

سُبْحَانَكَ يَا رَبِّ الْعَالَمِينَ



دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

## طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند ایکپ-کانفرم با

## هدف ارتقاء شاخصه‌های مکانیکی محصول

نگارنده

صادق مرادی

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

اساتید مشاور

دکتر سید مجتبی واردی کولایی

مهندس حسن غفوریان نصرتی

بهمن ۱۳۹۹

## فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای صادق مرادی به شماره دانشجویی ۹۶۳۵۶۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان طراحی و بهینه سازی پارامترهای فرایند ایکپ-کانفرم با هدف ارتقاء شاخصه های مکانیکی محصول که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> قبول ( با درجه : _____ امتیاز _____ )	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

۳- خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۴- قابل قبول ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی گردویی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	دکتر سید مجتبی واردی کولایی	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندس حسن غفوریان نصرتی	مربی	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی حیدری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

## تقدیم‌نامه

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

## سپاس‌گزاری

سپاس از پدر دلسوز و مادر فداکارم، این دو معلم بزرگوار، که همواره بر کوتاهی و درشتی من قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند. آن‌ها که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده‌اند. کمال تشکر و قدردانی از اساتید فرهیخته، دکتر مهدی گردویی، دکتر سید مجتبی واردی کولایی و مهندس حسن غفوریان نصرتی که در کمال سعہ‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه برای من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند. با سپاس از اساتید گروه مکانیک بویژه دکتر پوریا اکبرزاده و مهندس مهدی اخیانی که در طول دوره تحصیل کمک‌های شایانی کردند. همچنین بر خود واجب دانسته که سپاس‌گزار کمک‌ها و حمایت‌های تمامی اعضای خانواده و دوستان صمیمی خود باشم.

## تعهد نامه

اینجانب صادق مرادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایند ایکپ-کانفرم با هدف ارتقاء شاخصه‌های مکانیکی محصول تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ‌جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

## چکیده

محدودیت‌های موجود فرایند فشردن در کانال همسان زاویه‌دار (ایکپ) موجب گسترش روش‌های توسعه یافته به منظور مداوم کردن فرایند شده است. این محدودیت‌ها شامل کوتاه بودن طول قطعه‌کار، ناپیوسته بودن فرایند و ایجاد دورریز لبه‌های ابتدا و انتهای، محدودیت کورس پرس و نیاز به قطعات مازاد برای خارج کردن ماده از کانال قالب ایکپ می‌باشد. به همین سبب فرایند ایکپ در تولید انبوه کارایی لازم را نداشته و مقرون به صرفه نیست. در سال‌های اخیر محققین به روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید پیوسته مانند فرایند ایکپ مداوم توجه ویژه داشته‌اند. به منظور شناخت بهتر این فرایند، در پژوهش حاضر به بررسی اثر پارامترهای موثر بر فرایند ایکپ مداوم آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و همچنین بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. هدف، دستیابی به میزان حداکثر استحکام تسلیم میله، حداقل گشتاور و حداقل انحنای میله و همچنین دستیابی به توزیع کرنش یکنواخت‌تر در میله است. تاثیر پارامترهای شعاع چرخ‌دوار، زاویه خم میله، زاویه‌های گوشه و کانال قالب، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار، ضریب اصطکاک بین میله و قالب و نسبت ابعادی کانال قالب بر روی گشتاور فرایند، استحکام تسلیم میله، انحنای میله خروجی و یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله بررسی می‌شود. برای این منظور ۸۸ آزمایش بر اساس روش سطح پاسخ در نرم‌افزار مینی تب طراحی و شبیه‌سازی آن‌ها (پس از اعتبارسنجی) با استفاده از نرم‌افزار آباکوس اجرا شده است. به منظور مدل‌سازی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیومی از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شده است. برای پیدا کردن تعداد لایه‌ها و همچنین تعداد نرون‌ها در هر لایه از دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و وال (نهنگ) استفاده شده است. شبکه عصبی پرسپترون دو لایه بهینه‌شده با الگوریتم ازدحام ذرات با میزان میانگین مربعات خطایی برابر ۰/۰۰۲۷ به عنوان بهترین شبکه عصبی انتخاب و بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم براساس آن، توسط دو الگوریتم ازدحام ذرات و وال اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای زوایای کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب بر روی تمامی پاسخ‌ها تاثیری معنادار دارد. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی فرایند نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با خطای حدود ۱۵ درصد، کمترین خطا و روش سطح پاسخ و الگوریتم وال، هر دو دارای خطایی ۱۷ درصد می‌باشند.

## واژگان کلیدی:

آلومینیوم ۷۰۷۵، بهینه‌سازی، ایکپ مداوم، روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم وال

## مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- مرادی ص، گردویی م، غفوریان نصرتی ح، واردی کولایی س م، بهینه‌سازی و بررسی عوامل موثر فرایند ایکپ مداوم با استفاده از روش سطح پاسخ، مطالعه موردی: میله آلومینیوم ۷۰۷۵، نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، بهمن ماه، سال ۱۳۹۹، (در مرحله داوری)



## فهرست عنوان‌ها

### فصل ۱ : مقدمه ..... ۱

۱-۱ نانومواد ..... ۲

۲-۱ تغییر شکل پلاستیک شدید و روش‌های آن ..... ۴

۱-۲-۱ تغییر شکل پیچشی تحت فشار بالا ..... ۵

۲-۲-۱ نورد تجمعی ..... ۶

۳-۲-۱ اکستروژن پیچشی ..... ۷

۴-۲-۱ فشردن در کانال همسان زاویه‌دار ..... ۸

۵-۲-۱ توسعه فرایند ایکپ ..... ۱۱

۳-۱ مرور بر منابع تحقیق ..... ۱۸

۴-۱ معرفی پایان‌نامه ..... ۲۲

۵-۱ اهداف و نوآوری پایان‌نامه ..... ۲۴

### فصل ۲ : مواد و روش تحقیق ..... ۲۷

۱-۲ شناخت آلومینیوم ۷۰۷۵ ..... ۲۸

۲-۲ آماده سازی نمونه‌ها ..... ۲۹

۱-۲-۲ اجرای فرایند ایکپ مداوم ..... ۳۰

۲-۲-۲ آزمون فشار ..... ۳۱

۳-۲ شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهار گوش ..... ۳۲

۴-۲ روش سطح پاسخ ..... ۳۴

۱-۴-۲ طراحی آزمون ایکپ مداوم با روش سطح پاسخ ..... ۳۵

۳۷	شبکه عصبی مصنوعی	۵-۲
۳۷	ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی	۱-۵-۲
۳۹	شبکه پرسپترون چند لایه	۲-۵-۲
۴۰	شبکه عصبی مورد استفاده و بهینه‌سازی آن	۳-۵-۲
۴۱	الگوریتم ازدحام ذرات	۶-۲
۴۲	تعاریف اولیه الگوریتم ازدحام ذرات	۱-۶-۲
۴۳	انتخاب تصادفی جمعیت اولیه ذرات	۲-۶-۲
۴۳	انتخاب تعداد ذرات اولیه	۳-۶-۲
۴۴	ثبت بهترین موقعیت برای هر ذره و بهترین موقعیت در بین کل ذرات	۴-۶-۲
۴۵	آزمون هم‌گرایی	۵-۶-۲
۴۶	الگوریتم وال	۷-۲
۴۷	فرایند محاصره شکار	۱-۷-۲
۴۹	روش حمله شبکه‌های حسابی (مرحله بهره‌برداری)	۲-۷-۲
۵۱	جستجوی طعمه (مرحله اکتشاف)	۳-۷-۲

### فصل ۳ : نتایج و بحث ..... ۵۳

۵۴	آزمون فشار	۱-۳
۵۵	فرایند ایکپ مداوم	۲-۳
۵۶	شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم	۳-۳
۵۷	روش سطح پاسخ	۴-۳
۵۷	صحت‌سنجی تحلیل واریانس	۱-۴-۳
۵۹	تحلیل واریانس	۲-۴-۳

۶۳	..... اثرات اصلی پارامترها	۳-۴-۳
۶۴	..... اثرات تقابلی پارامترها	۴-۴-۳
۶۷	..... حالت بهینه به روش سطح پاسخ	۵-۴-۳
۶۸	..... شبکه عصبی مصنوعی	۵-۳
۶۹	..... بهینه‌سازی شبکه عصبی با الگوریتم ازدحام ذرات	۱-۵-۳
۷۰	..... بهینه‌سازی شبکه عصبی با الگوریتم WOA	۲-۵-۳
۷۱	..... مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌ساز در ایجاد شبکه عصبی	۳-۵-۳
۷۴	..... معرفی بهینه‌ترین شبکه	۴-۵-۳
۷۹	..... بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات	۶-۳
۸۰	..... بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با استفاده از الگوریتم وال	۷-۳
۸۲	..... مقایسه روش‌های بهینه‌سازی PSO و WOA با روش RSM	۸-۳

**فصل ۴ : نتیجه‌گیری و پیشنهادها** ..... ۸۳

۸۴	..... نتیجه‌گیری	۱-۴
۸۸	..... ارائه پیشنهادها	۲-۴

**پیوست** ..... ۸۹

**منابع** ..... ۹۸

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ طرح‌واره روش HPT [7] ..... ۵
- شکل ۲-۱ طرح‌واره نورد تجمعی [8] ..... ۷
- شکل ۳-۱ فرایند اکستروژن پیچشی [12] ..... ۸
- شکل ۴-۱ الف) طرح‌واره فرایند ایکپ و پارامترهای هندسی  $\varphi$  و  $\psi$  قالب ایکپ [13] ..... ۹
- شکل ۵-۱ الف) مسیر A (ب) سیستم لغزشی مسیر A [17] ..... ۱۰
- شکل ۶-۱ الف) مسیر B<sub>A</sub> (ب) سیستم لغزشی مسیر B<sub>A</sub> [17] ..... ۱۰
- شکل ۷-۱ الف) مسیر B<sub>C</sub> (ب) سیستم لغزشی مسیر B<sub>C</sub> [17] ..... ۱۰
- شکل ۸-۱ الف) مسیر C (ب) سیستم لغزشی مسیر C [17] ..... ۱۱
- شکل ۹-۱ طرح‌واره فرایند ایکپ با قالب چرخشی [23] ..... ۱۲
- شکل ۱۰-۱ فرایند اکستروژن جانبی [24] ..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱ طرح‌واره قالب چند پاسه در فرایند ایکپ [25] ..... ۱۳
- شکل ۱۲-۱ طرح‌واره فرایند ایکپ در کانال موازی [26] ..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱ طرح‌واره فرایند DCAP [27] ..... ۱۵
- شکل ۱۴-۱ طرح‌واره فرایند تغییر شکل برشی متوالی [30] ..... ۱۶
- شکل ۱۵-۱ طرح‌واره فرایند ایکپ مداوم ..... ۱۷
- شکل ۱۶-۱ قطعه آلومینیوم خالص تجاری بعد از فرایند ایکپ مداوم [21] ..... ۱۸
- شکل ۱۷-۱ الف) مقایسه نتایج نیرو و گشتاور در زوایای قالب ۹۰°، ۱۰۰° و ۱۱۰°، ب) مقایسه نتایج عددی و تجربی مقدار کرنش پلاستیک [35] ..... ۱۹
- شکل ۱۸-۱ الف) نمونه آلومینیوم ۶۱۰۱ پس از اجرای شش پاس فرایند ایکپ مداوم، ب) طرح‌واره کلی فرایند [36] ..... ۱۹

