

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

دانشکده فنی
گروه مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

مدلسازی عددی و تحلیل تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری در مخازن تحت فشار

از:

سیدمهدی نقوی

اساتید راهنما:

دکتر ابوالفضل درویزه

دکتر منصور درویزه

استاد مشاور:

دکتر علی باستی

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به

دستهای سبز پدر و مادرم که تمام عاطفه و مهر است و به چشمانشان که ستاره ای روشن در تمامی شبهای زندگی ام بوده است.

همسرم که مهربانی اش صفای دریا را جاودانه در گوشم زمزمه می کند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات اساتید راهنما آقایان دکتر ابوالفضل درویزه، دکتر منصور درویزه برای ارائه راهنمایی های ارزنده در طول انجام این پایان نامه قدردانی می نمایم. همچنین از راهنمایی های آقای دکتر باستی کمال تشکر را دارم. از همسر و اعضاء خانواده که در طول انجام این پایان نامه با صبر و تحمل مشکلات را پذیرا بودند نیز سپاسگزارم.

فهرست مطالب

۱	..... فصل اول : پیشگفتار.....	فصل اول : پیشگفتار.....
۲	..... مقدمه.....	۱-۱
۳	..... نگاهی بر پژوهشهای پیشین.....	۲-۱
۳	..... تاریخچه اجزاء محدود در مدلسازی فرآیند جوشکاری.....	۱-۲-۱
۳	..... تنشهای پسماند جوشی.....	۲-۲-۱
۹	..... تغییر شکل های جوشی.....	۳-۲-۱
۱۱	..... روند انجام این پژوهش.....	۳-۱
۱۲	..... فصل دوم : تنش های پسماند و تغییر شکل های جوشی.....	فصل دوم : تنش های پسماند و تغییر شکل های جوشی.....
۱۳	..... مقدمه.....	۱-۲
۱۳	..... تعریف تنش های پسماند و منابع ایجاد آن.....	۱-۱-۲
۱۴	..... تنشهای پسماند جوشی.....	۲-۲
۱۶	..... تنشهای پسماند در جوشکاری سر به سر اجسام استوانه ای.....	۱-۲-۲
۱۷	..... تغییر شکل های جوشی.....	۳-۲
۱۷	..... انواع تغییر شکلهای جوشی.....	۱-۳-۲
۲۰	..... تغییر شکلهای لوله.....	۲-۳-۲
۲۰	..... کاهش قطر در مقطع جوش.....	۱-۲-۳-۲
۲۱	..... بیضوی شدن یا Ovality.....	۲-۲-۳-۲
۲۲	..... دلایل تنشها و تغییر شکل جوشی.....	۴-۲
۲۳	..... تاثیر توزیع حرارت.....	۵-۲
۲۳	..... عوامل ایجاد کننده تغییر شکلهای جوشی.....	۶-۲
۲۵	..... فصل سوم: مدلسازی عددی.....	فصل سوم: مدلسازی عددی.....
۲۶	..... مقدمه.....	۱-۳
۲۷	..... مدلسازی عددی.....	۲-۳
۲۸	..... آنالیز المان محدود برای فیلد حرارتی.....	۳-۳
۲۸	..... خواص حرارتی مواد.....	۱-۳-۳
۲۹	..... انتقال حرارت.....	۲-۳-۳
۳۰	..... معادلات حاکم.....	۳-۳-۳
۳۲	..... شرایط مرزی.....	۴-۳-۳
۳۴	..... آنالیز المان محدود برای فیلد مکانیکی.....	۴-۳

۳۸	..... فصل چهارم: شبیه سازی جوش	
۳۹	..... مقدمه	۱-۴
۴۰	..... روش اجزاء محدود	۲-۴
۴۰	..... روش مدل سازی	۳-۴
۴۳	..... خواص مواد	۴-۴
۴۳	..... نحوه مدل سازی منبع حرارتی	۵-۴
۴۴	..... تخمین انرژی جوش	۱-۵-۴
۴۵	..... توزیع انرژی جوش	۱-۱-۵-۴
۴۶	..... مدل ریاضی برای توزیع انرژی جوش	۲-۱-۵-۴
۴۹	..... مدل هندسی	۶-۴
۵۰	..... مش بندی مدل	۷-۴
۵۳	..... اضافه کردن مواد پرکننده جوش	۸-۴
۵۴	..... فصل پنجم: نتایج و بحث	
۵۵	..... مقدمه	۱-۵
۵۶	..... بررسی تغییر شکل و تنشهای پسماند جوشی در جوشکاری لوله به روش تیگ	۲-۵
۵۶	..... هدف مسئله	۱-۲-۵
۵۶	..... هندسه مسئله	۲-۲-۵
۵۶	..... مشخصات فرآیند جوشکاری	۳-۲-۵
۵۷	..... خواص مواد	۴-۲-۵
۵۸	..... انتخاب المان	۵-۲-۵
۵۹	..... روش حل مسئله	۶-۲-۵
۶۰	..... نتایج	۷-۲-۵
۶۰	..... نتایج تحلیل حرارتی تیگ	۱-۷-۲-۵
۶۴	..... نتایج تحلیل مکانیکی تیگ	۲-۷-۲-۵
۶۴	..... نتایج تغییر شکل جوشی تیگ	۱-۲-۷-۲-۵
۶۹	..... تایید مدل المان محدود با نتایج عملی	۱-۱-۲-۷-۲-۵
۷۱	..... نتایج تنش پسماند جوشی تیگ	۲-۲-۷-۲-۵
۷۷	..... بررسی تغییر شکل و تنشهای پسماند جوشی در جوشکاری لوله به روش میگ	۳-۵
۷۷	..... هدف مسئله	۱-۳-۵
۷۷	..... هندسه مسئله	۲-۳-۵

