بسم الله الرحمن الرحيم
بسم الله الرحمن الرحيم
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه سازی اعوجاج ناشی از جوشکاری درپانلهای کشتی

نگارش

امیر ارسلان صادقی‌نیا

استاد راهنما

دکتر مهدی ایرانمش

اردیبهشت 1387

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی:امیر ارسلان صادقی نیا دانشجوی آزاد ● بورسیه ○ معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۴۱۳۰۰۰۵ دانشکده: مهندسی کشتی سازی رشته تحصیلی:کشتی سازی گروه:سازه کشتی

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی ایرانمنش درجه و رتبه: استادیار

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

نام و نام خانوادگی: درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : شبیه سازی اعوجاج ناشی از جوشکاری در پانلهای کشتی

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی:Welding distortion simulation in ship panels

نوع پروژه: کارشناسی ○ کاربردی ○ ارشد ● بنیادی ○ دکترا ○ توسعه‌ای ○ سال تحصیلی:۸۷-۸۸ نظری ○

تاریخ شروع :۸۵/۸/۱ تاریخ خاتمه :۸۷/۲/۱۴ تعداد واحد :۶ سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: جوشکاری زیر پودری،گرادیان حرارتی،تنش پسماند،اعوجاج،اجزای محدود

واژه‌های کلیدی به انگلیسی :Residual stress , Distortion , Thermal gradient , SAW , FEM

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۵۴	تصویر ●	جدول ●	نمودار ○	نقشه ○	واژه‌نامه ○	تعداد مراجع ۵۲	تعداد صفحات ضمائم ۲
زبان متن	فارسی ●		انگلیسی ○		چکیده	فارسی ●		انگلیسی ●
یادداشت								

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت **PDF** همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی) مرکزی)

با افتخار و احترام این اثر کوچک را به پاس مهربانی های بزرگ و بی حدش به سعیده فرزاد فر عزیز تقدیم می کنم

بینهایت تشکر میشود از استاد گرامی ، جناب آقای دکتر ایرانمنش که راهنماییهای ارزنده ایشان خط مشی سرانجام این مجموعه بود.

از کلیه زحماتی که آقایان محمدرضا نجف آبادی فرهانی ، مجتبی دیانتی ، سردار مومن مهربانی و حسام میرزایی عزیز برای به سرانجام رساندن این پروژه متحمل شدند به شدّت تشکر میکنم.

چکیده

تنش های پسماند در ناحیه جوش بر عمر کاردهی سازه های جوشکاری تاثیر گذار است.ترکهای خوردگی، تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری و کمانش ناشی از جوشکاری بطور مستقیم روی کارپذیری و پروسه های ساخت در صنعت تاثیر میگذارد. به هر حال کنترل تنش های پسماند و اعوجاج ناشی از پروسه های جوشکاری بی نهایت در صنایع ساخت سازه های فلزی مهم هستند. به همین دلیل شبیه سازی کامپیوتری پروسه های جوشکاری، جهت تشخیص تنشهای پسماند و پیش بینی اعوجاج سازه های جوشکاری شده قبل از شروع پروسه ساخت از اهمیت زیادی برخوردار است که تا امروز با دقت قابل قبولی با روش های آنالیتیک و عددی صورت گرفته است. در یک گام تخصصی تر ، از شبیه سازی پروسه جوشکاری میتوان جهت بهینه سازی طراحی و روند ساخت و جلوگیری از بوجود آمدن خسارات بزرگ، چه از نظر هزینه و چه از نظر زمان استفاده کرد.

به هر حال، بسیاری از آنالیزهای دو بعدی و سه بعدی ترمو-الاستیک-پلاستیک، با استفاده از کد های عمومی اجزای محدود ، برای مثالهای کوچک و ساده ایجاد صورت گرفته است.

در این پروژه، یک آنالیز دو بعدی جهت مطالعه تنشهای پسماند و تغییر شکل ناشی از جوشکاری شامل کوتاه شدگی های طولی و عرضی، صورت گرفته است.

آنچه بدیهی است بارگذاری حرارتی نقطه آغاز سیکل بوجود آمدن تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری است .توزیع غیریکنواخت حرارت و قیود تکیه گاهی باعث شکل گیری تنشهای ناشی از جوشکاری شده و همین تنشها ، دلیل بوجود آمدن تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری در قطعه است . در این مجموعه پس از آنکه روابط تجربی موجود جهت محاسبه انقباضهای ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است ، مدل تسمه و فنر به عنوان حل آنالیتیک این پدیده مورد ارزیابی قرار گرفته است . به دنبال آن با استفاده از روش اجزای محدود حل عددی روی این مسئله انجام شده و در آخر سعی شده با انجام آزمایشات عملی به مجموعه پاسخها اعتبار بخشی شود .

