

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

# تأثیر مسیر کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB) بر ریزساختار و خواص مکانیکی نوار برنج ۶۰/۴۰

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مواد- شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد

محمد میرزایی

اساتید راهنما

دکتر احمد رضاییان

پروفسور محمدرضا طرقي نژاد



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد آقای محمد میرزائی  
تحت عنوان

## تأثیر مسیر کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB) بر ریزساختار و خواص مکانیکی نوار برنج ۶۰/۴۰

در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدرضا طرقي نژاد

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر احمد رضائیان

۳- استاد داور دکتر محمدحسین عنایتی

۴- استاد داور دکتر ابوذر طاهری زاده

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر کیوان رئیسی

سپاس خدای را که سخوران، در ستودن او بماند و شامندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را کزاردن نتوانند.  
بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، بازبان قاصد دست ناتوان،

چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا این می کند و سلامت امانت های را که به

دشش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل":

از پدر، مادر، برادران و خواهر عزیزم... این معلمان بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و دشمنی من، قلم عفو کشیده و گریانه از کنار

غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از اساتید با کمال و شایسته؛ آقایان دکتر محمد رضا طرقتی، نژاد و دکتر احمد رضائیان که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ گلگی

در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت را به نهای این رساله را بر عهده گرفتند؛

از تمامی دوستانم به ویژه دوست و همراه گرانقدرم آقای مهندس علی قاطعی به پاس بهرایی ها و دلگرمی هایشان نهایت سپاس خویش

ابراز داشته و امیدوارم در تمامی مراحل زندگی، پیروز و سربلند باشند.

باشد که این خردترین، بخششی از زحمات آنان را سپاس گوید.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

## تقدیم بہ:

وجود مقدس پدر عزیزم و مہربان مادرم،

آنان کہ ناتوان شدند تا من بہ توانایی برسم

مو، سپید کردند تا من روسفید شوم

و

قائمشان خمیدہ شد تا من سربلند بانم

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۵۵	فهرست اشکال
سیزده	فهرست جداول
۱	چکیده
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
	<b>فصل دوم: مروری بر مطالب</b>
۴	۱-۲ تغییر شکل پلاستیک شدید
۶	۱-۱-۲ فرایند فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان (ECAP)
۹	۲-۱-۲ فرایند پیچش تحت فشار بالا (HPT)
۹	۲-۲ فرایند نورد تجمعی - پیوندی (ARB)
۱۲	۱-۲-۲ جوش سرد نوردی
۱۵	۲-۲-۲ نقش کرنش‌های برشی در ARB
۱۷	۳-۲-۲ مواد تغییر شکل یافته با فرایند ARB
۱۸	۴-۲-۲ بررسی ریزساختاری مواد ARB شده
۲۴	۵-۲-۲ بررسی اندازه دانه فرعی یا کریستالیت با استفاده از روش ریت‌ولد
۲۵	۶-۲-۲ بررسی خواص مکانیکی مواد ARB شده
۲۸	۳-۲ اثر چرخش در نمونه‌های ARB شده
۲۹	۱-۳-۲ بررسی اثر چرخش غلتک
۳۳	۲-۳-۲ بررسی اثر چرخش نمونه
۴۱	۴-۲ خلاصه
	<b>فصل سوم: مواد و روش‌ها</b>
۴۳	۱-۳ مقدمه
۴۳	۲-۳ مواد اولیه و ترکیب شیمیایی
۴۴	۳-۳ نحوه انجام فرایند ARB
۴۵	۴-۳ بررسی ریزساختار
۴۵	۵-۳ ارزیابی خواص مکانیکی
۴۶	۶-۳ محاسبه اندازه دانه فرعی با روش ریت‌ولد
۴۶	۷-۳ شکست‌نگاری
	<b>فصل چهارم: نتایج و بحث</b>
۴۷	۱-۴ مقدمه
۴۷	۲-۴ آنالیز ریزساختاری
۴۷	۱-۲-۴ بررسی کیفی پیوندهای ایجاد شده
۴۹	۲-۲-۴ بررسی سطح جدایش آخرین فصل مشترک

۵۲	..... باندهای برشی ۳-۲-۴
۵۶	..... خواص مکانیکی ۳-۴
۵۶	..... خواص کششی ۱-۳-۴
۶۱	..... کرنش برشی ۲-۳-۴
۶۶	..... سختی و ریزسختی ۳-۳-۴
۶۹	..... محاسبه اندازه کریستالیت با استفاده از داده‌های پراش پرتو ایکس ۵-۴
۷۲	..... شکست‌نگاری ۶-۴

**فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

۷۸	..... نتیجه‌گیری ۱-۵
۷۹	..... پیشنهادات ۲-۵
۸۰	..... مراجع



## فهرست اشکال

<u>شکل</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۲- مسیرهای A، B و C در فرایند ECAP	۷
شکل ۲-۲- نقشه EBSD مشاهده شده از راستای طولی نمونه های مس ECAP شده بعد از ۲۰ پاس در پنج مسیر مختلف، الف) مسیر A، ب) مسیر B <sub>30</sub> ، پ) مسیر B <sub>45</sub> ، ت) مسیر B <sub>60</sub> و ث) مسیر B <sub>C</sub>	۸
شکل ۲-۳- شکل نمادینی از فرایند ARB	۱۰
شکل ۲-۴- فلزاتی که به صورت موفقیت آمیز توسط جوش سرد به یکدیگر قابل اتصال هستند	۱۳
شکل ۲-۵- ایجاد پیوند بین لایه ها مطابق با مکانیزم فیلم سطحی	۱۳
شکل ۲-۶- تصویر نمادین از نحوه شکل گیری توزیع کرنش برشی (خطوط b) و اندازه دانه (خطوط a) در ورق های تولید شده به روش ARB	۱۶
شکل ۲-۷- تصویر نمادین از توزیع کرنش برشی در ضخامت آلیاژ آلومینیوم AA1100 پس از سیکل های مختلف ARB	۱۷
شکل ۲-۸- ریزساختار برنج ۷۰/۳۰ قبل از شروع فرایند ARB	۱۹
شکل ۲-۹- سطح مقطع عرضی برنج ۷۰/۳۰ بعد از الف) یک، ب) ۲، پ) ۴ و ت) ۶ سیکل ARB	۱۹
شکل ۲-۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برنج ۷۰/۳۰ الف) از جوش سرد ایجاد شده در نمونه ۲ سیکل ARB شده پس از شکست، ب) از مقطع عرضی نمونه ۶ سیکل ARB شده	۲۰
شکل ۲-۱۱- سطوح شکست برنج ۷۰/۳۰ الف) برنج ۷۰/۳۰ اولیه، ب) بعد از ۱ سیکل، پ) بعد از ۲ سیکل، ت) بعد از ۳ سیکل، ث) بعد از ۴ سیکل و ج) بعد از ۶ سیکل ARB	۲۱
شکل ۲-۱۲- تصاویر TEM از نمونه های برنجی ARB شده بعد از، الف) یک سیکل، ب) سه سیکل و پ) شش سیکل	۲۲
شکل ۲-۱۳- دیاگرام نمادین از تبلور مجدد پیوسته یک ریزساختار لایه ای به شدت تغییر شکل یافته، الف) ساختار اولیه، ب) فروپاشی ساختار لایه ای، پ) شروع کروی شدن با حرکت مرز دانه ها و ت) پایان کروی شدن	۲۳
شکل ۲-۱۴- منحنی تغییرات میکروکرنش و اندازه دانه فرعی برای نمونه برنجی بر حسب تعداد سیکل ARB با استفاده از روش ریت ولد	۲۵
شکل ۲-۱۵- تغییرات استحکام کششی و تغییر طول نمونه برنجی در سیکل های متفاوت ARB	۲۶
شکل ۲-۱۶- باندهای برشی صفحه عرضی برنج ۷۰/۳۰ ARB شده بعد از الف) ۲ سیکل، ب) ۴ سیکل و پ) ۶ سیکل (فلش ها باندهای برشی را نشان می دهند)	۲۷
شکل ۲-۱۷- سختی مختلف نمونه برنجی بعد از سیکل های مختلف ARB	۲۸
شکل ۲-۱۸- طرح نمادین از چرخش غلتک های نورد	۲۹
شکل ۲-۱۹- نقشه EBSD نمونه مس، از الف) نمونه اولیه، ب) نمونه آنیل شده نورد معمولی و پ) نمونه آنیل شده نورد متقاطع	۳۰
شکل ۲-۲۰- توزیع زوایای جهت گیری مرز دانه های مشاهده شده در الف) نمونه اولیه، نمونه تبلور مجدد یافته بعد از نورد معمولی و پ) نورد متقاطع	۳۱

- شکل ۲-۲۱- تصویر قطبی معکوس ND نمونه اولیه و نمونه های نوردی، الف) نمونه اولیه، ب) نورد معمولی و پ) نورد متقاطع ..... ۳۲
- شکل ۲-۲۲- الف) میکروسختی ویکرز و ب) تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی بعد از نورد با روش های مختلف ..... ۳۳
- شکل ۲-۲۳- طرح نمادین از فرایند نورد متقاطع که در آن نمونه می چرخد، الف) چرخش هر دو قطعه و ب) چرخش یک قطعه ..... ۳۴
- شکل ۲-۲۴- خواص مختلف تنش تسلیم، استحکام کششی و کرنش شکست در نمونه های آلومینیم ۱۰۵۰ نورد متقاطع شده. محور کششی الف) موازی و ب) عرضی، نسبت به راستای نورد شده ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۵- تصاویر TEM از آلومینیوم ۱۰۵۰ در موقعیت های مختلف. الف) سطح نورد شده صفحه بالایی (NT)، ب) سطح نورد شده صفحه پایینی (NB)، پ) سطح عمود بر جهت نورد (R)، ت) صفحه جانبی از ورق بالایی (TU) و ج) صفحه جانبی از ورق پایینی (TL) ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۶- تصاویر TEM از سیکل ۶ آلومینیوم نورد متقاطع شده. الف) سطح عمود بر راستای نورد و ب) سطح جانبی ..... ۳۷
- شکل ۲-۲۷- اندازه دانه مختلف به صورت تابعی از تعداد سیکل نورد تجمعی از مکان های مختلف نمونه آلومینیمی نورد تجمعی شده. الف) سطح بالایی لایه بالایی (NT)، ب) سطح پایینی از لایه پایینی (NB) و ج) مرکز لایه ها (NC) ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۸- تصویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت آلومینیمی تولید شده به وسیله فرایند الف) ARB و ب) CRARB در ۸ سیکل ..... ۳۹
- شکل ۲-۲۹- نمودار تنش-کرنش مهندسی آلیاژ  $Al/8\%B_4C$  تولید شده به روش ARB و CRARB (پس از ۸ سیکل) و ماده اولیه (قبل از ARB) ..... ۴۰
- شکل ۲-۳۰- نقشه مرز دانه ای نمونه های مسی ARB شده با مسیرهای مختلف تا ۸ سیکل ..... ۴۱
- شکل ۳-۱- شکل نمایشی از فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای A، C، B<sub>C</sub> و B<sub>A</sub> ..... ۴۴
- شکل ۳-۲- تصویر نمایشی از نمونه های آزمون کشش مورد استفاده در پژوهش حاضر ..... ۴۶
- شکل ۴-۱- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار اولیه برنج ۶۰/۴۰ ..... ۴۸
- شکل ۴-۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از برنج ARB شده در مسیر A پس از الف) ۱، ب) ۲، پ) ۳، ت) ۴ و ث) ۵ سیکل ..... ۵۰
- شکل ۴-۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از برنج ARB شده در مسیر B<sub>A</sub> پس از الف) ۱، ب) ۲، پ) ۳، ت) ۴ و ث) ۵ سیکل ..... ۵۱
- شکل ۴-۴- تصاویر میکروسکوپ نوری از برنج ARB شده در مسیر B<sub>C</sub> پس از الف) ۱، ب) ۲، پ) ۳، ت) ۴ و ث) ۵ سیکل ..... ۵۲
- شکل ۴-۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از برنج ARB شده در مسیر C پس از الف) ۱، ب) ۲، پ) ۳، ت) ۴ و ث) ۵ سیکل ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۰- میانگین داده های حاصل از آنالیز تصویر آخرین سطوح جدایش ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۱- منحنی های تنش-کرنش مهندسی برای نمونه های برنج ۶۰/۴۰ در سیکل های مختلف مسیر A ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۲- منحنی های تنش-کرنش مهندسی برای نمونه های برنج ۶۰/۴۰ در سیکل های مختلف مسیر B<sub>A</sub> ..... ۵۷

