ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org



بررسی عددی و تجربی اثر شکل لبه اتصال لولههای درزدار جوشکاری شده به روش القایی فرکانس بالا روی حرارت ایجاد شده فلز جوش

مرتضى غفار پور¹، حسن مسلمى نائينى^{2*}، داود اكبرى³

1- دانشجوي دكتراي، مهندسي مكانيك- ساخت وتوليد، دانشگاه تربيت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستى moslemi@modares.ac.ir ،14115-111

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این تحقیق، اثر شکل لبه اتصال روی ایجاد و گرادیان دمایی فلز جوش در لولههای درزدار مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، کاهش حرارت ایجاد شده در فلز جوش با تغییر شکل لبه اتصال و کاهش گرادیان دمایی در راستای ضخامت است. شکل لبه اتصالهای مختلفی برای دستیابی به شکل لبه اتصال مناسب به صورت تجربی و عددی با استفاده از نرم افزار کامسول مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، برای بررسی خواص مکانیکی مانند استحکام نهایی و ازدیاد طول فلز جوش، از آزمونهای تجربی مخرب و غیر مخرب استفاده	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 25 فروردین 1399 داوری اولیه 14 اردیبهشت 1399 پذیرش: 1۳خرداد 1399
شده است. همچنین، ارزیابی خواص متالورژیکی مانند مرز دانهها و گسترش منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهند که با تغییر لبه اتصال، دمای ایجاد شده 19 درصد و گرادیان دمایی در فلز جوش کاهش مییابد. به دنباله آن مرز دانهها افزایش یافته و پروفیل فلز جوش مستطیلی شکل را منتج میشود. استحکام کششی نهایی 5 درصد افزایش مییابد اما تغییر چندانی در ازدیاد طول مشاهده نمیشود.	کلیدواژگان: شکلدهی غلتکی سرد جوشکاری القابی فرکانس بالا گرادیان دمایی شکل لبه اتصال

Numerical and experimental investigation of the joint type effect on the heat created in weld metal in the pipe welded by high frequency induction welding

Morteza Ghaffarpour, Hassan Moslemi Naeini^{*}, Davod Akbari

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, moslemi@modares.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 13 April 2020	This paper has focused on the joint type effect on the creation and gradient temperature of weld metal in the welded pipe. The main purpose is to reduce the heat generated in the weld metal and the temperature gradient
Accepted: 2 June 2020	in the pipe thickness direction, by joint type Changes. To obtain a suitable joint type, different joint types have been studied experimentally and numerically by Comsol software. By using destructive and non-destructive
Keywords: Cold roll-forming High frequency induction welding Temperature gradient Joint type	tests, the mechanical properties, such as the ultimate tensile strength and the elongation of the weld metal, have been investigated. Evaluation of the metallurgical properties, for instance, the grain boundary and the enlargement of the heat affected zone, has also been examined. The results show that changing the joint type reduces the generated temperature 19% and the temperature gradient in the weld metal. Follow it, the grain boundaries increase and a rectangular weld metal profile is created. Increases the ultimate tensile strength 5% but not obvious change in elongation.

1– مقدمه

کمتر شود. بنابراین، اگرحرارت تولید شده جهت جوش کمینه باشد، گرادیان دمایی در مقطع فلز جوش یکنواخت باشد، منطقه متأثر از حرارت کاهش یابد میتوان لوله درزداری تولید نمود که دارای خواص مکانیکی بسیار نزدیک به خواص مکانیکی لولههای بدون درز باشد. شکل لبه اتصال، در جوشکاری القایی فرکانس بلا پارامتر مهمی در توزیع حرارت و عدم یا وجود عیوب جوشی بشمار میرود.

لولههای با درز جوش تولید شده به روش غلتکی سرد، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف داشته و جوانب مختلف ناشناختهای دارد، بنابراین نیاز به تحقیقات زیادی برای شناخت بیشتر این لولهها احساس می شود. این لولهها نیازمند خواص مکانیکی بالا هستند، اما وجود درز در بدنه آنها باعث می شود که استحکام و کیفیت ساخت آنها از لولههای فولادی بدون درز

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Ghaffarpour, H.n Moslemi Naeini, D. Akbari, Numerical and experimental investigation of the joint type effect on the heat created in weld metal in the pipe welded by high frequency induction welding, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 9, pp. 10- 24, 2020 (in Persian)

حرارت در لبه بالا و پایین ورق اتفاق میافتد. چویی و همکارانش [5] سازوکار تشکیل زائده (داخلی و خارجی) در اثر

جوشکاری فرکانس بالا را مورد بررسی قرار دادند. چونگ و

همکارانش [6] به بررسی عمر خستگی اتصالهای القایی

فرکانس بالا با استفاده از شبیهسازی مونته – کارلو پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که اگر پارامترهای جوشکاری به صورت بهینه

بکار گرفته نشود، انتشار ترک با سرعت بیشتری در فلز جوش

رخ خواهد داد و عمر خستگی به شدت کاهش مییابد. کیم و همکارانش [7] به بررسی کیفیت جوش فرکانس بالا توسط

عکسبرداری پرداختند. هدف بررسی کیفیت جوش به کمک

عکس برداری و تدوین یک الگوریتم بود که توسط عکس برداری

بتوان کیفیت جوش را پیشبینی کرد. هیون جانگ کیم و همکارانش [8] جوشکاری فرکانس بالا لولههای فولادی را به

صورت سهبعدی بررسی کردند. هدف این تحقیق بررسی اثر زاویهی Vee شکل بر روی حرارت ایجاد شده در ناحیهی جوش

