



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مواد  
گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی

### عنوان پایان نامه

تحلیل تجربی و شبیه سازی فرآیند اتصال فولاد دریایی به آلیاژ آلومینیم سری ۵۰۰۰

نگارش:

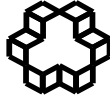
مهدی ضرونی

استاد راهنما:

دکتر رضا اسلامی فارسانی

زمستان ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## تاییدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان :

تحلیل تجربی و شبیه سازی فرآیند اتصال فولاد دریایی به آلیاژ آلومینیم سری ۵۰۰۰

توسط مهدی ضرونی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته

مهندسی مواد گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی در تاریخ

مورد تأیید قرار دادند.

امضاء

۱- استاد راهنما دکتر رضا اسلامی فارسانی

امضاء

۲- استاد مشاور دکتر

امضاء

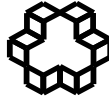
۳- استاد ممتحن دکتر

امضاء

۴- استاد ممتحن دکتر

امضاء

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دکتر



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## اظهارنامه دانشجو

اینجانب مهدی ضرونی دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی،

انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان:

**تحلیل تجربی و شبیه سازی فرایند اتصال فولاد دریایی به آلیاژ آلومینیم سری ۵۰۰۰**

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر رضا اسلامی فارسانی توسط شخص اینجانب انجام

شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد. در مورد

استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که

مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد

دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب

دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

## حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده و استاد/استادان راهنمای آن می باشد. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پایان نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد/استادان راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم به

امام عصر (عج)؛

شہیدان راہ خدا؛

پدر فداکار؛

ومادر عزیز و مہربانم

## تشکر و قدردانی

ستایش می‌کنم و شکر می‌گویم خداوند بلند مرتبه را که همواره لطف بی‌کرانش در زندگی نصیب من بوده است. در این جا بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات استاد راهنمای خود آقای دکتر رضا اسلامی فارسانی که در طی مراحل مختلف این پایان نامه همواره راهنمای بنده بوده‌اند کمال تشکر را به عمل آورم.

همچنین از زحمات و همکاری های صمیمانه برادران و دوستان عزیزم، آقای دکتر علی خامعه‌ای، آقایان مهندسین نجفی، مجید رضایی، غلامرضا رضایی، منوچهر یاراحمدی، رضا رحمانی، مرتضی معظمی، علی صالحی و تمام کسانی که بنده را در انجام و به پایان رساندن این پایان نامه یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

مهدی ضرونی

دی ماه ۱۳۹۲

## چکیده

امروزه نیاز به اتصال آلومینیم به فولاد به منظور کاهش وزن سازه، در صنایع دریایی، هوافضا و خودروسازی، به سرعت در حال افزایش است. در این تحقیق آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ از طریق روش جوشکاری قوسی با گاز محافظ خنثی و الکتروود تنگستنی (تیگ) - لحیم کاری سخت، به فولاد گالوانیزه، فولاد زنگ نزن و فولاد ساده کربنی با به کار بردن پرکننده های پایه آلومینیم (Al-5Si) - ۴۰۴۳ و (Al-12Si) ۴۰۴۷ اتصال داده شد. شبیه سازی عددی فرآیند اتصال با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام گرفت. نتایج شبیه سازی تطابق خوبی با نتایج عملی داشت. سیکل های حرارتی ایجاد شده در حین فرآیند اتصال روی میزان ترشوندگی فولاد، میزان تنش پسماند جوشکاری و ضخامت لایه بین فلزی ترد ایجاد شده موثر است. افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش زمان حضور مذاب و در نتیجه افزایش ضخامت لایه بین فلزی ترد می شود. حضور عنصر سیلیسیم در پرکننده روی ماهیت، ریخت و ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک فولاد - فلز جوش، موثر است. فازهای ترد شکل گرفته شامل فاز  $Fe(Al, Si)_3$  ( $\theta$ ) در طرف فولاد و فاز  $Al_{7.2}Fe_{1.6}Si$  ( $\tau_F$ ) در طرف فلز جوش می باشد. افزایش عنصر سیلیسیم در فصل مشترک فولاد - فلز جوش، باعث کاهش حضور اتم های آهن در این ناحیه وهم چنین افزایش انرژی فعال سازی نفوذ آهن در آلومینیم می شود که در نتیجه منجر به کاهش ضخامت لایه بین فلزی می شود. بالاترین استحکام حاصل شده (۱۷۰/۶مگا- پاسکال) مربوط به اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۷ بود. همچنین برای این نوع اتصال شکست در فلز جوش رخ داد، در حالی که برای دیگر اتصالات شکست در ناحیه فصل مشترک فولاد - فلز جوش رخ داد. در این تحقیق لایه بین فلزی با ضخامت بین ۲-۶ میکرون ایجاد شد.