شکل ۴-۱۳- منحنی های تنش- کرنش مهندسی برای نمونه های برنج ۶۰/۴۰ در سیکل های مختلف مسیر BC..... ۵۸

شکل ۴-۱۴- منحنی های تنش- کرنش مهندسی برای نمونه های برنج ۶۰/۴۰ در سیکل های مختلف مسیر C..... ۵۸

شکل ۴-۱۵- تغییرات استحکام کششی و ازدیاد طول در بر حسب سیکل های ARB در مسیرهای مختلف. .... ۶۰

شکل ۴-۱۶- طرح نمادین از توزیع کرنش برشی در سیکل های مختلف مسیر A..... ۶۳

شکل ۴-۱۷- طرح نمادین از توزیع کرنش برشی در سیکل های مختلف مسیر BA ، الف) نمایش توزیع کرنش برشی در سیکل ۵، ب) توزیع کرنش برشی در صفحه ND-RD نسبت به جهت نورد اولین سیکل، پ) توزیع کرنش برشی در صفحه ND-TD نسبت به جهت نورد اولین سیکل. .... ۶۴

شکل ۴-۱۸- طرح نمادین از توزیع کرنش برشی در سیکل های مختلف مسیر BC ، الف) نمایش توزیع کرنش برشی در سیکل ۵، ب) توزیع کرنش برشی در صفحه ND-RD نسبت به جهت نورد اولین سیکل، پ) توزیع کرنش برشی در صفحه ND-TD نسبت به جهت نورد اولین سیکل. .... ۶۵

شکل ۴-۱۹- طرح نمادین از توزیع کرنش برشی در سیکل های مختلف مسیر C..... ۶۶

شکل ۴-۲۰- تغییرات سختی در صفحه RD-TD با افزایش تعداد سیکل ARB در مسیرهای مختلف. .... ۶۷

شکل ۴-۲۱- توزیع ریزسختی در صفحه ND-RD برای نمونه های اولیه، ۲، ۳ و ۵ سیکل ARB شده در مسیرهای A و C..... ۶۷

شکل ۴-۲۲- توزیع ریزسختی در صفحه ND-RD برای نمونه های اولیه، ۳، ۴ و ۵ سیکل ARB شده در مسیرهای BA و BC..... ۶۸

شکل ۴-۲۳- منحنی تغییرات میکرو کرنش بر حسب تعداد سیکل در مسیرهای مختلف. .... ۷۰

شکل ۴-۲۴- منحنی تغییرات اندازه دانه فرعی بر حسب تعداد سیکل در مسیرهای مختلف. .... ۷۱

شکل ۴-۲۵- منحنی تغییرات متوسط چگالی نابجایی بر حسب تعداد سیکل در مسیرهای مختلف. .... ۷۲

شکل ۴-۲۶- تصاویر سطوح شکست سیکل های ۲ و ۵ در مسیرهای مختلف. .... ۷۳

شکل ۴-۲۷- تصویر سطح شکست اطراف فصل مشترک سیکل ۵ از مسیر A..... ۷۴

شکل ۴-۲۸- تصویر سطح شکست اطراف فصل مشترک سیکل ۵ از مسیر BA..... ۷۵

شکل ۴-۲۹- تصویر سطح شکست اطراف فصل مشترک سیکل ۳ از مسیر BC..... ۷۶

شکل ۴-۳۰- تصویر سطح شکست اطراف فصل مشترک سیکل ۳ از مسیر C..... ۷۶

شکل ۴-۳۱- نسبت شکست برشی به شکست دیمپلی رخ داده در سطح نمونه های شکست با افزایش سیکل در مسیرهای مختلف. .... ۷۷

## فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>جدول</u>
۶.....	جدول ۱-۲- خلاصه‌ای از عمده‌ترین فرایندهای SPD.....
۱۱.....	جدول ۲-۲- تغییرات هندسی مواد در حین ARB.....
۱۸.....	جدول ۳-۲- تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی برخی از آلیاژهای ARB شده.....
۴۳.....	جدول ۱-۳- ترکیب شیمیایی برنج مورد استفاده در پژوهش حاضر (درصد وزنی).....
۴۵.....	جدول ۲-۳- تصویر نمادین از نحوه چرخش ورق‌ها در مسیرهای مختلف.....
۴۶.....	جدول ۳-۳- خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در مسیرهای مختلف.....

