



## Influence of the Process Parameters on Induced Residual Stress by Ultrasonic Needle Peening on Al6061 Alloy

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Lak M.<sup>1</sup> MSc,  
Sadough Vanini S.A.<sup>1\*</sup> PhD,  
Ghasemi A.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Lak M, Sadough Vanini S A, Ghasemi A. Influence of the Process Parameters on Induced Residual Stress by Ultrasonic Needle Peening on Al6061 Alloy. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(2):109-116

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

#### \*Correspondence

Address: Department of mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Hafez Street, Valiasr Square, Tehran, Tehran, Iran.

Phone: -

Fax: -

sadough@aut.ac.ir

#### Article History

Received: September 11, 2020

Accepted: December 26, 2020

ePublished: February 16, 2021

### ABSTRACT

Ultrasonic needle peening is a modern technique that enhances the surface properties of metallic components by imposing static and dynamic loadings. The efficiency of this technique dramatically is dependent on the process parameters. In this study, an experimental and numerical investigation on ultrasonic needle peening was carried out. The numerically predicted residual stress profile was verified using X-ray diffraction measurement of residual stress. A 3D finite element model of ultrasonic needle peening was simulated by ABAQUS software. Moreover, a parametric study was performed to investigate the effects of needle diameter, amplitude, device moving speed, and static force on residual stress distribution. In order to design experiments and determine the optimized process parameters of ultrasonic needle peening, Taguchi's method was implemented. Based on the results, needle diameter had the lowest impact on maximum compressive residual stress, and residual stress increases by increasing amplitude and reducing device moving speed. The maximum residual stress was achieved for the needle diameter of 4mm, the amplitude of 16 $\mu$ m, the device moving speed of 1.5cm/s, and the static force of 10N. For the optimum case, compressive residual stress was improved 24%.

**Keywords** Ultrasonic needle peening, Finite element, Optimization, Residual stress, Al6061alloy.

### CITATION LINKS

[1] A review of ultrasonic peening treatment. [2] Fatigue strength improvement for ship structures by Ultrasonic Peening. [3] Development of a new 3D model for the prediction of residual stress and fracture behaviour in Ti-6Al-4V after ultrasonic peening treatment. [4] Physics and mechanism of ultrasonic impact. [5] Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment. [6] Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models. [7] Modelling of ultrasonic impact treatment (UIT) of welded joints and its effect on fatigue strength. [8] Simulation of residual stress and fatigue strength of welded joints under the effects of ultrasonic impact treatment (UIT). [9] Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment. [10] Mechanical and electrochemical behaviors of butt-welded high temperature steel pipes. [11] Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. [12] The effect of ultrasonic peening on service life of the butt-welded high-temperature steel pipes. [13] Fatigue properties of welded Strenx 700 MC HSLA steel after ultrasonic impact treatment application. [14] Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. [15] X-ray diffraction residual stress techniques. [16] Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction. [17] Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement. [18] Standard Test Method for Determining the Effective Elastic Parameter for X-Ray Diffraction Measurements of Residual Stress. [19] Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP). [20] A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates. [21] Modeling large-strain, high-rate deformation in metals. [22] Montgomery, Design and analysis of experiments.

## بررسی اثر پارامترهای کنترلی فرآیند عملیات سطحی کوبش فراصوتی بر تنش‌های پسماند ایجادشده روی ورق آلومینیوم آلیاژی Al6061

مهدی لک MSc

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

سید علی صدوق ونینی Phd\*

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

علی قاسمی MSc

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### چکیده

عملیات سطحی کوبش فراصوتی (التراسونیک نیدل پینینگ) از روش‌های نوین قابل استفاده جهت تقویت سطوح قطعات فلزی در برابر بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. استفاده از این فرایند نیازمند انتخاب دقیق و بهینه پارامترهای عملکردی است. در پژوهش حاضر با استفاده از مطالعه عددی تأثیر پارامترهایی مانند: قطر پین (Needle)، دامنه، سرعت حرکت دستگاه و نیروی استاتیکی بر روی تنش پسماند ایجادشده روی ورق‌های آلومینیوم آلیاژی Al6061 بررسی شده است. با استفاده از دستگاه تفرق اشعه ایکس، تنش پسماند اندازه‌گیری شد. از روش لایه‌برداری الکتروشیمیایی جهت اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند در عمق نمونه استفاده گردید. مدل سه بعدی اجزاء محدود فرایند عملیات سطحی کوبش فراصوتی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تنش پسماند مدل اجزاء محدود ارائه شده اعتبارسنجی شد. سپس، پارامترهای مهم فرایند کوبش فراصوتی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود بررسی شد. جهت طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند از روش تاگوچی استفاده شد. بر اساس نتایج مشخص شد که قطر پین در مقایسه با پارامترهای دیگر تأثیر کمتری بر روی تنش پسماند فشاری بیشینه دارد و تنش پسماند با افزایش دامنه و کاهش سرعت حرکت ابزار افزایش می‌یابد. همچنین، در حالت انتخاب پارامترهای بهینه بیشینه تنش پسماند ۲۴٪ افزایش یافت.