واژه های کلیدی: آلومینیم ۵۰۸۳، فولاد دریایی، شبیه سازی عددی، جوشکاری تیگ - لحیم کاری، ترکیب بین فلزی.



صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: مروری بر منابع
۶	۱-۲. آلومینیم
۶	۱-۱-۲. طبقه بندی آلیاژهای آلومینیم
۷	۱-۱-۱-۲. آلیاژهای کارشدهی آلومینیم
۷	۱-۱-۲-۲. آلیاژهای ریخته شدهی آلومینیم
۸	۱-۲-۲. آلیاژهای آلومینیم دریایی
۱۰	۲-۲. فولاد های دریایی
۱۱	۳-۲. فولاد های بدنه ی کشتی
۱۲	۴-۲. ضرورت اتصال آلومینیم به فولاد
۱۳	۵-۲. روش های اتصال آلومینیم به فولاد
۱۴	۱-۵-۲. پیوند چسبی
۱۴	۱-۱-۵-۲. پارامترهای موثر بر دوام اتصالات چسبی
۱۴	۲-۱-۵-۲. مزایای اتصالات چسبی
۱۵	۳-۱-۵-۲. معایب اتصالات چسبی
۱۵	۲-۵-۲. روش قطعه میانی، زوج فلز یا اتصال گذار
۱۵	۳-۵-۲. جوشکاری لیزر - لحیم کاری
۱۶	۱-۳-۵-۲. مزایای جوشکاری لیزر - لحیم کاری
۱۶	۲-۳-۵-۲. معایب جوشکاری لیزر - لحیم کاری
۱۷	۴-۵-۲. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۸	۱-۴-۵-۲. مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۹	۲-۴-۵-۲. معایب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۹	۵-۵-۲. جوشکاری انفجاری
۱۹	۱-۵-۵-۲. پارامترهای جوشکاری انفجاری
۲۰	۲-۵-۵-۲. مهمترین مزایا و کاربرد های جوشکاری انفجاری
۲۰	۳-۵-۵-۲. معایب جوشکاری انفجاری
۲۱	۶-۵-۲. فرایند های جوشکاری (تیگ) - لحیم کاری
۲۱	۱-۶-۵-۲. اصول فرایند های جوشکاری (تیگ) - لحیم کاری
۲۱	۲-۶-۵-۲. پارامترهای فرایند جوشکاری (تیگ) - لحیم کاری

عنوان	صفحه
۶-۲. مروری بر تحقیقات انجام شده در ارتباط با اتصال آلومینیم به فولاد.....	۲۴
۷-۲. مروری بر شبیه سازی اتصال آلومینیم به فولاد.....	۲۶
۱-۷-۲. معاله حاکم انتقال حرارت در حین جوشکاری و حل تحلیلی روزنتال.....	۲۶
۲-۷-۲. حل عددی حرارت در جوشکاری.....	۲۸
۱-۲-۷-۲. شرایط مرزی.....	۲۹
۲-۲-۷-۲. مدل سازی منبع حرارت.....	۲۹
۳-۲-۷-۲. شبیه سازی اضافه کردن فلز پرکننده.....	۳۰
۳-۷-۲. مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه شبیه سازی فرایند جوشکاری.....	۳۱
فصل سوم: شبیه سازی.....	۳۴
۱-۳. معرفی نرم افزار آباکوس.....	۳۵
۲-۳. شبیه سازی فرایند جوشکاری با نرم افزار آباکوس.....	۳۶
۱-۲-۳. شبیه سازی حرارتی فرایند جوشکاری.....	۳۶
۱-۱-۲-۳. مدل سازی مسئله.....	۳۷
۲-۱-۲-۳. تعریف خواص مواد و نسبت دادن آن به مدل.....	۳۷
۳-۱-۲-۳. سرهم بندی اجزاء مدل.....	۴۰
۴-۱-۲-۳. بیان شرایط مرزی مسئله.....	۴۰
۵-۱-۲-۳. پارتیشن بندی اجزاء فلز جوش.....	۴۰
۶-۱-۲-۳. تعریف گام های مسئله.....	۴۱
۷-۱-۲-۳. بارگذاری حرارتی.....	۴۱
۸-۱-۲-۳. مش بندی و اعتبار سنجی مش.....	۴۲
۲-۲-۳. شبیه سازی مکانیکی فرایند جوشکاری.....	۴۳
فصل چهارم: مواد، تجهیزات و روش آزمایش.....	۴۵
۱-۴. مواد آزمایش.....	۴۶
۲-۴. آماده سازی نمونه های آزمایش.....	۴۷
۳-۴. انجام آزمایشات جوشکاری(تیگ) - لحیم کاری.....	۴۸
۴-۴. آزمایشات مکانیکی.....	۵۰
۵-۴. آزمایشات متالوگرافی.....	۵۱
فصل پنجم: نتایج و بحث.....	۵۳
۱-۵. نتایج شبیه سازی.....	۵۵
۱-۱-۵. نتایج تحلیل حرارتی.....	۶۰