بسیار مهم است که جهت بهینه سازی روشهای جوشکاری، از قبیل روش زیرپودری، با استفاده از سیستمهای ساده کار شود تا بتوان با بهره گیری از آنها تنش های پسماند و تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری را به حداقل رساند.

در این مجموعه خطوط جوش لب به لب ، به عنوان موضوع اصلی بحث در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: جوشکاری زیر پودری،گرادیان حرارتی،تنش پسماند،اعوجاج،اجزای محدود

فهرست مطالب

فصل 1 مقدمه و کلیات 1

1-1- مروری بر فعالیتهای مرتبط گذشته 2

2-1- روشهای تعیین هزینه های جوشکاری 4

1-2-1- **فاکتور اپراتور** 4

2-2-1- **تعیین هزینه های نیروی انسانی** 5

3-2-1- **محاسبه هزینه مواد** 6

3-1- ارزیابی پروسه‌های جوشکاری در صنایع کشتی سازی 6

4-1- جوشکاری زیر پودری 8

1-4-1- **مزایا و محدودیت های روش جوشکاری زیرپودری** 10

5-1- اهمیت مطالعه اعوجاج ناشی از جوشکاری 10

6-1- ساختار و هدف پایان نامه 11

فصل 2 تحلیل حرارتی جوش 13

1-2- مقدمه 14

2-2- مدلسازی منبع حرارتی جوش 14

1-2-2- **مدل بیضوی دوگانه** 16

3-2- شارش گرما در حوضچهٔ جوش 17

4-2- شارش گرما در قطعه کار جامد 18

5-2- خواص حرارتی فولاد 19

6-2- توزیع شبه پایدار حرارت 21

7-2- منبع حرارتی متحرک 23

8-2- حل برای ورق‌های نازک 24

1-8-2- فرمول‌های دیگر 26

9-2- جریان حرارت دوبعدی یا سه بعدی 27

فصل 3 تنشهای پسماند 29

3-1- مقدمه 30

3-2- تنش‌های حرارتی در ورق 30

3-3- تنش‌های پسماند 31

3-4- چگونگی ایجاد تنش پسماند و عوامل موثر بر آن 32

3-5- تنش پسماند در قطعه جوشکاری شده 33

3-6- منابع خطا در محاسبه مقدار تنش های پسماند با روابط تجربی 39

3-7- پارامترهای موثر در توزیع و بزرگی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری 40

3-8- معیار تسلیم برای فولاد 42

فصل 4 اعوجاج ناشی از جوشکاری 45

4-1- مقدمه 46

4-2- مدل سه میله ای 48

4-3- میدان تنشی گذرا 50

4-4- تغییر شکلهای درون صفحه‌ای باقیمانده ناشی از جوشکاری 53

4-4-1- **روابط تجربی برای محاسبه انقباض ناشی از جوشکاری** 56

4-4-2- **مدل تسمه و فنر برای بررسی انقباض طولی و عرضی ناشی از جوشکاری** 61

4-5- پارامترهای موثر مقدار تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری 69

4-6- کنترل اعوجاج ناشی از جوشکاری 69

4-6-1- **روشهای پیش از اجرای عملیات جوشکاری** 70

4-6-2- **روش‌های قابل اجرا در حین اجرای عملیات جوشکاری** 71

4-6-3- **روشهای کنترل و زدودن اعوجاج بعد از جوشکاری** 80

فصل 5 شبیه سازی کامپیوتری اعوجاج ناشی از جوشکاری 83

5-1- مقدمه 84

5-2- حل اجزاء محدود برای توزیع حرارت 85

5-3- تاثیر حرارت بر خواص فیزیکی-مکانیکی فولادهای کربنی 89

5-4- حل اجزاء محدود برای آنالیز مکانیکی 93

5-4-1- **بررسی منابع خطا در شبیه سازی اجزای محدود** 96

5-5- شبیه سازی اعواجاج ناشی از جوشکاری با استفاده از نرم افزار Ansys 97

5-5-1- **آنالیز حرارتی جوش با استفاده از نرم افزار Ansys** 98

5-5-2- **آنالیز مکانیکی جوش با استفاده از نرم افزار Ansys** 102

5-5-3- بررسی پارامترهای موثر در مقدار تنشهای پسماند و تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری 110

