

## تأثیر نیتروژن بر ریزساختار و خواص مکانیکی و خوردگی فولادهای زنگ نزن آستنیتی بدون نیکل\*

سید محسن صالحی<sup>(۱)</sup> شهرام خیراندیش<sup>(۲)</sup> سید مهدی عباسی<sup>(۳)</sup>

### چکیده

مقادیر متفاوتی از نیتروژن به فولادهای زنگ نزن آستنیتی بدون نیکل پر منگنز به کمک فروآلیاژ نیترییدی اضافه شد. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری، خواص مکانیکی توسط سختی سنجی و کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین خواص خوردگی توسط طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون بررسی شد. نتایج نشان داد که فولاد پر نیتروژن و کم نیتروژن به ترتیب دارای ساختار آستنیتی و آستنیت + فریت است. افزایش نیتروژن باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی و سختی می شود. علاوه بر این، افزایش نیتروژن باعث کاهش چگالی جریان و جابجایی پتانسیل خوردگی به مقادیر مثبت تر می شود. **واژه‌های کلیدی** فولادهای زنگ نزن آستنیتی، نیتروژن، خواص مکانیکی، خوردگی.

## Effects of Nitrogen on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior in Nickel-Free Austenitic Stainless Steels

S. M. Salehi SH. Kheirandish S. M. Abbasi

### Abstract

Different amounts of nitrogen were added to nickel-free high manganese austenitic stainless steels with addition of a nitrided ferroalloy. The microstructure was evaluated by optical microscopy and the mechanical properties were determined by macro-hardness and tensile tests. The corrosion behavior was evaluated by electrochemical impedance spectroscopy and polarization. The results showed that the microstructure of high nitrogen and low nitrogen steels were austenite and ferrite and austenite, respectively. The hardness, yield strength and ultimate tensile strength of the steels increased with increasing nitrogen content. In addition, corrosion current densities decreased and corrosion potentials shifted to more positive values with increasing nitrogen content.

**Key Words** Austenitic Stainless Steels; Nitrogen; Mechanical properties; Corrosion.

\* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۴/۱/۲۳ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۴/۱۱/۴ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Email: s\_ms5@yahoo.com

(۲) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) دانشیار، مرکز مواد فلزی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

استحکام بدون تأثیر زیاد در چقرمگی، بهبود خواص خوردگی، افزایش استحکام کششی در دماهای بالا و کاهش تمایل به تشکیل مارتنزیت تحت اعمال کار سرد [14-10].

به منظور پیش بینی ریزساختار فولاد، می توان از روابط (۱) و (۲) مقدار کروم و نیکل معادل را محاسبه نمود؛ سپس با قرار دادن آن در نمودار شفلر که در شکل (۱) قابل مشاهده است، می توان ریزساختار فولاد را پیش بینی نمود [10]:

$$Ni_{eq} = Ni + Co + 0.05Mn + 0.3Cu + 2.0N + 3.0C \quad (1)$$

$$Cr_{eq} = Cr + 2Si + 1.0Mo + 0.5V + 0.5Al + 1.75Ti + 0.75W \quad (2)$$

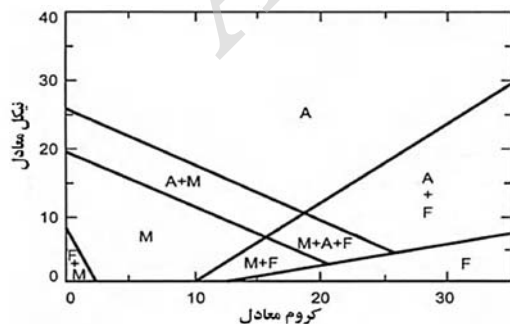
کمترین میزان نیتروژن حل شده در فولاد برای دستیابی به ساختار تماماً آستنیتی از معادله (۳) پیروی می کند [9]:

$$[\%N]_{min} = -0.88(wt\%/C) + 0.46(wt\%/Cr) - 0.009 \quad (3)$$

$$(wt\%/Mn) + 0.38(wt\%/Mo) - 0.53(wt\%/Si) + 0.82$$

$$(wt\%/Ni) - 0.28(wt\%/Cu) - 0.32(wt\%/W) - 0.278$$

اخیراً تحقیقات زیادی بر روی فولادهای پزشکی انجام شده است. یکی از این فولادها آلیاژ P558 است [11]. این فولاد حاوی مقادیری از منگنز (۱۰ درصد) و نیتروژن (۰/۵ درصد وزنی) و مقدار کمی نیکل (کمتر از ۰/۲ درصد وزنی) است. این فولاد استحکام و سختی بالایی را در حالت آنیل شده دارد [11].



