دانشکده فنی و مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

رساله

برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک–طراحی کاربردی

عنوان :

بررسی تجربی و ارائه مدل تحلیلی پدیده فوران در جوشکاری حین کار لوله‌های فولادی ضدزنگ آستنیتی

استاد راهنما

دکتر فرید وکیلی تهامی

استاد مشاور

دکتر محمد زهساز

پژوهشگر

علی ضیایی اصل

بهمن ماه ۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

نام خانوادگی: ضیائی اصل **نام:** علی

عنوان پایان‌نامه: بررسی تجربی و تحلیلی پدیده *Burn-through* در جوشکاری حین کار لوله‌های فولادی

استاد راهنما: دکتر فرید وکیلی تهامی **استاد مشاور:** دکتر محمد زهساز

مقطع تحصیلی: دکتری **رشته**: مهندسی مکانیک **گرایش**: طراحی کاربردی
دانشگاه: تبریز **دانشکده**: فنی مهندسی مکانیک
تاریخ فارغ التحصیلی: **تعداد صفحه**: ۱۷۰

کلید واژه‌ها: تنش حرارتی، المان محدود، جوشکاری حین کار، توزیع حرارت

چکیده

در این پژوهش فرآیند جوشکاری حین کار به منظور بررسی فوران بر اساس روش المان محدود مدل‌سازی شده است. ابتدا فرآیند جوشکاری اتصال Tشکل دو ورق بصورت دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌سازی و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است. سپس با روش به‌روزرسانی بر اساس داده-های تجربی، مدل توسعه یافته‌ای بصورت روابط دو بیضی‌گون برای منبع حرارتی بدست آمده است. مزیت عمده این مدل، کاهش ضرایب معادلات منبع حرارتی می‌باشد که این امر با مرتبط ساختن سایر ضرایب به خصوصیات فیزیکی وهندسی در جوش حاصل شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدل دو بعدی با اصلاح تابع تولید حرارت، قادر به پیش‌بینی میدان حرارتی بوده، ولی منجر به خطای فاحش در حل مکانیکی شده و بنابراین، استفاده از آن توصیه نمی‌گردد.

از این مدل توسعه یافته، در تحلیل عددی فرآیند جوشکاری اتصال Tشکل دو لوله استفاده شده و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همچنین نفوذ جوش و ضخامت *HAZ* پیش-بینی شده توسط این مدل با نتایج حاصل از میکروگرافی و میکروسختی‌سنجی مقایسه شده که تطبیق خوبی ملاحظه شده است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل دوبیضی‌گون توسعه داده شده در این پژوهش، قادر است بخوبی فرآیند جوشکاری را هم در اتصال Tشکل دو ورق وهم در اتصال Tشکل دو لوله شبیه‌سازی کند.

با استفاده از این مدل اثر سرعت پیشروی جوش، ضخامت لوله و ضریب همرفت ناشی از عبور سیال از داخل لوله اصلی مطالعه شده است. با استفاده از نتایج حل مکانیکی، توزیع تنش در ضخامت لوله اصلی در حین جوشکاری بدست آمده احتمال بروز فوران بر اساس حل حرارتی و مکانیکی در تمامی حالات مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که ضریب همرفت جریان سیال عبوری از داخل لوله و ضخامت آن، نقش

اساسی در کاهش احتمال فوران را دارد. از سوی دیگر افزایش ضریب همرفت به دلیل بالا بردن سرعت خنک‌شدن قطعه، باعث افزایش احتمال بروز ترک گرم خواهد شد و در عین حال ممکن است کیفیت جوش و نفوذ ذوب را نیز کاهش دهد. همچنین استفاده از آب راکد در داخل لوله به دلیل تشکیل حباب بخار موضعی در دیواره که موجب افزایش موضعی درجه حرارت می‌شود، برای جلوگیری از وقوع فوران توصیه نمی‌شود.

جوشکاری حین کار روی لوله‌های فولادی به ضخامت کمتر از ۵/۵ میلیمتر به دلیل بالا بودن احتمال وقوع فوران مجاز نمی‌باشد؛ مگر اینکه یک جریان سرد کننده با ضریب همرفت کافی در داخل لوله برقرار باشد.

نتایج نشان می‌دهد که هر چند افزایش زیاد سرعت جوشکاری، موجب کاهش نفوذ حرارت جوشکاری به عمق شده و تا حدودی احتمال بروز فوران را کاهش می‌دهد، اما به دلیل اینکه موجب کاهش کیفیت اتصال جوشی می‌گردد، توصیه نمی‌شود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ز

فهرست شکل‌ها ..... ح

مقدمه ۱

بررسی منابع

فصل ۱- پایه های نظری و پیشینه تحقیق ۵

۱-۱- مقدمه ۶

۱-۲- تاریخچه پیشرفت فرآیند جوشکاری ۷

۱-۳- تاریخچه روش های بررسی فرآیند جوشکاری ۸

۱-۴- کاربرد جوشکاری در صنعت ۱۵

۱-۴-۱- انواع روش های جوشکاری در صنعت ۱۶

۱-۵- عملیات انشعاب گرم در لوله های در حین کار ۱۷

۱-۶- جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن ۱۸

۱-۶-۱- جوش پذیری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۱۸

۱-۶-۲- حرارت جوشکاری در فولاد های زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰

۱-۶-۳- بررسی ترک‌های زیر لایه جوش و ترک‌های انجمادی در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰

۱-۶-۴- خواص مکانیکی و حرارتی فولاد زنگ‌نزن ۲۰

۱-۶-۴-۱- خصوصیات فیزیکی مواد برای تحلیل حرارتی در فرآیند جوشکاری ۲۱

۱-۶-۴-۲- خصوصیات مکانیکی مواد در فرآیند جوشکاری ۲۲

۱-۷- عیوب مورد بررسی در فرآیند جوشکاری و اثرات آن ۲۵

۱-۷-۱- عیوب اصلی مورد بررسی فرایند جوشکاری فولاد ضدزنگ آستنیتی ۲۵

۱-۷-۲- اثرات عیوب جوشکاری حین کار و روشهای کاهش آن ۲۷

۱-۷-۲-۱- راهکارهای مورد استفاده در صنعت برای کاهش خطرات فوران و ترک گرم ۲۷

۱-۷-۲-۲- کنترل تنش پسماند و اعوجاج ۲۸

۱-۸- مبانی مدلسازی برای تحلیل اتصالات جوشی ۲۹

۱-۸-۱- روشهای مدلسازی منبع حرارتی در جوشکاری ۳۱

۱-۸-۱-۱- مدل رزنتال ۳۱

۱-۸-۱-۲- مدل دیسکی ۳۳
۱-۸-۱-۳- مدل دوبعدی با در نظر گرفتن حرکت الکترود ۳۴
۱-۸-۱-۴- مدل حجمی ۳۷
۱-۸-۲- مدلسازی تغییر فاز ماده ۳۹
۱-۸-۳- شرایط مرزی حرارتی ۴۰
۱-۸-۴- روش تولد و مرگ المان در مدلسازی اتصالات جوشی ۴۱

مواد و روشها

فصل ۲- بررسی تجربی جوشکاری اتصال Tشکل ۴۵
۲-۱- مقدمه ۴۶
۲-۲- دستگاه ثبّات ۸ کاناله ۴۶
۲-۳- انتخاب جنس ۴۸
۲-۴- اتصال سر ترموکوپلها به قطعه ۴۹
۲-۵- بررسی تجربی جوشکاری Tشکل ورق ۵۰
۲-۵-۱- آماده سازی قطعه و اتصال به دستگاه ثبّات ۵۰
۲-۵-۲- شرایط جوشکاری و نمونه های جوشکاری شده ۵۳
۲-۶- بررسی تجربی جوشکاری Tشکل لوله ۵۵
۲-۶-۱- آزمایش جوش لوله خالی ۵۷
۲-۶-۲- آزمایش جوش لوله مملو از آب ۶۱
۲-۶-۳- آزمایش جوش لوله حاوی جریان آب ۶۲
فصل ۳- بررسی المان محدود اتصال جوشی Tشکل با استفاده از مدل عددی ۶۷
۳-۱- مقدمه ۶۸
۳-۲- روش المان محدود ۶۹
۳-۲-۱- تحلیل حرارتی ۶۹
۳-۲-۱-۱- فرمول بندی المان محدود در تحلیل انتقال حرارت گذرا ۶۹
۳-۲-۱-۲- مدلسازی تغییر فاز ماده ۷۱
۳-۲-۲- تحلیل مکانیکی ۷۲
۳-۲-۲-۱- فرمول بندی مکانیک پیوسته ۷۲
۳-۲-۲-۲- فرمول‌بندی المان محدود در تحلیل مکانیکی ۷۶
۳-۳- مدلسازی برای تحلیل حرارتی ۸۰
۳-۳-۱- مدلسازی منبع حرارتی ۸۰

- مدل دو بیضی گون سه بعدی توسعه یافته برای منبع حرارتی در اتصال Tشکل دو ورق ۸۰
- مدل دو بیضی گون دوبعدی توسعه یافته برای منبع حرارتی در اتصال Tشکل دو ورق ۸۴
- مدل دو بیضی گون سه بعدی بدست آمده برای منبع حرارتی در جوش لوله ۸۵