- شکل ۱-۱۹ الف) طرح‌واره فرایند ایکپ مداوم، ب) نمونه‌های آلیاژی آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل و بعد از اجرای فرایند [37]..... ۲۰
- شکل ۱-۲۰ طرح‌واره فرایند C2S2؛ الف) قبل از اجرای فرایند شبیه‌سازی، ب) بعد از اجرای فرایند شبیه‌سازی [38]..... ۲۱
- شکل ۱-۲۱ الف) مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تاثیر فاکتور برشی بر مقدار گشتاور، ب) مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تاثیر توان کرنش سختی بر مقدار گشتاور [40]..... ۲۲
- شکل ۲-۱ نمونه‌های اولیه آماده شده جهت اجرای فرایند آنیل و آزمون فشار ..... ۳۰
- شکل ۲-۲ دستگاه ایکپ مداوم ..... ۳۱
- شکل ۲-۳ اجرای آزمون فشار نمونه‌های آلومینیوم با استفاده از دستگاه سنتام مدل STD-600 ..... ۳۲
- شکل ۲-۴ نمونه‌های آزمون فشار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پس از اجرای فرایند ایکپ مداوم ..... ۳۲
- شکل ۲-۵ مقایسه انرژی جنبشی با انرژی کل در شبیه‌سازی فرایند ..... ۳۳
- شکل ۲-۶ مدل المان محدود فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش ..... ۳۴
- شکل ۲-۷ ساختار شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون با دو لایه پنهان ..... ۳۹
- شکل ۲-۸ روند نما الگوریتم ازدحام ذرات ..... ۴۶
- شکل ۲-۹ رفتار تغذیه حباب‌تور وال کوهان‌دار [49] ..... ۴۷
- شکل ۲-۱۰ بردارهای مکان دو بعدی و سه بعدی و مکان‌های احتمالی بعدی [49] ..... ۴۹
- شکل ۲-۱۱ مکانیزم جستجوی شبکه حبابی در الگوریتم وال؛ الف) موقعیت مارپیچی، ب) حلقه زدن انقباضی [49]..... ۵۰
- شکل ۲-۱۲ مکانیزم اکتشاف پیاده سازی شده در الگوریتم وال [49]..... ۵۱
- شکل ۳-۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه آلومینیوم ۷۰۷۵ اولیه و آنیل شده ..... ۵۴
- شکل ۳-۲ الف) مجموعه ایکپ مداوم مقطع چهارگوش میله آلومینیومی ۷۰۷۵؛ ب) منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده و یک پاس ایکپ مداوم شده ..... ۵۶

- شکل ۳-۳ الف) تعیین میزان انحنای میله پس از خروج از قالب ایکپ، ب) تعیین توزیع کرنش در سطح مقطع میله ..... ۵۷
- شکل ۳-۴ الف) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برآزش یافته، ب) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده ..... ۵۸
- شکل ۳-۵ نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی الف) گشتاور مورد نیاز، ب) استحکام تسلیم میله، ج) یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله، د) انحنای میله خروجی ..... ۶۱
- شکل ۳-۶ چگونگی تاثیر ضریب اصطکاک بین میله و قالب، زاویه برخورد کانال‌های قالب و زاویه گوشه بیرونی قالب بر؛ الف) گشتاور فرایند، ب) استحکام تسلیم میله، ج) یکنواختی کرنش، د) انحنای میله آلومینیومی ..... ۶۴
- شکل ۳-۷ اثرات تقابلی پارامترها بر یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله آلومینیومی؛ الف) اثر تقابلی بین زوایای قالب (CD)، ب) اثر تقابلی بین اصطکاک قالب و زاویه برخورد کانال قالب (CF)، ج) اثر تقابلی بین اصطکاک قالب و زاویه گوشه آن (DF) ..... ۶۵
- شکل ۳-۸ چگونگی تاثیر اثر تقابلی بین ضریب اصطکاک قالب و زاویه برخورد کانال قالب (CF) بر پاسخ‌ها؛ الف) گشتاور فرایند ایکپ مداوم، ب) استحکام تسلیم میله، ج) یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله، د) انحنای میله خروجی از قالب ایکپ ..... ۶۷
- شکل ۳-۹ مقایسه درصد میانگین مربعات خطا در شبکه با تعداد لایه‌های مختلف بهینه شده با دو الگوریتم PSO و WOA ..... ۷۲
- شکل ۳-۱۰ مقایسه کاهش میانگین مربعات خطا در تعداد تکرارهای مختلف برای الف) شبکه‌ای با دو لایه پنهان، ب) شبکه‌ای با سه لایه پنهان، ج) شبکه با چهار لایه پنهان ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۱ نمودار ضرایب رگرسیونی الف) نمودار ضریب رگرسیون کل، ب) نمودار ضریب رگرسیون به ازای گشتاور، ج) نمودار ضریب رگرسیون به ازای استحکام تسلیم میله، د) نمودار ضریب رگرسیون به ازای انحنای میله پس از خروج از قالب، ی) نمودار ضریب رگرسیون به ازای توزیع کرنش ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۲ نمودار هیستوگرام الف) نمودار هیستوگرام کل، ب) نمودار هیستوگرام به ازای گشتاور، ج) نمودار هیستوگرام به ازای استحکام تسلیم میله، د) نمودار هیستوگرام به ازای انحنای میله پس از خروج از قالب، ی) نمودار هیستوگرام به ازای توزیع کرنش ..... ۷۹
- شکل ۳-۱۳ مقایسه روش‌های بهینه‌سازی ..... ۸۲

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ استحکام تسلیم و نهایی نمونه آلومینیوم ۱۰۵۰ بعد از اجرای ۴ پاس به وسیله فرایندهای ایکپ مداوم و C2S2 [38]..... ۲۱
- جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [43]..... ۲۹
- جدول ۲-۲ ترکیب فیزیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [43]..... ۲۹
- جدول ۳-۲ پارامترهای مستقل فرایند با سطوح طراحی..... ۳۶
- جدول ۱-۳ پارامترهای مورد استفاده در اجرای فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵..... ۵۶
- جدول ۲-۳ جدول تحلیل واریانس برای پاسخ‌های مورد نظر در بررسی فرایند ایکپ مداوم..... ۶۲
- جدول ۳-۳ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵..... ۶۸
- جدول ۴-۳ درصد ضریب رگرسیون به ازای تمامی پارامترها و تک تک پارامترهای خروجی در الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات..... ۶۹
- جدول ۵-۳ مشخصات شبکه‌های عصبی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات..... ۶۹
- جدول ۶-۳ درصد ضریب رگرسیون به ازای تمامی پارامترها و تک تک پارامترهای خروجی در الگوریتم بهینه‌ساز وال..... ۷۰
- جدول ۷-۳ مشخصات شبکه‌های عصبی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم وال..... ۷۱
- جدول ۸-۳ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ با الگوریتم PSO..... ۸۰
- جدول ۹-۳ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ در الگوریتم WOA..... ۸۱

## فهرست نشانه‌ها

اندازه متوسط دانه	$d$	تعداد نرون‌های لایه پنهان $i$ ام	$N_i$
ضریب کرنش سختی	$K$	خروجی‌های مطلوب	$O_d$
تعداد متغیرهای مستقل	$k$	خروجی‌های پیش‌بینی شده	$O_p$
تعداد دفعات عبور نمونه از قالب	$N$	بهترین موقعیت یافت شده	$P_{best}$
توان کرنش سختی	$n$	مقدار پاسخ حاصل از شبیه‌سازی	$R_{FEM}$
گشتاور	$T$	مقدار پاسخ حاصل از مینی‌تب	$R_{Minitab}$
تعداد تکرار	$t$	مقدار پاسخ حاصل از الگوریتم ازدحام ذرات	$R_{PSO}$
ضریب وزنی	$W$	مقدار پاسخ حاصل از الگوریتم وال	$R_{WOA}$
تابع پاسخ	$y$	توزیع کرنش در سطح مقطع میله	$STD_\varepsilon$
زاویه برخورد کانال قالب	$\varphi$	بردار سرعت	$V_i$
زاویه گوشه بیرونی قالب	$\psi$	بردار موقعیت	$X_i$
استحکام تسلیم ماده	$\bar{\sigma}$	متغیرهای مستقل	$x_i$
انحنای میله پس از خروج از قالب	$\rho$	استحکام شبکه	$\sigma_0$
بردار کاهش خطی	$\vec{a}$	کرنش معادل	$\varepsilon_N$
بردار تصادفی بین صفر و یک	$\vec{r}$		
بردار مکان	$\vec{X}$		
بردار مکان تصادفی	$\vec{X}_{rand}$		
بردار مکان بهترین جواب	$X^*$		
ثابت تنش	$k_y$		



# فصل ۱ : مقدمه

دنیای نانومواد را از یک دیدگاه می‌توان به دو دسته اصلی مواد نانواندازه و مواد نانوساختار دسته‌بندی نمود. مواد نانواندازه به این معنی است که ماده مورد نظر دارای ابعاد نانومتری است و مواد نانوساختار به موادی گفته می‌شود که ابعاد ظاهری آنها به صورت بالک است، ولی ساختار تشکیل دهنده آنها در ابعاد نانو قرار دارد. مواد نانو ساختار با دو رویکر اصلی، بالا به پایین<sup>۱</sup> و پایین به بالا<sup>۲</sup> ساخته می‌شوند که در اولی منظور تغییر ساختار درشت اندازه ماده و رساندن آن به ابعاد نانومتری است و در دومی منظور این است که ماده بالک را از ابتدا به وسیله چینش اتم‌ها یا اجزا نانواندازه خلق کنند. در رویکر بالا به پایین، روش‌های گوناگونی وجود دارد که دسته‌ای از آنها، به صورت اعمال کار مکانیکی بر روی ماده هستند [1]. یکی از روش‌های اصلی این دسته، روش تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۳</sup> (SPD) است که در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فرایندهای این روش که با توجه به شکل آن‌ها دسته‌بندی می‌شوند، در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به فلز، باعث ایجاد ساختار ریزدانه در ماده می‌شوند.

برخی از این روش‌ها برای فرآوری مواد حجیم<sup>۴</sup> و برخی دیگر برای فرآوری ورق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تفاوت دیگر این روش‌ها در فعال کردن تعداد سیستم‌های لغزش مواد می‌باشد که همین امر در میزان توانایی یک فرآیند در ریزدانه کردن مواد، موثر است [2].