بود. گونگور و همکارانش [9] ارتباط بین میکرو ساختار و

1-1- پيشينه پژوهش

مرتضی غفارپور و همکاران

جوشكارى شده با فرايند جوش القايى فركانس بالا پرداختند. هدف آنها بررسی اثر حرارت بر ریز ساختار ناحیهی جوش و بررسی کیفیت و چقرمگی جوش با آزمونهای کشش و شارپی بود. هان و ای ال یو و همکارانش [11] به تحلیل عددی فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالای لوله پرداختند. آنها راههای موثر بر افزایش کیفیت جوش القایی فرکانس بالا را مورد تحقیق قرار دادند. آنها دریافتند که شکل لبهی مناسب راهی برای جلوگیری از عیبهای جوش سرد و ذوب اضافی میباشد. اوکابی و همکارانش [12] به بررسی خطوط لولههای القایی فرکانس بالا با ضریب اطمینان بالا پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که برای حصول ضريب اطمينان بالا بايستي حرارت ورودي و توزيع آن بهینه باشند و در نهایت اکسیدهای ناخالصی از فلز جوش خارج شوند. هان و همکارانش [13] توزیع دما را در جوشکاری القایی فركانس بالا بر اثر شكل لبه اتصال دولبه ورق مورد بررسى قرار دادند. آنها تغییر شکل لبه اتصال را راهی مناسب جهت بهبود توليد خطوط لوله معرفي كردند. سونگ و همكارانش [14] به بررسی حرارت ورودی بهینه در جوشکاری القایی فرکانس بالا پرداختند. آنها حرارت ورودی را توسط پارامترهای ضخامت، سرعت و فرکانس تغییر دادند. طی تحقیق عنوان شد اگر حرارت کافی در شکل گیری درز اتصال وجود نداشته باشد، لوله تولیدی دارای درز روی خط اتصال خواهد بود. توشی سوکه و همکارانش [15] روی روش های کنترلی و رصد کردن خطوط لولهسازی به روش جوشكارى القايى فركانس بالا تحقيق انجام دادهاند. آنها روی بهینه کردن مقدار حرارت ورودی به فلز جوش متمرکز شدند. ناکسو کیم و همکارانش [16] به کمک روش اجزای محدود شکل لبه اتصال لولههای جداره ضخیم را بررسی کردند. آنها اظهار داشتند برای دستیابی به جوش با کیفیت، پیشبینی شكل لبه اتصال لازم است. آنها ارتباط بين ضخامت و قطر لوله-ها با شکل لبه اتصال را با یکدیگر مقایسه کردند. آنها شکل لبه اتصالی که جوش با کمترین فشار غلتکها ایجاد شود را بهترین طرح اعلام کردند. پتروسیمیون و همکارانش [17] پارامترهای جوشكارى القايى فركانس بالا را بررسى كردند. آنها دماى ايجاد شده در فلز جوش را عامل تعیین کننده در کیفیت جوش دانستند. بررسیهای آنها نشان داد که ارتباط قوی بین کیفیت جوش و گسترش منطقه متأثر از حرارت وجود دارد.

باوجود تحقیقات فراوانی در مورد جوشکاری القایی فرکانس بالا انجام شده است، ولی هنوز تحقیقات جامعی برای ارزیابی کاهش حرارت ایجاد شده در فلز جوش و گرادیان دمایی مناسب و در راستای آن افزایش خواص مکانیکی مانند استحکام نهایی و

11

القایی فرکانس بالا می توان به لوله جوشکاری شده با پروفیل-های جوش با شکلهای مختلفی دست یافت. آنها با تغییر پارامترهای جوشکاری به پروفیل جوش مستطیلی شکل دست یافتند. قنبری و همکارانش [2] اثر آمادهسازی لبهی ورقها و پارامترهای جوشکاری القایی فرکانس بالا مانند شدت جریان، فرکانس و اندازه زاویه Vee را بررسی کردند. آنها دریافتند که در این فرایند جوشکاری، فرکانس، شدت جریان و زاویه Vee جزو عوامل محدود کننده در خطوط تولید لوله درزدار میباشد. لذا شکل لبه اتصال را موثرترین پارامتر در تولید لوله درزدار با خواص مکانیکی و متالورژیکی بالا معرفی کردند. میشارا و همكارانش [3] از جوشكاري القايي فركانس بالا براي جوشكاري صفحات تخت استفاده كردند. آنها شدت ميدان مغناطيسي، چگالی شار مغناطیسی، توزیع و گرادیان دمایی را به صورت همزمان شبیهسازی و تحلیل نمودند. سایتو و همکارانش [4] مدلی تحلیلی از چگونگی توزیع جریان در فلز جوش در فرایند جوش القایی فرکانس بالا ارائه نمودند. در این تحلیل مشخص گردید که بیشترین تمرکز جریان و به دنبال آن بیشترین تمرکز

خفارپور و همکارانش [1] تحقیقات زیادی روی فرایند شکلدهی هدف آنه غفارپور و همکارانش [1] تحقیقات زیادی روی فرایند شکلدهی هدف آنه غلتکی سرد و جوشکاری القایی فرکانس بالا انجام دادهاند. آنها بررسی ک دریافتند که با تغییرشکل لبه اتصال و پارامترهای جوشکاری بود. هان

ازدیاد طول و خواص متالورژیکی مانند کاهش منطقه متأثر از حرارت، كاهش اندازه دانهها و افزايش مرز آنها ارائه نشده است. البته پارامترهای این فرایند جوشکاری، جهت بهینهسازی پارامترها، کاهش انرژی جوشکاری، توزیع دمایی به صورت تئوری و عملی مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی به دلیل ماهیت فرایند شکلدهی غلتکی سرد، تغییر پارامترها در شرایط کارگاهی بسیار زمانبر و پرهزینه است. لذا تفاوت اصلی این مقاله با تحقيقات ديگر، صرفا تمركز روى شكل لبه اتصال، كه پارامتری بدون محدودیت در تولید است، میباشد. هدف این مقاله، بررسی اثر شکل لبه اتصال روی کاهش حرارت ایجاد شده در فلز جوش، کاهش منطقه متأثر از حرارت، یکنواختی گرادیان دمایی در مقطع جوش و به دنباله آن دستیابی به اتصالی عاری از عيوب و در نهايت افزايش استحكام نهايي و ازدياد طول و یکنواختی ساختار دانهبندی در فلز جوش، کاهش اندازه دانهها و افزایش مرز آنها با استفاده از شبیهسازی جوشکاری القایی فرکانس بالا در لولههای درزدار و صحتسنجی شبیهسازی با آزمایشهای تجربی میباشد.

با توجه به اهمیت شکل لبه اتصال در این فرایند، شش نوع لبه اتصال مطابق شکل 1 مورد آزمایش قرار گرفته و در نهایت گرادیان دمایی مناسب معرفی شده است.

مدلسازی توسط نرم افزار کامسول انجام شده است و این شبیهسازیها توسط آزمونهای تجربی صحتسنجی شدهاند. نمودارهای گرادیان دمایی در شکل لبه اتصالهای مختلف بررسی و مقایسه شدهاند. دمای ایجاد شده در فلز جوش به کمک کانتورهای دمایی بررسی شده است. برای صحتسنجی کانتورهای دمایی، گسترش منطقه متأثر از حرارت در نمونههای متالوگرافی با نتایج شبیهسازی مقایسه شدهاند.

2- شبیهسازی جوشکاری القایی فرکانس بالا 2-1- هندسه لوله، کویل القایی و اتمسفر جوش

مسئله مورد تحلیل دارای سه بخش جداگانه فیزیک مغناطیس، انتقال حرارت و مکانیک میباشد که تحلیل عددی آنها به کمک نرم افزار کامسول مالتی فیزیک¹ انجام پذیرفته است. این نرمافزار مخصوص شبیهسازی فرایندهایی است که نیاز است چند فیزیک به صورت همزمان در مسئله مورد تحلیل قرار گیرد. در این تحلیل، اثرات پوستهای و مجاورتی در توزیع چگالی جریان الکتریکی و وابستگی دما به شکل لبه اتصال که از اهمیت بسزایی برخوردار است، بررسی میشوند.

