# بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده فنی و مهندسی**
**بخش مواد و متالورژی**
**پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد و متالورژی گرایش خوردگی و حفاظت از مواد**

---

# بررسی رفتار الکتروشیمیایی و خوردگی فولاد ساده کربنی جوشکاری شده به روش اصطکاکی در حضور نانو ذرات تقویت کننده فلز جوش تحت اثر فاکتور شکل

---

**مؤلف**
**مهدی آل ابراهیم**

**استاد راهنما**
**دکتر عبدالحمید جعفری**

**استاد مشاور**
**مهندس فاطمه بقایی راوری**

**بهمن ماه ۱۳۹۱**

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

**بخش مواد و متالورژی**

**دانشکده فنی و مهندسی**

**دانشگاه شهید باهنر کرمان**

تسلیم شده است و هیچ‌گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : مهدی آل ابراهیم

استاد راهنما : دکتر عبدالحمید جعفری

استاد مشاور : مهندس فاطمه بقایی راوری

داور ۱ : دکتر شهریار شرفی

داور ۲ : دکتر غلامرضا خیاطی

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر احمد ایران نژاد

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر مریم احتشام زاده

**حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.**

**تقدیم به**

**پدر و مادر،**
**امید و باورم**

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. به رسم ادب و به شکر اتمام این پژوهش از استاد با کمالات و شایسته، جناب آقای دکتر عبدالحمید جعفری که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، از سرکار خانم‌ها مهندس بقایی و دادگری نژاد که در انجام آزمایشات همواره نهایت همکاری را مبذول فرمودند و همچنین از دوست و همکار ارجمند آقای مهندس احسان فریدون نژاد که نقش ایشان در انجام این تحقیق خاطره انگیز و ماندنی است و از دوست گرامی آقای مهندس مجید افتخار موسوی و دیگر دوستان، نهایت سپاس و قدردانی را دارم.

## چکیده

جوشکاری اصطکاکی از روش‌های نوین جوشکاری حالت جامد است که دارای مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های جوشکاری ذوبی از جمله باریک باقی ماندن منطقه متأثر از جوش، عدم نیاز به فلاکس، سرباره ساز، گاز محافظ و ماده پرکننده و در نتیجه یک جوش تمیز تر با مصرف کمتر انرژی می‌باشد. در این پژوهش تأثیر فاکتور شکل برای نخستین بار در جوشکاری اصطکاکی بر رفتار الکتروشیمیایی و ریزساختار فولاد ساده کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. توأمان با توجه به بهبود چشمگیر خواص کامپوزیت‌های سرمت روشی نوین در ایجاد کامپوزیت پایه فلزی، با استفاده از جوش اصطکاکی، توسط اضافه کردن نانو پودر سرامیکی کاربید سیلیسیم به فلز جوش، به منظور تحصیل خواص بهینه ریزساختاری نسبت به فلز پایه به کار گرفته شد. جوش به دست آمده با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپ نوری(OM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM)، پراش پرتو ایکس(XRD) و انجام آزمایشات الکتروشیمیایی پتانسیودینامیک و طیف نگاری امپدانس و نویز الکتروشیمیایی(EIS) در محلول شبیه سازی شده آب خلیج فارس بررسی شد. نتایج، ضمن تعریف زاویه بهینه جوشکاری اصطکاکی، بهبود خواص خوردگی در اثر ریز دانه شدن مقطع جوش در پی ایجاد کامپوزیت پایه فلزی و در نتیجه افزایش مقاومت به ضربه و بهبود مقاومت به خوردگی را نشان می‌دهند.



