

باسمه تعالی  
 اولین همایش ملی مهندسی مکانیک NCME2012  
 ۲۶ و ۲۷ مهرماه ۱۳۹۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز

تاریخ: ۱۳۹۱/۰۷/۲۶  
 شماره: ۵۵۵۳۳

بِسْمِ تَعَالَى  
 کواهی شرکت در همایش

جناب آقای سعید حنایی

برپاس تلاشهای علمی و تحقیقاتی و حضور ارزشمند جنابعالی در اولین همایش ملی مهندسی مکانیک بسمت ارزنده مبارکباد عرض می‌گردد.

بررسی کیفیت جوش های قوسی به کمک بازدهی نورمود پناامیکی  
 که با همکاری آقای مجتبی ماموریان و به صورت سخنرانی ارائه نمودید این کولتیس را شایسته می‌گردد. امید است نتایج دستاورد های علمی  
 و پژوهشی این موفق باشید

دکتر محسنی صفری  
 مدیر علمی همایش

امامعلی دوشی  
 دبیر اجرایی همایش

دانشگاه آزاد اسلامی  
 واحد الیگودرز

دانشگاه الیگودرز - میدان دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز - حوزه معاونت پژوهش و فناوری - دبیرخانه اولین همایش ملی مهندسی مکانیک  
 تلفن و شماره: ۰۲۶۳۳۳۳۳۳۳۳  
 website: www.iau-aligudarz.ac.ir - email: ncme2012@iau-aligudarz.ac.ir

## بررسی کیفیت جوش‌های قوسی به کمک بازدهی ترمودینامیکی

سعید حنایی<sup>1</sup>، مجتبی ماموریان<sup>2</sup>

<sup>1</sup>دانشجوی تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، [saeid2003soh@yahoo.com](mailto:saeid2003soh@yahoo.com)  
<sup>2</sup>استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد، [mamourian@um.ac.ir](mailto:mamourian@um.ac.ir)

### چکیده

تحلیل بازده گرمایی جوش را می‌توان به منظور حداقل سازی اتلافات انرژی در جوشکاری به کار برد. در مطالعه حاضر جوشکاری قوسی و بازده مربوط به آن بررسی می‌گردد. بازده قانون اول و قانون دوم برای جوش محاسبه و نسبت به پارامترهای مورد بحث فرموله می‌شود. این پارامترها عبارتند از نسبت جرم اضافی نوار جوش، نسبت جرم اتلاف شده نوار و گرمای اتلاف شده که در طی متن معرفی می‌شوند. به عنوان یک قاعده کلی می‌توان گفت بازده قانون اول و دوم با افزایش نسبت جرم اضافی و نسبت گرمای اتلافی کاهش می‌یابد. از آنجا که فرآیندهای مدرن تکنولوژی جوش امکان کنترل فرآیند جوش را در حین عملیات فراهم می‌سازد، تحلیل حاضر می‌تواند به عنوان فرمول کنترل کننده در سنسورهای بک-فیس مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوسی، بازدهی انرژی، بازدهی انرژی، نسبت جرم اضافی نوار جوش، نسبت حرارت اتلافی

### 1- مقدمه

معنای کاهش اتلافات انرژی است و از سویی دیگر به معنای کاهش تولید انرژی است. برای این منظور از دو بازده قانون اول و قانون دوم استفاده شده است. در نظر نگارندگان، استفاده از این دو بازده علاوه بر سهولت استفاده، پاسخی دقیق به همراه دارد. تحقیقات متعددی بر روی کیفیت جوش انجام گرفته است. میاشیتا و همکاران در سال 2005 جوشکاری لیزری قطعاتی با جنس متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توانستند چگونگی نفوذ ناحیه سیال حوضچه جوش را به قسمت جامد بررسی نمایند [1]. ملیوکوف و همکاران در سال 2006 میزان گرمای بهینه برای اتصالاتی با قطر کم

یکی از مورد اعتمادترین روش‌های اتصال قطعات در صنعت، استفاده از جوشکاری می‌باشد که به دلیل آسان بودن فرآیند و قیمت پایین می‌تواند نیازهای متعدد صنعت را ارضاء نماید. با اینحال تلاش برای افزایش کیفیت جوش همچنان ادامه دارد. پارامترهای متعددی بر کیفیت جوش تاثیر گذار می‌باشد از جمله دمای اولیه قطعه، دمای محیط، جنس قطعات، نوع الکتروود، سرعت پروسه جوشکاری و ... در این میان تحلیل گرمایی فرآیند جوشکاری شامل اطلاعات سودمندی در جهت بهینه سازی جوش می‌باشد. بهبود کیفیت جوش از یک طرف به

این تحقیق می‌توان به عنوان فرمول کنترل کننده تجهیزات جوشکاری بهره برد.