جنس لوله مورد بررسی st37 با ضخامت 4/85 میلیمتر، قطر لوله 114 میلیمتر به طول 100 میلیمتر در نظر گرفته شده است. طول ناحیه جوش 20 میلیمتر، زاویه 5 Vee درجه به طول 80 میلیمتر به صورت ثابت در منظور شده است. شکل 2 هندسه لوله شبیهسازی شده را نشان میدهد. جدول 1 مشخصات مواد در نظر گرفته شده برای لوله در شبیهسازی را نشان میدهد.

در این شبیه سازی تنش تسلیم و مدول یانگ وابسته به دما هستند. بدیهی است که با تغییر دما باید این دو مشخصه کاهش یابند. شکلهای 3 و 4 به ترتیب تغییرات تنش تسلیم و مدول یانگ در اثر حرارت را نشان می دهند.



Fig. 1 Joint types that prepared for experimental tests شكل 1 شكل لبه اتصالهاى نمونه سازى شده جهت آزمونهاى تجربى



Fig. 2 Geometry of the simulated pipe شكل 2 هندسه لوله شبيهسازى شده

کویل القایی مطابق مشخصات کارگاهی از جنس مس در نظر گرفته شده است. هدایت الکتریکی بالای این فلز دلیل انتخاب

¹ Comsol multiphysics

منظور شده است.

جدول 1 مشخصات مواد در نظر گرفته شده برای لوله در شبیهسازی Table 1 Specifications of the pipe material for simulation

مقدار منظور شده	مشخصات
100	نفوذپذیری نسبی
4/032e6 (s/m)	رسانش الكتريكي
44/5 (W/(m·K))	رسانش حرارتی
7850 (kg/m³)	چگالی
475 (J/(kg·K))	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت
206(Gpa)	مدول يانگ اوليه
0/29	نرخ پواسون
450(Mpa)	تنش تسليم اوليه









غلتکهای جوش در نظر گرفته شده است. جهت کاهش زمان محاسبات در شبیهسازی تعداد دو حلقه کویل رسم شده است. با توجه به قابلیتهای نرمافزار کامسول میتوان در محاسبات هر حلقه کویل را دو حلقه در نظر گرفت. دراین صورت محاسبات دقيقا مانند شرايط آزمايشگاهي با تعداد 4 حلقه كويل انجام خواهد شد. شکل 5 هندسه و موقعیت قرار گیری کویل را نشان می دهد.

مرتضی غفارپور و همکاران

جدول 2 مشخصات فنی ماده منظور شده برای کویل جوشکاری القایی فركانس بالا

Table 2 characteristics of the coil material in the high frequency induction welding

مقدار منظور شده	مشخصات
1	نفوذپذیری نسبی
5/998e7 (S/m)	رسانايى الكتريكي
17 e-6 (1/K)	ضريب انبساط حرارتي
385 (J/(kg·K))	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت
1	گذردهی نسبی
$400 (W/(m \cdot K))$	رسانش گرمایی
$1/72 \text{ e-8} (\text{ohm} \cdot \text{m})$	مقاومت ويژه
0/0039 (1/K)	ضريب مقاومت حرارتي
298 (K)	دمای محیط



Fig. 5 Modeling of the high frequency induction welding coil شکل 5 کویل القایی مدلسازی شده در جوشکاری القایی فرکانس بالا

قطر پروفیل کویل برابر 4 میلی متر و قطر محیطی آن 164 میلیمتر در نظر گرفته شده است. لذا فاصله شعاعی بین لوله و كويل 25 ميلىمتر منظور شده است. برای اینکه عملکرد کویل القایی کاملا شبیه شرایط آزمایشگاهی قرار باشد، لوله و کویل بایستی در یک اتمسفر مشابه باشند. اتمسفر در نظر گرفته شده از نظر هندسی، استوانهای با قطر 170 میلیمتر و طول 110 میلیمتر و از نظر مشخصات موادی، هوای محیط در نظر گرفته شده است. آن است. در شبیهسازی مشخصات فنی مس طبق جدول 2

2-2- تحلیل فیزیکی فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا شبیهسازی فیزیک القایی: برای شبیهسازی فیزیک القایی از ماژول مغناطیس¹ نرم افزار کامسول استفاده شده است. این ماژول برای حوزههای محاسباتی مانند توزیع جریان با کویل، رسانندهها و مغناطیس مناسب است. برای تحلیل این فیزیک بایستی معادلات مکسول² با تصحیح قانون آمپر³ حل شوند. قانون آمپر در شکل اولیه خود میدان مغناطیسی را تنها به جریان الکتریکی ربط میدهد. ولی در شرایط خاصی که میدان الکتریکی نسبت به زمان تغییر نکند، درست است. قانون آمپر را بنا به مورد استفاده به دو صورت انتگرالی و دیفرانسیلی می توان نوشت. صورت انتگرالی قانون آمپر در دستگاه واحد متریک به صورت معادله (1) است:

 $\oint B.dl = \mu_0 \iint J.ds = \mu_0 I_{enc}$ (1) که در آن *B* میدان مغناطیسی برحسب تسلا است. این معادله

که در آن B میدان مغناطیسی برحسب تسلا است. این معادله یک انتگرل خطی روی مسیر بسته C است. اگر این انتگرال را روی سطح S که توسط مسیر C محصور شده است محاسبه شود باید از انتگرال دوگانه کمک گرفته شود. که در این انتگرال دوگانه μ_0 ثابت تراوایی خلاء و *I* چگالی جریان الکتریکی است که از داخل مسیر C و سطح S میگذرد. لازم به ذکر است که که از داخل مسیر C و سطح S میگذرد. لازم به ذکر است که در این معادله مسیر C و سطح S میگذرد. لازم به ذکر است که از اینرو چگالی جریان متوسط عبوری از سطح S است. (2) میباشد. که در آن، σ سرعت حرکت القا کننده⁴ و $J = J = \sigma v \times B$ (2) که در آن، σ سرعت حرکت القا کننده⁴ و $J = \xi$ گالی جریان الکتریکی خارجی است. اگر بردار مغناطیس *M* فرض شود، میدان مغناطیسی را میتوان به صورت معادله (3) نوشت:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 (\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}) \tag{3}$$

ازاینرو اگر قانون آمپر بازنویسی شود، این قانون به صورت معادله (4) بیان خواهد شد.

 $\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times A - \mathbf{M}) - \sigma \nu \times (\nabla \times A) + \sigma \nabla V = J_e$ (4)

جهت همخوانی شرایط تئوری و تجربی، شبیه سازی فیزیک مغناطیس در حالت فرکانسی منظور شده است. در حالت فرکانسی چگالی جریان به صورت معادله (5) تعریف می گردد. $\nabla H = J = \sigma(E + v + \mathbf{B}) + (j\omega + J_e)$ (5)

شکل 6 شار جریان الکتریکی در درز اتصال را نشان میدهد. در شکل 6 مشخص است که جریان در لبههای بالا و پایین، بخصوص در انتهای Vee بیشترین تمرکز را دارد.