5-6- آزمایشات عملی 121

5-6-1- شرح آزمایشات 122

5-6-2- نتایج آزمایشات 125

5-6-3-**بررسی منابع خطا در بررسی تجربی** 127

5-7- مقایسه و ارزیابی پاسخهای بدست آمده 128

5-8- بررسی روش‌های کنترل تغییرشکلهای ناشی از جوشکاری 128

5-8-1- **بررسی تکنیک گرم کاری اطراف خط جوش با نرم افزار Ansys** 129

5-8-2-**بررسی تکنیک کشش حرارتی با نرم افزار Ansys** 132

5-8-3-**بررسی تکنیک چاه حرارتی با نرم افزار Ansys** 136

5-8-4-**بررسی تکنیک پیش‌گرم و پس‌گرم در ناحیه اتصال با نرم افزار Ansys** 138

5-8-5-**مقایسه روشهای بحث شده جهت کاهش تغییر شکلهای ناشی از جوشکاری** 141

5-8-6-**انتخاب روش بهینه کنترل اعوجاج ناشی از جوشکاری با دید اقتصادی** 142

فصل 6 نتایج ، پیشنهادات و کارهای آینده 144

6-1- نتایج 145

6-2- پیشنهادات و کارهای آینده 148

منابع 150

پیوست 1

پیوست 2

فهرست شکل‌ها

شکل 1-1) شماتیک خط جوش بجا مانده از روشهای دستی (a) و روشهای اتوماتیک (b) 7
شکل 1-2) شماتیک پروسه جوشکاری زیر پودری 9
شکل 1-3) شماتیک پروسه جوشکاری زیر پودری با سه الکترود 9
شکل 2-1) توزیع منبع حرارتی در حین جوشکاری a) دایروی بر روی سطح b)بیضوی روی سطح 15
شکل 2-2) شماتیک مدل بیضی دوگانه 16
شکل 2-3) چگالی انرزی حرارتی برای مشعل و برای الکترود دستی 17
شکل 2-4) تغییرات چگالی فولاد با تغییرات درجه حرارت 19
شکل 2-5) تغییرات ضریب حرارت ویژه فولاد با تغییرات درجه حرارت 20
شکل 2-6) تغییرات ضریب رسانش حرارتی فولاد با تغییرات درجه حرارت 20
شکل 2-7) شکل شماتیک درجه حرارت منبع حرارتی جوش در مقایسه با نقاط اطرافش 21
شکل 2-8) موقعیت نواحی سه گانه خط جوش 22
شکل 2-9) شماتیک منبع حرارتی متحرک در تحلیل رزنتال برای ورق نازک 24
شکل 2-10) شماتیک ایزوترمهای بدست آمده از تحلیل رزنتال برای ورق نازک 26
شکل 2-11) شماتیک توزیع حرارت دو بعدی وسه بعدی جوشکاری 27
شکل 3-1) اولین و دومین و سومین حالت از تنشهای پسماند که در جهت y اثر می کنند 32
شکل 3-2) مدل ساده ای از نحوه بوجود آمدن تنش پسماند 34
شکل 3-3) تغییرات درجه حرارت و تنشهای پسماند طولی ناشی از جوشکاری 37
شکل 3-4) توزیع تنش های پسماند در یک ورق با جوش سر به سر (a) جوش سر به سر ورق (b) توزیع تنش طولی در امتداد y (c) توزیع تنش عرضی در امتداد x 37
شکل 3-5) توزیع تنشهای پسماند در راستای محور y 39
شکل 3-6) تغییرات تنشهای پسماند طولی به ازای طول های متفاوت خط جوش 40
شکل 3-7) تغییرات تنشهای پسماند عرضی به ازای طول های متفاوت خط جوش 41
شکل 3-8) اثر تغییرات درجه مهار بر تنشهای پسماند و اعوجاج ناشی از جوشکاری 41
شکل 3-9) تصور هندسی معیار تسلیم در فضای تنشهای اصلی 43
شکل 3-10) تصویر تنش برای معیار تسلیم 44
شکل 4-1) ارتباط حوزه های مطالعاتی فرآیند جوشکاری 46
شکل 4-2) صورتهای مختلف اعوجاج ناشی از جوشکاری 47
شکل 4-3) پروسه تغییر شکل ناشی از جوشکاری 48
شکل 4-4) شماتیک مدل سه میله ای 49
شکل 4-5) شماتیک ارتباط گرادیان حرارت ، تنش و تغییر شکل در قطعه در حین جوشکاری 50
شکل 4-6) شماتیک تغییرات حرارت و تغییرات تنش در قطعه در حین جوشکاری a) شماتیک پروسه جوشکاری b)شماتیک توزیع تنشهای طولی c) شماتیک توزیع حرارت 52
شکل 4-7) شماتیک تغییرات سیکل محلی تنش-کرنش در اطراف منبع حرارتی متحرک 52
شکل 4-8) شماتیک مکانیزم تغییر شکلهای درون صفحه ای ناشی از جوشکاری 54
شکل 4-9) روابط ایده آل شده تنش-کرنش در ناحیه HAZ برای یک اتصال لب به لب 56
شکل 4-10) ناحیه نزدیک و ناحیه دور در ورقهای در حال جوشکاری 57