## فهرست عناوین

صفحه	عنوان
۶۱	۵-۱-۲. نتایج تحلیل مکانیکی .....
۶۶	۵-۱-۳. مقایسه نتایج عملی و شبیه سازی ( بررسی صحت شبیه سازی) .....
۶۸	۵-۲. تاثیر حرارت ورودی روی ظاهر جوش و ترشوندگی ورق ها .....
۷۳	۵-۳. تاثیر حرارت ورودی روی ریز ساختار جوش .....
۸۱	۵-۴. بررسی استحکام اتصال و عوامل موثر بر آن .....
۸۵	۵-۵. بررسی میکروسکوپی ریز ساختار اتصال .....
۹۹	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها .....
۱۰۰	۶-۱. نتیجه گیری .....
۱۰۲	۶-۲. پیشنهادها .....
۱۰۳	مراجع .....

## فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲. گروه های مختلف آلیاژهای کارشده ی آلومینیم بر طبق سیستم نام گذاری آمریکا	۷
جدول ۲-۲. گروه های آلیاژی ریخته شده ی آلومینیم بر اساس نام گذاری جامعه ی آلومینیم ایالات متحده ی آمریکا	۸
جدول ۳-۲. خواص آلیاژ های ۵۰۸۳ و ۵۰۵۹ و ۷۰۲۰ و خواص بعد جوش این آلیاژ ها	۹
جدول ۴-۲. مقایسه ی ترکیب شیمیایی فولاد ساختمانی و فولاد دریایی	۱۰
جدول ۵-۲. مقایسه خواص مکانیکی فولاد ساختمانی و فولاد دریایی	۱۱
جدول ۶-۲. مقایسه ی ترکیب شیمیایی فولاد بدنه کشتی و فولاد گالوانیزه	۱۲
جدول ۷-۲. مقایسه خواص مکانیکی فولاد بدنه کشتی و فولاد گالوانیزه	۱۲
جدول ۱-۳. خواص حرارتی وابسته به دما برای آلیاژ ۵۰۸۳	۳۸
جدول ۲-۳. خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ ۵۰۸۳	۳۸
جدول ۳-۳. تنش تسلیم وابسته به دما برای آلیاژ ۵۰۸۳	۳۹
جدول ۴-۳. خواص حرارتی و مکانیکی فولاد گالوانیزه	۳۹
جدول ۴-۳. (ادامه) خواص حرارتی و مکانیکی فولاد گالوانیزه	۳۹
جدول ۵-۳. خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ ۴۰۴۳	۳۹
جدول ۵-۳. (ادامه) خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ ۴۰۴۳	۴۰
جدول ۶-۳. پارامتر های جوشکاری	۴۱
جدول ۱-۴. آنالیز شیمیایی مواد مورد آزمایش	۴۶
جدول ۲-۴. پارامتر های جوشکاری	۴۹
جدول ۱-۵. پارامتر های جوشکاری بهینه	۸۳
جدول ۲-۵. استحکام نهایی ایجاد شده	۸۳
جدول ۳-۵. نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پر کننده ۴۰۴۳ در موقعیت های مشخص شده در شکل ۵-۳۲	۹۰
جدول ۴-۵. نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه و با پر کننده ۴۰۴۷ و نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن و فولاد ساده کربنی در موقعیت های مشخص شده در شکل ۵-۳۶	۹۰