Fig. 6 Electric flux in the weld line

شکل 6 شار الکتریکی در درز اتصال

به دلیل اثر پوستی و مجاورتی، که هر دو از خواص ذاتی جریان با فرکانس بالا هستند، در جریانهای با فرکانس بالا لبه-های نزدیک به هم بایستی بیشترین شار را تجربه کنند. این اصل در شبیهسازی مغناطیسی به درستی پیادهسازی شده و نشان از صحت نتایج دارد. تمرکز جریان در انتهای Vee باعث تمرکز حرارتی در این ناحیه خواهد شد. لذا میتوان نتیجه گرفت دمای ناحیه مذکور نسبت به مابقی سطوح لوله بیشتر میباشد. از این رو با فشار غلتکهای جوشکاری لبههای به هم میباشد، که تا دمای نزدیک به ذوب داغ هستند، به سمت هم فشرده خواهند شد. این فشردگی باعث ممزوج شدن دو لبه در-هم و اتصال ایجاد خواهد شد.

شبیه سازی فیزیک انتقال حرارت: فیزیکی که برای این مورد در نرمافزار کامسول انتخاب شده است، انتقال حرارت در جامدات⁵ می باشد. در این فیزیک روابط حرارت مطابق قانون فوریه به کار گرفته می شود. معادله (6) معادله دیفرانسیل حل شده برای تحلیل فیزیک انتقال حرارت را نشان می دهد.

 $\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{U}_{trans} \cdot \nabla \mathbf{T} \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = -\alpha T : \frac{dS}{dt} + Q \quad (6)$ $\sum_{k=1}^{n} \nabla \mathbf{T} + \mathbf{U}_{trans} \cdot \nabla \mathbf{T} + \nabla \cdot (q + q_r) = -\alpha T : \frac{dS}{dt} + Q \quad (6)$ $\sum_{k=1}^{n} \nabla \mathbf{T} + \mathbf{U}_{trans} \cdot (\mathbf{K})^{n} + \mathbf{U}_{trans} \cdot (\mathbf{$

¹¹ Coefficient of thermal expansion

¹³ Contains additional heat sources

¹ Magnetic fields

² Maxwell

³ Ampere's law ⁴ Conductor

⁵ Heat transfer in solids

⁶ Specific heat capacity at constant stress

 ⁷ Absolute temperature
 ⁸ Velocity vector of translational motion

⁹ Heat flux by conduction

¹⁰ Heat flux by radiation

¹² Second Piola-Kirchhoff stress tensor

مهندسی ساخت و تولید ایران، آذر 1399، دوره 7 شماره 9

البته منبع گرمایی اضافه در نظر گرفته نشده، لذا در تحلیل این عبارت برابر صفر منظور شده است. مابقی طبق مشخصات مواد لحاظ شده است. براساس شبیهسازی فیزیک انتقال حرارت، دمای لبهها تقریباً تا دمای 2000 درجه سانتی گراد بالا میرود. شکل 7 شبیهسازی فیزیک حرارت را نشان میدهد. با وجود دمای بالا در درز جوش، با فشار غلتکها ماده مومسان به صورت زائده به بیرون رانده خواهد شد.

2-3- شرایط مرزی در انتقال حرارت

مقادیر اولیه^۱: این مقادیر بیشتر متوجه دمای اولیه (محیط استوانهای، لوله و کویل) است که شرایط اولیه را طبق شرایط آزمایشگاهی 293/15 درجه کلوین معادل 20 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است.

ایزوله حرارتی²: این شرط اولیه جزو شرایط اولیه اجباری در تحلیلهای انتقال حرارت است. طبق این شرط مرزی دما فقط از مرزهای مشخص شده انتقال پیدا میکند. سطح پیشانی لوله طبق شکل 8 به صورت ایزوله در نظر گرفته شده است. لذا مابقی سطوح و مرزها میتوانند حرارت را انتقال دهند.

شار حرارتی³: تمامی سطوح لوله و کویل برای این شرط مرزی منظور شده است. لذا انتقال حرارت بجز مرزهای ایزوله از تمامی مرز ها قابل انتقال است.

سطوح پراکندگی حرارت⁴: این شرط مرزی برای تعیین سطوحی که انتقال حرارت از طریق تشعشع انتقال پیدا میکند بکار میرود. لذا پراکندگی حرارت برای تمامی سطوح لوله در نظر گرفته شده است.

سرعت حرکت کویلها: سرعت حرکت کویلها برابر سرعت حرکت کویلها برابر سرعت حرکت خطی لوله و طبق شرایط آزمایشگاهی، 12 متر بر دقیقه منظور شده است.

2-4- مشبندى

نوع مش بندی انتخاب شده از نوع سه گوش آزاد^ه می باشد. این روش مش زنی از هیچ نوع الگوی از پیش تعیین شده ای استفاده نمی کند. به همین جهت در بسیاری از مواقع از این روش با نام غیر ساختاری⁶ نیز یاد می شود. دلیل انتخاب این مش در قدم اول هندسه پیچیده در لبه های جوش و در قدم دوم فیزیک های مورد نیاز برای حل مسئله و نوع تحلیل هم زمان این فیزیک ها

گرفته شده





Fig. 7 Heat transfer in the pipe

شکل 7 انتقال حرارت ایجاد شده روی لوله



Fig. 8 The frontal surface of the pipe, which is isolated considered for heat transfer analysis

شکل 8 سطح پیشانی لوله که برای تحلیل انتقال حرارت ایزوله در نظر

¹ Initial values ² Thermal isulation

³ Heat flux

⁴ Diffuse surface

⁵ Free trihedral ⁶ Unstructured

مرتضی غفارپور و همکاران

Fig. 11 Production of the welded pipe by high frequency induction welding in the roll forming process

شکل 11 تولید لوله درزدار به روش جوشکاری القایی فرکانس بالا در فرایند شکلدهی غلتکی



 Fig. 12 The plane considered for temperature gradient and heat transfer in the joint type A

 شکل 12 صفحه منظور شده برای بررسی گرادیان دمایی و انتقال حرارت در A

 شکل لبه اتصال A

از اینرو عدد 10 نشان داده شده در محور افقی نشاندهنده خط مرکزی جوش است. محور عمودی این نمودارها منطبق بر ضخامت ورق است. اگر صفحات با ارتفاع صفر، 2/75 و 4/85 میلیمتر در راستای ضخامت، صفحه ارائه شده در شکل 12 را قطع کنند، حاصل برخورد سه خط ایجاد می کند. گرادیانهای دمایی نشان داده شده در شکل 13- الف و ب روی این سه خط محاسبه و گزارش شدهاند.