۳-۳-۲- مدلسازی تغییر فاز ماده ۸۸

۳-۳-۳- شرایط مرزی حرارتی ۸۹

۳-۴- مدلسازی برای تحلیل مکانیکی ۹۱

۳-۴-۱- خصوصیات هندسی، فیزیکی و مکانیکی مواد برای تحلیل مکانیکی ۹۲

۳-۴-۲- روش مدلسازی اضافه شدن ماده به قطعه در حین فرآیند جوش ۹۲

۳-۵- روش حل المان محدود مدلهای عددی ۹۳

۳-۶- مدل المان محدود دو بعدی و سه بعدی جوش T شکل دو ورق ۹۴

۳-۶-۱- انتخاب جنس و ابعاد، مدلسازی هندسی و مش بندی ۹۴

۳-۶-۲- بارگذاری، شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی ۹۷

۳-۶-۳- مدلهای عددی بررسی شده ۹۸

۳-۷- مدل المان محدود سه بعدی جوش T شکل دو لوله ۹۹

۳-۷-۱- انتخاب جنس و ابعاد ، مدلسازی هندسی و مش بندی ۹۹

۳-۷-۲- بارگذاری، شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی ۱۰۱

۳-۷-۳- مدلهای عددی بررسی شده ۱۰۲

نتایج و بحث

فصل ۴- به روز رسانی مدل و مقایسه نتایج ۱۰۴

۴-۱- مقدمه ۱۰۵

۴-۲- به روز رسانی ۱۰۵

۴-۳- نتایج تجربی جوشکاری Tشکل دو ورق ۱۰۷

۴-۴- نتایج حل المان محدود مدل دوبعدی اتصال جوشی Tشکل دو ورق ۱۰۹

۴-۴-۱- نتایج حل حرارتی مدل دوبعدی ۱۰۹

۴-۴-۱-۱- نتایج حل حرارتی مدل دوبعدی ورق با ضخامت ۶ میلیمتر ۱۱۰

۴-۴-۱-۲- نتایج حل حرارتی مدل دوبعدی ورق با ضخامت ۵ و ۸ میلیمتر ۱۱۳

۴-۴-۲- نتایج حل مکانیکی مدل دوبعدی ۱۱۴

۴-۴-۲-۱- نتایج حل مکانیکی مدل دوبعدی ورق با ضخامت ۶ میلیمتر ۱۱۴

۴-۵- نتایج حل المان محدود مدل سه بعدی اتصال جوشی Tشکل دو ورق ۱۱۵

۴-۵-۱- نتایج حل حرارتی مدل سه بعدی ۱۱۵

۴-۵-۱-۱- نتایج حل حرارتی مدل سه بعدی ورق با ضخامت ۶ میلیمتر ۱۱۵

۴-۵-۱-۲- نتایج حل حرارتی مدل سه بعدی ورق با ضخامت ۵ و ۸ میلیمتر ۱۱۷
۴-۵-۱-۳- حل حرارتی جوشکاری با سرعت بالا در ورق با ضخامت ۵ میلیمتر ۱۱۹
۴-۵-۲- نتایج حل مکانیکی مدل سه بعدی ۱۱۹
۴-۵-۲-۱- نتایج حل مکانیکی مدل سه بعدی ورق با ضخامت ۶ میلیمتر ۱۱۹
۴-۵-۲-۲- نتایج حل مکانیکی مدل سه بعدی ورق با ضخامت ۵ و ۸ میلیمتر ۱۲۳
۴-۵-۲-۳- حل مکانیکی جوشکاری با سرعت بالا در ورق با ضخامت ۵ میلیمتر ۱۲۵
۴-۶- مقایسه نتایج و ارزیابی مدل المان محدود اتصال جوشی Tشکل دو ورق ۱۲۵
۴-۷- نتایج تجربی جوشکاری Tشکل دو لوله ۱۳۳
۴-۷-۱- نتایج آزمایش جوش لوله خالی ۱۳۳
۴-۷-۲- نتایج آزمایش جوش لوله مملو از آب ۱۳۴
۴-۷-۳- نتایج آزمایش جوش لوله حاوی جریان آب ۱۳۵
۴-۷-۴- میکروسختی سنجی ۱۳۶
۴-۸- نتایج حل المان محدود مدل جوشکاری Tشکل دو لوله ۱۳۸
۴-۸-۱- نتایج حل المان محدود لوله اصلی به ضخامت ۷/۵ میلیمتر ۱۳۹
۴-۸-۲- نتایج حل المان محدود لوله اصلی به ضخامت ۵/۵ میلیمتر ۱۴۱
۴-۹- مقایسه نتایج و ارزیابی مدل المان محدود جوش دو لوله ۱۴۳

فصل ۵- پیش بینی فوران در جوشکاری Tشکل حین کار ۱۴۷

۵-۱- مقدمه ۱۴۸
۵-۲- بررسی تسلیم در اتصال Tشکل جوش دو ورق ۱۴۸
۵-۲-۱- بررسی تسلیم در جوش ورق با ضخامت ۶ میلیمتر ۱۴۸
۵-۲-۲- بررسی تسلیم در اتصال جوش T شکل ورق با ضخامت ۵ میلیمتر ۱۵۲
۵-۲-۳- بررسی تسلیم در اتصال جوش T شکل ورق با ضخامت ۸ میلیمتر ۱۵۴
۵-۳- بررسی فوران در اتصال Tشکل جوش دو لوله ۱۵۵
۵-۳-۱- بررسی فوران در جوشکاری لوله با ضخامت ۷/۵ میلیمتر ۱۵۶
۵-۳-۲- بررسی فوران در جوشکاری لوله با ضخامت ۵/۵ میلیمتر ۱۵۸

فصل ۶- نتیجه گیری ۱۶۳

۶-۱- نتایج تحقیق ۱۶۴
۶-۲- پیشنهاد برای ادامه تحقیق ۱۶۶

فهرست مراجع ۱۶۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱. درصد وزنی عناصر در فولاد ۳۱۶ ..... ۱۹
جدول ۱-۲. درصد وزنی عناصر در فولاد ۳۰۴ ..... ۱۹
جدول ۱-۳. گرمای ویژه و ضریب هدایت وابسته به دما برای فولاد ۳۰۴ ..... ۲۱
جدول ۱-۴. خصوصیات مکانیکی وابسته به دما برای فولاد ۳۰۴ ..... ۲۳
جدول ۱-۵. خواص مکانیکی و حرارتی متغیر با دمای فولاد ضدزنگ۳۰۴ ..... ۲۴
جدول ۱-۶. ضریب سخت شوندگی متغیر با دمای فولاد ضدزنگ ۳۰۴ ..... ۲۴
جدول ۱-۷. خواص مکانیکی و حرارتی متغیر با دمای فولاد ضدزنگ ۳۱۶ ..... ۲۴
جدول ۱-۸. بازده حرارتی در چند روش جوشکاری ۲۹
جدول ۲-۱. ضخامت ورق، پای جوش و سرعت پیشروی در نمونه های جوشکاری ورق. ۵۵
جدول ۲-۲. فهرست آزمایشهای انجام شده روی لوله حاوی جریان ۶۵
جدول ۳-۱. ضخامت ورق، پای جوش، سرعت، تعداد المان و گره در مدلهای المان محدود. ۹۹
جدول ۳-۲. دبی اندازگیری شده و ضریب همرفت محاسبه شده جریان آب داخل لوله اصلی درحین جوشکاری Tشکل لوله ۱۰۱
جدول ۳-۳. ضخامت لوله، سرعت، تعداد المان و گره در مدلهای المان محدود بررسی شده. ۱۰۲
جدول ۴-۱. مقایسه تحلیل تجربی و عددی دمای ماکزیمم نقطه به فاصله $3mm$ از لبه ورق قائم..... ۱۲۹
جدول ۴-۲. مقایسه تحلیل تجربی و عددی در مورد تغییرمکان لبه ورق پایه ۱۳۰
جدول ۴-۳. مقایسه دمای نقاط لوله اصلی- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود با داده های تجربی ۱۴۶
جدول ۵-۱. مقایسه دما و تنش در نقطه ای به عمق ۴ میلیمتر در ورقهای ۵، ۶ و ۸ میلیمتری ۱۵۵
جدول ۵-۲. پیش بینی وقوع فوران در جوشکاری Tشکل دو لوله ۱۶۲

