



بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک  
دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۲

21<sup>st</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering  
Faculty of Mechanical Engineering K.N.Toosi University of Technology  
7-9 May 2013



## کتابچه ارائه مقاله

بدینوسیله کتابچه می شود مقاله

بررسی تاثیر روش انفجاری بر تمش های پس ماند ناشی از جوشکاری به روش تحلیل اکرزژی  
نقاش:

سعید خانی، مجتبی ماموریان، میناز خسرو جردی

در بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک که در تاریخ ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۲ به میزبانی دانشگاه  
صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و با همکاری گروه پنا بر گزار گردید، ارائه شده است.

دکتر سعید علی اکبر موسویان

دبیر کمیته علمی

دکتر علی خانی

دبیر همایش



ISME2013-487

## بررسی تاثیر روش انفجاری بر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به روش تحلیل اگزوزی

سعید حنایی<sup>۱</sup>، مجتبی ماموریان<sup>۲</sup>، مهناز خسروجردی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، مشهد، دانشگاه فردوسی؛ saeid2003soh@yahoo.com

<sup>۲</sup>استادیار، مشهد، دانشگاه فردوسی؛ mamourian@um.ac.ir

<sup>۳</sup>کارشناسی اتومکانیک، مشهد، دانشگاه خيام؛ khosrojerdi.mahnaz@gmail.com

### چکیده

در این تحقیق با ارائه پارامتری با عنوان تولید انرژی بی‌بعد شده میزان تاثیرگذاری روش انفجاری بر این پارامتر در دو سرعت متفاوت و برای فواصل مختلفی از دیتونیتز بررسی گردیده است. که در آن تغییرات انرژی در اثر فرآیند جوشکاری به صورت محلی<sup>۱</sup> بیان شده است. از آنجا که این پارامتر از تولید انرژی و کل انرژی ورودی تشکیل یافته است، به عنوان معیاری از میزان تولید انرژی در قبال انرژی مصرف شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی تنش‌های پسماند جوشکاری که نوعی بازگشت‌ناپذیری محسوب می‌گردند، با تولید انرژی همراه خواهند بود بنابراین پارامتر مورد بحث می‌تواند معیاری از میزان تنش‌های پسماند در ازای مصرف مقدار مشخصی از انرژی محسوب گردد. نتایج حاصله نشان می‌دهد با افزایش فاصله عرضی دیتونیتز، میزان تولید انرژی بی‌بعد شده افزایش یافته که نشان از افزایش تنش‌های پسماند جوشکاری می‌باشد لذا فاصله کمتری از دیتونیتز برای کاهش تنش‌ها توصیه می‌گردد. در این تحقیق با به کارگیری مدل شار حرارتی سگرلیند تاثیرات سرعت بر توزیع دمای جوش وارد روابط شده که نشان می‌دهد افزایش سرعت سبب کاهش انرژی بی‌بعد شده می‌گردد. تطابق نتایج حاصله با داده‌های موجود، نشان از قابلیت بالای پارامتر تولید انرژی بی‌بعد شده در راستای بررسی کیفیت جوش دارد.

### واژه‌های کلیدی

بازده انرژی - بازده اگزوزی - تولید انرژی - تنش‌های پسماند جوشکاری

### مقدمه

تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری یکی از مهمترین و تاثیرگذارترین عیوب ایجاد شده در قطعات پس از اتمام فرآیند جوش می‌باشد. در این راستا متدهای گوناگونی در جهت کاهش این تنش‌ها ارائه گردیده است که می‌توان به روش‌های پیش‌گرمایش، گرمایش موازی، عملیات مغناطیسی، چکش کاری و روش‌های ارتعاشی اشاره نمود. روش انفجاری<sup>۲</sup>، متدی تازه در جهت کاهش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری است که بوسیله تولید تنش کنترل شده در خلال خط جوش می‌باشد. مبنای روش پیش‌رو، کارسختی یا سردکاری