همان طور که از شکل 13- الف مشخص است بیشترین دمای ایجاد شده در لبه اتصال A حدوداً 2100 درجه سانتی گراد است. این دما در نزدیکی سطح داخلی لوله تشکیل شده است. این امر موید اعمال صحیح دو اثر پوستی و مجاورتی در این شبیه سازی است. تمرکز دمایی در این شکل لبه اتصال روی لبه نزدیک سطح داخلی لوله، می تواند موجب ذوب و ریزش روی لبه نزدیک سطح داخلی لوله، می تواند موجب ذوب و ریزش این ناحیه از طرح گردد. این ذوب شدگی و ریزش علاوه بر مصرف مواد اولیه اضافی، اثراتی مانند بر هم ریختگی شکل لبه اتصال، افزایش دما بیش از حد انتظار برای جوشکاری و به دنباله آن افزایش منطقه متأثر از حرارت و افزایش گرادیان دمایی گردد. در این روش سعی شده است تا با انتخاب اندازه مناسب برای المانها و تعداد آنها روی خطوط لبه جوش، کیفیت مش ایجاد شده را بالا رود. این تغییر در المانها در شکل 10 نشان داده شده است. سعی شده تا المانهای در نظر گرفته شده برای لبهها، کوچکتر باشد تا تحلیل معادلات دیفرانسیل در این نواحی دقیقتر باشند.

3 - بحث و نتایج 3-1- جوشکاری القایی فرکانس بالا آزمون های تجربی در شرایطی مشابه شرایط شبیهسازی انجام شده است. شکل 11 تولید لوله به روش غلتکی سرد به کمک جوشکاری القایی فرکانس بالا به صورت واقعی را نشان میدهد.

3-2- بررسی گرادیان دمایی

برای بررسی گرادیان دمایی و نحوه انتقال حرارت در شکل لبه اتصالها صفحهای مطابق صفحه نشان داده شده در شکل 12 منظور شده است. سعی برآن شده تا این صفحه در فاصله یک میلیمتری لبههایی که به هم میرسند، باشد. با توجه به اینکه اثرات مجاورتی و پوستی در این صفحه بیشترین مقدار خود را دارند، بررسی در این صفحه میتواند بیشترین دمای ایجاد شده و گرادیان دمایی را نشان دهد.

شکلهای 13- الف و ب گرادیان دمایی تمامی نمونهها را نشان میدهد. محور افقی نمودارها منطبق بر محور افقی صفحه نشان داده شده در شکل 12 میباشد. شروع این محور 10 میلیمتر قبل از خط مرکزی جوش و نقطه پایانی، 10 میلیمتر بعد از خط مرکزی جوش را نشان میدهد.



Fig. 10 Difference of the element size in the welding line and the other surface of the pipe

شکل 10 تفاوت در اندازه المانها در لبههای جوشکاری و مابقی سطوح لوله



Fig. 13a Temperature gradient of the weld metal cross section in the joint type A to C

C تم الف گرادیان دمایی سطح مقطع فلز جوش با شکل لبه اتصال A تا A شکل الف گرادیان دمایی سطح مقطع فلز جوش ا



Fig. 13b Temperature gradient of the weld metal cross section in the joint type D to W

شكل 13ب گراديان دمايي سطح مقطع فلز جوش با شكل لبه اتصالD تا W

خواهد شد.

ب مشخص که در نمودار مربوط به نمونه D همگرایی خوبی بین نمودارهای گرادیان دمایی بین نقاط مختلف فلز جوش مشاهده می گردد. نقاط دارای حداکثر دما از سطح داخلی لوله تا سطح بیرونی آن پراکنده شدهاند. این نوع گرادیان دمایی و از طرف دیگر ایجاد حرارت کم در فلز جوش نشان میدهد که این طرح می تواند طرح مناسبی برای تولید لولههای درز دار باشد. در شکل لبه اتصال E حداکثر دمای ایجاد شده تقریباً 1550 درجه سانتی گراد است. حرارت ایجاد شده به دلیل نزدیک بودن به سطح داخلی لوله، تقریباً بالاست. نمودار گرادیان دمایی نقاط مختلف همگرایی مناسبی با یکدیگر دارند. این همگرایی نشاندهنده شکل لبه اتصال مناسب و گرادیان دمایی یکنواخت نقاط مختلف فلز جوش میباشد. مطابق شکل 13- ب در شکل لبه اتصال W لبههای نزدیک سطح داخلی و خارجی لوله تقریباً برابر 2200 درجه سانتی گراد دمای حداکثری را تجربه خواهند کرد. کمتر بودن دما در مرکز ضخامت ورق می تواند منجر به ایجاد پروفیل جوش پرانتزی گردد. گرادیان دمایی در مرکز ضخامت ورق با لبههای بالا و پایین هم شکل ولی منطبق نیست. لبههای بالا و پایین با شیب یکسانی از حداکثر دما به حداقل آن میرسند. یکنواخت نبودن دما در مرکز ضخامت و لبه های بالا و پایین میتواند منجر به ایجاد عیوب ساختاری و متالورژیکی مانند ذوب اضافی در لبهها، سوختگی کناره جوش گردد. لذا شبیهسازی این طرح، اهمیت شکل لبه اتصال در این فرایند جوشکاری را نشان میدهد. با مقایسه این طرح با سایر لبه اتصالها، نقش پخها در ایجاد شدن حداکثر دما، نقاطی از پروفیل جوش که حداکثر دما را تجربه میکنند و گرادیان دمایی مشخص می گردد.

3-3- آزمون خمش سه نقطه

فقر مواد خمیری در حین جوشکاری درسمت داخل یا خارج لوله مى تواند منجر به عيب عدم پرشدگى شود. وجود يا عدم وجود این عیب در نمونههای جوشکاری شده توسط آزمون خمش سه نقطه طبق استاندارد ایزو 7438 مشخص می گردد. در شکل 14 نمونههای آزمایش شده نشان داده شده است. برای آمادهسازی نمونههای آزمون خمش سه نقطه، ابتدا لوله با طرح اتصالهای مختلف جوشکاری شده بریده و سپس نمونهها مسطح شدەاند.

