

# فولاد نورد سرد - بررسی تأثیر نورد سرد و آنیل بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد مارچینگ-نیکل-کروم-منگنز دار نانو ساختار شده



و آنیل ساختارهایی با درصد بالای مارتنزیت، زیر مجموعه جدیدی از فرآیندهای ترمومکانیکی پیشرفته می باشد. که تحت عنوان نورد سرد (درصد وزنی) در کوره خلاء ریخته ( Fe-5Ni-10Cr-8Mn فرآیند مارتنزیت شناخته شده است. در این تحقیق یک فولاد آلیاژی با ترکیب اسمی گری شد. و پس از همگن سازی تحت دو مرحله نورد سرد به میزان ۵۰٪ و دو مرحله آنیل پس از نورد در دماهای مختلف قرار گرفت. آزمایش بر روی نمونه ها انجام شد EBSD سختی سنجی، آزمایش کشش و XRD های

نتایج نشان داد که نورد در دو مرحله و دمای آنیل ۶۰۰ درجه سانتی گراد با زمان یک ساعت. بهینه ترین حالت برای رسیدن به یک ساختار فوق ریزدانه // نانو ساختار است. همچنین آستنیت باقیمانده حاصل از آنیل دوفازی در این آلیاژ از نظر مکانیکی ناپایدار بوده. و حین بارگذاری و درصد ازدیاد 1050 MPa از خود نشان داد. استحکام کششی این فولاد در شرایط بهینه TRIP کششی به مارتنزیت استحاله یافت. و خاصیت طول نسبی آن ۲۸ درصد بدست آمد. که به صورت تغییر شکل یکنواخت قبل از گلوپی می باشد

جدول ۱: ترکیب شیمیایی بدست آمده از تست کوانتومتری

عنصر	Fe	Mn	Cr	Ni	C	Ti	S	Si	W	Nb	Al	B	P
درصد وزنی	پایه	۷/۸	۹/۷	۴/۱	۰/۰۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲

امکان پذیر (TMCP2) و فرآیند ترمومکانیکی پیشرفته (SPD1) تولید فولادهای فوق ریزدانه از طریق روش های تغییر شکل پلاستیک شدید روش های تغییر شکل پلاستیک شدید بسیاری را در تولید. انواع فلزات فوق ریزدانه / نانو ساختار ابداع شده (song & Ponge, 2006) است اند. اما فقط تعداد محدودی از این روش ها در مقالات گزارش شده اند. که در زمینه تولید فولادهای فوق ریزدانه / نانو ساختار مفید بوده اند. که (Segal, 1981 & Rezinkov) (ECAP3)، شامل فشار تحت کانال زاویه ای با مقطع یکسان

پیچش تحت فشار بالا (Saito, 1999 & Utsunomiya) (ARB4) فرآیند اتصال نورد تجمعی (Ivanisenko, 2003 & Lojkowski) (HPT5) و اکستروژن برشی ساده (Pardis, 2009 & Ebrahimi) (SSE6). با اعمال کرنش پلاستیکی. شدید بر روی فلز، منجر به کاهش شدید اندازه دانه می شوند. فرآیندهای ترمومکانیکی سابقه طولانی برای کاهش اندازه دانه در فولادها دارند.

که کاربرد صنعتی گسترده ای نیز پیدا کرده اند. این فرآیندها با اعمال کرنش کمتر و پیوستگی فرآیند و کنترل رژیم حرارتی. روش مناسبی برای (Maki,2009&Tsuji) کاهش اندازه دانه به شمار می آیند

یکی از فرآیندهای ترمومکانیکی که امروزه برای تولید فولادهای زنگ نزن آستنیتی فوق ریزدانه. توجه زیادی را به خود جلب کرده، فرآیند مارتنزیت است. نورد سرد و آنیل فولاد مارتنزیتی روشی است. که به وسیله تیسوجی و همکارانش در سال ۲۰۰۱ برای تولید فولادهای فوق ریزدانه .. (Tsuji,Ueji,2002) استفاده کردند