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲. انواع روش های اتصال آلومینیم به فولاد.....	۱۳
شکل ۲-۲. اشکال مختلف برای اتصال گذار.....	۱۵
شکل ۳-۲. سوراخ کلید شکل گرفته در فرایند جوشکاری لیزر.....	۱۶
شکل ۴-۲. اصول مربوط به جوشکاری اصطکاکی.....	۱۷
شکل ۵-۲. ریز ساختار جوش مربوط به جوشکاری اصطکاکی.....	۱۸
شکل ۶-۲. شماتیکی از فرایند جوشکاری انفجاری.....	۲۰
شکل ۷-۲. مدل منبع حرارت دو بیضیگون گلداک.....	۳۰
شکل ۱-۳. ابعاد و اتصال لب به لب قطعه ها.....	۳۷
شکل ۲-۳. قطعات مش بندی شده.....	۴۲
شکل ۳-۳. دمای پیک بر حسب اندازه ی المان.....	۴۳
شکل ۱-۴. نمونه های آنالیز شیمیایی شده در تحقیق.....	۴۶
شکل ۲-۴. فلاکس استفاده شده.....	۴۷
شکل ۳-۴. طرح اتصال ورق آلومینیم به ورق گالوانیزه.....	۴۸
شکل ۴-۴. طرح اتصال، اتصال ورق آلومینیمی به فولاد زنگ نزن.....	۴۸
شکل ۵-۴. تصویری از دستگاه جوش الکتروتکنوتک.....	۴۹
شکل ۶-۴. تعدادی از نمونه های تهیه شده آزمون کشش.....	۵۰
شکل ۷-۴. دستگاه آزمون کشش Universal Machine PM22.....	۵۰
شکل ۸-۴. نمونه های آزمون کشش استاندارد الف- نمونه لب به لب و ب- نمونه لب روی هم.....	۵۱
شکل ۹-۴. نمونه های مانت شده.....	۵۲
شکل ۱-۵. سیکل های دما - زمان در مختصات الف- A، ب- B.....	۵۵
شکل ۱-۵ (ادامه) سیکل های دما - زمان در مختصات ج- C، د- D، ر- E.....	۵۶
شکل ۲-۵. مختصات نقاط روی خط مرکزی جوش.....	۵۶
شکل ۳-۵. مسیر مشخص شده برای بررسی تغییرات دمایی.....	۵۷
شکل ۴-۵. تغییرات دمایی بر حسب فاصله از مرکز جوش.....	۵۸
شکل ۵-۵. تنش پسماند فون میزز شبیه سازی شده روی مسیر میانی روی قطعات.....	۵۹
شکل ۶-۵. اعوجاج نهایی ورق ها روی مسیر مشخص شده.....	۵۹
شکل ۷-۵. جابه جایی انتهای آلومینیم بر حسب حرارت ورودی.....	۶۰
شکل ۸-۵. مقطع عرضی جوش، شبیه سازی و عملی.....	۶۱
شکل ۹-۵. اعوجاج نهایی ورق ها روی مسیر میانی ورق ها (محاسبه شده و واقعی).....	۶۱
شکل ۱۰-۵. نقطه فصل مشترکی مورد بررسی.....	۶۲

