



پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد

عنوان:

بررسی خواص نیمه‌هادی لایه‌های رویین تشکیل شده روی فولادهای زنگ‌نزن

استاد راهنما:

دکتر آرش فتاح الحسینی

نگارش:

امید ایمان طلب

کلیه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا یا استاد راهنمای پایان‌نامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت. درج آدرس‌های ذیل در کلیه مقالات خارجی و داخلی مستخرج از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها الزامی می‌باشد.

....., Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

مقالات خارجی

.....، گروه، دانشکده، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

مقالات داخلی



دانشگاه بوعلی سینا
مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان: بررسی خواص نیمه‌هادی لایه‌های رویین تشکیل شده روی فولادهای زنگ‌نزن

نام نویسنده: امید ایمان طلب

نام استاد راهنما: دکتر آرش فتاح الحسینی

نام استاد/اساتید مشاور:

دانشکده: مهندسی گروه آموزشی: مهندسی مواد

رشته تحصیلی: مهندسی مواد گرایش تحصیلی: شناسایی و انتخاب مواد مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۴/۱۹ تاریخ دفاع: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵ تعداد صفحات: ۱۰۰

چکیده:

در این تحقیق، رفتار الکتروشیمیایی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن و ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن (۱/۱ مولار هیدروکسید سدیم + ۰/۱ مولار هیدروکسید پتاسیم) با استفاده از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و موت - شاتکی بررسی شد. برای این منظور، لایه‌های رویین در پتانسیل مدار باز در مدت زمان‌های ۱ تا ۱۲ ساعت تشکیل و سپس آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و موت - شاتکی انجام شدند. برای انجام آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، از پتانسیل تحریک ۱۰ میلی ولت و دامنه فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز استفاده شد. منحنی‌های پلاریزاسیون نشان دادند که فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن و ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن رفتار رویین قابل قبولی را ارائه می‌دهد. نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که بهترین مدار معادل دارای دو ثابت زمانی است: ثابت زمانی اول مربوط به فرکانس‌های بالا و میانی، به فرایند انتقال بار مرتبط است در حالی که ثابت زمانی دوم مربوط به فرکانس‌های کم، به فرایندهای ردوکس که در سطح لایه اتفاق می‌افتند، مرتبط می‌شود. هم‌چنین نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آشکار ساخت که با افزایش زمان تشکیل لایه رویین از ۱ به ۱۲ ساعت، مقاومت پلاریزاسیون افزایش می‌یابد که به واسطه افزایش ضخامت لایه رویین است. آزمون‌های موت - شاتکی نشان داد که چگالی پذیرنده‌های الکترونی در محدوده 10^{21} تا 3×10^{21} بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد که با افزایش زمان غوطه‌وری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، آزمون موت - شاتکی.

فصل اول - مقدمه.....	۱
فصل دوم- مروری بر منابع.....	۳
۱-۲- کاربرد فولادها در بتن.....	۳
۲-۲- خوردگی فولادها در بتن.....	۴
۱-۲-۲- مکانیزم حمله کلر به تقویت کننده فولادی.....	۵
۲-۲-۲- مکانیزم حمله دی اکسید کربن به بتن.....	۶
۳-۲-۲- مقدار کلر بحرانی برای شروع خوردگی فولاد در بتن.....	۸
۳-۲- روش های جلوگیری از خوردگی فولادها در بتن.....	۹
۴-۲- فولادهای زنگ نزن.....	۹
۵-۲- انواع فولادهای زنگ نزن.....	۱۱
۶-۲- شناسایی فولادهای زنگ نزن.....	۱۳
۷-۲- فولادهای زنگ نزن آستنیتی سری ۳۰۰.....	۱۴
۸-۲- خواص مکانیکی میلگردهایی از جنس فولاد زنگ نزن.....	۱۸
۹-۲- قابلیت جوش پذیری میلگردهایی از جنس فولاد زنگ نزن.....	۱۹
۱۰-۲- دیگر خواص میلگردهایی از جنس فولاد زنگ نزن.....	۱۹
۱۱-۲- انواع خوردگی فولادهای زنگ نزن در بتن.....	۲۰
۱-۱۱-۲- خوردگی یکنواخت.....	۲۰
۲-۱۱-۲- خوردگی بین دانه ای.....	۲۱
۳-۱۱-۲- خوردگی توام با تنش.....	۲۲
۴-۱۱-۲- خوردگی حفره ای.....	۲۲
۱۲-۲- کاربردهای فولادهای زنگ نزن در بتن.....	۲۳
۱۳-۲- جنبه های اقتصادی.....	۲۴
۱۴-۲- تاریخچه بررسی پدیده روپین شدن.....	۲۴
۱۵-۲- روپین شدن.....	۲۵
۱۶-۲- لایه روپین.....	۲۸
۱۷-۲- مدل های ارائه شده برای روپین شدن.....	۲۹
۱-۱۷-۲- مدل مات- کابرا.....	۲۹
۲-۱۷-۲- مدل فلتر- مات.....	۳۱