همانطور که در شکل 14 نشان داده شده است، هیچ یک از نمونهها بجز نمونه B پس از آزمون خمش دچار گسیختگی در ریشه جوش نشدهاند. این امر نشان دهنده صحت و سلامت

بررسی عددی و تجربی اثر شکل لبه اتصال لولههای درزدار جوشکاری شده به روش ... از طرفی گرم شدن لبه پایینی اتصال منجر به گرادیان دمایی غیریکنواخت در راستای ضخامت خواهد شد. گرادیان دمایی غیریکنواخت، باعث غیریکنواختی مرز فلز جوش از فلز پایه در راستای ضخامت میشود. این غیر یکنواختی اغلب در تصاویر متالوگرافی به شکل پرانتز ظاهر میگردد. پرانتزی بودن پروفیل فلز جوش خود یک عیب در راستای کاهش استحکام نهایی و افزایش اندازه دانهها شناخته میشود [2]. این شکل لبه اتصال یک پروفیل جوش پرانتزی نامتقارن را نتیجه میدهد. شیب گرادیان دمایی در سطح داخلی لوله بسیار زیاد و در فاصله 2/75 میلیمتری سطح داخلی لوله با شیبی کمتر و درجه حرارت بسیار پایین تر نشان داده شده است. این تفاوت در شیب و مقدار درجه حرارتها با گرادیانهای دمایی متفاوت، می تواند فلز جوش را دچار عیوب متالورژیکی مانند سوختگی لبه اتصال وساختار غیر یکنواخت کند. تمرکز دمایی نشان داده شده در لبه اتصال B حاکی از دمای ایجاد شده در سطح بالای شکل لبه اتصال بسيار بالاتر از سطح داخلي آن است. اين تفاوت دما به دلیل دو اثر مجاورتی و پوستی در لبه بالای شکل لبه اتصال است. حداکثر دمای ایجاد شده در این شکل لبه اتصال 1900 درجه سانتی گراد است. به نسبت شکل لبه اتصال A، حداکثر دمای ایجاد شده در این شکل لبه اتصال کمتر است. لذا این امر نشان دهنده تشدید دو اثر مجاورتی و پوستی در لبههای سطح داخلی است. در این شکل لبه اتصال همانطور که مشخص است گرادیان دمایی از سطح داخلی لوله به سمت سطح خارجی آن

بسيار ناهمگون بوده و اين خود مي تواند باعث بروز عيوب

ساختاری و متالورژیکی گردد. از طرفی مقدار دمای ایجاد شده

در سطح مقطع فلز جوش، از سطح داخلی به سطح خارجی بسيار متفاوت است. اين تفاوت نيز باعث ناهمگونى ساختار

طبق شکل 13- الف حداکثر حرارت ایجاد شده در فلز

جوش با شکل لبه اتصال C تقریباً 1800 درجه سانتی گراد است

که در مقایسه با شکل لبه اتصالهای A و B کمتر است.

گرادیان دمایی تقریباً یکنواخت است. مقدار حداکثر دمای نشان

داده شده در لبه اتصال D تقریباً برابر 1520 درجه سانتی گراد

است که مقدار حداکثری این دما از شکل لبه اتصالهای قبلی

کمتر است. کمتر بودن مقدار حرارت ایجاد شده در فلز جوش

نقش مهمی در سلامت اتصال از نظر خواص مکانیکی مانند

افزایش استحکام نهایی و ازدیاد طول و خواص متالورژیکی مانند یکنواختی ساختار، کاهش گستره منطقه متأثر از حرارت، کاهش

اندازه دانهها و افزایش مرز دانهها خواهد داشت. در شکل 13-

مرتضی غفا*ر*پور و همکاران

اتصال و بکارگیری مناسب پارامترهای جوشکاری میباشد. نمونه B تحت آزمون خمش از روی خط اتصال دچار گسیختگی شده است. این نشان دهنده فقر مواد خمیری در سمت داخل لوله در این نمونه میباشد. لذا شکل لبه اتصال B نمیتواند طرح اتصال مناسبی برای ساخت لولههای درزدار باشد.

3-4- آزمون کشش

برای اطمینان و آگاهی از استحکام کششی و ازدیاد طول نمونه-های جوشکاری شده، مقایسه نمونهها با یکدیگر وبا فلز پایه، از آزمون کشش خطی استفاده شده است. نمونهها با اندازه پهنای گیج برابر 6 میلیمتر و طول گیج برابر 25 میلیمتر مطابق استاندارد ASTM-E8 آماده شدهاند. لازم به ذکر است برای اطمینان از نتایج آزمون از هر نمونه سه عدد تهیه و آزمایش شده است. لذا نتیجه اعلام شده میانگین نتیجه سه نمونه است. در نمونههای آزمون کشش خط جوش عمود بر راستای کشش و بوسط نمونهها قرار گرفته و سرعت حرکت فک پرس 2 میلیمتر بر دقیقه است. برای مقایسه استحکام کششی نمونهها و فلز پایه، نمونهای از فلز پایه جوشکاری نشده تهیه و مورد آزمون کشش، در قرار گرفته است. نمونههای گسیخته شده در آزمون کشش، در شکل 15 نشان داده شده است.

شکل 16 نمودار تنش و کرنش نمونهها و جدول 3 نتایج استحکام کششی نهایی و درصد ازیاد طول نمونهها و فلز پایه را نشان میدهند.



Fig. 14 Samples used in the bending test A to W شکل **14** نمونههای مورد استفاده در آزمون خمش از A تا W



Fig. 15 Samples used in the tensile test A to W and blank شکل 15 نمونههای مورد استفاده در آزمون کشش از A تا W و فلز پایه



شکل 16 نمودار تنش و کرنش نمونههای A تا W و نمونه ماده خام

جدول **3** نتایج آزمون کشش و ازدیاد طول نمونه های A تا W وفلز پایه Table **3** Results of tension and strain test samples A to W and blank

	1	
درصد ازدیاد طول	استحکام نهایی (MPa)	نمونهها
0/28	435	А
0/22	428	В
0/29	446	С
0/33	475	D
0/33	472	Е
0/35	457	W
0/40	476	ورق خام (blank)

نمونههای گسیخته شده نشان میدهند که محل گسیختگی بجز نمونه B خارج از منطقه فلز جوش رخ داده است. این امر نشان دهنده آن است که شکل لبه اتصال B طرح مناسبی برای اتصال نیست. گسیختگی از فلز پایه نشاندهنده آن است که اتصال ایجاد شده عاری از عیوب است. لذا طرح اتصالهای A و C تا W، طرحهای اتصال مناسبی هستند. با توجه به اینکه تنها

پارامتر متغیر در فرایند شکلدهی و جوشکاری شکل لبه اتصال بوده است، شکل لبه اتصال میتواند روی وجود یا عدم عیوب جوشی تأثیر گذار باشد [2].

بالاترین ازدیاد طول را فلز پایه دارد. این ازدیاد طول بالا نشان دهنده ساختار یکنواخت فلز پایه قبل از جوش میباشد. پس از جوشکاری، نمونهها ازدیاد طولهای مختلفی از خود نشان دادهاند. نمونههای D، E و W بیشترین ازدیاد طول در بین نمونهها را دارند. ازدیاد طول بالای این نمونهها نشاندهنده ساختار تقریباً مشابه فلز جوش و فلز پایه است. کاهش ازیاد طول در نمونههای A, B, C نشاندهنده عدم یکنواختی ساختار فلز جوش، عدم ممزوج شدن لبهها درهم و ذوب اضافی لبههای بالا و پایین که باعث بریدگی کنار خط جوش میگردد، است. باتوجه به اینکه بجز شکل لبه اتصال، شرایط شکلدهی و تمام پارامترهای جوشکاری برای همه نمونهها یکسان بوده است، شکل لبه اتصال میتواند عاملی تأثیرگذار در ازدیاد یا کاهش طول نمونهها باشد.