است که عبارتست از افزایش استحکام فلز با استفاده از تغییر شکل پلاستیک<sup>[۱]</sup>. این افزایش استحکام در اثر حرکات نابه‌جایی‌ها داخل ساختار کریستال ماده است. شوک‌های موجی که توسط انفجار ایجاد گردیده، در راستای افزایش سختی فلزات به کار گرفته شده که در واقع از تغییر شکل‌های پلاستیک در نرخ بالایی از کرنش استفاده گردیده شده است. هنگامی که دیتونیتزها مشتعل می‌شوند، موج‌های فشاری تولید شده سبب کاهش قسمتی از تنش‌های اولیه می‌گردد<sup>[۲]</sup>. تحقیقات عددی و تجربی متعددی در جهت نشان دادن میزان تاثیر استفاده از موج‌های فشاری برای کاهش تنش‌های پسماند ارائه گردیده است؛ از جمله ژانگ و همکاران (۲۰۰۵) مکانیزم انجام عملیات انفجاری، چگونگی تشکیل موج‌های انفجاری و تاثیر آن بر تنش‌های پسماند را مورد مطالعه قرار دادند<sup>[۳]</sup>. کای-زین و همکاران (۲۰۰۵) ضمن بررسی تاثیر فرآیند انفجاری بر میزان تنش‌های پسماند جوشکاری، برخی پارامترهای بهینه در این روش را تعیین کردند<sup>[۴]</sup>. گارسیا-جاکومینو و همکاران (۲۰۰۹) هندسه‌های مختلفی از بارگذاری انفجاری در نواحی حرارتی جوش را مورد مطالعه قرار دادند که شامل بارگذاری خطی و سینوسی می‌باشد. نتایج آنان نشان داد که کاهش تنش‌های پسماند جوش از ۵۰ تا ۶۰ درصد قابل کاهش است<sup>[۵]</sup>. لیو و همکاران (۲۰۱۱) تاثیر متد مورد بحث را بر کاهش تنش‌های پسماند جوشکاری فولادهای هدفیلد را بررسی کردند و تفاوت رفتارهای استاتیک و دینامیک را مورد بحث قرار دادند<sup>[۲]</sup>.

### فیزیک مسئله

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دیتونیتز بر روی نوار جوش قرار می‌گیرد. هنگامی که دیتونیتز در  $t = 0$  آغاز به کار می‌کند، موج انفجاری در راستای جهت  $Z$  حرکت خواهد کرد. موج‌های ایجاد شده از نوع فشاری خواهند بود. این موج در انتهای آزاد سطح، تبدیل به موج کششی می‌گردد. در هنگام عبور موج فشاری، تنش‌ها به مرور تغییر یافته و کاهش می‌یابند. در شرایط مورد آزمایش، حوالی زمان  $t = 500\mu s$  تغییرات تنش‌ها به صفر

<sup>1</sup> Local  
<sup>2</sup> Explosive method

### مدل حرارتی جوش

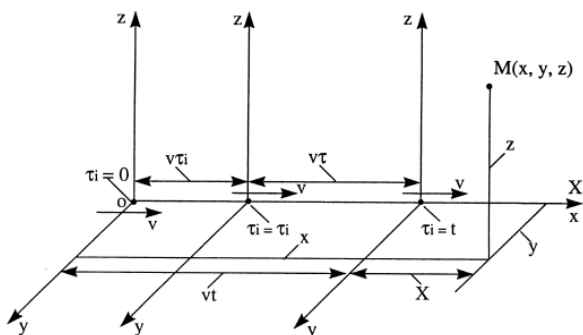
معادله دیفرانسیل هدایت حرارتی به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

در این صورت عبارت زیر، رابطه فوق را ارضا می‌کند [6]:

$$T = \frac{Q}{8(\pi k t)^{\frac{3}{2}}} e^{-[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]/4kt} \quad (5)$$

شکل (۲) شماتیکی از مسئله منبع حرارتی متحرک می‌باشد.  $X$ ،  $Y$  و  $Z$ ، مختصات مطلق را نشان می‌دهد و  $X$ ،  $Y$  و  $Z$ ، مختصات متحرک در راستای محور  $X$  را نشان می‌دهد.



