

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١

بسمه تعالی



دانشکده مهندسی مکانیک

# بررسی تأثیر Zr بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Al-Zn تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

محمدامین شافعی

استاد راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

استاد مشاور:

دکتر محمد رجبی

بهمن ۱۳۹۲

## تعهدنامه

تقدیم به

مقدس ترین واژه‌ها در لغت‌نامه دلم:

پدرم، مهربان، مشفق، بردبار و حامی.

مادر مهربانم که زندگی‌ام را مدیون مهر و عطوفت آن می‌دانم.

خواهرم که نشانه لطف الهی در زندگی من است.

همسرم همراه همیشگی و پشتوانه‌ی زندگی‌ام.

## تقدیر و تشکر

جناب آقایان دکتر سید جمال حسینی پور و دکتر محمد رجبی اساتید راهنما و مشاورم:

شما روشنایی بخش تاریکی جان هستید و ظلمت اندیشه را نور می‌بخشید. چگونه سپاس گویم  
مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است. چگونه سپاس گویم تأثیر علم‌آموزی  
شما را که چراغ روشن هدایت را بر کلبه‌ی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل  
این همه عظمت و شکوه شما مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف.

همچنین از همه کارکنان و دانشجویان مستقر در آزمایشگاه ریختگری، آقایان گلی، مهندس  
طاهر نژاد، مهندس عزیزیان و سایر دوستان که با مشاوره علمی و کمک‌های لازم، بنده را در  
انجام این پروژه یاری نموده‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

## چکیده

در این تحقیق تأثیر زیرکونیوم بر ریزساختار آلیاژ Al-Zn-Mg-Cu (آلیاژ سری ۷×××) تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این پژوهش کنترل اندازه دانه و تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم است. بدین منظور پودرهای خالص عناصر مورد نظر در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ساعت آسیاب شدند. جهت بررسی تأثیر زیرکونیوم، نمونه‌های دیگر از این آلیاژ با افزودن ۱٪ و ۲٪ وزنی زیرکونیوم تولید شد. مشخصه‌های ریزساختاری و مورفولوژیکی نمونه‌ها توسط آزمون‌های XRD و SEM تعیین شدند و اندازه دانه بر اساس الگوی تفرق اشعه X محاسبه شد. سپس جهت تهیه نمونه برای بررسی خواص مکانیکی، پودرهای آسیاب شده، پرس سرد و سپس تحت آزمون میکرو سختی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان آلیاژسازی، اندازه دانه نمونه‌های بدون زیرکونیوم و دارای زیرکونیوم کاهش یافته و به حد نانو رسیده و به واسطه آن میزان سختی افزایش یافته است. سپس جهت تهیه نمونه آزمون فشار، پودرهای ۶۰ ساعت آسیاب شده، در دمای  $380^{\circ}\text{C}$  و فشار  $600\text{MPa}$  به مدت ۳۰ دقیقه پرس گرم شده و تحت آزمون فشار قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که زیرکونیوم باعث تثبیت اندازه دانه شده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. با استفاده از الگوی پراش اشعه ایکس نشان داده شده است که زیرکونیوم به دلیل تشکیل ترکیب پایدار  $\text{Al}_3\text{Zr}$  مانع رشد دانه‌ها در مرحله تف جوشی و تبلور مجدد می‌شود. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های پرس گرم شده، ترکیب بین فلزی  $\text{MgZn}_2$  بیش‌ترین تأثیر را بر روی افزایش سختی دارد و زیرکونیوم به‌عنوان تثبیت‌کننده اندازه دانه ایفای نقش می‌کند.