**واژه‌های کلیدی**: جوشکاری اصطکاکی، رفتار الکتروشیمیایی، کامپوزیت پایه فلزی، نانو پودر کاربید سیلیسیم، خوردگی.

# فهرست


فصل اول: مقدمه ..... ۱

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته ..... ۵

۲-۱ درآمدی بر مبحث خوردگی ..... ۶

۲-۲ اهمیت جوشکاری ..... ۶

۲-۳ خوردگی در جوشکاری ..... ۷

۲-۳-۱ انواع خوردگی جوش ..... ۸

۲-۳-۱-۱زوج‌های دوفلزی ..... ۸

۲-۳-۱-۲ خوردگی حفره ای ..... ۸

۲-۳-۱-۳ خوردگی تنشی ..... ۹

۲-۳-۱-۴ خوردگی مرزدانه ای ..... ۹

۲-۳-۱-۵ ترک در اثر هیدروژن ..... ۱۰

۲-۳-۱-۶ خوردگی میکروبی ..... ۱۰

۲-۴ جوشکاری حالت جامد ..... ۱۱

۲-۴-۱ مزایای جوشکاری حالت جامد ..... ۱۲

۲-۴-۲ محدودیتهای جوشکاری حالت جامد ..... ۱۳

۲-۵ جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۳

۲-۵-۱ مکانیزم اتصال در جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۴

۲-۵-۲ انواع جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۶

۲-۵-۲-۱ جوشکاری اصطکاکی لحظهای ..... ۱۶

۲-۵-۲-۲ جوشکاری اصطکاکی پیوسته ..... ۱۷

۲-۵-۳ مزایای جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۹

۲-۵-۴ محدودیت‌های جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۹

۲-۵-۵ مواد مناسب برای قرار گرفتن تحت جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۹

۲-۵-۶ انواع دیگر جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۹

۲-۵-۶-۱ جوشکاری اصطکاکی شعاعی ..... ۱۹
۲-۵-۶-۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۲۰
۲-۵-۷ تعیین پارامترهای بهینه فرآیند جوشکاری اصطکاکی ..... ۲۱
۲-۵-۸ خصوصیات مکانیکی جوش‌های اصطکاکی..... ۲۲
۲-۵-۹ مطالعات در مورد جوشکاری اصطکاکی..... ۲۲
۲-۶ کامپوزیت‌ها ..... ۲۵
۲-۷ نانو ذرات ..... ۲۶
۲-۷-۱ نانو ذرات سرامیکی ..... ۲۶
۲-۷-۲ استحکام دهی با کاهش اندازه دانه ..... ۲۷
فصل سوم: مواد و روش تحقیق..... ۲۸
۳-۱ مقدمه..... ۲۹
۳-۲ روش تحقیق آزمایشگاهی ..... ۲۹
۳-۲-۱ آلیاژ و مواد مورد استفاده..... ۲۹
۳-۲-۲ ابزار و دستگاه مورد استفاده در جوشکاری ..... ۲۹
۳-۲-۳ نحوه اعمال فاکتور شکل ..... ۳۰
۳-۲-۴ روند انجام جوشکاری ..... ۳۰
۳-۲-۴-۱ بدست آوردن پارامتر های بهینه جوشکاری اصطکاکی ..... ۳۰
۳-۲-۴ -۲ اضافه کردن نانو پودر SiC در فرآیند جوشکاری اصطکاکی..... ۳۳
۳-۲-۵ بررسی ماکرو و میکرو ساختار..... ۳۳
۳-۲-۶ تست سختی و میکروسختی ..... ۳۳
۳-۲-۷ تست کشش..... ۳۴
۳-۲-۸ تست ضربه ..... ۳۴
۳-۲-۹ آماده سازی نمونه‌ها..... ۳۴
۳-۲-۱۰ بررسی ریز ساختار..... ۳۴
۳-۲-۱۱ پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ..... ۳۵
۳-۲-۱۲ طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی ..... ۳۵