شکل (۲) - شماتیک مختصات متحرک

در این راستا، باید افزایش دمای نقطه  $M(x, y, z)$  در زمان  $t$  ناشی از منبع حرارتی متحرک با قدرت  $Q$  مشخص گردد. در زمان  $t_i$ ، منبع حرارتی متحرک به اندازه  $v t_i$  حرکت نموده است. بنابراین فاصله بین منبع حرارتی و نقطه  $M$ ، به شکل زیر می‌باشد:

$$\sqrt{(x - v t_i)^2 + y^2 + z^2} \quad (6)$$

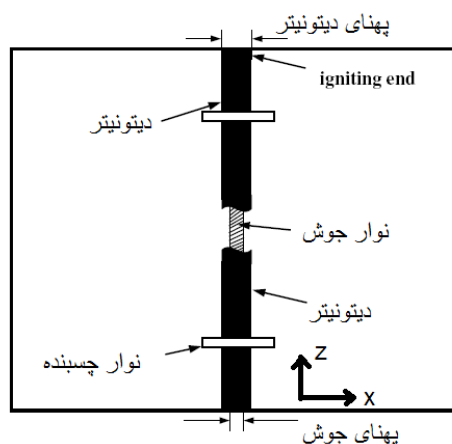
در این صورت افزایش دمای  $d\theta_M$  در نقطه  $M$  در زمان  $t$  در اثر گرمای آزاد شده، در زمان  $t_i$  به شکل زیر خواهد بود:

$$dT = \frac{Q d\tau_i}{8\rho c(\pi k \tau_i)^{\frac{3}{2}}} e^{-[(x-v\tau_i)^2 + y^2 + z^2]/4k\tau_i} \quad (7)$$

برای بیان چگونگی توزیع شار گرمای ناشی از قوس شعله جوش، از فرمولاسیون مدل دیسکی پاولیک که براساس توزیع گاوسی شار حرارتی است، استفاده می‌گردد. روابط ارائه شده در این قسمت در واقع فرم کلی مدل دیسکی پاولیک به همراه اصلاحیه های منبع حجمی پالی، هیبرت و وستبای می‌باشد.

در هنگام ارائه این مدل حرارتی، اطلاعات اندکی از چگونگی برخورد گرمای منبع (از نوع قوسی، پرتو الکترونی یا لیزر) با حوضچه سیال در دست بوده، لذا جریان سیال ایجاد شده در منطقه مذاب مد نظر

نزدیک می‌گردد [۳]. لذا از این زمان به بعد می‌توان اندازه تنش‌ها را در حالت تعادل فرض نمود و نهایتاً تنش‌های پسماند دچار توزیع مجدد شده و ماکزیمم کرنش کششی حذف می‌گردد.



شکل (۱) - فیزیک استفاده از روش انفجاری

### مدل ریاضی موج انفجاری

فرآیند انفجاری صورت گرفته در مدت زمانی کوتاه و اثرات حرارتی ناچیز همراه می‌باشد لذا می‌توان از تغییرات حرارتی چشم‌پوشی کرد. شبیه سازی کاهش تنش ناشی از انفجار، توسط تابع فشار زیر قابل بیان می‌باشد [۳]:

$$P(x, z, t) = p(x)q(z, t) \quad (1)$$

که در آن  $q(z, t)$  تابعی برای نمایش تغییرات موج نسبت به زمان بوده و  $p(x)$  تغییرات در جهت  $X$  را نشان می‌دهد که می‌توان نوشت:

$$P(x) = \begin{cases} P_0 F(x) & , 0 \leq x \leq x_0 \\ 0 & , x > x_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$q(z, t) = \begin{cases} 0 & t \leq z/v_0 \text{ or } t \geq z/v_0 + 1.3 \\ \frac{t}{z/v_0 + 0.13} & z/v_0 \leq t \leq z/v_0 + 1.17 \\ 1 & z/v_0 + 1.17 \leq t \leq z/v_0 + 1.04 \\ \frac{t}{z/v_0 + 0.26} & z/v_0 + 1.04 \leq t \leq z/v_0 + 1.3 \end{cases} \quad (3)$$

در روابط فوق  $P_0$ ،  $x_0$ ،  $v_0$  و  $t$  به ترتیب ماکزیمم بارگذاری، پهنای دیتونیترا، سرعت انفجاری و زمان می‌باشند.