*کلمات کلیدی: آلیاژ Al-Zn-Mg، آلیاژسازی مکانیکی، اندازه دانه، خواص مکانیکی.*

## فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- شرح مسئله و هدف از پژوهش	۱
۲-۱- متالورژی پودر	۳
۱-۲-۱- تاریخچه	۳
۲-۲-۱- مراحل تولید به روش متالورژی پودر	۴
۳-۱- آلیاژسازی مکانیکی	۱۱
۱-۳-۱- تاریخچه	۱۱
۲-۳-۱- اصول و مبانی	۱۲
۳-۳-۱- عوامل مؤثر بر آلیاژسازی مکانیکی	۱۳
۴-۳-۱- مزایا و معایب	۱۴
۴-۱- ابزارهای اندازه‌گیری	۱۵
فصل ۲- مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده	۱۸
۱-۲- تولید پودر به روش آلیاژسازی مکانیکی	۱۸
۱-۱-۲- تأثیر زمان آلیاژسازی مکانیکی	۱۸
۲-۱-۲- تأثیر عناصر آلیاژی و مواد افزودنی	۲۵
۳-۱-۲- تأثیر ریزدانه‌گی بر خواص مکانیکی	۳۰

فصل ۳- روش تحقیق.....	۳۲
۳-۱- شرح فعالیت‌های انجام‌شده.....	۳۲
۳-۲- مواد اولیه.....	۳۳
۳-۳- فرآیند آلیاژسازی مکانیکی.....	۳۳
۳-۴- فرآیند پرس گرم.....	۳۴
۳-۵- مشخصه یابی ساختاری و فازی.....	۳۵
۳-۶- مشخصه یابی ریزساختاری و مورفولوژیکی.....	۳۷
۳-۷- میکروسختی سنجی.....	۳۸
۳-۸- تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها.....	۳۸
فصل ۴- نتایج و بحث.....	۳۹
۴-۱- فرآیند آلیاژسازی مکانیکی.....	۳۹
۴-۱-۱- مشخصه یابی ریزساختاری و مورفولوژیکی.....	۳۹
۴-۱-۲- آنالیز تفرق اشعه ایکس.....	۴۹
۴-۱-۳- خواص مکانیکی.....	۶۰
۴-۲- پرس گرم.....	۶۲
۴-۲-۱- آنالیز تفرق اشعه ایکس.....	۶۲
۴-۲-۲- مشخصه یابی ریزساختاری و مورفولوژیکی.....	۶۷
۴-۲-۳- میکروسختی سنجی.....	۷۰
۴-۲-۴- آزمون فشار.....	۷۱
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۷۳
۵-۱- نتیجه‌گیری.....	۷۳
۵-۲- پیشنهادات.....	۷۴





## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴.....	شکل (۱-۱) مراحل تولید یک قطعه به روش متالورژی پودر.....
۶.....	شکل (۲-۱) روش‌های مختلف مخلوط کردن پودر [۱۲].....
۷.....	شکل (۳-۱) مراحل تولید و اجزای قالب انعطاف‌پذیر: الف) قالب هنگامی که پودرها در درون آن قرار می‌گیرد، ب) هنگامی که سیال در آن شروع به اعمال نیرو می‌کند و ج) محصول نهایی تولیدشده [۱۲].....
۷.....	شکل (۴-۱) مراحل تولید و اجزای یک قالب سنتی [۱۲].....
۸.....	شکل (۵-۱) تغییرات چگالی قطعه‌ی خام در حین فشردن پودرها به روش سنتی: الف) شماتیکی از پودرها در حین فشرده شدن ب) نمودار تغییرات چگالی بر حسب فشار اعمالی [۱۲].....
۹.....	شکل (۶-۱) تشکیل شدن تدریجی گلوبی در حین تف جوشی [۱۰].....
۱۰.....	شکل (۷-۱) اثر دما بر چگالی خام ماده‌ی فشرده شده [۱۰].....
۱۱.....	شکل (۸-۱) تصویری از مکانیزم خرد شدن پودرها در آسیاب و تشکیل فاز بین فلزی [۱۳].....
۱۳.....	شکل (۹-۱) مراحل مختلف تغییر شکل پودرها در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی [۱۷].....
۱۶.....	شکل (۱۰-۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه Al-20 Mg پس از ۲۴ ساعت آسیاب [۱۳].....
۱۶.....	شکل (۱۱-۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه Ti-45 Al-2.4 Si پس از فرآیند پرس گرم [۱۳].....
۱۷.....	شکل (۱۲-۱) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه Ti-Al در دو حالت آمورف و کریستالی [۱۳].....
۲۰.....	شکل (۱-۲) الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ آلومینیم-روی در زمان‌های مختلف آسیاب کاری [۲۳].....