شکل 4-11) شماتیک عمق نفوذ نکرده جوش 58
شکل 4-12) حداکثرتغییرشکل های عرضی ورق بر اساس روابط تجربی 60
شکل 4-13) حداکثرتغییرشکل های طولی ورق بر اساس روابط تجربی 61
شکل 4-14) شماتیک مدل تسمه و فنر برای کشیدگی عرضی 61
شکل 4-15) شماتیک اتصال لب به لب دو ورق 63
شکل 4-16) شماتیک مدل تکمیلی تسمه و فنر برایانقباض عرضی 64
شکل 4-17) حداکثرتغییرشکل های عرضی ورق در روش تسمه و فنر 65
شکل 4-18) شماتیک مدل تسمه و فنر برای محاسبه انقباض طولی 66
شکل 4-19) دیاگرام آزاد قطعه در حال جوشکاری برای محاسبه کشیدگی طولی 66
شکل 4-20) حداکثرتغییرشکل های طولی ورق در روش تسمه و فنر 68
شکل 4-21) شماتیک روش پیش نشاندن برای اتصال لب به لب 72
شکل 4-22) شماتیک روش استفاده از پشت بند و تکه های کوچک جهت کنترل پیچیدگی 72
شکل 4-23) شماتیک حالت های گوناگون تغییر جهت امتداد جوشکاری 72
شکل 4-24) ترتیب جوشکاری مناسب 73
شکل 4-25) شماتیک روش اول تکنیک گرم کاری اطراف خط جوش 74
شکل 4-26) شماتیک روش دوم تکنیک گرم کاری اطراف خط جوش 75
شکل 4-27) نمایش اثر فاکتورهای اساسی دخیل در انتخاب گرم کن ، عرض ناحیه حرارت دیده (a) ، زمان اعمال حرارت و فاصله از خط جوش(b) 75
شکل 4-28) شماتیک روش کشش حرارتی 76
شکل 4-29) شماتیک روش پاشش آب پس جوشکاری 77
شکل 4-30) شماتیک روش ترکیبی برای کنترل تغییر شکاهای ناشی از جوشکاری 77
شکل 4-31) شماتیک روش نگداشتن در زیر آب 78
شکل 4-32) شماتیک روش خنک کاری بوسیله نیتروژن مایع , جوشکاری در حوضچه نیتروژن مایع (a) و خنک کاری توسط لوله کشی نیتروژن مایع (b) 79
شکل 4-33) شماتیک کشیدن مکانیکی 81
شکل 4-34) استفاده از گرم کردن و قالبهای ویژه جهت تثبیت شکل قطعه 81
شکل 5-1) مش بندی اعمال شده برای تحلیل حرارتی مسئله 86
شکل 5-2) شماتیک شرایط مرزی از روی قطعه تحت آزمایش 87
شکل 5-3) کانتورهای حرارتی بدست آمده از حل مسئله برای ورق 6mm در ثانیه 2 (a) , 40(b) , 80(c) , 120(d) , 300(e) , 500(f) 88
شکل 5-4) تغییرات ضریب انبساط خطی فولاد با دما 90
شکل 5-5) تغییرات مدول الاستیسیته خطی فولاد با دما 91
شکل 5-6) تغییرات تنش جاری شدن با دما 91
شکل 5-7) تغییرات شیب منحنی تنش- کرنش در فاز پلاستیک با دما 92
شکل 5-8) مش بندی مثلثی صورت گرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله 94
شکل 5-9) شماتیک شرایط مرزی بکار گرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله 95
شکل 5-10) حداکثرتغییرشکل های طولی(a) و حداکثرتغییرشکل های عرضی(b)ورق بر اساس آنالیز اجزای محدود 96
شکل 5-11) المانهای استفاده شده جهت فاز حرارتی مسئله المان Plane77(a) و المان Shell57(b) 99
شکل 5-12) مش بندی اعمال شده برای تحلیل حرارتی مسئله در نرم افزار ANSYS 99