اغلب دو گونه از توابع  $F(x)$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. در

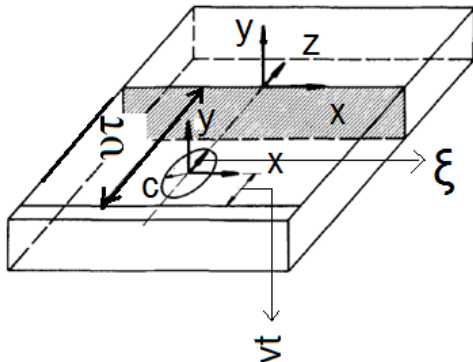
دیتونیتراهای نواری،  $F(x) = \text{Cos}(\frac{\pi}{x_0} x - \frac{\pi}{2})$  و در دیتونیتراهای

صفحه‌ای  $F(x) = 1$  می‌باشد.

در اینجا از فاکتوری استفاده شده که موقعیت منبع حرارتی در زمان  $t = 0$  نسبت به مختصات ثابت تعیین می‌گردد که با  $\tau$  نمایش داده می‌شود. تبدیل مختصات متحرک به ثابت و بالعکس را میتوان از طریق رابطه زیر پیش برد:

$$\xi = Z + v(\tau - t) \quad (10)$$

سرعت جوشکاری  $v: m/s$



شکل (۴)-مختصات متحرک برای شار حرارتی جوش

در این صورت معادله (۹) به شکل زیر تبدیل می‌گردد:

$$q(x, z, t) = \frac{3Q}{\pi c^2} e^{-\frac{3xz}{c^2}} e^{-\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{c^2}} \quad (11)$$

این رابطه برای  $c^2 < \xi^2 + \eta^2$  برقرار است و در  $c^2 > \xi^2 + \eta^2$  مقدار تابع فوق صفر می‌باشد. برای دوری از تحلیل سه بعدی، اغلب فرض می‌گردد که  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$  باشد؛ از این رو انتقال گرما به صفحه  $(x-y)$  (محدود شده که در صفحه  $Z = 0$  جای می‌گیرد. این ساده سازی در صورتی که سرعت جوش پایین بوده و حرارت ورودی جوش بالا باشد، می‌تواند باعث خطای قابل توجهی گردد.

محاسبه تولید انرژی بی‌بعد شده در خلال جوشکاری

بازده قانون اول برای فرآیند جوشکاری به فرم زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta_I = \frac{\text{انرژی لازم برای تولید باند جوشکاری}}{\text{کل انرژی ورودی}} \quad (12)$$

بازده قانون دوم برای فرآیند جوشکاری به فرم زیر تعریف می‌گردد [۸]:

$$\eta_{II} = \frac{\text{انرژی لازم برای تولید باند جوش}}{\text{کل انرژی ورودی}} \quad (13)$$

اختلاف دو بازده انرژی و انرژی ناشی از تولید انرژی است، لذا می‌توان نوشت:

$$\eta_T - \eta_{II} = \frac{\text{تولید انرژی}}{\text{کل انرژی ورودی}} \quad (14)$$

نبوده ولی به هر حال مدل دیسکی بسیار واقع بینانه تر از مدل نقطه ای است. در حقیقت برای یک شعله پیش گرمایش که باعث تولید مذاب نگردد، این مدل می‌تواند واقعاً مدل مناسبی باشد. برای توزیع سطحی شار مطابق شکل (۳) به فرم زیر می‌باشد [۷]:

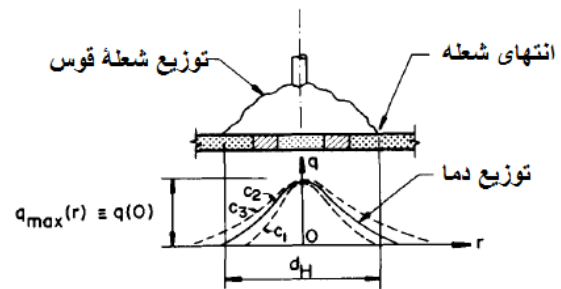
$$q(r) = q(0) e^{-cr^2} \quad (8)$$

شار سطحی در شعاع  $r$  بر حسب  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

ماکزیمم شار در مرکز منبع حرارتی بر حسب  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