- شکل (۲-۲) تأثیر زمان آسیاب کاری بر روی پارامتر شبکه آلومینیم و جابجایی پیک (۱۱۱) آلومینیم در اثر آسیاب کاری در زمان‌های مختلف [۲۳]. ۲۰
- شکل (۳-۲) اندازه دانه آلومینیم و روی تابعی از زمان آسیاب کاری [۲۳]. ۲۱
- شکل (۴-۲) میزان سختی پودر و درصد کرنش شبکه تابعی از زمان آلیاژسازی [۲۳]. ۲۲
- شکل (۵-۲) الگوی پراش اشعه ایکس، (a) نمونه اولیه، (b) ۲ ساعت آسیاب شده و (c) ۳/۵ آسیاب شده [۸]. ۲۳
- شکل (۶-۲) تغییرات اندازه دانه و کرنش شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی [۸]. ۲۳
- شکل (۷-۲) تغییرات سختی نسبت به زمان آلیاژسازی [۸]. ۲۴
- شکل (۸-۲) تغییرات اندازه دانه، ثابت شبکه و کرنش شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی مکانیکی [۲۴]. ۲۴
- شکل (۹-۲) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه آنیل شده [۲۴]. ۲۵
- شکل (۱۰-۲) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های آلیاژسازی شده [۶]. ۲۷
- شکل (۱۱-۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه ۸۰ ساعت آسیاب شده [۶]. ۲۷
- شکل (۱۲-۲) الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های پرس گرم شده [۶]. ۲۸
- شکل (۱۳-۲) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های آسیاب شده [۳۰]. ۲۹
- شکل (۱۴-۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ۸۰ ساعت آلیاژسازی شده [۳۰]. ۲۹
- شکل (۱۵-۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری همراه با الگوی پراش الکترونی [۳۰]. ۳۰
- شکل (۱۶-۲) نمودار تنش کرنش برای نمونه‌های آسیاب شده [۳۲]. ۳۱
- شکل (۱-۳) الگوی عملیاتی مراحل تحقیق. ۳۲
- شکل (۲-۳) آسیاب گلوله‌ای مدل PM100 (Retsch, Germany). ۳۴
- شکل (۳-۳) قالب و سنبه‌های فرآیند پرس گرم و سرد. ۳۵
- شکل (۴-۳) دستگاه آزمون پراش اشعه ایکس X'Pert Pro MPD (PANalytical). ۳۶
- شکل (۵-۳) رسم نمودار  $\beta \cos \theta$  بر حسب  $\sin \theta$  جهت تعیین اندازه دانه [۱۳]. ۳۶
- شکل (۶-۳) تصویری از میکروسکوپ الکترونی روبشی. ۳۷

