

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
دانشکده‌ی فنی و مهندسی
گروه مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد
رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی
تغییر شکل پلاستیک شدید با روش رول کردن

استاد راهنما
دکتر مسعود رضایی‌زاده

استاد مشاور
دکتر فرهاد شیخ سامانی

نگارنده
علیرضا دادیان

دی ۱۳۹۲

شکر و قدردانی:

سپاس و ستایش مرخداى را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، در فشان. آفریدگارى که خوشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمرى و فرصتى عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت یازماید.

از آن جایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تائین می کند و سلامت امانت باری را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه از استاد دلسوز، با کلمات و شایسته ام؛ جناب آقای دکتر مسعود رضایی زاده که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از بیچ کلمی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهمائی این رساله را بر عهده گرفتند، از استاد گرانقدرم؛ جناب آقای دکتر فرزاد شیخ سامانی که زحمت مشاوره این رساله را بر عهده داشتند و از استاد فرزانه؛ جناب آقای دکتر علیرضا عرب سلخار که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند، کمال شکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در کتب عشق‌شما آموختم و هرچه بگوختم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌تان را سپاس توانم بگویم

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی‌گر آن سنگ‌تراز این ارزان ندانستم تا به خاک پایتان شکر کنم

باشد که حاصل تلاشم، نسیم‌گونه غبار محبتی‌تان را برزید

بوسه بر دستان پر مهرتان

چکیده

یکی از روش‌های جدید تولید مواد با اندازه دانه نانومتری، روش تغییر شکل شدید پلاستیک است. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشمگیری می‌یابد. از آن جایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، لذا روش‌های تغییر شکل شدید به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه حین فرآیند تغییری نکنند. به همین دلیل تعداد مراحل انجام فرآیند از نظر تئوری نامحدود خواهد بود. توجه به این نکته موجب ابداع روش‌های جدیدتر و کارآمدتر می‌شود. از آن جاکه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای ورق‌ها، دارای محدودیت‌های بسیاری به واسطه‌ی ضخامت آن است، در این پایان‌نامه روش جدیدی در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید با عنوان تغییر شکل پلاستیک شدید با روش رول کردن، برای بهبود خواص مکانیکی ورق‌ها معرفی می‌شود. سپس فرآیند در نرم‌افزار آباکوس مدل شده و اثر پارامترهای مختلف بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان، با مقایسه مقاومت به کشش ورق رول شده با ورق خام، دیده می‌شود که چگونه با اعمال یک فرآیند ساده و کم هزینه بر ورق‌های فلزی با ضخامت‌های مختلف، می‌توان به ورقی با استحکام بالا دست یافت، که نه تنها ابعادهای تغییر یافته نخواهد کرد، بلکه استحکام آن در تمام طول ورق به طور ثابت افزایش خواهد یافت.

کلمات کلیدی: روش اجزا محدود، اصلاح ریزساختار، مواد نانومتری، بهبود خواص مکانیکی، تغییر شکل پلاستیک شدید، روش رول کردن.

فصل اول: کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه..... ۱

۲-۱- بیان مسئله و هدف‌های پژوهش..... ۲

فصل دوم: پیشینه پژوهش

۱-۲- مقدمه..... ۵

۲-۲- مواد نانومتری..... ۷

۱-۲-۲- نانو ذرات..... ۷

۲-۲-۲- روش‌های تولید نانو ذرات..... ۷

۱-۲-۲-۲- روش‌های پایین به بالا و انواع آن..... ۷

۲-۲-۲-۲- روش‌های بالا به پایین و انواع آن..... ۱۸

۳-۲-۲-۲- روش‌های الگو برداری از نانو ساختارها..... ۲۴

۳-۲- روش تغییر شکل پلاستیک شدید..... ۲۵

۱-۳-۲- تغییر شکل الاستیک و تغییر شکل پلاستیک..... ۲۵

۲-۳-۲- تغییر شکل پلاستیک شدید..... ۲۶

۳-۳-۲- روش تغییر شکل شدید پلاستیک..... ۲۷

۴-۳-۲- روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید با توجه به هندسه محصول..... ۲۸