فصل چهارم: نتایج ..... ۳۶
۴-۱ مقدمه ..... ۳۷
۴-۲ تست‌های مکانیکی ..... ۳۷
۴-۲-۱ تست کشش ..... ۳۷
۴-۲-۲ تست سختی ..... ۳۸
۴-۲-۳ تست میکرو سختی ..... ۴۰
۴-۲-۴ تست ضربه ..... ۴۰
۴-۳ نتایج میکروسکوپ نوری ..... ۴۱
۴-۴ نتایج میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) ..... ۴۷
۴-۵ نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترون روبشی منطقه جوش اصطکاکی ..... ۵۰
۴-۶ نتایج الکتروشیمیایی ..... ۵۱
۴-۶-۱ نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ..... ۵۱
۴-۶-۲ طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی ..... ۵۳
فصل پنجم: بحث و بررسی ..... ۵۶
۵-۱ بررسی نتایج تست‌هایی مکانیکی از نمونه های جوش داده شده ..... ۵۷
۵-۱-۱ تست کشش ..... ۵۷
۵-۱-۲ تست سختی و میکرو سختی ..... ۵۷
۵-۱-۳ تست ضربه ..... ۵۸
۵-۲ بررسی ریزساختار جوش اصطکاکی ..... ۵۸
۵-۳ بررسی رفتار الکتروشیمیایی ..... ۵۹
۵-۳-۱ منحنی‌های پلاریزاسیون ..... ۵۹
۵-۳-۲ منحنی‌های نایکوئیست ..... ۶۰
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۶۱
۶-۱ نتیجه گیری ..... ۶۲
۶-۲ پیشنهادات ..... ۶۳
فصل هفتم: مراجع ..... ۶۴

## فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ نحوه انجام جوشکاری اصطکاکی در مرحله فورج ..... ۱۴

شکل۲-۲ شماتیک انجام جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۵

شکل ۲-۳ شماتیک تأثیر پارامتر های جوشکاری اصطکاکی ..... ۱۵

شکل ۲-۴ پارامتر های جوشکاری اصطکاکی لحظه ای ..... ۱۷

شکل ۲-۵ پارامتر های جوشکاری اصطکاکی پیوسته ..... ۱۸

شکل ۲-۶ شماتیک انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۲۰

شکل۳-۱: شماتیک نمونه های اولیه جوش اصطکاکی با زاویه ۹۰ و ۱۸۰ درجه ..... ۳۰

شکل ۴-۱ مقایسه نتایج استحکام کششی نهایی نمونه های جوش ..... ۳۸

شکل ۴-۲ سختی بر حسب فاصله از مرکز جوش برای نمونه جوش داده شده به روش اصطکاکی با زاویه ۱۸۰ درجه ..... ۳۸

نمودار ۴-۳ سختی بر حسب فاصله از مرکز جوش برای نمونه جوش داده شده به روش اصطکاکی با زاویه ۹۰ درجه ..... ۳۹

شکل ۴-۴ شماتیک نحوه اندازه گیری سختی نمونه های جوش ..... ۳۹

شکل ۴-۵ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه شاهد از بالا به پایین به ترتیب در بزرگنمایی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر ..... ۴۲

شکل ۴-۶ تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع جوش اصطکاکی زاویه جوش ۱۸۰ درجه بدون پودر از بالا به پایین به ترتیب در بزرگنمایی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برای ..... ۴۳

شکل ۴-۷ تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع جوش زاویه جوش ۹۰ درجه بدون پودر از بالا به پایین به ترتیب در بزرگنمایی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر ..... ۴۴

شکل ۴-۸ تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع جوش زاویه جوش ۱۸۰ درجه همراه با پودر نانو از بالا به پایین به ترتیب در بزرگنمایی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر ..... ۴۵

شکل ۴-۹ تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع جوش زاویه جوش ۹۰ درجه همراه با نانو پودر از بالا به پایین به ترتیب در بزرگنمایی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر .....۴۶

شکل ۴-۱۰ تصاویر SEM از جوشکاری اصطکاکی بعد از عملیات اچ کردن از نمونه جوشکاری شده با زاویه ۹۰ درجه و بدون پودر در بزرگنمایی ۸۰۰ و ۲۰۰۰ .....۴۷