- شکل (۷-۳) تصویری از دستگاه فشار Santam مورد استفاده در این تحقیق. .... ۳۸
- شکل (۱-۴) تصاویر SEM از تغییرات مورفولوژیکی نمونه A در زمان‌های مختلف آسیاب کاری (ساعت)، الف) پودر اولیه،  
 ب) ۱۰ ساعت، ج) ۴۰ ساعت و د) ۶۰ ساعت. .... ۴۰
- شکل (۲-۴) نمودارهای توزیع اندازه ذرات در زمان‌های ۴۰ و ۶۰ ساعت آسیاب کاری برای نمونه‌های A. .... ۴۱
- شکل (۳-۴) تصاویر SEM از تغییرات مورفولوژیکی نمونه B در زمان‌های مختلف آسیاب کاری (ساعت)، الف) ۱۰ ساعت،  
 ب) ۲۰ ساعت، ج) ۴۰ ساعت، د) ۶۰ ساعت. .... ۴۲
- شکل (۴-۴) نمودارهای توزیع اندازه ذرات در زمان‌های ۴۰ و ۶۰ ساعت آسیاب کاری برای نمونه‌های B. .... ۴۳
- شکل (۵-۴) مراحل شماتیک تغییرات مورفولوژیکی در سیستم نرم-ترد در حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، الف) مخلوط  
 ابتدایی، ب) پهن‌شدگی و خردایش، ج) د) جوش سرد، ه) تشکیل ذرات هم‌محور، و) حالت پایا [۱۹]. .... ۴۴
- شکل (۶-۴) تصاویر SEM از تغییرات مورفولوژیکی نمونه C در زمان‌های مختلف آسیاب کاری (ساعت)، الف) ۱۰ ساعت،  
 ب) ۲۰ ساعت، ج) ۴۰ ساعت، د) ۶۰ ساعت. .... ۴۵
- شکل (۷-۴) نمودارهای توزیع اندازه ذرات در زمان‌های ۴۰ و ۶۰ ساعت آسیاب کاری برای نمونه‌های C. .... ۴۶
- شکل (۸-۴) میانگین اندازه ذرات نمونه‌های ۴۰ و ۶۰ ساعت آسیاب شده. .... ۴۷
- شکل (۹-۴) تصاویر SEM با بزرگنمایی X ۱۰۰۰ از تغییرات مورفولوژیکی نمونه C در زمان‌های مختلف آسیاب کاری  
 (ساعت)، الف) ۱۰ ساعت، ب) ۲۰ ساعت، ج) ۴۰ ساعت، د) ۶۰ ساعت. .... ۴۸
- شکل (۱۰-۴) الگوی آنالیز عنصری میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات زیرکونیوم برای نمونه C. .... ۴۸
- شکل (۱۱-۴) الگوی پراش اشعه X برای نمونه A در زمان‌های مختلف آسیاب کاری. .... ۴۹
- شکل (۱۲-۴) الگوی XRD صفحه (۱۱۱) نمونه A در زمان‌های مختلف آسیاب کاری. .... ۵۰
- شکل (۱۳-۴) نمودار تغییرات اندازه دانه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه A. .... ۵۱
- شکل (۱۴-۴) نمودار تغییرات کرنش شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه A. .... ۵۱
- شکل (۱۵-۴) نمودار تغییرات ثابت شبکه آلومینیم نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه A. .... ۵۲
- شکل (۱۶-۴) الگوی پراش اشعه X برای نمونه B در زمان‌های مختلف آسیاب کاری. .... ۵۳
- شکل (۱۷-۴) الگوی XRD صفحه (۱۱۱) نمونه B در زمان‌های مختلف آسیاب. .... ۵۴