$c$ : ضریب تمرکز  $(m^{-2})$

$r$ : فاصله شعاعی از مرکز منبع حرارتی



شکل (۳)-منبع حرارتی دیسکی پاولیک

در شکل (۳)،  $c_1 > c_2 > c_3$  می‌باشد و  $d_H$  منطقه داغ می‌باشد و در مورد معنای فیزیکی  $c$  می‌توان گفت که اگر شار یکنواخت  $q(0)$  در یک دایره به قطر  $d$  توسعه یابد و  $d = \frac{2}{\sqrt{c}}$  در این صورت نرخ ورود

انرژی به صورت  $V\dot{m}\eta$  خواهد بود. دایره دقیقاً آن انرژی را از قوس دریافت می‌دارد. لذا  $c$  به پهنای منبع حرارتی وابسته بوده و هر چه منبع متمرکزتر باشد،  $d$  کمتر و  $c$  بیشتر خواهد بود. آزمایشات نشان داده که مبالغ مهمی از گرمای قوس مستقیماً از طریق جا به جایی و تشعشع به فلز منتقل می‌شود بدون این که از حوضچه سیال عبور نماید. بر این اساس بود که پاولیک سعی نمود توزیع و مقدار گرما را داخل قطعه نمایش دهد. در مطالعات آن‌ها، اتلافات ناشی از تشعشع و جا به جایی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

فریدمن، کروتز، سگرلیند فرم دیگری از دیسک پاولیک را ارائه دادند بدین صورت که منبع حرارتی خود را در یک مختصات متحرک مطابق شکل (۴) به فرم زیر بیان کردند:

$$q(x, \xi) = \frac{3Q}{\pi c^2} e^{-\frac{3xz}{c^2}} e^{-\frac{3\xi^2}{c^2}} \quad (9)$$

که در آن:

$Q$ : نرخ انرژی ورودی  $(W)$

$c$ : مشخصه شعاعی توزیع شار  $(m)$

مطابق رابطه کلازیوس-دوهم<sup>۳</sup> چنانچه تولید انترویی در واحد حجم و زمان با  $\dot{\gamma}$  نمایش داده شود، در این صورت:

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma: \dot{\epsilon}_p}{T} - \frac{A_k \dot{v}_k}{T} - \frac{J_q \cdot \nabla T}{T^2} \geq 0 \quad (15)$$

که در آن  $\sigma$  تانسور تنش،  $\epsilon_p$  قسمت پلاستیک تانسور تنش،  $T$  دمای مطلق،  $A_k$  نیروهای ترمودینامیکی که در اثر متغیرهای درونی ایجاد می‌گردد و  $J_q$  شار گرما می‌باشد. سه عبارت سمت راست رابطه فوق بیانگر اتلافات صورت گرفته می‌باشند. عبارات اول، دوم و سوم به ترتیب اتلافات ناشی از کرنش‌های پلاستیک، تغییرات نیروهای درونی و اتلافات هدایت حرارتی می‌باشند [۸]. تحقیقات نشان می‌دهد که میزان اتلافات ناشی از نیروهای درونی تنها ۵ تا ۱۰ درصد مقدار اتلافات پلاستیک می‌باشد لذا قابل نظر کردن است [۹].

در این تحقیق از عبارت اول سمت راست رابطه (۱۵) برای تولید انترویی صورت گرفته در اثر کرنش‌های پلاستیک استفاده می‌گردد. از عبارت دوم صرف نظر می‌گردد و برای نشان دادن نرخ تولید انترویی به ازای واحد حجم به صورت محلی، دو بعدی از رابطه زیر استفاده می‌گردد [۱۰]:

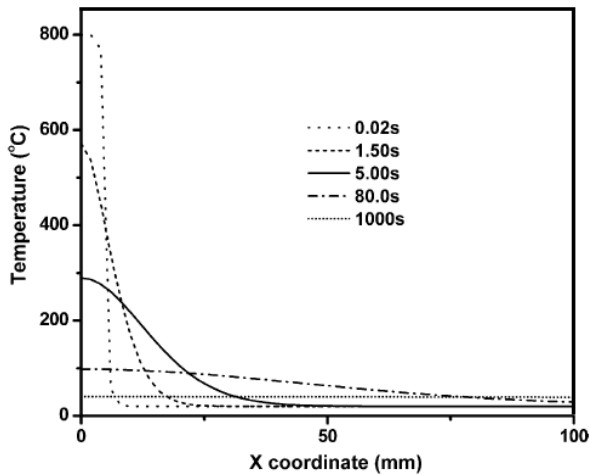
$$\dot{s}_{gen} = \frac{k}{T^2} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{T} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

در رابطه فوق می‌توان از گرادیان‌های سرعت مربوط به حرکت سیال مذاب صرف نظر کرد [۱۱-۱۳].