شکل ۱ تغییر مکان خطوط نمودار شفلر نسبت به نمودار مرسوم [۲۴]

## مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی دسته وسیعی از فولادها هستند که بیشتر برای مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته اند. شکل پذیری عالی، چقرمگی خوب در دمای اتاق و دمای پایین، مقاومت در برابر پوسته شدن، مقاومت در برابر اکسایش و خزش در دمای بالا از جمله ویژگی های این فولادها است [1، 2]. این ویژگی ها در کنار دارا بودن خاصیت پارامغناطیس در این دسته از فولادهای زنگ نزن آستنیتی، سبب شده این فولادها در حوزه پزشکی و به عنوان مواد کاشتنی مورد استفاده قرار می گیرند [3]. مناسب ترین ریزساختار برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی ریزساختاری است که شامل فقط آستنیت باشد و فاقد هرگونه ترکیبات میانی یا فریت و مارتنزیت باشد [4]. از جمله عناصر پایدارکننده فاز آستنیت، نیکل و نیتروژن است. اضافه کردن این دو عنصر موجب گسترش حلقه گاما می شود [2].

فولادهای زنگ نزن حاوی نیکل باعث ایجاد حساسیت، تورم و یا بیماری در انسان می شود [5]. این فولادها وقتی در معرض خوردگی قرار می گیرند، دوز بالایی از محصولات خوردگی (شامل یون نیکل) را تولید می کنند که این یون با بدن در تماس قرار می گیرد. این محصولات می توانند باعث تضعیف سلول هایی بشوند که در مکانیزمهای دفاع در برابر عفونت نقش دارند و همچنین باعث کاهش سرعت واکنش های ترمیمی بافت های بدن گردند [6]. بر طبق مطالعات مینزل میزان نیکل در تجهیزات پزشکی باید کمتر از ۰/۲ درصد جرمی و برای استفاده از این فولاد در داخل بدن و بخش های حساس کمتر از ۰/۰۵ درصد باشد [7، 8]. به همین دلیل از نیتروژن به عنوان عنصر جایگزین نیکل استفاده می شود. نیتروژن به عنوان عنصر پایدار کننده قوی فاز آستنیت شناخته می شود. در تحقیقاتی نشان داده شده است [9] که قدرت پایدارکنندگی ۰/۰۵ درصد وزنی نیتروژن، معادل یک درصد وزنی نیکل است. نیتروژن باعث بهبود خواص فولادهای آستنیتی می شود که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود: افزایش قابل توجه در

مناسب، آلیاژهای کار شده تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت قرار گرفت و به منظور عدم تشکیل فازهای ثانویه، نمونه‌ها در آب کوئنچ شدند [۱۳]. ابتدا نمونه‌ها توسط محلول گلیسرول (شامل ۱۵ میلی لیتر هیدروکلرید اسید، ۵ میلی لیتر نیتریک اسید و ۱۰ میلی لیتر گلیسرول) اچ شده و سپس ریزساختار آن‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت و توسط نرم‌افزار Clemex اندازه دانه محاسبه شد.

نمونه‌های کشش طبق استاندارد ASTM E8 تهیه شد و توسط دستگاه کشش Instron 8512 با سرعت ۲ میلیمتر بر دقیقه و با دقت ۰/۱ نیوتن تحت آزمایش قرار گرفت. سختی نمونه‌ها نیز به وسیله روش سختی سنجی ویکرز با بار ۳۰ کیلوگرم نیرو اندازه‌گیری شد.

جهت بررسی فازی نمونه‌ها از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده گردید. آنالیز پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌ها در حالت پولیش شده انجام گردید. آنالیز پراش اشعه ایکس با استفاده از دستگاه X'Pert Pro MPD PANalytical با لامپ Cuka و در ولتاژ ۴۰ کیلوولت انجام شد. آنالیزها در محدوده زاویه‌ای ۲۰θ تا ۱۲۰ درجه با اندازه گام ۰/۰۲۶ درجه انجام شد. جهت آنالیز داده‌های پراش اشعه ایکس از نرم‌افزار X'Pert HighScore استفاده شد.

از دستگاه پتانسیوآستات-گالوانواستات IVIUMSTAT جهت اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی به دو روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون استفاده شد. آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس ۱۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز و آزمایش پلاریزاسیون در محدوده ۲۵۰- میلی‌ولت تا ۲ ولت و با سرعت روبش ۰/۰۰۱ ولت بر ثانیه انجام گرفت. محلول مورد استفاده در آزمایش خوردگی محلول رینگر است که ترکیب این محلول در جدول (۳) آورده شده است [4]. سطح در معرض خوردگی برابر ۰/۲ سانتیمتر مربع بود.