- شکل (۴-۱۸) تصویر SEM با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر از نمونه ۶۰ ساعت آسیاب نمونه B جهت مشخص کردن ذرات باقی مانده زیرکونیوم. .... ۵۴
- شکل (۴-۱۹) تغییرات اندازه دانه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه B. .... ۵۵
- شکل (۴-۲۰) تغییرات کرنش شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه B. .... ۵۵
- شکل (۴-۲۱) نمودار تغییرات ثابت شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه B. .... ۵۶
- شکل (۴-۲۲) الگوی پراش اشعه X برای نمونه C در زمان‌های مختلف آسیاب کاری. .... ۵۷
- شکل (۴-۲۳) الگوی XRD صفحه (۱۱۱) نمونه C در زمان‌های مختلف آسیاب. .... ۵۷
- شکل (۴-۲۴) نمودار تغییرات اندازه دانه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه C. .... ۵۸
- شکل (۴-۲۵) نمودار تغییرات کرنش شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه C. .... ۵۸
- شکل (۴-۲۶) نمودار تغییرات ثابت شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه C. .... ۵۹
- شکل (۴-۲۷) نمودار تغییرات سختی نسبت به زمان آلیاژسازی نمونه‌های پرس سرد شده. .... ۶۰
- شکل (۴-۲۸) روند تغییرات دانسیته ظاهری بر حسب زمان آسیاب در سیستم‌های الف (نرم-نرم، ب) نرم-ترد [۳۷]... ۶۱
- شکل (۴-۲۹) الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های پرس گرم شده. .... ۶۳
- شکل (۴-۳۰) مقایسه تغییرات اندازه دانه برای نمونه‌های ۶۰ ساعت آسیاب شده و ۶۰ ساعت آسیاب و پرس گرم شده. .... ۶۴
- شکل (۴-۳۱) مقایسه تغییرات ثابت شبکه برای نمونه‌های ۶۰ ساعت آسیاب شده و نمونه ۶۰ ساعت آسیاب و پرس گرم شده. .... ۶۶
- شکل (۴-۳۲) مقایسه تغییرات کرنش شبکه برای نمونه‌های ۶۰ ساعت آسیاب شده و ۶۰ ساعت آسیاب و پرس گرم شده. .... ۶۷
- شکل (۴-۳۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های ۶۰ ساعت آسیاب و پرس گرم شده، الف) نمونه A، ب) نمونه B، ج) نمونه C. .... ۶۸
- شکل (۴-۳۴) تصاویر SEM به همراه توزیع عناصر نمونه B، ۶۰ ساعت آسیاب و پرس گرم شده، الف) تصویر SEM، ب) عنصر Al، ج) عنصر Zr، د) عنصر Zn، ه) عنصر Cu، و) عنصر Mg. .... ۶۹
- شکل (۴-۳۵) تصاویر SEM به همراه توزیع عناصر نمونه C، ۶۰ ساعت آسیاب و پرس گرم شده، الف) تصویر SEM، ب) عنصر Al، ج) عنصر Zr، د) عنصر Zn، ه) عنصر Cu، و) عنصر Mg. .... ۶۹

شکل (۴-۳۶) مقایسه سختی نمونه‌های ۶۰ ساعت آسیاب شده و نمونه‌های ۶۰ ساعت آسیاب شده و پرس گرم شده... ۷۰

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۶۴	جدول (۱-۴) مشخصات تفرق اشعه ایکس مرجع مربوط به ترکیبات $MgZn_2$ و $Al_3Zr$ .....
۷۲	جدول (۲-۴) نتایج آزمون فشار بر روی نمونه‌های پرس گرم شده.....

## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱- شرح مسئله و هدف از پژوهش

آلیاژهای آلومینیم به دلیل داشتن چگالی پایین، استحکام بالا و وزن سبک قابلیت استفاده در اجزای سازه‌های ساخته‌شده در صنایع هوافضا و خودرو را دارند [۱]. آلیاژهای آلومینیم به دو گروه عمده، آلیاژهای کار شده و آلیاژهای ریختگی تقسیم می‌شوند [۲]. امروزه اکثر تحقیقات در زمینه آلیاژهای کارپذیر است. توجه بیشتر محققان به آلیاژهای کارپذیر به این دلیل است که محدودیت‌های روش ریختگری را نداشته و امکان افزودن عناصر آلیاژی به میزان مختلف را دارند و بررسی بر روی پارامترهای مختلف آلیاژسازی و بهبود خواص آلیاژ بیشتر قابل تحلیل است. در سال‌های اخیر مطالعات پژوهشی در زمینه آلیاژهای کارپذیر آلومینیم روند افزایشی داشته است. مطالعات فوق بر خواصی چون شکل‌پذیری، افزایش خواص مکانیکی، استحکام در دماهای بالا و پایین، خستگی، خوردگی و خزش تمرکز یافته است. دو راهبرد مهمی که در این حوزه مد نظر قرار گرفته است شامل به‌کارگیری مواد افزودنی مناسب و فرآیندهای کاری مطلوب همچون روش‌های متالورژی پودر و انجماد سریع است [۳].