۴-۲- مروری بر پژوهش‌های انجام شده..... ۲۹

۱-۴-۲- فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای بالک‌ها..... ۲۹

۲-۴-۲- فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای ورق‌ها..... ۳۵

۳-۴-۲- فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله‌ها..... ۳۹

۵-۲- جمع‌بندی..... ۴۱

فصل سوم: روش پژوهش

۱-۳- مقدمه..... ۴۵

۲-۳- معرفی فولاد st-37..... ۴۶

۳-۳- معرفی نرم‌افزار آباکوس..... ۴۷

۴-۳- شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار.....	۴۷
فصل چهارم: بحث و نتایج عددی	
۱-۴- مقدمه.....	۵۳
۲-۴- تست کشش ورق st-37.....	۵۳
۳-۴- تغییرات تنش در طول فرآیند و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن.....	۵۶
۱-۳-۴- تغییرات تنش نسبت به زمان انجام فرآیند.....	۵۶
۱-۱-۳-۴- مقایسه سیکل‌های مختلف (در دو مدل).....	۵۶
۲-۱-۳-۴- مقایسه مدل ۱ و ۲ (در تمام سیکل‌ها).....	۶۰
۲-۳-۴- تغییرات تنش نسبت به طول ورق.....	۶۹
۱-۲-۳-۴- مقایسه سیکل‌های مختلف (در دو مدل).....	۶۹
۲-۲-۳-۴- مقایسه مدل ۱ و ۲ (در تمام سیکل‌ها).....	۷۳
۴-۴- تاثیر سرعت انجام فرآیند بر مقادیر تنش‌های ورق.....	۸۲
۱-۴-۴- تغییرات تنش نسبت به زمان.....	۸۲
۲-۴-۴- تغییرات تنش نسبت به طول ورق.....	۸۴
۵-۴- تاثیر فرآیند بر مقاومت به کشش ورق.....	۸۶
۶-۴- تغییرات ضخامت ورق در طول فرآیند و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن.....	۸۸
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها	
۱-۵- جمع‌بندی نتایج.....	۹۱
۲-۵- پیشنهادها.....	۹۳
منابع.....	۹۵

شکل ۱-۲- شماتیک، الف- ساختار مولکولی، ب- نانوساختار، ج- میکروساختار و د- ماکروساختار شبکه نانو الیاف خودآرایی شده.....	۶
شکل ۲-۲- شماتیک روش سل-ژل.....	۱۵
شکل ۳-۲- شماتیکی از چهار مکانیسم لیتوگرافی STM یا دستکاری مولکول‌ها به وسیله سوزن.....	۱۹
شکل ۴-۲- شماتیک الف- آسیاب ساینده، ب- آسیاب گلوله‌ای.....	۲۲
شکل ۵-۲- الف- تفجوشی حالت مایع، ب- تفجوشی حالت جامد.....	۲۳
شکل ۶-۲- مقایسه روش بالا به پایین و روش پایین به بالا.....	۲۵
شکل ۷-۲- نمودار شماتیک تنش- کرنش یک فلز در حالت الاستیک.....	۲۶
شکل ۸-۲- دسته‌بندی کلی روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید براساس شکل محصول.....	۲۸
شکل ۹-۲- شماتیک فرآیند ECAP با هندسه مکعبی و زاویه کانال ۹۰ درجه.....	۲۹
شکل ۱۰-۲- شماتیک فرآیند ECAP با هندسه استوانه‌ای و زاویه کانال بزرگ‌تر از ۹۰.....	۳۰
شکل ۱۱-۲- مسیرهای مختلف اصلی برای روش ECAP.....	۳۱
شکل ۱۲-۲- فرآیند ECAP برای ورق‌های ضخیم.....	۳۱
شکل ۱۳-۲- تصویر شماتیک فرآیند CEC.....	۳۲
شکل ۱۴-۲- فرآیند HPT (از سمت راست به ترتیب: با سنبه چرخان، با قالب چرخان، و نمونه تحت فرآیند).....	۳۳
شکل ۱۵-۲- شمای کلی فرآیند فورج سیکلی در قالب بسته CCDF.....	۳۴
شکل ۱۶-۲- شماتیک فرآیند ARB.....	۳۶
شکل ۱۷-۲- شمای کلی از فرآیند RCS.....	۳۷
شکل ۱۸-۲- مقایسه دو روش CGP (شکل بالا) و RCS (شکل پایین).....	۳۸
شکل ۱۹-۲- فرآیند کنگره‌دار کردن دو مرحله‌ای.....	۳۸
شکل ۲۰-۲- نمای کلی از فرآیند ECAR.....	۳۹
شکل ۲۱-۲- مراحل مختلف فرآیند PTCAP برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید روی لوله‌ها.....	۴۰
شکل ۲۲-۲- مراحل مختلف فرآیند TCP.....	۴۰