۷۷	..... مشخصات فرآیند جوشکاری	۳-۳-۵
۷۸	..... خواص مواد	۴-۳-۵
۷۸	..... انتخاب المان حرارتی	۵-۳-۵
۷۸	..... روش حل مسئله	۶-۳-۵
۷۸	..... نتایج	۷-۳-۵
۷۸	..... نتایج تحلیل حرارتی میگ	۱-۷-۳-۵
۸۲	..... نتایج تحلیل مکانیکی میگ	۲-۷-۳-۵
۸۲	..... نتایج تغییر شکل جوشی میگ	۱-۲-۷-۳-۵
۸۳	..... مقایسه نتایج تغییر شکل جوشی تیگ و میگ	۱-۱-۲-۷-۳-۵
۸۵	..... نتایج تنش پسماند جوشی میگ	۲-۲-۷-۳-۵
۹۰	..... مقایسه نتایج تنشهای پسماند جوشی تیگ و میگ	۱-۲-۲-۷-۳-۵
۹۱	..... نتایج و بحث	
۹۳	..... پیشنهادات	
۹۴	..... مراجع	

فهرست شکل ها

۵	..... شکل ۱-۱ مدل Plane strain مورد استفاده در تحلیل تنشهای پسماند [۲].
۶	..... شکل ۲-۱ مراحل بارگذاری حرارتی [۳].
۷	..... شکل ۳-۱ مدل ۲ بعدی Plain Strain در مدلسازی تنشهای پسماند [۵].
۸	..... شکل ۴-۱ تنشهای پسماند محوری در لوله [۶].
۸	..... شکل ۵-۱ تنشهای پسماند محیطی در لوله [۶].
۱۵	..... شکل ۱-۲ توزیع دما و توزیع تنش در ناحیه جوش وقتی که حوضچه در حال حرکت است [۱۹].
۱۷	..... شکل ۳-۲ توزیع تنشهای پسماند محوری بر روی سطوح داخلی (a) و خارجی (b) پوسته استوانه‌ای [۶].
۱۹	..... شکل ۴-۲ انواع تغییر شکلهای جوشی [۲۰].
۲۰	..... شکل ۵-۲ کاهش قطر لوله در مقطع جوش.
۲۱	..... شکل ۶-۲ Ovality در مقطع جوش.
۲۷	..... شکل ۲-۳ روند نمای تحلیل المان محدود جوشکاری.
۴۲	..... شکل ۱-۴ تاثیر حوزه های مختلف بر روی یکدیگر در تحلیل جوش.
۴۷	..... شکل ۲-۴ نمایی از توزیع حرارت به شیوه گلداک [۲۴].
۴۸	..... شکل ۳-۳ انقباض نامتقارن که منجر به تغییر شکل زاویه ای می شود.
۵۵	..... شکل ۱-۴ تأثیر حوزه‌های مختلف بر روی یکدیگر در تحلیل جوش [۴۵].
۵۸	..... شکل ۲-۴ نمایی از توزیع حرارت به شیوه گلداک [۴۵].
۴۹	..... شکل ۳-۴ مدل‌های هندسی در آنالیز جوشکاری.
۵۰	..... شکل ۴-۴ ایجاد المانهای ارتباطی بین المانهای درشت و ریز.
۵۱	..... شکل ۵-۴ مش بندی قطعه برای جوشکاری.
۵۲	..... شکل ۶-۴ مش بندی تطبیقی یا Adaptive Meshing.
۵۳	..... شکل ۷-۴ تکنیک تولد و مرگ المان.
۵۶	..... شکل ۱-۵ ابعاد هر یک از لوله ها.
۶۸	..... شکل ۲-۵ موقعیت خال جوشها نسبت به نقطه شروع جوشکاری.
۵۸	..... شکل ۳-۵ خواص فولاد ضدزنگ ۳۰۴ [۱۸].
۵۹	..... شکل ۴-۵ مدل المان محدود تیگ و میگ.
۶۸	..... شکل ۵-۵ مش بندی انتخاب شده برای لوله.
۶۱	..... شکل ۶-۵ تاریخچه حرارتی گره روی خط جوش در سطح خارجی لوله در روش تیگ.
۶۲	..... شکل ۷-۵ تاریخچه حرارتی گره درفاصله ۱۰ میلیمتری خط جوش در سطح خارجی لوله در روش تیگ.
۶۳	..... شکل ۸-۵ تاریخچه حرارتی گره درفاصله ۱۵۰ میلیمتری خط جوش در سطح خارجی لوله در روش تیگ.
۶۴	..... شکل ۹-۵ تاریخچه حرارتی گره درفاصله ۲۹۰ میلیمتری خط جوش در سطح خارجی لوله در روش تیگ.
۶۵	..... شکل ۱۰-۵ مقاطع بررسی شده.
۶۶	..... شکل ۱۱-۵ میزان کاهش قطر در مقطع اول.
۶۷	..... شکل ۱۲-۵ میزان تغییر قطر در مقطع وسط لوله.
۶۸	..... شکل ۱۳-۵ میزان تغییر قطر در مقطع بالای لوله.

