



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی مکانیک  
گرایش طراحی کاربردی

تحت عنوان:

**بررسی اثر تعداد پاسهای جوشکاری و تست فشار هیدرواستاتیک بر تنش پسماند در  
لوله های فولادی به کمک شبیه سازی به روش اجزاء محدود**

اساتید راهنما :

دکتر محمد ابراهیم اعلمی آل آقا

دکتر مهرداد فروتن

نگارش:

سعید نیک آبادی

تیر ماه ۱۳۸۹

## چکیده

در این پایان نامه به بررسی اثر تعداد پاسهای جوشکاری و تست فشار هیدرواستاتیک بر روی تنش پسماند در لوله های فولادی به کمک شبیه سازی به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. شبیه سازی انجام شده با استفاده از روش آنالیز المان محدود ترمو-الاستو-پلاستیک و با استفاده از کدنویسی در نرم افزار المان محدود ANSYS11.0، به محاسبه تنشهای پسماند جوشی در اتصالات سر به سر ورق و لوله پرداخته شده است. در این تحقیق در مرحله اول شبیه سازی سه بعدی ورق صورت گرفته است. در مرحله دوم به بررسی شبیه سازی سه بعدی لوله ۳/۴ اینچ پرداخته شده است و تاریخچه دمایی حاصل از این شبیه سازی با نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی دمایی به دو روش لیزری و تماسی مقایسه شد. همخوانی مناسبی بین نتایج حاصل از روش عددی و تجربی مشاهده گردید. در مرحله سوم شبیه سازی سه بعدی یک لوله با قطر خارجی ۱۱۴/۵ میلیمتر صورت گرفت و توزیع تنش پسماند حاصل از شبیه سازی با نتایج موجود حاصل از اندازه گیری تجربی تنش های پسماند به روش کرنش سنجی سوراخ مقایسه شده است. در ادامه به مدل سازی فرآیند جوشکاری در دو نمونه لوله نفت و گاز ۸ و ۲۰ اینچ پرداخته شده است. و در نهایت هم به بررسی اثر تعداد پاس و همچنین تأثیر تست هیدرواستاتیک در کاهش تنش های پسماند پس از فرآیند جوشکاری در لوله ۸ اینچ پرداخته شده است. تعداد پاس یکی از پارامترهای مهم در پروسه جوشکاری به شمار می رود که تأثیر بالایی بر هزینه ایجاد اتصال و کیفیت نهایی جوش دارد. در این قسمت از پایان نامه پس از اطمینان صحت و دقت نتایج حاصل از مدل المان محدود لوله ۸ اینچ به بررسی اثر تعداد پاس بر مقدار و چگونگی توزیع تنشهای پسماند جوشی پرداخته می شود. در این بررسی ایجاد اتصال بین دو لوله در ۲ و ۳ پاس در حالت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از راهکارهای صنعتی برای کاهش تنش پسماند استفاده از فرآیند هایدروتست است. در این بخش از پایان نامه به بررسی اثر فرآیند هایدروتست بر روی تنش های پسماند بر مبنای نتایج حاصل از شبیه سازی لوله ۸ اینچ پرداخته شده است. که نتایج تنش های پسماند پس از اعمال فشار هیدرواستاتیکی نشان می دهد که تا حد زیادی در کاهش تنش ها نقش دارد.

به منظور مدل سازی و به دست آوردن میدان دمایی از منبع گرمایی متحرک و مدل کروی چشمه گرمایی و خواص متغییر با دمای ماده استفاده شده است. سپس با استفاده از آنالیز کوپل غیر مستقیم نتایج این تحلیل در تحلیل ترمو-الاستو-پلاستیک و به دست آوردن میدان تنش به کار گرفته شده است. که برای انجام این کارها و بالا بردن دقت نتایج و در عین حال پایین آوردن زمان حل مسأله با استفاده از برنامه نویسی ماکرو نوع خاصی از مش بندی انجام شده است. و همچنین برای حل آنالیز حرارتی و مکانیکی در تمام مدل ها از برنامه نویسی ماکرو استفاده شده است.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
أ.....	فهرست مطالب
ه.....	فهرست شکلها
ط.....	فهرست جداول

### فصل اول: اهمیت جوشکاری و مروری بر تحقیقات در این زمینه

۱	۱-۱- مقدمه
۲.....	۲-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده
۴.....	۳-۱- رؤوس مطالب مرور شده در این تحقیق
۶.....	

### فصل دوم: تنش های پسماند حرارتی ناشی از جوشکاری

۸	۱-۲- مقدمه
۹.....	۲-۲- تنش پسماند
۹.....	۱-۲-۲- تنش های پسماند مکانیکی
۱۱.....	۲-۲-۲- تنش های پسماند حرارتی
۱۲.....	۳-۲- توزیع تنش پسماند
۱۶.....	۴-۲- تنش های پسماند جوشی در اتصالات سربه سر ورق
۱۸.....	۵-۲- تنش های پسماند جوشی در اتصالات سربه سر لوله
۱۹.....	۶-۲- تأثیر تنش های پسماند بر روی اتصالات جوشکاری شده
۲۰.....	۷-۲- اندازه گیری تنش های پسماند
۲۱.....	۱-۷-۲- اندازه گیری تنش های پسماند با روشهای غیر مخرب
۲۱.....	۱-۷-۲- روشهای انکسار اشعه
۲۲.....	۲-۷-۲- اندازه گیری تنش های پسماند با روشهای مخرب
۲۳.....	۲-۷-۲- اندازه گیری تنش پسماند به روش مقطع زنی
۲۳.....	۳-۷-۲- اندازه گیری تنش های پسماند با روشهای نیمه مخرب
۲۴.....	۱-۳-۷-۲- اندازه گیری به روش کرنش سنجی سوراخ

### فصل سوم: آنالیز المان محدود فرآیند جوشکاری

۲۸	۱-۳- مقدمه
۲۹.....	۲-۳- روش اجزاء محدود
۲۹.....	۳-۳- شبیه سازی فرآیند جوشکاری
۳۱.....	۱-۳-۳- آنالیز حرارتی
۳۴.....	۱-۱-۳-۳- معادلات انتقال حرارت
۳۵.....	۲-۱-۳-۳- شرایط مرزی و شرایط اولیه حرارتی
۳۷.....	