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱. جوشکاری با الکترود روکش‌دار. ۱۷
شکل ۱-۲. نمایش شماتیک دستگاه انشعاب گرم[۲۶] ۱۸
شکل ۱-۳. نمایش کاتر لوله و انواع اتصالات لوله ها[۲۶]. ۱۸
شکل ۱-۴. تغییر ضریب هدایت حرارتی بعضی فولادها با درجه حرارت[۳۱]. ۲۱
شکل ۱-۵. مدول یانگ برای بعضی از فولادها[۳۱]. ۲۳
شکل ۱-۶.ضریب انبساط حرارتی برای بعضی از فولادها[۳۱]. ۲۳
شکل ۱-۷. توزیع تنش در اطراف جوش ۲۶
شکل ۱-۸. نوعی از توزیع تنشهای پسماند در جوش لب به لب[۲۷] ۲۶
شکل ۱-۹. منبع حرارتی دیسکی[۴۰] ۳۳
شکل ۱-۱۰. توزیع زمانی شار حرارتی بصورت ذوزنقه‌ای در مدل دوبعدی ۳۵
شکل ۱-۱۱. توزیع زمانی شار حرارتی بصورت ناقوسی در مدل دوبعدی[۴۱] ۳۶
شکل ۱-۱۲. مدل منبع حرارتی متحرک ۳۶
شکل ۱-۱۳. مدل منبع حرارتی جوش به صورت دو بیضی گون[۷]. ۳۹
شکل ۱-۱۴. مدلسازی تغییر فاز ماده[۳۱] ۴۰
شکل ۱-۱۵. تولد و مرگ المان در جوشکاری[۴۶] ۴۲
شکل ۲-۱. کالیبراسیون دستگاه ثبّات در آزمایشگاه ابزار دقیق شرکت پتروشیمی تبریز ۴۷
شکل ۲-۲. منبع حرارتی در کالیبراسیون ۴۷
شکل ۲-۳. شکل شماتیک اتصال Tشکل جوش دو صفحه مسطح ۵۱
شکل ۲-۴. نقاط مورد نظر برای اندازهگیری دما در زیر ورق پایه ۵۱
شکل ۲-۵. اتصال سر ترموکوپل به قطعه با جوش نقطهای ۵۲
شکل ۲-۶. قطعه پس از اتصال ترموکوپلها با جوش نقطهای ۵۲
شکل ۲-۷. شکل شماتیک اتصال دستگاه ثبات به قطعه و رایانه ۵۳
شکل ۲-۸. اندازه گیری دما و تغییر مکان قطعه جوشکاری شده-مسیر اول ۵۳
شکل ۲-۹. اندازه گیری دما و تغییر مکان قطعه جوشکاری شده-مسیر دوم ۵۴
شکل ۲-۱۰. اندازه گیری ولتاژ و شدت جریان جوشکاری ۵۴
شکل ۲-۱۱. شکل شماتیک اتصال Tشکل جوش دو لوله ۵۵
شکل ۲-۱۲. نقاط مورد نظر برای اندازه گیری دما در داخل لوله اصلی ۵۶