شکل ۴-۱۱ تصاویر SEM از جوشکاری اصطکاکی بعد از عملیات اچ کردن از نمونه جوشکاری شده با زاویه ۹۰ درجه و همراه با پودر در بزرگنمایی ۸۰۰ و ۲۰۰۰.....۴۷

شکل ۴-۱۲ تصاویر SEM از جوشکاری اصطکاکی بعد از عملیات اچ کردن از نمونه جوشکاری شده با زاویه ۱۸۰ درجه و بدون پودر در بزرگنمایی ۸۰۰ و ۲۰۰۰.....۴۸

شکل ۴-۱۳ تصاویر SEM از جوشکاری اصطکاکی بعد از عملیات اچ کردن از نمونه جوشکاری شده با زاویه ۱۸۰ درجه و همراه با پودر در بزرگنمایی ۸۰۰ و ۲۰۰۰ .....۴۸

شکل ۴-۱۴ نتایج آنالیز SEM منطقه جوش اصطکاکی برای نمونه جوش داده شده با زاویه ۹۰ درجه همراه با پودر .....۵۰

شکل ۴-۱۵ منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه های جوش داده شده و نمونه شاهد .....۵۱

شکل ۴-۱۶ منحنی‌های Nayquist و bode طیف نگاری امپدانس نمونه شاهد .....۵۳

شکل ۴-۱۷ منحنی‌های Nayquist و bode طیف نگاری امپدانس نمونه های جوش داده شده به روش اصطکاکی با زاویه ۹۰ درجه .....۵۳

شکل ۴-۱۸ منحنی‌های Nayquist و bode طیف نگاری امپدانس نمونه های جوش داده شده به روش اصطکاکی با زاویه ۹۰ درجه همراه پودر نانو .....۵۴

شکل ۴-۱۹ منحنی‌های Nayquist و bode طیف نگاری امپدانس نمونه های جوش اصطکاکی با زاویه ۱۸۰ درجه .....۵۴

شکل ۴-۲۰ منحنی‌های Nayquist و bode طیف نگاری امپدانس نمونه جوش داده شده به روش اصطکاکی با زاویه ۱۸۰ درجه همراه با نانو پودر کاربید سیلیسیم .....۵۵

# فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ مشخصات فولاد کربنی مورد استفاده برای جوشکاری اصطکاکی..... ۲۹

جدول ۳-۲ جوش‌های اصطکاکی انجام شده برای یافتن پارامتر بهینه فرآیند..... ۳۲

جدول ۴-۱ نتایج بدست آمده از تست کشش نمونه شاهد به همراه نمونه های جوش داده شده. ۳۷

جدول ۴-۲ نتایج تست میکرو سختی نمونه های جوش داده شده به همراه نمونه شاهد ..... ۴۰

جدول ۴-۳ نتایج تست ضربه برای نمونه های جوش داده شده به همراه نمونه شاهد ..... ۴۱

جدول ۴-۴ نتایج بررسی دانه بندی و درصد فازها با استفاده از نرم افزار Image J..... ۴۹

جدول ۴-۵ نتایج حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون لگاریتمی ..... ۵۱

جدول ۴-۶ نتایج حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون خطی..... ۵۲

# فصل اول

# مقدمه

امروزه پژوهش‌های خوردگی نه تنها از جهت ملاحظات اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد، بلکه از نقطه نظر حفظ جان افراد نیز در کانون توجه صنعتگران و محققین قرار دارد. یکی از حساس‌ترین شرایط خوردگی در صنعت، محل اتصالات و انشعابات می‌باشد.

جوشکاری به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های اتصال همواره مورد توجه بوده است. فرآیند جوشکاری اصطکاکی (Friction Welding) یکی از انواع فرآیندهای اتصال حالت جامد می‌باشد که در اثر به هم آمیختگی ناشی از گرمای ایجاد شده از سایش کنترل شده سطوح انجام می‌شود. در اثر حرارت اصطکاک، فلز به دمای خمیری می‌رسد و شروع به ایجاد لایه‌های درآمیخته با سطح دیگر کرده و جوش مطلوبی حاصل می‌شود [۱].