- شکل ۲-۲۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه‌های تولید شده به روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، الف- ورق آلومینیوم تولید شده به روش ARB، ب- نمونه مسی تولید شده به روش ECAP و ج- نمونه مسی تولید شده به روش HPT..... ۴۲
- شکل ۳-۱- نمودار تنش- کرنش مهندسی تست کشش ورق فولاد St-37..... ۴۹
- شکل ۳-۲- نمودار تنش- کرنش پلاستیک، فولاد St-37 برای تعریف به نرم‌افزار ۵۰
- شکل ۳-۳- شماتیک مدل شماره ۱..... ۵۲
- شکل ۳-۴- شماتیک مدل شماره ۲..... ۵۲
- شکل ۴-۱- شماتیک نمونه ورق استاندارد مورد استفاده در تست کشش..... ۵۴
- شکل ۴-۲- دستگاه تست کشش (Santam STM-250)..... ۵۴
- شکل ۴-۳- شماتیک نمونه ورق خام در مدل‌سازی تست کشش در نرم‌افزار آباکوس..... ۵۵
- شکل ۴-۴- مقایسه نمودارهای تنش- کرنش تست کشش در آزمایشگاه و مدل‌سازی..... ۵۵
- شکل ۴-۵- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و غلتک با قطر ۵۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۵۶
- شکل ۴-۶- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و غلتک با قطر ۴۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۵۷
- شکل ۴-۷- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و غلتک با قطر ۳۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۵۷
- شکل ۴-۸- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و غلتک با قطر ۵۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۵۸
- شکل ۴-۹- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و غلتک با قطر ۴۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۵۸
- شکل ۴-۱۰- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و غلتک با قطر ۳۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۵۹
- شکل ۴-۱۱- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۱ با غلتک‌های مختلف..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۲ با غلتک‌های مختلف..... ۶۱
- شکل ۴-۱۳- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۳ با غلتک‌های مختلف..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۴ با غلتک‌های مختلف..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۵ با غلتک‌های مختلف..... ۶۲
- شکل ۴-۱۶- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۶ با غلتک‌های مختلف..... ۶۳
- شکل ۴-۱۷- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۷ با غلتک‌های مختلف..... ۶۳
- شکل ۴-۱۸- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۸ با غلتک‌های مختلف..... ۶۴
- شکل ۴-۱۹- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۹ با غلتک‌های مختلف..... ۶۴

- شکل ۴-۲۰- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۱ با غلتک‌های مختلف..... ۶۵
- شکل ۴-۲۱- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۲ با غلتک‌های مختلف..... ۶۵
- شکل ۴-۲۲- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۳ با غلتک‌های مختلف..... ۶۶
- شکل ۴-۲۳- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۴ با غلتک‌های مختلف..... ۶۶
- شکل ۴-۲۴- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۵ با غلتک‌های مختلف..... ۶۷
- شکل ۴-۲۵- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۶ با غلتک‌های مختلف..... ۶۷
- شکل ۴-۲۶- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۷ با غلتک‌های مختلف..... ۶۸
- شکل ۴-۲۷- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۸ با غلتک‌های مختلف..... ۶۸
- شکل ۴-۲۸- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۲ و سیکل ۹ با غلتک‌های مختلف..... ۶۹
- شکل ۴-۲۹- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و غلتک با قطر ۵۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۷۰
- شکل ۴-۳۰- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و غلتک با قطر ۴۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۷۰
- شکل ۴-۳۱- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و غلتک با قطر ۳۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۷۱
- شکل ۴-۳۲- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و غلتک با قطر ۵۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۷۱
- شکل ۴-۳۳- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و غلتک با قطر ۴۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۷۲
- شکل ۴-۳۴- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و غلتک با قطر ۳۰ میلیمتر در سیکل‌های مختلف..... ۷۲
- شکل ۴-۳۵- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۱ با غلتک‌های مختلف..... ۷۳
- شکل ۴-۳۶- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۲ با غلتک‌های مختلف..... ۷۴
- شکل ۴-۳۷- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۳ با غلتک‌های مختلف..... ۷۴
- شکل ۴-۳۸- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۴ با غلتک‌های مختلف..... ۷۵
- شکل ۴-۳۹- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۵ با غلتک‌های مختلف..... ۷۵
- شکل ۴-۴۰- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۶ با غلتک‌های مختلف..... ۷۶