- شکل ۱۴-۵ بررسی میزان تغییر قطر در مقاطع مختلف لوله..... ۶۹
- شکل ۱۵-۵ میزان کاهش قطر در مقطع اول [۱۸]..... ۷۰
- شکل ۱۶-۵ میزان تغییر قطر در مقطع وسط لوله [۱۸]..... ۷۰
- شکل ۱۷-۵ میزان تغییر قطر در مقطع بالای لوله [۱۸]..... ۷۱
- شکل ۱۸-۵ تنش محوری در سطح داخلی در روش تیگ..... ۷۲
- شکل ۱۹-۵ تنش محیطی در سطح داخلی در روش تیگ..... ۷۳
- شکل ۲۰-۵ تنش محوری در سطح خارجی در روش تیگ..... ۷۴
- شکل ۲۱-۵ تنش محیطی در سطح خارجی در روش تیگ..... ۷۵
- شکل ۲۲-۵ توزیع تنشهای محوری و محیطی در سطح داخلی لوله در روش تیگ..... ۷۵
- شکل ۲۳-۵ توزیع تنشهای محوری و محیطی در سطح خارجی لوله در روش تیگ..... ۷۶
- شکل ۲۴-۵ تاریخچه حرارتی گره روی خط جوش در سطح خارجی لوله در روش میگ..... ۷۹
- شکل ۲۵-۵ تاریخچه حرارتی گره در فاصله ۱۰ میلیمتری خط جوش در سطح خارجی لوله در روش میگ..... ۸۰
- شکل ۲۶-۵ تاریخچه حرارتی گره در فاصله ۱۵۰ میلیمتری خط جوش در سطح خارجی لوله در روش میگ..... ۸۱
- شکل ۲۷-۵ تاریخچه حرارتی گره در فاصله ۲۹۰ میلیمتری خط جوش در سطح خارجی لوله در روش میگ..... ۸۲
- شکل ۲۸-۵ میزان تغییر قطر در سه مقطع لوله..... ۸۳
- شکل ۲۹-۵ مقایسه تغییر شکل جوشی تیگ و میگ..... ۸۴
- شکل ۳۰-۵ تنش محوری در سطح داخلی در روش میگ..... ۸۵
- شکل ۳۱-۵ تنش محیطی در سطح داخلی در روش میگ..... ۸۶
- شکل ۳۲-۵ تنش محوری در سطح خارجی در روش میگ..... ۸۷
- شکل ۳۳-۵ تنش محیطی در سطح خارجی در روش میگ..... ۸۸
- شکل ۳۴-۵ توزیع تنشهای محوری و محیطی در سطح داخلی لوله در روش میگ..... ۸۸
- شکل ۳۵-۵ توزیع تنشهای محوری و محیطی در سطح خارجی لوله در روش میگ..... ۸۹
- شکل ۳۶-۵ مقایسه تنش پسماند جوشی تیگ و میگ..... ۹۰

مدلسازی عددی و تحلیل تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری در مخازن تحت فشار

سید مهدی نقوی

فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی منجر به ایجاد تغییرات پیچیده فیزیکی و متالورژیکی در قطعه کار می شود. در این فرآیند همچنین عوامل غیرخطی کننده ماده نظیر پارامترهای وابسته به دمای جوش باعث پیچیده تر شدن بیشتر مساله می شود.

به همین جهت ارائه یک مدل ریاضی دقیق حرارتی و تنشی در این شرایط بسیار مشکل است. با توجه به کاربرد وسیع مخازن تحت فشار و لوله ها در صنعت و استفاده فراوان از روشهای مختلف جوشکاری لزوم بسط دادن تحلیل تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری به این کاربرد مهم صنعتی بسیار اهمیت می دهد.

در این تحقیق یک تحلیل حرارتی- مکانیکی گذرای سه بعدی برای جوشکاری قوسی با گاز محافظ به روش اجزاء محدود برای دو هندسه یکی جوشکاری تیگ و دیگری جوشکاری میگ در حالت یک پاس انجام شده است.

تحلیل حرارتی - مکانیکی به دو بخش تقسیم می شود.

در بخش اول یک تحلیل انتقال حرارت گذرای سه بعدی انجام شده و تاریخچه حرارتی جوش محاسبه می گردد. در بخش دوم با استفاده از نتایج دمایی بدست آمده از بخش نخست، یک تحلیل ترمو-الاستو-پلاستیک گذرای سه بعدی برای محاسبه تغییرشکلهای جوشی و تنشهای پسماند جوشی انجام می گردد.

سپس جهت صحت نتایج با داده های تجربی موجود مقایسه خواهد شد، پس از آنکه از صحت مدل المان محدود اطمینان حاصل گردید، تنش های پسماند جوشی از این مدل استخراج و به عنوان نتایج صحیح ذخیره می گردد.