امکان به‌کارگیری تعداد و مقادیر بالاتری از عناصر آلیاژی در روش متالورژی پودر موجب فراهم آمدن موارد مطلوبی چون نرخ تغییر شکل بالا در دمای اتاق، ساختار فوق‌ریزدانه یا نانو و تغییر شرایط کارگرم و کارسرد شده است. آلیاژهای آلومینیم با ریزساختار نانوکریستال و فوق‌ریزدانه و یکنواخت دارای خاصیت تغییر شکل بالا در دماهای بالا و پایین هستند. به‌عنوان نمونه آلیاژ سری ۷۴۷۵ آلومینیم با افزودن ۰/۷ درصد وزنی زیرکونیوم در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی در نرخ کرنش  $10^{-1}$  بر ثانیه از خود خاصیت سوپر پلاستیک نشان داده درحالی‌که این نتیجه سه برابر بیشتر از نتایج به‌دست آمده از همین آلیاژ تولیدشده به روش ریختگری است [۴].



در بین آلیاژهای آلومینیم، آلیاژهای سری  $7xxx$  به دلیل دارا بودن مقاومت مکانیکی بسیار زیاد و خاصیت سوپر پلاستیکی مورد توجه بیشتر قرار گرفته‌اند. از جمله موارد مصرف این آلیاژها در پوسته بدنه هواپیما، پوسته فوقانی بال، دم هواپیما و غیره است. این سری از آلیاژهای آلومینیم به وسیله‌ی روی آلیاژ شده‌اند که عناصر دیگر مانند منیزیم، مس، زیرکونیوم و کرم نیز می‌توان به آن افزود [۵]. روی و منیزیم هر دو حلالیت بالایی در آلومینیم دارند و معمولاً منجر به رسوب سختی می‌شوند و نیز افزودن درصدی کمی از عنصر مس استحکام این آلیاژ را افزایش می‌دهد و آلیاژ پر استحکام صنایع هواپیمایی را به وجود می‌آورد. با وجود این که سری  $7xxx$  دارای استحکام نسبتاً بالا است با این حال این آلیاژ تا یک حدی قابلیت تحمل بار و تغییر شکل را دارا است. برای حل این مشکل می‌توان با بهبود اندازه دانه استحکام را بالا برد و خاصیت سوپر پلاستیک به این آلیاژ بخشید [۶].

روش‌های متعددی برای بهبود اندازه دانه وجود دارد اما همه آن‌ها منجر به تولید دانه با اندازه متوسط  $10-15 \mu m$  می‌شوند. یکی از راه‌های دستیابی به ساختار نانو از آلیاژهای آلومینیم فرآیند انجماد سریع و جرقه پلازما است که ذرات آلیاژ را به صورت سریع گرم و سرد می‌کند [۷]. این روش به دلیل بالا بودن هزینه و مصرف انرژی زیاد مورد توجه قرار نگرفته است. در صنعت به دنبال روشی ارزان و مورد استفاده در مقیاس بالا هستند [۸]. به این منظور می‌توان از روش متالورژی پودر برای تولید پودر با اندازه دانه در حد نانو و به صورت همگن استفاده کرده و سپس از فرآیند اکستروژن و یا پرس گرم جهت استحکام بخشی استفاده کرد. با این حال در اکستروژن گرم به دلیل دمای بالا دانه‌ها رشد می‌کنند و آلیاژ درشت‌دانه خواهیم داشت. بنابراین برای داشتن یک روش بهینه از آلیاژسازی مکانیکی (MA)<sup>۱</sup> برای تولید آلیاژ آلومینیم استفاده می‌شود [۹].

در این پژوهش به بررسی اثر فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و عناصر افزودنی بر روی آلیاژ سری  $7xxx$  پرداخته می‌شود. هدف از این پژوهش کنترل اندازه دانه و تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم است. پارامترهای مورد بررسی، زمان آلیاژسازی و میزان عنصر زیرکونیوم افزوده شده به نمونه‌ها است که

<sup>۱</sup> mechanical alloying

بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ اثر گذاشته و باعث بهبود آن‌ها می‌شوند. زمان آلیاژسازی به صورت تجربی و با توجه به سایر عوامل کنترل‌کننده فرآیند آسیاب کاری که منجر به تشکیل محلول جامد فوق اشباع و آگلومره شدن پودرها می‌شود ادامه پیدا می‌کند و باید زمان به گونه‌ای افزایش پیدا کند تا از پس زدن عناصر آلیاژی از داخل شبکه آلومینیم جلوگیری شود. همچنین میزان عنصر زیرکونیوم نیز با توجه به منابع انتخاب‌شده و تأثیر درصدهای مختلف از این عنصر بر روی ساختار آلیاژ تشکیل‌شده مد نظر قرار گرفته شده است. در این تحقیق درصد عناصر آلیاژی انتخاب‌شده و بررسی پارامترهای مد نظر برای اولین بار صورت گرفته و تفاوت این تحقیق با سایر پژوهش‌های مشابه، در درصد عناصر آلیاژی بوده و نتایج به دست آمده قابل مقایسه بوده و تأثیر این تفاوت قابل بررسی است.