**کلیدواژه‌ها:** کوبش فراصوتی، اجزاء محدود، بهینه‌سازی، تنش پسماند، آلومینیوم آلیاژی Al6061

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶

\*نویسنده مسئول: sadough@aut.ac.ir

### ۱- مقدمه

فرآیند عملیات سطحی کوبش فراصوتی یکی از موثرترین روش‌های عملیات سطحی مکانیکی است که اخیراً در صنایع مختلف مانند هوافضا، دریایی، راه‌آهن، سازه‌های فلزی و غیره به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این فرایند، نوسانات التراسونیک فرکانس بالا از طریق پین به سطح نمونه منتقل می‌شود. بر اثر این ضربات متوالی تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های سطحی نمونه ایجاد و منجر به ایجاد تنش پسماند،

کاهش اندازه دانه‌ها، اصلاح مشخصه‌های هندسی سطح و سایر اثرات می‌شود. تنش پسماند فشاری ایجادشده، باعث افزایش عمر خستگی قطعات می‌گردد. تنش‌های پسماند فشاری به دو دلیل باعث افزایش عمر قطعات فلزی می‌شوند. اولاً این تنش‌ها باعث بسته شدن ترک‌های ریز موجود در سطح قطعات می‌شود و رشد آن‌ها را به تأخیر می‌اندازد. دوماً وجود این تنش‌ها، باعث کاهش مقدار اندازه تنش ناشی از بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی اعمال شده بر نمونه می‌شود [1-3].

فرایند عملیات سطحی کوبش فراصوتی مزایای بسیاری دارد که می‌تواند به عنوان یک عملیات نهایی در ساخت قطعات مورد استفاده قرار گیرد. استاتیکوف و همکاران [4] نشان دادند که این فرایند T اثرات مثبتی بر روی توزیع تنش پسماند، بهبود ساختار کریستالی، سختی سطح، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش دارد. مطالعات زیادی پیرامون ماهیت این فرایند به صورت تحلیلی و عددی تا کنون صورت گرفته است. بررسی ماهیت این فرایند و پارامترهای کنترلی آن به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی توسط استاتیکوف [5] مطالعه شده است. در این تحقیق نشان داده شد که ضربات واردشده به سطح نمونه به وسیله امواج فراصوتی موجب انتشار موج‌های تنش فراصوتی در داخل نمونه و منجر به تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های سطحی نمونه می‌شود و تنش‌های پسماند کششی که در فرایند ساخت ایجاد شده است را کاهش می‌دهد. مدل‌های اجزاء محدودی نیز برای شبیه‌سازی و بررسی فرایند عملیات سطحی کوبش فراصوتی توسعه یافتند. یین و همکاران [3] یک مدل سه بعدی اجزاء محدود بر پایه برخورد-جدایش-برخورد را برای بررسی توزیع تنش پسماند در حین و پس از عملیات کوبش را توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه ایکس و مقایسه آن‌ها با نتایج اجزاء محدود مدل ارائه شده را اعتبارسنجی نمودند. همچنین، به بررسی تأثیر فاصله پین با سطح نمونه، پارامترهای مدل ماده جانسون-کوک و زمان کوبش پرداختند. ژو و همکاران [6] تأثیر سرعت اولیه پین، اندازه و شکل پین و فاصله بین ضربه دوم روی توزیع تنش پسماند را با استفاده از روش عددی مطالعه نمودند.

در دهه‌های اخیر، این فرایند به عنوان یک روش تنش‌زدایی و ایجاد تنش پسماند فشاری برای قطعات و سازه‌های جوشی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. توزیع مجدد تنش پسماند پس از عملیات سطحی کوبش فراصوتی در اتصالات جوشی توسط یوان و همکاران [7,8] بررسی شد. نتایج نشان داد که این فرایند تنش پسماند کششی ناشی از جوشکاری را به طور کامل از بین می‌برد و تنش پسماند فشاری در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. در مطالعات فریدونی و همکاران [9] از تکنیک کوبش فراصوتی به عنوان یک فرایند موثر برای افزایش عمر خستگی اتصالات جوشی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد وقتی میزان بارگذاری خستگی در حدود ۸۵ درصد حد تسلیم ماده

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- فرآیند کوبش فراسوئی

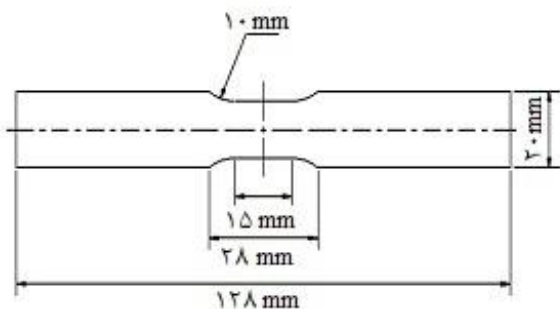
آلومینیوم آلیاژی سری ۶ هزار، دارای کاربردهای بسیاری در صنعت می‌باشند. این آلیاژها به دلیل سبکی و داشتن ضریب مقاومت بالا نسبت به وزن موارد استفاده بسیاری در صنایع هوایی، دریایی، معدنی و غیره دارند و مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد. برای اطمینان از صحت آلیاژ Al6061 خریداری شده که به صورت ورق با ضخامت ۵ میلی‌متر بود، آزمون کوانتومتری و تعیین ترکیب شیمیایی به روش اسپکترومتری نشری در شرایط محیط (دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۳۰٪)، توسط آزمایشگاه رازی انجام شد. ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی عناصر در جدول ۱ آورده شده است.

عملیات کوبش فراسوئی روی نمونه‌هایی با ابعاد ارائه شده در شکل ۱ انجام شد و سپس تنش پسماند در عمق، اندازه‌گیری شد. در فرآیند کوبش فراسوئی، امواج التراسونیک ایجاد شده به ترانسدیوسر منتقل شده و با تبدیل امواج التراسونیک به ارتعاش مکانیکی باعث ضربه زدن متوالی به سطح قطعه کار می‌شود. این ضربات مکانیکی باعث به وجود آمدن تغییر شکل پلاستیکی بر روی سطح قطعه و نهایتاً ایجاد تنش پسماند بر روی سطح و در عمق قطعه کار می‌شود. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ترانسدیوسر (۱)، امواج الکتریکی فرکانس بالا را از منبع تغذیه التراسونیک و به ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا تبدیل می‌کند، سپس در قسمت هورن (۲)، این امواج تشدید می‌شود و نهایتاً به پین (۳) منتقل می‌شود. پین با ضرباتی که به قطعه کار می‌زند موجب انتشار امواج التراسونیک و ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه کار می‌شود [4,14].