## چکیده

در پژوهش حاضر تاثیر مسیرهای کرنش در فرایند نورد تجمعی پیوندی (ARB) بر خواص مکانیکی و ریزساختاری نوارهای برنج ۶۰/۴۰ مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از نورد تجمعی پیوندی مستقیم (مسیر A) و همچنین نورد تجمعی پیوندی با زاویه‌های چرخش ۹۰ درجه در جهت پادساعتگرد (مسیر B<sub>C</sub>)، ±۹۰ (مسیر B<sub>A</sub>) و ۱۸۰ درجه (مسیر C) استفاده شد. در فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیر A نمونه‌ها در سیکل دوم چرخانده نشد در حالی که در مسیرهای B<sub>A</sub>، B<sub>C</sub> و C نمونه‌ها پس از نورد در سیکل اول به ترتیب ۹۰ درجه در جهت پادساعتگرد، ±۹۰ و ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر جهت نورد چرخانده شد. جهت انجام این پژوهش از نوارهای برنج ۶۰/۴۰ تجاری با ضخامت ۱ میلی‌متر و در ابعاد ۱۰ × ۶ سانتی‌متر برای مسیرهای A و C و ۶ × ۶ سانتیمتر برای مسیرهای B<sub>A</sub> و B<sub>C</sub> استفاده گردید. فرایند نورد تجمعی پیوندی با مسیرهای مختلف تا ۵ سیکل (کرنش معادل ۴/۰) روی ورق‌های برنجی با موفقیت انجام شد. به منظور بررسی شرایط پیوندهای ایجاد شده در طی فرایند نورد تجمعی پیوندی از میکروسکوپ نوری استفاده شد. نتایج نشان داد که در مسیرهای A و C با افزایش تعداد سیکل، پیوندهای ایجاد شده در سیکل‌های قبل بهبود یافته‌است ولی در مسیرهای B<sub>A</sub> و B<sub>C</sub>، پیوندهای ایجاد شده در فصل مشترک عدم چسبندگی بیشتری را نسبت به دو مسیر قبل نشان دادند. به منظور بررسی خواص مکانیکی ورق‌های نورد تجمعی شده با مسیرهای مختلف از آزمون کشش تک‌محوری و سختی‌سنجی استفاده شد. نتایج نشان داد که استحکام کششی و سختی در تمامی مسیرها تا سه برابر نمونه اولیه افزایش یافت. همچنین برای درک بهتر کرنش برشی اعمالی، این کرنش برشی شبیه‌سازی شده و برای هر چهار مسیر ارائه و با هم مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کرنش‌های برشی نشان داد که کرنش‌های برشی بیشترین مقدار خود را زمانی دارا هستند که مسیر کرنش در حین فرایند تغییر نکند. علاوه بر این، اندازه دانه‌های فرعی ایجاد شده، چگالی نابجایی‌ها و میکروکرنش در ورق‌های ARB شده با آنالیز داده‌های پراش پرتوایکس و به کارگیری روش ریت‌ولد در هر مسیر تخمین و با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد که اندازه دانه فرعی در هر مسیر به طور متوسط بین ۳۲-۲۲ nm بود. بررسی سطوح شکست نمونه‌های نورد تجمعی شده در مسیرهای مختلف پس از آزمون کشش با میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت و مشخص شد که شکست در ورق‌های تولید شده در هر چهار مسیر دارای شکست نرم با مکانیزم دیپیل‌های برشی است.

**کلمات کلیدی:** تغییر شکل پلاستیک شدید، برنج ۶۰/۴۰ تک‌فاز، استحکام کششی، کرنش برشی

## فصل اول

### مقدمه

مواد با دانه‌های فوق‌ریز که متوسط اندازه دانه آن‌ها کمتر از  $1\ \mu\text{m}$  می‌باشد، خواص مکانیکی بسیار خوبی را از خود نشان می‌دهند. اما برای مصارف عملی نیازمند استفاده از مواد حجمی<sup>۱</sup> است. تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از بهترین راه‌ها برای دستیابی به مواد حجمی و ریزدانه کمتر از میکرومتر است. قبل از استفاده از فرایندهای تغییر شکل شدید، ریز کردن دانه‌ها توسط نورد معمولی و آنیل صورت می‌گرفت که منجر به تبلور مجدد و رشد دانه می‌شد. به کارگیری این نوع روش‌ها نیازمند تجهیزات و علم بسیاری است که استفاده از این روش را دشوار کرده است. کمترین اندازه دانه به دست آمده با استفاده از مسیر تبلور مجدد و رشد دانه حدود  $10\ \mu\text{m}$  گزارش شده است. بیشترین کاهش ضخامت در نورد معمولی که در صنعت انجام می‌گیرد حدود ۸۰-۶۰ درصد بوده است که بر اساس کرنش حقیقی فون میسس  $1/86 \sim 1/06$  است؛ این در حالی است که در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، کرنش پلاستیک بالاتر از ۴/۰ به مواد اعمال می‌شود. این کرنش بسیار شدید منجر به ایجاد ریزساختار فوق‌ریزدانه در مواد می‌گردد. ویژگی منحصر به فرد تغییر شکل پلاستیک شدید، ثابت ماندن ابعاد نمونه در حین فرایند است که در نتیجه آن می‌توان کرنش‌های بسیار بالایی را به ماده اعمال کرد.