در این پایان‌نامه در فصل اول به ارائه مطالب کلی در رابطه با فرآیند متالورژی پودر و آلیاژسازی مکانیکی پرداخته می‌شود. سپس به مروری بر منابع و بررسی مقالات مرتبط با آلیاژسازی مکانیکی و تأثیر عناصر آلیاژی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی انجام می‌شود. در فصل سوم به روند کار و روش تحقیق در این پروژه اشاره می‌شود و در فصل چهارم نتایج و مقایسه‌های انجام‌شده ارائه می‌شوند.

## ۲-۱- متالورژی پودر

### ۱-۲-۱- تاریخچه

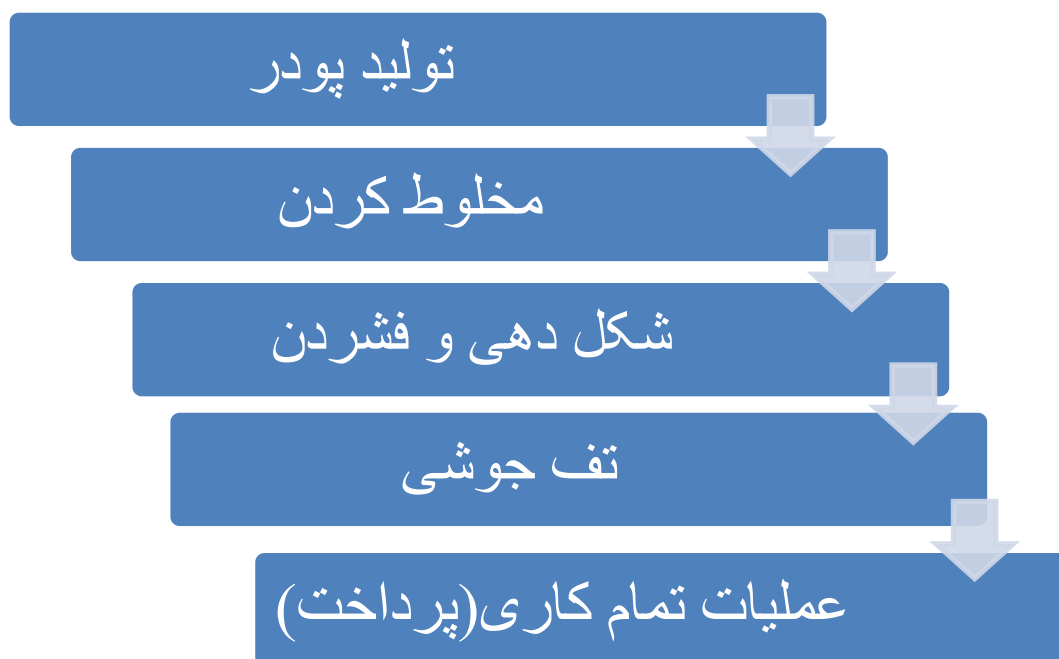
استفاده از متالورژی پودر در زمان‌های قدیم در بسیاری از نقاط دنیا گزارش شده است. به عنوان مثال ستون شهر دهلی<sup>۱</sup> هندوستان در ۳۰۰ سال بعد از میلاد به روش متالورژی پودر بنا شده است. روش‌های متالورژی پودر از اوایل قرن نوزدهم میلادی به طور جدی مورد توجه قرار گرفت. در این هنگام نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی، پودرهای حاصل از ته‌نشین کردن شیمیایی و روش‌های فشردن بدون نیاز به دمای بالا منجر به توسعه این روش شد. عصر نوین متالورژی پودر با تولید یاتاقان‌های برنزی متخلخل و اتصالات الکتریکی مسی-گرافیتی در دهه‌ی ۱۹۳۰ آغاز شد. ولی از اوایل دهه‌ی ۱۹۴۰ بسیاری از