در حین کرنش. و در ادامه بازگشت مارتنزیت به آستنیت (a) نیمه پایدار به مارتنزیت (Y) این فرآیند شامل نورد سرد سنگین برای تبدیل آستنیت در طی آنیل در زمان ها و دماهای نسبتاً پایین می باشد

این روش به دلیل سهولت در تولید قطعات بزرگ نظیر ورق از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این روش آستنیت در اثر تغییر شکل سرد به مارتنزیت تبدیل می شود. و در ادامه فرآیند تغییر شکل، مارتنزیت موجود در ریزساختار خرد شده. و مکان های مناسب جوانه زنی را برای بازگشت مارتنزیت به آستنیت در حین عملیات آنیل بعدی فراهم می کند. و منجر به ریزدانه‌گی فولاد و بهبود خواص مکانیکی آن می گردد. در این فرآیند انتخاب صحیح پارامترهای مؤثر بر آنیل بازگشت. جهت حصول ساختاری با اندازه دانه های نانو و زیر میکرون. از اهمیت ویژه ای برخوردار است

### مواد و روش تحقیق

درصد وزنی). از مواد اولیه با خلوص بالا استفاده شد. ( Fe-5Ni-10Cr-8Mn در این تحقیق به منظور تهیه یک فولاد آلیاژی با ترکیب اسمی انجام شد. پس از عملیات آلیاژسازی و ریخته گری. شمش تحت عملیات (VAR8) عملیات ذوب و آلیاژ سازی در کوره ذوب قوسی تحت خلاء همگن کردن به منظور از بین بردن جدایش های ریخته گری به مدت ۴۰ ساعت. تحت دمای ۱۰۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. ترکیب شیمیایی بدست آمده از تست کوانتومتری در جدول ۱ نشان داده شده است

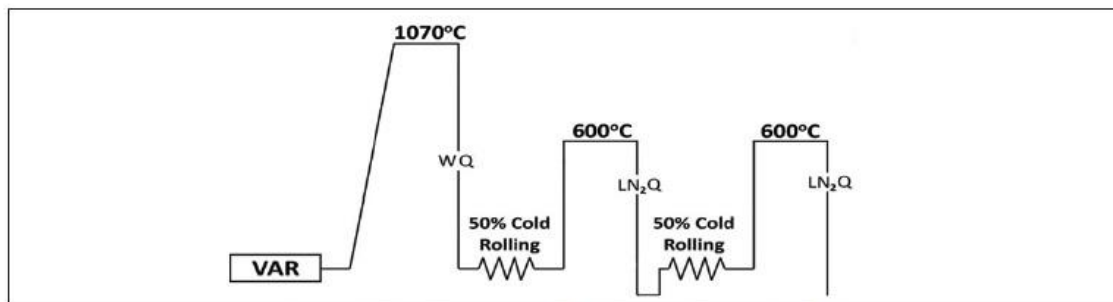
در مرحله اول نمونه تحت عملیات نورد به میزان ۵۰٪. و آنیل در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. و در مرحله دوم نورد به میزان ۵۰٪ و آنیل در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد مجدداً انجام شد. سرد کردن نمونه پس از همگن سازی در داخل آب. و پس از هر مرحله آنیل در داخل نیتروژن مایع انجام گرفت. در شکل ۱ نحوه ی انجام عملیات ترمومکانیکی بکار رفته در این تحقیق نشان داده شده است

بعد از هر مرحله بر روی نمونه انجام شد. و در انتهای آزمون Kg بررسی های متالوگرافی، پراش اشعه ایکس. و سختی سنجی ویکرز با بار ۱۰۰ انجام گرفت. و آزمایش پراش mm/min شماره ۷ بر روی نمونه ها. در دمای محیط تحت سرعت فک ۱ JIS Z 2201 کشش مطابق استاندارد. در راستای عمود بر نورد. در مساحتی در حدود ۲۵×۵۰ میکرومتر تصویربرداری شد. (EBSD9) الکترون برگشتی