۳۳	.....مدل ساتو- کوهن.....
۳۵	.....مدل عیوب نقطه‌ای.....
۳۵	.....مدل عیوب نقطه‌ای.....
۴۰	.....رفتار الکترونی سطوح فلزات و آلیاژها.....
۴۵	.....تحقیقات بر روی رفتار الکترونی لایه‌های رویین.....
۴۶	.....اهداف پژوهش.....
۴۷	.....فصل سوم- مواد و روش تحقیق.....
۴۷	.....۱-۳- الکتروود کار و آماده سازی آن.....
۴۸	.....۲-۳- سل مورد استفاده.....
۴۸	.....۳-۳- آزمون‌های پلاریزاسیون.....
۴۹	.....۴-۳- آزمون طیف سنجی امیدانس الکتروشیمیایی.....
۴۹	.....۵-۳- آزمون موت- شاتکی.....
۵۱	.....فصل چهارم- نتایج و بحث.....
۵۱	.....۱-۴- مطالعات پتانسیل مدار باز.....
۵۳	.....۲-۴- مطالعات پلاریزاسیون پتانسیودینامیک.....
۵۹	.....۳-۴- مطالعات طیف سنجی امیدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز.....
۶۴	.....۴-۴- مدل سازی طیف های امیدانس.....
۷۲	.....۵-۴- آزمون‌های موت- شاتکی.....
۸۱	.....فصل پنجم- نتیجه گیری.....
۸۳	.....مراجع.....

فهرست شکل ها

عنوان	شکل	صفحه
شکل ۱-۲- شمایی از فرایند خوردگی فولاد در بتن تحت اثر یون کلر	۵	۵
شکل ۲-۲- نمودار تعادلی آهن - کروم	۱۱	۱۱
شکل ۳-۲- نمودار تعادلی آهن - نیکل	۱۱	۱۱
شکل ۴-۲- تقسیم بندی فولادهای زنگ‌زن بر اساس ریزساختار	۱۲	۱۲
شکل ۵-۲- شمایی از تقسیم‌بندی فولادهای زنگ‌زن با توجه به پایداری فازها	۱۳	۱۳
شکل ۶-۲- ارتباط بین خواص و ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌زن آستنیتی سری ۳۰۰	۱۹	۱۹
شکل ۷-۲- نمودار نوعی پلاریزاسیون فلزاتی مانند کروم، نیکل، آهن و فلزات والو	۲۷	۲۷
شکل ۸-۲- منحنی‌های پلاریزاسیون آهن در محلول‌های بافری هیدروکسید سدیم/ اسید فسفریک در pH های مختلف	۲۸	۲۸
شکل ۹-۲- شمایی از تغییرات انرژی برای حرکت کاتیون از طریق لایه رویین با فرض این‌که وارد شدن کاتیون از فلز به داخل لایه کنترل‌کننده سرعت است	۳۲	۳۲
شکل ۱۰-۲- شمایی از مکانیزم تعویض جا برای رشد لایه رویین روی سطح فلز	۳۵	۳۵
شکل ۱۱-۲- واکنش‌های تولید و نابودی عیوب سطحی مطابق با مدل عیوب نقطه‌ای	۳۸	۳۸
شکل ۱۲-۲- مدل لایه دوگانه الکتریکی سطحی Φ : پتانسیل داخلی، σ : بار اضافی	۴۲	۴۲
شکل ۱۳-۲- نمودار موت- شاتکی برای الکتروود نوع-n و نوع-p فسفاید گالیم در محلول ۰/۰۵ مولار اسید سولفوریک	۴۶	۴۶
شکل ۱-۴- نمودار تغییرات پتانسیل مدار باز فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن تا ۱۲ ساعت	۵۲	۵۲
شکل ۲-۴- نمودار تغییرات پتانسیل مدار باز فولاد زنگ‌زن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن تا ۱۲ ساعت	۵۲	۵۲
شکل ۳-۴- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ رویش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)	۵۳	۵۳
شکل ۴-۴- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۳ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ رویش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)	۵۴	۵۴
شکل ۵-۴- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ رویش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)	۵۴	۵۴

شکل ۴-۶- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ روبش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)..... ۵۵

شکل ۴-۷- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ روبش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)..... ۵۶

شکل ۴-۸- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۳ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ روبش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)..... ۵۷

شکل ۴-۹- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ روبش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)..... ۵۷

شکل ۴-۱۰- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز (نرخ روبش برابر ۱ میلی‌ولت در ثانیه)..... ۵۸

شکل ۴-۱۱- منحنی نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۵۹

شکل ۴-۱۲- منحنی نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۳ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۰

شکل ۴-۱۳- منحنی نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۰

شکل ۴-۱۴- منحنی نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۱

شکل ۴-۱۵- منحنی‌های نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۲

شکل ۴-۱۶- منحنی‌های نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۳ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۲

شکل ۴-۱۷- منحنی‌های نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۳

شکل ۴-۱۸- منحنی‌های نایکویست فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از گذشت ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز..... ۶۳

شکل ۴-۱۹- مدار معادل رندلس برای مدل‌سازی لایه رویین تشکیل شده روی فولادهای زنگ‌نزن..... ۶۴

شکل ۴-۲۰- دومین مدار معادل برای مدل‌سازی لایه رویین تشکیل شده روی فولادهای زنگ‌نزن ۶۴

شکل ۴-۲۱- منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴-۲۰ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۶۶

شکل ۴-۲۲- منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴-۲۰ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۶۶

شکل ۴-۲۳- سومین مدار معادل برای مدل‌سازی لایه رویین تشکیل شده روی فولادهای زنگ‌نزن ۶۷

شکل ۴-۲۴- منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴-۲۳ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۶۷

شکل ۴-۲۵- منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴-۲۳ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۶۸

شکل ۴-۲۶- چهارمین مدار معادل برای مدل‌سازی لایه رویین تشکیل شده روی فولادهای زنگ‌نزن ۶۹