برخی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید عبارتند از فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان (ECAP)<sup>۲</sup>، پیچش تحت فشار بالا (HPT)<sup>۳</sup>، فرایند برش پیوسته نوار محبوس شده (CCSS)<sup>۴</sup>، فرایند اکستروژن و فشار سیکلی (CEC)<sup>۵</sup>، فرایند موج و صاف کردن مکرر (RCS)<sup>۶</sup>، اکستروژن هیدرواستاتیکی (HE)<sup>۷</sup> و فورج چند

<sup>1</sup> Bulk

<sup>2</sup> Equal channel angular pressing

<sup>3</sup> High pressure torsion

<sup>4</sup> Continuous confined shearing

<sup>5</sup> Cyclic extrusion compression

<sup>6</sup> Repetitive corrugation and straightening

<sup>7</sup> Hydrostatic extrusion

محوری (MDF)<sup>۱</sup> را می‌توان نام برد که می‌تواند کرنش‌های پلاستیک شدیدی را به مواد وارد کنند و ساختارهای ریزدانه تولید کنند. این روش‌ها معمولاً دارای تجهیزات سنگین و گران‌قیمتی هستند. در سال ۱۹۹۸ با ابداع روش جدیدی به نام نورد تجمعی - پیوندی (ARB)<sup>۲</sup>، فرایندی جدید با اعمال کرنش بالا و روشی ساده مطرح شد. در این روش دو سطح یکسان از ورق چربی‌زدایی و برسکاری شده سپس روی هم قرار می‌گیرند و طی یک سیکل نورد با اعمال کرنش ۵۰٪ ضخامتی همانند ورق‌های اولیه و طولی دو برابر طول ورق‌های اولیه را به دست می‌آورند. با نصف کردن ورق به دست آمده و تکرار فرایند می‌توان کرنش‌های بالایی را در نمونه ایجاد کرد. از آنجایی که نورد کردن فرایند ساده‌ای است و فقط نیاز به دستگاه نورد دارد لذا این روش، این روش به دلیل صرفه اقتصادی و رایج بودن به سرعت مورد توجه محققین قرار گرفت. محققین آلیاژهای بسیاری را با انرژی نقص چیدن بالا مورد مطالعه قرار دادند و ریزساختارهایی با ابعاد نانومتری را به دست آوردند.

با توجه به اینکه انرژی نقص چیدن فاکتور بسیار مهمی در فرایند تغییرشکل پلاستیک محسوب می‌گردد و روی خواص مکانیکی و ریزساختاری مواد موثر است و با توجه به این موضوع که تغییرشکل پلاستیک متفاوتی در مواد با انرژی نقص چیدن پایین رخ می‌دهد، بنابراین شناخت رفتار مواد با انرژی نقص چیدن پایین مثل مس و برنج حائز اهمیت است. بررسی تاثیر نورد تجمعی و مقاطع روی آلیاژهایی با انرژی نقص چیدن پایین مثل برنج ۶۰/۴۰ به دلیل رفتار متفاوت این مواد در مقابل تغییرشکل پلاستیک ضروری به نظر می‌رسد. این آلیاژ با دارا بودن خواص مطلوب از جمله قابلیت شکل پذیری بالا، مقاومت نسبتاً بالا در مقابل خوردگی و خاصیت منحصر به فرد میکروبی‌زدایی آن، استفاده از این آلیاژ را در محیط‌های پاکیزه مورد توجه زیادی قرار داده است. با تغییر خواص مکانیکی این آلیاژ می‌توان دامنه استفاده از آن را وسیع‌تر کرد.

در پژوهش حاضر، با تغییر مسیر کرنش در حین فرایند نورد، مطالعه‌ای در زمینه تاثیرات این تغییر کرنش بر مشخصه‌یابی، خواص مکانیکی و رفتار شکست برنج ۶۰/۴۰ صورت گرفته است. بر این اساس، در فصل دوم، مفاهیم علمی در فرایند صورت گرفته و تغییر خواص ناشی از این فرایند و در فصل سوم، مواد و روش پژوهش مورد استفاده ذکر شده است. در فصل چهارم، به تفصیل به بررسی تاثیر مسیر کرنش بر تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و رفتار شکست نمونه‌های تولید شده با مسیرهای متفاوت کرنشی پرداخته شده است. در انتها نیز در فصل پنجم، نتایج حاصل از این پژوهش ارائه گردیده است.

<sup>۱</sup> Multi-directional forging

<sup>۲</sup> Accumulative roll-bonding

## فصل دوم مروری بر مطالب

### ۲-۱ تغییر شکل پلاستیک شدید

ریز کردن دانه‌ها وابسته به راهی اقتصادی برای بهبود خواص مکانیکی ساختار مواد است. از آنجایی که کاهش اندازه دانه مواد فلزی زیر  $5\mu\text{m}$  توسط یک فرایند کار سرد معمولی و فرایند تبلور مجدد کار سختی است، بنابراین استفاده از روش‌هایی مثل بازپخت نانو پودرها، آلیاژسازی مکانیکی (MM)<sup>۱</sup> و تبلور مجدد یک ماده آمورف جامد گسترش یافت تا موادی ریزدانه با دانه‌هایی در مقیاس نانومتری تولید شود. به هر حال، هر یک از این روش‌ها به سختی می‌توانند مواد ریزدانه حجمی و بدون عیب تولید کنند [۱]. اخیراً برای ریزدانه کردن از فرایندهای منحصر به فرد اعمال کرنش شدید برای ریزدانه کردن مواد فلزی با متوسط اندازه دانه زیر  $1\mu\text{m}$  مثل فرایند پیچش تحت فشار بالا، فرایند فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان و آلیاژسازی مکانیکی برای پودرهای فلزی استفاده می‌شود. این روش‌ها برای تولید مواد با متوسط اندازه دانه زیر میکرومتر هستند اما مشکل این روش‌ها این است که توانایی کافی برای تولید مواد حجمی را ندارند [۲]. نمونه‌های تولید شده در این روش را حجمی می‌گویند چرا که در هر راستا بیش از  $1000$  دانه تولید می‌کنند. به این مواد در ابتدا به دلیل اندازه دانه زیر  $1\mu\text{m}$  و جدایش دانه‌های آن‌ها با مرزدانه‌های بزرگ زاویه، مواد فوق‌ریزدانه گفته می‌شد که پس از انجام آزمایش پراش پرتو ایکس مشخص شد که اندازه دانه آن‌ها در حدود  $50-40\text{ nm}$  است و از آن پس به این مواد، مواد نانو ساختار حجمی گفته می‌شود [۳].