شکل ۲-۱۳. مکانیزم طراحی شده برای موقعیتیابی نقاط زیر منطقه جوش ۵۷
شکل ۲-۱۴. نیم لوله سوار بر پایه چرخان به همراه مکانیزم موقعیتیاب نقاط زیر منطقه جوش..... ۵۸
شکل ۲-۱۵. الف) دستگاه جوش تخلیهای در *UOW* ب و ج) دستگاه اندازه گیری دما در *UOW*.... ۵۹
شکل ۲-۱۶. اتصال ترموکوپلها برای اندازه گیری درجه حرارت سطح داخلی و عمق ۶۰
شکل ۲-۱۷. شکل شماتیک اندازه گیری دمای نقاط داخل ضخامت لوله اصلی ۶۰
شکل ۲-۱۸. شروع فرآیند جوشکاری پس از آماده کردن قطعه و اتصالات مربوط ۶۰
شکل ۲-۱۹. شکل شماتیک تست ریگ جهت آزمایش لوله مملو از آب ۶۱
شکل ۲-۲۰. مراحل ساخت تست ریگ طراحی شده جهت آزمایش لوله مملو از آب ۶۳
شکل ۲-۲۱. تست ریگ ساخته شده آماده جهت آزمایش لوله مملو از آب ۶۴
شکل ۲-۲۲. شکل شماتیک تست ریگ جهت آزمایش لوله حاوی جریان آب ۶۴
شکل ۲-۲۳. شکل شماتیک خط لوله انشعابی جهت آزمایش جوش روی لوله حاوی جریان آب..... ۶۵
شکل ۲-۲۴. خط لوله انشعابی جهت آزمایش جوش روی لوله حاوی جریان آب ۶۵
شکل ۲-۲۵. توسعه لایه مرزی حرارتی در امتداد جریان داخلی لوله [۴۹] ۶۶
شکل ۲-۲۶. تغییرات ضریب همرفت حرارتی جریان داخلی لوله در امتداد طول لوله [۴۹] ۶۶
شکل ۳-۲. مختصات اویلری و لاگرانژی[۵۲] ۷۳
شکل ۳-۳. مدل دو بیضوی در اتصال جوشی *T*شکل دو ورق ۸۱
شکل ۳-۴. تغییرات تابع تولید حرارت سه بعدی در وسط ورق ($z_{1/2}$) نسبت به زمان ۸۲
شکل ۳-۵. تغییرات تابع تولید حرارت سه بعدی نسبت به فاصله از مرکزبیضی در امتداد x'..... ۸۳
شکل ۳-۶. تغییرات تابع تولید حرارت سه بعدی در امتداد جوش (جهت z) در زمان $t_{1/2}$ ۸۳
شکل ۳-۷. مختصات مرکز بیضی تولید حرارت ۸۴
شکل ۳-۸. تغییرات تابع تولید حرارت دوبعدی نسبت به زمان ۸۵
شکل ۳-۹. تغییرات تابع تولید حرارت دوبعدی نسبت به فاصله از مرکزبیضی در امتداد x' ۸۵
شکل ۳-۱۰. الف) محورهای مختصات در اتصال *T*شکل دو لوله ب) شکل هندسی جوش دو لوله..... ۸۶
شکل ۳-۱۱. تغییرات تابع تولید حرارت در $\theta=180$ درجه نسبت به زمان ۸۷
شکل ۳-۱۲. تغییرات تابع تولید حرارت سه بعدی در امتداد جوش (جهت θ) ۸۸
شکل ۳-۱۳. عامل اصطکاک برای جریان کاملاً توسعه یافته داخل لوله [۴۹] ۹۱
شکل ۳-۱۴. المان *Plane55* و المان *Plane182*[۵۸] ۹۵
شکل ۳-۱۵. مدل المان محدود دوبعدی و شرایط مرزی مکانیکی ۹۵
شکل ۳-۱۶. نمای نزدیک مش بندی محل جوش مدل عددی دوبعدی ورق به ضخامت ۶ *mm*..... ۹۵
شکل ۳-۱۷. المان *Solid70* و *Solid185* [۵۸] ۹۶

شکل ۳-۱۸. مدل المان محدود سه بعدی و شرایط مرزی مکانیکی ۹۷
شکل ۳-۱۹. مشبندی مدل عددی سه بعدی ورق به ضخامت $6\ mm$ ۹۷
شکل ۳-۲۰. المان $Solid90$ و $Solid186$ [۵۸] ۱۰۰
شکل ۳-۲۱. مدل المان محدود سه بعدی اتصال جوشی Tشکل دو لوله ۱۰۰
شکل ۴-۱. فلوچارت برای به روز رسانی مدل ۱۰۶
شکل ۴-۲. نمودار تاریخچه دمایی نقاط انتخابی-ورق $6mm$-بدست آمده از نتایج تجربی ۱۰۸
شکل ۴-۳. تغییر مکان لبه ورق پایه و قائم -ورق $6mm$-بدست آمده از نتایج تجربی ۱۰۸
شکل ۴-۴. تغییر مکان لبه ورق پایه و قائم -ورق $6mm$-بدست آمده از نتایج تجربی ۱۰۹
شکل ۴-۵. اثر توزیع بیضوی تولید حرارت و منطقه نفوذ جوش در مدل عددی دوبعدی ۱۱۰
شکل ۴-۶. اثر توزیع بیضوی تولید حرارت و منطقه HAZ در مدل عددی دوبعدی ۱۱۱
شکل ۴-۷. توزیع دمایی در مدل عددی دوبعدی ورق $6mm$- ۳ ثانیه پس از عبور الکترود ۱۱۱
شکل ۴-۸. تغییرات دما در زیر ورق-مدل عددی دوبعدی ورق $6mm$ ۱۱۲
شکل ۴-۹. مسیر در ضخامت مدل دوبعدی ۱۱۳
شکل ۴-۱۰. تغییرات دما، موقعیت نفوذ جوش و HAZ در ضخامت ورق $6mm$ ۱۱۳
شکل ۴-۱۱. تاریخچه تغییر مکان عمودی لبه ورق-مدل عددی دوبعدی ورق $6mm$ ۱۱۵
شکل ۴-۱۲. توزیع دمایی مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۱۶
شکل ۴-۱۳. تغییرات دما در زیر ورق-مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۱۶
شکل ۴-۱۴. تغییرات دما در ضخامت-مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۱۷
شکل ۴-۱۵. تغییرات دما در امتداد جوش زیر ورق $6mm$ مدل سه بعدی ۱۱۸
شکل ۴-۱۶. تغییرات دما در ضخامت-مدل سه بعدی ورق $5mm$ ۱۱۸
شکل ۴-۱۷. تغییرات دما در ضخامت-مدل سه بعدی ورق $8mm$ ۱۱۹
شکل ۴-۱۸. تغییر شکل منطقه جوش در لحظات آغازین فرآیند با بزرگنمایی ۱۲۰
شکل ۴-۱۹. شکل نهایی قطعه-مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۲۰
شکل ۴-۲۰. تاریخچه تغییر مکان عمودی لبه ورق-مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۲۱
شکل ۴-۲۱. شکل نهایی با بزرگنمایی-مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۲۱
شکل ۴-۲۲. تنش مؤثر در حین جوشکاری-مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۲۲
شکل ۴-۲۳. تغییرات تنش مؤثر در ضخامت ورق- مدل سه بعدی ورق $6mm$ ۱۲۲
شکل ۴-۲۴. تاریخچه تغییر مکان عمودی لبه ورق-مدل سه بعدی ورق $5mm$ ۱۲۳
شکل ۴-۲۵. شکل نهایی قطعه-مدل سه بعدی ورق $8mm$ ۱۲۴
شکل ۴-۲۶. تاریخچه تغییر مکان عمودی لبه ورق-مدل سه بعدی ورق $8mm$ ۱۲۴