## 2- محاسبه بازده انرژی و بازده انرژی در فرآیند جوشکاری

با استفاده از علائم اختصاری نشان داده شده در جدول (1) رابطه بقای انرژی در جوشکاری به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} \quad (1)$$

جدول (1) - علائم اختصاری مورد استفاده

$C_p$	گرمای ویژه (J/kg K)
$E$	انرژی (J)
$h$	انتالی (J/kg)
$L$	گرمای نهان (J/kg)
$m$	جرم (kg)
$P$	قدرت (W)
$Q$	انتقال گرما (J)
$s$	انرژی (J/kg K)
$t$	زمان (s)
$T$	دما (K)
$x$	انرژی (J/kg)
$\alpha$	نسبت جرم اضافه
$\beta$	نسبت جرم اتلافی

چنانچه رابطه (1) برای یک حجم کنترل بسیار کوچک نظیر آنچه که در شکل (1) نشان داده شده است، نوشته شود، خواهیم داشت:

را بررسی نمودند [2]. آنها شرایط مرزی بهینه جهت توصیف معادله گرمای جوش را تعیین نمودند. میبیدی در سال 2007 مدل المان محدود اتصالات لب به لب برای پدیده‌های انتقال در جوش را مورد استفاده قرار داد [3]. در همین راستا صباغزاده و همکاران در سال 2007 اثر تغییرات پارامترهای مختلف مربوط به پلاسمای جوش‌های لیزری را مورد بررسی قرار دادند.

آن‌ها تغییرات کیفیت جوش را در اثر تغییرات عمق نفوذ و پهنای حوضچه مذاب به روش اسپکتروسکوپی پلاسما بررسی نمودند [4].

بحث از ترمودینامیک جوشکاری به منظور افزایش کیفیت جوش در چند سال اخیر مطرح گردیده است [5]. القحطانی در سال 2008 میلادی، تاثیر پارامترهای پالس لیزر جوشکاری را بر نرخ تولید انرژی مورد مطالعه قرار داد [6].

ارتباط میان بازگشت‌ناپذیری (تولید انرژی) و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، توسط فلاحی و همکاران در سال 2011 میلادی ارائه گردید [7].

در آن تحقیق، با استفاده از رابطه تولید انرژی بر حسب توزیع دما، تاثیر توالی جوش بر میزان تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت.

در پرتو فعالیت‌های پیش گفته، نگارندگان از بازدهی انرژی و بازدهی انرژی برای بررسی تاثیر تغییرات جرم نوار جوش و انرژی اتلافی آن در کیفیت جوش استفاده نموده‌اند. تاثیر این پارامترها بر کیفیت جوش تا به حال مورد بررسی محققین قرار نگرفته است.

از آنجا که امروزه بسیاری از پروسه‌های جوشکاری توسط تجهیزات رباتیکی صورت می‌پذیرد، نیاز به کنترل کیفیت در خلال انجام پروسه جوشکاری ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور می‌توان از سنسور بک-فیس برای بررسی وضعیت نوار جوش بهره برد و سپس از طریق روابط حاصله در این تحقیق می‌توان داده‌های این سنسورها را به کیفیت جوش مرتبط ساخت و تولید انرژی و اتلاف انرژی در خلال جوشکاری را به حداقل رساند.

توجه گردد که در سنسورها استفاده از روابط تحلیلی مناسب‌تر از روابط عددی است چرا که روابط تحلیلی سرعت فیدبک بالاتری دارند. از این‌رو از روابط حاصله در

که در آن نرخ جرم گذاری نوار جوش که با  $\dot{m}_{loss}$  نشان داده می شود به صورت زیر است:

$$\dot{m}_{bond} = \dot{m}_{flat-bond} + \Delta \dot{m}_b \quad (8)$$

در رابطه (8)،  $\Delta \dot{m}_b$  عبارتست از اختلاف اندازه نرخ تشکیل نوار جوش معمولی و نرخ تشکیل نوار جوش مسطح. این اختلاف جرم به صورت گنبدی و برجسته بر روی نوار جوش قرار می گیرد. نهایتاً معادله بقای انرژی را به شکل زیر می توان بازنویسی نمود:

$$P_{in} = \dot{Q}_{loss} + \dot{m}_{flat-bond}(h_b - h_{in}) + \Delta \dot{m}_b(h_b - h_{in}) + \dot{m}_{loss}(h_{loss} - h_{in}) \quad (9)$$