۳۸	..... اتلاف حرارت ۳-۱-۳-۳
۳۹	..... تحلیل تنش ۲-۳-۳
۴۰	..... معیار تسلیم ۱-۲-۳-۳
۴۰	..... کار سختی ۲-۲-۳-۳
۴۱	..... قانون جریان ۳-۲-۳-۳
۴۳	..... شرایط مرزی مکانیکی ۴-۲-۳-۳
۴۴	..... مشخصات ماده ۳-۳-۳
۴۴	..... کمیتهای ترمو قیزیکی ۱-۲-۳-۳
۴۶	..... کمیتهای مکانیکی ۲-۲-۳-۳
۴۷	..... تغییرات فازی ۴-۳-۳
۴۷	..... تغییرات فازی حالت جامد ۱-۴-۳-۳
۴۹	..... تغییرات فاز جامد به مایع ۲-۴-۳-۳
۵۰	..... شبیه سازی پروسه جوشکاری به روش اجزاء محدود ۴-۳
۵۰	..... مدلسازی هندسی ۱-۴-۳
۵۲	..... مش بندی مدل ۲-۴-۳
۵۶	..... مدلسازی منبع حرارتی ۳-۴-۳
۵۹	..... توزیع گوسی شار سطحی ۱-۳-۴-۳
۶۱	..... توزیع نیم کروی چگالی توان ۲-۳-۴-۳
۶۱	..... توزیع بیضوی چگالی توان ۳-۳-۴-۳
۶۲	..... توزیع دو بیضوی چگالی توان ۴-۳-۴-۳
۶۵	..... تکنیک تولد و مرگ المانها ۴-۴-۳
۶۶	..... شبیه سازی فرآیند هیدرو استاتیک ۶-۲

#### فصل چهارم: فعالیت های آزمایشگاهی

۶۸	
۶۹	..... مقدمه ۱-۴
۶۹	..... آماده سازی نمونه ها ۲-۴
۷۱	..... جوشکاری نمونه های آماده شده ۳-۴
۷۲	..... نمونه های پلیت ۱-۳-۴
۷۲	..... نمونه های لوله ۲-۳-۴
۷۳	..... آزمایش متالوگرافی ۴-۴
۷۳	..... نمونه برداری از قطعه مورد نظر ۱-۴-۴
۷۴	..... آماده کردن سطح نمونه ۲-۴-۴
۷۴	..... سنگ زدن ۱-۲-۴-۴
۷۴	..... سنباده زنی ۲-۲-۴-۴
۷۵	..... پولیش زدن و صیقل کردن نمونه ها ۳-۲-۴-۴
۷۵	..... پولیش مکانیکی ۱-۳-۲-۴-۴

۷۸.....	۳-۴-۴- اچ کردن
۷۹.....	۱-۳-۴-۴- اچ شیمیایی
۸۰.....	۵-۴- اندازه گیری مدل بیضوی گلداک
۸۴.....	۶-۴- اندازه گیری دما
۸۴.....	۱-۶-۴- ترمومتر مادون قرمز غیر تماسی
۸۵.....	۱-۱-۶-۴- کالیبراسیون دستگاه
۸۷.....	۲-۱-۶-۴- مشخصات دستگاه لیزری
۸۸.....	۳-۱-۶-۴- بررسی نتایج
۸۹.....	۲-۶-۴- ترمومتر تماسی
۹۱.....	۱-۲-۶-۴- بررسی نتایج
۹۳.....	۷-۴- اندازه گیری تنشهای پسماند

## ۹۵ فصل پنجم: محاسبه تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری

۹۶.....	۱-۵- مقدمه
۹۷.....	۲-۵- مدل اول : پلیت
۹۷.....	۱-۲-۵- شبیه سازی سه بعدی
۹۷.....	۱-۱-۲-۵- مدل المان محدود
۱۰۰.....	۲-۱-۲-۵- مدل حرارتی
۱۰۱.....	۳-۱-۲-۵- مدل مکانیکی
۱۰۱.....	۴-۱-۲-۵- نتایج بدست آمده
۱۰۵.....	۳-۵- مدل دوم : لوله ۳/۴ اینچ
۱۰۵.....	۱-۳-۵- شبیه سازی سه بعدی
۱۰۵.....	۱-۱-۳-۵- مدل المان محدود
۱۰۸.....	۲-۱-۳-۵- مدل حرارتی
۱۰۹.....	۴-۱-۳-۵- نتایج بدست آمده
۱۱۰.....	۵-۱-۳-۵- مقایسه نتایج حرارتی حاصل از شبیه سازی سه بعدی با نتایج تجربی
۱۱۲.....	۴-۵- مدل سوم : لوله ای با قطر ۱۱۴/۵ میلیمتر
۱۱۳.....	۱-۴-۵- شبیه سازی سه بعدی
۱۱۳.....	۱-۱-۴-۵- مدل المان محدود
۱۱۴.....	۲-۱-۴-۵- مدل حرارتی
۱۱۵.....	۳-۱-۴-۵- مدل مکانیکی
۱۱۶.....	۴-۱-۴-۵- نتایج بدست آمده
۱۱۷.....	۵-۱-۴-۵- مقایسه تنش های پسماند حاصل از شبیه سازی سه بعدی با نتایج تجربی
۱۲۱.....	۵-۵- مدل چهارم : لوله ۸ اینچ
۱۲۱.....	۱-۵-۵- شبیه سازی سه بعدی
۱۲۱.....	۱-۱-۵-۵- مدل المان محدود

۱۲۴	..... مدل حرارتی ۲-۱-۵-۵
۱۲۵	..... مدل مکانیکی ۳-۱-۵-۵
۱۲۶	..... نتایج بدست آمده ۴-۱-۵-۵
۱۳۱	..... مدل پنجم : لوله ۲۰ اینچ ۶-۵
۱۳۱	..... شبیه سازی سه بعدی ۱-۶-۵
۱۳۱	..... مدل المان محدود ۱-۱-۶-۵
۱۳۳	..... مدل حرارتی ۲-۱-۶-۵
۱۳۵	..... مدل مکانیکی ۳-۱-۶-۵
۱۳۶	..... نتایج بدست آمده ۴-۱-۶-۵
۱۳۹	..... بررسی اثر تعداد پاس ۷-۵
۱۳۹	..... نتایج بدست آمده ۱-۷-۵
۱۴۳	..... اثر تست هیدرواستاتیک ۸-۵
۱۴۴	..... نتایج بدست آمده ۱-۸-۵

#### فصل ششم: نتیجه گیری، جمع بندی و پیشنهادات ۱۴۸

۱۴۹	..... جمع بندی نتایج ۱-۶
۱۵۰	..... اثر تعداد پاس ۱-۱-۶
۱۵۱	..... اثر تست هیدرواستاتیک ۱-۱-۶
۱۵۱	..... پیشنهادات ۲-۶

# فصل اول

اهمیت جوشکاری و مروری بر تحقیقات در این زمینه

## فصل اول : اهمیت جوشکاری و مروری بر تحقیقات در این زمینه

### ۱-۱ مقدمه

جوشکاری یکی از فنون قدیمی بوده که از عصر آهن به بعد به نحوی در رابطه با اتصال فلزات مورد استفاده قرار گرفته است. به دنبال کشف آهن و نیاز به ساخت ابزار، بشر تکنیک هایی برای اتصال فلزات آموخت. برخی از این فنون هنوز به عنوان اصول در تکنیک های پیشرفته جوشکاری امروزی به کار می روند. تحولات اساسی در این زمینه عمدتاً در اواخر قرن نوزدهم میلادی آغاز شد و به دنبال آن روشهای مختلفی تکامل یافته و پایه آنچه امروز تکنولوژی جوشکاری نامیده می شود، نهاده شد.