همان طور که در جدول 3 نشان داده شده است، نمونه D و E استحکام کششی بالاتری نسبت به بقیه نمونهها دارند. استحکام کششی نمونه D تقریباً برابر با فلز پایه است. این برابری استحکام نشان دهنده عاری از عیوب بودن فلز جوش و خواص مکانیکی بالای این نمونه است. در آزمون کشش، از دیاد طولی که رخ می دهد مربوط به فلز پایه به همراه فلز جوش است. با توجه به اینکه طول نمونهها و طول فلز جوش آنها است. با توجه به اینکه طول نمونهها و طول فلز جوش آنها به فلز جوش باشد. از دیاد طول در نمونههای D و E تقریباً بالا و نز دیک به نمونه بدون جوش است. این نتایج نشان دهنده خواص مکانیکی و متالورژیکی بالای فلز جوش در این نمونهها است.

3-5- آزمون میکروگرافی

برای بررسی ریز ساختار مناطق مختلف فلز پایه و فلز جوش، از آزمون میکروسکپی نوری با بزرگنمایی 500 برابر استفاده شده است. شکل 17 تصاویر میکروسکپی را نشان میدهد. البته به دلیل ماهیت فرایند ساخت لوله به روش غلتکی سرد، بین خط مرکزی جوش و منطقه متأثر از حرارت، ناحیه TMAZ['] شکل میگیرد. این ناحیه هم تحت تأثیر حرارت قرار دارد و هم تغییر فرم پلاستیکی در آن اتفاق میافتد. به دلیل فشار غلتکهای جوش، تفاوت ساختاری مناطق مختلف فلز جوش در نمونهها پر واضح نیست. با این حال در ادامه به تغییرات جزئی اشاره خواهد

شد.

در این تصاویر نواحی سفید رنگ فریت و نواحی قهوهای رنگ مارتنزیت تمپر شده را نشان میدهد. فلز پایه ساختاری فریتی و پرلیتی دارد. در تمامی نمونهها ساختار ناحیه HAZ ریزدانه فریتی و پرلیتی است. با توجه به تصاویر میکروسکپی، در ناحیه خط مرکزی جوش احتمالا فریتهای سوزنی، نواحی مارتنزیتی تمپر شده و مقادیری جزئی نواحی بینیتی و پرلیتی وجود دارند.

ساختار دانهبندی منطقه متأثر از حرارت نمونههای A، B، دارای مارتزیت تمپر شده نسبتا درشت را ز مابقی نمونهها است. این درشتدانگی نشاندهنده این است که نمونههای مذکور به نسبت بقیه نمونهها دمای بیشتری را تجربه کردهاند. در خط مرکزی جوش این نمونهها ساختار درشت مارتنزیتی تمپر شده مشاهده می گردد. در نمونههای D و E ساختار منطقه متأثر از حرارت یکنواختی بیشتری نسبت به مابقی نمونهها دارند و در خط مرکزی جوش دارای فریتهای سوزنی شکل و پرلیت هستند. از اینرو تمرکز دمایی در نمونههای E و D از مابقی نمونهها کمتر بوده است. نتایج آزمون کشش نیز این یکنواختی را تائید می کنند. بالاتر بودن استحکام در این نمونهها میتواند به دلیل نوع ساختار متالورژیکی و یکنواختی آن باشد.

ساختار خط مرکزی جوش در نمونه C و W تقریباً مشابه هم هستند. تشابه در این دو ساختار نشاندهنده ذوب و ریخته شدن لبههای تیز در نمونه C میباشد. به دلیل ذوب و ریخته شدن لبهی تیز، دمای ورودی به نمونه C کمتر از نمونه W خواهد بود. لذا دانهبندی در نمونه W کمی درشتتر از نمونه C در مناطق HAZ و خط مرکزی جوش است.

6-3- صحتسنجی نتایج

برای صحتسنجی نتایج شبیهسازی، گسترش منطقه متأثر از حرارت در نمونههای مختلف مطابق شکل 18 بررسی شده است. در نمونه A گسترش منطقه متأثر از حرارت در سطح داخلی لوله بیشتر است. کانتورهای دمایی نیز نشان میدهند که تمرکز دمایی سطح داخلی لوله بیشتر و دمای نشان داده شده در سطح داخلی لوله، مقدار بالاتری دارد. گسترش منطقه متأثر از حرارت در نمونه B شرایطی کاملا عکس نمونه A را دارد.

در نمونه C تمرکز حرارتی در خط مرکزی مقطع جوش بالاتر از سطوح داخلی و خارجی لوله است. ولی گسترش منطقه متأثر از حرارت در سطوح بالا و پایین لوله از مرکز مقطع جوش بالاتر است. انتظار میرود که منطقه متأثر از حرارت در مرکز

¹ Thermomechanically Affected Zone

مهندسی ساخت و تولید ایران، آذر 1399، دوره 7 شماره 9

مقطع جوش بالاتر باشد. در آزمونهای تجربی به دلیل اینکه مرکز مقطع جوش دمای نزدیک به ذوب یا به صورت نقطهای 🦳 لبههای تیز مرکز مقطع ذوب شده و ریخته میشوند.

بالاتر از ذوب را تحمل می کند، قبل از ممزوج شدن لبهها،



Fig. 17 Metallography of base metal, HAZ and weld center line samples A to W with magnifying 500 times **شکل 17** متالوگرافی فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و خط مرکزی جوش نمونههای A تا W با بزرگنمایی 500 برابر



Fig. 18 Expansion of heat affected zone in the sample E and temperature contour

شکل 18 گسترش منطقه متأثر از حرارت در نمونه ماکروگرافی E و کانتور دمایی

عامل در تمرکز حرارتی، تشدید اثرات مجاورتی و پوستی است. تشدید اثرات مجاورتی و پوستی و به دنباله آن تمرکز حرارتی بالا، در کانتورهای دمایی این شکل لبه اتصال نیز مشخص است.