از نتایج این تحقیق می توان به تطابق بسیار خوب نتایج با داده های تجربی اشاره نمود، بنابراین می توان گفت روش اجزاء محدود قادر به پیش بینی نتایج تنش پسماند جوشکاری می باشد.

کلمات کلیدی: تنش پسماند، جوشکاری محیطی، روش اجزاء محدود، تیگ، میگ

Abstract

Numerical Modeling and Residual Stress Analysis Due To Welding In Pressure Vessel

Seyyed Mehdi Naghavi

Electric arc welding may have considerable effects on the physical and metallurgical characteristics of structures. These effects, along with other nonlinearities due to the changes in material properties with time, make the modeling of the welding process more difficult. On the other hand, the increasing usage of welded pressure vessels and tubes in industries requires accurate mathematical modeling of the welding process including the evaluation of residual stresses.

In this research, 3-D transient thermomechanical analysis have been carried out to model the single pass TIG and MIG welding of pipes using the finite element method.

The analysis consist of two distinct parts. In the first part, 3-D transient thermal analysis of the welding procedure have been carried out to obtain the pertinent time and position temperature field. In the second part, the obtained temperature histories results are then used to perform 3-D thermo-elasto-plastic analysis to evaluation of the welding distortion and residual stress distribution in the welded pipe.

To validate the obtained results are compared with the experimental results. The finite element results were in a very good agreement with the experimental results. So finite element method can predict welding residual stresses results.

Key words: Residual Strees, Girth Weld, Finite Element Method, TIG, MIG

پیشگفتار

تکنولوژی جوشکاری یکی از روشهای متداول اتصال دائم قطعات فلزی و بعضاً غیرفلزی بوده که از زمانهای دور به صورت گسترده‌ای بکار گرفته می‌شود. اتصالات جوشی نظیر سایر انواع اتصالات دارای محدودیت‌هایی از جمله وجود تنشهای پسماند و در نهایت تغییر شکل سازه است که تاثیر مخربی بر عملکرد سازه خواهد داشت. لذا تحلیل و ارزیابی این تنش‌ها به منظور اطمینان از قرار گرفتن آنها در محدوده مجاز از اهمیت بسزایی برخوردار است.

جوشکاری محیطی لوله‌ها نیز کاربرد عملی زیادی دارد از جمله این کاربردها می‌توان به ساخت مخازن تحت فشار و سیستمهای Piping در صنایع هسته‌ای و نفت و گاز اشاره کرد.

فرآیند جوشکاری منجر به توزیع غیریکنواختی از درجه حرارت می‌شود، که با کرنشهای حرارتی و تغییرشکل‌های پلاستیک محلی همراه است. مهمترین عوامل ایجاد تنش‌ها و کرنشهای پسماند در قطعات جوشکاری شده، گرم شدن فلز پایه تا دمای ذوب و سرد شدن ناگهانی و غیر یکنواخت آن در طی سیکل حرارتی می‌باشد، تنش پسماند اطراف جوش، یکپارچگی سازه را از بین برده و تنش پسماند کششی بزرگ در نزدیکی ناحیه جوش باعث کاهش استحکام خستگی سازه و در نتیجه کاهش طول عمر آن می‌شود. هنگام طراحی سازه جوشی می‌بایست پارامترهای طراحی و ساخت از قبیل ضخامت ورق، طرح اتصال، شرایط جوشکاری، ترتیب جوشکاری و روش جوشکاری را به نحوی تغییر داد که اثرات زیان‌آور عیوب جوشکاری از جمله تنش‌های پسماند به میزان قابل قبولی کاهش یابد. نائل شدن به این هدف در مرحله اولیه طراحی خیلی بهتر از مواجهه با مشکلات آتی در مرحله ساخت است. استفاده از روشهای عددی و مخصوصاً روش اجزاء محدود جهت تخمین تنشهای پسماند ضروری به نظر می‌رسد، در این تحقیق موارد زیر بررسی شده است:

- ۱- تحلیل میدان دمایی گذرا و غیر یکنواختی جوش به کمک روش المان محدود
- ۲- تحلیل تغییر شکل‌های جوشی به کمک روش المان محدود
- ۳- تحلیل تنشهای پسماند جوشی به کمک روش المان محدود
- ۴- بررسی تاثیر انتخاب روش جوشکاری بر روی تنشهای پسماند و تغییر شکل‌های جوشی به کمک روش المان محدود

۲-۱- نگاه بر پژوهشهای پیشین

۲-۱-۱ تاریخچه اجزاء محدود در مدلسازی فرایند جوشکاری

در طول ۳۵ سال گذشته، تحقیقاتی برای استفاده از روشهای تحلیلی پیشرفته در مدلسازی جوش صورت گرفته است. به دلیل پیچیدگی فیزیکی مسئله جوشکاری، حل ریاضیاتی ساده برای تحلیل این فرآیند پیچیده مناسب نیست، همچنین در عمل و در کارهای تجربی - آزمایشگاهی نیز به دست آوردن الگوی کاملی از توزیع تنشها و تغییرشکلها در کل سازه جوشی ممکن نیست. از این رو مدلسازی کامپیوتری و روش حل عددی برای تحلیل صحیح این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار و راه را برای تحلیلهای دقیقتر و صحیح هموار نموده است.