تکنولوژی جوشکاری یک دانش کاربردی بوده و امروز به واسطه گستردگی آن حوزه های مختلفی از قبیل خواص مواد، مقاومت مصالح، الکتروتکنیک و الکترونیک را در بر می گیرد. در این رابطه جوشکاری دارای بیشترین گستردگی و بالاترین رقم پارامترهای دخالت کننده در مقایسه با دیگر فرآیندهای صنعتی می باشد. این تکنولوژی در بسیاری از شاخه های صنعت از جمله صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، ماشین سازی، خودروسازی، پل سازی، اسکله های دریایی، نیروگاهها و صنایع نظامی به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. به طوریکه به صراحت می توان اذعان نمود که مهندسی جوش و جوشکاری نقش بسیار مهمی در توسعه صنعتی و اقتصادی جهان ایفا نموده است. امروزه تکنولوژی جوشکاری از یک روش ابتدایی به روشهای مدرن با اتوماسیون بالا تحول یافته و بالغ بر صد روش مختلف را شامل می شود. اما با این وجود اتصالات جوشی دارای محاسن و محدودیتهای است که تا حد امکان باید آنها را مورد توجه قرار داد و هنگام طراحی به آنها توجه کرد.

به طور کلی محاسن یک اتصال جوشی را می توان آب بندی کامل، استحکام استاتیکی بالا (در حد استحکام فلز پایه و یا بالاتر از آن)، انعطاف پذیری بالا، وزن پایین و زمان تولید کوتاه عنوان کرد. اما با تمام برتری های جوشکاری نسبت به سایر روش های اتصال مکانیکی قطعات، این اتصال باعث به وجود آمدن عیب هایی نیز می گردد که بر عملکرد سازه و ضریب اطمینان آن تأثیر گذار است. عیوب متفاوت ایجاد شده در جوش را می توان به سه دسته عیوب تکنیکی، متالوژی و مکانیکی تقسیم بندی کرد. عیوبی از قبیل ناخالصی، ترک، تنش های پسماند و تغییر شکل های جوشی. هر یک از عیوب گفته شده باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال جوش شده و مشکلاتی را در ارتباط با استفاده از تکنولوژی جوشکاری ایجاد می کنند و می توانند باعث عدم کارایی دلخواه اتصال جوشی شوند.



در عمل ایجاد جوش کاملاً سالم (بدون هیچگونه عیب و نقص) تقریباً غیر ممکن و غیر اقتصادی است. بنا بر آنچه گفته شد لزوماً یک اتصال جوشی صددرصد طبق آنچه طراحی شده است رفتار نخواهد کرد به طوری که عیوب و مشکلات ایجاد شده، رفتار سازه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین ضرورت دارد بعد از ساخت یک سازه جوشی، یک سری اقدامات جهت اطمینان از رفتار سازه و کیفیت جوش ایجاد شده انجام گیرد.

یکی از مسائل مطرح در بحث ایمنی سازه های جوشی تنش های پسماند ناشی از جوشکاری است. تنش های پسماند جوشی از نوع عیوب مکانیکی ایجاد شده در جوش بوده و همواره همراه با این اتصالات می باشد. علیرغم توسعه زیاد تکنولوژی از آن زمان تا به حال، هنوز این مشکل در سازه های جوشی وجود دارد. این گونه تنش ها، از نوع تنش های حرارتی هستند که به واسطه حرارت دادن و انبساط و انقباض موضعی و تغییر شکل پلاستیک در قطعه به وجود می آیند. در هنگام بارگذاری خارجی این تنش ها با تنش های ناشی از بار جمع شده و در شرایط خاص منجر به شکست قطعه یا سازه می گردد. پیش بینی تنش های پسماند در اثر جوشکاری، از نقطه نظر مسائل مربوط به رشد ترک و مکانیک شکست و همچنین مقاومت خستگی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در سازه های جوشی رعایت ضریب اطمینان در مواضع جوش داده شده، مستلزم طراحی اتصال به طور صحیح و دقیق می باشد. یکی از اولین نکات، آگاهی دقیق بر نقش موضع اتصال و نوع و مقدار تنش های اعمال شده بر آن است. با دانستن نوع نیرو و جهت آن می توان طرح اتصال صحیح در محل مناسب را برای جوش مشخص کرد تا حداکثر تحمل را داشته باشد. به طور کلی موضع طراحی جوش شامل طرح اتصال، موضع اتصال، اندازه جوش و استحکام اتصال است.

انتخاب چگونگی آماده سازی و ایجاد اتصالات جوشی به طور کلی با توجه به ضخامت قطعات، مسائل تکنولوژیکی روش جوشکاری مورد استفاده، موقعیت جوشکاری، امکانات موجود و نیز بسیاری از فاکتورهای فنی و اقتصادی دیگر انجام می گیرد. به طوری که گاهی اوقات در یک اتصال خاص چندین طرح پیشنهاد می گردد. از مهمترین پارامترهای مطرح در طراحی جوش می توان به نوع شیار و تعداد پاسهای به کار رفته در ایجاد آن اتصال اشاره کرد.

به طور کلی تنش های پسماند به ندرت در مرحله طراحی سازه مورد توجه قرار می گیرد، اما به منظور انجام یک طراحی ایمن و مقرون به صرفه لازم است که طراح اطلاعات مناسبی راجع به بزرگی و توزیع تنش ها داشته باشد. با بررسی اثر پارامترهای طراحی جوش (تعداد پاس ها، تأثیر سرعت حرکت الکتروود، شکل پخ و ...) بر تنش های پسماند جوشی نتایجی به دست می آید که می توان از آنها به عنوان یک معیار مطمئن برای طراحی مناسب جوش استفاده نمود. در این رابطه باید توجه نمود که چنانچه اطلاعات مناسبی راجع به این تنش ها در اتصالات مورد نظر موجود نباشد، بعضاً از تخمین های خیلی محافظه کارانه استفاده می شود که ممکن است در نهایت منجر به زیر سوال رفتن کاربرد سازه و بالا رفتن شدید هزینه ها گردد.

در سال های اخیر تحقیقات فراوانی به منظور محاسبه تحلیلی و اندازه گیری عملی این تنش ها صورت گرفته است. به دلیل وجود پارامترهای زیاد تأثیر گذار بر پروسه جوشکاری، تغییرات خواص مواد در حین جوشکاری ناشی از تغییرات دمایی، غیر خطی بودن آنالیز، متحرک بودن منبع حرارتی جوش و سایر پیچیدگی های موجود در این پروسه، رسیدن تخمین صحیح و درستی از تنش های پسماند کار نسبتاً پیچیده و مشکلی است و روشهای تحلیلی تنها برای هندسه های ساده و با فرضیات ساده کننده فراوان کاربرد دارند. روشهای بررسی تجربی نیز به دلیل هزینه بالای اندازه گیری و همچنین در بعضی موارد امکان پذیر نبودن اندازه گیری، کاربرد محدودی دارند. از این رو می توان شبیه سازی المان محدود جوشکاری را بهترین روش جهت پیش بینی رفتار ترمودینامیکی این فرآیند، به دست آوردن دما در حین جوشکاری و نیز محاسبه تنش های پسماند به حساب آورد. با شبیه سازی فرآیند جوشکاری با روشهای عددی می توان اثر پارامترهای گوناگون بر روی تنش های پسماند را مورد مطالعه قرار داد. سپس با تغییر دادن آنها شرایط بهینه برای جوشکاری را پیش بینی نمود [۲ و ۴].

با توجه به اینکه در این پایان نامه تنش های پسماند به عنوان یکی از مسایل مهم در مکانیک جوش مورد توجه خاص قرار گرفته است لذا در فصل دوم به طور مفصل درباره این تنش ها، چگونگی شکل گیری آنها، اثرات این تنش ها بر کارایی سازه های جوشی و روش های اندازه گیری عملی آنها توضیح داده خواهد شد. همچنین در این پروژه آنالیز حرارتی ایجاد شده در اتصالات جوشی از طریق مدلسازی المان محدود و اندازه گیری تجربی اندازه گیری شده است. به این منظور نمونه های از اتصال جوشکاری لوله تهیه شده و پس از محاسبه تاریخچه حرارتی با استفاده از مدلسازی المان محدود، نتایج دما در این اتصالات با استفاده از روشهای لیزری و تماسی اندازه گیری گردیده و با نتایج محاسبات المان محدود مقایسه شده است.

## ۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

جوشکاری یکی از روشهای عمومی برای اتصال دائمی قطعات است. برای بالا بردن ایمنی و طراحی دقیق سازه ها لازم است که درک درستی از تنش های پسماند ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری وجود داشته باشد. عواملی مانند انتقال حرارت از سطح جوش به روشهای همرفتی و تشعشعی، خواص فیزیکی و مکانیکی وابسته به دما و در نهایت تشکیل تدریجی تنش در طی فرآیند باعث پیچیده شدن تحلیل جوشکاری می گردد [۵]. در تحلیل فرآیند جوشکاری دو مرحله اساسی وجود دارد. مرحله اول تعیین توزیع مکانی و زمانی دما و حرارت ناشی از جوشکاری می باشد. در مرحله دوم تحلیل مکانیکی فرآیند انجام می شود و توزیع تنشهای حرارتی گذرا و در نهایت توزیع تنش به دست می آید.

مطالعه بر روی تنشهای حرارتی گذرا در جوشکاری از سال ۱۹۳۰ آغاز گردید و نتایج آن در سال ۱۹۳۶ ارائه شد. در این تحقیق تنشهای حرارتی در طول لبه های ورق ارزیابی و تعیین شد. در سال ۱۹۳۶ برای اولین بار از کامپیوتر برای تحلیل تنش حرارتی استفاده شد، برنامه ساده ای برای تنشهای پسماند بر روی یک نوار

باریک فلزی نوشته شد و در کامپیوتر اجرا گردید. این برنامه فقط تنش های طولی را برحسب فاصله از خط جوش به دست می داد [۶].

در طول چند سال گذشته تلاش های زیادی برای استفاده از روش های تحلیلی پیشرفته در تحلیل فرآیند جوشکاری صورت گرفته است. به دلیل پیچیدگی فیزیکی مسائل جوشکاری، آنالیزهای ریاضیاتی ساده برای تحلیل این فرآیند پیچیده مناسب نیستند، همچنین با کارهای تجربی و آزمایشگاهی نیز به دست آوردن الگوی کاملی از توزیع تنش ها و تغییر شکل ها در کل سازه جوشی امکان پذیر نمی باشد. از این رو مدل سازی کامپیوتری و تحلیل عددی برای بررسی صحیح این فرآیند از اهمیت ویژه ای برخوردار گشته و راه را برای انجام تحلیل های دقیق تر هموار نموده است. در این میان روش اجزا محدود روش بسیار مناسبی برای محاسبه توزیع دما و تنش های پسماند حاصل از عملیات جوشکاری می باشد.

در سال ۱۹۷۱ Ueda و Nomoto برای محاسبه تنش های پسماند جوشی از ابزار المان محدود استفاده کردند [۷] و [۸]. آنها بر پایه روابط المان محدود با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی به صورت تابعی از دما، فرآیند جوشکاری را مدل نمودند. آنها در کاری مشابه کار را با اندازه گیری تنش های سه محوره که در آن کرنش های اصلی به عنوان پارامتر وارد شده بود ادامه دادند [۹] و [۱۰]. در این آنالیز نیز از اساس المان محدود استفاده کردند. Habbitt و Marcal در سال ۱۹۷۳ با استفاده از المان محدود دو بعدی به مدل سازی جوش پرداختند و تنش های پسماند جوشی را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. Muraki در سال ۱۹۷۵ برای بررسی تنش های حرارتی حاصل از پروسه جوشکاری برنامه کامپیوتری الاستو-پلاستیک تهیه کرد [۱۲]. Brown و Song آنالیز دو بعدی و سه بعدی کاملی را برای مدل سازی سیلندرهای بزرگ جوشکاری شده و اندازه گیری تنش های پسماند جوشی انجام دادند [۱۳]. به طور مشابه Michaleris و Debiccari از مدل دو بعدی کرنش صفحه ای برای پیش بینی تغییر شکل ها در قطعات بزرگ استفاده کردند [۱۴].

برای مدل سازی توزیع حرارت و تنش در جوشکاری از کدهای FE نوشته شده در قالب نرم افزارهای تجاری نیز استفاده شده است. Karlsson جوشکاری سر به سر لوله های کربن- منگنزی را به وسیله کدهای ADINAT و ADINA مدل کرد [۱۵]. Vincent و همکارانش جوشکاری لیزر CO<sub>2</sub> را برای جوشکاری عدسی یک مخزن به کار بردند و نتایج اندازه گیری تنش های پسماند را از طریق اندازه گیری تجربی و همچنین استفاده از کد FE نرم افزارهای Sysweld و Code\_Aster مقایسه کردند. تغییرات متالورژیکی محاسبه شد و در نهایت نتایج با اندازه گیری عملی همخوانی خوبی داشت [۱۶].

Bricksad و Josefson مدل المان محدود تقارن محوری را برای مدل کردن جوشکاری چند پاسه لوله ای با ضخامت ۴۰ میلیمتر به کار بردند [۱۷]. Mochizuki از روش آنالیز کرنش پایه ای برای تخمین تنش های پسماند در لوله فولاد کربنی استفاده کرد و نتایج آنالیز را با نتایج اندازه گیری عملی با تفرق اشعه X مقایسه کرد. نتایج آنالیز او همخوانی خوبی با نتایج تجربی داشت [۱۸]. Wen از آنالیز دو بعدی Axisymmetric

برای مدل سازی FE جوشکاری در لوله ای با ضخامت ۱۹ میلیمتر استفاده کرد [۱۹]. Tsai از یک مدل Shell سه بعدی و حرکت دادن قوس جوش برای مدل سازی تنش های پسماند جوشی در لوله های AISI304 استفاده کرد [۲۰]. Li و همکارانش از یک مدل المان محدود کامل سه بعدی برای مدلسازی جوش در لوله ای با هندسه پخ باریک شونده استفاده کردند. تحقیقات آنان نشان داد که اندازه گیری های عملی بیشتری برای ارزیابی المان محدود نیاز است [۲۱]. Jiang و همکارانش مدل کامل سه بعدی برای تعیین میدان حرارتی در جوش شاخه ای لوله ها انجام دادند. اما در تحقیق آنان تنش های پسماند محاسبه نشده است [۲۲].

### ۳-۱ رئوس مطالب مرور شده در این تحقیق

در این پایان نامه به بررسی اثر تعداد پاسهای جوشکاری و اثر تست هیدرو استاتیک بر روی تنش پسماند در لوله های فولادی به کمک شبیه سازی به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. برای این کار جهت بالا بردن دقت نتایج و در عین حال پایین آوردن زمان حل مساله با استفاده از برنامه نویسی ماکرو نوع خاصی از مش بندی انجام شده است. همچنین جهت حل آنالیز حرارتی و آنالیز مکانیکی نیز از برنامه نویسی ماکرو استفاده شده است. بمنظور ارزیابی مدلسازی و اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، نتایج آنالیز حرارتی با نتایج حاصل از اندازه گیری دمای به روشهای لیزری و تماسی مقایسه شده است. و در ادامه تلاشهای فراوانی برای امکان مقایسه تنشهای پسماند ایجاد شده در اتصالات لوله از طریق مدلسازی المان محدود و اندازه گیری تجربی به روش X-Ray پرداخته شد که متأسفانه به دلیل نبود تجهیزات لازم این امکان میسر نشد و نتایج آنالیز مکانیکی با نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی تنش های پسماند به روش کرنش سنجی سوراخ موجود در مقاله [۲۳] مقایسه شده است.

در فصل اول این پایان نامه به بیان مقدماتی راجع به جوشکاری و علل ایجاد تنش های پسماند جوشی پرداخته شده است، و در ادامه مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه در سالهای گذشته شده است.

در فصل دوم این پایان نامه به معرفی تنش های پسماند ناشی از جوشکاری، بررسی تاثیر این تنش ها بر کارایی اتصالات جوشی و معرفی روش های اندازه گیری آن پرداخته شده است.

در فصل سوم به کاربرد روش های المان محدود در مدلسازی جوش، نحوه مدلسازی فرایند جوشکاری با استفاده از روش المان محدود، معرفی پارامترهای تاثیر گذار بر روی مساله مدل سازی اتصالات جوشی و همچنین نحوه خاص مش بندی مدل پرداخته شده است.

در فصل چهارم این پایان نامه به انجام فعالیتهای تجربی پرداخته شده است. در این فصل در ابتدا با استفاده از متالوگرافی انجام شده پارامترهای مدل دوبل بیضوی گلداک به دست آورده شده است و در ادامه نتایج حرارتی حاصل از اندازه گیری دما به دو روش لیزری و تماسی به دست آورده شده است، که در فصل پنجم با نتایج المان محدود مقایسه شده است.

در فصل پنجم این پایان نامه به شرح فرایند شبیه سازی جوشکاری لوله با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS.11 و نکات و مسایل مهم مربوط به آن و مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی پرداخته شده است و در ادامه اثر تعداد پاسهای جوشی و اثر فرآیند هایدروتست بر تنش های پسماند جوشی در اتصال سر به سر لوله مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ششم به بیان نتیجه گیریهای بدست آمده از تحقیق و ارائه پیشنهادات برای ادامه کار پرداخته شده است.

# فصل دوم

تنش های پسماند حرارتی ناشی از جوشکاری

## فصل دوم : تنش های پسماند حرارتی ناشی از جوشکاری

### ۱-۲ مقدمه

در این فصل به بررسی مبانی تئوریک ایجاد تنش پسماند در جسم پرداخته می شود. در جوشکاری ذوبی، محل جوش توسط منبع حرارتی جوشکاری، به طور موضعی حرارت داده شده و در نتیجه توزیع غیر یکنواخت حرارت در طول سیکل حرارتی، کرنشهای ناسازگاری ایجاد می شود که منجر به تنشهای حرارتی می گردد. این کرنشهای ناسازگار که ناشی از تغییرات ابعادی حاصل از انجماد فلز جوش، استحاله های متالورژیکی و تغییر شکل پلاستیک است منبع ایجاد تنشهای پسماند و اعوجاج می باشد.

اهمیت مطالعه تنشهای پسماند بدین دلیل است که ارزیابی شکست سازه های جوشی غالباً تحت تأثیر تنشهای پسماند قرار دارد. تنشهای پسماند کششی بزرگ در مناطق نزدیک فلز جوش تحت شرایط خاصی ممکن است منجر به شکست ترد شده و یا منشأ ایجاد ترکهای ناشی از خستگی و یا خوردگی باشد، از طرفی تنشهای پسماند فشاری می تواند منجر به کاهش مقاومت کمانشی سازه گردد، بنابراین پیشگویی تنشهای پسماند جوشی از الزامات یک طراحی ایمن است.

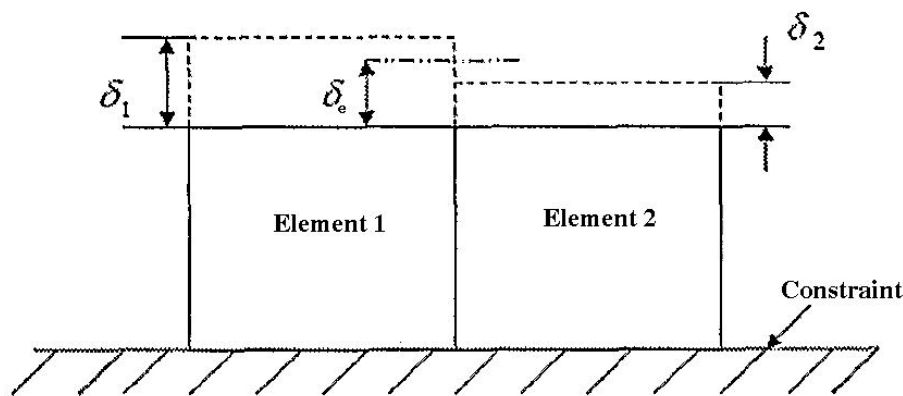
در ادامه این فصل در ابتدا تنش پسماند به طور کامل توضیح داده می شود، سپس چگونگی توزیع این تنشها در اتصالات سربه سر پلیت و لوله بیان خواهد شد و در نهایت روشهای اندازه گیری تنشهای پسماند گفته خواهد شد.

### ۲-۲ تنش پسماند

تنشهای پسماند تنشهایی هستند که بدون وجود بار خارجی در جسم وجود خواهند داشت. عدم وجود بارهای خارجی به این معناست که تنشها و کرنشهای پسماند باید خود-تعادل باشند. این تنشها در بیشتر مواد و اجسام وجود دارند و اندازه و توزیع آن به نوع و تاریخچه کارهای انجام شده روی قطعه بستگی خواهد داشت.

در حالت کلی ایجاد تنش پسماند می تواند دو عامل عمده داشته باشد: عامل مکانیکی و عامل حرارتی. اگر اثر این تنش بر ایجاد و رشد ترک مورد نظر باشد، نحوه و منشأ ایجاد آن تفاوتی نخواهد داشت. بر این اساس می توان تنش پسماند را ناشی از وجود حوزه های کرنشی ناسازگار در جسم دانست. کرنشهای ناسازگار

معمولاً کرنشهای ویژه یا اولیه نامیده می شوند. بر اساس استفاده از کرنش ویژه اگر المانهای ۱ و ۲ در شکل دارای ابعاد واحد باشند و تغییر طول آنها بدون وجود المان دیگر به ترتیب  $\delta_1$  و  $\delta_2$  باشند، با فرض نامساوی بودن تغییر طول، تغییر طول نهایی در دو المان به صورت  $\delta_e = \frac{1}{2}(\delta_2 - \delta_1)$  خواهد بود. بر اساس این تغییر مکان، تنش پسماند کششی در المان ۱ و فشاری در المان ۲ ایجاد خواهد شد.



شکل ۱-۲ ایجاد کرنش ویژه و تنش پسماند در دو المان [۲۴]

بطور کلی همه فرآیندهای ساخت و مونتاژ از جمله ریخته گری، جوشکاری، ماشینکاری، عملیات حرارتی و... از عوامل ایجاد تنش پسماند در قطعات تولید شده می باشند. در حالت کلی تنش های پسماند به دو گروه میکروسکوپی و ماکروسکوپی تقسیم می شوند.

در مقیاس میکروسکوپی تنش های پسماند بر اثر انواع عیوب متالورژیکی ایجاد می شوند. ایجاد و توزیع تنش های پسماند میکروسکوپی موجود در جسم، بیشتر به فرآوری مواد اولیه بستگی داشته و اغلب در کل مواد به صورت پراکنده موجود می باشد. مکانهای خالی، جابجایی اتمها، عیوب شبکه در اثر تغییر شکل و عیوب مرز دانه ها از عوامل مهم بروز این نوع تنش ها می باشند.

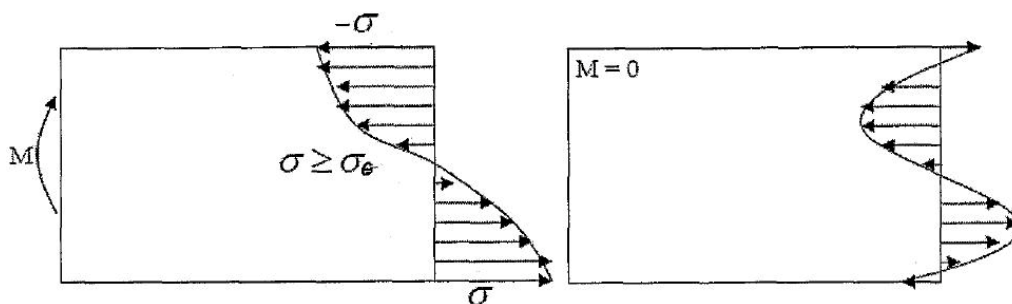
در مقیاس ماکروسکوپی گروهی از دانه ها و یا قسمتی از قطعه تحت تنش قرار دارد. تنش های ماکروسکوپی سبب ناهمگونی در رفتار مکانیکی قسمت های مختلف می شوند. از این رو در مبحث ایمنی سازه تاکید بیشتر روی بررسی تنش های ماکروسکوپی قطعات می باشد. تنش های پسماند ماکروسکوپی را می توان توسط روشهای خاصی اندازه گیری نموده و برای آن بزرگی و توزیع تعیین کرد. منابع این تنش ها بسیار متنوع بوده و می توان آنها را در سه مجموعه کلی مکانیکی، حرارتی و متالورژیکی دسته بندی نمود. تنش های پسماند اغلب توسط ترکیبی از این سه نوع منبع ایجاد می شوند. تنش های پسماند متالورژیکی اغلب از نوع تنش های پسماند میکروسکوپی می باشد ولی تنش های پسماند مکانیکی و حرارتی از نوع ماکروسکوپی به شمار می آیند [۲]. تنش های پسماند ماکروسکوپی عموماً به دلایل زیر به وجود می آیند:



- شکل دهی پلاستیک مواد تحت تأثیر نیروهای خارجی مانند عملیات نورد، کشش، اکستروژن، خمش، فورمینگ، ساچمه زنی و بطور کلی بارگذاری مکانیکی تا حد تسلیم.
- تغییر شکل پلاستیک مواد در هنگام گرم کردن یا سرد کردن غیر یکنواخت مثل عملیات جوشکاری و یا عملیات حرارتی موضعی.
- تغییر ساختار کریستالی مواد به دلیل تغییرات فازی در عملیات حرارتی نظیر کوئینچ<sup>۱</sup> کردن.