## ۱-۱ نانومواد

خواص مکانیکی و فیزیکی به فاکتورهای مختلفی بستگی دارد، یکی از پارامترهای مهم اندازه دانه می‌باشد، طبق رابطه هال-پچ<sup>۵</sup> تنش تسلیم یک ماده با جذر اندازه قطر دانه‌های آن رابطه عکس دارد:

<sup>۱</sup> Top-down

<sup>۲</sup> Bottom-up

<sup>۳</sup> Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>۴</sup> Bulk

<sup>۵</sup> Hall-Petch

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1-1)$$

که در این رابطه  $\sigma_0$  استحکام شبکه،  $k_y$  ثابت تنش که به جنس ماده بستگی دارد و  $d$  اندازه‌ی متوسط دانه است. طبق این رابطه هر چه اندازه دانه کوچک‌تر باشد تنش تسلیم افزایش می‌یابد، به همین خاطر پژوهشگران در راستای دستیابی به مواد با ذرات نانو تلاش‌های زیادی کرده‌اند.

نانومواد از نظر دانه‌بندی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- مواد درشت دانه با اندازه دانه‌های بزرگ‌تر از  $1 \mu\text{m}$
- مواد ریز دانه با اندازه دانه‌ی کوچک‌تر از  $1 \mu\text{m}$
- نانومواد با اندازه دانه کوچک‌تر از  $100 \text{ nm}$

تاکنون روش‌های زیادی برای تولید نانومواد ارائه شده و تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. همان‌طور که گفته شد نانومواد را می‌توان به دو روش کلی تقسیم کرد. روش اول که تحت عنوان روش پایین به بالا معرفی شده است، شامل فرایندهایی نظیر آلیاژسازی مکانیکی<sup>۱</sup>، رسوب شیمیایی بخار<sup>۲</sup>، انجماد سریع<sup>۳</sup> و آسیاب گلوله‌ای و پرس<sup>۴</sup> است که قابلیت تولید دانه‌هایی با اندازه دانه  $10 \text{ nm}$  تا  $50 \text{ nm}$  را دارند [3]. از این فرایندها برای تولید مقادیر زیاد پودرهای نانو بلور استفاده می‌شود. مشکل اصلی این فرایندها تولید یک محصول نهایی از طریق پرس کردن این پودرها است. پودرهای تولید شده به روش مکانیکی دارای سختی زیادی هستند به همین دلیل پرس سرد آن‌ها تقریباً غیر ممکن است. از طرفی استفاده از پرس داغ برای تفجوش کردن این پودرها می‌تواند منجر به رشد دانه‌ها و وقوع تبلور مجدد شود. تاکنون پژوهشگران روش‌های مختلفی برای رفع این مشکلات پیشنهاد داده‌اند اما هنوز تحقیقات برای پیدا کردن روش مناسب

<sup>۱</sup> Mechanical alloying

<sup>۲</sup> Chemical vapor deposition

<sup>۳</sup> Rapid solidification

<sup>۴</sup> Ball milling

برای تولید محصول یکپارچه و دستیابی به اندازه دانه نانومتری ادامه دارد. روش دوم برای تولید مواد با ابعاد نانومتری بالا به پایین نام دارد، که شامل فرآیندهای متعددی است که با اعمال کرنش‌های شدید پلاستیک در مواد فلزی باعث کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری می‌شوند. اساس کار این روش کاهش مستقیم اندازه دانه‌ها در نمونه‌ای با ابعاد بزرگ است. این روش باعث یکنواختی بیشتر و تنش‌های پسماند کمتر در محصول تولید شده می‌شود [4].

## ۱-۲ تغییر شکل پلاستیک شدید و روش‌های آن

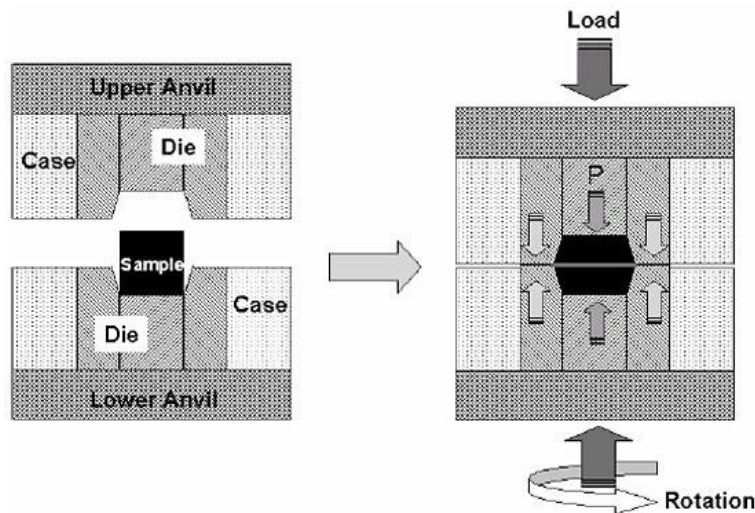
روش تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)، در واقع مجموعه تکنیک‌هایی است که طی آن می‌توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود، بدون اینکه فلز دچار شکست و ترک‌خوردگی شود. در روش SPD نه تنها استحکام فلز افزایش می‌یابد، بلکه موجب افت داکتیلیته شده و گاهی افزایش نرمی نیز مشاهده می‌شود. که این موضوع وجه تمایز این روش با دیگر روش‌ها است، علت این ویژگی خاص ساختار نانو ایجاد شده در فلز توسط روش تغییرشکل پلاستیک شدید است. مواد ریزساختار دارای خواصی از جمله استحکام استاتیکی بالا، مقاومت به خستگی مطلوب، قابلیت شکل‌پذیری و چقرمگی خوب هستند. این مواد دارای مصارف گسترده و مهمی می‌باشند [5].

در این بخش روش‌های SPD شرح داده خواهند شد. تا کنون روش‌های متنوعی برای SPD کشف شده‌اند که در همه‌ی آن‌ها کرنش بسیار بالایی به قطعه اعمال می‌شود. کرنش بالا در این روش‌ها باعث می‌شود نابعی‌ها آرایش مجدد یافته و در نهایت مرزدانه‌های جدیدی به وجود آید. معمولاً در روش‌های SPD مقطع و هندسه‌ی جسم تغییر نمی‌کند که این خاصیت تکرارپذیری این روش‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد و طبق این خاصیت می‌توان کرنش‌های بالاتری با تکرار یک روش اعمال کرد. از دیگر خصوصیات این روش‌ها، حفظ شکل اولیه محصول است که مانع جریان آزاد در مواد می‌شود؛ که می‌تواند در تولید یک محصول با فشار بالای هیدرواستاتیکی به ما کمک کند. در فرآیندهای SPD امکان تولید ماده با اندازه‌ی دانه‌ی کمتر از  $1\ \mu\text{m}$  وجود دارد. هزینه‌ی بالا، اتوماسیون به منظور تولید انبوه و پیچیدگی فرایند تولید مانع از صنعتی

شدن روش‌های SPD است. از طرفی به دلیل خواص مطلوب مواد ریزدانه، این فرآیندها از مقیاس آزمایشگاهی خارج شده و تولید صنعتی می‌شوند. در ادامه روش‌های اصلی تغییرشکل پلاستیک شدید ارائه می‌شوند.

### ۱-۲-۱ تغییر شکل پیچشی تحت فشار بالا

فرایند تغییرشکل پیچشی تحت فشار بالا<sup>۱</sup> (HPT) که در سال ۱۹۳۰ توسط بریجمن ارائه شد. به طور معمول در این فرایند یک نمونه دیسکی شکل نازک بین دو فک بالا و پایین تحت فشار قرار گرفته و کرنش از طریق چرخش دو فک اعمال می‌گردد [6]. در این فرایند معمولاً ضخامت دیسک از ۰/۵ mm و قطر آن از ۲۰ mm بیشتر نمی‌شود. طرح‌واره این فرایند در شکل ۱-۱ قابل مشاهده است. در این روش یک دیسک نازک تحت فشار زیاد تغییرشکل پیچشی پیدا می‌کند؛ از آنجایی که تنش‌های اعمالی در این فرایند از نوع هیدرواستاتیک فشاری هستند، کرنش‌های پلاستیک بسیار شدید را می‌توان بدون بروز شکست و ترک در نمونه بر آن اعمال کرد [7].



شکل ۱-۱ طرح‌واره روش HPT [7]

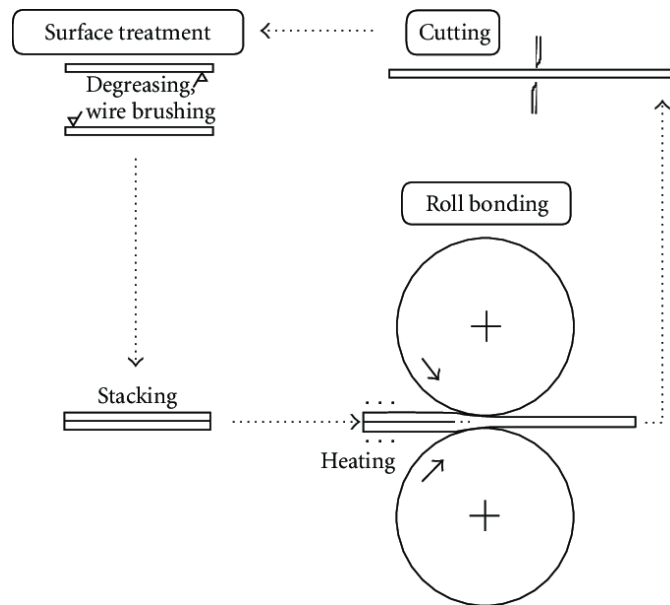
<sup>۱</sup> High Pressure Torsion (HPT)

## ۱-۲-۲ نورد تجمعی

نورد تجمعی<sup>۱</sup> (ARB) بر طبق اصول نشان داده شده در شکل ۱-۲ توسط سایتو و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است [8]. اولین مرحله در این فرایند آماده سازی سطح دو ورق می‌باشد که با برس زنی و رفع لایه‌های اکسیدی و چربی زدایی بین سطوح که باعث ایجاد یک لایه کار سخت شده می‌شود انجام می‌پذیرد. پس از آماده سازی، دو ورق طوری روی هم قرار می‌گیرند که سطوح پرداخت شده آن‌ها در تماس با هم باشند. مهم‌ترین مرحله در فرآیند نورد تجمعی، نورد هم‌زمان دو ورق است. استفاده از نورد در فرآیند ARB نه فقط به عنوان یک روش تغییر شکل بلکه به عنوان عاملی برای ایجاد اتصال بین دو ورق و تولید یک ورق کاملاً یکپارچه است. گاهی برای بهتر شدن این اتصال، فرآیند نورد در دمای بالا ولی زیر دمای تبلور مجدد، انجام می‌شود. مقدار کاهش ضخامت در هر مرحله ۵۰٪ بوده که در نتیجه آن ورق ضخامتی برابر ضخامت ورق اولیه خواهد داشت. سپس این ورق از راستای طولی به دو قسمت بریده می‌شود و مراحل کار مجدداً تکرار می‌شوند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که تشکیل ترک لبه‌ای کمتر اتفاق می‌افتد که این امکان را به ما می‌دهد این فرایند را تا تکرارهای بیشتر انجام دهیم [2]. سایتو با انجام این فرایند در هشت مرحله در دمای ۲۰۰°C توانست اندازه دانه‌ی آلومینیوم را از ۳۷ μm به کمتر از ۱ μm در راستای ضخامت برساند. سوچی و همکاران نیز این فرایند در ۵ مرحله انجام داده و اندازه دانه‌ی آلومینیوم را از ۱۸ μm به ۲۸۰nm رساندند. نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی توانایی این روش برای دستیابی به ساختار فوق‌ریزدانه است [9].