شکل ۴-۲۷- منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴-۲۶ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۷۰

شکل ۴-۲۸- منحنی نایکویست و مدل‌سازی شده با استفاده از مدار معادل شکل ۴-۲۶ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۷۰

شکل ۴-۲۹- تاثیر زمان تشکیل لایه رویین بر مقاومت پلاریزاسیون فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن و ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۷۲

شکل ۴-۳۰- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۷۳

شکل ۴-۳۱- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۳ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز ۷۳

شکل ۴-۳۲- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز.....۷۴

شکل ۴-۳۳- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز.....۷۴

شکل ۴-۳۴- مقادیر چگالی پذیرنده‌های الکترونی محاسبه شده برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول شبیه‌سازی بتن.....۷۵

شکل ۴-۳۵- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز.....۷۶

شکل ۴-۳۶- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۳ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز.....۷۶

شکل ۴-۳۷- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۶ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز.....۷۷

شکل ۴-۳۸- منحنی موت- شاتکی لایه رویین تشکیل شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن بعد از ۱۲ ساعت غوطه‌وری تحت شرایط پتانسیل مدار باز.....۷۷

شکل ۴-۳۹- مقادیر چگالی پذیرنده‌های الکترونی محاسبه شده برای لایه رویین فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن.....۷۸

فصل اول

مقدمه

در بین انواع فولادهای زنگ‌نزن، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی متداول‌ترین نوع هستند. این نوع فولادهای زنگ‌نزن به‌طور کلی غیرمغناطیسی بوده و قابلیت سخت‌شدن به‌وسیله عملیات حرارتی را ندارند. استحکام این نوع فولادها را مانند فولادهای فریتی تنها با کار سرد می‌توان افزایش داد. به‌طور کلی، کروم عنصر آلیاژی اصلی در فولادهای زنگ‌نزن است و فولاد بایستی حداقل ۱۱ تا ۱۲ درصد کروم داشته باشد. کروم عنصر فعالی است ولی این عنصر و آلیاژهای آن در بسیاری از محیط‌ها غیرفعال شده و مقاومت عالی از نظر خوردگی از خود نشان می‌دهند. در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی کروم- نیکل‌دار، عنصر نیکل به‌عنوان عامل اصلی پایدار کننده آستنیت است [۱ و ۲].

فولادهای زنگ‌زن آستنیتی کروم- نیکل دار دارای مقاومت بهتری نسبت به انواع بدون نیکل هستند و به‌طور معمول دارای بالاترین مقاومت خوردگی نسبت به گروه‌های دیگر می‌باشند. به‌همین دلیل این فولادها به‌طور وسیعی برای شرایط حادثه خوردگی به‌کار برده می‌شوند. در میان فولادهای زنگ‌زن آستنیتی انواع ۳۰۴، ۳۰۴ کم کربن، ۳۱۶، ۳۱۶ کم کربن و ۳۲۱ به‌عنوان آلیاژ همه‌فن حریف^۱ برای صنایع شیمیایی هستند و باید توجه داشت که انواع مولیبدن‌دار مانند ۳۱۶، ۳۱۶ کم کربن و ۳۲۱ در بسیاری از کاربردها بهتر از ۳۰۴ و ۳۰۴ کم کربن رفتار می‌کنند [۲].

به‌دلیل اهمیت پدیده رویین شدن^۲ و لایه رویین^۳ تشکیل شده در انواع فولادهای زنگ‌زن در برابر خوردگی، در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای روشن کردن مکانیزم‌های رشد لایه‌های رویین و رفتار الکتروشیمیایی آن‌ها انجام شده است. هم‌چنین با این‌که رویین شدن نرخ خوردگی فولادهای زنگ‌زن را بسیار کاهش می‌دهد ولی نمی‌تواند از خوردگی کامل جلوگیری کند زیرا سطوح رویین شده مستعد به انواع خوردگی موضعی هستند.

هدف از این تحقیق مطالعه رفتار الکتروشیمیایی فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ کم کربن و ۳۲۱ در محلول شبیه‌سازی بتن (۰/۱ مولار هیدروکسید سدیم + ۰/۱ مولار هیدروکسید پتاسیم) در پتانسیل مدار باز با انجام آزمون‌های آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک^۴، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۵ و موت-شاتکی^۶ است. در این رابطه از مدل‌سازی رفتار لایه رویین و فصل مشترک‌ها با مدار معادل الکتریکی و تاثیر زمان تشکیل لایه بر المان‌های مدار معادل استفاده شد.

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است که فصل اول به مقدمه اختصاص داده شده است. در فصل دوم ضمن بررسی بتن و ماهیت آن، کاربرد فولادها و خوردگی آن‌ها نیز بررسی شده است. سپس فولادهای زنگ‌زن و پدیده رویین شدن، تحقیقات انجام شده در این زمینه و مدل‌های ارائه شده جمع‌آوری شده است. هم‌چنین به‌علت اهمیت آزمون‌های موت-شاتکی، توضیحات مختصری در مورد این روش نیز ارائه شده است. در فصل سوم به روش انجام تحقیق و جزییات آزمایش‌های مختلف پرداخته شده است. در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و موت-شاتکی و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. و در نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری بیان شده است.