در طی فرآیند جوشکاری مقداری از جرم نوار جوش در اثر گرمایش اضافی و تبخیر از بین می رود. از معادله (9) می توان نسبت به زمان پروسه جوشکاری انتگرال گیری کرد که به شکل زیر می باشد:

$$\int_0^{\Delta t} P_{in} dt = \int_0^{\Delta t} \dot{Q}_{loss} dt + \int_0^{\Delta t} \dot{m}_{flat-bond}(h_b - h_{in}) dt + \int_0^{\Delta t} \dot{m}_{loss}(h_{loss} - h_{in}) dt + \int_0^{\Delta t} \Delta \dot{m}_b(h_b - h_{in}) dt \quad (10)$$

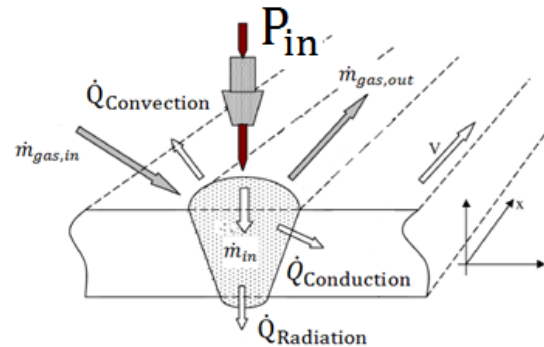
که در آن  $\Delta t$  زمان لازم برای انجام پروسه جوشکاری است. با فرض عدم تغییر مشخصات مواد در طی فرآیند جوش می توان نوشت:

$$Q_{in} = Q_{loss} + \dot{m}_{flat-bond}(h_b - h_{in}) + \Delta \dot{m}_b(h_b - h_{in}) + \dot{m}_{loss}(h_{loss} - h_{in}) \quad (11)$$

بر مبنای رابطه (11) بازده انرژی به شکل زیر تعریف می گردد:

$$\eta_i = \frac{\text{انرژی لازم برای تولید نوار جوش}}{\text{کل انرژی ورودی}}$$

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (2)$$



شکل (1) تبادل جرم و انرژی صورت گرفته در خلال جوشکاری قوسی

فرم باز شده رابطه (2) به شکل زیر می باشد:

$$P_{in} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} + \dot{m}_{gas,in} h_{gas,in} = P_{refl} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{m}_{gas,out} h_{gas,out} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (3)$$

می توان نوشت:

$$\dot{Q}_{loss} = P_{refl} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} - \dot{m}_{gas,in} h_{gas,in} \quad (4)$$

لذا:

$$P_{in} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} = \dot{Q}_{loss} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (5)$$

و یا می توان نوشت:

$$P_{in} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} + \dot{Q}_{loss} \quad (6)$$

برای فرض حالت شبه پایا (که در سرعت های معمول جوشکاری، فرضی قابل اعتماد است [8]) بقای جرم به شکل زیر می باشد:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{bond} + \dot{m}_{loss} \quad (7)$$

بازده انرژی برای فرآیند جوشکاری به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_{II} = \frac{m_{bond}(h_b - h_{in})}{Q_{in}} \quad (12)$$

و یا می توان نوشت:

$$\eta_{II} = \frac{\text{انرژی لازم برای تولید نوار جوش}}{\text{کل انرژی ورودی}} \quad (20)$$

که در آن می توان نوشت:

$$X_{in} = \int_0^{\Delta t} P_{in} \quad (21)$$

نرخ تولید انرژی سبب کاهش نرخ انرژی داخل سیستم می گردد. این واقعیت فیزیکی را می توان از طریق رابطه زیر فرموله کرد:

$$x_b - x_{in} = (h_b - h_{in}) - T_0(s_b - s_{in}) \quad (22)$$

و یا می توان نوشت:

$$x_b - x_{in} = C_{ps}(T_m - T_0) + L_m - T_0 \left[ C_{ps} \ln \left( \frac{T_m}{T_0} \right) + \frac{L_m}{T_m} \right] \quad (23)$$