اجزا ابزار کوبش فراسوئی متشکل از: پین، هورن و ترانسدیوسر که تشکیل شده است از قطعه پشت بند از جنس St304، دو عدد پیژوالکتریک، سه عدد الکتروود از جنس مس آلیاژی، قطعه تمرکز دهنده از جنس Al 7075-T6 و یک عدد پیچ آلن گرید ۸/۸.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ Al6061

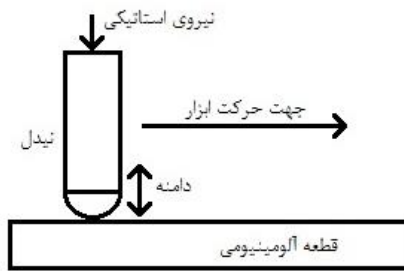
عنصر	Al	Mg	Si	Fe	Cr	Cu	Mn	Zn	Ti	V	Ni	Zr	B
در صد وزنی	۰/۹۲	۰/۶۲	۰/۳	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	
عناصر %	پایه												



شکل (۱) ابعاد نمونه عملیات شده

می‌باشد، فرآیند کوبش فراسوئی می‌تواند عمر خستگی را ۴۰ درصد افزایش دهد. در مطالعات داوری و همکاران [10-12]، تأثیر عملیات کوبش فراسوئی بر عمر خستگی لوله‌های فولادی A106-B جوشکاری شده مورد استفاده در صنایع گاز در محیط‌های خورنده بررسی شده است. این مطالعات نشان داده است که عمر خستگی لوله‌هایی که تحت این عملیات قرار گرفته‌اند، افزایش قابل‌توجهی داشته است. نتایج نشان داد که اعمال عملیات ضربه فراسوئی به ترتیب منجر به افزایش ۵۸ و ۹۹/۷ درصد عمر خستگی در شرایط معمول و در محیط خورنده شد. همچنین بر اساس نتایج آماری، اعمال عملیات ضربه فراسوئی منجر به افزایش ۱۴ درصدی استحکام خستگی اتمسفری در ۲۰۰۰۰ چرخه و افزایش ۱۹/۸ درصدی استحکام خستگی در محیط خورنده در ۲۰۰۰۰ چرخه می‌شود. علاوه بر این، افزایش ۳۰ درصدی سختی در محل پنجه جوش نیز مشاهده گردید. نوی و همکاران [13] اثر سه عامل مختلف موثر در عملیات کوبش فراسوئی بر خواص خستگی جوش فولاد کم آلیاژ استحکام بالا را بررسی کردند. در این تحقیق بر اساس اندازه‌گیری تنش پسماند، زیری سطح و عمر خستگی عوامل بهینه فرآیند کوبش فراسوئی تعیین شد. آن‌ها موفق شدند حد خستگی نمونه‌ها را ۱۲ درصد افزایش دهند.

به هر حال، مفاهیم اساسی فرآیند عملیات سطحی کوبش فراسوئی هنوز هم به عنوان یک مبحث چالش‌برانگیز مورد توجه محققین است. در مطالعات عددی سرعت حرکت پین، زاویه برخورد، جنس پین، دامنه نوسان پین، فرکانس مولد پالس و تعداد ضربات در یک ناحیه شبیه‌سازی و بررسی شده است. در مطالعات پیشین بیشتر محققین بر روی اثر ضربات به صورت تک و یا دو ضربه متمرکز بودند و این در حالی است که هدف نهایی فرآیند کوبش فراسوئی ایجاد تنش‌های پسماند بر روی سطح وسیعی از قطعه هدف می‌باشد. با توجه به اینکه در این روش سرعت برخورد و فرکانس ضربات بالا می‌باشد، شبیه‌سازی در حالت تک ضربه و دو ضربه از دقت خوبی برخوردار نخواهد بود. در هیچ‌کدام از مطالعات پیشین به صورت هدفمند و سازمان‌یافته اثر پارامتر سرعت حرکت دستگاه بر روی توزیع تنش پسماند بررسی نشده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند عملیات سطحی کوبش فراسوئی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. مدل اجزا محدود با استفاده از اندازه‌گیری آزمایشگاهی تنش پسماند با استفاده از روش پراش اشعه ایکس اعتبارسنجی شد. سپس با استفاده از این مدل، اثر پارامترهای کنترلی این فرآیند بررسی شده است. با استفاده از روش بهینه‌سازی پارامترهای بهینه فرآیند برای دستیابی به بیشترین مقدار تنش پسماند فشاری بدست آمد. طراحی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن ۴ پارامتر در ۳ سطح انجام شد. این پارامترها شامل قطر پین، دامنه نوسان، سرعت حرکت ابزار و همچنین نیروی استاتیکی می‌باشند.