¹ Workhorse

² Passivity

³ Passive Film

⁴ Potentiodynamic Polarization

⁵ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

⁶ Mott-Schottky

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱- کاربرد فولادها در بتن

طی دهه‌های اخیر خوردگی میلگرد در بتن مسلح، یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش دهنده عمر سازه‌های مذکور بوده است. در واقع به دلیل مقاومت کششی اندک بتن، لازم است که آن را به طریقی در برابر بارگذاری کششی تقویت نمود. استفاده از میلگردهای فولادی راه حلی است که طی سالیان متمادی برای رفع این مشکل به کار رفته است.

pH محیط بتن تازه به دلیل وجود مقادیر بسیاری از هیدروکسید کلسیم و مقادیر به نسبت کمتری از عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم بین ۱۲ تا ۱۳ می‌باشد. وجود این محیط قلیایی باعث ایجاد یک لایه نازک اکسید روی سطح میلگرد می‌شود. این لایه در محیط به شدت قلیایی بتن تازه پایدار بوده و میلگرد را در برابر خوردگی محافظت می‌کند [۳-۵].

اگر pH محیط بیش تر از ۱۰ باشد، میلگرد از لحاظ شیمیایی غیرفعال مانده و در معرض خوردگی قرار نمی گیرد. مشکل اساسی زمانی آغاز می شود که pH محیط کاهش یابد یعنی قلیایی بودن بتن از بین رود. کاهش pH محیط می تواند به دلایل متفاوتی صورت پذیرد که مهم ترین دلیل تحقق این امر مربوط به نفوذ یک سری عناصر شیمیایی خاص به داخل بتن است. در این میان، موارد زیر دارای بیش ترین اهمیت هستند [۳-۵]:

۱- دی اکسید کربن موجود در اتمسفر

۲- دی اکسید گوگرد موجود در محیط های صنعتی

۳- یون های کلر موجود در محیط های دریایی

۴- املاح نمک (که به طور معمول در اثر یخ زدایی جاده ها و پل ها روی سازه های بتنی انباشته می شود) ورود هر یک از عوامل فوق به داخل بتن باعث انجام واکنش شیمیایی و کاهش pH بتن می شود. در اغلب موارد این عوامل از حفره های موجود در سطح بتن وارد ساختار سازه می شوند.

در محیط هایی که امکان ورود چنین عواملی وجود دارد، غلظت آن ها افزایش یافته و در نهایت به آستانه ای می رسد که لایه محافظ تخریب می شود و در نتیجه فولاد شروع به خورده شدن می کند. شواهدی حاکی از این امر وجود دارد که آستانه خوردگی در بتن به نوع سیمان مصرف شده و ترکیبات آن بستگی دارد. علاوه بر این، نوع ماده خورنده غالب نیز به جغرافیای محل استفاده بتن بستگی دارد. خوردگی باعث کاهش سطح مقطع مفید میلگرد شده و می تواند ناپیوستگی های مقطعی ایجاد کرده و مقاومت کششی و مقاومت در برابر تنش های خستگی را کاهش دهد. در سازه های بتن مسلح، در اثر خوردگی میلگرد اضافه حجمی تا چند برابر حجم فولاد اولیه ایجاد می شود. تنش های ناشی از نیروهای مولکولی حاصل از این اضافه حجم منجر به ترک خوردگی و در نهایت تخریب کامل سازه بتنی می شود. ترک های ایجاد شده راه را برای نفوذ آب، اکسیژن و یون های کلر باز می نمایند و این باعث تسریع در خوردگی می شود. بنابراین محصولات خوردگی بیش تری تشکیل شده و تنش های بیش تری به وجود می آید. تنش های بیش تر باعث ایجاد ترک های بیش تر می شود. چرخه به وجود آمده تا جایی که فاجعه تخریب بتن به طور کامل اتفاق افتد، ادامه پیدا می کند.

۲-۲- خوردگی فولادها در بتن

به طور کلی خوردگی شامل واکنش های آندی و کاتدی است و برای وقوع آن، هدایت کننده الکتریکی (میلگرد) و الکترولیت (رطوبت) لازم است. آند و کاتد در بتن تقویت شده می تواند در یک میلگرد یا در دو میلگرد مجزا باشد. رطوبت بتن یک مسیر الکترولیتی را برای انتقال الکترون از آند به کاتد فراهم می آورد. میلگرد هدایت کننده الکتریکی است که سل خوردگی را تکمیل می کند. خوردگی فولاد مسلح کننده در محیط قلیایی بتن شامل واکنش های آندی و کاتدی است که منجر به ایجاد حالت مقاوم در میلگرد

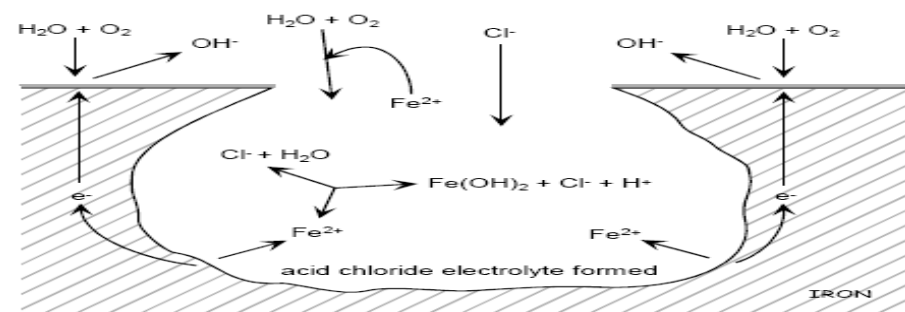
می‌شود. واکنش آندی شامل اکسید شدن آهن و تولید اکسید فرو (واکنش ۱-۲) یا اکسید فریک (واکنش ۲-۲) است و واکنش کاتدی شامل احیا شدن اکسیژن (واکنش ۳-۲) می‌باشد که در نتیجه آن یون هیدروکسیل تولید می‌شود [۶].