لذا با تلفیق روابط (20) و (23) خواهیم داشت:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{m}_{bond} (C_p(Solid)(T_m - T_{Pr}) + L_m)}{\dot{Q}_{Conduction} + \dot{Q}_{Convection} + \dot{m}_{bond} (-T_0 [C_p(Solid) \ln \left( \frac{T_m}{T_{Pr}} \right) + \frac{L_m}{T_m}])} + \frac{\dot{Q}_{Radiation} + \dot{m}_{Gas,out} h_{Gas,out}}{\quad} \quad (24)$$

با استفاده از روابط (12) و (14) بازده انرژی به صورت رابطه (25) خواهد بود:

$$\eta_{II} = \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha + \beta \left( \frac{h_{loss} - h_{in}}{h_b - h_{in}} \right) + \gamma} \left\{ 1 - \frac{T_0 \left[ C_{ps} \ln \left( \frac{T_m}{T_0} \right) + \frac{L_m}{T_m} \right]}{C_{ps}(T_m - T_0) + L_m} \right\} \quad (25)$$

$$\eta_I = \frac{m_{flat-bond}(h_b - h_{in}) + \frac{\Delta m_b (h_b - h_{in})}{m_{loss}(h_{loss} - h_{in})}}{Q_{loss} + m_{flat-bond}(h_b - h_{in})} \quad (13)$$

که در آن:

$$h_b - h_{in} = C_{ps}(T_m - T_0) + L_m \quad (14)$$

و به همین صورت:

$$h_{loss} - h_{in} = C_{ps}(T_m - T_0) + L_m + C_{pl}(T_{evap} - T_m) + L_{evap} \quad (15)$$

اکنون می توان پارامتر جرم اضافی را برای جوش به صورت زیر تعریف نمود:

$$\alpha = \frac{\Delta m_b}{m_{flat-bond}} \quad (16)$$

و نسبت جرم اضافه از بین رفته به شکل زیر است:

$$\alpha = \frac{\Delta m_{loss}}{m_{flat-bond}} \quad (17)$$

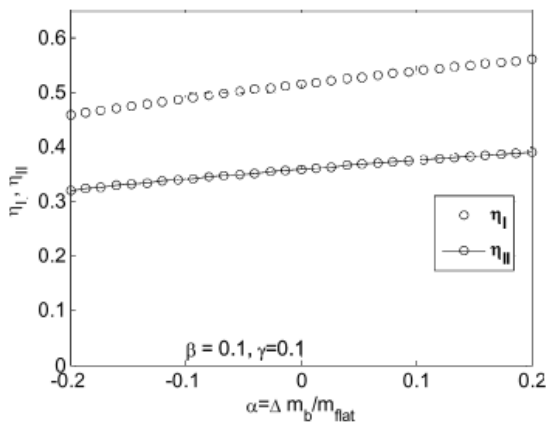
و نسبت گرمای اتلاف شده به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\gamma = \frac{Q_{loss}}{Q_{ideal}} = \frac{Q_{loss}}{m_{flat-bond}(h_b - h_{in})} \quad (18)$$

در این صورت رابطه بازده انرژی به شکل زیر قابل نوشتن است:

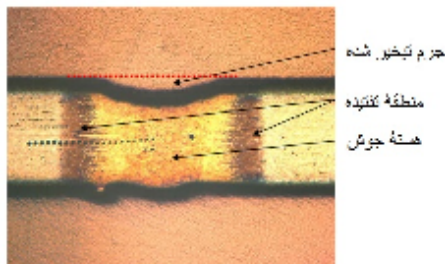
$$\eta_I = \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha + \beta \left( \frac{h_{loss} - h_{in}}{h_b - h_{in}} \right) + \gamma} \quad (19)$$





شکل (2) تغییرات بازده انرژی و بازده انرژی با نسبت جرم اضافی

در شکل (3) می توان نمونه‌ای از تبخیر و از بین رفتن نوار جوش در خلال جوشکاری را مشاهده نمود.



شکل (3) از بین رفتن مقداری از جرم نوار جوش در اثر تبخیر [9]

با وجود اینکه افزایش ضخامت نوار جوش، میزان انرژی ورودی بیشتری را می طلبد، مطابق شکل (2) افزایش نسبت جرم اضافی، میزان بازدهی قانون اول و دوم را افزایش می دهد. این افزایش به علت این است که نابودی انرژی در اثر خروج جرم، حداقل می گردد. به همین ترتیب بازده قانون دوم با افزایش نسبت جرم اضافی افزوده می گردد. با مقایسه بازده قانون اول و دوم مشاهده می گردد که بازده قانون اول بیشتر از بازده قانون دوم می باشد که این مطلب به خاطر تولید انتروپی در خلال پروسه گرمایش جوش می باشد که به موجب آن انرژی در دسترس در خلال جوشکاری کاهش می یابد. به هر حال مقدار تفاوت بازده قانون اول و دوم در حدود 15٪ می باشد. این مقدار تقریباً برای تمامی مقادیر نسبت جرم اضافی یکسان می باشد.