شکل ۴) پین، دامنه نوسان، سرعت حرکت ابزار و نیروی استاتیکی



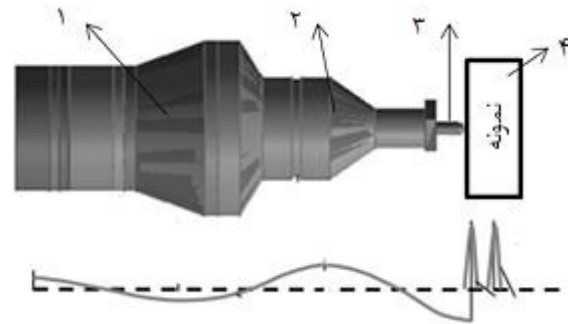
شکل ۵) نمایی از نمونه پس از عملیات سطحی کوبش فراصوتی

### ۲-۲- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش X-Ray

روش تفرق اشعه ایکس، یک روش غیر مخرب است که از آن می‌توان در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند ایجاد شده بر روی سطح استفاده نمود. در این روش در ابتدا زاویه مناسب پیک پراش اشعه X بر اساس تعدادی روبش تعیین می‌گردد. سپس سامانه در این زاویه ثابت شده و قطعه در زوایای مختلف  $\psi$  چرخیده می‌شود. در هر زاویه فاصله بین صفحات بلورین تعیین شده و سپس نموداری بر حسب سینوس زاویه  $\psi$  و فاصله بین صفحات بلورین رسم می‌گردد. با استفاده از این نمودار می‌توان تنش‌های پسماند ایجاد شده در سطح قطعه آلومینیومی را محاسبه نمود<sup>[15]</sup>. پس از به دست آوردن نمودار، لازم است خطی میانگین بر روی این نمودار رسم شده و با استفاده از شیب آن می‌توان مقدار تنش پسماند را محاسبه نمود. شیب مثبت خط نشان‌دهنده تنش‌های پسماند کششی و شیب منفی نشان‌دهنده تنش پسماند فشاری می‌باشد. جهت اندازه‌گیری تنش پسماند از دستگاه فیلیپس مدل PW 1730 استفاده گردید. ولتاژ، جریان، آند و فیلتر استفاده شده به ترتیب ۴۰ میلی ولت، ۳۰ میلی آمپر، کروم و نیکل می‌باشد.

در روش اندازه‌گیری تنش پسماند به وسیله X-Ray زاویه تابش اشعه تغییر کرده و منحنی شدت اشعه بر حسب زاویه رسم می‌گردد. پس از تعیین موقعیتی که در آن پیک پراش مشاهده می‌شود، زاویه تابش ثابت شده و سپس قطعه کار تحت زاویه  $\psi$  دوران می‌کند. در این پژوهش زاویه  $\psi$  از صفر تا ۲۶ درجه دوران داده شده است و در هر زاویه فاصله صفحات بلورین اندازه‌گیری شده است.

در شکل ۶ فاصله صفحات بلورین بر حسب  $\sin^2\psi$  نشان داده شده است. در این شکل یک خط میانگین از داده‌های آزمایشگاهی رسم شده است.



شکل ۲) اجزا ابزار کوبش فراصوتی (۱ ترنسدیوسر، ۲ هورن، ۳ پین، ۴ نمونه)

مولدهای امواج فرکانسی اغلب دارای فرکانسی بین ۲۰ تا ۵۵ کیلوهرتز می‌باشند<sup>[14]</sup>. در تجهیز استفاده شده در این پژوهش، فرکانس رزونانس ۲۸ کیلوهرتز و دامنه نوسان ۸ میکرومتر می‌باشد. فرکانس امواج تولیدی به نوع دستگاه وابسته بوده و این فرکانس تأثیر مستقیمی در سرعت پین، تعداد ضربات در هر ثانیه و غیره دارد. دامنه نوسان به تعداد پیزو الکتریک‌های موجود در دستگاه وابسته می‌باشد. پیزو الکتریک‌های استفاده شده در این پژوهش ۲ عدد بوده که هر کدام دارای دامنه نوسان ۴ میکرومتر می‌باشند. قطر پین استفاده شده و نیروی استاتیکی به ترتیب برابر ۵ میلی‌متر و ۱۰ نیوتون می‌باشد. در پژوهش حاضر پین و هورن نشان داده شده در شکل ۳ (الف) طراحی و ساخته شده است. پین در ابعاد مختلف طراحی و ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفت. هورن این دستگاه در ابتدا به نحوی مدل‌سازی می‌شود که بتواند در فرکانس کاری ۲۸ کیلوهرتز تشدید شود. سپس با استفاده از مدل موجود، هورن ساخته شد و به ترنسدیوسر متصل گردید. شکل ۳ (ب) نگره‌دارنده و نصب آن روی دستگاه را نشان می‌دهد.

پارامترهای کنترلی مهم در این فرآیند قطر پین، دامنه نوسان، سرعت حرکت ابزار و نیروی استاتیکی می‌باشند (شکل ۴). تغییر هر کدام از این پارامترها، می‌تواند باعث به وجود آمدن نتایج متفاوتی بر روی قطعه شود. این پارامترها می‌توانند بر روی میزان تنش پسماند ایجاد شده، عمق تنش پسماند بیشینه، میزان صافی سطح ایجاد شده و غیره موثر باشند. شکل ۵ تصویری از نمونه آزمایش، پس از عملیات سطحی کوبش فراصوتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳) ابزار کوبش فراصوتی و نگره‌دارنده (ب) نگره‌دارنده و اتصال ابزار کوبش فراصوتی روی دستگاه

(ب) نحوی المان بندی پین و نمونه را نشان می‌دهد. المان‌های نمونه از نوع آجری هشت گره‌ای با یک نقطه انتگرال‌گیری و آورکلاس کنترل (C3D8R) و المان‌های پین از نوع المان‌های دیسکریت صلب (R3D4) است. پس از آزمون همگرایی مش، اندازه‌ی المان‌های ناحیه بالای نمونه برابر با  $0.2 \times 0.2 \times 0.2$  میلی‌متر مکعب انتخاب شد. بیشینه سرعت اولیه پین از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [19].