فولاد BioDur108 با مقدار نیتروژن ۰/۹ درصد وزنی دارای استحکام تسلیم ۶۰۶ مگاپاسکال در حالت آنیل شده است [12]. در حالی که فولاد ۳۱۶L در حالت آنیل دارای استحکام تسلیم ۲۴۱ مگاپاسکال است [12]. در این مقاله، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بدون نیکل با دو مقدار مختلف نیتروژن به وسیله کوره القایی تولید شد و سپس فرایند ESR برای تصفیه فولاد مورد استفاده قرار گرفت. ریزساختار و خواص مکانیکی به ترتیب توسط میکروسکوپ نوری و آزمایش کشش و سختی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین مقاومت به خوردگی فولاد توسط آزمایش پتانسیوآستات مورد آزمایش قرار گرفت.

### روش انجام تحقیق

ترکیب فولاد مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است. آلیاژسازی فولاد در کوره القایی صورت گرفت و سپس تصفیه مذاب در ESR (Electro Slag Remelting) انجام شد. ابعاد شمش ورودی ۳۰۰×۶۰×۴۰ میلی‌متر و ابعاد شمش خروجی برابر ۱۵۰×۸۰×۶۰ میلی‌متر بود. سرباره مورد استفاده در فرایند ESR ترکیب  $CaF_2$  و  $Al_2O_3$  به ترتیب با نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد وزنی بود. همچنین از گاز نیتروژن به عنوان گاز محافظ استفاده شد.

برای نیتروژن‌دار کردن آلیاژ از فروکروم حاوی نیتريد استفاده شد. ترکیب شیمیایی نیتريد فروکروم در جدول (۲) آورده شده است. میزان اکسیژن و نیتروژن آلیاژ و نیتريد فروکروم توسط روش آنالیز گاز با دقت ۰/۰۲۵ppm اندازه‌گیری شد. همچنین آنالیز شیمیایی سایر عناصر شیمیایی با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری صورت پذیرفت.

آلیاژهای تولید شده با دو درصد مختلف نیتروژن تحت عملیات نورد گرم قرار گرفت. این عملیات در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان کاهش ضخامت در هر پاس نورد، حدود ۲-۱ میلی‌متر بود. به منظور دستیابی به ساختار یکنواخت با دانه‌بندی

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد پرنیتروژن و کم نیتروژن (درصد وزنی)

فولاد	C	Cr	Mn	Ni	Mo	Si	Cu	S	P	Al	O	N	Fe
پر نیتروژن	۰/۰۴	۱۹/۸	۲۲/۱	-	۱/۴۰	۱/۴۱	۰/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰۵۷	۱/۱۰	پایه
کم نیتروژن	۰/۰۴	۱۹/۷	۲۱/۹	-	۱/۳۸	۱/۳	۰/۳۱	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰۵۲	۰/۰۳	پایه

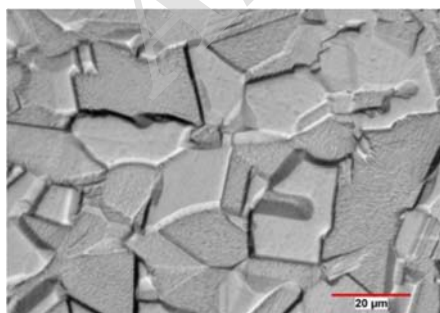
جدول ۲ ترکیب شیمیایی FeCrN

S	P	Si	C	N	Cr
۰/۰۴	۰/۰۴	۱/۵	۰/۰۶	۷-۹	۵۸-۶۵

جدول ۳ نمک‌های تشکیل دهنده محلول رینگر برحسب گرم بر لیتر [۴]

NaCl	KCl	CaCl <sub>۲</sub>	NaHCO <sub>۳</sub>
۶/۵	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۲

جدول (۱) محاسبه نمود. سپس با نقطه‌یابی این اعداد در شکل (۱)، مشاهده می‌شود که پیش بینی ریزساختار نمودار شغلر با نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختاری یکسان است. از طرفی با توجه به معادله (۳) کمترین مقدار نیتروژن برای فولادها در حالت آنیل ۰/۵ درصد وزنی است و چون این مقدار در فولاد پرنیتروژن محقق شده است، ریزساختار فولاد تماماً آستنیتی است؛ و ندرشیب و همکاران با بررسی ریزساختار فولاد Cr<sub>۱۸</sub>Mn<sub>۱۹</sub>N<sub>۰/۹</sub> مشاهده کردند که ریزساختار فولاد مورد آزمایش تماماً آستنیتی است که این امر تایید کننده ریزساختار فولاد پرنیتروژن است [16]. در عوض در فولاد بدون نیتروژن به علت عدم فراهم شدن مقدار نیتروژن کافی، ساختار فولاد دوفازی شده است.



شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد پرنیتروژن شامل دانه‌های آستنیت به همراه دوقلویی حرارتی

## نتایج و بحث

بررسی ریزساختاری شکل (۲) و شکل (۳) ریزساختار فولادهای پرنیتروژن و کم نیتروژن را نشان می‌دهد. ریزساختار فولاد پرنیتروژن در شکل (۲)، شامل دانه‌های هم‌محور آستنیت با اندازه دانه حدود  $20 \pm 5$  میکرومتر است. این ساختار شامل دوقلویی آنیلی نیز می‌شود. اساس تشکیل دوقلویی آنیلی در کریستال FCC بر مبنای کاهش انرژی مرزهای دانه در ساختار کریستالی است [14]. ریزساختار در شکل (۳) شامل دانه‌های فریت (مناطق تیره‌تر) و آستنیت (مناطق روشن‌تر) است. میانگین اندازه دانه‌های فریت در فولاد کم نیتروژن در حدود  $25 \pm 5$  میکرومتر و اندازه دانه‌های آستنیت در حدود  $8 \pm 3$  میکرومتر است. یکی از مکانیزمهای کاهش اندازه دانه وجود آلومینیوم در فولاد است. مکانیزم کنترل اندازه دانه‌ها بر این اساس استوار است که آلومینیوم موجود در فولاد، با نیتروژن موجود در مذاب ترکیب شده و تشکیل ذرات بسیار ریز و پراکنده نیتريد آلومینیوم را می‌دهد. این ذرات از تحرک مرز دانه‌های آستنیت کاسته و حتی می‌توانند آن‌ها را متوقف کنند [15]. به این ترتیب از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌شود.

مقدار کروم و نیکل معادل آلیاژهای پرنیتروژن و کم نیتروژن را می‌توان با استفاده از معادلات (۱) و (۲) و

### بررسی خواص مکانیکی

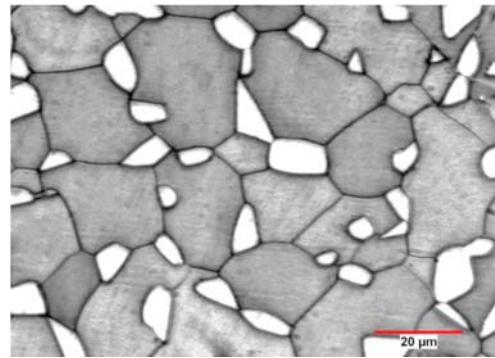
شکل (۵) نمودار تنش- کرنش مهندسی فولادهای پر نیتروژن و کم نیتروژن و فولاد 316LVM را نشان می‌دهد. جدول (۴) نتایج آزمایش تنش- کرنش و سختی را بر روی فولادهای پر نیتروژن و کم نیتروژن نشان داده و این نتایج با فولادهای مشابه مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استحکام فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن بسیار بیشتر است. همچنین افزایش طول فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن بیشتر است و در مقایسه با فولاد 316LVM دارای استحکام بیشتر و چقرمگی کمتری است. مکانیزم غالب در افزایش استحکام فولاد پر نیتروژن، استحکام محلول جامد است. نیتروژن با ایجاد اعوجاج در شبکه کریستالی استحکام محلول جامد را افزایش می‌دهد [17].

معادله هولومان بر روی کارسختی این فولادها صادق است [18]. این معادله در زیر آمده است:

$$\sigma = k\epsilon^n \quad (4)$$

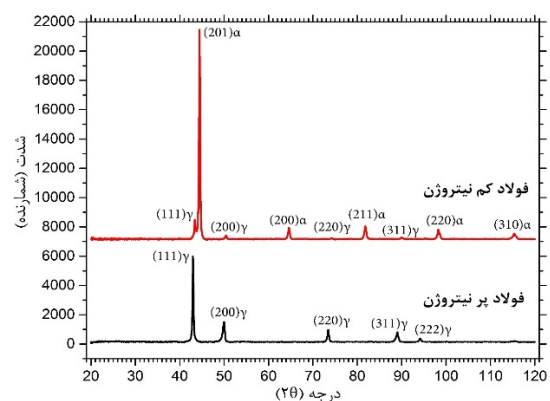
پارامترهای  $n$  و  $k$  معادله (۴) برای دو فولاد مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۵) آمده است. این دو پارامتر از نمودار تنش- کرنش حقیقی استخراج شده است. ضریب  $K$  توانایی آستنیت را به کار سخت شدن نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که فولاد پر نیتروژن توانایی بیشتری در کار سخت شدن دارد بدون اینکه پارگی در ماده ایجاد شود. همچنین پارامتر  $n$  نشان‌دهنده سرعت کارسختی است. بیشتر بودن این پارامتر برای فولاد پر نیتروژن نشان‌دهنده قابلیت بیشتر ماده به تغییر شکل قبل از گلوئی شدن نسبت به فولاد کم نیتروژن است [19].

علت اصلی افزایش کارسختی فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن، افزایش قابل توجه استحکام محلول جامد فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن است. در واقع عناصری که باعث ایجاد بیشترین تغییر در پارامتر شبکه آستنیت می‌شوند بیشترین تأثیر بر استحکام را دارند. نیتروژن و کربن بیشترین اعوجاج در شبکه را ایجاد می‌کنند [3]. از طرفی دیگر وجود عناصر



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد کم نیتروژن. فاز روشن‌تر، آستنیت و فاز تیره، فریت است

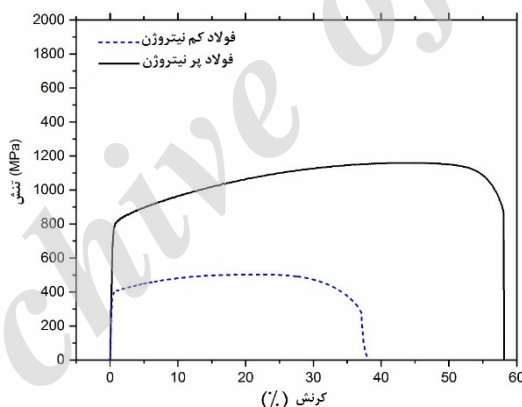
شکل (۴) آزمایش پراش اشعه ایکس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فولاد پر نیتروژن فقط پیک‌های آستنیت و در فولاد کم نیتروژن فقط پیک‌های آستنیت و فریت مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که پیک‌های فاز آستنیت در دو فولاد نسبت به هم تغییر موقعیت اندکی داشته است. این امر نشان‌دهنده اعوجاج ایجاد شده در شبکه ناشی از حل شدن نیتروژن در فضای اکتاهدرال شبکه FCC آستنیتی است. نیتروژن به دلیل حل شدن بین نشینی در شبکه کریستالی، بیشترین اعوجاج را در شبکه ایجاد می‌کند. میزان اعوجاج شبکه کریستالی نیتروژن ۱/۵ برابر کربن است [3]. همچنین اثری از پیک هیچ نوع فاز دیگری اعم از کاربید یا ترکیبات بین فلزی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴ آزمایش پراش اشعه ایکس از دو فولاد پر نیتروژن و کم نیتروژن

انبوه نابجایی‌های قفل شده است [3]. جدول (۴) نتایج سختی سنجی برای دو فولاد پرنیتروژن و بدون نیتروژن و برخی آلیاژهای مشابه را در حالت آنیل محلولی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، سختی فولاد پرنیتروژن حدود ۱۲۴ ویکرز از فولاد بدون نیتروژن بیشتر است. عناصر بین نشین باعث افزایش سختی در فولادهای آستینیتی در حالت آنیل محلولی شده است [21]. حضور کربن و خصوصاً نیتروژن در هر دو فولاد باعث ایجاد اعوجاج در شبکه آستینیت شده و در اثر برهم کنش بیشتر با نابجایی‌ها باعث افزایش سختی می‌شود. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود افزایش نیتروژن سبب افزایش سختی در آلیاژهای مشابه نیز شده است که این امر تایید کننده سختی فولادهای مورد آزمایش است.