- شکل ۴-۴۱- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۷ با غلتک‌های مختلف..... ۷۶
- شکل ۴-۴۲- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۸ با غلتک‌های مختلف..... ۷۷
- شکل ۴-۴۳- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۹ با غلتک‌های مختلف..... ۷۷
- شکل ۴-۴۴- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۱ با غلتک‌های مختلف..... ۷۸
- شکل ۴-۴۵- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۲ با غلتک‌های مختلف..... ۷۸
- شکل ۴-۴۶- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۳ با غلتک‌های مختلف..... ۷۹
- شکل ۴-۴۷- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۴ با غلتک‌های مختلف..... ۷۹
- شکل ۴-۴۸- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۵ با غلتک‌های مختلف..... ۸۰
- شکل ۴-۴۹- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۶ با غلتک‌های مختلف..... ۸۰
- شکل ۴-۵۰- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۷ با غلتک‌های مختلف..... ۸۱
- شکل ۴-۵۱- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۸ با غلتک‌های مختلف..... ۸۱
- شکل ۴-۵۲- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۲ و سیکل ۹ با غلتک‌های مختلف..... ۸۲
- شکل ۴-۵۳- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۱ با سرعت‌های مختلف..... ۸۳
- شکل ۴-۵۴- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۲ با سرعت‌های مختلف..... ۸۳
- شکل ۴-۵۵- نمودار تنش- زمان، برای مدل ۱ و سیکل ۳ با سرعت‌های مختلف..... ۸۴
- شکل ۴-۵۶- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۱ با سرعت‌های مختلف..... ۸۵
- شکل ۴-۵۷- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۲ با سرعت‌های مختلف..... ۸۵
- شکل ۴-۵۸- نمودار تنش- طول ورق، برای مدل ۱ و سیکل ۳ با سرعت‌های مختلف..... ۸۶
- شکل ۴-۵۹- مقایسه نمودارهای تنش- کرنش تست کشش همچنین کشش چند نمونه از ورق‌های چند سیکل رول شده به وسیله مدل‌های ۱ و ۲ و دارای تنش‌های اولیه..... ۸۷
- شکل ۴-۶۰- مقایسه مقادیر تنش تسلیم نمودارهای تنش- کرنش ورق‌های خام و رول شده..... ۸۷
- شکل ۴-۶۱- مقایسه مقادیر تنش نهایی نمودارهای تنش- کرنش ورق‌های خام و رول شده..... ۸۸
- شکل ۴-۶۲- نمودار ضخامت ورق- زمان در طول فرآیند، برای مدل ۱ و با غلتک‌های مختلف..... ۸۹
- شکل ۴-۶۳- نمودار ضخامت ورق- زمان در طول فرآیند، برای مدل ۲ و با غلتک‌های مختلف..... ۸۹
- شکل ۴-۶۴- نمودار ضخامت ورق- زمان در طول فرآیند، برای مدل ۱ و ۲ و با غلتک‌های مختلف..... ۹۰

خ

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۲	جدول ۱-۲- استحکام کششی نمونه‌های فلزی مختلف تولید شده به روش‌های ARB و ECAP
۴۶	جدول ۱-۳- مشخصات مکانیکی st-37
۴۸	جدول ۲-۳- دیمانسیون مورد استفاده در مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس
۵۴	جدول ۱-۴- ابعاد استاندارد نمونه ورق مورد استفاده در تست کشش

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

ورق‌ها کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، راکتورها، ساختمان‌سازی، اتومبیل‌سازی و دیگر صنایع دارند. دستیابی به ورق‌هایی با استحکام بالا و شکل‌پذیر^۱ همواره از مهم‌ترین بحث‌های مهندسين و صنعت‌گران به‌شمار می‌رود و تحقیقات در این زمینه همچنان ادامه دارد. از آن‌جا که بحث هزینه از مهم‌ترین مباحث تولید می‌باشد، صنعت‌گران تمایل دارند تا از آلیاژهای ارزان‌تر استفاده کرده و به موادی با استحکام و چقرمگی^۲ مناسب دست یابند. به‌همین منظور مکانیزم ریزدانه‌گی بهترین مکانیزم افزایش استحکام ماده در فرآیندهای مرسوم تولید است. اینجاست که فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید^۳ اهمیت ویژه‌ای می‌یابند. روش‌های سنتی تولید نظیر نورد^۴ یا اکستروژن^۵ به‌دلیل کاهش سطح مقطع از نظر اعمال کرنش‌های زیاد محدودیت دارند و خواسته‌های فوق را نمی‌توانند برآورده سازند، درحالی‌که فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید این محدودیت‌ها را ندارند.

^۱ Deformable

^۲ Toughness

^۳ Severe Plastic Deformation

^۴ Rolling

^۵ Extrusion

۲-۱- بیان مسئله و هدف از انجام پایان نامه

یکی از روش‌های جدید تولید مواد با اندازه دانه نانومتری، روش تغییر شکل شدید پلاستیک است. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشمگیری می‌یابد. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، لذا اکثر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به‌نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه حین فرآیند تغییری نکند (پیرگری، ۱۳۸۵).