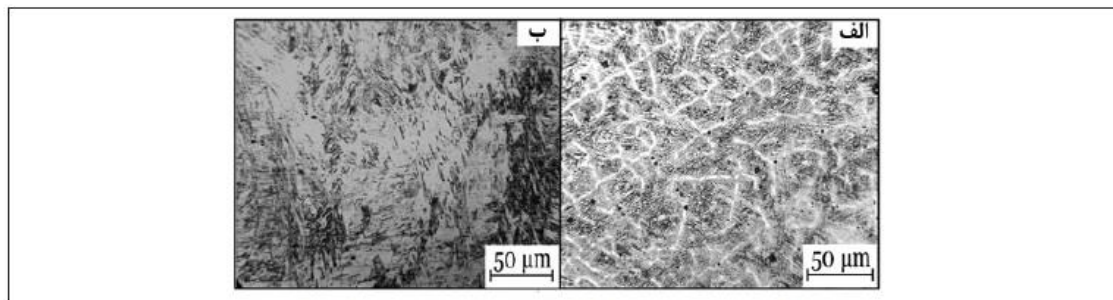
### نتایج بحث

شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار قبل و بعد از همگن سازی را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲- الف دیده می شود. نمونه ریختگی قبل از همگن سازی جدایلهای دندریتی را نشان می دهد. در این تصویر مناطق تیره رنگ، مارتنزیت های تشکیل شده و مناطق سفید رنگ آستنیت های باقی مانده. در مناطق غنی از عناصر آلیاژی در بین بازوهای دندریتی را نشان می دهد. پدیده های مزبور ناشی از سرد شدن غیر تعادلی در ضمن انجماد و عدم نفوذ کامل عناصر آلیاژی می باشد

این موضوع موجب افت خواص مکانیکی فولاد از جمله قابلیت کار گرم و کار سرد می شود. ( اصلو کاربرد عملیات حرارتی فولادها، ۱۳۷۸). از این رو، ساختار ریختگی فولاد باید به کمک عملیات همگن سازی مناسب یکنواخت شود. در تصویر ۲-ب ریزساختار نمونه همگن سازی شده در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی گراد. و زمان ۴۰ ساعت و سرد شده در آب. نشان داده شده است. شکل ۲-ب نشان می دهد که در اثر همگن سازی طولانی ساختار دندریتی از بین رفته. و شبکه پیوسته فاز آستنیت بین دندریتی حذف شده و ساختار یکنواخت مارتنزیتی بدست آمده است