شکل 5-13) مجموعه نتایج بدست آمده از تحلیل حرارتی جوش بوسیله نرم افزار Ansys برای ورق6 میلیمتر در ثانیه 2 (a) , 40(b) , 80(c) , 120(d) , 300(e) , 500(f) 101
شکل 5-14) المان PLANE42 (a) و المان shell43(b) بکارگرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله 102
شکل 5-15) حداکثرتغییرشکل های طولی(a) و حداکثرتغییرشکل های عرضی(b)ورق بر اساس آنالیز اجزای محدود, نرم افزار ANSYS 103
شکل 5-16) توزیع حرارت در مقطع A-A (a) , توزیع تنش طولی در مقطع A-A (b) و توزیع حرارت در مقطع B-B (c) , توزیع تنش طولی در مقطعB-B (d) و توزیع حرارت در مقطع C-C (e) , توزیع تنش طولی در مقطع C-C (f) و توزیع حرارت در مقطع D-D (g) , توزیع تنش طولی در مقطع D-D (h) 104
شکل 5-17) توزیع حرارت در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 8 (a) , توزیع تنش عرضی در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 8 (b) ,توزیع حرارت در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 50 (c) , توزیع تنش عرضی در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 50 (d) ,توزیع حرارت در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 100 (e) , توزیع تنش عرضی در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 100 (f) ,توزیع حرارت در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 500 (g) , توزیع تنش عرضی در طول ورق ، فاصله 25 میلیمتر از خط جوش ، ثانیه 500 (h) 105
شکل 5-18) تغییرات تنشهای طولی در راستای عرض) a) و تغییر شکلهای طولی در راستای عرضb)) معادل مقطع a-a در شکل 3-3 تغییرات تنشهای طولی در راستای عرض c)) و تغییر شکلهای طولی در راستای عرضd)) معادل مقطع b-b در شکل 3-3 تغییرات تنشهای طولی در راستای عرض e)) و تغییر شکلهای طولی در راستای عرضf)) معادل مقطع c-c در شکل 3-3 تغییرات تنشهای طولی در راستای عرض g)) و تغییر شکلهای طولی در راستای عرضh)) معادل مقطع d-d در شکل 3-3 106
شکل 5-19) تغییرات تنشهای عرضی در راستای طول(a) و تغییر شکل عرضی در راستای طول(b) در y=0 , در ثانیه8 تغییرات تنشهای عرضی در راستای طول(c) و تغییر شکل عرضی در راستای طول(d) در y=0 , در ثانیه50 تغییرات تنشهای عرضی در راستای طول(e) و تغییر شکل عرضی در راستای طول(f) در y=0 , در ثانیه100 تغییرات تنشهای عرضی در راستای طول(g) و تغییر شکل عرضی در راستای طول(h) در y=0 , در ثانیه500 107
شکل 5-20) تغییرات تنشهای طولی در راستای طول(a) و تغییر شکل طولی در راستای طول (b) در y=0 , در ثانیه 8 تغییرات تنشهای طولی در راستای طول(c) و تغییر شکل طولی در راستای طول (d) در y=0 , در ثانیه 50 تغییرات تنشهای طولی در راستای طول(e) و تغییر شکل طولی در راستای طول (f) در y=0 , در ثانیه 100 تغییرات تنشهای طولی در راستای طول(g) و تغییر شکل طولی در راستای طول (h) در y=0 , در ثانیه 500 108
شکل 5-21) تغییرات تنشهای عرضی در راستای عرض (a) و تغییر شکل عرضی در راستای عرض (b) در x=250 ,ثانیه 8 تغییرات تنشهای عرضی در راستای عرض (c) و تغییر شکل عرضی در راستای عرض (d) در x=250 ,ثانیه 50 تغییرات تنشهای عرضی در راستای عرض (e) و تغییر شکل عرضی در راستای عرض (f) در x=250 ,ثانیه 100 تغییرات تنشهای عرضی در راستای عرض (g) و تغییر شکل عرضی در راستای عرض (h) در x=250 ,ثانیه 500 109
شکل 5-22) شماتیک شرایط مرزی بکار گرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله در حالت لبه های آزاد 111
شکل 5-23) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با در نظر گرفتن لبه های آزاد برای ورق در ثانیه 500 112
شکل 5-24) تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن لبه های آزاد برای ورق در ثانیه 500 112
شکل 5-25) شماتیک شرایط مرزی بکار گرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله در اولین حالت مهار 113
شکل 5-26) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با در نظر گرفتن چهار گوشه تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 113

شکل 5-27) تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن چهار گوشه تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 113
شکل 5-28) شماتیک شرایط مرزی بکار گرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله در دومین حالت مهار 114
شکل 5-29) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با در نظر گرفتن لبه های ابتدا و انتهای ورق سرتاسر مقید به تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 114
شکل 5-30) تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن لبه های ابتدا و انتهای ورق سرتاسر مقید به تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 115
شکل 5-31) شماتیک شرایط مرزی بکار گرفته شده برای تحلیل مکانیکی مسئله در سومین حالت مهار 115
شکل 5-32) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با در نظر گرفتن هر سه لبه ورق سرتاسر مقید به تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 116
شکل 5-33) تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن هر سه لبه ورق سرتاسر مقید به تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 116
شکل 5-34) مقایسه حداکثر تنش طولی (a) , حداقل تنش طولی (b) , حداکثر تنش عرضی(c) , حداقل تنش عرضی (d) در ورق 6 میلیمتر 117
شکل 5-35) مقایسه حداکثر تغییرشکلهای طولی (a) , حداقل تغییرشکلهای طولی (b) در ورق 6 میلیمتر 118
شکل 5-36) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با تغییر ضخامت ورق در ثانیه 500 119
شکل 5-37) تغییرات تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت قطعه برای شرایط I=450 و V=40 119
شکل 5-38) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با در نظر گرفتن تغییرات انرژی ورودی جوشکاری برای ورق 6 میلیمتر 120
شکل 5-39) تغییرات تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن تغییرات انرژی ورودی جوشکاری برای ورق 6 میلیمتر در ثانیه 500 120
شکل 5-40) تغییرات تنشهای طولی (a) و تنشهای عرضی (b) با در نظر گرفتن تغییرات سرعت جوشکاری برای ورق 6 میلیمتر در ثانیه500 121
شکل 5-41) تغییرات تغییرشکلهای طولی (a) و تغییرشکلهای عرضی (b) با در نظر گرفتن تغییرات سرعت جوشکاری برای ورق 6 میلیمتر در ثانیه500 121
شکل 5-42) ابعاد هندسی مدل تست عملی 123
شکل 5-43) آماده سازی ورق ضخامت 10 میلیمتر برای جوشکاری زیرپودری 123
شکل 5-44) دستگاه جوش زیرپودری تولید شرکت گام الکتریک 124
شکل 5-45) ورقهای ضخامت 6 میلیمتر تحت مطالعه پس از اجرای جوشکاری زیرپودری 126
شکل 5-46) حداکثرتغییرشکل های طولی(a) و حداکثرتغییرشکل های عرضی(b)ورق بر اساس نتاج مطالعه میدانی ... 126
شکل 5-47) مقایسه پاسخهای بدست آمده برای ورق 6 میلیمتر شامل حداکثرتغییرشکل های عرضی(a) و حداکثرتغییرشکل های طولی(b) 128
شکل 5-48) مقایسه انقباض طولی (a),انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با گرمکاری دینامیک 130
شکل 5-49) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با گرمکاری استاتیک 131
شکل 5-50) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با پاشش آب روی خط جوش 133

شکل 5-51) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با سیستم ترکیبی 134
شکل 5-52) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b)در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری قطعه در زیر آب 136
شکل 5-53) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با سیستم نیتروژن مایع 137
شکل 5-54) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با اعمال پیش گرم 139
شکل 5-55) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b),تنشهای طولی (c),تنشهای عرضی(d) در جوشکاری بدون کنترل و جوشکاری با اعمال پس گرم 140
شکل 5-56) مقایسه انقباض طولی (a), انقباض عرضی (b) برای روشهای مختلف کنترل اعوجاج در ورق 6 میلیمتر 141

فهرست جدول‌ها

جدول 1-1) فاکتورهای عملکرد برای روشهای مختلف جوشکاری 5
جدول 2-1) راندمان قوس الکتریکی در روشهای جوشکاری 7
جدول 1-5) مقایسه تنشهای پسماند با در نظر گرفتن لبه های آزاد برای ورق در ثانیه 500 112
جدول 2-5) مقایسه تنشهای پسماند با در نظر گرفتن چهار گوشه تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 114
جدول 3-5) مقایسه تنشهای پسماند با در نظر گرفتن لبه های ابتدا و انتهای ورق سرتاسر مقید به تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 چهار گوشه 115
جدول 4-5) مقایسه تنشهای پسماند با در نظر گرفتن هر سه لبه ورق سرتاسر مقید به تکیه گاه ساده برای ورق در ثانیه 500 116
جدول 5-5) مشخصات و پارامترهای منظور شده برای اولین نمونه آزمایشی 124
جدول 6-5) مشخصات و پارامترهای منظور شده برای دومین نمونه آزمایشی 125
جدول 7-5) مشخصات و پارامترهای منظور شده برای سومین نمونه آزمایشی 125
جدول 8-5) مشخصات و پارامترهای منظور شده برای چهارمین نمونه آزمایشی 125

فصل 1 مقدمه و کلیات

1-1- مروری بر فعالیت‌های مرتبط گذشته

جوشکاری با استفاده از قوس الکتریکی، اندکی پس از اختراع جریان الکتریسیته در اوخر قرن هجدهم میلادی شروع شد، ولی اولین مطالعات و بررسی‌های مبتنی بر علم و آموخته‌های آکادمیک روی پدیدهٔ جوشکاری از حدود سال 1930 میلادی آغاز شده است. شکست و ریزش پلهای فلز جوشکاری شده در اروپا و فاجعهٔ انهدام کشتی‌های سری آزادی[1] در جنگ جهانی دوم بهانهٔ مناسبی را جهت برنامه‌ریزی تحقیقات علمی راجع به پدیدهٔ جوشکاری بوجود آورد[1].

از آنجا که محاسبات مورد نیاز جهت تحلیل پدیده گذرایی چون جوشکاری پیچیده است این مطالعات بصورت محدود انجام می‌گرفت. تا اینکه در سال 1960 با دسترسی به کامپیوترهای پیشرفته مطالعات برروی تحلیل پدیده جوش رونق یافت. اولین کسی که از کامپیوتر برای تحلیل تنش‌های حرارتی در جوشکاری استفاده کرد تال[2] بود[2]. تال در پایان نامه دکترایش در سال 1961 یک برنامه ساده جهت محاسبه تنش‌های حرارتی در طول خط جوش نوشت. در تحلیل تال تنها s_x درنظر گرفته می‌شد که فقط تابعی از فاصله عرضی جوش از خط مرکز بود. به هر حال بخاطر پیچیدگی مساله جوشکاری، بویژه اثر پیچیده رفتار مواد غیرالاستیک و بارگذاری و باربرداری مواد، روش-های عددی مورد توجه قرار گرفته بود.