در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه نانومتری (اندازه دانه کوچکتر از صد نانومتر) یا بسیار ریزدانه (با اندازه دانه کمتر از یک میکرون) موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است. این مواد که با نام آبر فلز^۱ شناخته می‌شوند، خواص بی‌نظیری همانند استحکام زیاد در دمای محیط، خاصیت سوپر پلاستیک^۲ در دمای بالا و نرخ کرنش کم و مقاومت عالی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهند. تغییر الگوهای لغزش متداول در مواد با اندازه دانه نانومتری و فعال شدن مکانیزم‌های لغزش مرزدانه‌ای از ویژگی‌های این مواد است که منجر به خواص مکانیکی منحصر به فرد آن‌ها می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای تولید مواد نانومتری ارائه شده و تحقیقات گسترده‌ای روی آن‌ها انجام شده است. روش‌های تولید مواد نانومتری را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم‌بندی کرد.

روش اول که تحت عنوان روش پایین به بالا^۳ معرفی شده است، شامل فرآیندهایی نظیر آلیاژسازی مکانیکی^۴، رسوب شیمیایی بخار^۵، و انجماد سریع^۶ است، که قابلیت تولید دانه‌هایی با اندازه‌ای در حدود ۱۰ تا ۵۰ نانومتر را دارند. این فرآیندها به طور گسترده‌ای برای تولید مقادیر زیاد پودرهای نانو بلور مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما مشکل اصلی این فرآیندها تولید یک محصول نهایی از طریق پرس کردن این پودرها است. به دلیل سختی بالای پودرهای تولید شده با روش‌های مکانیکی، پرس سرد آن‌ها تقریباً غیرممکن است. از طرف دیگر استفاده از پرس داغ برای زینتر^۷ کردن این پودرها می‌تواند منجر به رشد دانه‌ها و وقوع تبلور مجدد شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای رفع این مشکلات پیشنهاد شده است اما هنوز تحقیقات برای پیدا کردن روشی کاملاً مناسب

¹ Super Metals

² Super Plastic

³ Bottom-Up Procedure

⁴ Mechanical Alloying

⁵ Chemical Vapor Deposition

⁶ Rapid Solidification

⁷ Sintering

برای پرس پودرهای نانوکریستالی و تولید محصول نهایی کاملاً یکپارچه با اندازه دانه نانومتری ادامه دارد. روش دوم برای تولید مواد با اندازه دانه نانومتری که با نام روش بالا به پایین^۱ شناخته می‌شود، می‌شود، شامل فرآیندهای متعددی است که با اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک در مواد فلزی باعث کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری می‌شوند. علت انتخاب این نام برای روش مذکور این است که اساس آن کاهش مستقیم اندازه دانه‌ها در نمونه‌ای با ابعاد بزرگ است. این فرآیندها به‌عنوان روش‌هایی جدید برای تولید مواد نانوکریستالی یا بسیار ریزدانه در مقیاس صنعتی مطرح شده و در بسیاری موارد با موفقیت‌هایی نیز همراه بوده‌اند. در این پژوهش به‌معرفی روش تغییر شکل شدید پلاستیک به‌عنوان روشی مناسب برای تولید فلزات با اندازه دانه نانومتری و بیان اصول روش‌های ابداع شده بر این پایه پرداخته می‌شود (پیرگری، ۱۳۸۵).

روش تغییر شکل شدید پلاستیک^۲ به‌عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه نانومتری مطرح می‌باشد. اصول این روش اعمال کرنش به ماده فلزی بدون تغییر ابعاد ظاهری آن است. تاکنون فرآیندهای متعددی برای اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک در مواد فلزی و رسیدن به ساختارهای نانومتری پیشنهاد شده‌اند که در بسیاری موارد با موفقیت‌هایی نیز همراه بوده‌اند. ویژگی مشترک و منحصربه‌فرد این فرآیندها، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرآیند می‌باشد که در نتیجه آن محدودیت در اعمال کرنش از بین می‌رود و دست‌یابی به کرنش‌های بسیار بالا (در حدود هشت تا ده) در ماده به راحتی میسر می‌شود. به‌این ترتیب در اثر اعمال کرنش، امکان اصلاح ریزساختار، کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری و بهبود خواص مکانیکی نمونه فلزی فراهم می‌آید، درحالی‌که شکل نمونه تغییری نکرده است. ویژگی دیگر این فرآیندها افزایش استحکام و اصلاح ساختار دانه‌ها بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی یا ذرات سرامیکی است.