شکل ۱: شماتیک عملیات ترمومکانیکی انجام شده جهت تولید فولاد فوق ریزدانه

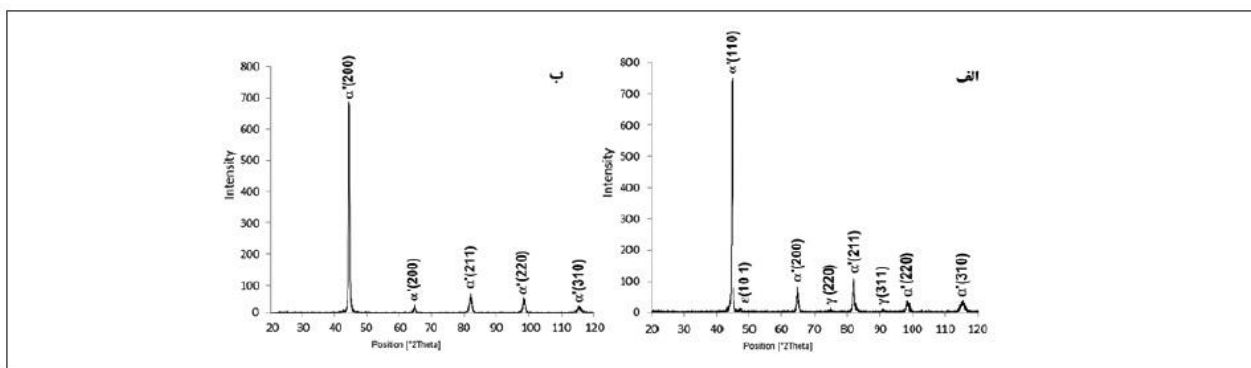


شکل ۲: نمونه ریخته‌گری شده (الف) قبل از همگن سازی، (ب) بعد از همگن سازی

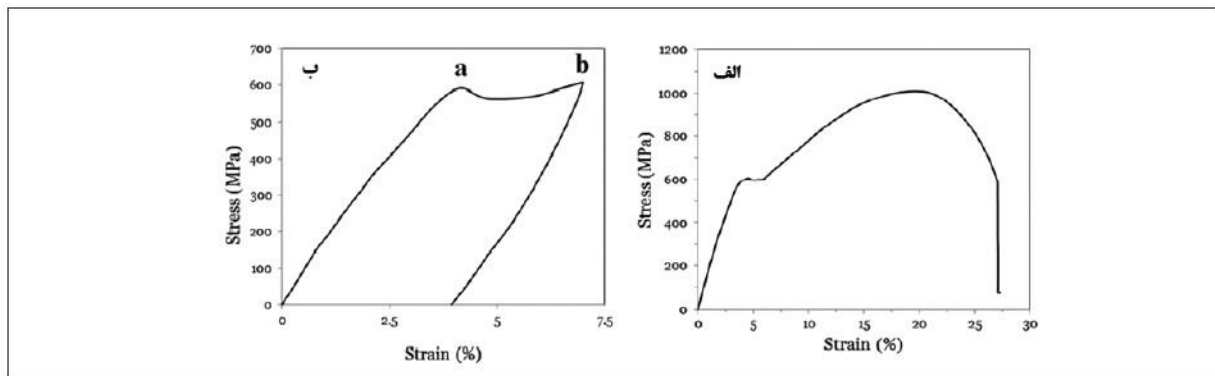
را نشان می‌دهد. که با bcc الگوی پراش اشعه ایکس نمونه همگن شده در شکل ۳-الف نشان داده شده است. که خطوط پراش مربوط به آهن نیز مشاهده می‌شود. که (ε) bcc و آهن fcc (γ) مطابقت دارد. در کنار این خطوط بازتاب‌های ضعیف مربوط به آهن a ساختار مارتنزیتی وجود آستنیت باقیمانده به مقدار جزئی در ساختار را نشان می‌دهد. دلیل پایداری آستنیت در نمونه همگن شده، وجود عناصر آلیاژی نیکل و منگنز در بین بازوهای دندریتی می‌باشد. که غلظت بالای آن‌ها می‌تواند سبب کاهش دمای تشکیل مارتنزیت و در نتیجه پایداری شیمیایی گردد.

شکل ۲-ب الگوی پراش اشعه ایکس ساختار نورد شده را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود. در حال همگن پیک‌های آستنیت بصورت جزئی نمایان است. در حالی که پس از نورد سرد، این پیک‌ها جای خود را به پیک‌های مارتنزیت می‌دهند. مارتنزیت در این فولادها به دلیل کربن کم، دارای ساختار انعطاف پذیر می‌باشد. در اثر ۵۰ درصد نورد سرد اول تمام فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده است. و سختی نمونه به مقدار ۳۷۳ ویکرز افزایش یافت. در ادامه نمونه تحت دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل مرحله اول به مدت یک ساعت قرار گرفت.