شکل ۵-۱۱. سیکل های حرارتی محاسبه شده، به ترتیب در نقطه فصل مشترک فولاد - فلز جوش	۶۲
شکل ۵-۱۲. تاثیر حرارت ورودی روی زمان سرد شدن مذاب	۶۴
شکل ۵-۱۳. تاثیر حرارت ورودی روی دمای پیک	۶۴
شکل ۵-۱۴. ضخامت بین فلزی بر حسب حرارت ورودی	۶۴
شکل ۵-۱۵. تاثیر حرارت ورودی روی زمان شروع مذاب در نقطه فصل مشترک فولاد- فلز ذوب	۶۵
شکل ۵-۱۶. تاثیر حرارت ورودی روی تنش پسماند فون میزز	۶۷
شکل ۵-۱۷. تاثیر حرارت ورودی روی تنش فون میزز در فصل مشترک فلز جوش فولاد	۶۸
شکل ۵-۱۸. عکس های ماکرو از مقطع عرضی جوش برای نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۳ (الف) - حرارت ورودی J/mm ۲۴۷/۵ (ب) - J/mm ۴۱۳/۶۳۶ (ج) - J/mm ۴۲۰ (د) - J/mm ۴۶۱/۳ (ر) - اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۷ و حرارت ورودی J/mm ۴۵۵/۸	۶۹
شکل ۵-۱۹. عکس های ماکرو از مقطع عرضی جوش برای نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن با الکتروود ۴۰۴۳ (الف) - حرارت ورودی J/mm ۴۳۲ (ب) - J/mm ۴۵۵ و اتصال آلومینیم به فولاد کربنی ساده با الکتروود ۴۰۴۳ (ج) - حرارت ورودی J/mm ۴۷۴ (د) - J/mm ۴۹۴ ... ۷۰	۷۰
شکل ۵-۲۰. تصاویر ظاهری نمونه های جوشکاری - لحیم کاری. سمت چپ نمای جلویی و سمت راست نمای پشتی	۷۲
شکل ۵-۲۱. عکس های میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در ناحیه فصل مشترک فلز جوش - فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۳ (الف) - حرارت ورودی J/mm ۲۴۷/۵ (ب) - J/mm ۴۱۳/۶۳۶	۷۳
شکل ۵-۲۱ (ادامه) عکس های میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در ناحیه فصل مشترک فلز جوش - فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۳ (ج) - J/mm ۴۲۰ (د) - J/mm ۴۶۱/۳ (ر) - اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۷ و حرارت ورودی J/mm ۴۵۵/۸	۷۴
شکل ۵-۲۲. ضخامت بین فلزی واقعی بر حسب حرارت ورودی	۷۵
شکل ۵-۲۳. مقایسه ضخامت بین فلزی واقعی و محاسبه شده	۷۵
شکل ۵-۲۴. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در ناحیه فصل مشترک فلز جوش - فولاد زنگ نزن با الکتروود ۴۰۴۳ (الف) - حرارت ورودی J/mm ۴۳۲ (ب) - J/mm ۴۵۵ و اتصال آلومینیم به فولاد کربنی ساده با الکتروود ۴۰۴۳ (ج) - حرارت ورودی J/mm ۴۷۴ (د) - J/mm ۴۹۴	۷۶

- شکل ۵-۲۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در ناحیه فصل مشترک فلز جوش - آلومینیم در نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۳  
 الف) - حرارت ورودی  $247/5 \text{ J/mm}$  (ب) -  $413/636 \text{ J/mm}$  (ج) -  $420 \text{ J/mm}$   
 د) -  $461/3 \text{ J/mm}$  (ر) - اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۷  
 و حرارت ورودی  $455/8 \text{ J/mm}$  ..... ۷۷
- شکل ۵-۲۶. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در ناحیه فصل مشترک فلز جوش - آلومینیم در نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن با الکتروود ۴۰۴۳ - حرارت ورودی  $432 \text{ J/mm}$  (ب) -  $455 \text{ J/mm}$  واتصال آلومینیم به فولاد کربنی ساده با الکتروود ۴۰۴۳  
 ج) - حرارت ورودی  $474 \text{ J/mm}$  (د) -  $494 \text{ J/mm}$  ..... ۷۸  
 شکل ۵-۲۷. نمودار دو تایی AL-Si ..... ۷۹
- شکل ۵-۲۸. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در ناحیه فلز جوش در نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۳ - الف) - حرارت ورودی  $247/5 \text{ J/mm}$   
 ب) -  $413/636 \text{ J/mm}$  (ج) -  $420 \text{ J/mm}$  (د) -  $461/3 \text{ J/mm}$  (ر) - اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با الکتروود ۴۰۴۷ و حرارت ورودی  $455/8 \text{ J/mm}$  ..... ۸۰
- شکل ۵-۲۹. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فلز جوش در نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن با الکتروود ۴۰۴۳ - الف) - حرارت ورودی  $432 \text{ J/mm}$  (ب) -  $455 \text{ J/mm}$  واتصال آلومینیم به فولاد کربنی ساده با الکتروود ۴۰۴۳ - ج) - حرارت ورودی  $474 \text{ J/mm}$  (د) -  $494 \text{ J/mm}$  ..... ۸۱
- شکل ۵-۳۰. مقطع شکست اتصالات الف) - اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۳ (ب) اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۷ (ج) - اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی، د) - اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن ..... ۸۴
- شکل ۵-۳۱. استحکام نهایی بر حسب حرارت ورودی را برای نمونه های اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ی ۴۰۴۳ ..... ۸۵
- شکل ۵-۳۲. عکس های SEM در نواحی مختلف اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۳ - الف) - فصل مشترک فولاد - فلز جوش (ب) - فصل مشترک آلومینیم - فلز جوش و ج) - ناحیه فلز جوش ..... ۸۶
- شکل ۵-۳۳. دیاگرام سه تایی Fe-Al-Si در دمای  $600^\circ \text{C}$  ..... ۸۷
- شکل ۵-۳۴. دیاگرام سه تایی Mg-Al-Si در دمای  $450^\circ \text{C}$  ..... ۸۷
- شکل ۵-۳۵. دیاگرام دو تایی Al-W ..... ۸۸