بین نشین (نیتروژن و کربن) باعث جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها در آلیاژ می‌شود. این عناصر با برهم کنش با نابجایی‌ها، مانع حرکت آنها می‌شوند [20]. نابجایی‌ها در فولادهای حاوی عناصر بین نشین با مقادیر بالا، محصور شده‌اند. به همین دلیل این نابجایی‌ها توسط اتم‌های بین نشین قفل می‌شود [17]. مقدار تنش لازم برای آزاد کردن نابجایی‌ها در حدود  $\frac{G}{10}$  تا  $\frac{G}{5}$  است که این عدد بسیار بیشتر از تنش کششی نهایی است. در این شرایط مقدار تنش لازم برای جوانه زنی نابجایی جدید کمتر از آزاد کردن نابجایی‌های قفل شده است. همین امر سبب می‌شود که در استحکام تسلیم، نابجایی‌ها (به جای اینکه آزاد شوند) با جوانه زنی و رشد نابجایی‌های جدید، باعث ایجاد تغییر شکل در ماده گردد. در واقع در منطقه بعد از استحکام تسلیم کارسختی، ناشی از تقاطع نابجایی‌های ایجاد شده با



شکل ۵ منحنی تنش-کرنش مهندسی فولاد پرنیتروژن و کم نیتروژن

جدول ۴ نتایج آزمایش کشش و سختی برای نمونه‌ها در شرایط آنیل محلولی شده

سختی (Hv)	درصد تغییر طول (%)		استحکام کششی (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	فولاد
	کل	یکنواخت			
۳۳۱	۵۷	۴۳	۱۱۶۰	۷۹۰	پرنیتروژن
۲۰۶	۳۷	۲۳	۵۰۳	۳۸۷	کم نیتروژن
۱۶۵	۷۳	۵۶	۶۲۴	۳۱۲	[۱۸] 316LVM
۲۴۰	۴۲	-	۶۸۶	۵۶۲	Cr <sub>21</sub> Mn <sub>6</sub> Ni <sub>0.17</sub> Mo <sub>0.02</sub> N <sub>0.23</sub> (فولاد دو فازی) [۲۵]
-	۴۹	-	۹۳۱	۶۰۷	[۱۲] BioDur 108

جدول ۵ پارامترهای کار سختی از رابطه هولومان محاسبه شده از

نمودار تنش- کرنش حقیقی

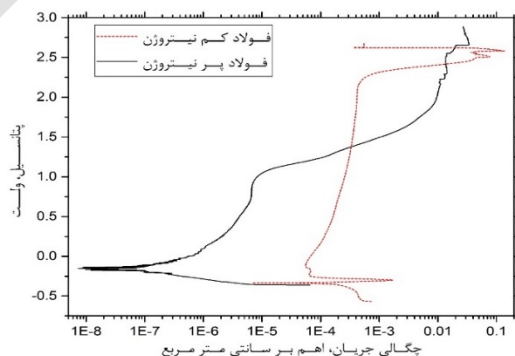
ک	n	فولاد
۱۸۸۸	۰/۲۱	پر نیتروژن
۷۳۵	۰/۱۳	کم نیتروژن

### بررسی خواص خوردگی

شکل (۶) منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک دو فولاد کم نیتروژن و پر نیتروژن را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از دو منحنی در جدول (۶) ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی جریان فولاد کم نیتروژن ۹ برابر بیشتر از فولاد پر نیتروژن است. این نشان‌دهنده سرعت خوردگی پایین‌تر فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن است. مقدار چگالی جریان در فولاد 316LVM برابر ۵/۱۶۹ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع گزارش شده است [22]. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار چگالی جریان فولاد 316LVM نسبت به فولاد کم نیتروژن مورد پژوهش ۱۸ برابر و نسبت به فولاد پر نیتروژن ۱۶۰ برابر بیشتر است. این امر نشان از مقاومت به خوردگی بالای فولادهای پر نیتروژن در برابر خوردگی است. در فولاد کم نیتروژن به دلیل داشتن مقدار بیشتر کروم نسبت به فولاد 316LVM باعث افزایش مقاومت به خوردگی شده است. در فولاد پر نیتروژن، علاوه بر کروم، نیتروژن نیز نقش مؤثری را در کاهش سرعت خوردگی ایفا می‌کند. نیتروژن با تشکیل یون آمونیوم و به دنبال آن تشکیل ترکیبات نیتريت و نترات، باعث کاهش خوردگی

می‌شود [23]. همچنین گفته شده است که نیتروژن باعث بهبود خاصیت روینگی در فولادها می‌شود [22]. همان‌طور که در جدول (۶) و شکل (۶) مشاهده می‌شود، افزایش نیتروژن سبب افزایش پتانسیل روینگی و افزایش پتانسیل شکست لایه روین شده است.