<sup>۱</sup> Delhi

قطعات فلزات غیرمعارف شامل فلزات و آلیاژهای دیرگداز مانند زیرکونیوم، نیوبیوم و تیتانیوم و آلیاژهای آن‌ها از طریق این فناوری تولید شدند. هرچند انتخاب قطعات پودری در آغاز کار، عمدتاً به خاطر هزینه‌ی کم‌ترشان بود، ولی مبنای انتخاب و گسترش استفاده از این فناوری در این روزها بهتر شدن کیفیت، همگنی ویژگی‌ها و به همراه آن سرعت تولید و اقتصادی بودن آن بود. گسترش فرآیند متالورژی پودر به حیطه‌هایی که به مواد دارای کیفیت بالا و ویژگی‌های انحصاری نیاز دارند امکانات حتی بهتری را برای این فرآیند خلق خواهد کرد [۱۰].

### ۱-۲-۲- مراحل تولید به روش متالورژی پودر

روش متالورژی پودر یک روش اقتصادی، سریع و با ظرفیت بالا برای تولید قطعات با دقت بالا از پودرهای فلزی و غیرفلزی است. طی دهه‌ی گذشته این روش توانسته به‌عنوان روشی برای تولید قطعات با دقت بالا که در زمینه‌های مختلف مهندسی کاربرد دارند خود را معرفی نماید [۱۱]. مراحل تولید یک قطعه به کمک این روش را می‌توان در شکل (۱-۱) مشاهده نمود که در ادامه در مورد هر کدام به اختصار توضیحاتی آورده شده است.



شکل (۱-۱) مراحل تولید یک قطعه به روش متالورژی پودر.

**(۱) تولید پودر**

آگاهی به چگونگی تولید پودر می‌تواند به‌عنوان مبنایی قابل‌قبول و مناسب در تخمین برخی ویژگی‌های آن به‌کار گرفته شود. روش انتخابی برای تولید هر پودر بستگی به ویژگی‌های خاص ماده دارد که می‌تواند بر اندازه، شکل، ریزساختار، ترکیب شیمیایی و هزینه‌ی تولید مؤثر باشد. روش‌های اصلی تولید پودر را می‌توان به ۳ قسمت کلی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی نمود [۱۱]:

الف) روش‌های شیمیایی نظیر استفاده از واکنش‌های شیمیایی به‌منظور تولید پودر

ب) روش‌های فیزیکی نظیر روش ته‌نشینی در الکترولیت

ج) روش‌های مکانیکی نظیر آلیاژسازی مکانیکی به‌منظور تولید پودرهای کامپوزیتی

**(۲) مخلوط کردن**

به‌منظور رسیدن به یک محصول نهایی خوب و مورد قبول در فرآیند متالورژی پودر بایستی پودرهای اولیه قبل از پرس شدن به خوبی با یکدیگر ترکیب شده تا به یک ترکیب پودری همگن با توزیع دانه‌بندی مناسب برسند. از این بخش می‌توان به‌عنوان یکی از مزیت‌های روش متالورژی پودر نام برد که این امکان را فراهم می‌کند که بتوان در آن آلیاژهای مختلفی که ترکیب کردن آن‌ها در روش‌های دیگر دشوار و یا غیرممکن است را با یکدیگر ترکیب کرد. به همین منظور از ۴ روش برای این کار استفاده می‌شود که در

شکل (۱-۲) نشان داده شده است که عبارت‌اند از:

الف) چرخاندن در یک محفظه‌ی استوانه‌ای شکل

ب) چرخاندن در یک محفظه‌ی مخروطی ۲ طرفه

ج) هم‌زدن در یک مخلوط‌کن پیچی

د) هم‌زدن در یک مخلوط‌کن پره‌ای