عنوان	صفحه
شکل ۵-۳۶. تصاویر SEM در نواحی مختلف اتصال آلومینیم به فولاد (الف) - اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۷، فصل مشترک فولاد - فلز جوش (ب) - اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن، فصل مشترک فولاد - فلز جوش و (ج) - اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی، فصل مشترک فولاد - فلز جوش	۸۹
شکل ۵-۳۷. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۳ (الف) - نقطه A و (ب) - نقطه B	۹۱
شکل ۵-۳۸. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۳ (ج) - نقطه C و (د) - نقطه D	۹۲
شکل ۵-۳۹. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۷ (الف) - نقطه A و (ب) - نقطه B	۹۳
شکل ۵-۴۰. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۷ (ج) - نقطه C	۹۴
شکل ۵-۴۱. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن با پرکننده ۴۰۴۳ (الف) - نقطه A	۹۴
شکل ۵-۴۲. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد زنگ نزن با پرکننده ۴۰۴۳ (ب) - نقطه B	۹۵
شکل ۵-۴۳. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده ۴۰۴۳ (الف) - نقطه A	۹۵
شکل ۵-۴۴. نتایج آنالیز EDS در نمونه اتصال آلومینیم به فولاد ساده کربنی با پرکننده ۴۰۴۳ (ب) - نقطه B	۹۶
شکل ۵-۴۵. تصویر الکترون برگشتی و توزیع عناصر آلیاژی برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۳	۹۷
شکل ۵-۴۶. تصویر الکترون برگشتی و توزیع عناصر آلیاژی برای اتصال آلومینیم به فولاد گالوانیزه با پرکننده ۴۰۴۷	۹۸



## فهرست علائم و اختصارات

عنوان	علامت اختصاری
دانسیتته	$\rho$
مدول یانگ	E
ضریب انبساط حرارتی	$\alpha$
گرمای نهان ذوب	$L_f$
دمای شروع ذوب	$T_m$
دمای شروع انجماد	$T_s$
تنش تسلیم	$Y_s$
استحکام نهایی	UTS
هدایت حرارتی	K
گرمای ویژه	$C_p$
بردار شار حرارتی	q
نرخ تولید گرمای درونی	Q
بازدهی قوس	$\eta$
جریان جوشکاری	I
ولتاژ جوشکاری	V
سرعت جوشکاری	v
ضریب انتقال حرارت ترکیبی	$\tilde{h}$
ثابت استفان - بولتزمن	$\sigma$
تابندگی	$\varepsilon$
کسر حرارت ورودی به بخش عقبی	$f_r$
کسر حرارت ورودی به بخش جلویی	$f_f$
حجم المان جوش	$V_H$