به‌طور خلاصه مزایای روش تغییر شکل شدید پلاستیک عبارتند از: امکان تولید مستقیم قطعات فلزی با ابعاد بزرگ و اندازه دانه‌های نانومتری، قابلیت انجام فرآیند به‌وسیله دستگاه‌ها و قالب‌های معمولی، امکان اعمال کرنش‌های شدید پلاستیکی بدون تغییر ابعاد نمونه‌ها، عدم وجود محدودیت در اعمال کرنش (زیرا از لحاظ نظری تعداد دفعات انجام فرآیندها نامحدود است) و امکان تهیه نمونه‌های بسیار ریز دانه با ابعاد مناسب برای انجام آزمایش‌های مکانیکی. با وجود پیشرفت‌های انجام شده در زمینه تولید مواد نانومتری، هنوز اطلاعات کمی در مورد

¹ Top-Down Procedure

² Severe Plastic Deformation

خواص مکانیکی این مواد وجود دارد. علت این مسئله دشواری تهیه مقدار کافی نمونه با ابعاد مناسب برای آزمایش‌های مکانیکی است. با استفاده از روش تغییر شکل شدید پلاستیک، حتی در آزمایشگاه می‌توان نمونه‌هایی با اندازه دانه بسیار ریز (زیر میکرونی یا نانومتری) برای انجام آزمایش‌های مکانیکی تولید کرد (پیرگری، ۱۳۸۵ و تمیمی و همکاران، ۱۳۸۶).

به‌طور کلی در شکل‌دهی حجمی^۱ امکان تغییر شکل پلاستیک شدید از طریق تغییر شکل‌های برشی، همانند اکثر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید که نمونه‌هایی از آن در فصل بعد مشاهده می‌شود، وجود دارد. ولی در ورق‌ها محدودیت‌های بسیاری به‌واسطه ضخامت آن دیده می‌شود. به‌همین دلیل در این پایان‌نامه روشی جدید برای بهبود خواص مکانیکی ورق‌ها ارائه می‌شود. فصل‌های دوم تا پنجم به‌طور مختصر در زیر آمده است:

در ابتدای فصل دوم، نانو مواد تعریف شده و اهمیت آن‌ها بیان می‌شود. سپس دو رویکرد کلی برای تولید نانو مواد معرفی می‌گردد و روش‌های مختلفی در رابطه با هر کدام توضیح داده می‌شود. از میان روش‌های ذکر شده، روش تغییر شکل پلاستیک شدید از گروه روش‌های فرآوری مکانیکی، انتخاب می‌شود. سپس اهمیت این روش در تولید مواد نانومتری بیان شده و پیشینه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در این مورد ارائه می‌گردد.

در فصل سوم، روش جدید مورد نظر یعنی تغییر شکل پلاستیک شدید با روش رول کردن و همچنین پارامترهای موثر بر آن توضیح داده می‌شود. سپس فلز و نرم‌افزار مورد استفاده در مدل‌سازی معرفی شده و مراحل مختلف شبیه‌سازی بیان می‌گردد.

ابتدای فصل چهارم نشان می‌دهد که چگونه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. سپس نتایج مدل‌سازی به‌صورت نمودارهای دو بعدی ارائه شده و توضیحاتی در رابطه با هر یک داده می‌شود.

فصل پنجم، در واقع نتیجه‌گیری از فصل‌های قبل و بیان اهمیت این روش به‌عنوان یک روش جدید و کارآمد در تولید ورق‌های با استحکام می‌باشد.

¹ Bulk Forming

فصل دوم

پیشینه‌ی پژوهش

۲-۱- مقدمه

نانو بلورها در علوم پیشرفته و فن‌آوری جدید نقش مهمی را ایفا می‌کنند. به‌همین دلیل توجه زیادی را به سمت خود جذب کرده‌اند. از طرفی کنترل شکل نانو بلورها باعث کنترل خواص، افزایش کاربرد و گزینش‌پذیری آن‌ها می‌شود. نانو بلورهای فلزی خواص نوری، الکترونیکی و مغناطیسی زیادی دارند و می‌توانند با انجام واکنش‌های شیمیایی سنتز شوند (مصطفایی و مقیم، ۱۳۸۹).

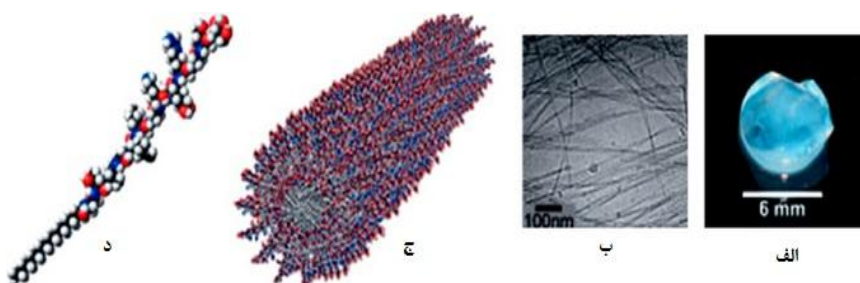
مطابق بیان عمومی در فن‌آوری نانو، بلورهای با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر به‌عنوان نانو بلورها معرفی می‌شوند. نانو بلورها به‌علت وضعیت منحصربه‌فردشان به‌عنوان پلی بین اتم‌ها و جامدهای توده‌ای^۱ به آسانی سنتز می‌شوند. از انواع جامدهای معدنی، فلزات به‌این علت که بیشتر از دو سوم عناصر جدول تناوبی را تشکیل داده‌اند، بسیار مورد توجه هستند. از جمله کاربردهای نانو بلورها می‌توان به اهمیت آن‌ها در فوتونیک، تصویرگری، حسگرها و علوم پزشکی اشاره نمود. البته قابلیت و کاربرد این دسته از ترکیبات به نوع فلزی که به‌صورت نانو بلورها و با خواص کنترل شده سنتز شده‌اند، بستگی دارد (مصطفایی و مقیم، ۱۳۸۹).