---

<sup>۱</sup> Accumulative Roll Bonding (ARB)



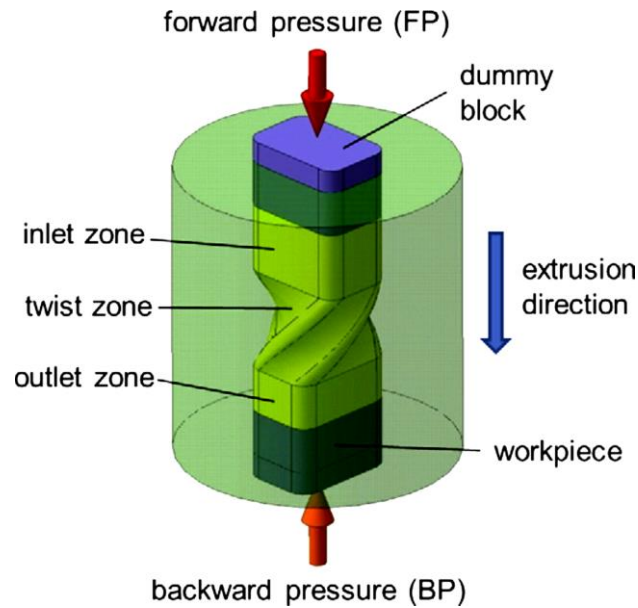
شکل ۱-۲ طرح‌واره نورد تجمعی [8]

### ۱-۲-۳ اکستروژن پیچشی

فرایند اکستروژن پیچشی<sup>۱</sup> برای تولید فلزات و آلیاژهای که دارای شکل‌پذیری بهتری هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماهیت تغییر شکل پلاستیک در این فرایند به شکل برش ساده است. تحقیقات انجام شده بیان‌گر این است که موثرترین راه برای دستیابی به مواد فوق‌ریزدانه ایجاد تنش برشی ساده است [10].

حالت اعمال تنش برشی در این فرایند مشابه فرایند فشردن در کانال همسان زاویه‌دار (ECAP) می‌باشد با این تفاوت که در روش اکستروژن پیچشی دو صفحه‌ی برشی مجزا وجود دارد که یکی عمود و دیگری موازی محور اکستروژن است [11]. این فرایند سبب بهبود قابل توجهی در خواص فیزیکی و مکانیکی فلزات می‌شود. در این روش نمونه در داخل یک کانال که دارای یک پیچش با زاویه مشخص است اکستروژد می‌شود (شکل ۱-۳). ابعاد نمونه بعد از هر پاس ثابت باقی می‌ماند. از این روش برای اکستروژد قطعات توخالی و یا قطعات با سطح مقطع مستطیلی نیز استفاده می‌شود. چرخش  $90^\circ$  قطعه در هر پاس باعث ایجاد کرنش‌های همگن‌تر در قطعه شده که این امر باعث بهبود خواص الکترونیکی و مغناطیسی می‌شود [12].

<sup>۱</sup> Twist extrusion

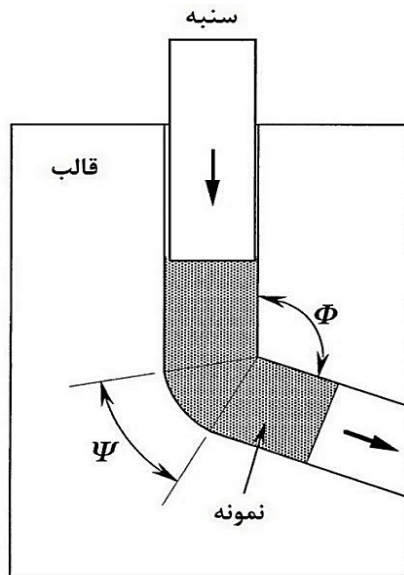


شکل ۳-۱ فرایند اکستروژن پیچشی [12]

## ۴-۲-۱ فشردن در کانال همسان زاویه‌دار

یکی از موثرترین روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی حجم مواد، فرایند فشردن در کانال همسان زاویه‌دار است. این فرایند اولین بار در سال ۱۹۸۱ توسط دانشمندی به نام سگال معرفی گردید. در طی دهه‌های اخیر این فرایند به عنوان فرایندی پرکاربرد در تولید مواد فوق‌ریزدانه تبدیل شده است. در این فرایند نمونه‌هایی که معمولاً به شکل استوانه یا چهار گوش هستند به داخل قالبی با کانال‌های هم مقطع که تحت زاویه مشخص نسبت به هم قرار گرفته‌اند اکستروژد می‌شوند. نمونه در حین عبور از داخل کانال‌ها، در گوشه قالب دچار تغییر شکل برشی ساده می‌شود. اگر سطح مقطع کانال‌ها یکسان باشد اندازه نمونه قبل و بعد از انجام فرایند تغییری نمی‌کند که نشان دهنده امکان تکرار مجدد فرایند است. طرح‌واره این فرایند را می‌توان در شکل ۴-۱ مشاهده کرد. مطابق شکل کانال‌ها تحت زاویه‌ای به نام  $\varphi$  به هم متصل شده‌اند و گوشه خارجی تقاطع این دو کانال زاویه  $\psi$  وجود دارد [2].





شکل ۱-۴ الف) طرحواره فرایند ایکپ و پارامترهای هندسی  $\psi$  و  $\varphi$  قالب ایکپ [13]

مقدار کرنش اعمالی به نمونه در هر عبور از قالب را می‌توان مطابق رابطه ۱-۲ محاسبه کرد.

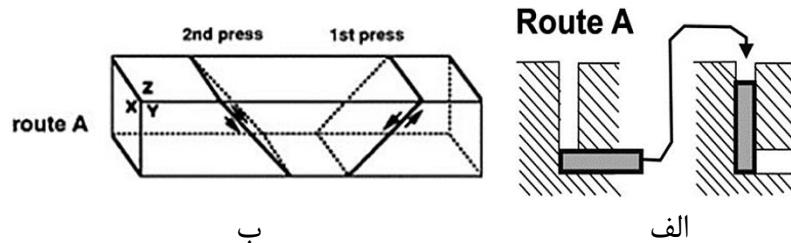
$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \csc \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \quad (۲-۱)$$

در این رابطه  $N$  تعداد دفعات عبور نمونه از قالب و  $\varepsilon_N$  کرنش معادل به ازای هر مرحله انجام فرایند می‌باشد [14]. به طور کلی پارامترهای مختلفی روی یکنواختی ساختار و خواص مکانیکی نمونه تولید شده در فرایند ایکپ موثراند. این پارامترها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد [15, 16].

- زاویه کانال قالب ( $\varphi$ ) و زاویه‌ی گوشه خارجی قالب ( $\psi$ ) که به طور مستقیم با فرایند ایکپ وابستگی دارند.
- پارامترهای آزمایشگاهی مانند سرعت پرس، دمای انجام فرایند و نیروی اعمالی به نمونه برای عبور از قالب ایکپ (این پارامترها به صورت تجربی تعیین می‌شوند).
- انتخاب مسیر فرایند و تعداد عبور نمونه از قالب.

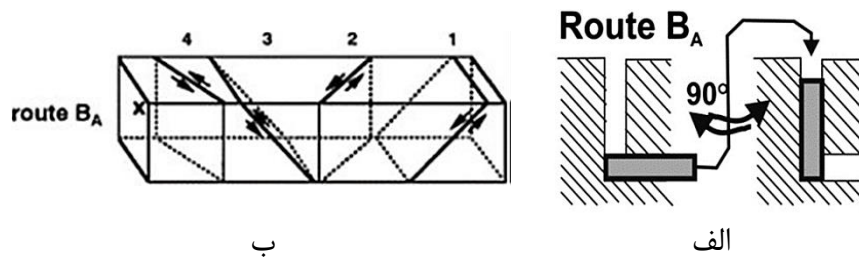
به طور کلی چهار مسیر در فرایند ایکپ وجود دارد که با توجه به سیستم‌های لغزشی متفاوتی که در عملیات پرس کاری نمونه در قالب از خود نشان می‌دهند، دسته‌بندی می‌شوند.

۱. مسیر A: در این مسیر نمونه اولیه پس از خروج از قالب بدون هیچ چرخشی دوباره در قالب قرار می‌گیرد. این مسیر را می‌توان در شکل (۱-۵ الف) و مسیر لغزش آن را در شکل (۱-۵ ب) مشاهده کرد [17].



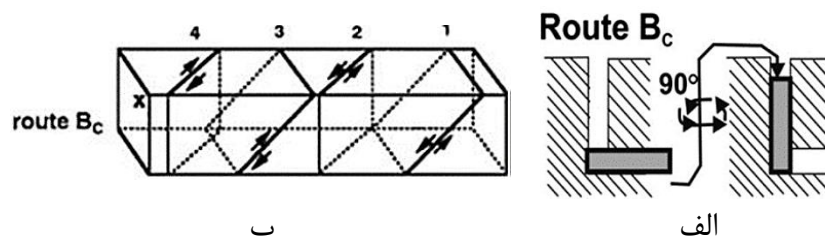
شکل ۱-۵ الف) مسیر A (ب) سیستم لغزشی مسیر A [17]

۲. مسیر B<sub>A</sub>: در این مسیر نمونه بعد از هر مرحله عبور از قالب ۹۰° در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد و برای انجام مجدد فرایند در قالب قرار می‌گیرد. طرح‌واره مسیر B<sub>A</sub> و سیستم لغزشی این مسیر در شکل ۱-۶ مشاهده می‌شود [17].



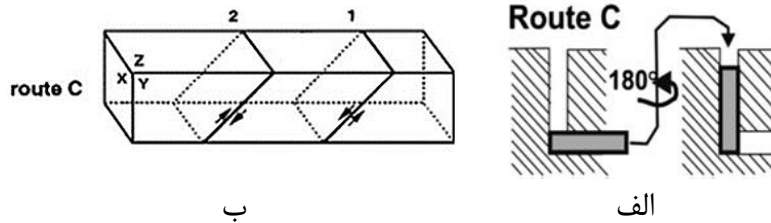
شکل ۱-۶ الف) مسیر B<sub>A</sub> (ب) سیستم لغزشی مسیر B<sub>A</sub> [17]

۳. مسیر B<sub>C</sub>: در این مسیر نمونه بین هر عبور از قالب ۹۰° در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. طرح‌واره کلی و سیستم لغزشی این مسیر را می‌توان در شکل ۱-۷ مشاهده کرد [17].



شکل ۱-۷ الف) مسیر B<sub>C</sub> (ب) سیستم لغزشی مسیر B<sub>C</sub> [17]

۴. مسیر C: در مسیر C نمونه  $180^\circ$  در جهت عقربه‌های ساعت در هر بار عبور از قالب چرخیده می‌شود. طرح‌واره کلی و سیستم لغزشی این مسیر را در شکل ۸-۱ می‌توان مشاهده کرد [17].