در جوشکاری حالت جامد(Solid State Welding) برخلاف فرآیندهای جوشکاری ذوبی که اتصال در نتیجه ذوب موضعی دو قطعه و تداخل آن‌ها و عمل انجماد انجام می‌شود، اتصال بدون تشکیل مذاب صورت می‌پذیرد با این وجود ممکن است فیلمی از فلز مذاب در یک مرحله میانی از عملیات بین سطوح ایجاد گردد که این فلز مذاب معمولاً به طور کامل از جوش جدا می‌شود، ولی در حضور کوتاه خود نقش مفیدی را در انجام جوش ایفا می‌کند. جوشکاری اصطکاکی از رایج‌ترین روش‌های جوش حالت جامد می‌باشد که بر پایه اصل تبدیل انرژی مکانیکی به گرمایی استوار است. این روش دارای مزایای بی‌شماری از جمله پایین بودن میزان مصرف انرژی و عدم نیاز به فلاکس بوده و با طبیعت سازگار می‌باشد [۲]. شاخص‌ترین ویژگی این روش جوشکاری که از نقطه نظر خوردگی بسیار اهمیت دارد ایجاد منطقه تحت اثر جوش(Heat Affected Zone) باریک و محدود می‌باشد که علت آن وجود گرمای اصطکاک در محدوده منطقه اصطکاکی باشد. همچنین پایین‌تر بودن دمای بیشینه منطقه متأثر از جوش، از دمای سالیدوس باعث می‌شود که در مقایسه با فرآیندهای جوشکاری ذوبی، ریزساختاری‌های تا اندازه‌ای متفاوت ایجاد گردد. در هنگام انجام جوشکاری ذوبی، تنش‌های حرارتی و مکانیکی پیچیده‌ای در جوش و مناطق پیرامون آن به دلیل به کار بردن متمرکز حرارت به همراه قید و فشار به وجود می‌آید. به دنبال جوشکاری ذوبی، تنش‌های پسماند معمولاً به استحکام تسلیم فلز پایه می‌رسد. که عدم وجود این شرایط در جوشکاری اصطکاکی موجبات شرایط خوردگی بهتر اتصالات حاصل از این نوع از جوشکاری را فراهم می‌آورد.

با توجه به محدودیتی که در نحوه انجام جوشکاری اصطکاکی وجود دارد، از جمله لزوم گرد بودن سطح مقطع نمونه‌ها، همواره تلاش در جهت بهبود شرایط انجام جوش بوده است. همچنین صرفه جویی در هزینه و زمان جوش از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد. از طرفی از آنجا که

اصطکاک بین سطوح عامل اصلی ایجاد جوش می‌باشد، افزایش سطح تماس از طریق تغییر در زاویه سطح تماس دو قطعه در حال جوشکاری، جهت تسریع فرآیند ذوب موضعی و آمیختگی بهتر، در این پژوهش برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. این امر در بهبود کیفیت جوش، خواص مکانیکی بهتر و مقاومت به خوردگی بالاتر در اثر ایجاد ساختاری همگن تر مفید خواهد بود.