روشهای عددی از دهه هفتاد برای شبیه سازی فرآیندهای جوشکاری بکار گرفته شده است. تمرکز اصلی اکثر فعالیتهای اساساً روی پیش بینی تاریخچه دمایی، تنش پسماند و تغییر شکلها بوده است. در این راستا روش المان محدود مرسوم ترین روش عددی بوده که عمده مقالات در این زمینه را به خود اختصاص داده است.

به سبب طبیعت پروسه جوشکاری، پیچیدگیهای بسیاری در تحلیل المان محدود جوش به نسبت سایر مباحث سنتی مکانیک باید اعمال شود برای نمونه خواص وابسته به دمای ماده، گرادیان بسیار بالای دما، میدانهای تنش و کرنش وابسته به زمان و با مختصاتهای فضایی و از جمله این پیچیدگیها می باشد. مدلسازی جوش همزمان با پیشرفت کامپیوترها و تقاضای روز افزون صنعت از دودهمه پیش تا کنون توسعه چشمگیری یافته است که در ادامه به روند این پیشرفت ها اشاره می شود.

۲-۲-۱ تنش های پسماند جوشی

J. Williams [۱] تنشهای پسماند ایجاد شده در طی جوشکاری تک پاسه را با استفاده از تکنیک المان محدود محاسبه کرد.

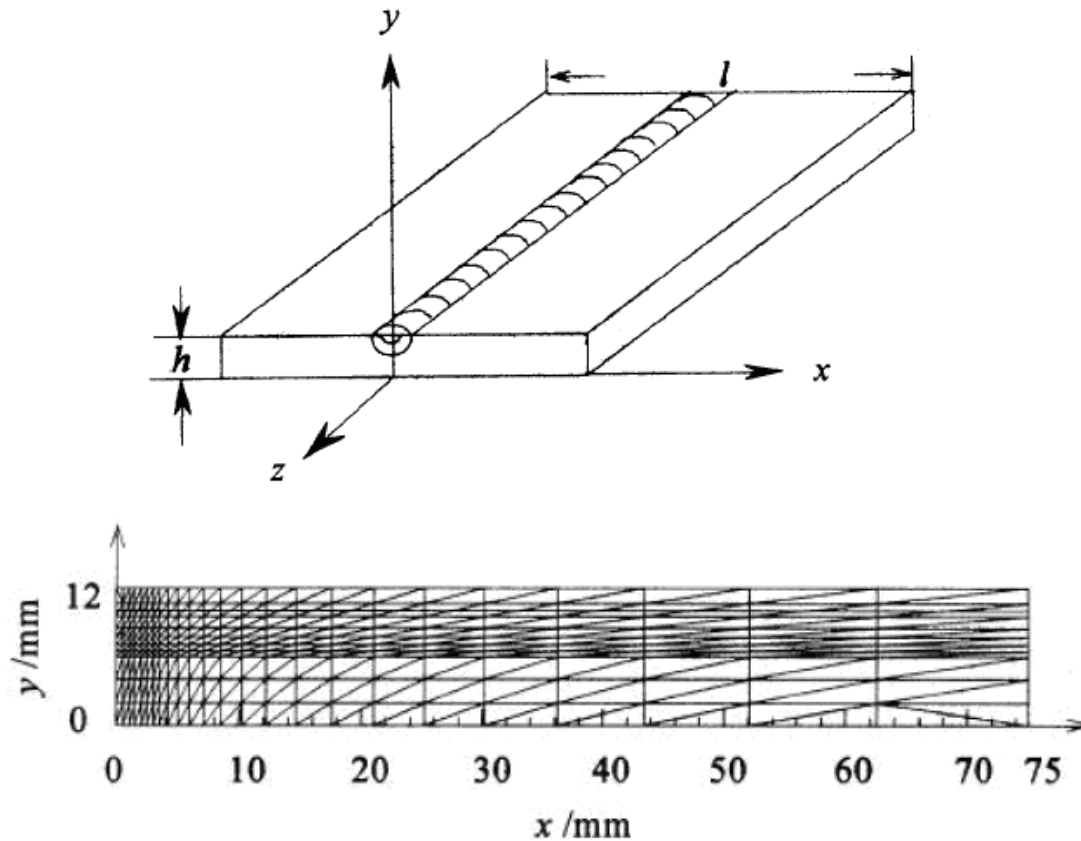
نمونه مورد بررسی در این تحقیق دو پلیت بلند با طول ۳۰۰ میلی متر و عرض ۱۰۰ میلی متر است که با اتصال جوشی به هم

متصل می شوند. برای مدلسازی المان محدود مسئله آنها از یک مدل ۲ بعدی اکسیسمتریکی و روش کوپل غیر مستقیم استفاده کردند. خواص مواد وابسته به دما فرض شده است. با انجام تحلیل و مقایسه تنشهای پسماند طولی و عرضی آنها نشان دادند که تنشهای طولی بزرگ کششی در مناطق نزدیک جوش و با بزرگی برابر استحکام تسلیم فلز پایه به وجود می آید و با فاصله گرفتن از مرکز جوش تبدیل به تنشهای فشاری می شود. اندازه گیری تنشهای پسماند عرضی نیز توزیع مشابهی را در نمونه اتصال نشان