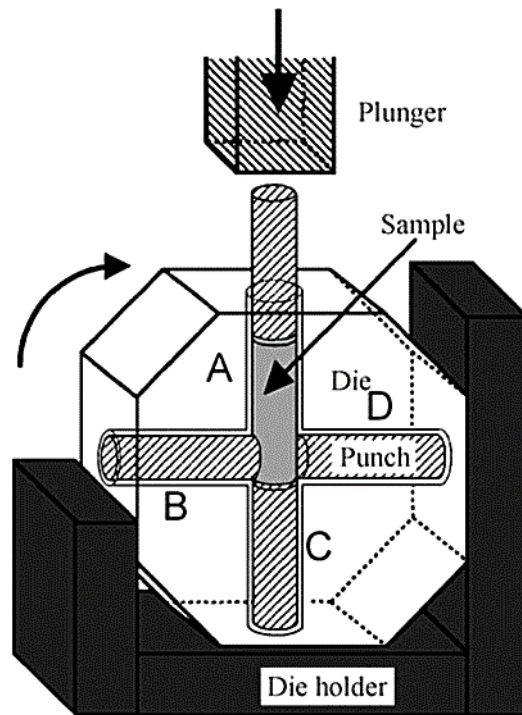
شکل ۸-۱ الف) مسیر C ب) سیستم لغزشی مسیر C [17]

در فرایند ایکپ با فشار پشتی نمونه توسط سنبه‌ای که سرعت ثابت دارد در قالب فشرده شده و از طرف دیگر قالب، سنبه‌ای جهت تعیین سرعت خروج نمونه از قالب استفاده می‌شود. سنبه تعیین کننده سرعت خروجی نمونه از قالب باعث می‌شود ابعاد نمونه کاملا مشابه ابعاد کانال باشد [18]. این فرایند به دلیل افزایش نیروی هیدرواستاتیک امکان رشد ترک در نمونه را کاهش می‌دهد [19].

## ۱-۲-۵ توسعه فرایند ایکپ

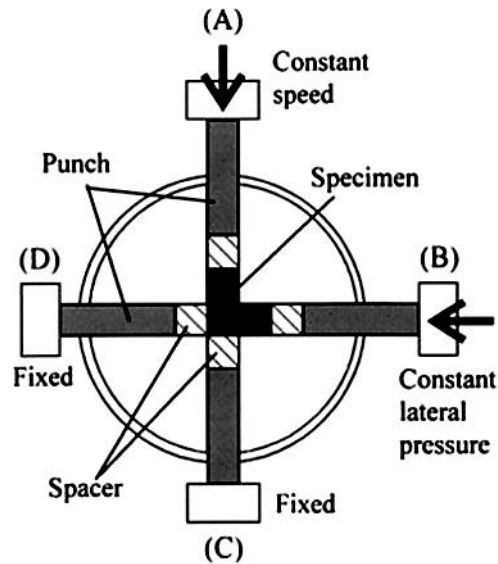
فرایند ایکپ به دلیل تولید ساختار فوق‌ریزدانه و اعمال کرنشی در حدود ۱ به مواد پلی‌کریستال در یک پاس عبور از قالب بسیار مورد توجه محققان قرار گرفت [20]. فرایند ایکپ سنتی مشکلاتی دارد. به دلیل محدودیت در جابه‌جایی رم دستگاه پرس، نمونه‌های تولید شده در این روش طول کمتری خواهند داشت [21]. علاوه بر این برای اعمال کرنش بیشتر، نمونه پس از هر بار عبور از قالب خارج می‌شود و سپس با چرخش بین هر عبور یا بدون چرخش در قالب قرار می‌گیرد که باعث افزایش زمان تولید نمونه خواهد شد. به دلیل وجود ترک‌های ریز و ساختار غیر یکنواخت ایجاد شده در ابتدا و انتهای نمونه تولید شده در این فرایند بخشی از نمونه تولید شده هدر می‌رود که باعث افزایش هزینه در تولید خواهد شد [22]. برای رفع این مشکلات و محدودیت‌ها و صنعتی شدن فرایند ایکپ، روش‌ها و قالب‌های جدیدی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها، استفاده از قالب چرخشی در فرایند ایکپ است (شکل ۹-۱). در این روش قالب دارای چهار کانال می‌باشد که با زاویه  $90^\circ$  نسبت به هم قرار گرفته‌اند. مزیت این روش حذف

جایگذاری مجدد نمونه در قالب و امکان اجرای فرایند با پاس‌های متوالی است. با این حال به دلیل استفاده از نمونه با طول کوچک احتمال ایجاد ناهمگنی در نمونه وجود دارد [23].



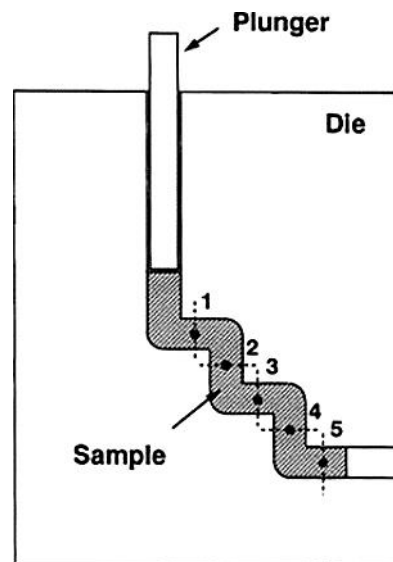
شکل ۹-۱ طرحواره فرایند ایکپ با قالب چرخشی [23]

فرایند بعدی که به منظور حذف این محدودیت‌ها ارائه شده، فرایند اکستروژن جانبی است. در این فرایند از چهار سنبه برای تامین نیرو لازم جهت انجام فرایند ایکپ استفاده شده است (شکل ۱۰-۱). نمونه توسط سنبه A به داخل کانال اکستروژن می‌شود و هم‌زمان توسط سنبه B تحت نیروی جانبی ثابت قرار می‌گیرد. این روند تا ۱۰ پاس عبور نمونه از قالب می‌تواند اجرا شود [24].



شکل ۱-۱۰ فرایند اکستروژن جانبی [24]

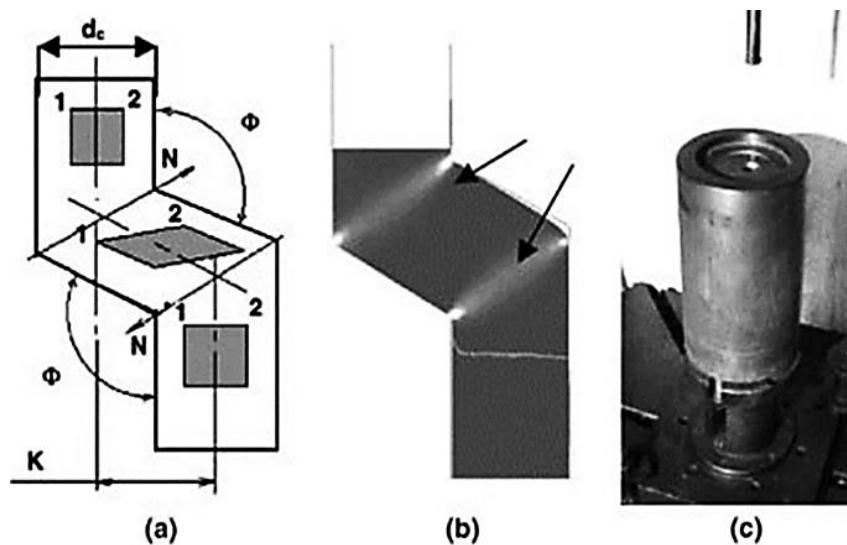
استفاده از قالبی که کانال آن شامل ۵ خم  $90^\circ$  است روش دیگری است که برای حذف محدودیت‌های فرایند ایکپ سنتی ارائه شده است (شکل ۱-۱۱). این روش قابلیت اعمال چند پاس توسط یک عبور نمونه از قالب را دارا می‌باشد. به منظور تعیین مشخصه‌های ساختاری نمونه در تعداد پاس‌های مختلف می‌توان از این روش استفاده کرد [25].



شکل ۱-۱۱ طرحواره قالب چند پاسه در فرایند ایکپ [25]

ایکپ در کانال‌های موازی روش دیگری است که برای رفع این محدودیت‌ها ارائه شده است. در این فرایند قالب دارای دو کانال موازی است که با زاویه  $\phi$  و فاصله  $K$  نسبت به قرار گرفته‌اند (شکل ۱-۱۲). مزیتی که

این روش نسبت به سایر روش‌ها داراست اعمال دو برش در هر عبور نمونه از قالب و دستیابی به کرنش مطلوب در هر پاس است. دو پارامتر مهم در این فرایند  $\phi$  و  $K$  می‌باشند که تشکیل الگوی سیلان و تنش کرنش در فرایند را تحت تاثیر قرار می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد بیشترین مقدار همگنی و کرنش در یک پاس این فرایند که برابر دو پاس در شکل معمول خود است، در مقدار زاویه  $\phi$  برابر  $100^\circ$  و مقدار  $K$  برابر قطر کانال می‌باشد. امکان انجام این فرایند تا دمای  $500^\circ\text{C}$  نیز وجود دارد. نتایج نشان دهنده بهبود همگنی نمونه تولید شده در این روش نسبت به ایکپ معمولی است [26].



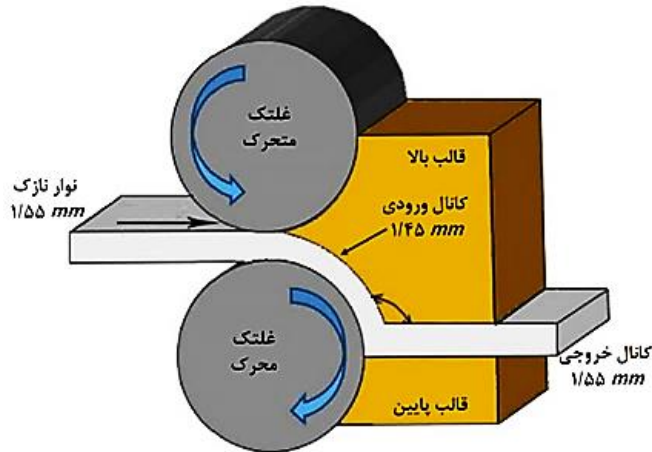
شکل ۱-۱۲ طرحواره فرایند ایکپ در کانال موازی [26]

کلیه فرایندهای ذکر شده به منظور حذف محدودیت‌ها در فرایند ایکپ به کار می‌روند، اما همچنان محدودیت طول نمونه اولیه در همه روش‌های ذکر شده دیده می‌شود. اقداماتی جهت رفع این محدودیت و انجام فرایند ایکپ به صورت مداوم نیز انجام گرفته است. اولین قدم در این زمینه ترکیب تجهیزات نورد در فرایند ایکپ می‌باشد. این ترکیب باعث به وجود آمدن روش‌هایی از قبیل برش موضعی متوالی<sup>۱</sup>، نورد در کانال همسان زاویه‌دار و فشردن در کانال غیرهمسان زاویه‌دار<sup>۲</sup> شده است. در روش فشردن در کانال غیر

<sup>۱</sup> Continuous Confined Strip Shearing (C2S2)

<sup>۲</sup> Dissimilar Channel Angular Pressing (DCAP)

همسان زاویه دار مطابق شکل ۱-۱۳، نمونه اولیه نوار نازک فلزی به ضخامت  $1/55$  mm است که بین دو غلتک اکستروود می‌شود. ضخامت نمونه پس از عبور از بین غلتک‌ها به  $1/45$  mm کاهش پیدا می‌کند. با عبور نمونه در کانال خروجی ضخامت به مقدار اولیه  $1/55$  mm باز می‌گردد [27].