در بین پدیده‌ها و اتفاقات مربوط به جوشکاری تغییر شکل و اعوجاج ناشی از جوشکاری در بین محققین جایگاه ویژه‌ای داشته است چنانچه گزارشات باارزشی از مجموعه فعالیتهای کارلسون[3] و اسمیت[4] و راداج[5] و گلداک[6] و یواد[7] ا به جا مانده است[3و4و5و6و7].

در طول 35 سال گذشته نیز، تحقیقاتی برای استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته در مدلسازی جوش صورت گرفته است . بدلیل پیچیدگی فیزیکی مساله جوشکاری ، حل ریاضیاتی ساده برای تحلیل این فرایند پیچیده مناسب نیست. همچنین در عمل و در کارهای تجربی - آزمایشگاهی نیز بدست آوردن الگوی کاملی از توزیع تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در کل سازه جوشی ممکن نیست. از اینرو مدلسازی کامپیوتری و روش حل عددی برای تحلیل صحیح این فرایند از اهمیت ویژه ای برخوردار گشته و راه را برای تحلیل‌های دقیق هموار نموده است.

چنانچه قبلا گفته شد، روش‌های عددی از دهه هفتاد برای شبیه سازی فرایندهای جوشکاری بکار گرفته شده است. تمرکز اصلی اکثر این فعالیتها اساسا روی پیش بینی تاریخچه دمایی، تنش‌های پسماند و

[1] Liberty ships
[2] Tall
[3] Karlsson
[4] Smit
[5] Radaj
[6] Goldak
[7] Ueda

تغییر شکلهای پلاستیک بوده است. در این راستا روش‌های المان محدود مرسوم‌ترین 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 نسبت به 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، تغییر شکلهای بزرگ در سازه های نازک، تغییر فاز و مبحث خزش از جمله این پیچیدگی ها می باشند. مدلسازی جوش همزمان با پیشرفت کامپیوترها و تقاضای روز افزون صنعت از دو دهه پیش تاکنون توسعه چشمگیری یافته است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

آرگیریس[1] و گروهش [8] در سال 1982 یک پاسخ حرارتی-مکانیکی را با استفاده از مدل دو بعدی جهت ترکیب کردن دو تحلیل حرارتی و مکانیکی ارایه کرد. پس آن ریبیکی[2] و گروهش [9] یک تحلیل الاستیک-پلاستیک حرارتی را روی یک سازه جوشی لب به لب و بصورت دو بعدی و نیز با تکنیک مدلسازی نصف سازه 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.

ماسابوچی[3] و پاپازوقلو[4] [10] یک تحلیل دو بعدی حرارتی و مکانیکی را برای جوشکاری میگ چند پاسه انجام دادند. اما تحلیل های مزبور همگی بدلیل نبودن امکانات مناسب کامپیوتری، بصورت دو بعدی انجام شدند. هر چند تحلیل دو بعدی جهت پیش بینی تاریخچه دمایی و تنش پسماند بسیار دقیق است اما با این تحلیل امکان بررسی تغییر شکلهای خارج از صفحه و بررسی اثر خال جوش ها نقاط شروع و پایان جوشکاری وجود ندارد. لذا چاره ای به جز تحلیل سه بعدی نبود. در سال 1992 امکانات نرم افزاری به حدی پیشرفت کرده بود که امکان مدلسازی سه بعدی جوش فراهم شد، لذا در این سال براون[5] و سانگ[6] [11] یک تحلیل دو بعدی و سه بعدی را برای یک رینگ تقویتی مخزن انجام دادند و نتیجه گرفتند که تحلیل دو بعدی، تغییر شکل پیچشی رینگ را نادرست پیش بینی کرده است. مایکلریز[7] و گروهش [12] ، تاثیرات قیود مکانیکی بر تنش های پس ماند و تغییر شکلها را بصورت دو بعدی و سه بعدی بررسی کردند و نتایج تحلیل دو بعدی و سه بعدی را با هم مقایسه کردند. ادی و گروهش یک تحلیل کامل سه بعدی را برای جوش لب به لب یک تیر انجام دادند و میدان های دما و تنش کرنش را به طور کامل استخراج کردند. تکرینال[8] و

[1] Argyris
[2] Rybicki
[3] Masabuchi
[4] Papazoghlu
[5] Brown
[6] Song
[7] Michaleri
[8] Techrinal

مازومبر[1][13] یک جوش لب به لب را سه بعدی و با توجه به اضافه شدن فیلر در حین پیشروی فرایند جوشکاری تحلیل کردند. مشابه همین کار را یدا و گروهش و ریکی و گروهش برای چند پاس انجام دادند.