می‌دهد. در بخش بعد این تحقیق به بررسی تاثیر برخی پارامترها روی بزرگی و توزیع تنشهای پسماند پرداخته شده است. نتایج زیر از این بررسی به دست آمده است:

- ۱- بزرگی تنشهای پسماند در مناطق مرکزی جوش با افزایش طول نمونه کاهش می‌یابد.
- ۲- تنشهای پسماند کششی در مجاورت جوش با کاهش ضخامت افزایش می‌یابد.
- ۳- افزایش سرعت جوشکاری باعث کاهش منطقه متاثر از حرارت و در نتیجه کاهش تنشهای پسماند شد.
- ۴- مقدار تنشهای پسماند با استفاده از قیود، بزرگتر از حالتی است که اتصال به صورت آزاد صورت گیرد.
- ۵- پیشگرم کردن باعث کاهش تنشهای پسماند می‌شود.

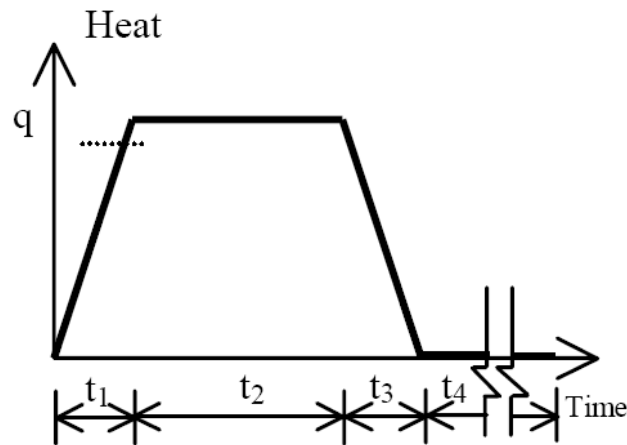
W. JUAN و L. YAJIANG [۲] تنشهای پسماند ایجاد شده در جوشکاری فولادهای با استحکام بالا را با استفاده از روش المان محدود به دست آوردند. در این تحقیق از یک مدل ۲ بعدی Plane strain برای مدلسازی جوش سر به سر دو پلیت استفاده شد. همچنین به دلیل تقارن مدل تنها نصف اتصال مدل شده است. بارگذاری در این مدل به صورت توزیع مثلثی (دوزنقه‌ای) و به طور یکنواخت روی نودهای منطقه جوش اعمال شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق تحلیل کوپل غیر مستقیم حرارتی - مکانیکی است. مدل مورد استفاده در این تحلیل در شکل ۱-۱ دیده می‌شود.



شکل ۱-۱: مدل Plane strain مورد استفاده در تحلیل تنشهای پسماند توسط [۲]

پس از انجام این تحقیق آنها به این نتیجه رسیدند که تنشهای پسماند طولی و عرضی در مرکز جوش در ابتدای جوشکاری فشاری است ولی با گذشت زمان تبدیل به تنشهای کششی می گردند ولی سطح این تنشها از استحکام نهایی فلز پایینتر است.

B.Mellor [۳] از یک مدل دو بعدی متقارن برای مدلسازی جوشکاری سر به سر صفحات استفاده کرد. حرارت ورودی به فلز جوش شامل بار حرارتی سطحی یکنواخت شامل ۲۰٪ انرژی جوش و بار حجمی شامل ۸۰٪ انرژی جوش به منطقه جوش اعمال شد. همچنین برای مدل کردن حرکت منبع جوش در این تحلیل از تابع پله‌ای در مدل ۲ بعدی استفاده شد. این بارگذاری شامل ۴ مرحله بارگذاری است (مطابق شکل ۱-۲) مرحله اول شامل افزایش خطی حرارت تا مقدار q (نزدیک شدن قوس) مرحله دوم ثابت نگه داشتن حرارت تا زمان t_2 و در مرحله سوم کاهش خطی حرارت تا زمان t_3 (دور شدن منبع حرارتی جوش) است. مرحله چهارم شامل خنک شدن نمونه تا دمای محیط است.



شکل ۱-۲: مراحل بارگذاری حرارتی [۳]

تحلیل المان محدود با روش آنالیز کوپل غیر مستقیم صورت گرفت و تنشهای پسماند به دست آمده با نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی تنشها به روش کرنش سنجی مقایسه شد و نشان داده شد که نتایج حاصل همخوانی خوبی دارند. در ادامه این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای مختلف روی دقت جوابها پرداخته شد و نتایج زیر به دست آمد:

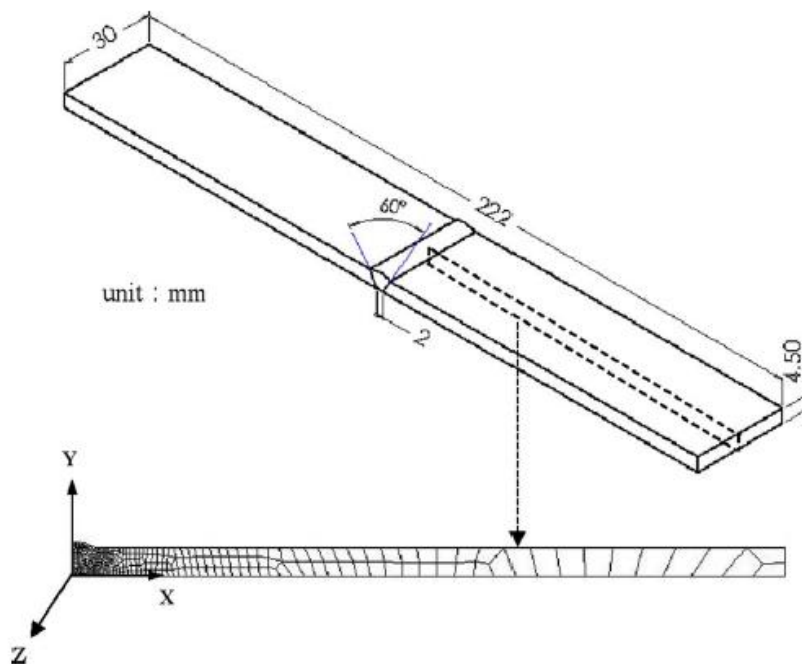
۱- میزان حرارت ورودی و در نظر گرفتن تنش تسلیم مواد به صورت تابعی از دما تاثیر زیادی روی دقت نتایج دارد.

۲- با توجه به اثرات اندک تشعشع و گرمای نهان ذوب روی تنشهای پسماند جوشی برای ساده سازی مدل می توان از اثر این دو پارامتر صرف نظر کرد.

S.Murgan [۴] توزیع دما و تنشهای پسماند ایجاد شده در اتصالات جوشی فولاد زنگ نزن AISI304 و فولاد کم کربن را از روش اندازه گیری تجربی با متد تفرق اشعه X اندازه گیری و با هم مقایسه کردند. این اتصالات با ضخامتهای مختلف تهیه و با روش الکتروود دستی جوش داده شده بودند. آنها با مقایسه نتایج به این نتیجه رسیدند که در نقاط نزدیک جوش در نمونه های فولاد زنگ نزن در زمانهای مشابه بالاتر از نمونه مشابه کربنی است ولی در نقاط دورتر دما در فولاد کربنی بالاتر است. با بررسی تنشهای پسماند در هر پاس جوش در این تحقیق نتیجه گرفته شده است که گستردگی تنشهای پسماند در فولاد زنگ نزن در پاس اول بالاتر از فولاد کم کربن است و با افزایش تعداد پاسها مساوی و حتی بالعکس می شود. تنشهای پسماند وابسته به پیک دما و توزیع آن هستند بنابراین برای این که پیک دما در هر دو نمونه برابر باشد اتصال فولاد کم کربن به حرارت بالاتری نیاز دارد و لذا انرژی ورودی بالاتر منجر به تشکیل تنشهای بزرگتری می گردند.

Plain Strain [5] P. Chang, T. Teng برای مدل‌سازی تشکیل تنش‌های پسماند در یک اتصال سر به سر پلیت‌ها از مدل ۲ بعدی

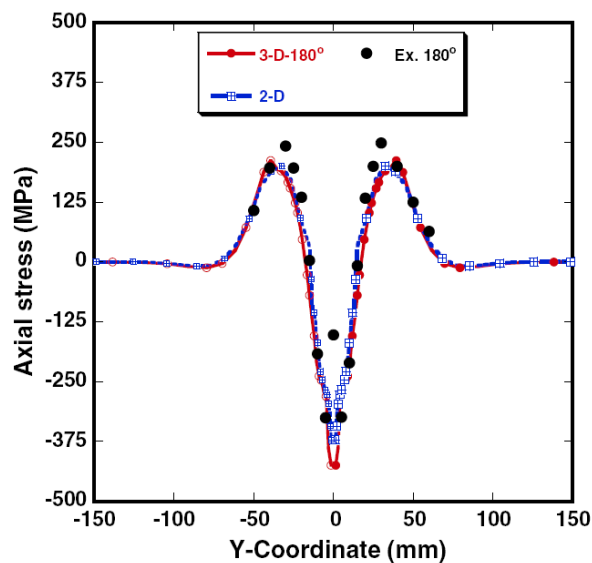
Strain مطابق شکل ۱-۳ استفاده کردند.



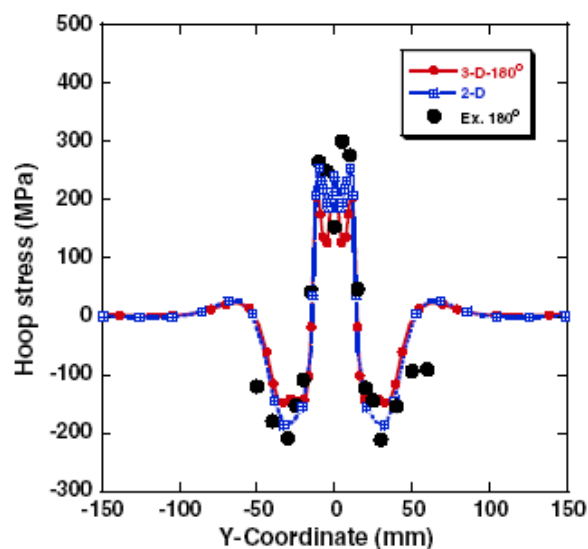
شکل ۱-۳: مدل ۲ بعدی Plain Strain در مدل‌سازی تنش‌های پسماند [۵]

آنها توزیع تنش‌های طولی و عرضی به دست آمده از این مدل را با توزیع تنش‌های حاصل از اندازه‌گیری تجربی با روش تفرق اشعه X مقایسه کردند و مشاهده شد که نتایج به دست آمده از محاسبات المان محدود با نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی همخوانی خوبی دارد.