شکل ۴-۲۷. تنش مؤثر در حین جوشکاری-مدل سه بعدی ورق $8mm$ ۱۲۵
شکل ۴-۲۸. تاریخچه دمایی نقطهای به فاصله $1mm$ از لبه ذوب ۱۲۶
شکل ۴-۲۹. نمودار محاسبه $\Delta t800500$ با توجه به شرایط جوشکاری[۳۰] ۱۲۷
شکل ۴-۳۰. نمودار برای محاسبه دمای حداکثر با توجه به فاصله از خط ذوب[۳۰] ۱۲۸
شکل ۴-۳۱. مقایسه تاریخچه تغییرات دمای نقطه ای به فاصله $3mm$ از لبه ورق قائم ۱۲۸
شکل ۴-۳۲. مقایسه تغییرمکان لبه ورق پایه از تحلیل تجربی و عددی-ورق $6mm$ – جوش اول ... ۱۳۰
شکل ۴-۳۳. شکل نهایی اتصال دو ورق ۱۳۰
شکل ۴-۳۴. بررسی ریزساختاری نمونه جوشکاری شده ۱۳۱
شکل ۴-۳۵. بزرگنمایی مناطق جوش ۱۳۲
شکل ۴-۳۶. سطح داخلی لوله اصلی و نقاط انتخابی محل اتصال ترموکوپل پس از جوشکاری ۱۳۳
شکل ۴-۳۷. نمودار تاریخچه دمایی نقاط انتخابی-لوله به ضخامت ۷/۵ میلیمتر ۱۳۴
شکل ۴-۳۸. نمودار تاریخچه دمایی نقاط انتخابی-لوله به ضخامت ۵/۵ میلیمتر ۱۳۴
شکل ۴-۳۹. نمودار تاریخچه دمایی نقاط انتخابی-لوله به ضخامت ۷/۵ میلیمتر ۱۳۵
شکل ۴-۴۰. تاریخچه دمایی نقاط انتخابی-لوله به ضخامت ۷/۵ میلیمتر حاوی جریان آب با دبی $45/4lit/s$ ۱۳۶
شکل ۴-۴۱. میکروسختی سنجی سطح مقطع آماده شدهٔ از اتصال جوشی ۱۳۷
شکل ۴-۴۲. نمودار حاصل از میکروسختی سنجی نمونه جوشکاری شده ۱۳۸
شکل ۴-۴۳. تغییرات دما در امتداد مسیر زینی شکل زیر منطقه جوش در داخل لوله اصلی ۱۳۹
شکل ۴-۴۴. تاریخچه دمائی نقاط در سطح داخلی لوله اصلی به ضخامت ۷/۵ میلیمتر با همرفت طبیعی ۱۴۰
شکل ۴-۴۵. تاریخچه دمائی نقاط در سطح داخلی لوله اصلی به ضخامت ۷/۵ میلیمتر ۱۴۰
شکل ۴-۴۶. تاریخچه دمائی نقاط در سطح داخلی لوله اصلی به ضخامت ۵/۵ میلیمتر با همرفت طبیعی ۱۴۱
شکل ۴-۴۷. تاریخچه دمائی نقاط در سطح داخلی لوله اصلی به ضخامت ۵/۵ میلیمتر ۱۴۲
شکل ۴-۴۸. تاریخچه دمائی نقاط در سطح داخلی لوله اصلی به ضخامت ۵/۵ میلیمتر- جوشکاری با ۱۵٪ افزایش سرعت پیشروی ۱۴۲
شکل ۴-۴۹. مقایسه نتایج حل عددی با داده های تجربی-تاریخچه دمائی نقطهٔ داخل لوله اصلی در $\theta=90$ ۱۴۴
شکل ۴-۵۰. مقایسه نتایج حل عددی با داده های تجربی-تاریخچه دمائی نقطهٔ داخل لوله اصلی در $\theta=180$ ۱۴۴