و یا می توان نوشت:

$$\eta_{II} = \eta_I \left\{ 1 - \frac{T_0 \left[ C_{ps} \ln \left( \frac{T_m}{T_0} \right) + \frac{L_m}{T_m} \right]}{C_{ps} (T_m - T_0) + L_m} \right\} \quad (26)$$

3- بحث و بررسی

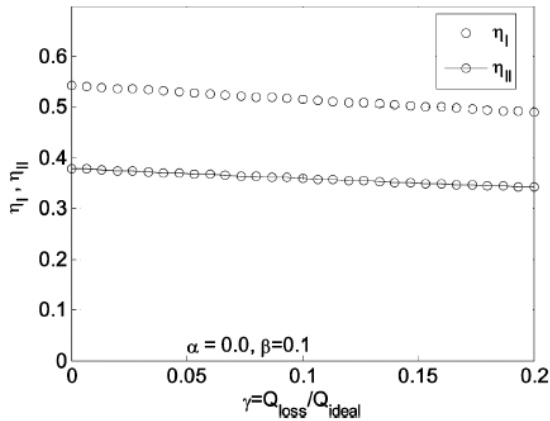
خواص قطعه مورد بررسی به صورت جدول (2) می باشد:

جدول (2) مشخصات حرارتی - مکانیکی [8]

پارامتر	مقدار
چگالی	7870 kg/m <sup>3</sup>
دمای ذوب	1808 K
گرمای نهان ذوب	272 kJ/kg
گرمای ویژه جامد	452 J/kg K
گرمای ویژه سیال	800 J/kg K
گرمای ویژه بخار	450 J/kg K
دمای تبخیر	3023 K
گرمای نهان تبخیر	6088 kJ/kg
دمای محیط	298 K

شکل (2) تغییرات بازده قانون اول و دوم را با نسبت جرم اضافی نشان می دهد. باید توجه گردد که نسبت جرم اضافی به عنوان نسبت جرم نوار جوش به نسبت جرم مسطح شده نوار جوش می باشد. در کاربرد های عملی ضخامت نوار جوش از ضخامت قطعه کار بزرگتر یا کوچکتر می باشد که به علت افزودگی بیش از نیاز ماده و یا دفع و تبخیر ماده در خلال جوشکاری می باشد. دفع ماده یا تبخیر هنگامی رخ می دهد که قدرت شعله جوش افزوده گردد.

سیستم جوشکاری می باشد که این خروج انرژی با افزایش نسبت اتلاف انرژی افزوده می گردد. اختلاف بین دو بازده تقریباً ثابت باقی می ماند. کوچکتر بودن بازده قانون دوم به علت تولید انتروپی می باشد.



شکل (5) تغییرات بازده قانون اول و دوم نسبت به نسبت اتلاف گرما

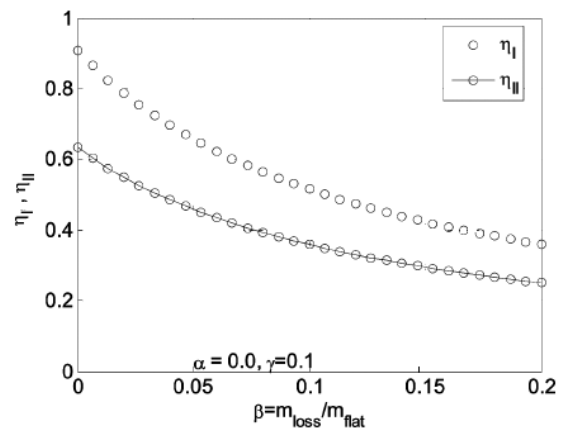
#### 4- جمع بندی

در طی این تحقیق روابط بازده انرژی و انرژی برای فرآیند جوشکاری قوسی محاسبه و پارامترهای نسبت جرم اضافی، نسبت جرم اتلاف شده و نسبت اتلاف گرما معرفی و فرموله شده است. نتایج نشان می دهد که بازده انرژی و انرژی با نسبت جرم اضافه رابطه مستقیم و با نسبت جرم اتلافی و نسبت اتلاف گرما رابطه عکس دارد. هرچند روند تغییر دو بازده با نسبت اتلاف گرما کمتر از تغییرات دو بازده نسبت به دیگر پارامترها است. از طرفی با تغییر هر سه پارامتر اختلاف دو بازده که برابر است با تولید انتروپی تقریباً ثابت باقی می ماند.