ادی و گروهش[2] [14] یک متودولوژی برای تعیین رفتار کمانشی سازه‌ها با تغییر شکلهای جوش بزرگ را ارائه داد. ماکیلرز و گروهش[15] یک تکنیک را برای پیش بینی کمانش پانل‌های جوشکاری شده با سطح مقطع کوچک ارائه کرد.

1-2- روشهای تعیین هزینه های جوشکاری[16]

1-2-1-فاکتور اپراتور

فاکتور اپراتور یا سیکل کاری در جوشکاری قوسی، درصدی از زمان واقعی قوس در یک مدّت زمان مشخص می باشد. این زمان میتواند بر حسب دقیقه، ساعت، شیفت کار و یا مقادیر دیگر باشد. درصد بالای زمان قوس (فاکتور اپراتور) باعث تغییر مقدار جوش ایجاد شده و در نهایت افزایش راندمان زمانی جوشکاری می شود. عملیاتی چون تمیزکاری قطعه، بارگذاری، خال جوش زنی و غیره موجب کاهش فاکتور اپراتور می شود.

فاکتور اپراتور بالا بیانگر هزینه نهایی کم نمی باشد زیرا ممکن است مطابق دستور العمل جوشکاری، زمان قوس یا زمان جوشکاری زیادی مورد نیاز باشد. به عنوان مثال ممکن است استفاده از سیم جوش نازک را به جای استفاده از سیم جوشهای بزرگ‌تر توصیه کرده باشند. این مورد باعث افزایش فاکتور اپراتور میشود. نحوه اجرای جوشکاری، بیان کننده ظاهر، چگونگی و کمیت جوش می باشد، بنابراین هر گونه مانعی از مقابل جوشکاران بایستی برداشته شود. کار باید در موقعیتی انجام شود که کمترین خستگی را به همراه داشته باشد و جوشکار به راحتی بتواند کار را انجام دهد.

به عنوان مثال، تغییر موقعیت از عمودی یا بالای سر به موقعیت تخت موجب افزایش سرعت جوشکاری میشود، به طوری که یک پاس جوش در حالت تخت در حداکثر سرعت جوشکاری ایجاد میشود.

فاکتور اپراتور با استفاده از قید و بست و یا استفاده از دستگاه های نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک که در آن جوشکار یا اپراتور، مثل شیار زدن و غیره را انجام نمی دهد، افزایش می‌آید.

[1].Muzamber
[2] Oddy

فاکتور اپراتور واقعی به نوع و اندازه جوش، موقعیت جوش، قید و بست، محل جوشکاری و دیگر شرایط کاری نیز بستگی دارد. ممکن است این فاکتور از یک پروژه با پروژه دیگر یا قطعه به قطعه دیگر در صورت تغیر شرایط جوشکاری، تغییر کند.

1-2-2-تعیین هزینه های نیروی انسانی

هزینه نیروی انسانی، معمولا بر اساس زمان مصرفی در یک قطعه یا انجام یک کار محاسبه می شود. مهمترین منبع محاسبه هزینه نیروی انسانی جوشکاری، دستور العمل جوشکاری و طرح اتصال می باشد. دستور العمل جوشکاری، متغیرهای فرایند مثل سرعت جوشکاری، اندازه و نوع سیم جوش را مشخص میکند. طرح اتصال جوش، تعداد پاس ها، اندازه جوش و مقدار فلّز جوش رسوب داده را مشخص میکند. داده ها بر اساس فاکتور اپراتور محاسبه شده و تصحیح می گردد.

هزینه نیروی انسانی برای جوشکاری دستی یا ماشینی ممکن است بصورت هزینه بر حسب طول واحد جوش بیان شود. برای جوشهای تک پاسه، هزینه نیروی انسانی از رابطه زیر بدست می آید.

$$L_c = 0.2P_R/(T_S * O_F) \quad (1\text{-}1)$$

سرعت حرکت از دستور العمل جوشکاری بدست می آید. فاکتور اپراتور به فرایند و روش جوشکاری بستگی دارد و از جدول شماره (1-1) قرایت می‌شود. نرخ دستمزد جوشکار یا اپراتور بصورت ساعتی بعلاوه هزینه های جانبی شامل بیمه، تعطیلات و غیره محاسبه میشود.

جدول 1-1) فاکتورهای عملکرد برای روشهای مختلف جوشکاری

روش جوشکاری	رنج فاکتور اپراتور
15-30	روشهای دستی
10-60	روشهای نیمه اتوماتیک
50-95	روشهای اتوماتیک

برای محاسبه هزینه نیروی انسانی در جوش‌های چند پاسه رابطه زیر را معرفی میکنیم:

$$L_c = (P_R * W_M)/(D_R * O_F) \quad (2\text{-}1)$$

وزن فلّز جوش رسوب داده شده را می توان با هندسه جوش و نرخ رسوب را می توان از داده های استاندارد محاسبه کرد.