شکل ۴-۵۱. مقایسه نتایج حل عددی با داده های تجربی-تاریخچه دمائی نقاطی در ضخامت لوله اصلی ۱۴۵
شکل ۴-۵۲. ضخامت منطقه ذوب شده و *HAZ*- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود با نتایج حاصل از میکروسختی سنجی ۱۴۶
شکل ۵-۱. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۵/۳۶ ثانیه-ورق *۶mm* ۱۴۹
شکل ۵-۲. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۶ ثانیه-ورق *۶mm* ۱۵۰
شکل ۵-۳. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۷ ثانیه-ورق *۶mm* ۱۵۰
شکل ۵-۴. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۸ ثانیه-ورق *۶mm* ۱۵۱
شکل ۵-۵. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۹ ثانیه-ورق *۶mm* ۱۵۱
شکل ۵-۶. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۹/۴۱ ثانیه-ورق *۶mm* ۱۵۲
شکل ۵-۷. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۰ ثانیه-ورق *۶ mm* ۱۵۲
شکل ۵-۸. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۶ ثانیه-ورق *۵mm* ۱۵۳
شکل ۵-۹. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۵/۳۶ ثانیه-ورق *۵mm* ۱۵۳
شکل ۵-۱۰. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۷ ثانیه-ورق *۵mm* ۱۵۴
شکل ۵-۱۱. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۱۷ ثانیه-ورق *۸mm* ۱۵۴
شکل ۵-۱۲. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۷/۶ ثانیه ۱۵۶
شکل ۵-۱۳. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۳۰/۴ ثانیه ۱۵۷
شکل ۵-۱۴. نمودار تنش، دما و استحکام در زمان ۲۸/۲ ثانیه-لوله با همرفت داخلی ۱۵۷
شکل ۵-۱۵. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۳۰/۴ ثانیه-لوله تحت فشار داخلی ۱۵۸
شکل ۵-۱۶. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۷/۶ ثانیه ۱۵۹
شکل ۵-۱۷. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۸/۶ ثانیه ۱۵۹
شکل ۵-۱۸. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۸/۶ ثانیه-لوله تحت فشار داخلی ۱۶۰
شکل ۵-۱۹. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۵ ثانیه-جوشکاری با سرعت بالا ۱۶۰
شکل ۵-۲۰. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۸/۴ ثانیه ۱۶۱
شکل ۵-۲۱. نمودار تنش، دما و استحکام تسلیم در زمان ۲۸/۶ ثانیه ۱۶۱

مقدمه

امروزه جوشکاری حین کار لوله‌ها امری اجتناب ناپذیر در صنایع مختلف، به ویژه نفت و گاز می‌باشد. در بررسی و انجام این فرآیند، به دلیل احتمال بروز حوادثی که منجر به صدمات جانی و مالی بسیاری می‌شود، لازم است تا نهایت دقت اعمال شود. در این پژوهش، فرآیند جوشکاری حین کار به منظور پیش‌بینی فوران[1] بر اساس روش المان محدود مدل‌سازی شده است. موضوع بررسی احتمال فوران در جوشکاری حین کار و روش‌های کاهش آن به علت تأثیر قابل ملاحظه آن در کاهش خطر عملیات جوشکاری و بهبود رفتار مکانیکی محل اتصال (خزش، خستگی و خوردگی) از اهمیت ویژه‌ای در صنایع نفت و پتروشیمی برخوردار است. به خصوص با افزایش میزان کاربرد جوشکاری حین کار در صنایع، اخیراً به این مطلب توجه ویژه‌ای در صنعت و نیز ادبیات فن شده است. به دلیل پیچیدگی فرآیند جوشکاری از نظر شرایط اولیه و مرزی و نیاز به بررسی حرارتی- مکانیکی، امکان حل تحلیلی جهت مدل‌سازی فرآیند وجود ندارد. به همین دلیل بررسی عددی فرآیند جوشکاری امروزه یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم در شاخه مهندسی مکانیک می‌باشد که در این تحقیق به آن پرداخته خواهد شد. از طرفی به منظور شبیه سازی دقیق فرآیند جوشکاری لوله‌ها و نیز کنترل صحت مدل، با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی، تست ریگی طراحی و ساخته می‌شود. از این ریگ جهت انجام آزمایش و کنترل صحت مدل عددی استفاده خواهد شد. سپس تأثیر عوامل مهم مثل شدت و سرعت حرکت منبع حرارتی، فشار و دمای سیال عبوری داخل لوله و دبی آن مورد مطالعه قرار گرفته و از نتایج حاصل در جهت افزایش ایمنی در عملیات جوشکاری حین کار استفاده خواهد شد.

موضوع اصلی این پایان‌نامه مدل‌سازی و تحلیل تجربی و عددی فرآیند اتصال جوش در یک سه راهی مشخص می‌باشد. ویژگی‌های خاص این پایان‌نامه را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود.

- **دست آوردهای کلی:**

۱. کاهش ریسک ناشی از عمل جوشکاری در حین کار
۲. بررسی احتمال فوران و ایجاد امکان پیش بینی ترک[2]
۳. جلوگیری از خطرات احتمالی ناشی از نشت در حین جوشکاری
۴. کاهش هزینه عملیات جوشکاری حین کار

[1] *burn-through*
[2] *cracking*

- **دست آوردهای محاسباتی به طور خاص:**

۱. مدل ریاضی – عددی جوش دو لوله مشخص تعیین شده از طرف شرکت پتروشیمی تبریز
۲. ارائه طرح برای ساخت ریگ آزمایشی
۳. ساخت ریگ آزمایشی
۴. بدست آوردن دیاگرام تغییرات درجه حرارت و تنش نسبت به زمان در مسیرهای بحرانی اطراف محل جوش که می‌توانند جهت پیش بینی خطر فوران و ساختار متالورژیکی فلز پایه مورد استفاده قرار گیرند.