همزمان جهت بهبود ریزساختار سطح مقطع جوش از روشی نوین در ایجاد کامپوزیت پایه فلزی (Metal Matrix Composite) بهره گرفته شد. در این روش پودر سرامیکی که قابلیت ترکیب با فلز پایه را ندارد، با فلز حین جوشکاری مخلوط شده و ساختار ریز و همگنی ایجاد می‌کند. همچنین باعث کاهش تخلخل هیدروژنی که در هنگام تولید آلیاژ ممکن است به وجود آید، می-شود. با ایجاد کامپوزیت پایه فلزی انتظار می‌رود که علاوه بر خواص مکانیکی، مقاومت به خوردگی نیز بهبود یابد. کامپوزیت‌های پایه فلزی مزایای فراوانی نسبت به فلز یکپارچه داشته که از آن جمله می‌توان به استحکام بالاتر، خصوصیات بهتر در درجه حرارت‌های بالا، ضرایب انبساط حرارتی کمتر و مقاومت در برابر سایش اشاره کرد. این نوع از کامپوزیت‌ها به دلیل تولید راحت-تر، قیمت مناسب و خواص ایزوتروپیک بسیار مورد توجه می‌باشند. به دلیل داشتن این برتری‌ها، مواد مرکب فلزی، کاربرد گسترده ای در صنایع هوافضا دارند [۳]. این فرآیند در پژوهش‌های نوین بهسازی ریزساختاری فلزات، تحت عنوان فراوری اصطکاکی اغتشاشی رایج بوده و یکی از روش‌های مورد توجه اخیر جهت ایجاد کامپوزیت پایه فلزی می‌باشد که موجب بهبود خواص مکانیکی و خوردگی ورق‌های آلیاژی می‌شود. استفاده از این روش حین جوشکاری اصطکاکی با استفاده از نانو ذرات پودر سرامیکی همراه با بررسی فاکتور شکل بهینه از ابتکارات این پژوهش می‌باشد.

در این تحقیق از پودر نانو ذرات کاربید سیلیسیم(SiC) بهره گرفته شد که دارای مشخصه‌های سختی بالا، مقاومت به سایش بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین و ضریب هدایت حرارتی بالا که سبب مقاومت به شوک حرارتی بالا می‌شود، می‌باشد. این ماده در مواد نانو الکتریک و فوتونیک، بیومواد، پوشش‌های دی الکتریک و سلول‌های خورشیدی و به صورت فاز تقویت کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی به منظور افزایش استحکام و مقاومت سایشی کامپوزیت، کاربرد دارد [۳و۴].

از آنجا که دریا یکی از پرکاربردترین و حساس‌ترین محیط‌ها جهت پیشگیری و شناخت خوردگی می‌باشد و با عنایت به لزوم استفاده از جوشکاری اصطکاکی در انواع صنایع دریایی،

آزمایشات خوردگی و الکتروشیمیایی این پژوهش در محیط شبیه‌سازی شده آب خلیج فارس انجام شد.

## فصل دوم

# مروری بر تحقیقات گذشته

## ۲-۱ درآمدی بر مبحث خوردگی

تخریب مواد در اثر واکنش با محیط پیرامون را خوردگی می‌نامند. مقصود از مواد در این تعریف فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها می‌باشد که کلیه اجزاء ماشین‌ها، تجهیزات، فرآیندها و محصولات را در بر می‌گیرد و محیط‌ها نیز مایع یا گاز می‌باشند. البته در شرایط خاص واکنش‌های جامد-جامد نیز ممکن است ایجاد خوردگی کنند. مکانیزم‌های خوردگی زیاد می‌باشند، زیرا تعریف خوردگی وسیع است. از مکانیزم‌های رایج خوردگی، انتقال اتمی، مولکولی یا یونی می‌باشد که در فصل مشترک ماده رخ می‌دهد که معمولاً این انتقال‌ها چند مرحله ای می‌باشند و کندترین مرحله تعیین‌کننده سرعت نهایی واکنش می‌باشد.

در مورد مواد مهندسی مانند فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها انتقال جرم از طریق فصل مشترک به محیط را می‌توان پدیده‌ای الکتروشیمیایی، شیمیایی یا فیزیکی دانست. از آنجا که خوردگی الکتروشیمیایی شامل آزاد شدن یون‌ها در محیط و حرکت الکترون‌ها در ماده می‌باشد، این مکانیزم تنها هنگامی می‌تواند رخ دهد که محیط حاوی یون‌ها و موادی باشد که هادی الکترون باشند. در دماهای زیاد، گازها موجب خوردگی فلزات و به ویژه در حضور اکسیژن موجب تشکیل اکسیدها می‌شوند [۵].