# فصل اول

مقدمه

امروزه الزامات طراحی، صرفه جویی در مصرف سوخت و مسائل زیست محیطی باعث شده تا طراحان به سمت کاهش وزن سازه ها گرایش پیدا کنند. در این راستا جایگزینی فلزات سنگین همچون فولاد با فلزات با دانسیته پایین تر همچون آلومینیم به عنوان یک راهکار مناسب تلقی می گردد. اتصال آلومینیم به فولاد و در واقع جایگزینی آلومینیم با فولاد باعث کاهش وزن سازه و افزایش صرفه جویی در مصرف سوخت برای صنایع کشتی سازی، خودروسازی و هوافضا شده است. در این خصوص باید گفت که کاهش وزن ناشی از جایگزینی آلومینیم با فولاد باعث شده تا امکان ساخت کشتی های غول پیکر فراهم شده و این کشتی ها بتوانند مسیر های طولانی تری را بپیمایند. اتصال آلومینیم به فولاد علاوه بر صنایع هوافضا و صنایع خودرو سازی به صورت چشمگیری در صنایع دریایی یک پدیده بحرانی است. در شناورهای سطحی اتصال روسازه ی آلومینیمی به زیرسازه فولادی مورد بحث است. به طور کلی روش های اتصال آلومینیم به فولاد شامل جوشکاری ذوبی حالت گذار، روش های ترکیبی جوشکاری لیزر- لحیم کاری و جوشکاری با الکتروود تنگستنی - لحیم کاری، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری آلتراسونیک، پیوند چسبی و روش های بستن مکانیکی می باشد. روش های اتصال غیرذوبی به وسیله پارامتر های صرفه اقتصادی، شکل، ابعاد و نوع طرح اتصال محدود می شوند. روش هایی همچون جوشکاری انفجاری و آلتراسونیک

توسط ضخامت محدود می شوند. روش پیوند چسبی به علت تردید در دوام پیوند خیلی کاربردی نبوده و مورد بحث نیست. روش های بستن مکانیکی نیز نیاز به بازرسی دوره ای و در مواردی تعویض داشته که به لحاظ اقتصادی به صرفه نیست علاوه بر آن مشکلات خوردگی در این نوع طرح اتصال مطرح است. روش های ترکیبی جوشکاری - لحیم کاری که در آن ها در طرف فولادی لحیم کاری و عدم ذوب شدن فولاد و در طرف آلومینیم جوشکاری و ذوب شدن آلومینیم رخ می دهد به لحاظ اقتصادی به صرفه بوده و مشکلات شکل و ابعاد مطرح نیست. اختلافات گسترده ی خواص ترمو فیزیکی و خواص الکتروشیمیایی آلومینیم و فولاد باعث شده تا اتصال این دو فلز نامشابه از طریق روش های جوشکاری ذوبی با مشکلاتی گوناگونی همراه باشد [۱۶ و ۱۷].

کارهای تحقیقاتی گسترده ای در مورد فرایند های مختلف اتصال آلومینیم به فولاد صورت گرفته است. هدف از این کارها رسیدن به شرایط بهینه ای از پارامترهای روش اتصالی است طوری که اتصال آلومینیم به فولاد خواص مورد نیاز را برآورده نماید. همچنین کارهای گسترده ای در خصوص شبیه سازی فرایندهای اتصال آلومینیم به فولاد صورت پذیرفته است که در ادامه به آن ها اشاره خواهد شد. در این تحقیق روش اتصالی جوشکاری قوسی با گاز محافظ خنثی و الکتروود تنگستنی (تیگ)<sup>۱</sup> - لحیم کاری<sup>۲</sup> به عنوان یک روش اتصال آلومینیم به فولاد به جهت آن که در کشورمان قبلاً مورد بررسی واقع نشده است و همچنین بحث صرفه اقتصادی آن، انتخاب شد و به لحاظ شبیه سازی عددی و کار های تجربی مورد بحث قرار گرفت. آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ به عنوان پر کاربرد ترین آلیاژ آلومینیم دریایی سری ۵۰۰۰ که دارای جوش پذیری بالا و همچنین استحکام مناسب استفاده شد. فولاد زنگ نزن<sup>۳</sup> ۳۰۴ (فولاد ۱۸ درصد کروم، ۸ درصد نیکل) به عنوان یک فولاد دریایی و هم چنین فولاد گالوانیزه CS ( فولاد گالوانیزه تجاری) و فولاد St37 ( فولاد ساده کربنی ساختمانی) به عنوان فولاد های مشابه به فولاد های دریایی<sup>۴</sup> بدنه کشتی به لحاظ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی انتخاب شد.

در فصل اول این پایان نامه مقدمه ای در مورد موضوع و ضرورت طرح و بررسی آن و همچنین خلاصه ای از کارهای انجام گرفته، بیان می گردد.

فصل دوم مروری بر مبانی تئوری و تحقیقات صورت گرفته در خصوص موضوع می باشد. در این

<sup>۱</sup> - TIG(Tungsten Inert Gas)

<sup>۲</sup> -Brazing

<sup>۳</sup> - Stainless Steel

<sup>۴</sup> - Marin Steel