به منظور رسیدن به این اهداف، در قدم اول برای دستیابی به معادلات حاکم در فرآیند جوشکاری، روش مدل‌سازی منبع حرارتی و شبیه‌سازی حرکت الکترود، جوش Tشکل دو ورق از جنس فولاد ضدزنگ ۳۰۴ مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، فرآیند جوشکاری اتصال Tشکل دو ورق بصورت دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌سازی و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است. سپس با روش به‌روزرسانی[1] بر اساس داده‌های تجربی، مدل توسعه یافته‌ای بصورت روابط دو بیضی‌گون برای منبع حرارتی متحرک بدست آمده است. مزیت عمده این مدل، کاهش ضرایب معادلات منبع حرارتی می‌باشد، که این امر با مرتبط ساختن سایر ضرایب به خصوصیات فیزیکی و هندسی در جوش حاصل شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدل دو بعدی با اصلاح تابع تولید حرارت، قادر به پیش‌بینی میدان حرارتی بوده، ولی منجر به خطای فاحش در حل مکانیکی شده و بنابراین استفاده از آن توصیه نمی‌گردد. اما مدل سه‌بعدی قادر است تا بخوبی رفتار حرارتی-مکانیکی قطعه جوشکای شده را پیش‌بینی کند.

با تغییر مختصات از این مدل توسعه یافته، در بررسی حرارتی-مکانیکی فرآیند جوشکاری اتصال Tشکل دو لوله نیز استفاده شده و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همچنین آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی متعددی روی جوش لوله با شرایط مختلف، برای ارزیابی مدل عددی و نیز بررسی اثر سرعت پیشروی جوش، ضخامت لوله و ضریب همرفت ناشی از عبور سیال از داخل لوله اصلی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر دستگاه مختصات مدل توسعه یافته برای شبیه‌سازی جوش دو ورق، بخوبی توانایی بررسی اتصال دو لوله را نیز دارد. جوشکاری لوله در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است: لوله خالی، لوله مملو از آب و نیز لوله با جریان داخلی. احتمال بروز فوران بر اساس حل حرارتی و مکانیکی در تمامی حالات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب همرفت جریان سیال عبوری از داخل لوله و ضخامت آن، نقش اساسی در کاهش احتمال فوران را دارد. در لوله مملو از آب، هر چند که دمای جدار داخلی به نسبت لوله خالی کاهش می‌یابد؛ اما به دلیل

[1] *Model Updating*

جوشش موضعی آب در داخل لوله، افزایش ناگهانی دما رخ می‌دهد که احتمال بروز پدیده فوران را تقویت می‌کند. در انتها با بررسی نتایج عددی و نتایج تجربی بدست آمده و مقایسه آنها با داده‌های ارائه شده در ادبیات فن، پیشنهادات برای ادامه کار ارائه خواهند شد.

بررسی منابع

فصل ۱– پایه های نظری و پیشینه تحقیق

۱-۱- مقدمه

جوشکاری یکی از روش‌های متداول اتصال دائم قطعات فلزی می باشد که سال‌هاست در صنعت بکار گرفته می شود. این تکنولوژی در بسیاری از شاخه‌های صنعت از جمله نفت، پتروشیمی، ماشین سازی، خودرو سازی، اسکله‌های دریایی، نیروگاه‌های تولید برق و صنایع نظامی بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطوری که به صراحت می‌توان اذعان نمود که طراحی اتصالات جوشی و عملیات جوشکاری نقش بسیار مهمی را در توسعه صنعتی و اقتصادی هر کشوری ایفا می‌نماید.

جوشکاری در حقیقت ریخته گری در مقیاس کوچک می‌باشد که در آن تمام اصول متالورژیکی به منظور دستیابی به جوش مرغوب رعایت می‌شود. ترکیبات آلیاژی موجود در اغلب پرکننده‌ها و پوشش آنها، فرآیند پیش‌گرمایی[۱]، پس‌گرمایی[۲]، تأثیرات حرارتی در منطقه جوش[۳] و ناحیه متأثر از حرارت مجاور آن[۴]، ذوب و انجماد مشابه فرآیند ریخته‌گری می‌باشد.

جوش ایده ال را می‌توان به اتصالی اطلاق نمود که نتوان موضع اتصال را از قسمت‌های دیگر قطعات جوش داده شده تشخیص داد. اگرچه دست یافتن به چنین اتصالی ناممکن می‌نماید، اما می‌توان با رعایت اصول متالورژیکی و مکانیکی به اتصالی با کمترین عیوب ذاتی و اعوجاج در قطعه اصلی دست یافت.

به دلیل کاربرد وسیع تکنولوژی جوشکاری در بسیاری از شاخه‌های صنعت از جمله نفت، پتروشیمی، سازه‌های دریایی، پل‌ها، نیروگاه‌های تولید برق و صنایع نظامی مطالعات وسیعی در مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی در جهت کاهش عیوب جوشکاری انجام شده است. هم اکنون نیز با گسترش امکانات سخت‌افزاری و ابزار محاسبات عددی تلاش‌های زیادی به منظور مدل‌سازی فرآیند جوشکاری انجام می‌شود.

از این میان، اتصالات Tشکل لوله‌ها و ورق‌ها بصورت وسیعی در صنایع مختلف ذکر شده استفاده می‌شوند. برای طراحی دقیق اینگونه اتصالات، پیش بینی میدان‌های دمائی، تنش‌ها و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری به علت تاثیر آنها بر عمر خزش، خستگی، شکست، خطراتی مانند خروج سیال در حین عملیات جوشکاری و خوردگی اهمیت بسیاری دارند.

---

[1] *Pre-weld heat treatment*
[2] *Post-weld heat treatment*
[3] *Fusion Zone*
[4] *Heat-affected zone (HAZ)*