### بحث و نتیجه‌گیری

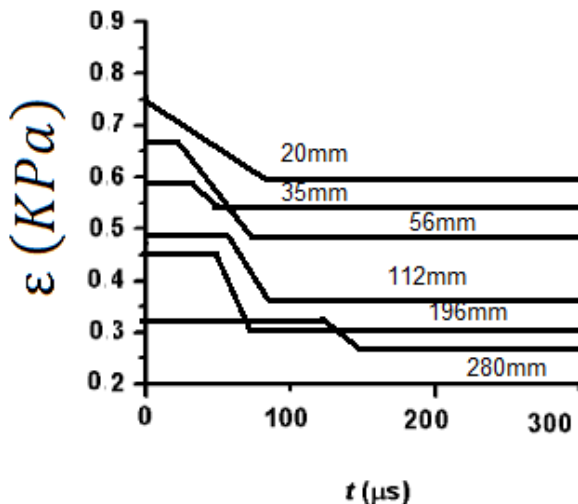
اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در این تحقیق بر روی فولاد 16MnR صورت گرفته است که هدایت حرارتی و گرمایی ویژه آن به ترتیب عبارتند از:  $36 \frac{W}{m \cdot K}$  و  $557 \frac{J}{kg \cdot K}$ . نتایج نهایی با مرجع [۳] مقایسه گردیده است. در آزمایش صورت گرفته از دیتونیت‌های صفحه‌ای با ماکزیمم بارگذاری ۰/۵ GPa و سرعت انفجاری ۰/۵۴ متر بر ثانیه استفاده شده است. و برای استحصال داده‌ها از کد مطلب استفاده گردیده است.

شکل (۵) توزیع دما در چند لحظه مختلف پس از اتمام جوشکاری را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در حوالی باند جوش مقدار گرادیان دمایی قابل ملاحظه است و به تدریج با فاصله گرفتن از نوار، گرادیان‌ها کاهش می‌یابد. لذا انتظار می‌رود بر روی نوار جوش ماکزیمم تنش‌های پسماند را شاهد باشیم. از طرفی مطابق شکل مذکور در حوالی زمان ۱۰۰۰ ثانیه، دمای قطعه به دمای محیط می‌رسد لذا برای محاسبه تولید انترویی محلی از رابطه (۱۶) نسبت به زمان تا زمان ۱۰۰۰ ثانیه انتگرال گرفته می‌شود تا تولید انترویی کل در این بازه زمانی محاسبه گردد.



شکل (۵) - توزیع دما برای جوشکاری در سرعت ۷/۵ میلی‌متر بر ثانیه

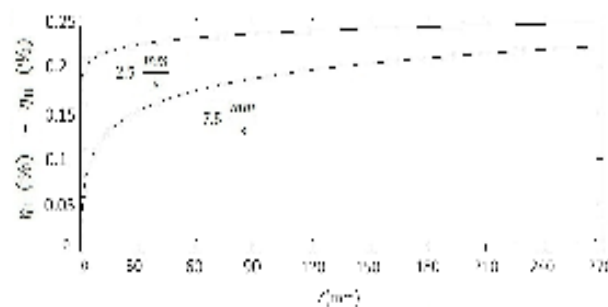
شکل (۶) تولید کرنش در اثر موج‌های فشاری در زمان‌های مختلف می‌باشد [۳].



شکل (۶) - کرنش تولید شده در اثر موج فشاری

شکل (۷) چگونگی تغییرات تولید انترویی بی‌بعد شده را به نمایش می‌گذارد. مطابق شکل، با افزایش فاصله دیتونیت، این پارامتر افزایش می‌یابد که نشان از افزایش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری می‌باشد. در ضمن با افزایش سرعت جوشکاری، میزان تاثیر گذاری فاصله دیتونیت بر انترویی بی‌بعد شده افزایش می‌یابد. بدین معنا که در سرعت بالاتر حساسیت قطعه نسبت به تغییرات مکان دیتونیت بیشتر است. نکته حائز اهمیت این است که در فواصل دورتر دیتونیت، تاثیر استفاده از روش انفجاری تقریباً قابل چشم‌پوشی می‌باشد. توجه گردد که میزان انترویی بی‌بعد شده برای سرعت‌های ۷/۵ و ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه بدون استفاده از روش انفجاری به ترتیب برابر ۰/۲۶ و ۰/۳۲ می‌باشد [۳] که کاهش مقدار آن پس از استفاده از روش انفجاری موید کاهش تنش‌های پسماند جوشکاری می‌باشد.

- [9] Amiri, M.; Naderi, M.; Khonsari, M.M. 2011, An experimental approach to evaluate the critical damage. *Int. J. Damage Mech.* 20, pp.89–112.
- [10] Bejan, A. 1982 "entropy generation through heat and fluid flow", New York, USA.
- [11] Fallahi, A., Jafarpur, K., Nami, M.R., 2011 "Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment", *Scientia Iranica*, Vol.18, pp.398-406.
- [12] Sahin, A.Z., Ayar, T., Yilbas, B., S. 2010 "Laser welding: the first and second law analysis", *International Journal of Exergy*, Vol.7, No.5, pp.535-546.
- [13] Dong, W., Lu, S., Li, D., Li, Y. 2011 "GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, No.54, pp.1420-1431.



شکل (۷) - تغییرات انتروپی بی بعد شده با محل دیتونیت

### خلاصه نتایج

بررسیهای صورت گرفته نشان می دهد که انتروپی بی بعد شده می تواند به عنوان روشی مناسب جهت بررسی میزان تاثیرگذاری روش انفجاری در کاهش تنش های پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان می دهد که برای سرعت ۲/۵ میلی متر بر ثانیه چنانچه دیتونیت در فاصله بیشتر از ۳۰ میلی متر قرار گیرد، تغییرات فاصله تاثیر چندانی بر میزان بازدهی روش مورد استفاده نخواهد داشت. این فاصله برای سرعت ۷/۵ میلی متر بر ثانیه در حدود ۲۷۰ میلی متر می باشد. ضمناً با افزایش سرعت جوشکاری، تاثیرگذاری روش انفجاری بر میزان تنش های پسماند بیشتر خواهد بود.

### مراجع

- [1] Smith, William F.; Hashemi, Javad 2006, *Foundations of Materials Science and Engineering* (4th ed.), McGraw-Hill, ISBN 0-07-295358-6.
- [2] F.C. Liu, B. Lv, F.C. Zhang, S. Yang 2011, "Enhanced work hardening in Hadfield steel during explosive treatment", *Materials Letters* 65 pp.2333–2336.
- [3] Zhang J., Liu K., Zhao K., Li X., Liu Y., Zhang K. 2005, "A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment", *International Journal of Solids and Structures* 42 pp.3794–3806.
- [4] Kai-Xin L., Jin-Xiang Zh., Kai Zh., Ziao-Jie L., 2005 "Mechanism of explosive technique on relieving welding residual stress", *china physics letter*, vol.22, No.3, pp.744-746.
- [5] Garcia-Jacomino J.L., Burgos Sola J., Cruz-Crespo A., M. Alvarez Luna J., Arteaga G., 2009 "Use of explosives in the reduction of residual stresses in the heated zone of welded joints" *Welding International*, Vol. 24, No. 12, pp. 920–925.
- [6] Carslaw. H.S., Jaeger. J.C., 1959. "Conduction of heat in solids" Oxford University Press, London.
- [7] Goldak J., Chakravarti A., Bibby M., 1983 "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources", Vol.15B, *METALLURGICAL TRANSACTIONS*, pp.299-305.
- [8] Amiri, M.; Naderi, M.; Khonsari, M.M. 2012, "Article On the Role of Entropy Generation in Processes Involving Fatigue" *Entropy* 14, pp.24-31.