دنیای نانو مواد را از یک دیدگاه می‌توان به دو دسته اصلی مواد نانو اندازه و مواد نانو ساختار دسته‌بندی نمود. مواد نانو اندازه به این معنی است که ماده مورد نظر ما دارای ابعاد نانومتری است

^۱ Bulks

که می‌تواند به صورت نانو ذرات مانند نانو لوله‌های کربنی^۱ و یا نانو ذرات سیلیس^۲ و یا نانو الیاف^۳ مانند نانو فیبرهای کربنی^۴ و یا نانو ورق‌ها^۵ مانند نانو ورق‌های میکا^۶ یا نانو ورق‌های خاک رس^۷ باشد.

در سمت دیگر، مواد نانو ساختار قرار دارند. مواد نانو ساختار به موادی گفته می‌شود که ابعاد ظاهری آن‌ها به صورت بالک^۸ است، ولی ساختار تشکیل‌دهنده آن‌ها در ابعاد نانو قرار دارد (Valiev and Langdon, 2006).



شکل ۲-۱- شماتیک، الف- ساختار مولکولی، ب- نانوساختار، ج- میکروساختار و د- ماکروساختار شبکه نانو الیاف خودآرایی شده (Beachley and Wen, 2010)

باید خاطر نشان کرد که روش‌های ساخت مواد نانو بسیار گسترده می‌باشد. به‌طور کلی از میان روش‌های ساخت نانو ذرات می‌توان سه روش بالا به پایین، پایین به بالا و الگوبرداری از نانو ساختارها را نام برد و سایر روش‌ها را به صورت زیر مجموعه‌ای از روش‌های ذکر شده در نظر گرفت. مثلاً روش عملیات حرارتی^۹ که روش بسیار مهمی است در گروه روش‌های بالا به پایین قرار گرفته است. در این بخش ابتدا نانو ذره تعریف می‌شود سپس توضیحاتی در خصوص انواع روش‌های مختلف ساخت نانو ذرات ارائه می‌گردد.

¹ Carbon Nano Tubes

² Silica Nano Particles

³ Nano Fibers

⁴ Carbon Nano Fibers

^۵ Nano Plates

⁶ Mica Nano Plates

⁷ Clay Nano Plates

⁸ Bulk

⁹ Thermal Processing

۲-۲- مواد نانومتری

۲-۲-۱- نانو ذرات

برای نانو ذرات تعاریف متعددی ارائه شده است، اما به‌طور خاص نانو ذرات دارای قطری بین ۱ تا ۲۵۰ نانومتر می‌باشند. به‌عبارتی آن‌ها در حوزه‌ای ما بین اثرات کوانتومی اتم‌ها، مولکول‌ها و خواص مواد توده‌ای قرار می‌گیرند. مواد مختلف در این مقیاس از خود خواص متفاوت و جالبی را بروز می‌دهند. توانایی ساخت و کنترل ساختار نانو ذرات به مهندسان این امکان را می‌دهد تا خواص حاصله را تغییر داده و بتوانند خواص مطلوب را در مواد طراحی کنند. موارد فوق‌العاده گسترده‌ای وجود دارند که اندازه فیزیکی ذره می‌تواند خواص بهبود یافته مفیدی را به‌وجود آورد. مثلاً اندازه کوچک ذرات امکان صیقل‌دهی ظریف‌تر سطوح را فراهم می‌کند. نانو ذرات به‌قدری کوچک هستند که می‌توان گفت بی‌نظمی چندانی در آن‌ها وجود نداشته و لذا فلزات پر قدرت و بسیار سخت را می‌توان از آن‌ها تولید کرد. مساحت سطحی بالای آن‌ها نیز سبب تولید کاتالیزور کارا تر و مواد پراثری می‌گردد. تغییر الگوهای لغزش متداول در مواد با اندازه دانه نانومتری و فعال شدن مکانیزم‌های لغزش مرزدانه‌ای از ویژگی‌های این مواد است که منجر به خواص مکانیکی منحصر به فرد آنها می‌شود (نخبگان جوان، ۱۳۸۵).