D.Deng, H.Murakawa [۶] از آنالیز المان محدود برای محاسبه توزیع حرارت و تنش‌های پسماند در اتصال چند پاسه سر به سر لوله‌های فولاد زنگ نزن آستینیتی SUS304 استفاده کردند. آنها نخست یک مدل ۳ بعدی (3D) جهت تعیین و شبیه سازی حوزه‌های دمایی و تنش‌های پسماند جوشی به کار بردند. سپس با همان پارامترها مدل ۲ بعدی (2D) متقارن محوری نیز ایجاد کردند. در شکل ۱-۴ و ۱-۵، مقایسه ای بین تنش‌های پسماند محوری و محیطی در لوله بدست آمده از تحلیل سه بعدی، تحلیل دو بعدی تقارن محوری و بررسی تجربی انجام گرفته است.



شکل ۱-۴: تنشهای پسماند محوری در لوله [۶]



شکل ۱-۵: تنشهای پسماند محیطی در لوله [۶]

نتایج شبیه سازی نشان می دهند که مدل دوبعدی اکسیسیمتریک می تواند به صورت کارآمدی سیکل حرارتی و تنشهای پسماند را در لوله ها محاسبه کند با این تفاوت که استفاده از مدل دوبعدی زمان محاسبات را تا حد بسیار زیادی کاهش می دهد.

پس از مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی با نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی به روش کرنش سنجی شیار مشاهده شد که هر دو مدل نتایج بسیار خوبی را نشان می دهند. همچنین توزیع دما در نقاط مختلف در حین جوشکاری را با نصب ترموکوپلهایی اندازه گیری کردند که در مقایسه با نتایج المان محدود تطابق خوبی مشاهده شد.

X.Zhu, Y.Chao [۷] تاثیر خواص مواد را در مدلسازی المان محدود جوشکاری بررسی کردند. این کار با مدلسازی جوشکاری در یک پلیت انجام گرفت و خواص مواد به صورت وابسته به دما، ثابت در دمای اتاق و ثابت با مقدار متوسط در نظر گرفته شد. با مقایسه نتایج به دست آمده در حالت‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن تمامی خواص مواد به جز تنش تسلیم به صورت ثابت در دمای اتاق منجر به نتایج مناسبی خواهد شد. برطبق این بررسی در نظر گرفتن تنش تسلیم به صورت سه خطی به ترتیب زیر روش ساده و مناسبی برای مدلسازی جوشکاری است:

مقدار تنش تسلیم در دمای ۰ تا ۱۰۰ درجه معادل مقدار تنش تسلیم در دمای اتاق، در $\frac{2}{3}$ دمای ذوب برابر ۰.۰۵ تنش تسلیم در

دمای اتاق و در نهایت بین ۱۰۰ درجه تا $\frac{2}{3}$ دمای ذوب بصورت کاهشی از نوع خطی در نظر گرفته می شود.

در مدل‌های سه بعدی می توانند میدان حرارتی و تنش را به طور جزئی تری در حین جوشکاری نشان دهد، اما به دلیل غیر خطی بودن تحلیل، زمان مورد نیاز برای آن بسیار بالا است.

۱-۲-۳ تغییر شکل های جوشی

H.Argyris et.a [۸] در سال ۱۹۸۲ یک پاسخ حرارتی- مکانیکی را با استفاده از مدل دوبعدی جهت ترکیب کردن دو تحلیل حرارتی و مکانیکی ارائه کرد. (ایجاد امکان ترکیب تحلیل حرارتی و مکانیکی اولین گام برای شبیه سازی جوش است). سپس E. F. Rybicki et.al [۹] یک تحلیل الاستیک - پلاستیک حرارتی را روی یک سازه با جوش لب به لب و به صورت دو بعدی و نیز با تکنیک مدلسازی نصف سازه (در سازه هایی که محور تقارن دارند می توان جهت کاهش حجم محاسبات ، نصف سازه را مدل کرد) انجام داد . او نصف یک لوله را مدل کرد و نتایج حاصله از تحلیل که شامل تعیین تاریخچه دمایی و تنش پسماند بود را با اندازه گیری های تجربی تایید کرد. او جوشکاری را با دو پاس انجام داد. V.J Papazoglou and K. Masubuchi [۱۰] یک تحلیل دو بعدی حرارتی و مکانیکی را برای جوشکاری میگک چند پاسه انجام دادند اما تحلیل های مذکور همگی به دلیل نبود امکانات مناسب کامپیوتری ، به صورت دو بعدی انجام شدند . هرچند تحلیل دو بعدی جهت پیش بینی تاریخچه دمایی و تنش پسماند بسیار دقیق است اما با این تحلیل امکان بررسی تغییرشکلهای خارج صفحه و بررسی اثر خال جوشها و نقاط شروع و پایان جوشکاری وجود ندارد . لذا چاره ای جز روی آوردن به تحلیلهای سه بعدی نبود .