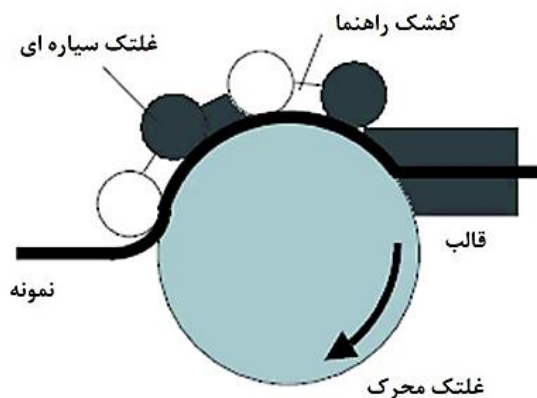


شکل ۱-۱۳ طرح‌واره فرایند DCAP [27]

قدم دوم، فرایند کشش در کانال همسان زاویه‌دار<sup>۱</sup> است که به منظور تولید نمونه‌های میله‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها تجربی کاهش ۱۵ درصدی سطح مقطع نمونه اولیه در این فرایند را نشان می‌دهد. این فرایند در تولید نمونه‌ها در چند پاس موثر نمی‌باشد [28]. قدم سوم، فرایند تغییر شکل برشی متوالی<sup>۲</sup> است که در تولید نوارهای فلزی از آن استفاده می‌شود (شکل ۱-۱۴). در این فرایند نمونه اولیه بین غلتک بزرگ و غلتک‌های سیاره‌ای کوچک که تامین کننده نیروی فرایند هستند تغذیه می‌شود. نمونه از بین غلتک‌ها عبور کرده و وارد کانال قالبی با زاویه  $\varphi$  می‌شود. طبق تحقیقات انجام شده نمونه آلومینیومی در این فرایند، مقدار بهینه زاویه  $\varphi$  برابر  $115^\circ$  است [29].

<sup>۱</sup> Equal Channel Angular Drawing (ECAD)

<sup>۲</sup> Conshearing



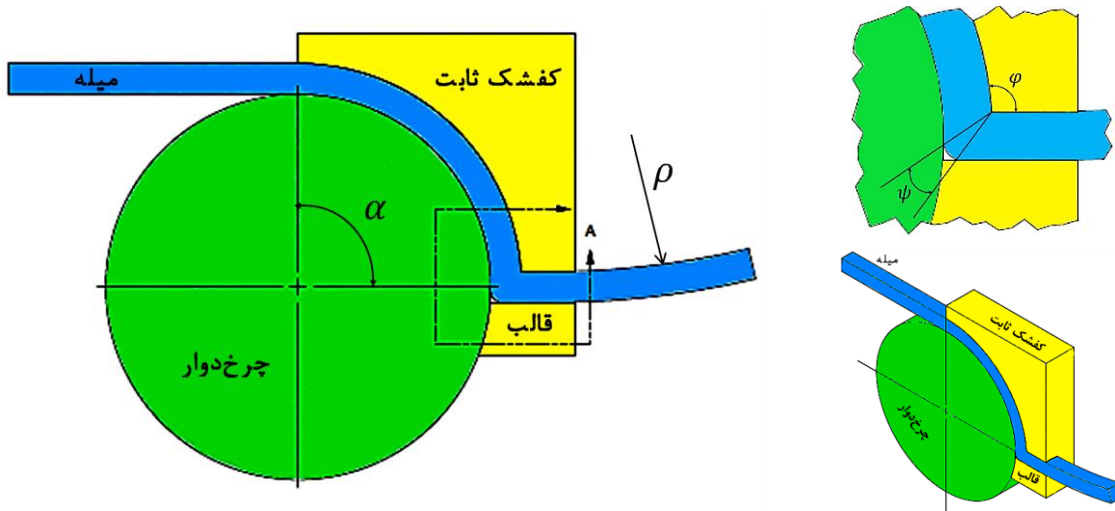
شکل ۱-۱۴ طرحواره فرایند تغییر شکل برشی متوالی [30]

ایده شکل‌دهی فلزات به وسیله اکستروژن پیوسته یا کانفرم توسط اترینگون در سال ۱۹۷۴ ارائه شد [31]. این فرایند تشکیل شده از یک غلتک که دارای یک شیار مستطیل شکل است و نیروی فرایند را تامین می‌کند، کفشک ثابت که باعث ایجاد یک نیروی بازدارنده می‌شود و قالب ایکپ که باعث ایجاد ساختار ریزدانه در نمونه می‌شود. اصطکاک در اثر تماس سه سطح از غلتک با نمونه اولیه باعث حرکت نمونه به سمت جلو می‌شود. کفشک ثابت سطح شیار را پوشانده و باعث ایجاد یک نیروی بازدارنده و محدود کننده حرکت نمونه است. سطح مقطع نمونه خروجی به شکل شیار ایجاد شده روی غلتک نمی‌باشد زیرا هدف از فرایند کانفرم تغییر هندسه قطعه یا تحکیم بخشیدن به پودرها است. سطح مقطع نمونه مطابق با سطح مقطع قالب ایکپ موجود در فرایند است.

فرایند ایکپ معمولی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تولید مواد فوق‌ریزدانه است، اما به دلیل محدودیت در طول نمونه دارای نقض می‌باشد. در حالی که فرایند کانفرم قادر به تولید نمونه در طول‌های بلند و به صورت پیوسته می‌باشد. فرایند ایکپ مداوم<sup>۱</sup> ترکیبی از دو فرایند ایکپ و کانفرم می‌باشد که قادر به تولید نمونه در طول‌های بلند و ساختار فوق‌ریزدانه و مستحکم‌تر می‌باشد [32]. نمونه‌هایی با سطح مقطع‌های متفاوت مثل نوار فلزی، شمش، میله و سیم می‌توان تحت فرایند ایکپ مداوم قرار داد. طرحواره کلی این فرایند را می‌توان در شکل ۱-۱۶ مشاهده کرد.

<sup>۱</sup> ECAP-Conform





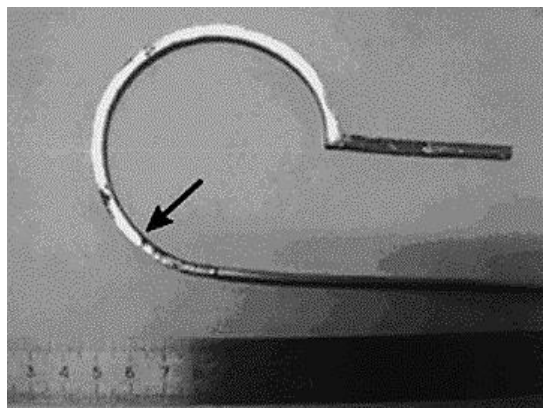
شکل ۱-۱۵ طرحواره فرایند ایکپ مداوم

قالب ایکپ دارای دو زاویه موثر است: (۱) زاویه برخورد کانال‌های قالب ( $\varphi$ )، (۲) زاویه گوشه بیرونی قالب ( $\psi$ ) که مربوط به انحنای موجود در گوشه خارجی برخورد کانال‌ها در قالب ایکپ است. تجربیات نشان داده که بیشترین کرنش معادل در زاویه  $\varphi$  برابر  $90^\circ$  و زاویه  $\psi$  برابر صفر درجه حاصل می‌شود، اما کوچکی زوایای قالب باعث افزایش نیروی گشتاور در فرایند شده و عبور نمونه از قالب ایکپ را دچار مشکل می‌کند که این کار برای فرایند مضر است [33]. نتایج پژوهشی که توسط ناکاشیما و همکاران در فرایند ایکپ در قالبی با زاویه  $\varphi$  برابر با  $135^\circ$  صورت گرفته نشان می‌دهد این فرایند قادر به ایجاد ساختار فوق ریزدانه نیست [34].

تفاوت‌هایی در فرایند ایکپ معمولی و فرایند ایکپ مداوم علاوه بر ماهیت مداوم بودن آن وجود دارد. در فرایند ایکپ مداوم نمونه اولیه قبل از ورود به قالب خم می‌شود. در صورتی که سطح مقطع نمونه اولیه با سطح مقطع شیار متفاوت باشد، این فرایند در نمونه اولیه باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک شده و سطح مقطع نمونه اولیه را به شکل سطح مقطع شیار تبدیل می‌کند. فرایند ایکپ معمولی در عمل نیاز به قطعه مازاد برای خارج کردن نمونه اولیه از قالب دارد در صورتی که در فرایند ایکپ مداوم نیاز به قطعه مازاد نیست.

## ۳-۱ مرور بر منابع تحقیق

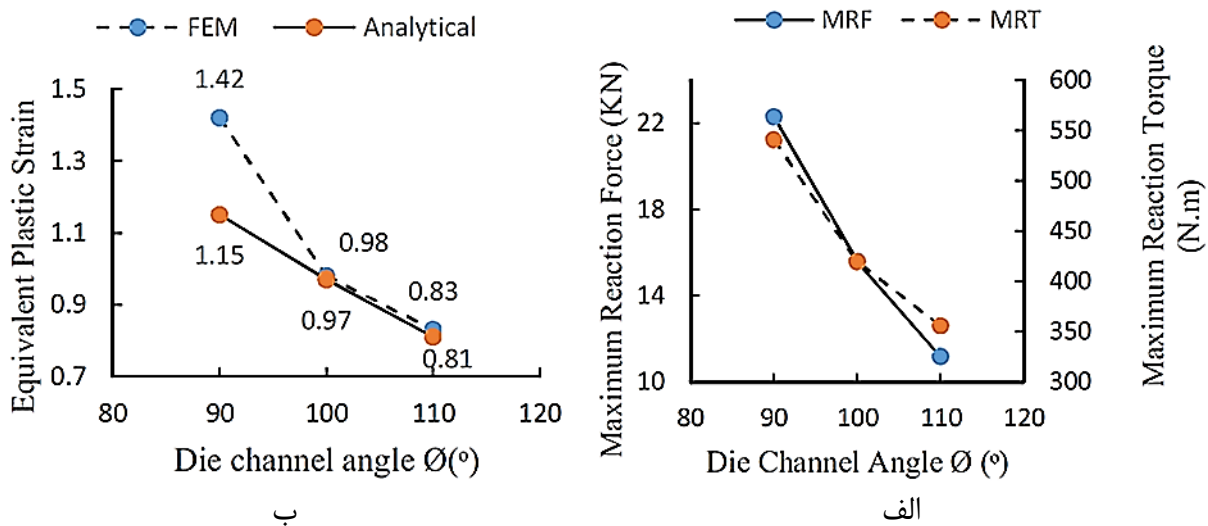
می‌توان با استفاده از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید، مواد با اندازه دانه حدود  $1\ \mu\text{m}$  یا کمتر که دارای خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فردی است تولید کرد. نتایج حاصل از انجام این فرایند بر روی آلومینیوم خالص تجاری نشان می‌دهد این فرایند قادر به اصلاح دانه‌بندی نمونه تا اندازه دانه  $650\ \text{nm}$  است [32]. در پژوهشی والیف و همکاران به بررسی ساختار فوق‌ریزدانه سیم آلومینیوم خالص تجاری پرداخته‌اند. نمونه مورد استفاده در این پژوهش دارای قطر  $3/4\ \text{mm}$  و طول  $1\ \text{m}$  است که در دمای محیط و با زاویه قالبی برابر  $90^\circ$  در چهار پاس انجام می‌شود. در اجرای فرایند از مسیر C استفاده شده است. شیار ایجاد شده بر روی غلتک دارای ابعاد  $2/78\ \text{mm} \times 3/86\ \text{mm}$  است که سطح مقطع نمونه با وارد شدن به شیار غلتک به همین ابعاد تبدیل می‌شود (شکل ۱-۱۷) [31]. نتایج حاصل از مشاهدات TEM نشان دهنده تکامل ریز ساختار نمونه اولیه در این فرایند است.