توجه به فرایندهای تولید مواد حجمی فوق‌ریزدانه و کاربرد آن‌ها در دهه گذشته به طور قابل توجهی افزایش یافته است. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)<sup>۲</sup>، اشاره به روش‌های مختلف شکل‌دهی فلز دارد که ممکن است کرنش بسیار بالایی را به مواد اعمال کند تا منجر به اصلاح استثنایی دانه‌ها گردد. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد

<sup>۱</sup> Mechanical milling

<sup>۲</sup> Severe plastic deformation



در فرایندهای SPD اعمال کرنش بسیار شدید بدون تغییر در ابعاد کلی نمونه است. از دیگر ویژگی‌های آن این است که شکل، وابسته به هندسه ابزار مخصوص به کار رفته، از جریان یافتن ماده جلوگیری می‌کند و در نتیجه باعث تولید فشار هیدرواستاتیک قابل توجهی می‌گردد. حضور این فشار هیدرواستاتیک برای دستیابی به کرنش‌های بالا و ایجاد چگالی بالایی از نقص در شبکه، برای اصلاح اندازه دانه‌ها ضروری است. اصل فرایند SPD که همان حفظ منطقی ابعاد نمونه است در فرایندهایی مثل پیچش تحت فشار بالا، اکستروژن دومحوری و فورج چندمحوری نشان داده شده است. اما فرایندهای SPD دیگری مثل کشش و فشار تک محوری، اکستروژن تک محوری، نورد و کشش را با اینکه کرنش بسیار شدیدی روی قطعه اعمال می‌کنند، مستثنی می‌کنند. استفاده از روش‌های SPD اجازه تولید نسبتاً آسان مواد فوق‌ریزدانه حجمی را با نزدیک به ۱۰۰۰ دانه در هر جهت بدون تغییر حجم می‌دهد. مواد فوق‌ریزدانه تولید شده با این روش، دارای دانه‌هایی با ساختارهای فرعی میکرومتری است و به طور کلی، نانو مواد SPD را تشکیل می‌دهند. تکنیک‌های متعددی برای فرایند SPD در حال حاضر در دسترس است. روش‌های عمده که در حال حاضر برای ساخت مواد فوق‌ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از ARB، ECAP، MDF، HPT، RCS، CEC [۳].

هدف اصلی فرایندهای SPD، تولید قطعات استحکام بالا و سبک وزن و سازگار با محیط زیست است. در فرایندهای شکل‌دهی معمولی مثل نورد، آهن‌گری و اکستروژن تحمیل کرنش پلاستیک به ماده معمولاً کمتر از ۲/۰ است. وقتی چند پاس نورد، کشش و اکستروژن برای کرنش بیشتر از ۲/۰ انجام می‌گیرد، ضخامت و قطر ماده آنقدر کم می‌شود که برای قطعات ساختاری قابل استفاده نیست. بسیاری از فرایندهای SPD به دلیل تحمیل کرنش زیاد روی مواد حجمی، بدون تغییرات ابعادی گسترش یافتند [۳].

یکی از روش‌هایی که می‌تواند برای تولید پیوسته مواد حجمی به کار رود، روش ARB است که می‌توان با استفاده از این روش به متوسط اندازه دانه زیر  $1\ \mu\text{m}$  دست یافت [۲]. فرایند ARB نیز از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است. در این فرایند مقدار زیادی از کرنش بدون تغییر ابعاد در ورق باقی می‌ماند و ساختار ورق را به طور قابل توجهی ریز می‌گرداند. مواد ARB شده دارای تنش تسلیم و تنش کششی بالایی هستند اما میزان تغییر طول و توانایی کرنش سختی پایینی دارند. محدودیت انعطاف‌پذیری کششی، گستردگی استفاده از مواد و ساختار آن‌ها را محدود می‌کند. انعطاف‌پذیری ضعیف آن‌ها معمولاً به عدم تعادل مرزدانه‌های ریزساختار و انرژی بالای ذخیره شده درونی که منجر به تغییر شکل پلاستیک شدید می‌گردد، نسبت داده می‌شود [۱].

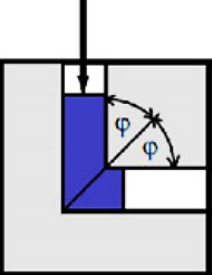
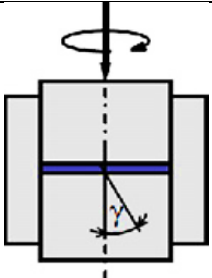
شکل ساختار در مواد تغییر شکل شدید یافته معمولاً ریزساختاری‌های سلولی شکل با مرزهای کم زاویه (LAGB)<sup>۱</sup> است و تفاوت آن‌ها با مواد نانو ساختار تولید شده به روش SPD این است که ساختارهای نانو SPD، دارای ساختار فوق‌ریزدانه، با دانه‌هایی با مرزهای زاویه بزرگ (HAGB)<sup>۲</sup> هستند [۴].

عمده‌ترین فرایندهای SPD در جدول ۱-۲ خلاصه شده است که شکل نمادین فرایند و کرنش پلاستیک قابل دسترس را نشان می‌دهد. فرایندهای ECAP، ARB و HPT به خوبی برای تولید مواد فوق‌ریزدانه مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شده است که مواد تولید شده با این روش‌ها دارای متوسط اندازه دانه زیر  $1\ \mu\text{m}$  با مرزهایی که بیشتر آن‌ها بزرگ زاویه‌اند، هستند.

<sup>1</sup> Low-angle grain boundaries

<sup>2</sup> High-angle grain boundaries

جدول ۲-۱- خلاصه‌ای از عمده‌ترین فرایندهای SPD [۵]

نام فرایند	شکل نمادین	کرنش حاصل از فرایند
ECAP		$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \phi$ <p>n = تعداد سیکل</p>
HPT		$\varepsilon = \frac{\gamma(r)}{\sqrt{3}}, \gamma(r) = n \frac{2\pi r}{t}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• n = تعداد سیکل</li> <li>• r = فاصله تا مرکز دیسک</li> <li>• t = ضخامت دیسک</li> </ul>

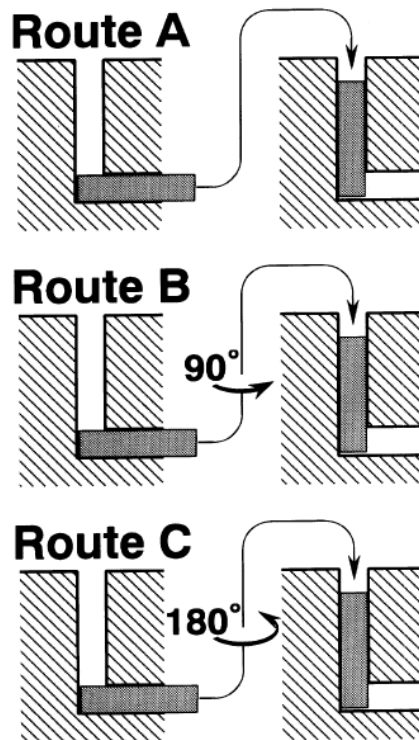
فرایند ARB در قسمت‌های بعدی به طور کامل توضیح داده خواهد شد، بنابراین در ادامه اشاره کوتاهی به فرایندهای مهم دیگر مثل ECAP و HPT خواهد شد.

### ۲-۱-۱ فرایند فشار تحت کانال زاویه‌ای با مقطع یکسان (ECAP)

یکی از گسترده‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که شکل نمادینی از آن در جدول ۲-۱ نشان داده شده است. در این فرایند ماده تحت فشار از درون یک قالب زاویه‌دار عبور می‌کند که به دلیل تغییر مسیر حرکت، دچار کرنش برشی شدید می‌گردد. در این فرایند به دلیل اینکه ابعاد نمونه در هر پاس تغییر نمی‌کند، برای رسیدن به کرنش‌های بیشتر اعمال فشار بارها انجام می‌گیرد [۴]. میدان‌های تنش فشاری هیدرواستاتیک در این فرایند یک مزیت مهم است که مانع از شکست مواد می‌گردد [۶]. ابعاد قطعات به کار رفته در این فرایند کوچک است؛ با این حال این فرایند قابلیت تولید مواد حجمی را دارد. ولی به دلیل پیوسته نبودن محصولات، تک باری<sup>۱</sup> محسوب می‌شوند [۳]. در این روش، کرنش‌های متفاوتی را می‌توان روی نمونه‌ها اعمال کرد. با توجه به جدول بالا، این کرنش‌ها می‌تواند از طریق متفاوت بودن زاویه قالب و یا چرخش نمونه بین هر پاس اعمال گردد. شکل ۲-۱ چرخش نمونه با مسیرهای مختلف را بین هر پاس نشان می‌دهد. در مسیر A، نمونه بدون چرخش در بین پاس در قالب قرار گرفته و کرنش بر آن اعمال می‌گردد. در مسیر B و C، نمونه بین هر پاس به ترتیب ۹۰ و ۱۸۰ درجه مطابق شکل چرخیده می‌شوند [۷]. البته لازم به ذکر است که مسیرهای مختلفی تحت عنوان B<sub>30</sub> (چرخش ۳۰ درجه نمونه بین هر پاس)، B<sub>45</sub> (چرخش ۴۵ درجه‌ای نمونه بین هر پاس)، B<sub>60</sub> (چرخش ۶۰ درجه‌ای نمونه بین هر پاس)، B<sub>C</sub> (چرخش

