



## Exergy Analysis of A36 Mild Steel Welding Process and Investigation of Hammering, Parallel Heating and Vibration Method on Residual Stress Reduction

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mamourian M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Naghedifar S.A.<sup>1</sup> MSc,  
Mohammadi Neyshaburi M.<sup>2</sup> MSc

#### How to cite this article

Mamourian M, Naghedifar S.A, Mohammadi Neyshaburi M. Exergy Analysis of A36 Mild Steel Welding Process and Investigation of Hammering, Parallel Heating and Vibration Method on Residual Stress Reduction. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(8):1979-1989.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Aerospace Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Phone: -

Fax: -

mamourian@um.ac.ir

#### Article History

Received: October 15, 2018

Accepted: May 4, 2020

ePublished: August 15, 2020

### ABSTRACT

Residual stress is one of the most substantial defects of welded parts caused by intensive thermal gradient. In this study, different mechanical and thermal techniques for reducing residual stresses have been investigated and the effectiveness of contributing parameters has been discussed afterwards. Subsequently, some equations have been proposed for welding energy and exergy efficiency and the effects of parallel flame heating, vibration method, and hammer working method on reducing welding residual stresses are expressed. The results show that by using parallel heating technique, the enhancement of flame power would result in reducing both energy and exergy efficiencies. However, the decremental rate of the two efficiencies would slow down and they approach to an asymptotic value. Increasing the speed of welding improves two efficiencies more than 2 times. On the other hand, the normalized entropy is reduced by increasing the heat input of the flames. This fact is an indicator of a reduction in welding residual stress. This reduction is more at high speeds. Eventually, the ratio of the two efficiencies shows that in this study, economical power was about 1800j/s. The reduction of normalized entropy for the vibration, hammering, and parallel flame methods are 0.001, 0.1, and 10, respectively. Overall, it is expected that thermal methods are more efficient than mechanical methods in reducing residual stresses.

**Keywords** Welding Residual Stress; Exergy; Hammering; Parallel Heating; Vibration Method

### CITATION LINKS

[1] Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds [2] Thermal and stress analysis of a sheet metal in welding [3] Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint [4] Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation [5] A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel [6] Reduction of residual stresses induced by welding in monel alloy, using parallel heat welding [7] Theory of thermomechanical processes in welding [8] Entropy generation rate during laser pulse heating: Effect of laser pulse parameters on entropy generation rate [9] Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment [10] Thermodynamics and transport properties of metal/inert-gas mixtures used for arc welding [11] Entropy generation in Marangoni convection flow of heated fluid in an open ended cavity [12] Influence of heat-input on mechanical behavior and phase balance of 2304 duplex stainless steel resistance spot welds [13] Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes [14] Friction stir vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint [15] Laser welding: the first and second law analysis [16] GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding [17] Simulation of welding distortions in ship section [18] Conduction of heat in solids [19] Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting [20] The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress [21] Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds [22] Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates [23] Investigation of residual stress of arc welding by finite element method [24] Handbook of Welding and Joints in Steel Buildings [25] Vibratory stress relief-an investigation of the underlying processes

## تحلیل انرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نرمه A36 و بررسی روش‌های چکش‌کاری، گرمایش موازی و روش ارتعاشی جهت کاهش تنش‌های پسماند

مجتبی ماموریان\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سیدعلی ناقدی فر MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

منا محمدی‌نیشابوری MSc

گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

یکی از مهم‌ترین عیوب قطعات جوشکاری شده که در اثر گرا دیان‌های شدید گرمایی ایجاد می‌شود، تنش‌های پسماند است. در این تحقیق روش‌های مختلف مکانیکی و حرارتی جهت کاهش تنش‌های پسماند بررسی شده و پارامترهای مختلف موثر مورد بحث قرار گرفته است. در همین راستا، روابطی برای بازده انرژی و انرژی برای جوشکاری ارائه شده و سپس تاثیرات گرمایش شعله‌های موازی، روش ارتعاشی و روش چکش‌کاری بر کاهش تنش‌های پسماند جوشکاری به کمک این دو بازده بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که در روش گرمایش موازی، با افزایش توان شعله‌ها، هر دو بازده انرژی و انرژی کاهش یافته اما از روند کاهشی این دو بازده، به مرور کاسته می‌شود و به مقدار صفر میل می‌کند. افزایش سرعت جوشکاری نیز هر دو بازده را تا بیش از ۲ برابر افزایش می‌دهد. از طرفی آنتروپی بی‌بعدشده با افزایش گرمای ورودی شعله‌ها، کاهش می‌یابد که نشان از کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری است. این کاهش در سرعت‌های بالاتر، بیشتر است. همچنین نسبت دو بازده نشان می‌دهد که در این بررسی، توان حدود ۸۰۰ ژول بر ثانیه، مقداری بهینه از نظر اقتصادی خواهد بود. مرتبه کاهش تولید آنتروپی بی‌بعدشده برای روش ارتعاشی ۰/۰۱، روش چکش‌کاری ۰/۱ و روش شعله موازی ۱۰ است. می‌توان انتظار داشت روش‌های گرمایشی کارایی بیشتری نسبت به روش‌های مکانیکی در کاهش تنش‌های پسماند دارا هستند.

**کلیدواژه‌ها:** تنش‌های پسماند جوشکاری، انرژی، چکش‌کاری، گرمایش موازی، روش ارتعاشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۵

\*نویسنده مسئول: mamourian@um.ac.ir

### مقدمه

پژوهش‌های صورت گرفته در راستای افزایش کیفیت فرآیند جوشکاری نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل در میزان تنش‌های پسماند، مشخصه‌های شعله جوش و گرا دیان‌های دمایی ایجادشده بر روی قطعه است. از این‌رو، مطالعات متعددی پیرامون تأثیرات توزیع دما و شکل حوضچه مذاب قطعه بر میزان تنش‌های پسماند جوشکاری صورت گرفته است. در پژوهشی تأثیر سرعت گرمایش قطعه را بر میزان تنش‌های پسماند جوشکاری، به روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند و اثبات کردند که افزایش سرعت

سرمایش، موجب افزایش تنش‌های پسماند می‌شود[1]. گرا دیان‌های دمایی تأثیر چندانی بر تنش پسماند عرضی ندارند[2]. در تحقیقی دیگر مدل‌های مختلفی از شار حرارتی را برای شبیه‌سازی شعله جوش استفاده کردند و تأثیر هر یک را بر میزان تنش‌های پسماند ایجادشده مورد مطالعه قرار دادند[3]. در همین راستا روش‌های متعددی برای کاهش گرا دیان‌های دمایی و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری ارائه شده است. از جمله تکنولوژی چاه گرمایی برای ایجاد تغییرات مورد نظر در تعیین گرا دیان‌های گرمایی نوار جوش بهره بردند و بدین وسیله توانستند میزان تنش‌های پسماند را تا ۲۰٪ کاهش دهند[4]. روش دیگری که ارائه شده، استفاده از دو شعله متحرک بوده که به موازات شعله جوش حرکت می‌کنند. این روش نخستین بار توسط لین و جو ارائه شد[5]. وی از طریق نتایج تجربی نشان داد که با استفاده از گرمایش موازی، می‌توان تنش‌های پسماند را ۲۱ تا ۳۲٪ کاهش داد. محققان از طریق روش سوراخ‌کاری نشان دادند که با به‌کارگیری روش مورد بحث در جوشکاری برخی قطعات، می‌توان تا حدود ۷۰٪ تنش‌های ون- میزز را کاهش داد[6].

بحث از ترمودینامیک جوشکاری به منظور افزایش کیفیت جوش، در چند سال اخیر مطرح شده است[7]. تأثیر پارامترهای پالس لیزر جوشکاری بر نرخ تولید آنتروپی مورد مطالعه قرار گرفته است[8]. ارتباط میان بازگشت‌ناپذیری (تولید آنتروپی) و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، توسط محققانی دیگر ارائه شده است[9]. با استفاده از رابطه تولید آنتروپی برحسب توزیع دما، تأثیر توالی جوش بر میزان تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت[10, 11]. اما در پژوهش حاضر، روابط تحلیلی بازده انرژی و بازده انرژی برای جوشکاری قوسی نوشته شده و تأثیر گرمایش موازی و سرعت جوشکاری بر مقدار هر یک از بازده‌های فوق بررسی شده است و نهایتاً تغییرات اختلاف این دو بازده در اثر گرمایش موازی و سرعت جوشکاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. اختلاف این دو بازده، در اثر بازگشت‌ناپذیری فرآیند جوش یا همان تولید آنتروپی در خلال پروسه جوشکاری است و چون مهم‌ترین دلیل بازگشت‌ناپذیری فرآیند، تنش‌های پسماند است لذا تغییرات اختلاف دو بازده در اثر گرمایش موازی، می‌تواند بیانگر تغییرات تنش‌های پسماند قطعات باشد. همچنین پارامتری به صورت نسبت دو بازده معرفی شده و نشان داده شده که به کمک این پارامتر، می‌توان گرمایش بهینه برای مساله را تعیین نمود.

محققان اثرات حرارت ورودی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر ریزساختار و رفتار مکانیکی جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن دوپلکس ۲۳۰۴ را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند هر چقدر سرعت سرد شدن در جوشکاری مقاومتی بیشتر باشد، تعادل فاز فریت- آستنیت در منطقه ذوب از بین می‌رود. همچنین هر چقدر جریان جوشکاری افزایش پیدا کند، ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش بهبود پیدا می‌کند[12]. بررسی اثر پیش‌گرمایش بر روی تنش‌های پسماند در جوشکاری تعمیراتی

افزایش دمای گرهی هستند. نهایتاً معادله اصلی المان محدود به صورت معادله زیر خواهد بود:

$${}^{M+1}K_1\{\Delta U_e\} - {}^{M+1}K_2\{\Delta T_e\} = \{\Delta R\} \quad (6)$$

که در آن

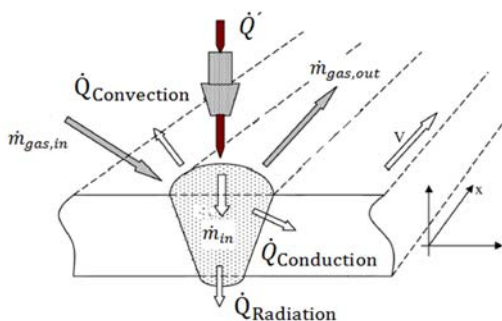
$${}^{M+1}K_1 = \int_v^1 [B]^T \{Dep\} [B] dV$$

$${}^{M+1}K_2 = \int_v^1 [B]^T \{C^{th}\} [M] dV \quad (7)$$

$\{R\} = \int_v^1 [N]^T \{P\} dA + \int_v^1 [N]^T \{f\} dV$   
 که در آن  $P, N, f$  به ترتیب تابع شکل المان، بردار نیروی سطحی و بردار نیروی حجمی هستند. نهایتاً به کمک رابطه ۶ مقدار تغییر مکان گرهی  $U_e$  محاسبه شده و از رابطه ۵ تنش نهایی به دست می‌آید.

### محاسبات بازده و انرژی

فرآیندهای انتقال حرارت و انتقال جرم در طی جوشکاری قوسی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، مقداری از انرژی تولیدشده در اثر جریان الکتریکی، به وسیله سه مکانیزم هدایت، جابه‌جایی و تشعشع اتلاف شده، قسمت اعظم آن موجب تولید فلز نوار جوش شده و مقدار اندکی نیز صرف تبخیر فلز می‌شود. در این مساله، قطعه در دمای اولیه  $T_{pr}$  قرار دارد که دمای اولیه باند جوش است. چنان چه باند جوش به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شود، انرژی از طریق شعله وارد حجم کنترل شده که موجب بالارفتن دما و نهایتاً ذوب آن می‌شود در حالی که دمای نواحی دورتر تقریباً برابر دمای اولیه قطعه فرض می‌شود. سپس، فلز ذوب‌شده به مرور منجمد می‌شود و گرمای خود را از طریق مکانیزم‌های هدایت حرارتی، تشعشع و جابه‌جایی حرارتی از دست می‌دهد. سرمایش تا دمای اولیه قطعه ادامه می‌یابد که نقطه نهایی بررسی مساله است. در این حالت فرض می‌شود دمای قطعه به صورت یکنواخت و برابر  $T_{pr}$  باشد.



شکل ۱) انتقال جرم و حرارت صورت گرفته در طی فرآیند جوشکاری [15]

بازده انرژی برای جوشکاری به فرم زیر تعریف می‌شود [15]:

$$\eta_I = \frac{\text{انرژی لازم برای تولید باند جوشکاری}}{\text{کل انرژی ورودی}} = \frac{\dot{m}_{bond} (h_b - h_{in})}{\dot{Q}} \quad (8)$$

که در آن  $\dot{m}_{bond}$ ،  $h_b$  و  $h_{in}$  به ترتیب نرخ تغییر جرم نوار جوش، آنتالپی ویژه باند و آنتالپی ویژه ورودی به سیستم (نوار جوش) بوده و  $\dot{Q} = \dot{Q}_{conduction} + \dot{Q}_{convection} + \dot{Q}_{radiation} +$  از جرم فلز تبخیرشده می‌توان صرف

لوله‌های فولادی نشان داد هر چقدر دما افزایش پیدا کند تنش‌های پسماند محوری کششی هم در سطح خارجی و هم در سطح داخلی کاهش پیدا می‌کند اما در سطح خارجی تنش‌های فشاری تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین اثر پیش‌گرمایش بر اندازه و توزیع تنش پسماند محیطی در سطح داخلی لوله تأثیر به‌سزایی ندارد. در دماهای پیش‌گرم بالا نیز تأثیر تنش‌های پسماند محوری بیشتر می‌شوند [13]. بررسی اثرات پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی بر ریزساختار آلیاژ آلومینیوم نشان داد اندازه دانه ناحیه جوش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی ۳۰٪ از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کوچک‌تر است. همچنین اندازه دانه ناحیه جوش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عواملی همچون سرعت چرخش، سرعت ابزار بستگی دارد و در نهایت با توجه به مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، استفاده از آن برای صنایع توصیه می‌شود [14].

در این پژوهش به کمک نرم‌افزار ANSYS Fluent و روابط ترمودینامیک به تحلیل انرژی فرآیند جوشکاری در فولاد نمره A36 پرداخته خواهد شد. در این راستا، روش‌های چکش‌کاری، گرمایش موازی و روش ارتعاشی بر کاهش تنش‌های پسماند مطالعه می‌شود.

### فیزیک و روابط حاکم مساله

#### روابط روش المان محدود

معادله هدایت حرارتی مورد استفاده به شکل زیر است:

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x}\left(k(T)\frac{\delta T}{\delta x}\right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(k(T)\frac{\delta T}{\delta y}\right) + \frac{\delta}{\delta z}\left(k(T)\frac{\delta T}{\delta z}\right) + Q \quad (1)$$

که در آن  $Q$ ،  $c_p$  و  $\rho$  به ترتیب نرخ گرمای تولیدی حجمی، ظرفیت گرمایی و چگالی قطعه هستند. شرایط مرزی معادله مورد بحث به شکل زیر است:

$$q_c = h_r(T^4 - T_{\infty}^4)$$

$$q_r = h_r(T^4 - T_{\infty}^4) \quad (2)$$

که در آن  $q_c$ ،  $q_r$ ،  $h$  و  $h_r$  به ترتیب گرمای مبادله‌شده در اثر جابه‌جایی و تشعشع، ضریب جابه‌جایی و ضریب تشعشع هستند. فرم المان محدود معادله هدایت به شکل زیر است:

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} + \{L\}^T \{q\} = Q \quad (3)$$

که در آن  $\{L\}$  ماتریس عملگر دیفرانسیل است. معادله تعادل به شکل زیر است:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (4)$$

که در آن  $f$  بردار نیروی حجمی و  $\sigma$  تانسور تنش است. معادله الاستو-پلاستیک مورد استفاده نیز به شکل زیر است:

$$\{\Delta \sigma_e\} = \{D^{ep}\} [B] \{\Delta U_e\} - \{C^{th}\} [M] \{\Delta T_e\} \quad (5)$$

که در آن  $\{D^{ep}\}$ ،  $[B]$ ،  $\{\Delta U_e\}$ ،  $\{C^{th}\}$ ،  $[M]$ ،  $\{\Delta T_e\}$  به ترتیب ماتریس نمو تنش گرهی، مجموع ماتریس سختی پلاستیک و الاستیک، ماتریس کرنش-تغییر مکان، بردار تغییر مکان گرهی، ماتریس سختی گرمایی، تابع شکل دما و ماتریس

$$\eta_I = \frac{\dot{m}_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m]}{\dot{Q}} \quad (9)$$

$$= \frac{\dot{m}_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m]}{UI}$$

که در رابطه فوق،  $C_{P(solid)}$ ،  $T_m$ ،  $L_m$  و  $T_{pr}$  به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه فلز باند، گرمای نهان ذوب، دمای ذوب فلز نوار جوش و مقدار دمای اولیه قطعه است. همچنین  $UI$  انرژی الکتریکی مصرف شده در الکتروود است.