۱-۲-۲- مکانیزم حمله کلر به تقویت کننده فولادی

در شکل ۱-۲ شمایی از فرآیند خوردگی فولاد در حضور یون کلر در بتن نشان داده شده است

[۷ و ۸].



شکل ۱-۲- شمایی از فرآیند خوردگی فولاد در بتن تحت اثر یون کلر [۷ و ۸].

سه نظریه درباره تاثیر یون کلر روی تقویت کننده فولادی وجود دارد [۸]:

(الف) نظریه لایه اکسید: این نظریه بیان گر این مطلب است که لایه پایدار اکسید در حفاظت تقویت کننده در برابر خوردگی نقش دارد و فرض می‌کند که یون‌های کلر نسبت به یون‌های دیگر مثل سولفات راحت‌تر در این لایه نفوذ می‌کنند. در نتیجه یون‌های کلر ممکن است موجب کلویدی شدن لایه اکسید و پراکنده شدن آن شوند و در نتیجه خوردگی راحت‌تر رخ می‌دهد.

(ب) نظریه جذب: بر اساس این نظریه یون‌های کلر در رقابت با اکسیژن محلول و یون‌های هیدروکسیل روی میلگرد جذب می‌شوند و هیدراتاسیون یون‌های آهن را گسترش می‌دهند، بنابراین خوردگی تقویت کننده را تسهیل می‌کنند.

(ج) نظریه کمپلکس ناپایدار: بر پایه این نظریه یون‌های کلر با جایگزینی به جای یون‌های هیدروکسیل در تشکیل لایه مقاوم شرکت می‌کنند، که در نتیجه آن هدایت‌پذیری و حلالیت افزایش

یافته و بنابراین لایه مقاوم خاصیت حفاظتی خود را از دست می‌دهد که مطابق با واکنش‌ها ۴-۲ و ۵-۲ است [۸]:



که در آن x از ۲ تا ۳ می‌باشد (بر پایه حالت اکسیداسیون آهن). مصرف یون‌های کلر در معادله ۴-۲ با معادله ۵-۲ و با آزاد کردن یون‌های کلر به تعادل می‌رسد. حضور یون‌های کلر موجب تسریع در از بین رفتن لایه اکسید آهن پایدار می‌شوند و این زنجیره واکنش‌ها به دلیل حلالیت FeCl_x همچنان ادامه پیدا می‌کند. تولید بسیار زیاد آن موجب افزایش از بین رفتن لایه اکسید مقاوم می‌شود. توزیع غیریکنواخت یون‌های کلر در سطح تقویت کننده و ضعف لایه اکسید آهن پایدار موجب می‌شود تا کلر بتواند به راحتی این لایه را به صورت موضعی از بین برده و خوردگی را تسریع نماید [۸].

آند، ناحیه‌ای است که در آن آهن می‌تواند به آسانی در یک پتانسیل به نسبت کم در الکترولیت حل شود. ناحیه غیرفعال باقی مانده به عنوان کاتد عمل می‌کند که در آن احیای اکسیژن در پتانسیل بالاتر رخ می‌دهد. افزایش حجم اکسیدهای آهن هنگامی که به اکسید بالاتر تبدیل می‌شوند، مهم‌ترین عامل ترک خوردگی بتن است. حجم اکسیدهای آهن هیدراته شده می‌تواند از شش تا هفت برابر بزرگ‌تر از آهن در شرایط عادی باشد [۸].

یون کلر در داخل بتن پس از نفوذ به دو صورت کلر آزاد و یا کلر پیوندی می‌تواند وجود داشته باشد. کلر آزاد در آب حفره‌ای بتن محلول می‌ماند. در حالی که کلر پیوندی می‌تواند به دو صورت فیزیکی و شیمیایی با دیگر ذرات داخل بتن پیوند داشته باشد [۹].

۲-۲-۲- مکانیزم حمله دی اکسید کربن به بتن

کربناتاسیون به خنثی شدن یا کاهش قلیائیت بتن در نتیجه واکنش با دی اکسید کربن، گفته می‌شود. در این عمل گاز دی اکسید کربن موجود در هوا یا محلول در آب (اسید کربنیک) با هیدروکسید کلسیم خمیر سیمان واکنش داده و تولید کربنات کلسیم می‌نماید. عمق کربناتاسیون در بتن با کیفیت مناسب پس از چندین سال بیش از ۱/۲۵ میلی‌متر نمی‌باشد. با این وجود در بتن‌های با کیفیت کم و متخلخل، کربناتاسیون می‌تواند موجب خوردگی میلگرد شده و در نتیجه به ترک خوردگی و پوسته شدن بتن بیانجامد. عوامل متعددی بر آهنگ کربناتاسیون موثر می‌باشند که عبارتند از: حجم حفره‌ها، مقاومت بتن، در معرض رطوبت بودن یا سیکل‌های متناوب تر و خشک شدن و اختلاف دمایی دو طرف بتن. به‌طور معمول زمانی که کربناتاسیون اصلی‌ترین عامل تخریب باشد، به‌طور متناوب رسوبات سفید رنگی در اطراف سنگ‌دانه‌ها و در سطوح داخلی ترک‌ها مشاهده می‌شود. فعل و انفعالات مهم شیمیایی مربوط به کربناتاسیون مطابق با واکنش‌های ۶-۲ و ۷-۲ می‌باشد [۱۰]:



مقدار دی اکسید کربن مورد نیاز به منظور کاهش pH بتن به مقدار محصولات قلیایی هیدراتاسیون یعنی به موارد ذیل بستگی دارد [۱۱]:

- ترکیبات سیمان (نوع سیمان)

- مقدار سیمان در هر متر مکعب بتن

مقدار دی اکسید کربنی که در واحد زمان به داخل بتن نفوذ می کند، بستگی به نفوذپذیری بتن

نسبت به گاز دی اکسید کربن دارد که به چهار عامل اصلی زیر بستگی دارد [۱۱]:

۱- ترکیب بتن

۲- تراکم بتن

۳- شرایط عمل آوری بتن

۴- شرایط محیطی بتن

در شرایطی که رطوبت نسبی محیط ثابت باشد، می توان آهنگ کربناتاسیون را با میزان رطوبت محیط مرتبط کرد. عمق کربناتاسیون در سازه هایی که در معرض تر و خشک شدن متناوب هستند، ممکن است کم تر باشد [۱۲].

در بتن هایی که مصالح آن آلوده به یون کلر می باشند، کربناتاسیون باعث کاهش pH محیط و انحلال فازهای جامد حاوی یون کلر مقید در محلول حفره ای و در نتیجه آزاد شدن کلر و ایجاد کلر آزاد می شود. کلر آزاد شده می تواند وارد قسمت های کربناته نشده بتن شود که این پدیده موجب افزایش میزان کلر آزاد در ضخامت پوشش بتنی روی تقویت کننده شده و ممکن است کلر را در سطح میلگرد به مقدار بحرانی برساند. بنابراین سازه های حاوی یون کلر که کربناتاسیون در آن ها رخ داده است، نسبت به سازه هایی که فقط از یک معضل رنج می برند، بیش تر در معرض خوردگی قرار دارند [۷ و ۱۳].

بونفلد^۱ و گلاس^۲ نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده اند که کلر پیوندی می تواند در شروع خوردگی نقش ایفا کند. به طوری که قسمت بیش تر کلر پیوندی با کاهش pH به مقادیر کم تر از ۱۲ آزاد می شود [۷ و ۱۳].

۲-۳- مقدار کلر بحرانی برای شروع خوردگی فولاد در بتن

کلر بحرانی دارای تعاریف مختلفی است که چگونگی از بین رفتن حالت مقاوم فولاد در بتن را شرح می دهد. برخی از محققین بر این عقیده اند که حالت مقاوم زمانی از بین می رود که تغییر در پتانسیل

^۱Buenfeld

^۲Glass

میلگرد رخ دهد [۱۴]. برخی دیگر مشاهده ظاهری را به کار برده و بر این عقیده‌اند که حالت مقاوم زمانی از بین می‌رود که لکه‌های خوردگی بر روی میلگرد ظاهر شود. سرانجام، دیگر محققین رسیدن جریان خوردگی به مقداری مشخص را نشانه از بین رفتن لایه مقاوم فرض می‌کنند [۱۵-۱۷]. عوامل زیادی، از جمله موارد زیر، مقدار کلر بحرانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۷]:

افزودنی‌های شیمیایی و معدنی، میزان رطوبت موجود (باتوجه به محل قرارگیری)، شرایط اتمسفری (دما و مقدار رطوبت هوا)، pH محلول حفره‌ای، میزان اکسیژن، نوع کاتیون‌های همراه کلر، شرایط سطحی، ترکیبات میلگرد و ریز ساختار آن. تمامی عوامل مذکور بر رفتار لایه پایدار و غیرفعال ایجاد شده بر روی فولاد موثر بوده و در واقع پتانسیل الکتریکی میلگرد را تعیین می‌نماید [۱۸].

تلفیقی از عوامل موثر باعث می‌شود تا یک مقدار ثابت برای کلر بحرانی وجود نداشته و کلر بحرانی تابعی از مشخصه‌های اجزای بتن و شرایط محیطی اطراف آن باشد. عامل اصلی قلیائیت بتن، حضور یون‌های هیدروکسیل است که موجب حفظ و گسترش لایه مقاوم روی تقویت کننده می‌شود. اثر مثبت یون‌های هیدروکسیل باید همراه با اثر منفی یون‌های کلر روی لایه مقاوم دیده شود. بنابراین به‌جای در نظر گرفتن مقدار یون‌های کلر یا یون‌های هیدروکسیل به‌عنوان معیاری برای از بین رفتن لایه مقاوم، نسبت یون کلر به هیدروکسیل در نظر گرفته می‌شود [۱۹].

کاهش نسبت آب به سیمان موجب افزایش مقدار کلر محیط می‌شود [۷] در حالی که وجود حفره‌های هوای تصادفی در سطح مشترک فولاد و بتن موجب کاهش مقدار کلر بحرانی می‌شود، چون مقدار هیدروکسید کلسیم و در نتیجه مقدار pH در این مناطق کمتر است. تجربه‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با کاهش مقدار حفرات هوای تصادفی در سطح مشترک فولاد و بتن از ۱/۵ درصد به ۰/۲ درصد حجمی بتن، مقدار کلر بحرانی از ۰/۲ درصد به ۲ درصد وزنی سیمان افزایش می‌یابد [۲۰ و ۲۱].