۲-۲-۲- روش‌های تولید نانو ذرات

روش‌های مختلفی برای تهیه و ساخت نانو ذرات وجود دارند. اما اصلی‌ترین روش‌های ساخت نانو ذرات را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود.

۲-۲-۲-۱- روش‌های پایین به بالا و انواع آن

در روش‌های پایین به بالا محصول از مواد ساده‌تر به وجود می‌آید، مانند ساخت یک موتور از قطعات آن. در حقیقت کاری که در این روش انجام می‌شود، کنار هم قرار دادن اتم‌ها و مولکول‌ها (که ابعاد کوچکتر از مقیاس نانو دارند) برای ساخت یک محصول نانومتری است. تصور کنید که قادر هستید اتم‌ها و مولکول‌ها را به‌طور واقعی ببینید و آن‌ها را به‌طور دلخواه کنار هم قرار دهید تا شکل مورد نظر حاصل شود. معمولاً روش‌های پایین به بالا ضایعاتی ندارند، هر چند الزاماً این مسأله صادق نیست.

روش‌های پایین به بالا انواع مختلفی دارد که به توضیح مختصری در مورد هریک می‌پردازیم:
رسوب‌دهی فاز گاز^۱: رسوب‌دهی فاز گاز به فرآیندی اطلاق می‌گردد که طی آن مواد در

^۱ Gas Phase Deposition

حالت بخار از طریق تراکم و واکنش شیمیایی به حالت جامد برمی گردند. این فرآیند برای پوشش‌دهی قطعات مختلف و رسیدن به خواص نوری، الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و مقاومت خوردگی ماده به کار می‌رود. این روش همچنین برای تشکیل فیلم‌ها و الیافی که برای فیلتر کردن مواد کامپوزیت مصرف می‌شوند، کاربرد دارد. فرآیندهای رسوب‌دهی گازی به‌طور معمول در محفظه‌ی خلاء به‌دست می‌آید. رسوب‌دهی شیمیایی و فیزیکی بخار از مهم‌ترین روش‌های رسوب‌دهی فاز گاز هستند.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار^۱: رسوب‌دهی شیمیایی بخار یک فرآیند شیمیایی است که برای رسوب فیلم‌های نازک از مواد گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند یک لایه از ماده در معرض یک یا چند ماده تبخیر شده قرار می‌گیرد و طی آن مواد اولیه با لایه مذکور واکنش داده و تجزیه می‌شود و محصول رسوبی مورد نظر را به‌وجود می‌آورند. البته در این فرآیند محصولات جانبی نیز به‌وجود می‌آیند که به‌وسیله گاز خارج می‌شوند. رسوب‌دهی شیمیایی بخار به‌طور وسیع در تولید نیمه‌هادی‌ها (به‌عنوان یک بخش از فرآیند تولید نانو ساختارهای نیمه‌هادی) و برای رسوب فیلم‌های گوناگون نظیر سیلیکون‌های پلی کریستال، آمورف، اپیتکسیال، سیلیکون، ژرمانیوم، تنگستن، سیلیکون نیتريد، سیلیکون اکسی نیتريد و تیتانیم نیتريد استفاده می‌شود. فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی بخار برای تولید الماس سنتزی نیز کاربرد دارد.

رسوب‌دهی شیمیایی در فشار اتمسفری^۲: یک روش رسوبی است که در آن واکنش در فشار اتمسفری انجام می‌شود. فشار اتمسفری باعث می‌گردد سرعت رسوب فیلم افزایش یابد و به حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر بر دقیقه برسد. در این فرآیند به‌دلیل تراکم سریع مولکول‌های گازی، هسته‌زایی هموزون صورت می‌گیرد و فیلم‌های تهیه شده از این روش اثرپذیری کمی از خود نشان می‌دهند. همچنین به‌دلیل داشتن تغییرات قابل اغماض محصول، این روش کاربرد زیادی در صنعت دارد.

رسوب‌دهی شیمیایی بخار پلاسمایی میکروویو^۳: در این روش ماده اولیه در پلاسمایی که از برهم‌کنش امواج ماکروویو و مخلوط گازی (معمولاً مخلوط گازهای H_2 و CH_4) ایجاد می‌شود، قرار می‌گیرد. این برهم‌کنش فرآیند هسته‌زایی هیتروزن را القا می‌کند. در مرحله بعد هسته‌های مذکور به یکدیگر چسبیده و فیلم یکنواختی را تشکیل می‌دهند. جهت‌گیری هسته‌های اولیه

¹ Chemical Vapor Deposition

² Chemical Deposition at Atmospheric Pressure

³ Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition