

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی مواد

## تولید و مشخصه یابی آلیاژ آلومینیم - منیزیم ۵۰۸۶ فوق ریز دانه توسط فرایند اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار (ECAP)

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش شناسایی و انتخاب مواد

محمد حسین خالقی فر

اساتید راهنما

دکتر محمود مرآتیان

دکتر غلامرضا آریانپور

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب.....	هفت
فهرست شکل ها.....	نه
فهرست جداول.....	یازده
چکیده.....	۱
فصل اول: مقدمه.....	۲
فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی.....	۵
۱-۲ مقدمه.....	۵
۲-۲ معرفی و تاریخچه.....	۶
۳-۲ معرفی آلیاژهای آلومینیم - منیزیم.....	۸
۴-۲ اساس روش اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار.....	۱۰
۵-۲ مسیرهای فرایند در اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار.....	۱۴
۶-۲ نقش پارامترهای خارجی بر فرایند ECAE/P.....	۱۴
۱-۶-۲ تأثیر مسیرهای فرایند.....	۱۵
۲-۶-۲ تأثیر زاویه برخورد کانال ها.....	۱۸
۳-۶-۲ تأثیر سرعت اکستروژن.....	۲۱
۴-۶-۲ تأثیر دمای اکستروژن.....	۲۱
۵-۶-۲ افزایش دمای نمونه در فرآیند ECAE/P.....	۲۴
۶-۶-۲ تأثیر زاویه انحنای خارجی.....	۲۴
۷-۶-۲ تأثیر فشار عقبی.....	۲۵
۷-۲ مشخصات ساختاری ماده پس از فرآیند اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار.....	۲۶
۱-۷-۲ فلزات خالص و محلول های جامد.....	۲۶
۲-۷-۲ آلیاژهای دوفازی.....	۲۷
۳-۷-۲ ساختار مرزدانه ها.....	۲۸
۸-۲ تغییرات ریزساختاری در حین تغییر شکل پلاستیک.....	۲۹
۹-۲ اثر نوع مسیر فرایند اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار بر ریزساختار حاصل.....	۳۱
۱۰-۲ خواص مکانیکی ماده پس از فرآیند ECAE/P.....	۳۲
۱-۱۰-۲ استحکام و چکش خواری.....	۳۳
۲-۱۰-۲ رفتار سوپر پلاستیک.....	۳۵
۱۱-۲ چگالش پودر توسط فرآیند ECAE/P.....	۳۶
۱۲-۲ جمع بندی.....	۳۷

۳۸	فصل سوم: مواد و روش تحقیق .....
۳۸	۱-۳ ماده مورد آزمایش .....
۳۹	۲-۳ انجام فرایند ECAP .....
۴۱	۳-۳ آزمون سختی .....
۴۱	۴-۳ آزمون کشش .....
۴۲	۵-۳ بررسی سطح شکست .....
۴۲	۶-۳ ارزیابی میکروسکوپی نمونه‌ها پس از فرایند .....
۴۲	۱-۶-۳ نمونه‌سازی .....
۴۳	۲-۶-۳ بررسی‌های میکروسکوپی .....
۴۳	۷-۳ مطالعات پراش پرتو ایکس (XRD) .....
۴۴	۱-۷-۳ آنالیز اندازه دانه‌های کریستالی و کرنش داخلی متوسط شبکه با استفاده از داده‌های پراش پرتو ایکس .....
۴۵	۲-۷-۳ اندازه گیری بافت .....
۴۶	فصل چهارم: نتایج و بحث .....
۴۶	۱-۴ مقدمه .....
۴۶	۲-۴ انتخاب دمای مناسب جهت انجام فرایند .....
۴۸	۳-۴ بررسی تغییرات خواص مکانیکی .....
۴۸	۱-۳-۴ سختی .....
۴۸	۲-۳-۴ تغییرات استحکام و ازدیاد طول .....
۵۴	۴-۴ شکست‌نگاری .....
۵۸	۵-۴ بررسی نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (XRD) .....
۵۸	۱-۵-۴ بررسی تغییرات جهت گیری صفحات کریستالی قبل و بعد از فرایند ECAP .....
۶۳	۲-۵-۴ بررسی تغییرات اندازه دانه فرعی یا کریستالیت و کرنش داخلی شبکه قبل و بعد از فرایند ECAP .....
۶۸	۶-۴ بررسی ریزساختار .....
۷۱	۷-۴ جمع بندی .....
۷۳	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها .....
۷۳	۱-۵ نتیجه گیری .....
۷۵	۲-۵ پیشنهادها .....
۷۶	مراجع .....

## فهرست شکل ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۱.....	شکل ۱-۲ اساس روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار.....
۱۱.....	شکل ۲-۲ طرح نمادین فرایند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار.....
۱۲.....	شکل ۳-۲ ماهیت تغییر شکل در فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار.....
۱۳.....	شکل ۴-۲ تغییرات کرنش معادل بر حسب زوایای قالب.....
۱۴.....	شکل ۵-۲ انواع مسیرها در فرایند ECAE/P.....
۱۶.....	شکل ۶-۲ موقعیت صفحات برش در فرآیند ECAE/P بر حسب عبورهای اکستروژن.....
۱۷.....	شکل ۷-۲ تغییر شکل المان دوبعدی در صفحات X، Y و Z بر حسب تعداد عبور فرایند ECAE/P.....
۱۹.....	شکل ۸-۲ قالب‌های استفاده شده برای بررسی تعیین زاویه برخورد کانال‌ها.....
۲۰.....	شکل ۹-۲ تاثیر زاویه برخورد کانال‌ها و شعاع داخلی و خارجی کانال بر میزان تخریب نمونه.....
۲۲.....	شکل ۱۰-۲ تغییرات تنش تسلیم نمونه نسبت به تغییرات سرعت اکستروژن برای آلیاژ Al-1%Mg.....
۲۳.....	شکل ۱۱-۲ تصاویر TEM بدست آمده از ریزساختار نهایی نمونه آلومینیوم آلیاژی ۵۰۵۲.....
۲۴.....	شکل ۱۲-۲ تغییرات اندازه دانه و فاکتور شکل نسبت به تغییرات دمای اکستروژن.....
۲۹.....	شکل ۱۳-۲ مدل ارائه شده برای مرز دانه‌های غیر تعادلی حاوی نابعایی‌ها.....
۳۰.....	شکل ۱۴-۲ مرز نابعایی‌های تشکیل شده در حین تغییر شکل پلاستیک.....
۳۴.....	شکل ۱۵-۲ تغییرات استحکام و چکش‌خواری بر حسب کرنش معادل در فرآیند ECAE/P و نورد سرد.....
۳۴.....	شکل ۱۶-۲ نتایج آزمایش کشش مس پس از فرآیند ECAE/P و نورد سرد.....
۳۹.....	شکل ۱-۳ قالب ساخته شده برای فرایند ECAP.....
۴۰.....	شکل ۲-۳ پرس ۲۰۰ تن مورد استفاده برای فرایند ECAP.....
۴۰.....	شکل ۳-۳ نمونه‌های Al-Mg 5086 با عبورهای متفاوت پس از فرایند ECAP.....
۴۱.....	شکل ۴-۳ دستگاه کشش Hounsfield مدل H50KS.....
۴۲.....	شکل ۵-۳ مشخصات نمونه استاندارد کششی مورد استفاده.....
۴۳.....	شکل ۶-۳ سطوح انتخاب شده نمونه برای بررسی میکروسکوپی و آنالیز XRD.....
۴۷.....	شکل ۱-۴ شکل‌ظاهری نمونه‌های Al-Mg پس از یک مرتبه عبور فرایند ECAP در دمای.....
۴۹.....	شکل ۲-۴ تغییرات سختی بر حسب تعداد عبور در مسیرهای چرخش A و Bc.....
۵۰.....	شکل ۳-۴ منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های آنیل شده و ECAP شده در مسیر A.....
۵۱.....	شکل ۴-۴ منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های آنیل شده و ECAP شده در مسیر Bc.....
۵۲.....	شکل ۵-۴ تغییرات استحکام کششی بر حسب تعداد عبور ECAP در دو مسیر A و Bc.....
۵۲.....	شکل ۶-۴ تغییرات درصد ازدیاد طول بر حسب تعداد عبور ECAP در دو مسیر A و Bc.....
۵۳.....	شکل ۷-۴ منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های تخت‌الاولیه، آنیل شده، ۱ مرتبه و ۲ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیرهای A و Bc.....
۵۴.....	شکل ۸-۴ نمایش شماتیک پدیده سیلان دندان‌های در نمودار تنش - کرنش.....
۵۴.....	شکل ۹-۴ نمایش شماتیک مکانیزم برش رسوبات توسط نابعایی‌ها.....

- شکل ۴-۱۰ تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌های آنیل شده و تا ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در مسیر A... ۵۵
- شکل ۴-۱۱ تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌های آنیل شده و ۱ تا ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در مسیر Bc..... ۵۷
- شکل ۴-۱۲ الگوی پراش پرتو ایکس در نمونه‌های آنیل شده و یک مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP..... ۵۹
- شکل ۴-۱۳ الگوی پراش پرتو ایکس در نمونه‌های ۶ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در دو مسیر A و Bc..... ۶۰
- شکل ۴-۱۴ الگوی پراش پرتو ایکس در نمونه‌های ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در دو مسیر A و Bc..... ۶۱
- شکل ۴-۱۵ نمودار پارامتر بافت بر حسب صفحات کریستالی در نمونه یک مرتبه عبور داده شده از قالب ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۶ نمودار پارامتر بافت بر حسب صفحات کریستالی در نمونه ۶ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیر A ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۷ نمودار پارامتر بافت بر حسب صفحات کریستالی در نمونه ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیر A ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۸ نمودار پارامتر بافت بر حسب صفحات کریستالی در نمونه ۶ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیر Bc..... ۶۳
- شکل ۴-۱۹ نمودار پارامتر بافت بر حسب صفحات کریستالی در نمونه ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیر Bc ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۰ تغییرات  $\beta\text{Cos}(\theta)$  بر حسب  $\text{Sin}(\theta)$  برای نمونه یک مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP..... ۶۴
- شکل ۴-۲۱ تغییرات  $\beta\text{Cos}(\theta)$  بر حسب  $\text{Sin}(\theta)$  برای نمونه ۶ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در مسیر A.... ۶۵
- شکل ۴-۲۲ تغییرات  $\beta\text{Cos}(\theta)$  بر حسب  $\text{Sin}(\theta)$  برای نمونه ۶ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در مسیر Bc... ۶۵
- شکل ۴-۲۳ تغییرات  $\beta\text{Cos}(\theta)$  بر حسب  $\text{Sin}(\theta)$  برای نمونه ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در مسیر A... ۶۶
- شکل ۴-۲۴ تغییرات  $\beta\text{Cos}(\theta)$  بر حسب  $\text{Sin}(\theta)$  برای نمونه ۱۰ مرتبه عبور داده شده از قالب در فرایند ECAP در مسیر Bc... ۶۶
- شکل ۴-۲۵ تغییرات اندازه دانه کریستالی و کرنش داخلی متوسط شبکه بر حسب تعداد عبور از قالب در فرایند ECAP در مسیر A... ۶۸
- شکل ۴-۲۶ تغییرات اندازه دانه کریستالی و کرنش داخلی متوسط شبکه بر حسب تعداد عبور از قالب در فرایند ECAP در مسیر Bc... ۶۸
- شکل ۴-۲۷ تصویر EBSD از ریز ساختار Al-Mg5086 پس از آنیل ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۸ تصویر EBSD از ریز ساختار Al-Mg5086 پس از ۶ مرتبه عبور از قالب در مسیر Bc ..... ۷۰

## فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۸.....	جدول ۱-۲ ترکیب چند آلیاژ مهم از آلیاژهای آلومینیم- منیزیم (درصد وزنی).....
۱۰.....	جدول ۲-۲ برخی خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم- منیزیم .....
۳۸.....	جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم - منیزیم ۵۰۸۶ استفاده شده .....

## چکیده

آلومینیم و آلیاژهای آن پس از فولاد پرمصرف‌ترین آلیاژهای فلزی هستند. آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۶ دارای ویژگی‌هایی از جمله عدم قابلیت عملیات حرارتی سختی رسوبی، قیمت پایین، استحکام به وزن نسبتاً بالا، مقاومت به خستگی بالا، مقاومت به خوردگی عالی در برابر آب شور، شکل‌پذیری خوب و جوش‌پذیری مناسب می‌باشد. مهمترین ویژگی فرایندهای تغییر شکل شدید پلاستیکی، اعمال کرنش بسیار زیاد به قطعه بدون ایجاد تغییر در سطح مقطع آن می‌باشد. در میان این فرایندها روش اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار به دلیل قابلیت تولید قطعه و امکان تولید تجاری و صنعتی بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، فرایند ECAP بر روی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۶ تا ۱۰ عبور در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در دو مسیر چرخش A و BC و در قالب با زاویه ۱۲۰ درجه انجام شد. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های این آلیاژ از آزمون‌های کشش تک محوری و سختی سنجی استفاده شد. سطح شکست نمونه‌های کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. بافت نمونه‌ها به کمک دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) و مقایسه نتایج الگوی پراش نمونه‌ها و محاسبه پارامتر بافت ارزیابی شد. ریزساختار نمونه‌ها با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم EBSD ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که سختی نمونه‌ها در عبورهای اولیه از فرایند در هر دو مسیر با افزایش قابل توجهی (از ۶۲ ویکرز به ۱۰۷ ویکرز با ۲ مرتبه عبور از مسیر BC) روبه‌رو بودند و در ادامه با افزایش تعداد عبور، نرخ افزایش سختی کم شد و در مقطعی نیز در مسیر A سختی کاهش یافت. استحکام کششی نمونه‌ها (از ۲۶۷ MPa به ۳۱۶ MPa با ۲ مرتبه عبور از مسیر BC) نیز روندی مشابه سختی داشت، گرچه نوسانات آن در عبورهای بالاتر بیشتر بود. درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با عبور اول از فرایند با کاهش چشمگیری روبه‌رو شد به طوریکه از ۳۴/۷ درصد به ۲۲/۴ درصد رسید و در ادامه نرخ کاهش درصد ازدیاد طول کم شد. تصاویر سطح شکست نمونه‌های کشش نشان دهنده افزایش تعداد حفره‌ها و در نتیجه ریز شدن آن‌ها متناسب با افزایش تعداد عبور است. مطالعات بافت در نمونه‌ها نشان داد که صفحات (۲۲۰) بافت غالب نمونه‌های ECAP شده را تشکیل داده‌اند، گرچه بافت غالب نمونه اولیه صفحات (۱۱۱) و (۳۱۱) بوده است. تصاویر ریزساختار بیانگر این بود که اندازه دانه از حدود ۲۰ میکرون در نمونه اولیه به کمتر از یک میکرون در نمونه ۶ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیر BC رسیده است. ریز شدن دانه‌ها با تئوری تفکیک دانه‌ها و شکل‌گیری مرزهای با زاویه زیاد و همچنین پدیده بازایی و تبلور مجدد دینامیکی قابل توجه می‌باشد. به نظر می‌رسد با توجه به نتایج، نمونه ۴ مرتبه عبور داده شده از قالب در مسیر BC با سختی ۱۱۱ ویکرز و استحکام کششی ۳۳۷ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول ۲۱ درصد بهترین نتایج خواص مکانیکی و ریزساختار را دارد. در این نمونه با توجه به افزایش سختی و استحکام، درصد ازدیاد طول در حد مناسبی است که منطبق با هدف اصلی این پروژه یعنی افزایش استحکام آلیاژ با جلوگیری از کاهش زیاد انعطاف‌پذیری نسبت به روش‌های دیگر شکل‌دهی می‌باشد.

## کلمات کلیدی

آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۶، تغییر شکل پلاستیکی شدید، اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار (ECAE/P)، سختی، استحکام کششی، شکست نگاری، بافت، ریزساختار



## فصل اول

### مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن پس از فولاد پرمصرف‌ترین آلیاژهای فلزی هستند. ویژگی‌های کم‌نظیر آلیاژهای آلومینیم از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب و هدایت الکتریکی و گرمایی زیاد سبب شده که این آلیاژها در زمینه‌های مختلف مهندسی همچون صنایع حمل و نقل، نظامی، هوا-فضا، دریایی، الکترونیک استفاده شوند. از این میان آلیاژهای گروه ۵۰۰۰ با داشتن خواص ویژه نظیر قیمت پایین، استحکام بالا، مقاومت به خوردگی مناسب و قابلیت شکل‌پذیری خوب به صورت گسترده در صنایع هوا و فضا، دریایی و کشتی‌سازی استفاده می‌شوند. آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۶ دارای ویژگی‌هایی از جمله عدم قابلیت عملیات حرارتی، قیمت پایین، استحکام نسبتاً بالا، مقاومت به خستگی بالا، مقاومت به خوردگی عالی در برابر آب شور، شکل‌پذیری خوب و جوش‌پذیری مناسب می‌باشد.

خصوصیات مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای آلومینیم به ترکیب و ریزساختار آنها بستگی دارد. افزودن عناصر آلیاژی به آلومینیم خالص، سبب بهبود خواص آن می‌شود. اگرچه عناصر زیادی در آلیاژسازی آلومینیم استفاده می‌شوند ولی تعداد محدودی از آنها هستند که در فاز جامد، حلالیت کافی برای ایجاد آلیاژ مورد نظر را دارند. عناصر آلیاژی اصلی در آلومینیم را مس، منگنز، سیلیسیم، منیزیم و روی تشکیل می‌دهد. سایر عناصر در مقادیر کمتر اغلب با اهداف خاصی به ترکیب آلیاژ افزوده می‌شود. از جمله کروم که مقاومت به خوردگی تنش را افزایش می‌دهد. منگنز سبب افزایش استحکام می‌شود. تیتانیوم و زیرکونیوم نیز اغلب به منظور بهبود ریزساختار، استفاده می‌شود. عناصر ناخالصی نظیر سرب و آهن نیز بطور ناخواسته وجود دارند. این عناصر اثر سودمندی ندارند و تولیدکنندگان آلیاژهای آلومینیم سعی می‌کنند تا میزان این ناخالصی‌ها را به حداقل برسانند.

آلیاژهای آلومینیم به دو گروه کار شده<sup>۱</sup> و ریختگی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. آلیاژهای کار شده توسط کار مکانیکی همراه با عملیات حرارتی به محصولاتی نظیر ورق، لوله، قطعات آهنگری و قطعات اکستروژن تبدیل می‌شوند. در صورتی که آلیاژهای ریختگی توسط روش‌های مختلف ریخته‌گری و به شکل نهایی تبدیل می‌شوند. اغلب سازه‌های آلومینیمی از جنس کار شده هستند.

آلیاژهای کار شده به دو زیرگروه آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی و آلیاژهای قابل عملیات حرارتی تقسیم می‌شوند. در آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی، افزایش استحکام توسط کار سرد یا کرنش سختی تأمین می‌شود. گروه‌های آلیاژی ۱۰۰۰ (آلومینیم خالص)، ۳۰۰۰ (آلومینیم - منگنز)، ۴۰۰۰ (آلومینیم - سیلیسیم) و ۵۰۰۰ (آلومینیم - منیزیم) جزء این گروه هستند. این گروه جهت سهولت شکل‌پذیری در شرایط آنیل نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گروه قابل عملیات حرارتی با حضور عناصر آلیاژی خاص، به واسطه عملیات حرارتی رسوب سختی<sup>۳</sup>، آلیاژی با استحکام بالا تولید می‌شود. این گروه شامل آلیاژهای گروه ۲۰۰۰ (آلومینیم - مس)، ۶۰۰۰ (آلومینیم - منیزیم - سیلیسیم) و ۷۰۰۰ (آلومینیم - روی) است.

خواص فیزیکی و مکانیکی مواد پلی کریستال (فلزات) تحت تاثیر عوامل مختلفی می‌باشد که در میان آنها اندازه دانه یکی از مهمترین و در اغلب موارد تاثیر گذارترین عامل شناخته شده است. به طور کلی عملیات ریز کردن دانه‌ها یک راه مؤثر و نسبتاً اقتصادی برای بهبود خواص مکانیکی مواد فلزی می‌باشد. در همین راستا، در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر فرایند، ساختار و رفتار مکانیکی مواد با اندازه دانه زیر میکرون انجام شده است. امروزه از عملیات ترمومکانیکی برای ریز کردن اندازه دانه آلیاژهای تجاری و صنعتی استفاده می‌شود. این عملیات شامل سیکل‌های ویژه حرارتی توأم با اعمال تغییر شکل مکانیکی است. حداقل اندازه دانه تولید شده توسط فرایندهای ترمومکانیکی حدود چند میکرون است و به دلیل ماهیت حرارتی - مکانیکی این فرایندها و وقوع پدیده‌های بازیابی و تبلور مجدد، تولید نمونه با اندازه دانه کمتر از یک میکرون بسیار دشوار است. تلاش‌های زیادی انجام گرفته تا فرایندهای متفاوتی جهت تولید مواد بسیار ریزدانه<sup>۴</sup> (UFG) با اندازه دانه کمتر از یک میکرون و حتی در حد نانومتر ابداع شود. تولید قطعات مواد پلی کریستال بسیار ریزدانه باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر اندازه کسری از میکرون، دانه‌های هم‌محور ریز در ساختار به صورت همگن توزیع شود.

طی دهه گذشته تلاش‌های بسیاری جهت ابداع و توسعه روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیکی برای تولید نمونه‌های فلزی بسیار ریزدانه انجام شده است. مهمترین ویژگی فرایندهای تغییر شکل شدید، اعمال کرنش بسیار زیاد به قطعه بدون ایجاد تغییر در سطح مقطع آن می‌باشد. تغییر شکل شدید فلزات به روش‌های گوناگون اعمال می‌شود که در میان آن‌ها روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار<sup>۵</sup> (ECAE/P) به دلیل قابلیت تولید قطعه و امکان تولید تجاری و صنعتی بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این روش نمونه فلزی درون یک قالب دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان قرار می‌گیرد. زاویه محل تقاطع دو کانال می‌تواند بیشتر از صفر و کمتر از ۱۸۰ درجه

1 - Wrought alloys

2 - Cast alloys

3 - Precipitation hardening

4 - Ultra-Fine Grain

5 - Equal Channel Angular Extrusion/Pressing

باشد. نمونه فلزی در یکی از کانال‌ها قرار گرفته و توسط یک پیستون تحت فشار و با ایجاد کرنش بسیار زیاد سیلان یافته و از کانال دیگر خارج می‌شود. در هر عبور تغییر شکل برشی زیادی بدون تغییر در سطح مقطع و عاری از تخلخل در ماده اعمال می‌گردد. با کاهش اندازه دانه فلز به کمتر از میکرون خواص مکانیکی و فیزیکی قابل توجهی در نمونه ظاهر می‌شود که این خواص امروزه بطور وسیعی در مراکز پژوهشی تخصصی در حال بررسی و تحقیق است.

به طور مثال در نمونه‌های آلومینیم خالص استحکام دو تا سه برابر افزایش یافته ضمن آنکه بر خلاف سایر فرایندهای استحکام بخشی انعطاف پذیری آن نیز بالا می‌رود. از لحاظ ریزساختار، متوسط اندازه دانه و یکنواختی توزیع آن، دو عامل مهم و تاثیرگذار است. در اغلب تحقیقات صورت گرفته بر روی فرایند ECAE/P، هدف رسیدن به کمترین مقدار اندازه دانه و توزیع همگن تر اندازه دانه در کل محصول است. تحقیقات نشان می‌دهد که عوامل بسیار زیادی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی محصول فرایند ECAE/P موثر است و بخش اندکی از آن مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون فرایند ECAE/P به صورت تحقیقاتی و آزمایشگاهی بر روی طیف وسیعی از فلزات و آلیاژهای فلزی مانند آلومینیم، مس، نیکل، طلا، منیزیم، تیتانیوم، زیرکونیوم، فولاد، تنگستن، همچنین آلیاژهای یوتکتیک و یوتکتوئید انجام شده و در حال انجام است. یکی از خواص حاصل از اعمال فرایند ECAE/P روی فلزات کاهش اندازه دانه و در نتیجه افزایش استحکام در عین حفظ چقرمگی است. استفاده از آلومینیم و آلیاژهای آن در این فرایند به دلیل خواص فلز آلومینیم مانند چگالی پایین و نسبت استحکام به وزن بالا، مورد توجه محققان است.

آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۶ از آن جمله آلیاژهای آلومینیم-منیزیم است که به دلیل خواص ویژه‌ای نظیر استحکام بالا، سبکی و مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی بالا نسبت به آلیاژهای معمول آلومینیم، کاربرد زیادی در صنایع دریایی، کشتی سازی، اتومبیل سازی و نظامی دارد. عملیات حرارتی ناپذیر بودن آلیاژهای سری ۵۰۰۰ امکان افزایش استحکام این آلیاژ را از طریق عملیات رسوب سختی غیرممکن کرده است در صورتیکه افزایش استحکام این آلیاژ بدون کاهش بسیار زیاد انعطاف‌پذیری آن توسط ریزکردن دانه‌ها می‌تواند کاربرد آن را در صنعت (به خصوص صنایع نظامی) بیش از پیش کند. لذا با توجه به اهمیت کاربرد و همچنین به علت عدم تحقیقات کافی در مورد تاثیر فرایند ECAE/P بر روی خواص این آلیاژ، در این پژوهش سعی می‌شود با تغییر پارامترهای فرایند ECAE/P مانند دمای اکستروژن، دمای نمونه و مسیر چرخش نمونه، تا حد امکان، خواص آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۶ پس از انجام فرایند ECAE/P بر روی آن، مورد بررسی قرار گیرد.

در ادامه گزارش پایان نامه در فصل دوم، مروری بر تحقیقات انجام گرفته در گذشته شده و پارامترهای موثر بر فرایند ECAP بررسی شده است. در فصل سوم با عنوان مواد و روش تحقیق، روش انجام فرایند و آزمایشات انجام گرفته در این پژوهش آورده شده و در فصل نتایج و بحث به ارزیابی و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده پرداخته شده است. در نهایت در فصل نتیجه گیری جمع بندی کلی آزمایشات و نتایج آورده شده است.

## فصل دوم

### مروری بر منابع مطالعاتی

#### ۲-۱- مقدمه

ریز شدن اندازه دانه یکی از روش‌های مهم افزایش استحکام مواد است که نسبت به سایر روش‌های استحکام بخشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این روش می‌توان در عین رسیدن به حد مناسبی از استحکام، به میزان چکش‌خواری<sup>۱</sup> خوبی نیز دست یافت. در حالی که در روش‌های دیگر، افزایش استحکام ماده با کاهش چکش‌خواری آن همراه است. به علاوه در این روش کنترل خواص مکانیکی راحت‌تر می‌باشد. به طور کلی رابطه بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پچ<sup>۲</sup> و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{\left(\frac{-1}{2}\right)} \quad (1-2)$$

در این رابطه،  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $\sigma_0$  مقاومت شبکه،  $d$  اندازه دانه و  $k$  ضریب ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد. رابطه فوق نشان می‌دهد که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد. به عبارت دیگر با ریز شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می‌یابد. بر همین اساس از گذشته تا به حال، فرآیندهای ایجاد مواد با دانه‌بندی ریز، حائز اهمیت بوده است. مشکلی که در عمل برای ایجاد مواد ریزدانه وجود دارد این است که معمولاً تولید مواد با دانه‌های ریزتر منجر به افزایش هزینه و تولید قطعاتی با ابعاد کوچکتر می‌شود. با این حال بهترین راه تولید مواد

---

1 - Ductility

2 - Hall- Petch

ریزدانه با هزینه کمتر و ابعاد نسبتاً بزرگتر، استفاده از روش‌های حرارتی - مکانیکی<sup>۱</sup> می‌باشد. در این روش‌ها ماده را (معمولاً طی چند مرحله) تحت فرآیندهای تغییر شکل و آنیل قرار می‌دهند، تا در نهایت به ساختاری با دانه بندی ریز دست یابند. البته باید توجه نمود که در این روش‌ها حداکثر می‌توان به اندازه دانه‌هایی در محدوده چند ده تا چند صد میکرون دست یافت. گرچه به منظور به کارگیری ماده در فرآیندهای سوپرپلاستیک، با کنترل دقیق فرآیند ترمومکانیکال و پارامترهای تولید، امکان دست‌یابی به دانه‌های کوچکتر در محدوده ۱ تا ۱۰ میکرون نیز وجود دارد [۱].

## ۲-۲- معرفی و تاریخچه

عموماً مواد پلی کریستال را از نظر دانه بندی به سه دسته تقسیم می‌کنند:

- مواد دانه درشت<sup>۲</sup>: موادی که اندازه دانه آن‌ها بزرگتر از یک میکرون است.
- مواد با اندازه دانه‌های کوچکتر از میکرون (بین ۱۰۰ نانومتر تا یک میکرومتر): این دسته به مواد با دانه بندی بسیار ریز<sup>۳</sup> (UFG) نیز معروف هستند.
- مواد نانو کریستال<sup>۴</sup> (NC): این دسته مواد دارای اندازه دانه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد.

به طور کلی مواد UFG و یا NC را به دو روش تولید می‌نمایند [۲]:

- روش‌های «پایین - بالا»<sup>۵</sup>
- روش‌های «بالا - پایین»<sup>۶</sup>

در روش‌های «پایین - بالا» مواد UFG و یا NC را از کنار هم قراردادن و چین اتم‌های مجزا در کنار هم و یا تجمع ذرات نانو پودری ایجاد می‌کنند. چگالش در محیط گاز خنثی<sup>۷</sup> [۳]، رسوب‌دهی الکتریکی<sup>۸</sup> [۴]، آسیاب کاری گلوله‌ای<sup>۹</sup> [۵] و آسیاب کاری در دماهای بسیار کم<sup>۱۰</sup> [۶]، مثال‌هایی از روش «پایین - بالا» می‌باشند. مشکل عمده این روش‌ها کوچک بودن ابعاد قطعه تولیدی است که این مسئله باعث محدود شدن کاربرد آن‌ها شده است. همچنین قطعه تولید شده دارای مقداری تخلخل<sup>۱۱</sup> و آلودگی است که در حین فرآیند ساخت قطعه حاصل می‌شود.

در روش‌های «بالا - پایین»، در ابتدا از یک ماده حجیم با دانه بندی درشت استفاده می‌کنند. سپس با انجام فرآیندهای خاصی، اندازه دانه آن را تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می‌دهند. این روش‌ها عمدتاً بر پایه ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روش‌های تغییر شکل شدید<sup>۱۲</sup> (SPD) معروف می‌باشند [۷].

---

1 - Thermomechanical Processing  
 2 - Coarse Grain Materials  
 3 - Ultra-Fine Grain Materials  
 4 - Nano Crystalline Materials  
 5 - Bottom-UP  
 6 - UP-Bottom  
 7 - Inert Gas Condensation  
 8 - Electrodeposition  
 9 - Ball Milling  
 10 - Cryomilling  
 11 - Porosity  
 12 - Severe Plastic Deformation

روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید در واقع نوعی از فرآیندهای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده هستند که به کمک آن‌ها می‌توان بدون تغییر قابل ملاحظه در ابعاد قطعه، کرنش‌های بسیار زیاد و دانسیته بالایی از نابعی‌ها را در ماده ایجاد کرد و با تغییر آرایش آن‌ها به مرزخانه‌های با زاویه کوچک<sup>۱</sup> و تبدیل آن‌ها به مرزخانه‌های با زاویه بزرگ<sup>۲</sup>، بزرگ<sup>۳</sup>، موادی با اندازه دانه کوچک‌تر از میکرون و یا نانومتر تشکیل داد. لازم به ذکر است که در روش‌های معمول معمول شکل دهی مانند نورد و اکستروژن، به دلیل کوچک شدن سطح مقطع قطعه در حین فرآیند، امکان دست‌یابی به کرنش‌های بسیار زیاد وجود ندارد و کرنش‌های ایجاد شده برای تولید مواد UFG و یا NC کافی نمی‌باشند.

معروف‌ترین روش‌های SPD عبارتند از:

- اکستروژن یا فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار<sup>۳</sup> (ECAE/P) [۸].

- پیچش تحت فشار زیاد<sup>۴</sup> (HPT) [۹].

- اتصال نورد تجمعی<sup>۵</sup> (ARB) [۱۰].

از میان روش‌های SPD روش ECAE/P به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارد، توجه بسیاری از محققین را در دو دهه اخیر به خود معطوف کرده است.

روش ECAE/P در اوایل دهه ۸۰ توسط سگال<sup>۶</sup> و همکارانش در یک انستیتو واقع در مینسک<sup>۷</sup> در اتحاد جماهیر شوروی<sup>۸</sup> سابق ابداع گردید [۱۱]. هدف ابتدایی از ابداع این روش، معرفی یک فرآیند تغییر شکل جدید بود که از طریق آن بتوان کرنش‌های پلاستیک برشی زیادی در ماده ایجاد نمود. پس از آن در اوایل دهه ۹۰، ولیف<sup>۹</sup> و همکارانش [۱۲ و ۱۳] نشان دادند که این روش قابلیت ایجاد مواد با دانه بندی بسیار ریز (کوچک‌تر از میکرون) را دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مواد ایجاد شده از این روش نسبت به مواد دانه درشت، خواص ویژه‌ای از جمله استحکام بسیار زیاد و قابلیت سوپرپلاستیک در نرخ کرنش‌های بیشتر و دماهای کمتر، از خود نشان می‌دهند. معرفی روش ECAE/P به عنوان یک روش مؤثر برای تولید مواد با دانه‌بندی بسیار ریز، همراه با خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه، علاقه بسیاری از محققین را برای به کارگیری این روش و اعمال آن بر روی مواد مختلف در پی داشته است. به همین دلیل، تاکنون برخلاف عمر کوتاه روش (حدود دو دهه) مقالات متعددی در ارتباط با این موضوع به چاپ رسیده است و هم‌اکنون نیز بسیاری از محققین در حال بررسی جنبه‌های مختلف تئوری و عملی فرآیند می‌باشند. در ادامه پس از معرفی آلیاژهای آلومینیم - منیزیم، اساس فرآیند ECAE/P همراه با جنبه‌های مختلف آن مورد بررسی قرار گرفته است.

1 - Low-Angle Grain Boundaries

2 - High-Angle Grain Boundaries

3 - Equal Channel Angular Extrusion/Pressing

4 - High Pressure Torsion

5 - Accumulative Roll Bonding

6 - Segal

7 - Minsk

8 - Soviet Union

9 - Valiev

### ۳-۲- معرفی آلیاژهای آلومینیم - منیزیم

آلیاژهای آلومینیم- منیزیم کاربرد وسیعی در صنایع خودروسازی، هوافضا، صنایع دریایی و کشتی سازی به عنوان سازه‌های سبک دارند. در این میان آلیاژ سختی ناپذیر آلومینیم ۵۰۸۶ به خاطر استحکام قابل قبول، مقاومت به خوردگی خوب، و دارا بودن قابلیت جوشکاری و پرداخت سطحی مناسب ترجیح داده می‌شود. بدیهی است که توسعه ظرفیت شکل پذیری در این ماده موجب افزایش توان بالقوه آن برای کاربردهای یاد شده خواهد گردید. در جدول ۱-۲ ترکیب چند آلیاژ مهم از آلیاژهای سری ۵۰۰۰ آورده شده است [۱۴].

جدول ۱-۲: ترکیب چند آلیاژ مهم از آلیاژهای آلومینیم- منیزیم (درصد وزنی) [۱۴]

AA No.	Composition, wt%														
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Specified Other Elements	Ti	Unspecified Other Elements		Al, min
													Each	Total	
5557	0.10	0.12	0.15	0.10 - 0.40	0.4 - 0.8	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.10	bal
5657	0.08	0.10	0.10	0.03	0.6 - 1.0	-	-	0.05	0.03	0.05	-	-	0.02	0.05	bal
5180	0.35 Si + Fe		0.10	0.20 - 0.70	3.5 - 4.5	0.10	-	1.7 - 2.8	-	-	0.08 - 0.25 Zr	0.06 - 0.20	0.05	0.15	bal
5082	0.20	0.35	0.15	0.15	4.0 - 5.0	0.15	-	0.25	-	-	-	0.10	0.05	0.15	bal
5182	0.20	0.35	0.15	0.20 - 0.50	4.0 - 5.0	0.10	-	0.25	-	-	-	0.10	0.05	0.15	bal
5083	0.40	0.40	0.10	0.40 - 1.0	4.0 - 4.9	0.05 - 0.25	-	0.25	-	-	-	0.15	0.05	0.15	bal
5183	0.40	0.40	0.10	0.50 - 1.0	4.3 - 5.2	0.05 - 0.25	-	0.25	-	-	-	0.15	0.05	0.15	bal
5086	0.40	0.50	0.10	0.20 - 0.70	3.5 - 4.5	0.05 - 0.25	-	0.25	-	-	-	0.15	0.05	0.15	bal

منیزیم در آلیاژهای تجاری آلومینیم در محدوده ۰/۵٪ تا ۱۳٪ وجود دارد. آلیاژهای آلومینیم- منیزیم دارای شکل پذیری فوق العاده، قابلیت ریخته‌گری خوب و استحکام بالا هستند. هرچه میزان آهن<sup>۱</sup> و سیلیسیم<sup>۲</sup> در این آلیاژها نسبت به دیگر آلیاژهای آلومینیم کمتر باشد، افزایش مقاومت به خوردگی را به دنبال خواهد داشت [۱۴]. گاهی اوقات جهت افزایش دمای تبلور مجدد به این آلیاژها مقادیری آهن و زیرکونیوم<sup>۳</sup> به آن اضافه می‌کنند. سیلیسیم جهت افزایش قابلیت سیلان، منگنز<sup>۴</sup> یا کروم جهت اصلاح اثر آهن، مس<sup>۵</sup> جهت کاهش خوردگی حفره‌ای ای و بالا بردن مقاومت به خوردگی عمومی و روی<sup>۶</sup> جهت افزایش استحکام و قابلیت ریخته‌گری، به این آلیاژها اضافه می‌شوند [۱۴].

- 
- 1 - Iron (Fe)
  - 2 - Silicon (Si)
  - 3 - Zirconium (Zr)
  - 4 - Manganese (Mn)
  - 5 - Copper (Cu)
  - 6 - Zinc (Zn)

در مواردی عنصر آنتیموان<sup>۱</sup> نیز به این جمع اضافه می‌شود و علت آن افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژ در آب دریا می‌باشد. اما تحقیقات اخیر اثر آنتیموان را رد کرده است. تیتانیوم<sup>۲</sup> نیز به همراه بور<sup>۳</sup> اغلب به عنوان جواهره‌زا اضافه میشوند. برلیوم و گاهی اوقات لیتیم<sup>۴</sup> جهت کاهش اکسیداسیون منیزیم در دماهای بالا و بخصوص در حالت مذاب به کار می‌روند. سرب<sup>۵</sup> نیز جهت بهبود قابلیت ماشین‌کاری با فرض آنکه هیچ کاهشی در استحکام و مقاومت به خوردگی ایجاد نشود، اضافه می‌شود. سیلیکون بخصوص در آلیاژهای با بیش از ۳ الی ۴ درصد منیزیم تولید ترکیب  $Mg_2Si$  می‌کند [۱۴].

در آلیاژهای تجاری آلومینیم-منیزیم، انجماد در کریستال‌های اولیه آلومینیم شروع شده و سپس بصورت دندریتی ادامه می‌یابد که همراه با قدری جدایش در مرزخانه‌ها یا بین بازوهای دندریتی است. در آلیاژهای با بیش از ۱۰٪ منیزیم و بیشتر از ۰/۵ درصد سیلیسیم، کریستال‌های اولیه  $Mg_2Si$  ممکن است در شکل‌های مکعبی یا هگزاگونال باشند [۱۴].

اگر درصد وزنی آهن بعلاوه منیزیم یا آهن بعلاوه کروم بالاتر از ۱ الی ۲ درصد باشد (بسته به میزان منیزیم) ممکن است کریستال‌های اولیه  $FeAl_3$ ،  $(FeMn)Al_6$ ،  $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$ ،  $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$  و  $(FeCr)Al_7$  تشکیل شوند. این کریستال‌های اولیه تاثیر حیاتی و مهمی بر استحکام ندارند اما بطور محسوسی بر قابلیت فرم‌پذیری، مقاومت به خستگی و سطح نهایی تاثیر می‌گذارند. این ادعا که افزودن منیزیم سبب کاهش اندازه کریستال  $FeAl_3$  و  $CoAl_9$  می‌شود، مورد تردید است [۱۴].

حد حلالیت منیزیم در آلیاژهای تجاری آلومینیم در محدوده ۲٪ در دمای اتاق تا حدود ۱۵ درصد در دمای  $720^\circ K$  می‌باشد. بنابراین بیشتر منیزیم بصورت محلول جامد بوده و تنها در شرایط غیرتعادلی یا حالت آنیل تولید  $Mg_5Al_8$  می‌کند. این ترکیب یک یوتکتیک منفصل در مرزخانه‌ها در آلیاژهای ریختگی می‌باشد [۱۵].

منیزیم به عنوان فاکتور اصلی کنترل‌کننده خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم است و دیگر عناصر آلیاژی با مشارکت با این عنصر تاثیرگذار می‌باشند. در جدول ۲-۲ بعضی از خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم به عنوان تابعی از ترکیب شیمیایی برای مقادیر متفاوت منیزیم آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود عملیات حرارتی به جز در مواردی که قطعه ریخته‌گری شده است، تاثیر قابل توجهی بر استحکام این آلیاژها ندارد به طوری‌که عملیات آنیل در پی پیرسازی طبیعی آلیاژ  $Mg$  ۷-۵ درصد می‌تواند درصد ازدیاد طول را حدود ۳ تا ۵ برابر بیشتر نماید [۱۵].

به عنوان مثال دیگری می‌توان ذکر کرد که خواص بدست آمده از آلیاژ حاوی  $Mg$  ۵-۴ درصد و  $Li$  ۳-۱ درصد پس از عملیات حرارتی، مشابه آلیاژ کارسرد شده حاوی  $Mg$  ۷-۵ درصد می‌باشد. در تولیدات کارشده اندازه دانه اثر کمی بر استحکام دارد. خواص آلیاژهای کارشده بستگی به حد کیفیت شمشی دارد که در کارخانه تولید شده است [۱۵].

---

1 - Antimony (Sb)  
2 - Titanium (Ti)  
3 - Bohr (B)  
4 - Lithium (Li)  
5 - Lead (Pb)  
6 - Wrought



جدول ۲-۲: برخی خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم-منیزیم [۱۵]

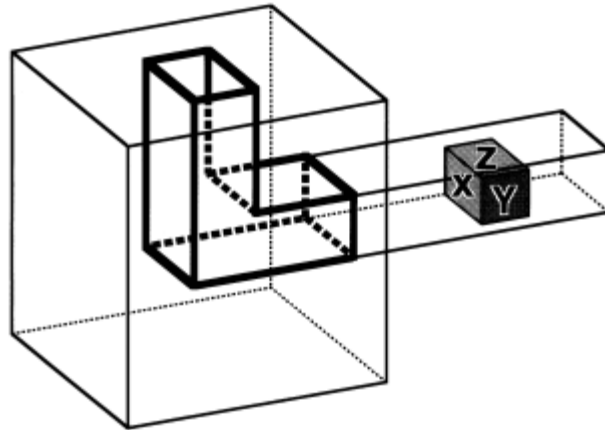
Alloy	Condition	Hardness (HV)	TS (MPa)	YS (MPa)	Elong. A (%)
0.5-1.5% Mg	Annealing	25-35	100-150	40-80	20-40
	Stress relieved	60-80	200-300	150-250	5-15
1% Mg, 1% Mn	Annealing	35-50	150-200	50-100	20-30
	Stress relieved	65-90	250-350	200-300	5-8
2-3% Mg, 0-2% Zn	Sand cast	50-60	150-200	50-100	3-7
	PM cast	50-70	170-220	70-150	3-8
	Annealing	40-55	150-250	80-150	25-35
	Stress relieved	65-90	250-350	200-300	6-15
5-7% Mg	Sand cast	50-60	150-200	70-150	4-10
	PM cast	60-80	200-300	100-200	5-12
	Annealing	60-80	250-350	120-250	20-30
	Stress relieved	80-100	400-500	250-350	10-15
8-12% Mg	Sand cast	70-90	150-300	100-200	3-8
	PM die cast	75-95	200-350	100-250	5-10
	Annealing	80-100	350-500	150-300	10-25
	Stress relieved	90-110	450-600	300-400	5-15
	Heat treated	120-140	400-500	250-350	20-25

#### ۲-۴- اساس روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار

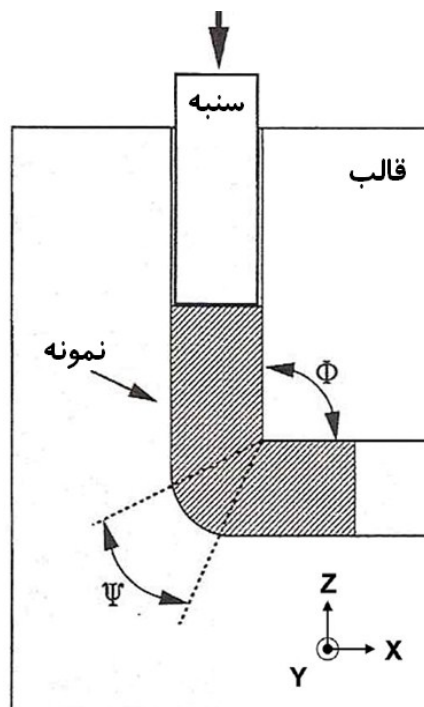
اساس روش ECAE/P در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. به طور کلی قالب ECAE/P دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان می‌باشد. جهت انجام فرایند، با توجه به ابعاد کانال‌ها، نمونه‌هایی با مقطع دایره یا مربع و با سطح مناسب ماشین کاری می‌شوند. طول نمونه‌ها معمولاً در حد ۶۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر و قطر مقطع آن‌ها در حد ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر انتخاب می‌شود. پس از اعمال روانسازهای مناسب، نمونه درون کانال ورودی قرار می‌گیرد. سپس به وسیله یک سمبه و استفاده از یک ماشین پرس، تحت فشار قرار گرفته و از این طریق به کانال خروجی اکستروژن می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲-۱ دیده می‌شود، معمولاً کانال‌ها عمود بر هم و بدون انحنای خارجی انتخاب می‌شوند. در حالت کلی زاویه برخورد کانال‌ها را با  $\Phi$  و زاویه انحنای خارجی آن‌ها را با  $\Psi$  نشان می‌دهند. طرح نمادین فرایند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

در حین فرایند به صورت ایده‌آل، نمونه از درون کانال‌ها به صورت یک ماده صلب<sup>۱</sup> حرکت می‌کند و در حالت ایده‌آل تغییر شکل آن، تنها به یک صفحه واقع در فصل مشترک کانال‌ها محدود می‌شود. در عمل به دلیل

اصطکاک، ماهیت ماده و شرایط هندسی قالب (مانند زوایای  $\Phi$  و  $\Psi$ ) ناحیه تغییر شکل ماده از یک صفحه به یک ناحیه تحت عنوان ناحیه تغییر شکل<sup>۱</sup> گسترش می یابد.



شکل ۱-۲: اساس روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار [۸].