## ۲-۲-۱ تنش پسماند مکانیکی

تیری به شکل ۲-۲ مورد نظر است. این تیر به صورت نامتقارن با تنش بزرگتر از تنش تسلیم بارگذاری می شود. سپس باربرداری انجام می شود. در نواحی با تنش کمتر از تنش تسلیم تغییر فرم الاستیک است و لذا تلاش دارد به حالت اولیه کرنش صفر برگردد، ولی در نواحی با تنش بالاتر از تنش تسلیم، به علت تغییر فرم پلاستیک کرنش اضافی ایجاد شده است. این اختلاف کرنش باعث ایجاد کرنش ویژه در جسم خواهد شد که در نهایت به تشکیل تنش پسماند کششی و فشاری خواهد انجامید.

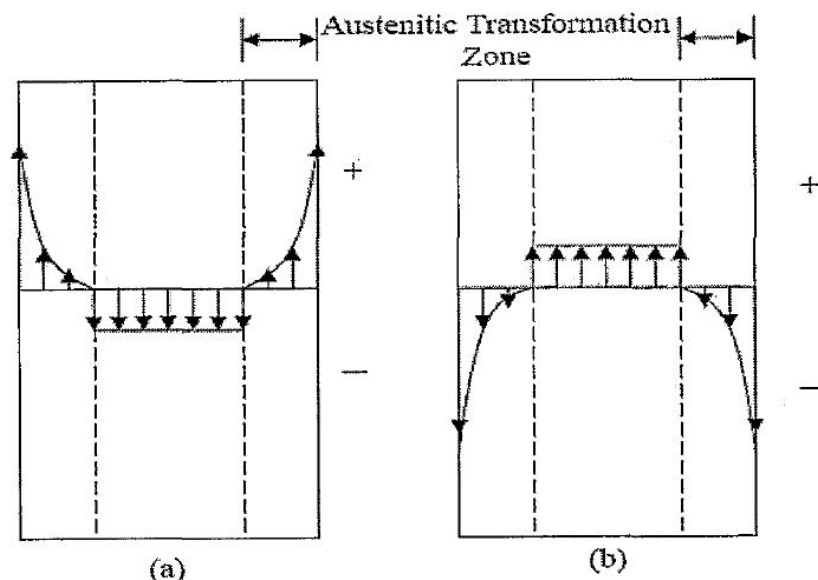


شکل ۲-۲ نحوه ایجاد تنش پسماند مکانیکی [۲۴]

## ۲-۲-۲ تنش پسماند حرارتی

اگر تنشهای اعمالی به جسم، به واسطه وجود تنشهای حرارتی ایجاد شود در این صورت تنشهای پسماند حرارتی در جسم ایجاد خواهد شد. به عنوان نمونه یک میله فولادی مانند شکل ۲-۳ در نظر گرفته شده و سطوح آن حرارت بالایی می بیند. در این مرحله نواحی خارجی دارای تنش کششی و نواحی داخلی دارای تنش فشاری هستند. فولاد از حالت فریت BCC به حالت آستنیت FCC تغییر فاز می دهد. به علت استحکام تسلیم پایین آستنیت نسبت به فریت در دمای بالا، تغییر فرم پلاستیک در آن نواحی ایجاد شده و تنشهای داخلی آزاد می شوند. در مرحله بعد بار حرارتی برداشته شده و جسم کم کم سرد می شود. تغییر فاز از

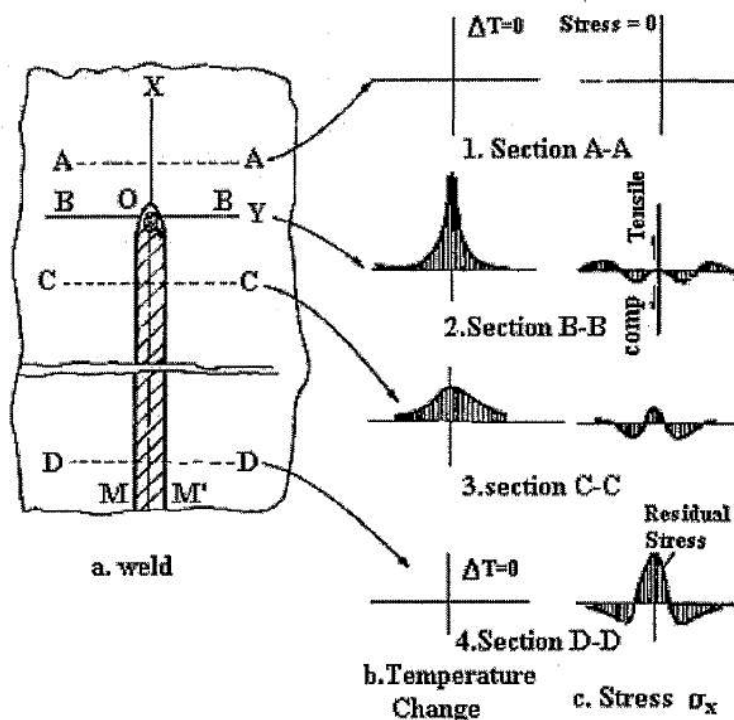
آستنیت به محصولات دیگر انجام می گیرد و سطوح میله منبسط می شود ولی فریت نواحی داخلی مانع از آن می شود. به عبارت دیگر تنش فشاری در سطح خارجی ایجاد می شود. در این حالت و در نهایت تنش پسماند در سطح خارجی فشاری و در داخل کششی خواهد شد. البته در اینجا فقط اثرات تغییر فاز نشان داده شده است. در حالت واقعی تغییر فاز و بارگذاری حرارتی پیچیده تر است. انبساط و انقباض حجمی نواحی مختلف جسم به واسطه تغییر فاز از آستنیت به محصولات دیگر مختلف است و لذا امکان دارد توزیع تنش متفاوت از شکل زیر باشد. ترکیب آستنیت تجزیه شده به عوامل مختلفی مانند نرخ سرمایش وابسته است و لذا در نواحی مختلف ترکیبهای مختلفی وجود خواهد داشت. بر این اساس پیش بینی واقعی توزیع تنش مشکل است و نتایج تجربی نیز با روشهای مخرب به دست می آید [۲۴].