## ۲-۲ اهمیت جوشکاری

دنیای صنعت و تکنولوژی شامل انواع محصولاتی است که تقریباً اکثر آن‌ها به صورت قطعات جداگانه تولید می‌شوند. اتصال این قطعات با روش‌های متنوعی صورت می‌پذیرد. اتصال واژه‌ای جامع می‌باشد که فرآیندهایی مانند جوشکاری و لحیم‌کاری و محکم‌سازی مکانیکی را در بر می‌گیرد. این فرآیندها جنبه‌ای مهم و ضروری در تولید می‌باشند. جوشکاری یکی از رایج‌ترین و مطمئن‌ترین روش‌های اتصال می‌باشد. نیاز روزافزون به اتصالات مدرن، سبک، محکم و مقاوم در سال‌های اخیر و مخصوصاً بیست سال اخیر، سبب توسعه سریع این فن‌آوری شده است.

فرآیندهای جوشکاری به سه دسته کلی جوشکاری ذوبی، جوشکاری حالت جامد و لحیم‌کاری تقسیم بندی می‌شوند. بعضی از انواع فرآیندهای جوشکاری می‌توانند در هر دو دسته ذوبی و حالت جامد طبقه‌بندی شوند که مثال‌های عمده آن جوشکاری سربه‌سر و مقاومتی هستند. جوشکاری ذوبی، ذوب و آمیزش مواد به یکدیگر توسط گرما تعریف می‌شود. انرژی گرمایی لازم برای این عملیات معمولاً به طریق شیمیایی یا الکتریکی تأمین می‌شود. فلزات پرکننده که فلزات افزوده شده به منطقه جوش طی فرآیند جوشکاری می‌باشند، در برخی از انواع روش‌های

جوشکاری ذوبی به کار می‌روند. جوش‌های ذوبی انجام شده بدون افزودن فلزات پرکننده به جوش‌های خودزا معروفند. با توجه به کاربرد گسترده اتصالات جوش در صنایع مختلف، استفاده از روش‌های مطمئن‌تر، چه از نظر کیفیت موضع جوش و چه از نقطه‌نظر کنترل خوردگی، در سال‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲-۳ خوردگی در جوشکاری

روش‌های جوشکاری ذوبی دارای معایبی هستند که در حیطه خوردگی، بیشتر خودنمایی می‌کنند. از جمله معایب جوش‌های ذوبی می‌توان به تخلخل و مک (Porosity)، خلل و فرج در دامنه انجماد و ذوب ناقص اشاره کرد. همچنین هزینه بالا، عدم امکان اتصال برخی آلیاژهای غیرمشابه و زمان جوشکاری زیاد از مشکلات این روش‌های جوشکاری است. با این وجود مهم‌ترین مشکل این روش‌ها از نگاه یک مهندس خوردگی، ایجاد دمای ذوب و ایجاد ناحیه متأثر از حرارت می‌باشد که منطقه مستعد به خوردگی خواهد بود. به طور کلی فاکتورهایی که اغلب بر خوردگی جوش‌ها اثرگذار می‌باشند عبارت از طراحی درز جوش، فن‌آوری ساخت، شیوه جوشکاری، مراحل جوشکاری، آلودگی به رطوبت، مواد شیمیایی آلی و غیر آلی، فیلم اکسیدی و پوسته، گل جوش و پاشش، عدم نفوذ یا عدم ذوب، تخلخل، ترک‌ها یا شیارها، تنش‌های پسماند زیاد، انتخاب نامناسب فلز پرکننده و نحوه پرداخت سطح تمام شده می‌باشند. سیکل گرمایش و سرمایش طی عملیات جوشکاری بر روی ریزساختار و ترکیب شیمیایی سطح جوش و فلز پایه مجاور اثر می‌گذارد. در نتیجه مقاومت خوردگی جوش‌های هم جنس و جوش‌های ساخته شده با فلز پر کننده ممکن است کمتر از فلز پایه آنیل شده مناسب باشد چرا که عواملی همچون جدانشینی میکروسکوپی، رسوب نشینی فاز های ثانویه، تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه تحت تأثیر جوش، شکل گیری مناطق مخلوط نشده (Formation Of Unmixed Zone) و تبخیر عناصر آلیاژی از حوضچه مذاب در حال انجماد تأثیر گذار می باشند [۶].