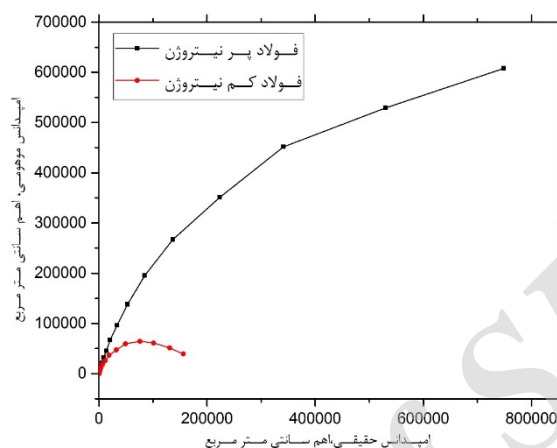
شکل (۷) منحنی نایکوئیست حاصل از طیف‌شناسی امپدانس الکتروشیمیایی دو فولاد کم نیتروژن و پر نیتروژن در محلول رینگر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در منحنی نایکوئیست هر دو فولاد فقط یک حلقه خازنی ناقص دیده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیل لایه روین با خواص محافظتی است. نقطه اوج فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن در فرکانس‌های بالاتری قرار دارد که این هم امر نشان‌دهنده مقاومت به خوردگی بالاتر فولاد پر نیتروژن است. برای مدل‌سازی نمودارهای نایکوئیست فولادهای مورد استفاده در این تحقیق از مدار معادل شکل (۸) استفاده شد. در این مدار  $R_{ct}$  مقاومت انتقال بار، CPE المان فاز ثابت مربوط به فصل مشترک فولاد/محلول است. نتایج حاصل از برون‌یابی منحنی نایکوئیست در جدول (۷) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن بسیار بیشتر است (حدود ۹ برابر). این روند افزایش مقاومت فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن با کاهش چگالی جریان خوردگی فولاد پر نیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن در جدول (۶) مطابقت دارد.



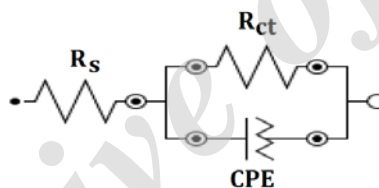
شکل ۶ منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک دو فولاد زنگ‌نزن آستینیتی پر نیتروژن و بدون نیتروژن در محلول رینگر

جدول 6 مقادیر اندازه‌گیری شده از منحنی پلاریزاسیون فولادهای پر و کم نیتروژن در محلول رینگر

فولاد	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	C. Rate (mm/y)	LPR ( $\Omega$ )	$E_{bd}$ (V)
کم نیتروژن	-0/3737	0/277	0/003256	1/356*10 <sup>5</sup>	-0/21
پر نیتروژن	-0/1463	0/0316	0/000371	2/64*10 <sup>6</sup>	1/15



شکل 7 نمودار نایکوئیست دو فولاد پر نیتروژن و کم نیتروژن در محلول رینگر



شکل 8 نمودار معادل مناسب برای معادل‌سازی نمودارهای نایکوئیست

جدول 7 نتایج به دست آمده از آزمایش امپدانس فولادهای پر نیتروژن و کم نیتروژن

فولاد	$R_{ct}$ (ohm)	CPE ( $F/cm^2$ )	n
کم نیتروژن	1/783*10 <sup>5</sup>	1/45*10 <sup>-6</sup>	0/8292
پر نیتروژن	1/6*10 <sup>6</sup>	4/016*10 <sup>-7</sup>	0/811

### نتیجه‌گیری

استحکام و سختی شده است. به طوری که استحکام تسلیم و استحکام کششی برای فولاد کم نیتروژن و فولاد پر نیتروژن به ترتیب از مقدار ۳۸۷ و ۶۲۸ مگاپا سکال به مقدار ۷۹۰ و ۱۷۳۱ مگاپا سکال تغییر یافته است؛ از طرفی مقدار سختی فولاد پر نیتروژن ۱۲۴ ویکرز بیشتر از فولاد کم نیتروژن است. این امر در حالی که صورت گرفته است که ازدیاد طول فولاد

- ۱- نیتروژن در فولاد پر نیتروژن باعث ایجاد ساختاری تماماً آستنیتی شده است؛ در حالی که در فولاد کم نیتروژن به علت کم بودن این عنصر، ساختار فریتی + آستنیتی ایجاد شده است. در هر دو فولاد هیچ کاربید و یا ترکیبات بین فلزی مشاهده نشد.
- ۲- افزایش نیتروژن در فولاد باعث افزایش قابل توجه در



پرنیتروژن نسبت به فولاد کم نیتروژن نیز افزایش یافته است. ۳- افزایش نیتروژن در فولاد باعث کاهش قابل توجه سرعت خوردگی می شود. به طوری که مقدار چگالی جریان در فولاد کم نیتروژن برابر ۰/۲۷۷ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع و در فولاد پر نیتروژن برابر ۰/۳۱۶ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع است.