شکل ۲-۳ توزیع تنش پسماند به واسطه تغییر فاز (a)- گرمایش (b)- سرمایش [۲۴]

### ۲-۳ توزیع تنش پسماند

در طی فرآیند جوشکاری حرارتی، فلز جوش و نواحی نزدیک آن دارای نرخهای مختلف سرمایش - گرمایش خواهند بود و لذا کرنشهای حرارتی مختلفی در نواحی مختلف ایجاد خواهد شد. افزایش حجم در نقاط با دمای بالا توسط مواد اطراف که دمای کمتری دارند محدود می شود. شکل ۲-۴ به صورت شماتیک نحوه شکل گیری تنش پسماند و توزیع نهایی آن را در جوش لب به لب دو ورق ساده نشان می دهد.



شکل ۲-۴ تشکیل تنش پسماند در جوشکاری

همان طور که در شکل ۲-۴ مشاهده می شود تغییرات دمایی در حین جوشکاری در طول ورق، منجر به ایجاد تنش های حرارتی در قطعه می شود. این تنش ها در راستای محور X-X تغییر می کند. قوس جوشکاری که در شکل در نقطه O قرار دارد با سرعت ثابت بر روی ورق حرکت می کند. میزان توزیع حرارت در جهت عرضی در چهار ناحیه A، B، C و D ترسیم شده است .

در قسمت A-A که در بالای الکتروود جوش قرار دارد تغییرات دما برابر صفر است و هیچ گونه تنشی در آن به وجود نیامده است (الکتروود جوش به قسمت A-A نرسیده است). در قسمت B-B که الکتروود جوش بر روی آن واقع شده، بیشترین گرادیان حرارتی وجود دارد و در قسمتهای C-C گرادیان حرارت کمتر است (الکتروود از آن قبلاً عبور کرده است) و در قسمت D-D گرادیان حرارتی به صفر رسیده است. توزیع تنش ها در راستای محور X ( $\sigma_x$ ) در قسمتهای A-A، B-B، C-C و D-D در شکل نشان داده شده است.

در قسمت A-A که هنوز الکتروود جوش به آن نرسیده است و گرادیان حرارتی آن صفر است، تنشی به وجود نیامده و مقدار آن صفر است. قسمت B-B که ناحیه تحت تأثیر الکتروود جوش است دارای بیشترین گرادیان حرارتی می باشد. در نقطه O که حوضچه مذاب هم اکنون تشکیل شده است تنشی وجود ندارد چون مذاب هیچ تنشی را تحمل نمی کند. در مقطع C-C که لحظاتی پیش الکتروود جوش از آن عبور کرده است مشاهده می شود که گرادیان حرارتی افت پیدا کرده است اما تنش های کششی در جوش ایجاد شده است، چون جوش سرد و منقبض شده و سبب به وجود آمدن تنش کششی در آن می شود و در کنار آن تنش های فشاری به منظور تعادل تنش در جوش به وجود آمده است. در نهایت به قسمت D-D جایی که

جوش کاملاً سرد شده است و گرادیان حرارتی صفر است. همان طور که مشاهده می‌شود تنش‌های پسماند در جوش به بیشترین مقدار خود رسیده است. این تنش‌ها به صورت کششی هستند چون به بیشترین انقباض خود رسیده اند و تنش‌های فشاری نیز در کنار آن وجود دارد که به صورت متقارن می‌باشد. برطبق روابط ماساباچی<sup>۲</sup> و مارتین<sup>۳</sup> [۲۵] توزیع تنش پسماند طولی را طبق رابطه تقریبی زیر می‌توان ارائه کرد:

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[ 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y}{b} \right)^2} \quad (1-2)$$

که در رابطه بالا  $\sigma_x$  ماکزیمم تنش پسماند به وجود آمده است و معمولاً از تنش تسلیم ماده پایه کمتر است و  $b$  هم پهنای ناحیه تنش کششی است [۲۶].

پروسه جوشکاری باعث افزایش دمای منطقه جوش تا دمای بالاتر از هزار درجه سانتیگراد در فولادها می‌شود و با عبور منبع حرارتی از آن محل دما سریعاً کاهش می‌یابد. گرمایش موضعی و به دنبال آن سرد شدن، باعث تغییرات حجمی می‌شود که آن خود منبع ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل‌های پسماند جوشی است. می‌توانیم قطعه را به صورت مجموعه‌ای از المانهای مکعبی کوچک و مساوی در نظر بگیریم. چنانچه به قطعه به صورت همگون و یکنواخت حرارت داده شود و سپس آرام سرد گردد و مخالفتی نیز در سر راه انبساط و انقباض قطعه نباشد هیچگونه تنش و یا تغییر شکل پسماند حرارتی ناشی از این سیکل حرارتی مشاهده نخواهد شد. اگر این گرم شدن به صورت غیر یکنواخت باشد لذا هر المان متناسب با  $\Delta T$  اعمال شده بر آن منبسط می‌گردد. چرا که تغییر شکل حرارتی متناسب با درجه حرارت بوده و این بستگی تا نقطه ذوب فلز وجود دارد. در این حالت المانها ابعاد مختلفی پیدا خواهند کرد و لذا نمی‌توان با اتصال آنها به یکدیگر قطعه اصلی را ایجاد کرد. این در حالی است که این المانها در حالت واقعی به همدیگر متصل هستند و هر المان انبساط المانهای مجاور خود را مقید می‌کند؛ لذا تنش‌هایی در قطعه ایجاد می‌گردد. اگر در طی گرم کردن تمامی المانها در حالت الاستیک باقی بمانند پس از سرد شدن، قطعه به حالت اولیه بدون تنش خود باز خواهد گشت در حالیکه اگر المانها به صورت پلاستیک تغییر شکل دهند پس از سرد شدن آن، المانها تمایل به تغییر ابعادی متناسب با میزان تغییر شکل پلاستیک متحمل شده خواهند داشت. لذا در این حالت تمامی المانها دچار تغییر بعد خواهند شد و بدون پذیرفتن تنش و تغییر شکل قادر به تشکیل جسم اصلی نخواهند بود و در نتیجه در جسم تنش‌ها و تغییر شکل‌های پسماند مشاهده خواهد شد.

در حین جوشکاری وجود شار حرارتی بالا ناشی از قوس الکتریکی باعث تغییرات دمایی غیرهمگون در ناحیه جوش می‌شود. این مسئله باعث تغییر شکل حرارتی (انبساط در حین گرم شدن و انقباض در حین سرد شدن) در جوش و مناطق اطراف آن و در نتیجه ایجاد تنش‌های سه محوره پیچیده‌ای می‌شود. یک مدل

<sup>1</sup> -Masubuchi

<sup>2</sup> -Martin