4- نتيجەگىرى

دمای ایجاد شده در فلز جوش بیشترین اثر را روی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال ایجاد شده دارد. کاهش گرادیان دمایی با به کارگیری شکل لبه اتصال D در جوش القایی فرکانس بالا، علاوه بر افزایش کیفیت جوش، موجب کاهش میزان توان مصرفی در فرایند تولید لوله خواهد شد. با انتخاب شکل لبه اتصال D، گرادیان دمایی در راستای ضخامت کاهش مییابد، که این امر موجب کاهش حرارت ورودی و کاهش عرض در نمونه D به دلیل شکل لبه اتصال مناسب، این نمونه نسبت به نمونههای دیگر تمرکز دمایی کمتری را تحمل میکند. این کاهش دما و عدم تمرکز دمایی در مقطع پروفیل جوش، باعث گرادیان دمایی یکنواخت در مقطع و شکلگیری پروفیل جوش مستطیلی میشود. مقایسه تصویر ماکروگرافی و کانتورهای دمایی نمونه E نشان میدهد که تمرکز دمایی در سطح داخلی لوله از سطح خارجی آن بیشتر است. این امر باعث گسترش بیشتر منطقه متأثر از حرارت در سطح داخلی لوله میشود. تصویر ماکروگرافی از نمونه W، گسترش منطقه متأثر از حرارت در سطوح داخلی و خارجی لوله را نشان میدهد. این گستردگی به دلیل تمرکز دمایی در لبههای بالایی و پایینی frequency electric resistance welding with image processing. *welding journal*, pp. 71-79, 2007.

- [8] H. J. Kim, S. K. Youn. three dimensional analysis of high frequency induction welding of steel pipes with impeder. *journal of manufacturing science and engineering*, pp. 123-130, 2008.
- [9] O. E. Gungor, P. Yan, P. Thibaux, M. Liebeherr, H. K. D. H. Bhadeshia, D. Quidort, Investigation into the microstructure toughness relation in high frequency induction welded pipes. *proceedings of the 8th international pipeline conference*. 2010.
- [10] P. Yan, O.E. Gungor, P. Thibaux, M. Liebeherr, H. K. D. H. Bhadeshia, Tackling the toughness of steel pipes produced by high frequency induction welding and heat-treatment, *Materials science and engineering*, Vol. 528, pp. 8492-8499, 2011.
- [11] Y. han, E. L. yu, Numerical analysis of a highfrequency induction welded pipe. *Welding journal*, pp. 270-277, 2012.
- [12] T. Okabe, S. Toyoda, S. Goto, Y. Kato, Numerical analysis of welding phenomena in high frequency electric resistance welding, *Journal of key* engineering materials, Vol. 622-623, pp. 525-531, 2014.
- [13] H. yi, Y. Enlin, F. Yulin, Z. Yuqian, Effect of opening angle on temperature distribution of HFIW pipe, *journal of material science and engineering*, Vol. 220, pp. 450-462, 2006.
- [14] S. Soo Eun, M. Hyun, K. Hong, H. Seung, Development of optimum welding heat input device based on welding frequency and spark detection, *Proceeding of the 9th international pipeline conference*, pp. 208-214, 2012.
- [15] F. Toshisuke, M. Nobuo, H. Noboru, H. Hideki, Development of the new welding control method for HF-ERW pipes - advanced welding process of HF-ERW, *Proceeding of the 9th international pipeline conference*, pp. 123-130, 2012.
- [16] N. Hastegawa, T. Fukami, Y. Takeda, M. Tanimo, H. Hamatani, T. Nakaji, T. Motoyoshi, T. Ohsawa, Development of a new optical monitoring system of welding conditions for producing HF-ERW line pipe with high weld seam toughness - advanced welding process of HF-ERW2, *Proceeding of the 9th international pipeline conference*, pp. 142-149, 2012.
- [17] P. Simion, V. Dia, B. Istrate, C. Munteanu, Controlling and monitoring of welding parameters for micro-alloyed steel pipes produced by high frequency electric welding. *Journal of advanced materials research*, Vol. 1036, pp. 464-469, 2014.
- [18] C. Maraveas, C. Zacharias, and K. Daniel Tsavdaridis, Mechanical properties of high and very high steel at elevated temperatures and after cooling down. *Open Access Springer*. No. 3, pp. 1-13, 2017.

جوش و منطقه متأثر از حرارت خواهد شد. با کاهش حرارت ورودی در موضع اتصال، فلز جوش دارای ساختار ریز دانهای خواهد شد.

با انتخاب شکل لبه اتصال D در لبهها میتوان اثرات خواص پوستی و مجاورتی را خنثی کرد. اثر پوستی و مجاورتی هر دو جزو ویژگیهای ذاتی جریان با فرکانس بالا هستند. با وجود شکل لبه اتصال نامناسب این دو ویژگی باعث تشدید دما در لبههای بالا و پایین اتصال خواهد شد. تشدید دما در فلز جوش اگر بیش از حد بالا باشد، ساختار دانهبندی غیر یکنواخت، افزایش اندازه دانهها و سوختگی کناره فلز جوش و به دنباله آن کاهش خواص مکانیکی و متالورژیکی را به همراه خواهد داشت.

شکل لبه اتصال، پارامتر تأثیرگذاری روی ایجاد زائده داخلی و خارجی، مقدار حجم زائدهها و تعیین جهت رانش آن می،باشد. با تغییر شکل لبه اتصال میتوان حرارت ایجاد شده در فلز جوش را به گونهای کنترل کرد که از سوختگی و افزایش اندازه دانهها در منطقه متأثر از حرارت جلوگیری شود. توزیع دمایی یکنواخت در شکل لبه اتصال و کاهش گرادیان دمایی باعث کاهش عرض جوش و ایجاد اتصالی مستطیلی شکل در فلز جوش می گردد.

5- مراجع

- M. Ghaffarpour, D. Akbari, H. Moslemi Naeni, S. Ghanbari, Improvement of the joint quality in the high-frequency induction welding of pipes by edge modification. *journal of welding in the world*. Vol. 63, pp. 1561-1572, 2019.
- [2] S. Ghanbari, D. Akbari, H. Moslemi Naeini, investigation of the groove shape preparation effects in the high frequency induction welding of the weld metal pipes, *Modares mechanical engineering*, Vol. 16, pp. 722-732, 2017. (in Persian فارسی).
- [3] Mishara, S. Pal, S. Bag, Electromagnetic transientthermal modeling of high-frequency induction welding of mild steel plates, *Advances in simulation*, *product design and development*, pp.407-415, 2020.
- [4] M. Saito, H. Kasahara, H. Tominaga, S. Watanabe, Theoretical analysis of current distribution in electric resistance welding. 105th ISIJ meeting, april 1983, pp.369, at the university of tokyo. accepted in the final form on march 4, 1986.
- [5] J. H. choi, Y. S. chang, C.-M. kim, J.-S. OH, and Y.-S. kim. Penetrator formation mechanisms during high-frequency electric resistance welding. *welding journal*, pp. 27-31, 2004.
- [6] C. M. Kim, J. K. Kim, C. S. Kim, Fatigue life evaluation of ERW joint in the pipe using Monte-Carlo simulation, *Journal of key engineering materials*, Vol. 297-300, pp. 3-9, 2005.
- [7] T. kim, Y. W. park, K. sung, M. kang, C. kim, C. lee, and S. rheee. estimation of weld quality in high-