## مراجع

1. Cobb H.M., "The History of Stainless Steel", ASM International, (2010).
2. Bhadeshia H., Honeycombe R., "Steel: Microstructure and Properties", 3rd ed., Butterworth-Heinemann, (2006).
3. Gavriljuk V.G., Berns H., "High Nitrogen Steels: Structure, Properties, Manufacture, Applications", Springer Berlin Heidelberg, (1999).
4. Winters G.L., Nutt M.J., "Stainless Steels for Medical and Surgical Applications", ASTM International, (2003).
5. Yang K., Ren Y., Wan P., "High nitrogen nickel-free austenitic stainless steel: A promising coronary stent material," *Science China Technological Sciences*, Vol. 55, pp. 329-340, (2011).
6. Fontana M.G., "Corrosion Engineering", McGraw-Hill Book Company, (1985).
7. Menzel J., Kirschner W., Stein G., "High nitrogen containing Ni-free austenitic steels for medical applications," *ISIJ international*, Vol. 36, (1996).
8. Uggowitzer P.J., Magdowski R., Speidel M.O., "Nickel Free High Nitrogen Austenitic Steels," *ISIJ International*, Vol. 36, pp. 901-908, (1996).
9. Balachandran G., Bhatia M.L., Ballal N.B., Rao P.K., "Some Theoretical Aspects on Designing Nickel Free High Nitrogen Austenitic Stainless Steels," *ISIJ International*, Vol. 41, pp. 1018-1027, (2001).
10. Klueh R.L., Maziasz P.J., Lee E.H., "Manganese as an austenite stabilizer in Fe-Cr-Mn-C steels," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 102, pp. 115-124, (1988).
11. Thomann U.I., Uggowitzer P.J., "Wear-corrosion behavior of biocompatible austenitic stainless steels," *Wear*, Vol. 239, pp. 58-48, (2000).
12. Walter M.J., "stainless steel for medical implants," *Advanced Materials & Processes*, Vol. 164, pp. 84-86, (2006).
13. Jiang Z.-h., Zhang Z.-r., Li H.-b., Li Z., Qi-feng M., "Microstructural evolution and mechanical properties of aging high nitrogen austenitic stainless steels," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 17, pp. 729-736, (2010).
14. Fullman R.L., Fisher J.C., "Formation of annealing twins during grain growth," *Journal of Applied Physics*, Vol. C, pp. 1350-1355, (1951).

۱۵. گلعدادر م.ع.، "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، ویرایش دوم، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۵).

16. Vanderschaeve F., Taillard R., Foct J., "Discontinuous precipitation of Cr<sub>2</sub>N in a high nitrogen, chromium-manganese austenitic stainless steel," *Journal of Materials Science*, Vol. 30, pp. 6035-6046, (1995).
17. Berns H., Gavriljuk V., Riedner S., "High Interstitial Stainless Austenitic Steels", Springer Berlin Heidelberg, (2013).
18. Talha M., Behera C.K., Sinha O.P., "Effect of nitrogen and cold working on structural and mechanical behavior of Ni-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications," *Materials Science and Engineering C*, Vol. 47, pp. 196-203, (2015).
19. Akbarpour M.R., Ekrami A., "Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 477, pp. 306-310, (2008).
20. Abbaschian R., Abbaschian L., Reed-hill R.E., "Physical Metallurgy Principles", 4<sup>th</sup> ed., Cengage Learning, (2008).
21. Ohkubo N., Miyakusu K., Uematsu Y., Kimura H., "Effect of Alloying Elements on the Mechanical Properties of the Stable Austenitic Stainless Steel," *ISIJ International*, Vol. 34, pp. 764-772, (1994).
22. Talha M., Behera C.K., Sinha O.P., "In-vitro long term and electrochemical corrosion resistance of cold deformed nitrogen containing austenitic stainless steels in simulated body fluid," *Materials Science and Engineering C*, Vol. 40, pp. 455-466. (2014),
23. Shih H., "Corrosion Resistance", InTech, (2012).
24. Lai J.K.L., Shek C.H., Lo K.H., "Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments", Bentham Science Publishers, (2012).
25. Kumar A., "Development and Characterization of Nickel Free Duplex Stainless Steel," Master of Science Thesis, Materials Science and Engineering, Thapar University, (2008).