مطالعات نشان داده‌اند که شرایط سطحی میلگرد روی مقدار کلر بحرانی بسیار تاثیرگذار بوده و در برخی از انواع میلگردها (ASTM A605) وجود پوسته ناشی از نورد گرم موجب بهبود شرایط سطحی و افزایش مقدار کلر بحرانی می‌شود، در حالی که در برخی دیگر از میلگردها (ASTM A706) حذف پوسته ناشی از نورد گرم موجب می‌شود تا مقدار کلر بحرانی افزایش یابد [۱۸]. هم‌چنین در صورت وجود لایه‌های اکسید روی میلگرد قبل از قرار گرفتن در بتن مقدار کلر بحرانی افزایش می‌یابد [۲۱]. میزان کلر بحرانی یکی از عوامل مورد نیاز برای پیش‌بینی طول عمر سرویس‌دهی سازه‌های بتنی است.

۲-۳- روش‌های جلوگیری از خوردگی فولادها در بتن

همان‌طور که گفته شد، فولاد موجود در بتن، به‌طور معمول توسط رویین شدن ناشی از محلول نفوذی به‌شدت قلیایی بتن، در برابر خوردگی محافظت می‌شود. لایه اکسیدی پایدار، روی سطح فولاد

تشکیل شده و از انحلال آندی آهن جلوگیری می‌کند. از بین رفتن دوام بتن، تنها هنگامی اتفاق می‌افتد که لایه اکسیدی پایدار، به سبب وارد شدن یون کلر در فصل مشترک بتن و فولاد یا کربناتاسیون بتن که کاهنده شدت قلیایی محلول نفوذی در چسب سیمان سخت شده در اطراف فولاد است، غیرپایدار (از بین رفتن لایه رویین) شود. بنابراین برای دوام بتن مسلح، باید طراحی مقاومت در برابر کربن و حذف یون کلر از هر منبع صورت گیرد. میلگرد فولادی باید در بتن مشخص شده مطابق با استانداردهای کنونی تعبیه شود. چگونگی اختلاط و حداقل پوشش باید به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرد و برای خوردگی محیط مناسب باشد. با این حال شواهد قابل توجهی وجود دارد که برخی از شرایط برآورده نشده و موجب نابودی فولاد و بتن به سبب طراحی نامناسب یا کاربرد در مکان غیرصحیح شده است. یک‌سری شرایط محیطی وجود دارند که بدون اقدامات حفاظت در برابر خوردگی، تعیین عمر طراحی را مشکل می‌سازد. در این میان عوامل زیر می‌توانند مشکلات را افزایش دهند [۲۲]:

- ساختار در معرض غلظت بالایی از یون کلر قرار گیرد مانند سازه‌های دریایی

- پوشش بتن و کیفیت بتن نامناسب باشد

- طراحی بتن‌های سبک وزن متراکم و غیرمتراکم برای رسیدن به عایق حرارتی کم وزن

- ساختارهایی که به‌شدت محدود شده مانند سازه‌های زیر زمینی مدفون در خاک.

در چنین مواردی، ممکن است طراحان برای کاهش نفوذپذیری، بهسازی مخلوط بتن را در نظر گیرند. به‌علاوه اقدامات حفاظت از خوردگی، از قبیل پوشش‌دهی و عملیات سطحی، ورود کلر به بتن را محدود می‌کند. استفاده از بتن‌های ضد آب و استفاده از مواد محافظت شده از خوردگی و موادی که مقاومت به خوردگی بیشتری برای بتن مسلح دارند (به‌طور مثال گالوانیزه کردن فولاد یا فولاد زنگ‌نزن)، استفاده از ممانعت‌کننده‌ها برای سالم نگه‌داشتن بتن و حفاظت کاتدی به‌وسیله تاثیر جریان ممکن است هرکدام یک روش موثر و اقتصادی باشند [۲۱-۲۳].

۲-۴- فولادهای زنگ‌نزن

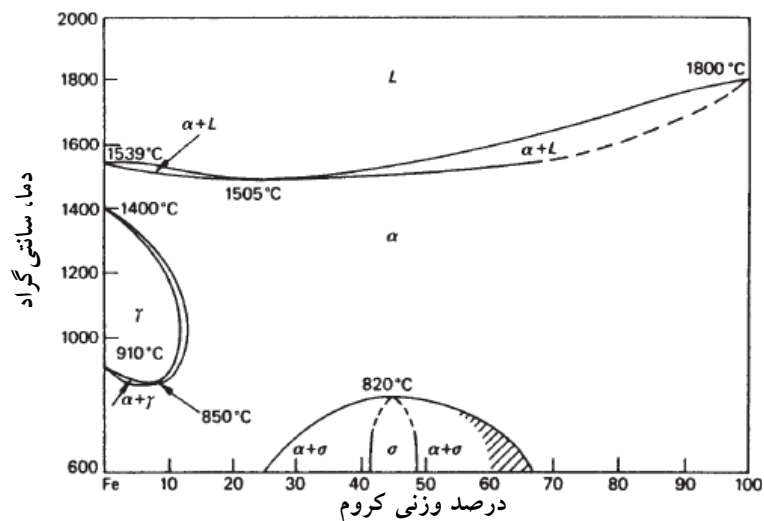
دلیل اصلی وجود فولادهای زنگ‌نزن که در حدود یک قرن پیش توسط مونارتز^۱ اختراع شدند، مقاومت بالای آن‌ها در برابر خوردگی است. تحقیقات نشان می‌دهد که امروزه استفاده از این فولادها به‌طور متوسط در حدود ۵ درصد در سال رشد دارد [۲۴].