شکل ۴-الف الگوی پراش اشعه ایکس از نمونه را نشان می‌دهد. خرد شدن دانه‌های مارتنزیت و کوچک شدن آنها سبب پایدار شدن فاز آستنیت بر روی پایداری آستنیت تأثیر می‌گذارد. و سبب تسریع در تشکیل NiMn شده است. همچنین در این فولادها نیکل و منگنز با تشکیل رسوب آستنیت برگشتی می‌شود. سختی در این مرحله به میزان ۳۶۷ ویکرز بدست آمد. که با توجه به اینکه در این فولادها کربن بسیار کمی وجود دارد. میزان سختی فازهای آستنیت و مارتنزیت تفاوت چندانی با هم ندارند. تشکیل رسوبات آلیاژی بسیار ریز و چگالی بالا در فاز مارتنزیت. (نیلی احمد آبادی، ۱۳۸۱، ۸؛ دلیل افزایش سختی در دماهای پایین می‌باشد (حسین نژاد



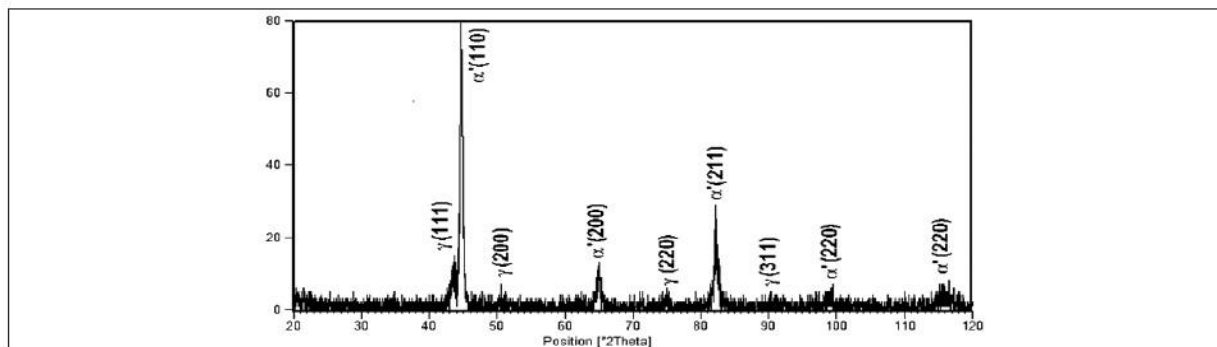
شکل ۳: الگوی پراش اشعه ایکس از (الف) نمونه همگن شده، (ب) نمونه ۵۰٪ نورد شده



شکل ۵: نمودار تنش - کرنش مهندسی الف) تا مرحله شکست ب) باربرداری شده در نقطه b

نمونه ها پس از آنیل مرحله اول تحت ۵۰ درصد نورد مرحله دوم و آنیل در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان یک ساعت قرار گرفت. میزان آستنیت و مارتنزیت به کمک الگوی پراش اشعه ایکس در شکل ۴-ب نشان داده شده است. ریز شدن اندازه دانه در اثر نورد سرد مرحله سبب شده تا در فرآیند آنیل مرحله دوم در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، ساختار دو فازی آستنیت و مارتنزیت در نمونه MS، دوم و کاهش دمای تشکیل شود. این فرآیند سبب شد تا ساختار ریزدانه تر شده و سختی افزایش یابد و به میزان ۲۹۰ ویکرز بدست آید

برای آزمون کشش مطابق استاندارد توضیح داده شده نمونه تهیه شد. و سپس تحت آزمایش کشش قرار گرفت. نتایج این آزمون به صورت منحنی تنش - کرنش مهندسی در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در نمونه بعد از تسلیم، وجود یک پلاتو شبیه پدیده نقطه تسلیم را نشان می دهد. این موضوع مورد توجه بیشتر قرار گرفت



شکل ۶: الگوی پراش اشعه ایکساز نمونه کشش

در شکل ۵-ب تغییرات تنش پس از باربرداری از انتهای ناحیه پلاتو نشان داده شده است. که عدم برگشت پذیری کامل کرنش را نشان می دهد