با تقسیم صورت و مخرج کسر بر سرعت جوشکاری می‌توان نوشت:

$$\eta_I = \frac{v \cdot \dot{m}_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m]}{UI \cdot d} \quad (10)$$

که در آن  $d$ ، طول باند جوشکاری و  $v$  سرعت حرکت شعله جوش است. بازده آگرزژی برای فرآیند جوشکاری به صورت زیر تعریف می‌شود [15]:

$$\eta_{II} = \frac{\text{آگرزژی لازم برای تولید باند جوش}}{\text{کل آگرزژی ورودی}} = \frac{\dot{m}_{bond}(x_b - x_{in})}{\dot{X}_{Total}} \quad (11)$$

که در آن  $x_b$ ،  $x_{in}$  و  $\dot{X}_{Total}$  به ترتیب آگرزژی ویژه نوار جوش، آگرزژی ویژه ورودی به سیستم (نوار جوش) و نرخ کل آگرزژی ورودی به سیستم است. توجه شود که نرخ آگرزژی کل ورودی در واقع همان انرژی الکتریکی مصرف شده در الکتروود است ( $U \cdot I$ ) که چون در مرحله بعدی فرآیند جوش، انرژی الکتریکی به صورت گرما ظاهر می‌شود، این دو انرژی را می‌توان از نظر مقدار، یکسان در نظر گرفت. می‌توان نوشت:

$$\dot{X}_b - \dot{X}_{in} = \dot{m}_{bond}[(h_b - h_{in}) - T_0(s_b - s_{in})] \quad (12)$$

$s_{in}$  و  $s_b$  به ترتیب آنتروپی ویژه نوار جوش و آنتروپی ویژه ورودی به سیستم هستند. در نتیجه رابطه ۱۳ حاصل می‌شود:

$$\dot{X}_b - \dot{X}_{in} = \dot{m}_{bond}[C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m - T_0(C_{P(solid)} \ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m)] \quad (13)$$

$$\dot{X}_{Total} = \dot{Q} \quad (14)$$

$$\eta_{II} = \left[ \dot{m}_{bond} (C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m - T_0(C_{P(solid)} \ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m)) \right] / (\dot{Q}) \quad (15)$$

و یا می‌توان نوشت:

$$\eta_{II} = \left[ v \cdot \dot{m}_{bond} (C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m - T_0(C_{P(solid)} \ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m)) \right] / (UI \cdot d) \quad (16)$$

با تلفیق روابط ۱۰ و ۱۶ رابطه اختلاف بازده انرژی و بازده آگرزژی و یا پارامتر تولید آنتروپی بی‌بعد شده، حاصل می‌شود:

$$\eta_I - \eta_{II} = \frac{\dot{m}_{bond}(T_0(C_{P(solid)} \ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m))}{UI} \quad (17)$$

$$\eta_I - \eta_{II} = \frac{v \cdot \dot{m}_{bond}(T_0(C_{P(solid)} \ln(T_m/T_{pr}) + L_m/T_m))}{UI \cdot d} \quad (18)$$

این اختلاف بیانگر تولید آنتروپی بی‌بعد شده در خلال جوشکاری است. مقدار  $UI$  در طی فرآیند جوشکاری ثابت می‌ماند، لذا پارامترهای متغیر موثر در میزان تولید آنتروپی، در صورت کسر رابطه ۱۸ جای دارد. پارامتر دیگری که باید معرفی و تفسیر شود، نسبت بازده آگرزژی و بازده انرژی است که از تلفیق روابط ۱۶ و ۱۰

به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{\eta_{II}}{\eta_I} = 1 - \frac{T_0[C_{P(solid)} \ln(T_m/T_{pr}) + L_m]}{C_{P(solid)}(T_m - T_{pr}) + L_m} \quad (19)$$

صورت عبارت دوم از سمت راست رابطه ۱۹، بیانگر تولید آنتروپی و مخرج آن به صورت مستقیم با بازده انرژی رابطه دارد. همان طور که مشاهده می‌شود، هم صورت و هم مخرج عبارت مورد بحث، با دمای اولیه ( $T_{pr}$ ) رابطه عکس دارند به عبارت دیگر، نسبت به تغییرات دمای اولیه، هم رفتار هستند؛ این در حالی است که تمایل داریم صورت کسر (که بیانگر تولید آنتروپی است و رابطه عکس با کیفیت جوش دارد)، کاهش و مخرج کسر (که رابطه مستقیم با بازده انرژی دارد) افزایش یابد. حالت بهینه فرآیند هنگامی اتفاق می‌افتد که صورت کسر مورد بحث، بیشتر از مخرج آن کاهش یابد یعنی شیب نمودار رابطه ۱۹ نسبت به  $T_{pr}$ ، افزایشی باشد. اگر شیب نمودار، کاهش باشد، به این معنا است که درصد کاهش بازده انرژی، بیشتر از درصد افزایش بازده آگرزژی (یا افزایش کیفیت جوش) است و این به صرفه نیست. اگر شیب نمودار به صفر نزدیک شود، در این صورت درصد افزایش بازده آگرزژی و درصد کاهش بازده انرژی به یک میزان است.

### شبیه‌سازی عددی

#### فرضیات و روش انجام

از نرم‌افزار ANSYS برای شبیه‌سازی فرآیند حرارتی جوشکاری قوسی بهره گرفته شده است. از اعمال جریان گرمایی به گره‌ها استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی‌های انجام گرفته از فولاد نرمة A36 استفاده شده و تغییرات خواص مکانیکی و گرمایی فلز برحسب دما از مطالعه بیرک- سورنسن [17] استخراج شده است. جوشکاری از نوع لب‌به‌لب فرض شده که صفحات دارای پخ با زاویه ۶۰ درجه هستند. چون تنها از یک پالس جوشکاری استفاده شده است می‌توان انتظار داشت برآمدگی ایجاد شده بر روی نوار جوش چندان قابل اعتنا نباشد.

برای جوشکاری با شدت جریان ۲۱۰ آمپر و ولتاژ ۲۵ صورت گرفته است. برای باند جوش این فولاد، با فرض ترکیب نیمی از فولاد و نیمی از فلز الکتروود، گرمای نهان ذوب ۲۷۴۰۰۰ ژول بر کیلوگرم، دمای ذوب ۱۴۸۲ درجه سانتی‌گراد، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و گرمای ویژه متوسط در محدوده دمایی مورد استفاده، برابر ۳۱۰ ژول بر کیلوگرم درجه کلوین است. شعله‌های گرمایش نیز به موازات مشعل جوشکاری و به فاصله ۶ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند.

#### تأثیرات گرمایشی شعله‌های موازی

استفاده از دو شعله متحرک به موازات شعله جوش که به اختصار گرمایش موازی خوانده می‌شود نخستین بار توسط لین و چو [5] ارائه شد که مبنای آن مانند سایر روش‌های گرمایشی، کاهش گرادیان‌های دمایی اطراف نوار جوش است. مکانیزم این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$T = \frac{qpt}{Cp(4a\pi)^{3/2}} \exp\left(-\frac{Xv}{2a}\right) \quad (۲۶)$$

$$\int_{\tau=0}^t \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \exp\left[-\frac{X^2+y^2+z^2}{4a\tau}\right] \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a}\right)$$

قسمت انتگرالی رابطه پیشین را می‌توان به شکل بی‌بعد بیان کرد. برای این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\omega = \frac{u^2\tau}{4a} \quad (۲۷)$$

در این صورت معادله ۲۶ به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$T = \frac{qpt.v}{16\lambda a\pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{Xv}{2a}\right) \times \int_0^{\frac{v^2t}{4a}} \frac{dw}{w^{3/2}} \exp[-w - \left(\frac{u^2}{4w}\right)] \quad (۲۸)$$

که در آن:

$$u = \frac{Rv}{2a} \quad (۲۹)$$

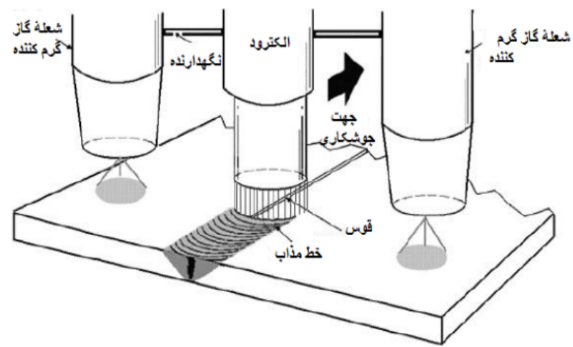
$$R = x^2 + y^2 + z^2 \quad (۳۰)$$

معادله ۲۸ برای شرایط گذرا نیز می‌تواند به کار گرفته شود. توجه شود که قسمت انتگرالی این رابطه از طریق عددی قابل حل است که در اینجا برای حل آن از روش سیمپسون بهره گرفته شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر جوشکاری در فاصله به اندازه کافی طولانی صورت گیرد، حالتی در قطعه ایجاد می‌شود که به آن حالت شبه‌پایا گفته می‌شود، به این معنا که چنانچه ناظری بر روی منبع حرارتی مورد استفاده، قرار گیرد، هیچ‌گونه تغییری در توزیع دمای اطراف منبع حرارتی ایجاد نمی‌شود. یا به بیان دیگر، اگر توزیع دمای اطراف منبع حرارتی به شکل یک تپه در نظر گرفته شود، در این صورت در حالت انتقال حرارت شبه‌پایا، تپه به صورت جسمی صلب و بدون هیچ‌گونه تغییری در سایز و شکل، بر سطح قطعه حرکت می‌کند [19]. نهایتاً رد پای خطوط هم‌دما بر روی سطح قطعه، خطوطی موازی یکدیگر و در جهت حرکت جوش خواهند بود.

برای مقادیر  $w > 5$  انتگرال رابطه ۲۹ مقدار تقریباً یکسانی خواهد داشت (حتی اگر  $w \rightarrow \infty$ ) در این صورت می‌توان برای  $w > 5$  شرایط شبه‌پایا در نظر گرفت (زیرا عبارات شامل زمان، درون انتگرال قرار دارد و مقدار انتگرال در این شرایط ثابت است).

#### استفاده از روش ارتعاشی برای کاهش تنش‌های پسماند

تنش‌گیری ارتعاشی قطعات جوشکاری شده (VSR) یکی از روش‌های کاهش تنش‌های پسماند از رسته اورلودینگ است که هر چند برای بیش از چهار سال سابقه دارد، با این وجود مکانیزم آن، ارزیابی‌های کمی و میزان تأثیرگذاری آن همچنان در دست مطالعه و بررسی است [20]. فرکانس کوتاه ارتعاشی با انرژی نوسانی بالا به قسمت‌های مونتاژ شده یا قسمت‌های ماشین‌کاری شده اعمال می‌شود. این ارتعاش‌های فراوان، باری (شارژی) مازاد بر الگوهای تنش‌های موجود در قطعه بوده که علاوه بر تغییر شکل‌های پلاستیک محلی، موجب کاهش پیک تنش‌های پسماند می‌شوند که نهایتاً سبب تولید قطعاتی پایدار و کاهش اعوجاج‌ها می‌شود. شماتیک استفاده از روش ارتعاشی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲) طرح‌واره روش گرمایش موازی

تأثیر شعله‌های موازی گرمایشی در مقدار  $T_{Pr}$  واقع می‌شود.

معادله دیفرانسیل هدایت حرارتی به شکل زیر بیان می‌شود:

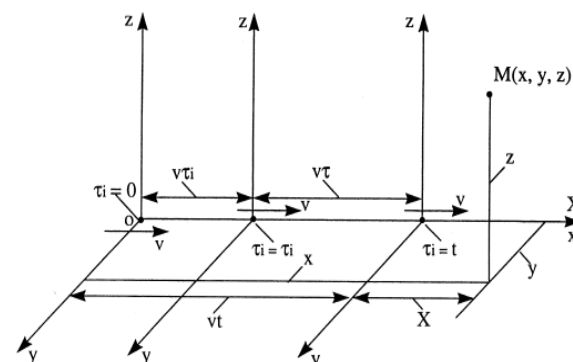
$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (۳۰)$$

که در آن  $k$  هدایت حرارتی و  $T$  توزیع دما است. در این صورت عبارت زیر، رابطه فوق را ارضا می‌کند [18]:

$$T = \frac{Q}{8(\pi kt)^{3/2}} e^{-[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]/(4kt)} \quad (۳۱)$$

که در آن  $x'$ ،  $y'$  و  $z'$  مختصات قرارگیری منبع حرارتی است.

شکل ۳، شماتیکی از مساله منبع حرارتی متحرک را نشان می‌دهد که حروف  $x$ ،  $y$  و  $z$ ، نمایانگر مختصات مطلق هستند و  $X$ ، مختصات متحرک در راستای محور  $x$  است.



شکل ۳) مختصات منبع حرارتی متحرک

فاصله بین منبع حرارتی و نقطه  $M$ ، به شکل زیر است:

$$\sqrt{(x - vt_i)^2 + y^2 + z^2} \quad (۳۲)$$

در این صورت افزایش دمای  $d\theta_M$  در نقطه  $M$  در زمان  $t$  در اثر گرمای آزاد شده، در زمان  $t_i$  به شکل زیر خواهد بود:

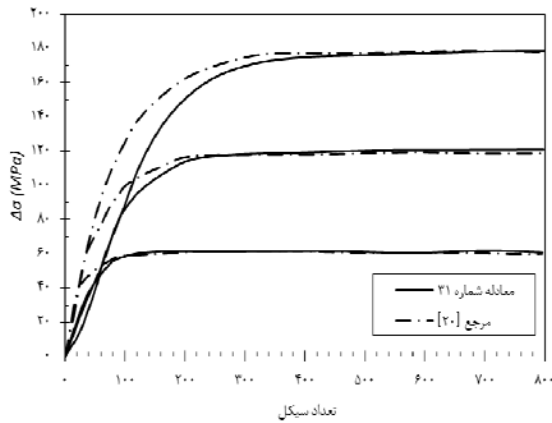
$$dT = \frac{qpt dt_i}{8\rho c(\pi kt)^{3/2}} e^{-[(x-vt_i)^2 + y^2 + z^2]/(4kt_i)} \quad (۳۳)$$

توجه شود که مکان نقطه  $M$  در مختصات متحرک است و لذا:

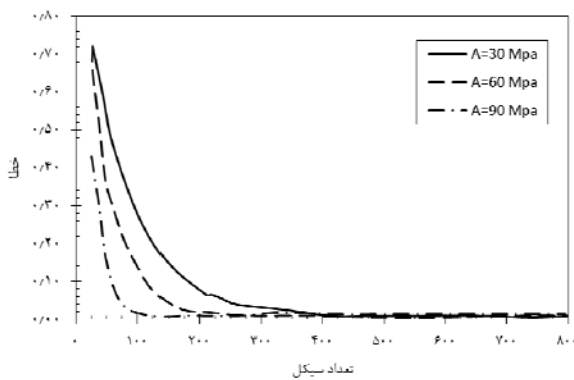
$$x - vt_i = X + vt, \tau = t - t_i \quad (۳۴)$$

$$T = \frac{qpt}{Cp(4a\pi)^{3/2}} \int_{\tau=0}^t \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} \exp\left(-\frac{(X+v\tau)^2 + y^2 + z^2}{4a\tau}\right) \quad (۳۵)$$

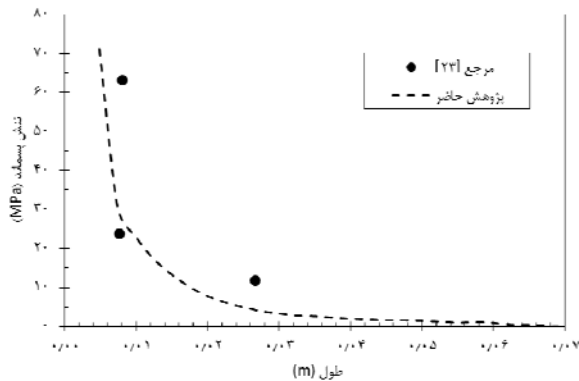
و یا می‌توان نوشت:



نمودار ۲) میزان کاهش تنش‌های پسماند به‌ازای تعداد دورهای ارتعاش‌دهی در دامنه‌های ارتعاشی مختلف محاسبه‌شده از رابطه ۳۱ در مقایسه با نتایج مطالعه راو و همکاران [20]



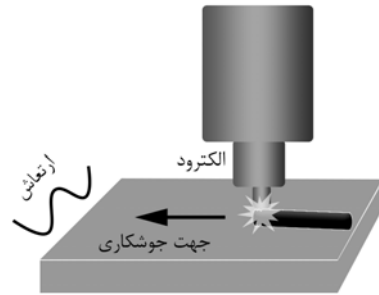
نمودار ۳) تغییرات میزان خطای نسبی (رابطه ۳۱) در دامنه‌های مختلف نسبت به تعداد بارگذاری



نمودار ۴) نتایج شبیه‌سازی تغییر تنش‌های پسماند با فاصله از نوار جوش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مطالعه حنایی [23]

### نتایج و بحث تأثیرات روش ارتعاشی

در مطالعه طهونی [24] نشان داده شده است که نمودار نیروی اعمال‌شده در اثر فرآیند ارتعاشی و کرنش‌های پلاستیک در تعداد سیکل‌های مختلف، یکسان است (نمودار ۵). لذا رابطه ۳۲ برای تعداد سیکل‌های مختلف صادق است.



شکل ۴) شماتیک استفاده از روش ارتعاشی در جوشکاری [21]

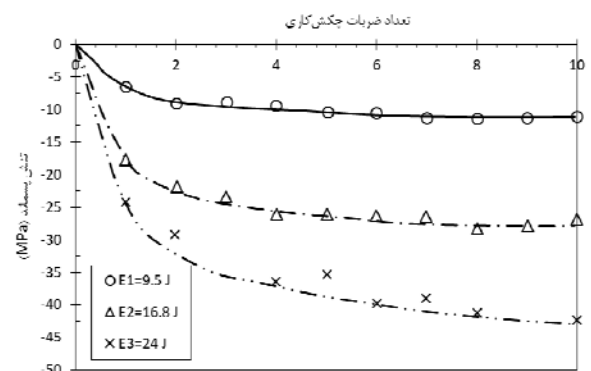
### ارزیابی صحت

کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در قبال استفاده از فرکانس روش چکش‌کاری در نمودار ۱ نشان داده شده است. در این نمودار، سیمبل‌ها نشانگر نتایج تجربی پژوهش هاسینی و همکاران [22] بوده و خطوط، نتایج پژوهش حاضر است. همان طور که مشاهده می‌شود، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری با افزایش انرژی چکش‌ها و افزایش تعداد بارگذاری، کاهش می‌یابد. رابطه کمی ۲۰ بین پارامتر بازگشت‌ناپذیری بی‌بعد شده و کاهش تنش‌های پسماند پیشنهاد می‌شود:

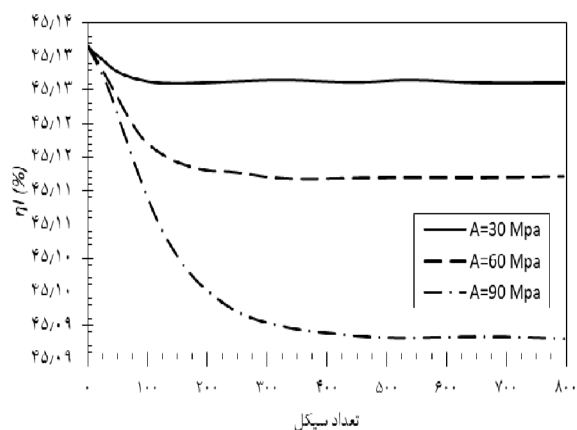
$$\Delta\sigma = \frac{1.23 \times 10^6 (13.738 - I)}{A} \quad (31)$$

که در آن  $A$ ،  $I$  و  $\Delta\sigma$  به ترتیب دامنه ارتعاش، بازگشت‌ناپذیری بی‌بعد شده و کاهش تنش‌های پسماند برحسب مگاپاسگال هستند. میزان کاهش تنش‌های پسماند در اثر روش ارتعاشی محاسبه‌شده از رابطه ۳۱ را در مقایسه با نتایج مطالعه راو و همکاران [20] در نمودار ۲ نشان داده شده است.

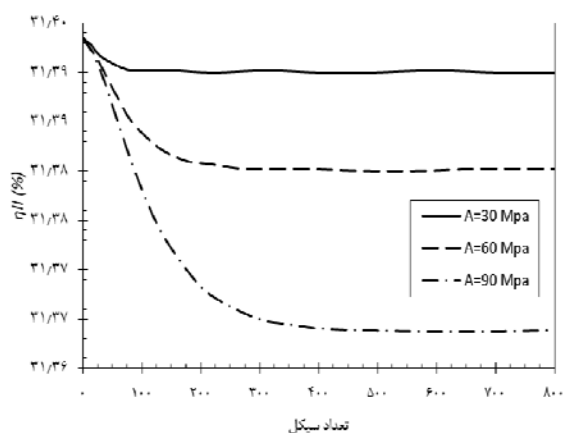
میزان خطای نسبی برای تعداد دورهای مختلف در سه دامنه در نمودار ۳ نشان داده شده است. به دلیل اینکه رابطه تحلیلی کرنش، در تعداد سیکل‌های کمتر، خطای بیشتری دارد لذا میزان خطای رابطه ۳۱ در تعداد دور کمتر، بیشتر است. علاوه بر این مقدار تنش‌های پسماند محاسبه‌شده با داده‌های تجربی مطالعه حنایی [23] در نمودار ۴ مقایسه شده است.



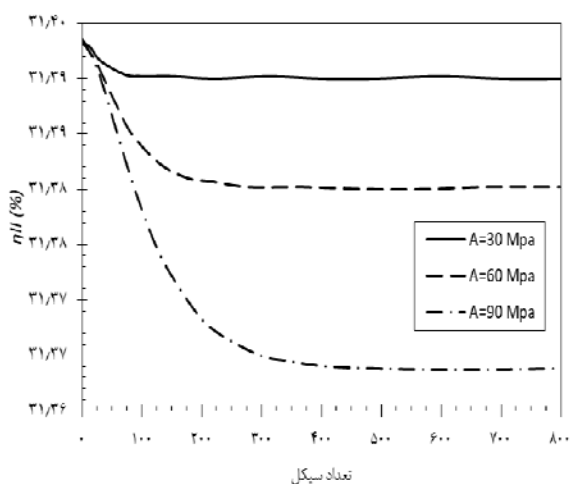
نمودار ۱) مقایسه نتایج کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در اثر چکش‌کاری نسبت به تعداد مراحل بارگذاری پژوهش هاسینی و همکاران [22] و پژوهش حاضر



نمودار ۶) تغییرات بازده انرژی نسبت به تعداد سیکل عملیات ارتعاشی در دامنه‌های مختلفی از ارتعاش



نمودار ۷) تغییرات بازده آگرزوی نسبت به تعداد سیکل عملیات ارتعاشی در دامنه‌های مختلفی از ارتعاش



نمودار ۸) تغییرات تولید آنتروپی بی‌بعد نسبت به تعداد سیکل عملیات ارتعاشی در دامنه‌های مختلفی از ارتعاش

### تأثیرات روش چکش‌کاری

اگر برخورد، با فرکانس ۴/۵ هرتز صورت بگیرد در این صورت بازده انرژی مطابق نمودار ۹ خواهد بود. مطابق این نمودار بازده انرژی

$$\epsilon_r = A \cdot P_1 \left[ 1 - \exp\left(-N \cdot \left(\frac{P_2}{A}\right)\right) \right] \quad (32)$$

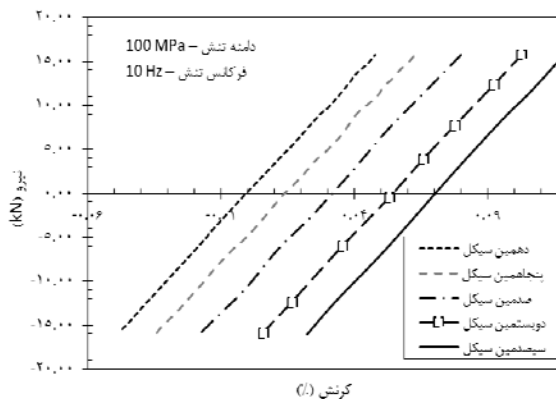
که در آن  $\epsilon_r$  کرنش خزشی سیکلی پس از  $N$  تعداد سیکل،  $A$  دامنه تنش‌های سیکلی دینامیک،  $P_1$  و  $P_2$  ثوابت تطبیق معادله با منحنی تجربی هستند. در این صورت کاهش تنش‌های پسماند به شکل زیر قابل بیان است [25]:

$$\Delta\sigma = \epsilon \cdot \epsilon_r \quad (33)$$

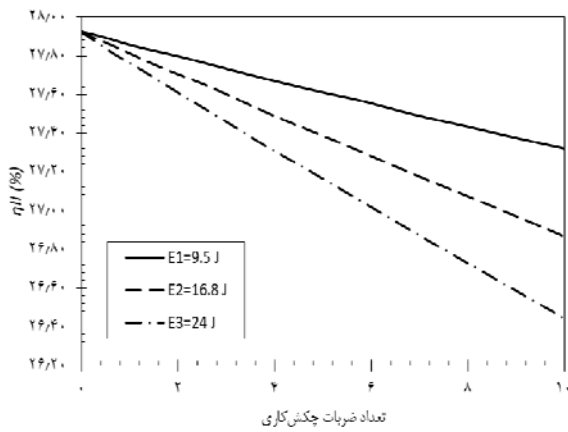
که در آن  $\epsilon$  مدول دینامیک است. بازده انرژی برای فرآیند تلفیقی جوشکاری- کارسختی ارتعاشی در نمودار ۶ نمایش داده شده است که در آن فرکانس ارتعاش ۱۰ هرتز است. همان طور که در نمودار ۶ دیده می‌شود، افزایش تعداد دوره‌های بارگذاری ارتعاشی موجب کاهش بازده انرژی می‌شود زیرا مصرف انرژی بیشتر می‌شود. اما به مرور شیب نمودار کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش کرنش و در نتیجه کاهش انرژی مصرفی است. تغییرات بازده آگرزوی فرآیند مورد بحث برای چند تعداد سیکل بارگذاری ارتعاشی در نمودار ۷ مقایسه شده است.

با مقایسه نمودارهای ۶ و ۷ مشخص می‌شود که بازده انرژی از بازده آگرزوی بیشتر است. این اختلاف به دلیل تولید آنتروپی در خلال فرآیند مورد بحث است از این رو روند تغییرات این دو نمودار مشابه یکدیگر هستند. کاهش هر دو بازده نشان از آن دارد که این محدوده از لحاظ اقتصادی هزینه بالایی را برای کارگزاران به همراه دارد.

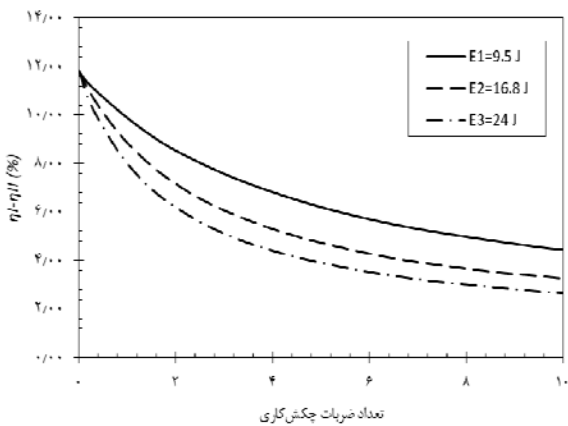
اختلاف دو بازده انرژی و آگرزوی در نمودار ۸ نشان داده شده است که با عنوان بازگشت‌ناپذیری بی‌بعد شده خوانده می‌شود. طبیعی است که در فرآیندهای صنعتی تمایل برای کاهش هر چه بیشتر این پارامتر وجود دارد. مطابق نمودار ۸ برای دامنه ارتعاشی ۳۰ مگاپاسکال در حوالی تعداد ۱۰۰ سیکل ارتعاشی، مقدار تولید آنتروپی بی‌بعد شده تقریباً به حداقل میزان خود می‌رسد. لذا از این تعداد سیکل به بعد تولید آنتروپی کاهش نخواهد داشت و یا به بیان دیگر ارتعاش بیشتر، تأثیری بر میزان تنش‌های پسماند نخواهد داشت. بنابراین تعداد سیکل بهینه برای دامنه ۳۰ مگاپاسکال حدود ۱۰۰ دور است. با افزایش دامنه ارتعاش، تعداد سیکل بهینه افزایش می‌یابد.



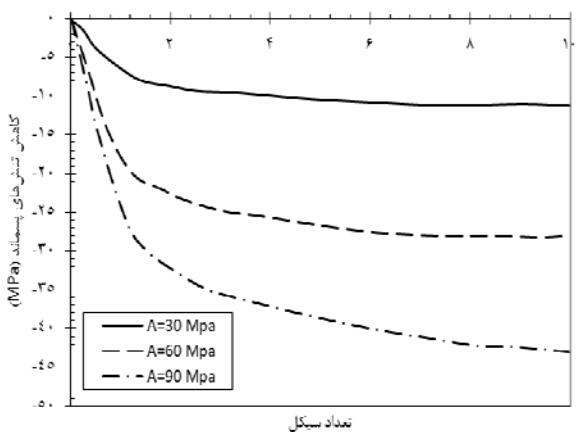
نمودار ۹) تغییرات نیرو با درصد کرنش خزشی در تعداد سیکل‌های مختلف [24]



نمودار ۱۰) تغییرات بازده انرژی با تعداد برخوردهای صورت گرفته



نمودار ۱۱) تغییرات تولید آنتروپی بی‌بعد شده با تعداد برخوردهای صورت گرفته



نمودار ۱۲) کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری در اثر چکش کاری نسبت به تعداد مراحل بارگذاری محاسبه شده از رابطه ۳۴

### گرمایش با شعله موازی

تغییرات مقدار بازده انرژی، بازده انرژی و تولید آنتروپی بی‌بعد شده با گرمای شعله، در سرعت‌های جوشکاری ۲/۵ و

برای سه انرژی دهی مختلف ترسیم شده است. انرژی بیشتر موجب کاهش بیشتر بازده انرژی می‌شود لذا به‌کاربردن این روش هزینه‌ساز است اما به‌دلیل مزایای بعدی از آن استفاده می‌شود.

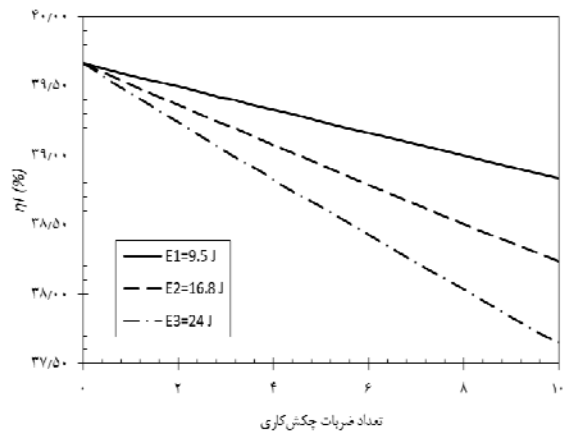
تغییرات بازده انرژی به‌ازای تعداد مراحل چکش کاری در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی نیز با افزایش تعداد مراحل چکش کاری کاهش می‌یابد. ضمناً افزایش انرژی چکش کاری، بازده انرژی را نیز کاهش می‌دهد. این شیب کاهشی با افزایش انرژی چکش کاری، افزوده می‌شود. این کاهش بازده انرژی و انرژی با افزایش تعداد مراحل چکش کاری، مربوط به افزایش انرژی و انرژی مصرف شده در طی فرآیند است. همان‌طور که انتظار می‌رود بازده انرژی از بازده انرژی کمتر است که مربوط به تولید آنتروپی در خلال فرآیند می‌شود. نمودار ۱۱ اختلاف دو بازده را نشان می‌دهد که همان بازگشت‌ناپذیری بی‌بعد شده است.

در نمودار ۱۱ نشان داده شده است که با افزایش مراحل چکش کاری، میزان تولید آنتروپی بی‌بعد شده کاهش می‌یابد، هر چند شیب کاهش اختلاف دو بازده به مرور کاسته می‌شود لذا می‌توان انتظار داشت تعداد بارگذاری بیش از ۵ هرگز چندان تغییری در میزان تنش‌ها ایجاد نکند. همچنین افزایش انرژی چکش سبب کاهش مضاعف تولید آنتروپی می‌شود. ضمناً شیب کاهش تولید آنتروپی بی‌بعد برای انرژی‌های بیشتر، بزرگ‌تر است لذا با افزایش انرژی چکش کاری، کاهش در میزان تنش‌ها، در تعداد بارگذاری کمتر به‌وقوع می‌پیوندد.

رابطه ۳۴ برای محاسبه میزان کاهش تنش‌های پسماند براساس بازگشت‌ناپذیری بی‌بعد شده ارایه شده است:

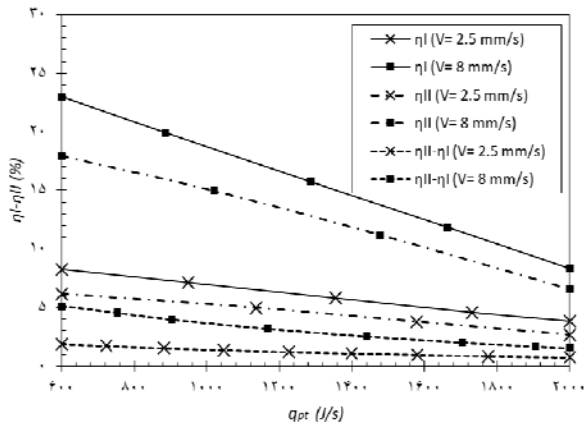
$$\Delta\sigma = \frac{E(-11.5+I)}{5.6} \quad (34)$$

که در آن  $E$  انرژی ناشی از چکش‌ها است. کاهش تنش‌های پسماند در اثر چکش کاری که از رابطه ۳۴ محاسبه شده، در نمودار ۱۲ نشان داده شده است.

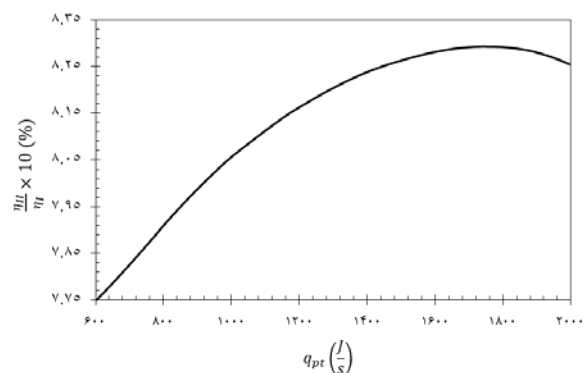


نمودار ۹) تغییرات بازده انرژی با تعداد برخوردهای صورت گرفته





نمودار ۱۳) تغییرات مقدار بازده انرژی، بازده انرژی و تولید آنتروپی بی‌بعد شده با گرمای شعله، در سرعت‌های جوشکاری ۲/۵ و ۸ میلی‌متر بر ثانیه



نمودار ۱۴) تغییرات نسبت بازده انرژی و انرژی با گرمای شعله، در سرعت‌های جوشکاری ۲/۵ و ۸ میلی‌متر بر ثانیه

### جمع‌بندی

تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، نقشی مهم و حیاتی را در کیفیت قطعات، استحکام و طول عمر آنها بازی می‌کنند. به همین منظور با رویکردی ترمودینامیکی- عددی به مطالعه این تنش‌ها پرداخته شد. در همین راستا سه روش تنش‌زدایی مشتمل بر روش گرمایش با شعله موازی، ارتعاشی و چکش‌کاری مطالعه شد.

۱- افزایش حرارت، موجب کاهش بازده انرژی و افزایش بازده انرژی شده، شیب افزایشی بازده انرژی در حدود ۱۸۰۰ ژول بر ثانیه به صفر نزدیک می‌شود.

۲- افزایش ۳ برابری سرعت جوشکاری، هر بازده انرژی و انرژی را تا حدود ۳ برابر افزایش می‌دهد.

۳- تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری با افزایش گرمایش شعله، کاهش خواهد داشت. اما با افزایش سرعت، این تنش‌ها (و یا اختلاف دو بازده) افزایش می‌یابد.

۴- با توجه به نسبت بازده انرژی به بازده انرژی، افزایش گرمایش تا حدود ۱۸۰۰ ژول بر ثانیه، می‌تواند به‌صرفه باشد و برای گرمای بیشتر از آن، میزان صرفه اقتصادی افزایش گرمایش، به

۸ میلی‌متر بر ثانیه در نمودار ۱۳ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش گرمای شعله‌ها، مقدار بازده انرژی کاهش می‌یابد. شیب کاهش این بازده برای سرعت‌های بالاتر، مقدار بیشتری دارد. ضمناً مقدار بازده، با افزایش سرعت، بیشتر می‌شود. همچنین نمودار ۱۳ تغییرات مقدار بازده انرژی با مقدار گرمای شعله را نمایش می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش گرمای شعله‌ها، مقدار بازده انرژی کاهش می‌یابد. شیب کاهش این بازده برای سرعت‌های بالاتر، مقدار بیشتری دارد. ضمناً مقدار بازده با افزایش سرعت، بیشتر می‌شود. توجه شود که بازده انرژی در یک سرعت مشخص از جوشکاری از بازده انرژی آن کمتر است که دلیل آن تولید آنتروپی است.

علاوه بر این، نمودار ۱۳ تغییرات اختلاف دو بازده انرژی و انرژی (یا تولید آنتروپی بی‌بعد شده) را در دو سرعت ۲/۵ و ۸ میلی‌متر بر ثانیه با گرمای شعله نشان می‌دهد. این اختلاف که ناشی از بازگشت‌ناپذیری‌های ایجاد شده در خلال جوشکاری است، در واقع نمایشی از میزان تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش گرمای شعله، تنش‌های پسماند ایجاد شده در قطعه کاهش می‌یابد. ضمناً این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش گرمای شعله‌ها، شیب کاهش آنتروپی بی‌بعد شده کاسته می‌شود به عبارت دیگر در دماهای بیشتر، تأثیر گرمای شعله‌ها بر کاهش تنش‌های پسماند کاسته می‌شود. توجه شود که با توجه به نمودار ۱۳ تأثیر گرمایش موازی در کاهش تنش‌های پسماند، در سرعت‌های بالاتر، بیشتر است.

تغییرات نسبت بازده انرژی به بازده انرژی را نسبت به تغییرات گرمای شعله را در نمودار ۱۴ نمایش داده شده است. همان طور که بیشتر در مورد معنای فیزیکی این پارامتر اشاره شد، در مناطقی که شیب افزایشی نمودار تندتر است، کاهش تولید آنتروپی (افزایش کیفیت جوش) از کاهش بازده انرژی بیشتر است. و لذا در آن محدوده افزایش گرمای شعله‌ها می‌تواند مقرون به‌صرفه باشد.

مطابق نمودار ۱۱، محدوده مورد بحث را می‌توان تا حدود ۱۸۰۰ ژول بر ثانیه در نظر گرفت. سپس شیب نمودار در حدود ۱۸۰۰ ژول بر ثانیه به صفر نزدیک است که نشان از نسبت یکسان کاهش در تولید آنتروپی و بازده انرژی دارد. در این محدوده هر چند کیفیت جوش با استفاده از گرمایش موازی بالا می‌رود اما بازده انرژی نیز به همان نسبت کاهش می‌یابد و برای گرمایش بیش از ۱۸۰۰ ژول بر ثانیه نمودار شیب نزولی پیدا می‌کند؛ به این معنا که کیفیت جوش بالا رفته (تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد) اما بازده انرژی به‌صورت مضاعف کم می‌شود و این حالت مطلوب نیست. نکته قابل توجه این است که نسبت دو بازده، به سرعت فرآیند جوشکاری وابسته نیست، لذا صرفه اقتصادی افزایش دمای آب، به سرعت پروسه جوشکاری نمی‌تواند وابسته باشد.

دما (K)	$T$
ولتاژ (V)	$U$
سرعت ( $m.s^{-1}$ )	$v$
کار (W)	$W$
انرژی ( $J.kg^{-1}$ )	$x$
مختصات	$x, y, z$
<b>علامه یونانی</b>	
نفوذ حرارتی ( $m^2.s^{-1}$ )	$\alpha$
کرنش پلاستیک	$\epsilon_r$
مدول دینامیک (Pa)	$\epsilon$
بازده قوس	$\eta$
بازده انرژی	$\eta_I$
بازده انرژی	$\eta_{II}$
مختصات متحرک	$\xi$
چگالی ( $kg.m^{-3}$ )	$\rho$
تنش (Pa)	$\sigma$
<b>زیرنویسها</b>	
حالت مرده	$0$
نوار جوش	<b>bond</b>
ورودی، خروجی	<b>in, out</b>
پیش گرمایش	<b>Pr</b>
جامد	<b>solid</b>

نوع کاربرد جوش مورد استفاده وابسته است.

۵- صرفه اقتصادی افزایش گرمایش، به سرعت پروسه جوشکاری وابسته نیست.

۶- ضمناً انطباق نتایج حاصله با نتایج ارایه شده توسط پژوهش بیرک- سورنسن [17] و سهولت استفاده از روش ارایه شده، نشان می دهد که اختلاف دو بازده انرژی و انرژی و یا تولید آنتروپی بی بعد شده می تواند معیاری مناسب از تنش های پسماند ناشی از جوشکاری باشد.

۷- بحث در مورد اینکه کدام روش تنش ها را بیشتر کاهش می دهد به تنهایی کافی نیست بلکه میزان کاهش تنش ها باید در قبال انرژی مصرف شده در نظر گرفته شود. نظر به اینکه کاهش تولید آنتروپی بی بعد شده کارایی روش های کاهش تنش های پسماند نسبت به کل انرژی مورد استفاده را نشان می دهد، لذا مقایسه این پارامتر برای روش های گوناگون معیاری مناسب برای بازشناسی کارایی روش ها است. مرتبه کاهش تولید آنتروپی بی بعد شده برای روش ارتعاشی ۰/۰۱، روش چکش کاری ۰/۱ و روش شعله موازی ۱۰ است.

۸- می توان انتظار داشت روش های گرمایشی کارایی بیشتری نسبت به روش های مکانیکی در کاهش تنش های پسماند دارا هستند.

### منابع

- 1- Teng TL, Lin CC. Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1998;75(12):857-864.
- 2- Sunar M, Yilbas BS, Boran K. Thermal and stress analysis of a sheet metal in welding. Journal of Materials Processing Technology. 2006;172(1):123-129.
- 3- Kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, Yanagida N, Saito K. Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint. Computational Materials Science. 2009;46(4):987-995.
- 4- Jiang W, Zhang Y, Woo W. Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012;92:56-62.
- 5- Lin YC, Chou Cp. A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 1995;48(1-4):693-698.
- 6- Barsanescu P-D, Leitou B, Goanta V, Cantemir D, Gherasim G. Reduction of residual stresses induced by welding in monel alloy, using parallel heat welding. International Journal Academic Research. 2011;3(1):335-339.
- 7- Sluzalec A. Theory of thermomechanical processes in welding. Berlin: Springer; 2005.
- 8- Al-Qahtani H, Yilbas BS. Entropy generation rate during laser pulse heating: Effect of laser pulse parameters on entropy generation rate. Optics and Lasers in Engineering. 2008;46(1):27-33.
- 9- Fallahi A, Jafarpur K, Nami MR. Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment. Scientia Iranica. 2011;18(3):398-406.
- 10- Hoffmann T, Baldea G, Riedel U. Thermodynamics

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

**سهم نویسندگان:** مجتبی ماموریان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سیدعلی نادقی فر (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ منا محمدی نیشابوری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪).

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

### فهرست علامه

A	دامنه ارتعاش (m)
A <sub>1</sub>	سطح مقطع فلز پرکننده در نوار جوش (m <sup>2</sup> )
A <sub>2</sub>	سطح مقطع فلز پایه در نوار جوش (m <sup>2</sup> )
C <sub>p</sub>	گرمای ویژه ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
d	طول باند جوشکاری (m)
E	انرژی (J)
g	شتاب گرانشی ( $m.s^{-2}$ )
h	آنتالپی ( $J.kg^{-1}$ )
I	بارگشت ناپذیری بی بعد
k	ضریب هدایت حرارتی ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
L <sub>m</sub>	گرمای نهان ذوب ( $J.kg^{-1}$ )
m	دبی جرمی ( $kg.s^{-1}$ )
Q	نرخ گرمای کل ایجاد شده در اثر قوس (W)
S''' <sub>gen</sub>	نرخ تولید آنتروپی در واحد حجم ( $J.kg^{-1}.K^{-1}.m^{-3}$ )
t	زمان (s)

in ship section. Copenhagen: Technical University of Denmark (DTU); 1999.

18- Carslaw HS, Jaeger JC. Conduction of heat in solids. Oxford: Oxford University Press; 1959.

19- Rosenthal D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding Journal*. 1941;20(5):220-234.

20- Rao D, Wang D, Chen L, Ni C. The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress. *International Journal of Fatigue*. 2007;29(1):192-196.

21- Jose MJ, Kumar SS, Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016;21(4):243-258.

22- Hacini L, Van Lê N, Bocher P. Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;208(1-3):542-548.

23- Hanaei S. Investigation of residual stress of arc welding by finite element method [dissertation]. Semnan: Semnan University; 2009. [Persian]

24- Tahouni S. Handbook of Welding and Joints in Steel Buildings. Unknown Publisher; 2010.

25- Walker C, Waddell A, Johnston D. Vibratory stress relief-an investigation of the underlying processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 1995;209(1):51-58.

and transport properties of metal/inert-gas mixtures used for arc welding. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009;32(2):3207-3214.

11- Saleem M, Hossain MA, Mahmud S, Pop I. Entropy generation in Marangoni convection flow of heated fluid in an open ended cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;54(21-22):4473-4484.

12- Arabi SH, Pouranvari M, Movahedi M. Influence of heat-input on mechanical behavior and phase balance of 2304 duplex stainless steel resistance spot welds. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(5):159-165. [Persian]

13- Charkhi M, Akbari D. Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):1-10. [Persian]

14- Fouladi S, Abbasi M, Givi M. Friction stir vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(4):217-224. [Persian]

15- Sahin AZ, Ayar T, Yilbas BS. Laser welding: the first and second law analysis. *International Journal of Exergy*. 2010;7(5):535-546.

16- Dong W, Lu S, Li D, Li Y. GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;54(7-8):1420-1431.

17- Birk-Sørensen M. Simulation of welding distortions