#### 5- مراجع

- [1] Miyashita, Y., Mutoh, Y., Akahori, M., Okumura, H., Nakagawa, I., Jin-Quran, X., 2005, *Laser welding of dissimilar metals aided by unsteady thermal conduction boundary element method analysis*, Welding International, Vol.19, No.9, pp.687-696.
- [2] Melyukov, V.V., Trufakin, A.I., Chirkov, A.M., Chastikov, A.V., 2006,

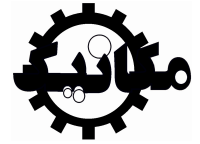
شکل (4) نشانگر تغییرات بازده قانون اول و دوم در مقایسه با نسبت جرم اتلاف شده است. در فرآیند جوشکاری افزایش انرژی ورودی منجر به اتلاف ماده از فلز جوشکاری می گردد. (شکل 3)



شکل (4) تغییرات بازده انرژی و بازده انرژی با نسبت جرم اتلافی

در واقع اتلاف ماده در پی افزایش حرارت ورودی و بالتبع آن تبخیر فلز صورت می پذیرد و گاهی هم اتلاف و نابودی در پی جریان پر فشار است که در اثر آن سیال از ناحیه مذاب به خارج آن ناحیه هدایت می گردد. به هر حال در تمامی انواع اتلاف ماده چه به صورت تبخیر و چه خروج ماده در اثر جریان پرفشار، انرژی در اثر خروج ماده پر انرژی از ناحیه نوار جوش تلف می شود. توجه گردد که میزان اختلاف بازده قانون اول و دوم با افزایش نسبت کاهش جرم کاهش می یابد. این مسئله بدین خاطر است که میزان انرژی جوشکاری با کاهش ضخامت فلز جوش کاهش می یابد.

شکل (5) تغییرات بازده قانون اول و دوم را با نسبت اتلاف گرما نشان می دهد. توجه گردد که نسبت اتلاف گرما برابر است با اتلاف گرما در طی فرآیند جوشکاری نسبت به حرارت ورودی برای جوشکاری ایده آل که در آن ها از اتلاف و نابودی ماده صرف نظر شده است. بازده قانون اول و دوم با افزایش نسبت اتلاف گرما کاهش می یابد اما این کاهش برای هر دو نوع بازده با شیب اندکی می باشد. زیرا تولید انتروپی سبب کاهش بازده قانون دوم می گردد. بعلاوه کاهش بازده قانون اول نیز به موجب خروج انرژی از



*Modelling of the optimum thermal conditions of laser welding circumferential joints of small diameter*, Welding International, Vol.20, No.4, pp.311-315.

[3] Mayboudi, L.S., Birk, A.M., Zak, G., Bates, P.J., 2007, *Laser transmission welding of a lap-joint: thermal imaging observations and three-dimensional finite element modeling*, Transaction of the ASME: Journal of Heat Transfer, Vol.129, No.9, pp.1177-1186.

[4] sabbaghzadeh, J., Dadras, S., Torkamany, M.J., 2007, *Comparison of pulsed Nd:YAG laser welding qualitative features with plasma plume thermal characteristics*, Journal of Physics (Applied Physics), Vol.40, No.4, pp.1047-1051.

[5] T. Hoffmann, T., Baldea, G., Riedel, U., 2009, *Thermodynamics and transport properties of metal/inert-gas mixtures used for arc welding*, Proceedings of the Combustion Institute No.32, pp.3207-3214.

[6] Al-Qahtani, H., Yilbas, B.S., 2008, *Entropy generation rate during laser pulse heating: Effect of laser pulse parameters on entropy generation rate*, Optics and Lasers in Engineering No.46, pp. 27-33.

[7] 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.

[8] Hanaei, S., Mamourian, M., 2012, *Underwater Welding Residual Stress Analysis Through Pipes Wall Using Exergy Analysis*, The first International Conference of Oil, Gas, Petrochemical and Power Plants.

[9] 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, No.54, pp.1420-1431.

[10] Sluzalec, A., 2005, *Theory of thermomechanical processes in welding*, Springer, Netherlands.