الگوی پراش اشعه ایکس نمون باربرداری شده در قسمت وسط نمونه تست کشش در شکل ۶ نشان داده شده است. که مقادیر کمتر آستنیت را نشان می دهد. و بنابراین می توان گفت که پلاتو ناشی از استحاله دینامیک آستنیت باقیمانده. به مارتنزیت در حین آزمایش کشش بوده است. با توجه به میزان آستنیت و مارتنزیت قبل و بعد از انجام آزمایش. به این نتیجه می توان رسید که در حین انجام آزمایش کشش. فاز نرم آستنیت ابتدا تغییر شکل یافته و پس از کرنش دچار ناپایداری مکانیکی می گردد. به عبارت دیگر ابتدا آستنیت، تغییر شکل یافته و بدنبال آن به مارتنزیت تبدیل می گردد

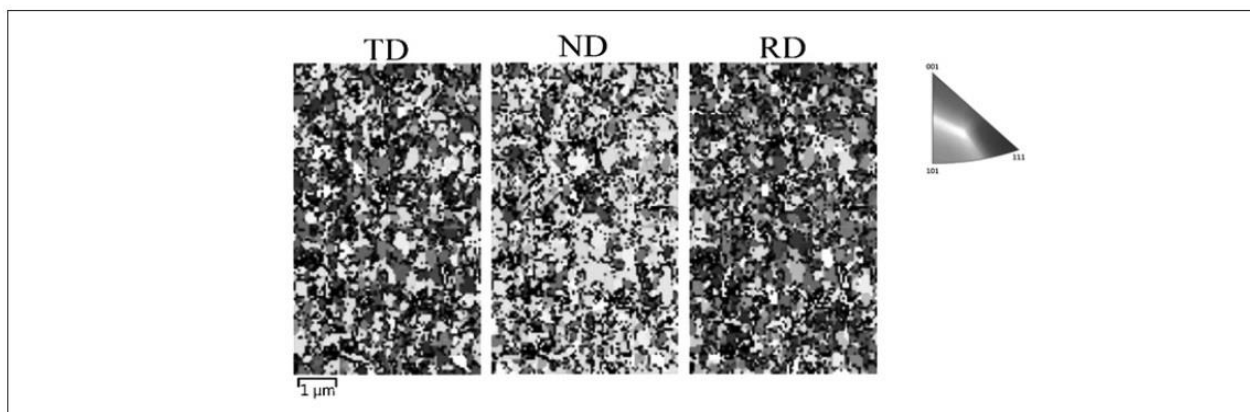
تبدیل فوق سبب افزایش حجم و کارسختی موضعی شده و از ناپایداری کششی جلوگیری می کند. توان و نرخ کارسختی بالا در این نمونه ناشی از در شکل ۵-الف تا b تغییر شکل و کارسخت شدن فاز آستنیت است. و تبدیل آستنیت کارسخت شده به مارتنزیت از گلوبی شدن موضعی. در نقطه ب جلوگیری نموده و سبب شد. توان کارسختی یا میزان تغییر شکل یکنواخت در این نمونه افزایش یابد. تبدیل آستنیت به مارتنزیت در حین کار معروف است. فولادهایی که تغییر شکل پلاستیک، تحریک کننده دگرگونی در TRIP10 مکانیکی سبب افزایش انعطاف پذیری می شود. و به معروف هستند TRIP آنهاست. و از آن تغییر حالت به منظور بهبود انعطاف پذیری کمک می گیرند. به فولادهای

در این فولادها در اثر کرنش یا همان تغییر شکل پلاستیک، آستنیت به مارتنزیت تبدیل می شود. از طرف دیگر مارتنزیت ایجاد شده در اثر کرنش به علت وجود چگالی بالایی از نابجایی ها، در ساختار در برابر کلویی شدن مقاومت کرده. و در نتیجه ترکیب خوبی از استحکام بالا و انعطاف نیز نشان می دهد. که b تحلیل داده های حاصل از الگوی پراش اشعه ایکس در نقطه (De Cooman,2004) پذیری خوب را موجب می شود در این فولاد در حین انجام آزمایش کشش، آستنیت به مارتنزیت تبدیل می شود