مقاومت خوردگی در شرایط جوشکاری شده را توسط تنظیم ترکیب شیمیایی، به طوری که از به وجود آمدن بعضی رسوبات واکنش کننده جلوگیری نماید، افزایش می‌دهند. همچنین با محافظت سطح مذاب از گازهای فعال در محیط جوشکاری و انتخاب پارامترهای صحیح جوشکاری می توان خواص خوردگی جوش را بهبود بخشید.

## ۲-۳-۱ انواع خوردگی جوش

جوش‌ها ضمن اینکه خوردگی کلاسیک را می‌توانند تجربه کنند، بیشتر به انواع خوردگی‌هایی حساس هستند که وابسته به تغییرات ریز ساختار می‌باشند. به طور ویژه می توان خوردگی دوفلزی (Galvanic Corrosion)، حفره‌ای، تنشی، مرزدانه ای، ترک خوردگی هیدروژنی و خوردگی میکروبی را نام برد. در هنگام طراحی سازه جوشکاری شده باید ملاحظات این انواع از خوردگی را مد نظر داشت.

### ۲-۳-۱- ازوج‌های دوفلزی (Galvanic Couples)

اگرچه بعضی از آلیاژها را می‌توان به طور همجنس (Autogenously) جوشکاری کرده و از فلز پرکننده رایج استفاده نمود، استفاده از فلزات پرکننده با ترکیب شیمیایی متفاوت از فلز پایه ممکن است سبب تولید اختلاف پتانسیل گردد، به طوری که قسمتی از فلز جوش فعال‌تر شود. برای اکثر آلیاژهای آلومنیوم فلز جوش نسبت به فلز پایه حساس‌تر می‌شود. ترکیبات عمومی رسوب فلز جوش/فلز پایه که موجب ایجاد زوج گالوانیکی می‌شوند، شناخته شده هستند. استفاده از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن برای تعمیرات قطعات ماشین‌آلات سنگین به خصوص آن‌هایی که از فولاد آلیاژی پراستحکام ساخته شده‌اند، بسیار رایج می‌باشد. این عمل موجب ایجاد پتانسیل کاتدی برای فولاد زنگ نزن در تماس الکتریکی با فولاد می‌شود. هیدروژن از کاتد فلز جوش فولاد زنگ نزن تولید می‌شود که می‌تواند بدون ترک خوردن هیدروژن زیادی را در خود حل کند. رفتار کاتدی جوش راسب شده ممکن است سبب افزایش حساسیت به ترک خوردگی تنشی (SCC) در ناحیه متأثر از جوش فولاد پراستحکام شود. اختلاف بین انبساط حرارتی فولاد زنگ نزن آستنیتی و فلز پایه سبب به وجود آمدن تنش پسماند قابل ملاحظه ای در جوش می‌شود. این میدان تنشی پسماند در ایجاد حساسیت به ترک خوردگی مشارکت می‌نماید.

### ۲-۳-۱-۲ خوردگی حفره ای [۶،۵]

حفره دار شدن نوعی خوردگی شدیداً موضعی است که باعث سوراخ شدن فلز می‌شود. مهم‌ترین ویژگی این نوع از خوردگی نسبت بسیار بزرگ سطح کاتد به آند می‌باشد. در نتیجه دانسیته جریان و سرعت خوردگی منطقه مرده بسیار بالا خواهد بود. حفره دار شدن یکی از مخرب‌ترین انواع خوردگی می‌باشد و در اثر سوراخ شدن تجهیزات یا قطعات فلزی باعث بلا استفاده شدن آن‌ها می‌شود، در حالی که تقلیل وزن حاصل از این نوع خوردگی ناچیز است. حفره‌دار شدن را به سختی می‌توان توسط آزمایشات خوردگی پیش بینی کرد. حفره‌ها معمولاً در جهت نیروی جاذبه