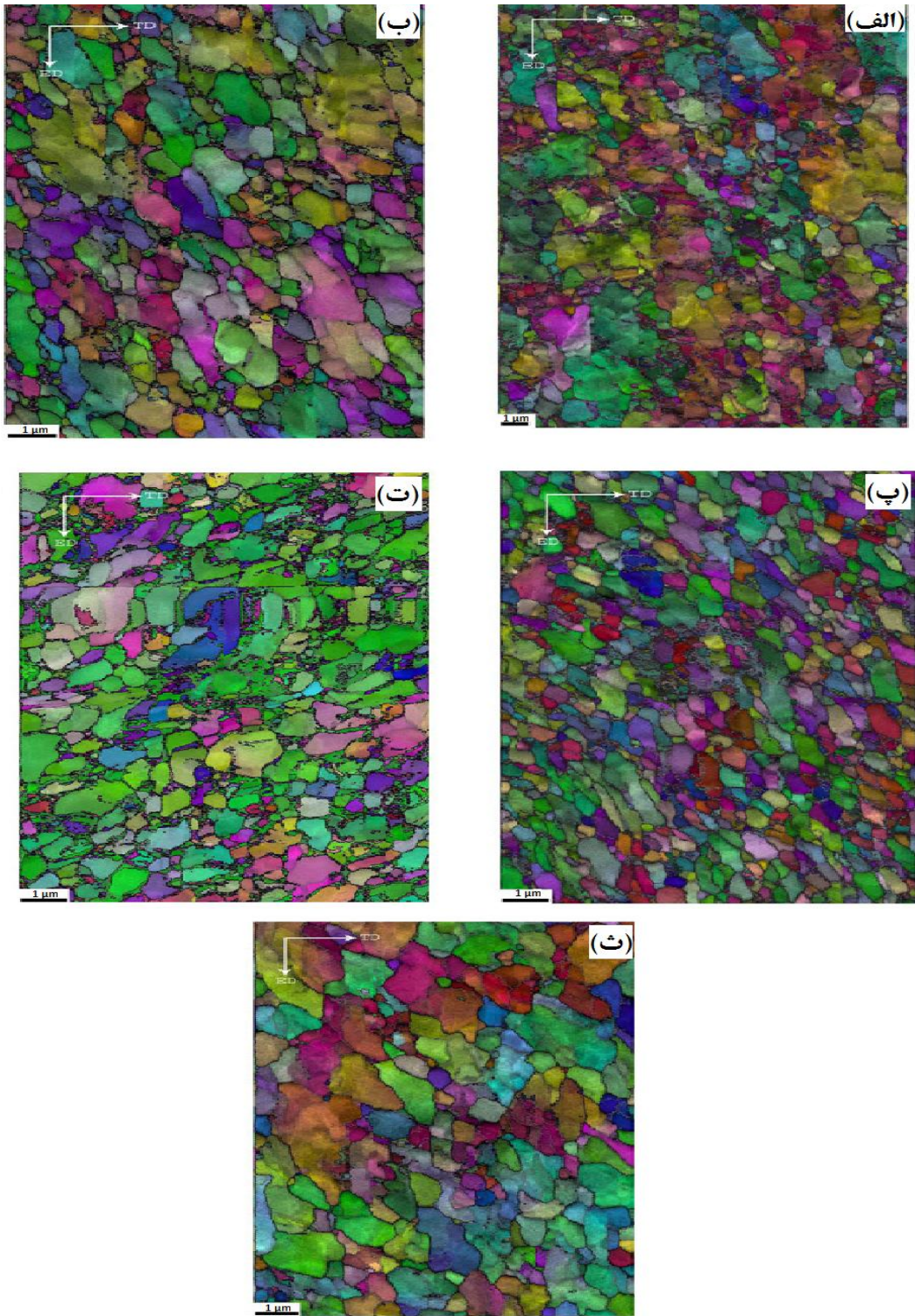
<sup>۱</sup>Batch

۹۰ درجه‌ای نمونه بین هر پاس در جهت ساعتگرد)،  $B_A$  (چرخش ۹۰ درجه‌ای متناوب نمونه بین هر پاس در جهت ساعتگرد و پادساعتگرد) [۸ و ۹]، برای فرایند ECAP گزارش شده است. در این فرایند خواص نمونه‌های چرخیده شده بستگی زیادی به نحوه چرخش و زاویه آن دارد. سلیمیان فرد و همکارانش [۸ و ۱۰] میله‌ی مسی را در فرایند ECAP با زاویه قالب ۱۲۰ درجه در مسیرهای مختلف  $A$ ،  $B_{30}$ ،  $B_{45}$ ،  $B_{60}$  و  $B_C$  برای ۲۰ پاس در هر مسیر انجام دادند. شکل ۲-۲ تصاویر پراش الکترونی برگشتی (EBSD<sup>۱</sup>) از ریزساختار برنج ECAP شده در مسیرهای  $A$ ،  $B_{30}$ ،  $B_{45}$ ،  $B_{60}$  و  $B_C$  را نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر پیداست، مسیر کرنش روی نمونه  $B_{45}$  بیشترین تاثیر را گذاشته و باعث ریز شدن دانه‌ها شده است. اما در مسیر  $B_C$  و  $A$  کمترین تاثیر را روی اندازه دانه‌ها گذاشته است. بنابراین مسیر کرنش اعمالی در یک فرایند ثابت تاثیر زیادی را روی اندازه دانه می‌گذارد آن‌ها نشان دادند که با توجه به قطر دانه‌ها، اصلاح اندازه دانه در مسیرهای مختلف متفاوت است ( $B_{45} > B_{60} > B_{30} > B_C > A$ ). همچنین در مسیرهای مختلف با پارامترهای ریزساختاری متفاوتی از جمله اندازه دانه، ماده رفتار متفاوتی را دارد. برای مثال، آن‌ها نشان دادند که در مسیر  $B_{60}$  دانه‌های هم‌محوری وجود دارد در حالی که در مسیر  $B_C$  ریزساختار شامل دانه‌های کشیده شده است.



شکل ۲-۱- مسیرهای  $A$ ،  $B$  و  $C$  در فرایند ECAP [۷].

<sup>۱</sup> Electron backscatter diffraction



شکل ۲-۲- نقشه EBSD مشاهده شده از راستای طولی نمونه‌های مس ECAP شده بعد از ۲۰ پاس در پنج مسیر مختلف، الف) مسیر A، ب) مسیر B<sub>30</sub>، پ) مسیر B<sub>45</sub>، ت) مسیر B<sub>60</sub> و ث) مسیر B<sub>C</sub> [۸].