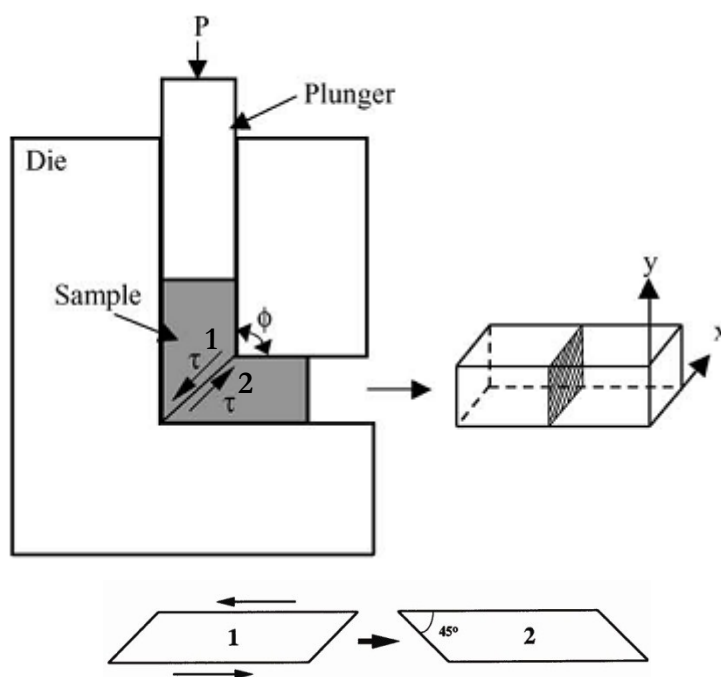
شکل ۲-۲: طرح نمادین فرایند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار [۱۶].

ماهیت تغییر شکل در فرایند ECAE/P از نوع برش ساده<sup>۲</sup> می باشد. شکل ۲-۳ یک قالب ECAE/P را در حالت دوبعدی با کانال‌های عمود بر هم و بدون انحنا<sup>۱</sup> خارجی نشان می دهد. با فرض ایده آل بودن تغییر شکل، المان شماره ۱ در کانال ورودی پس از اکستروژن شدن به کانال خروجی، به المان شماره ۲ تبدیل می شود. همان طور که در قسمت

1 - Deformation Zone  
2 - Simple Shear

پایینی شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، با توجه به نوع تغییر شکل این المان، ماهیت تبدیل المان شماره ۱ به المان شماره ۲ در فرایند ECAE/P از نوع برشی ساده می‌باشد [۱۶].

در بخش‌های بعد خواهیم دید که در قالب‌های با کانال‌های عمود برهم، در هر عبور از اکستروژن، کرنشی به اندازه تقریباً یک در ماده ایجاد می‌شود. بنابراین با توجه به ثابت بودن سطح مقطع نمونه، می‌توان با تکرار فرایند ECAE/P طی عبورهای مختلف، تغییر شکل‌های بسیار زیادی را در ماده ایجاد نمود. در حالی که در فرایندهای متداول شکل‌دهی مانند نورد و اکستروژن معمولی، اعمال تغییر شکل‌های زیاد بدون تغییر ابعاد نمونه امکان‌پذیر نمی‌باشد. قابلیت تکرار فرایند ECAE/P بر روی یک نمونه، علاوه بر ایجاد کرنش‌های بسیار زیاد در ماده، یک ویژگی مهم دیگر نیز به همراه دارد و آن امکان ایجاد مسیرهای کرنشی مختلف از طریق فعال شدن سیستم‌های لغزشی متفاوت می‌باشد. این کار با چرخش نمونه توسط مسیرهای مختلف بین عبورهای مختلف اکستروژن انجام می‌شود. بر همین اساس برای فرایند ECAE/P چهار مسیر متداول برحسب نوع چرخش نمونه بین عبورهای مختلف تعریف شده است که در بخش‌های بعد به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۲-۳: ماهیت تغییر شکل در فرایند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار [۹].

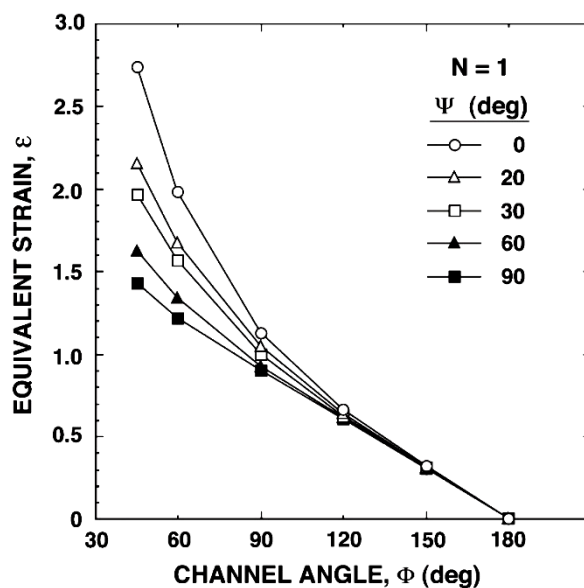
کرنش معادل ایجاد شده در هر عبور فرایند ECAE/P برابر است با [۱۶]:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (2-2)$$

واضح است که رابطه ۲-۲ در حالت  $\Psi = 0^\circ$  به رابطه ارائه شده توسط سگال<sup>۱</sup> [۱۷] که در زیر آمده است، تبدیل می شود:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cot(\Phi) \quad (۳-۲)$$

نتایج به دست آمده از رابطه ۳-۲ به صورت گرافیکی در شکل ۴-۲ نمایش داده شده است. در این شکل محدوده تغییرات  $\Phi$  بین  $45^\circ$  تا  $180^\circ$  و محدوده تغییرات  $\Psi$  بین  $0^\circ$  تا  $90^\circ$  در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل ۴-۲ در خصوص زوایای  $\Phi$  و  $\Psi$  به نتایج مختلفی می توان دست یافت. اول این که زاویه انحنای خارجی یعنی  $\Psi$  در مواردی که زاویه برخورد کانال ها یعنی  $\Phi$  بزرگ تر از  $90^\circ$  است، تأثیر چندانی بر کرنش معادل ندارد. دوم این که با کوچک شدن زوایای  $\Phi$  و  $\Psi$ ، کرنش معادل ایجاد شده در هر عبور افزایش می یابد. سوم اینکه در حالتی که  $\Phi = 90^\circ$  است، کرنش معادل ایجاد شده در هر عبور تقریباً برابر یا یک می باشد. نکته قابل توجه این است که نتایج آزمایشگاهی صحت روابط فوق را تأیید نموده اند [۲۶].



شکل ۴-۲: تغییرات کرنش معادل برحسب زوایای قالب [۲۶].

در سال ۱۹۹۷، وو<sup>۲</sup> و بیکر<sup>۳</sup> [۱۸] با اکسترود کردن لایه های رنگی پلاستیسین<sup>۴</sup> از درون یک قالب پلکسی گلاس<sup>۵</sup> نشان دادند که کرنش ایجاد شده در هر عبور بخصوص در لایه های میانی، تطابق بسیار خوبی با رابطه ۳-۲ دارد. علاوه بر این نیز شان<sup>۶</sup> [۱۹] در سال ۱۹۹۹ یک نمونه آلومینیمی را از مقطع طولی به دو قسمت تبدیل نمود. سپس با

1 - Segal  
2 - Wu  
3 - Biker  
4 - Plasticine  
5 - Plexiglass  
6 - Shan