$$v_{inimax} = 2\pi Af \quad (2)$$

که در آن  $A$  و  $f$  به ترتیب دامنه و فرکانس تحریک می‌باشند. در این تحقیق، دامنه و فرکانس به ترتیب برابر با  $8$  میکرومتر و  $28$  کیلوهرتز بود. بنابراین سرعت اولیه بیشینه برابر  $1/4$  متر بر ثانیه بدست می‌آید و بر روی نقطه مرجع در جهت  $Z$  اعمال می‌گردد. بین پرتابه‌ها و سطح نمونه از تماس سطح به سطح با الگوریتم تماسی پنالتی و ضریب اصطکاک  $0.2$  استفاده شد. جهت برخوردهای متوالی توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها از مدل قبلی به مدل بعدی به عنوان شرایط اولیه انتقال یافت و سپس، پین به سطح نمونه برخورد می‌نمود.

در این شبیه‌سازی از مدل ماده جانسون کوک [20] برای تعریف رفتار پلاستیک ماده استفاده شده است (معادله ۳).

$$\sigma = [A + B(\epsilon)^n][1 + C \ln(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})][1 - (\frac{T - T_0}{T_m - T_0})^m] \quad (3)$$

که در آن ضرایب  $A, B, C, n$  و  $m$  ثابت‌های معادله جانسون کوک است و از آزمایش بدست می‌آید.  $\epsilon_0$  برابر با  $1 s^{-1}$  در نظر گرفته می‌شود. ضرایب جانسون-کوک برای آلیاژ Al6061 در جدول ۲ ذکر شده است. از اثرات حرارتی نیز چشم‌پوشی شده است.

#### ۴- کاربرد سازی

##### ۴-۱- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

شکل ۸ کانتور تنش پس از برخورد پین و جدایش از سطح نمونه را نشان می‌دهد. به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، مقادیر تنش پسماند اندازه‌گیری شده به روش پراش اشعه ایکس و نتایج عددی مقایسه شدند.

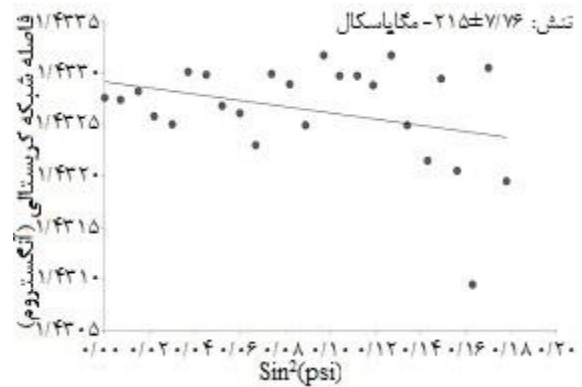
در شکل ۹ نتایج توزیع تنش پسماند در عمق نمونه حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، تطابق مناسبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. بنابراین پارامترهای دیگر با استفاده از مدل اجزاء محدود ارائه شده ارزیابی شدند.

##### ۴-۲- بهینه‌سازی فرآیند کوبش فراصوتی

مدل سه بعدی پس از اعتبارسنجی و تأیید، به منظور بهینه‌سازی و یافتن تنش پسماند فشاری بیشینه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲) پارامترهای جانسون-کوک برای آلیاژ آلومینیوم [21].

A(MPa)	B(MPa)	C	m	n
۳۲۴/۱	۱۱۳/۸	۰/۰۰۲	۱/۳۴	۰/۴۲



شکل ۶) نمودار فاصله صفحات بلورین بر حسب  $\sin^2\psi$

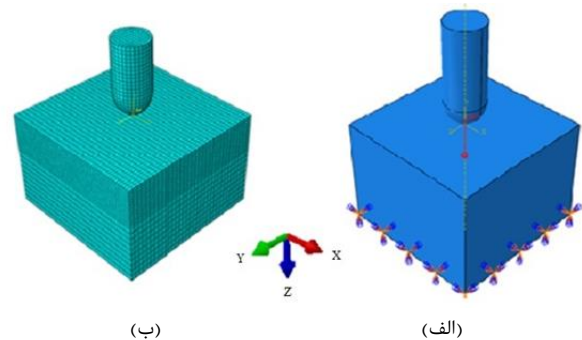
با استفاده از معادله ۱ می‌توان میزان تنش پسماند را محاسبه نمود.

$$\sigma = \frac{m}{d_0} \left( \frac{E}{1+\nu} \right) \quad (1)$$

در این معادله  $m$  شیب خط در نمودار فاصله صفحات بلورین بر حسب  $\sin^2\psi$ ،  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون و  $d_0$  فاصله اولیه بین صفحات بلورین است [15-18]. با استفاده از لایه‌برداری به روش الکتروشیمیایی، تنش پسماند در عمق‌های  $100$ ،  $200$ ،  $500$ ،  $1000$  و  $1500$  میکرومتر اندازه‌گیری شد.

#### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود باهدف بهینه‌سازی

مدل سه بعدی فرآیند عملیات سطحی کوبش فراصوتی برای بررسی پارامترهای موثر در فرآیند، شامل قطر، نیروی استاتیکی، سرعت حرکت ابزار و برخوردهای متوالی ایجاد شد. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS/Explicit استفاده شده است. نمونه به صورت یک مکعب با ابعاد  $10 \times 10 \times 35$  میلی‌متر مدل شد. این ابعاد به گونه‌ای انتخاب گردید که تأثیری بر روی نتایج نداشته باشد و به عبارت دیگر به اندازه‌ی کافی بزرگ بود. پین به صورت یک جسم صلب با قطر  $5$  میلی‌متر مدل شد. مطابق شکل ۷ (الف) کف نمونه در تمام جهات و نقطه مرجع پین نیز به جز جهت  $Z$  در تمام جهات مقید شد. همچنین جرم پین روی نقطه مرجع تعریف گردید. بنابراین در شبیه‌سازی، ارتفاع پین معنایی ندارد. شکل ۷- (ب)



شکل ۷) مدل اجزا محدود پین و نمونه: (الف) نمای از پین و نمونه به همراه نقطه مرجع و شرایط مرزی، (ب) نمای از نحوی مش‌بندی پین و نمونه

جدول ۳) پارامترهای اساسی در فرآیند کوبش فراصوتی و مقادیر آنها

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
قطر پین (میلی‌متر)	۳	۴	۵
دامنه نوسان (میکرومتر)	۸	۱۲	۱۶
سرعت حرکت ابزار (سانتی‌متر بر ثانیه)	۲/۵	۲	۱/۵
نیروی استاتیکی (نیوتن)	۵	۱۰	۲۰

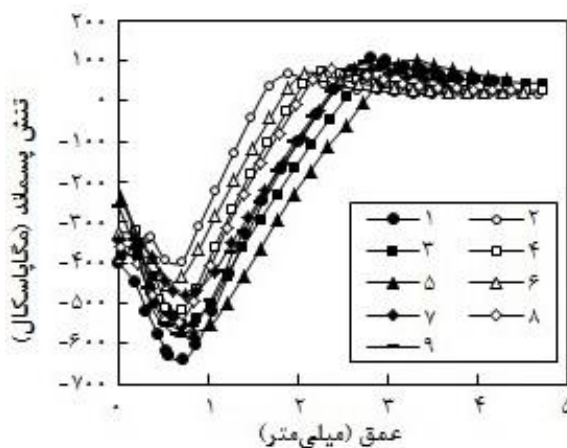
۵- نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای مختلف حاصل از طراحی آزمایش‌ها با روش تاگوچی و تنش‌های پسماند بدست آمده از اجزای محدود در جدول ۴ ارائه شده است.

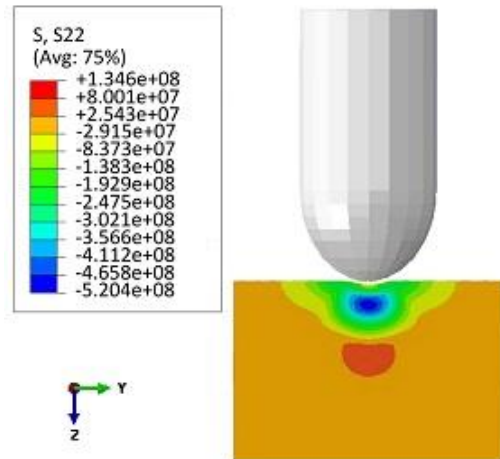
همچنین، توزیع تنش پسماند برای ۹ حالت شبیه‌سازی پیشنهادی بوسیله روش تاگوچی در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر پارامترهای کنترلی، میزان تنش پسماند فشاری بر روی سطح، بیشینه تنش فشاری در عمق و همچنین عمق بیشینه تنش فشاری تغییر می‌کند. به منظور دسترسی به بهینه‌ترین حالت، لازم است پارامترهای کنترلی به درستی انتخاب شوند.

جدول ۴) مقادیر پارامترهای مختلف در هر شبیه‌سازی و تنش‌های پسماند مرتبط

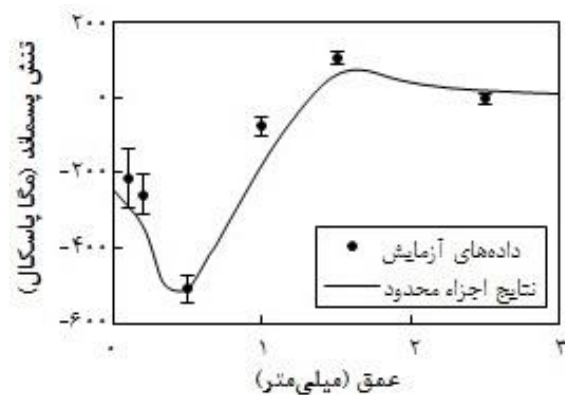
شماره شبیه‌سازی	قطر پین (میلی‌متر)	دامنه (میکرومتر)	سرعت پین (سانتی‌متر بر ثانیه)	نیروی استاتیکی (نیوتن)	بیشینه تنش پسماند ایجاد شده (MPa)
۱	۳	۸	۲/۵	۵	-۳۸۷
۲	۳	۱۲	۲	۱۰	-۵۳۴
۳	۳	۱۶	۱/۵	۱۰	-۶۳۲
۴	۴	۸	۲	۲۰	-۴۶۱
۵	۴	۱۲	۱/۵	۵	-۵۷۶
۶	۴	۱۶	۲/۵	۱۰	-۵۴۰
۷	۵	۸	۱/۵	۱۰	-۵۰۴
۸	۵	۱۲	۲/۵	۲۰	-۴۷۰
۹	۵	۱۶	۲	۵	-۵۶۲



شکل ۱۰) توزیع تنش پسماند استخراج شده از مدل‌های اجزا محدود مطابق با شماره شبیه‌سازی‌های جدول ۴



شکل ۸) کانتور تنش پسماند پس از برخورد پین با سطح نمونه



شکل ۹) توزیع تنش‌های پسماند در نمونه پس از کوبش فراصوتی (نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی)

چهار پارامتر در فرآیند کوبش فراصوتی در سه سطح بررسی شده است. هرچه قطر پین بزرگ‌تر شود، انرژی جنبشی پین نیز افزایش پیدا می‌کند<sup>[۶]</sup>. افزایش سرعت حرکت تفنگ، باعث کاهش هم پوشانی ضربات کنار هم می‌شود و در نتیجه باعث کاهش توزیع تنش پسماند در لایه‌های نزدیک سطح نمونه می‌شود. افزایش دامنه نوسان پین باعث افزایش سرعت پین و در پی آن افزایش تغییر شکل پلاستیک در سطح قطعه هدف و افزایش تنش پسماند می‌گردد<sup>[۶]</sup>. افزایش نیروی استاتیکی باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه افزایش تنش پسماند ایجاد شده می‌گردد. روش تاگوچی با استفاده از روش آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در زمانی که تعداد پارامترها و سطوح آنها زیاد می‌باشد را بسیار کاهش می‌دهد<sup>[۲۲]</sup>. برای هر پارامتر در سطح دلخواه، لازم است مابقی پارامترها در تمام سطوح خود لااقل یک‌بار دیگر تکرار گردند. از یک ماتریس L9 بر اساس روش تاگوچی برای طراحی آزمایش استفاده شده است. پارامترهایی که در شبیه‌سازی‌های مختلف بر اساس طراحی آزمایش تغییر کرده‌اند در جدول ۳ ارائه شده است.

فاکتور	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
مقدار	244/9	8/99%	33/98%	56/91%

تغییرات پارامتر متغیر، وابسته به پارامتر متغیر مستقل موجود می باشد و چه میزان از تغییرات پارامتر متغیر، وابسته به مابقی عوامل (خطاها) خواهد بود.

پارامترهای بهینه در شرایطی که بیشینه تنش پسماند ایجاد شود، در جدول ۷ ارائه شده است. در حالت بهینه برابر میزان تنش پسماند فشاری ۶۴۲- مگاپاسکال بدست آمد که ۲۴٪ از مقدار متوسط تنش پسماند فشاری محاسبه شده (۵۱۸- مگاپاسکال) بیشتر است.

فاکتور	مقدار	تنش پسماند بیشینه
قطر پین (میلی متر)	5	
دامنه (میکرومتر)	16	
سرعت حرکت ابزار (میلی متر بر ثانیه)	15	-۶۴۲ MPa
نیروی استاتیکی (نیوتون)	10	

#### ۶- نتیجه گیری

بررسی عددی و آزمایشگاهی فرآیند عملیات سطحی کوبش فراسازی بر روی آلومینیوم آلیاژی Al6061 انجام شد. تأثیر مهم ترین پارامترهای کنترلی فرآیند شامل قطر پین، دامنه، سرعت حرکت ابزار و نیروی استاتیکی بر روی توزیع تنش پسماند در عمق نمونه با استفاده از اجزا محدود بررسی شد. تطابق بسیار خوبی مابین اندازه گیری توزیع تنش پسماند در عمق نمونه با استفاده از روش پراش اشعه ایکس و نتایج عددی بدست آمد. همچنین با استفاده از روش تاگوچی طراحی آزمایش ها و یافتن پارامترهای کنترلی بهینه انجام شد. مهم ترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- قطر پین در مقایسه با پارامترهای دیگر تأثیر کمتری بر روی تنش پسماند فشاری بیشینه داشت.
- تنش پسماند با افزایش دامنه و کاهش سرعت حرکت ابزار افزایش یافت.
- با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای کنترلی بهینه بدین صورت بدست آمد: قطر پین ۵ میلی متر، دامنه نوسان ۱۶ میکرومتر، سرعت حرکت ابزار ۱۵ میلی متر بر ثانیه و نیروی استاتیکی ۱۰ نیوتون، در این حالت میزان تنش پسماند فشاری ۶۴۲- مگاپاسکال بدست آمد که ۲۴٪ از مقدار متوسط تنش پسماند فشاری محاسبه شده (۵۱۸- مگاپاسکال) بیشتر است.

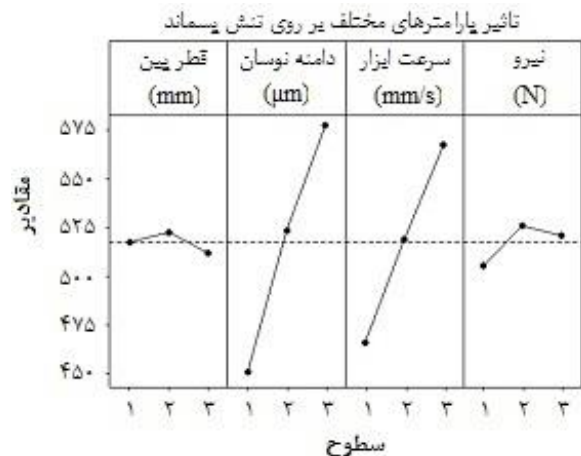
**تشکر و قدردانی:** از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمایشگاه های مربوطه قدردانی می شود.

نتایج بیشینه تنش پسماند ایجاد شده در هر حالت شبیه سازی در ستون آخر جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به اینکه تنش های پسماند فشاری یک عامل بسیار مهم و تأثیرگذار در عمر خستگی فلزات می باشد، هرچه میزان بیشتری داشته باشد، مفید تر بوده و باعث افزایش عمر قطعه در برابر خستگی می شود.

متوسط مقدار تنش پسماند حاصل از شبیه سازی ها در جدول ۴ برابر ۵۱۸- مگا پاسکال می باشد. جهت یافتن تنش پسماند فشاری بیشینه از روش تاگوچی استفاده گردید. اثر پارامترهای مختلف از قبیل قطر پین، دامنه، سرعت حرکت ابزار و نیروی استاتیکی بر روی تنش پسماند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تنش پسماند با افزایش دامنه و کاهش سرعت حرکت ابزار افزایش می یابد.

در فرآیند بهینه سازی از روش ANOVA استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، تأثیر پارامتر قطر پین در مقایسه با پارامترهای دیگر کمتر است. تأثیر مابقی پارامترها و مقادیر آنها در تحلیل آماری در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول Adj SS تنظیم جمع مربعات، Adj MS نسبت مجموع مجذور انحرافات بر درجه آزادی هر فاکتور، F-Value نسبت میانگین مربع انحراف هر فاکتور بر میانگین مربع انحراف خطا و P-Value مقدار احتمال می باشد. همان طور که از نتایج مشخص می باشد، پارامترهای دامنه نوسان و همچنین سرعت حرکت ابزار بیش ترین تأثیر را بر روی توزیع تنش پسماند دارند.

همان طور که در جدول ۶ مشاهده می شود، مقدار R-sq (adj) برابر ۹۸/۳۳ درصد می باشد که نشان دهنده انتخاب مدل مناسب برای بهینه سازی است. فاکتور R-sq در واقع نشان می دهد چه میزان از



شکل ۱۱) تأثیر پارامترهای مختلف بر روی تنش پسماند

جدول ۵) مقادیر پارامترها در تحلیل به روش ANOVA

پارامتر	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
دامنه (میکرومتر)	۲	۲۴۴۹۴/۹	۱۲۲۴۷/۴	۱۴۳/۳۴	۰/۰۰۷
سرعت حرکت ابزار (سانتی متر بر ثانیه)	۲	۱۵۶۱۶/۹	۷۸۰۸/۴	۹۱/۳۹	۰/۰۱۱
نیروی استاتیکی (نیوتون)	۲	۶۹۷/۶	۳۴۸/۸	۴/۰۸	۰/۱۹۷

- 13- Nový F, Petrů M, Trško L, Jambor M, Bokůvka O, Lago J. Fatigue properties of welded Strenx 700 MC HSLA steel after ultrasonic impact treatment application. *Materials Today: Proceedings*. 2020;32:174-8.
- 14- Abdullah A, Malaki M, Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. *Materials & Design*. 2012;38:7-18.
- 15- Prevey PS. X-ray diffraction residual stress techniques. ASM International, *ASM Handbook*. 1986;10:380-92.
- 16- Fitzpatrick ME, Fry AT, Holdway P, Kandil FA, Shackleton J, Suominen L. Determination of residual stresses by X-ray diffraction. 2005.
- 17- Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement, 03.01, E 915, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1984: 809-812.
- 18- Standard Test Method for Determining the Effective Elastic Parameter for X-Ray Diffraction Measurements of Residual Stress, ASTM E1426-98, American Society for Testing And Materials, 2009:5.
- 19- Chaise T, Li J, Nélias D, Kubler R, Taheri S, Douchet G, Robin V, Gilles P. Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP). *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(10):2080-90.
- 20- Johnson GR. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics*. 1983:541-7.
- 21- Lesuer DR, Kay GJ, LeBlanc MM. Modeling large-strain, high-rate deformation in metals. Lawrence Livermore National Lab., CA (US); 2001:3-5.
- 22- Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John Wiley & sons; 2017.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان تعهد می‌نمایند که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه، در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و ارسال نخواهد شد.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

**سه‌م نویسندگان:** مهدی لک (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی، (۴۰٪)؛ سید علی صدوق ونینی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ علی قاسمی (نویسنده سوم)، پژوهشگر فرعی، (۳۰٪)؛

**منابع مالی:** هزینه‌ها توسط دانشگاه صنعتی امیرکبیر تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*. 2015;87:1072-86.
- 2- Deguchi T, Mouri M, Hara J, Kano D, Shimoda T, Inamura F, Fukuoka T, Koshio K. Fatigue strength improvement for ship structures by Ultrasonic Peening. *Journal of marine science and technology*. 2012;17(3):360-9.
- 3- Yin D, Wang D, Li W, Li X, Zhang H, Naher S. Development of a new 3D model for the prediction of residual stress and fracture behaviour in Ti-6Al-4V after ultrasonic peening treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;247:29-39.
- 4- Statnikov ES, Korolkov OV, Vityazev VN. Physics and mechanism of ultrasonic impact. *Ultrasonics*. 2006 ;44:e533-8.
- 5- Statnikov E. Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment. *IIW Document*. 2004;13:2004-04.
- 6- Guo C, Wang Z, Wang D, Hu S. Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models. *Applied Surface Science*. 2015;347:596-601.
- 7- Yuan KL, Sumi Y. Modelling of ultrasonic impact treatment (UIT) of welded joints and its effect on fatigue strength. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015;9(34).
- 8- Yuan K, Sumi Y. Simulation of residual stress and fatigue strength of welded joints under the effects of ultrasonic impact treatment (UIT). *International Journal of Fatigue*. 2016;92:321-32.
- 9- Fereidooni B, Morovvati MR, Sadough-Vanini SA. Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment. *Ultrasonics*. 2018;88:137-47.
- 10- Daavari M, Vanini SA, Fereiduni E, Rokni MH. Mechanical and electrochemical behaviors of butt-welded high temperature steel pipes. *Engineering Failure Analysis*. 2016;62:287-99.
- 11- Daavari M, Vanini SS. Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. *Materials Letters*. 2015;139:462-6.
- 12- Daavari M, Vanini SA. The effect of ultrasonic peening on service life of the butt-welded high-temperature steel pipes. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(9):3658-65.