فولادهای زنگ‌نزن کم‌تر از ۲ درصد مقدار کلی فولاد تولیدی در ایالات متحده است، اما به‌دلیل این‌که از این نوع فولادها برای تجهیزات مقاوم به خوردگی در بیش‌تر صنایع، به‌خصوص در صنایع شیمیایی، نفت، گاز و پتروشیمی استفاده می‌شود، اهمیت اقتصادی و فن‌آوری زیادی دارند [۲۴].

^۱ Monnartz

فولادهای زنگ‌نزن، آلیاژهای آهن شامل حداقل ۱۱ درصد کروم به صورت محلول جامد هستند. این مقدار از کروم، از تشکیل اکسید آهن در اتمسفرهای معمول جلوگیری می‌کند. مقاومت به خوردگی این فولادها با یک لایه سطحی بسیار نازک فراهم می‌شود که در بیش‌تر محیط‌ها خود ترمیم‌کننده است. در برخی فولادهای زنگ‌نزن، میزان کروم به ۳۰ درصد وزنی نیز می‌رسد و تعداد دیگری عناصر آلیاژی برای ایجاد خواص ویژه یا راحتی تولید اضافه می‌شوند. برای مثال عناصر نیکل، نیتروژن و مولیبدن برای بهبود مقاومت به خوردگی، عناصر کربن، مولیبدن، نیتروژن، تیتانیوم، آلومینیوم و مس برای افزایش استحکام، عناصر گوگرد و سلنیم برای قابلیت ماشین‌کاری و در نهایت نیکل برای قابلیت شکل‌پذیری و چقرمگی اضافه می‌شوند [۲۴].

همان‌طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، کروم پایدار کننده فاز فریت (با شبکه مکعبی مرکزدار) است و با افزایش مقدار کروم، نواحی پایداری فریت دلتا^۱ و فریت آلفا^۲ گسترش می‌یابند و ناحیه پایداری آستنیت محدود می‌شود [۲۴].

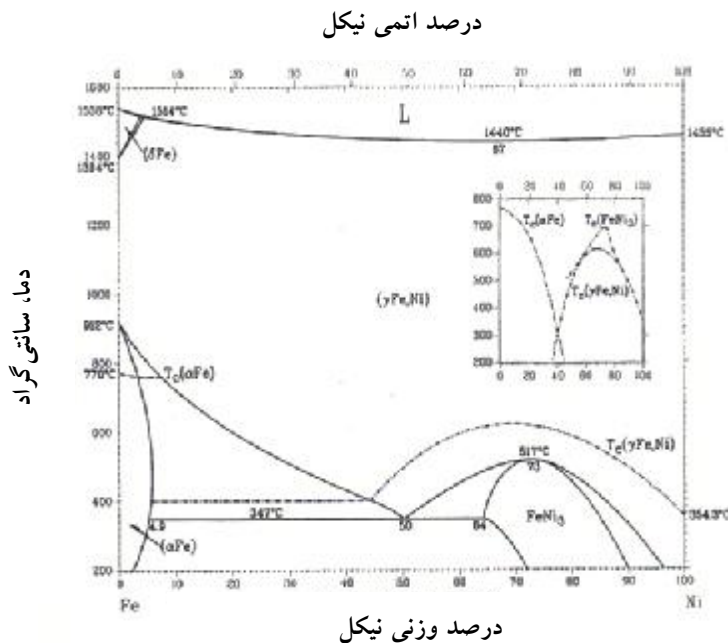


شکل ۲-۲- نمودار تعادلی آهن - کروم [۲۴].

نیکل عنصر آلیاژی دیگری است که پس از کروم بیش‌ترین اثر را روی برخی فولادهای زنگ‌نزن دارد. افزودن نیکل به آهن، موجب پایداری آهن با شبکه بلوری مکعب با وجوه مرکزدار می‌شود. با توجه به

¹ Delta Ferrite
² Alpha Ferrite

نمودار تعادلی آهن- نیکل در شکل ۲-۳، با وجود مقدار کافی نیکل، آستنیت در تمام دماهای بالاتر از دمای اتاق پایدار است [۲۴].



شکل ۲-۳- نمودار تعادلی آهن- نیکل [۲۴].

در آلیاژهای دوتایی آهن- نیکل، به منظور پایداری کامل آستنیت، در حدود ۳۰ درصد نیکل لازم است. علت این امر نفوذ آهسته آهن و نیکل در دمای اتاق است که امکان تشکیل مخلوطی از آستنیت و فریت را نمی‌دهد. با این حال، اگر کروم در حد مورد نیاز برای تشکیل فولاد زنگ‌نزن وجود داشته باشد، مقدار به مراتب کم‌تری نیکل برای پایداری آستنیت نیاز است [۲۴].

۲-۵- انواع فولادهای زنگ‌نزن

امروزه بیش از ۱۸۰ نوع فولاد زنگ‌نزن وجود دارد و هر ساله انواع جدیدتر تولید می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است فولادهای زنگ‌نزن بر اساس ریزساختار به چهار دسته اصلی آستنیتی^۱، فریتی^۲، دوفازی^۳ (آستنیتی- فریتی) و مارتنزیتی^۱ تقسیم می‌شوند که در این میان، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی متداول‌ترین نوع هستند [۲۴].

¹ Austenitic

² Ferritic

³ Duplex