پیش بینی شد. که نمونه به ساختار فوق ریزدانه/نانو ساختار رسیده باشد. که (Ma,Jin,2005,&Lee) در مقایسه نتایج با کار لی و همکاران (ND) از نمونه در راستای عمود بر نورد EBSD از نمونه گرفته شد. آزمایش (EBSD) برای اثبات این موضوع آزمون پراش الکترون برگشتی انجام گرفت. و مساحتی در حدود  $50 \times 25$  میکرومتر تصویربرداری شد. فاصله روبش بین نقاط به میزان  $300$  نانومتر انتخاب گردید. برای داشتن با کیفیت خوب نیاز به آماده سازی مناسب نمونه است. در این پروژه برای آماده سازی نمونه بعد از مراحل سنباده زنی و EBSD یک الگوی انجام پولیش مکانیکی. از پولیش الکتروشیمیایی برای آماده سازی نهایی بر روی سطح انجام شد

EBSD و تصاویری از اندازه دانه، جهات کریستالی، تصاویر فازی و داده های خام از نوع مرزدانه ها بدست آمد. شکل ۷ تصویر بدست آمده از نشان دهنده جهات کریستالی در نمونه می باشد. که در راستای عمود بر نورد بدست آمد. با در نظر گرفتن خط مقیاس و تفاوت در رنگ دانه ها، میانگین اندازه دانه ها زیر یک میکرومتر. و در هر جهت نشان دهنده بیشترین دسته صفحات کریستالی در آن جهت می باشد. در مقایسه صفحات نسبت به دیگر صفحات از دانسیته بیشتری برخوردار است (پایان نامه X، و صفحات کریستالی ۱۱۱ در راستای Y کریستالی ۱۰۱ در راستای Z). (کارشناسی ارشد، ۱۳۹۲)

نشان دهنده جهات کریستالی در نمونه می باشد. که در راستای عمود بر نورد بدست آمد. با در نظر گرفتن خط EBSD تصویر بدست آمده از مقیاس و تفاوت در رنگ دانه ها، میانگین اندازه دانه ها زیر یک میکرومتر. و در محدوده فوق ریزدانه / نانو ساختار بدست آمد (پایان نامه Z). (کارشناسی ارشد، ۱۳۹۲)



شکل ۶: نتایج خام استخراج شده از جهات کریستالی در آزمایش EBSD

### نتیجه گیری

- 1) عملیات مارتنزیتی دو مرحله در دمای  $600$  درجه سانتی گراد. به مدت یک ساعت و نورد  $50$  درصد در هر مرحله در این فولاد سبب بدست آمدن ساختار. زیر یک میکرون و در محدوده فوق ریزدانه/نانو ساختار می شود
- 2) به همراه ازدیاد طول  $28\%$  می باشد  $1050$  Mpa فولاد نانو ساختار تولید شده دارای استحکام تسلیم
- 3) ریزدانه کردن در این آلیاژ سبب پایداری فاز آستنیت می شود
- 4) و ریزدانه شدن است TRIP حداکثر تافنس و انعطاف پذیری در این آلیاژ ناشی از وقوع پدیده



## فولاد رسول دلاکان

با سالها تجربه ی گرانبها در زمینه ی تأمین و توزیع و عرضه انواع ورق آلیاژی - انواع فولاد آلیاژی. با اشکال مختلف تولیدی. از جمله ورق - میلگرد - تسمه - پروفیل - میلگرد با استاندارد و گواهینامه های روز دنیا در سراسر ایران فعالیت مینماید صنعتگر گرامی از اینکه ما را جهت خرید فولاد آلیاژی مورد نیاز خویش انتخاب می نماید سپاسگزاریم.

**ارتباط با ما: ۰۹۱۲۲۱۳۶۶۷۵ - ۰۲۱۲۸۴۲۳۸۲۰**

**واتس آپ: ۰۹۱۲۲۱۳۶۶۷۵**

**fooladrasuldalakan@gmail.com**

فولاد رسول دلاکان