شکل ۱-۱۶ قطعه آلومینیوم خالص تجاری بعد از فرایند ایکپ مداوم [21]

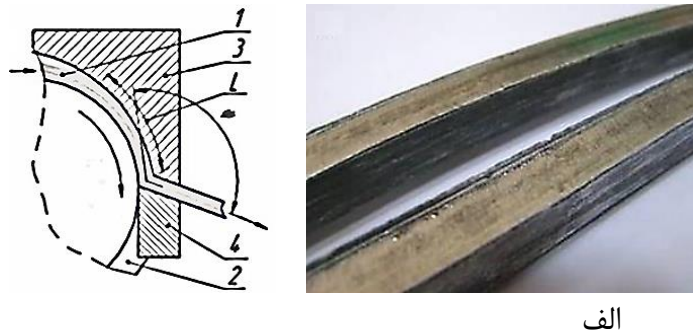
پوربشیری و همکاران شبیه‌سازی عددی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیومی  $6061$  را در زوایای مختلف کانال قالب ( $90^\circ$ ،  $100^\circ$  و  $110^\circ$ ) و ضرایب اصطکاکی مختلف ( $0/2$ ،  $0/3$  و  $0/4$ ) اجرا کردند. مقدار سرعت دورانی در این پژوهش برابر با مقدار ثابت  $0/05$  رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه کانال از  $90^\circ$  به  $110^\circ$  نیروی مورد نیاز فرایند  $40$  تا  $50$  درصد کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین با افزایش ضریب اصطکاک از  $0/2$  تا  $0/4$  مقدار کرنش پلاستیک در میله از  $8$  تا  $12$  درصد افزایش

داشته است. با توجه به شکل ۱-۱۸ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش زاویه قالب مقادیر نیرو، گشتاور و کرنش پلاستیک معادل کاهش خواهد یافت. همچنین می‌توان مشاهده کرد که بیشترین مقدار نیرو و گشتاور موجود در فرایند در زاویه قالب  $90^\circ$  می‌باشد [35].



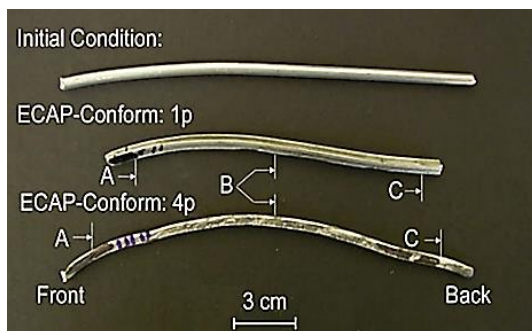
شکل ۱-۱۷ الف) مقایسه نتایج نیرو و گشتاور در زوایای قالب  $90^\circ$  و  $100^\circ$  و  $110^\circ$ ، ب) مقایسه نتایج عددی و تجربی مقدار کرنش پلاستیک [35]

موراشکن و همکاران به بررسی بهبود خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی آلیاژ آلومینیوم ۶۱۰۱ پس از اجرای فرایند ایکپ مداوم پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با اجرای فرایند ایکپ مداوم با زاویه قالب  $130^\circ$  در شش پاس می‌توان به ساختار فوق‌ریزدانه با اندازه دانه حدود  $400\text{ nm}$  تا  $600\text{ nm}$  دست پیدا کرد. در این پژوهش از نمونه‌ای به طول  $1/5\text{ m}$  که در دمای  $550^\circ\text{C}$  آنیل شده است، استفاده شد [36]. در شکل ۱-۱۹ طرحواره فرایند و نمونه تولید شده در شش پاس را می‌توان مشاهده کرد.

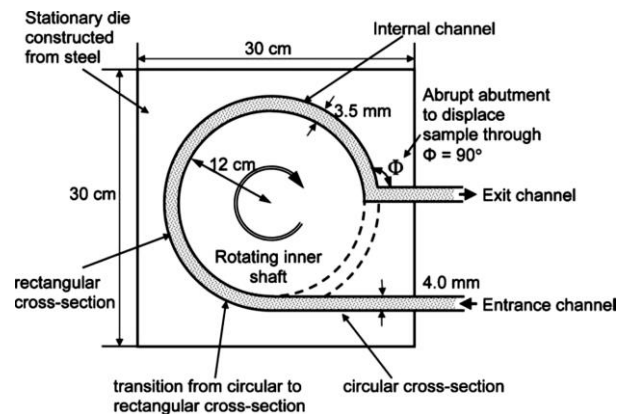


شکل ۱-۱۸ الف) نمونه آلومینیوم ۶۱۰۱ پس از اجرای شش پاس فرایند ایکپ مداوم، ب) طرحواره کلی فرایند [36]

چنگ و همکاران از میله آلومینیوم ۶۰۶۱ به طول و قطر به ترتیب ۲۵۰ mm و ۴ mm برای اجرای فرایند ایکپ مداوم در دمای اتاق استفاده کرده‌اند. سطح مقطع شیار ایجاد شده بر روی غلتک به شکل مستطیلی به ابعاد  $3/5 \text{ mm} \times 3/5 \text{ mm}$  می‌باشد. در این فرایند از قالب با زاویه  $90^\circ$  استفاده شده است. فرایند با سرعت ثابت  $0/2 \text{ mm/s}$  و تا پاس ۴ پس اجرا شد و نمونه بعد از انجام هر پاس  $90^\circ$  حول جهت طولی خود چرخانده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر سختی در ناحیه مرکزی میله همگن‌تر است؛ در حالی که در مقاطع نزدیک به ابتدا و انتهای میله ناهمگنی صفحه‌ای وجود دارد. طرح‌واره فرایند و همچنین نمونه اولیه و نمونه‌ها پس از انجام یک پاس و چهار پاس فرایند ایکپ مداوم را می‌توان در شکل ۱-۲۰ مشاهده کرد [37].



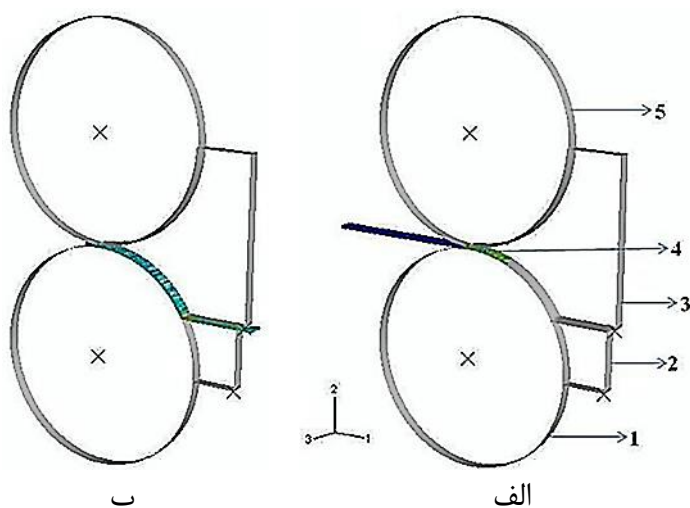
ب



الف

شکل ۱-۱۹ (الف) طرح‌واره فرایند ایکپ مداوم، (ب) نمونه‌های آلیاژی آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل و بعد از اجرای فرایند [37]

موسوی و همکاران به مقایسه دو فرایند برش موضعی متوالی (C2S2) و ایکپ مداوم به صورت عددی برای آلومینیوم خالص تجاری ۱۱۰۰ با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند (شکل ۱-۲۱). نتایج نشان می‌دهد که کرنش پلاستیک در فرایند برش موضعی متوالی تحت پاس اول به مقدار  $0/13$  رسیده؛ در حالی که در فرایند ایکپ مداوم این مقدار برابر  $0/52$  است. مقدار کرنش پلاستیک نهایی ایجاد شده در قطعه، در فرایند برش موضعی متوالی و فرایند ایکپ مداوم به ترتیب برابر  $0/86$  و  $1/36$  است. نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر فرایند ایکپ مداوم در ایجاد ساختار ریزدانه است. همچنین با توجه به جدول ۱-۱ می‌توان میزان افزایش استحکام در فرایند ایکپ مداوم که به مراتب بیشتر از فرایند برش موضعی متوالی است را مشاهده کرد [38].



شکل ۱-۲۰ طرحواره فرایند C2S2؛ الف) قبل از اجرای فرایند شبیه‌سازی، ب) بعد از اجرای فرایند شبیه‌سازی [38]

جدول ۱-۱ استحکام تسلیم و نهایی نمونه آلومینیوم ۱۰۵۰ بعد از اجرای ۴ پاس به وسیله فرایندهای ایکپ مداوم و C2S2 [38]

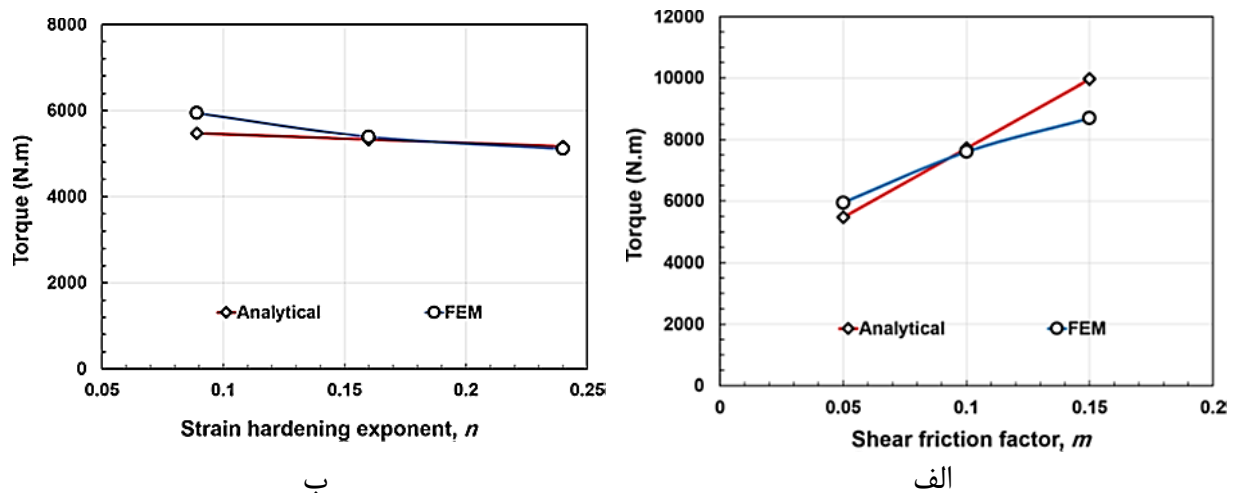
فرایند (اجرای ۴ پاس)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
C2S2	۱۱۰	۱۶۲
ایکپ مداوم	۱۴۰	۱۸۰

حبیبی‌پارسا و همکاران به بررسی عددی و تجربی تاثیر استفاده از فرایند ایکپ مداوم بر روی خواص مکانیکی و ساختار میله آلومینیوم ۱۱۰۰ به قطر ۵ mm در دمای اتاق پرداخته‌اند. مقدار سختی میله خم شده بر روی چرخ‌دوار در زوایای مختلف و بعد از خروج از قالب نشان می‌دهد که مقدار سختی قطعه با افزایش زاویه و نزدیک شدن به خروجی قالب افزایش یافته و همچنین مقادیر استحکام تسلیم و استحکام نهایی قطعه نیز افزایش پیدا کرده است [39]. بررسی تحلیلی و عددی گشتاور مورد نیاز فرایند ایکپ مداوم میله تیتانیومی خالص تجاری رده ۲ توسط گردویی و همکاران انجام شد. آنها یک روش تحلیلی که تلفیقی از دو روش تعادل انرژی<sup>۱</sup> و تحلیل کران بالا<sup>۲</sup> بود را ارائه و تاثیر دو پارامتر فاکتور اصطکاک برشی و توان

<sup>۱</sup> Energy balance method

<sup>۲</sup> Upper-bound analysis

کرنش سختی را بر فرایند مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش فاکتور اصطکاک برشی مقدار گشتاور مورد نیاز فرایند افزایش پیدا کرده است؛ در صورتی که با افزایش توان کرنش سختی مقدار گشتاور تغییرات قابل ملاحظه‌ای ندارد [40].



شکل ۱-۲۱ الف) مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تاثیر فاکتور برشی بر مقدار گشتاور، ب) مقایسه نتایج تحلیلی و عددی تاثیر توان کرنش سختی بر مقدار گشتاور [40]

در ادامه پژوهش قبلی، گردویی و همکاران به بررسی تحلیلی و تجربی گشتاور مورد نیاز فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش پرداخته و همچنین معیار آستانه لغزش<sup>۱</sup> را برای اجرای موفقیت‌آمیز این فرایند ارائه کردند. مقدار خطای گزارش شده بین روش تحلیلی و تجربی برابر ۱۱٪ گزارش شده است [41].

## ۴-۱ معرفی پایان‌نامه

در این پژوهش به طراحی و بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ با استفاده از روابط تحلیلی و مدل‌سازی المان محدود پرداخته می‌شود. گشتاور مورد نیاز فرایند و استحکام ایجاد شده در نمونه بعد از انجام فرایند و توزیع کرنش ایجاد شده در نمونه و همچنین میزان انحنای میله پس از خروج از قالب مورد توجه می‌باشد. از مدل الاستیک-پلاستیک با فرض همسانگردی رفتار مواد برای میله فلزی استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> Slip Threshold Criteria (STC)

همچنین از تکنیک المان محدود لاگرانژی-ویلری دلخواه بهره‌گیری خواهد شد. به منظور دستیابی به یک مدل معتبر نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی حاصل از انجام فرایند مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این مدل شامل زاویه تماس میله با چرخ‌دوار، شعاع چرخ‌دوار، نسبت ابعاد کانال قالب، زاویه برخورد کانال قالب، زاویه گوشه بیرونی قالب و همچنین ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار و ضریب اصطکاک بین میله و قالب می‌باشد. هدف این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای ذکر شده به منظور دستیابی به حداقل گشتاور موردنیاز فرایند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله خروجی (یا کاهش انحراف معیار میزان کرنش)، افزایش میزان استحکام ایجاد شده در میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ می‌باشد. به منظور تعیین بهترین شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup>، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های تشکیل دهنده هر لایه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز ازدحام ذرات<sup>۲</sup> و وال<sup>۳</sup> بهینه‌سازی شده و از بهترین شبکه عصبی مصنوعی تشکیل شده برای ادامه روند بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در راستای بهینه‌سازی فرایند از روش سطح پاسخ<sup>۴</sup> و الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم وال استفاده شده است. برای تعیین بهترین روش بهینه‌ساز در پژوهش، شبیه‌سازی مطابق نتایج حاصل از روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. اختلاف بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج حاصل از روش بهینه‌ساز به عنوان معیار تعیین ارزش هر روش بهینه‌ساز در نظر گرفته شده است.

پایان‌نامه‌ی حاضر شامل چهار فصل می‌باشد. در فصل دوم به بررسی و آماده‌سازی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته می‌شود. همچنین آزمون فشار جهت تعیین خواص مکانیکی این آلیاژ نیز توضیح داده خواهد شد. شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم مطابق با نتایج حاصل از آزمایشگاه جهت صحت‌سنجی انجام می‌گیرد. با

---

<sup>۱</sup> Artificial Neural Network (ANN)

<sup>۲</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>۳</sup> Whale Optimization Algorithm (WOA)

<sup>۴</sup> Response Surface Method (RSM)

توجه به طراحی آزمایش‌ها انجام شده در نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> تعداد آزمایش‌ها تعیین می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده جهت بهینه‌سازی فرایند استفاده می‌شوند. به منظور بهینه‌سازی از روش‌های سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم وال استفاده شده است. فصل سوم شامل نتایج و بررسی انجام فرایند ایکپ مداوم و بهینه‌سازی فرایند می‌باشد. در فصل چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهادها جهت ادامه‌ی کار ارائه داده می‌شود.

## ۱-۵ اهداف و نوآوری پایان‌نامه

ایکپ به شکل سنتی دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که مهم‌ترین این محدودیت‌ها شامل کوتاه بودن طول قطعه‌کار، ناپیوسته بودن فرآیند و ایجاد دور ریز لبه‌های ابتدا و انتهای (اثر لبه)، محدودیت کورس پرس، نیاز به قطعات مازاد برای خارج کردن مواد اصلی در محفظه قالب می‌باشد. در اثر این عوامل فرآیند ایکپ به ویژه در تولید انبوه کارایی لازم را نداشته و مقرون به صرفه نیست. محققین در سال‌های اخیر به روش‌های SPD پیوسته مانند ایکپ مداوم توجه ویژه داشته‌اند.

توجه اصلی در این پایان‌نامه شناخت فرایند ایکپ مداوم و عوامل موثر بر این فرایند به عنوان یک فرایند نسبتاً جدید و پیچیده است. از طرفی پس از شناخت عوامل تاثیرگذار، دانستن مقدار و یا محدوده بهینه این عوامل حائز اهمیت است. لذا اهداف و نوآوری‌های این پایان‌نامه را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- شناخت فرایند ایکپ مداوم و عوامل موثر بر این فرایند
- انجام فرایند ایکپ مداوم به صورت تجربی برای میله آلومینیوم ۷۰۷۵
- استخراج خواص مکانیکی میله آلومینیوم ۷۰۷۵ قبل و بعد از انجام فرایند ایکپ مداوم
- بررسی اثر عملیات حرارتی مختلف بر روی میله آلومینیوم ۷۰۷۵
- بررسی المان محدود عوامل موثر در فرآیند ایکپ مداوم آلومینیوم ۷۰۷۵ در قالبی با مقطع مربعی

<sup>۱</sup> Minitab



- بهینه‌سازی عوامل موثر در فرایند ایکپ مداوم با روش RSM، شبکه‌عصبی و استفاده از دو الگوریتم بهینه‌ساز PSO و WOA
- مقایسه روش‌های بهینه‌سازی و ارائه بهترین روش بهینه‌ساز در پژوهش حاضر



## فصل ۲ : مواد و روش تحقیق

در این فصل پس از بررسی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ از جهت خواص مکانیکی و آماده سازی آن برای اجرای فرایند ایکپ مداوم، شبیه سازی این فرایند انجام شد. به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمون تجربی با یکدیگر مقایسه می شوند. تعداد شبیه سازی با توجه به طراحی آزمایش انجام گرفته در نرم افزار مینی تب، برای تعداد ۷ پارامتر مستقل به عنوان ورودی، تعداد ۸۸ آزمایش تعیین شد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی، بهینه سازی فرایند ایکپ مداوم به روش های سطح پاسخ، ازدحام ذرات و وال انجام می شود.

## ۱-۲ شناخت آلومینیوم ۷۰۷۵

آلومینیوم خالص فلزی نرم و سبک است که به دلیل خواص مکانیکی ضعیف کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در صنعت بیشتر از آلیاژ آلومینیوم که حاصل ترکیب آلومینیوم با دیگر عناصر است و از طرفی خواص مکانیکی بهتری نسبت به آلومینیوم خالص دارد، استفاده می شود. یکی از آلیاژهای آلومینیوم که بیشترین استحکام ویژه و بهترین خواص مکانیکی را داراست آلیاژهای گروه ۷۰۰۰ هستند [5]. این آلیاژها دارای مقاومت به خوردگی تنشی و پوسته دار شدن بالا و همچنین جوش پذیری مناسب و چقرمگی شکست بالایی هستند [42]. به دلیل وجود روی (Zn) که عامل اصلی استحکام بخشی است، این آلیاژ قابلیت پیر سختی مناسبی دارد. یکی از پرکاربردترین آلیاژهای گروه ۷۰۰۰، آلیاژ ۷۰۷۵ است که در سال ۱۹۳۶ میلادی در ژاپن کشف شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ را می توان در جدول ۱-۲ مشاهده کرد. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به دلیل حفظ استحکام خود در دماهای بالا و قابلیت شکل پذیری خوب در بین آلیاژهای مختلف آلومینیوم به آلیاژ راهبردی<sup>۱</sup> معروف شده است که کاربرد وسیعی در صنایع نظامی، هسته ای و هوافضا دارد [10]. خواص فیزیکی این آلیاژ را می توان در جدول ۲-۲ مشاهده کرد [43].

<sup>۱</sup> Strategic

جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [43]

Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Ti	Zr	Si	Al
۵/۱-۶	۰/۱۸-۰/۲	۲/۱-۲/۹	۰/۳	۱/۲-۲	۰/۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۴	پایه

جدول ۲-۲ ترکیب فیزیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [43]

سیستم متریک	خواص
۲/۸۱	چگالی g/cm <sup>2</sup>
۰/۳۳	ضریب پواسون ----
۱۷۳	رسانایی گرمایی W/m-k
۰/۹۶۰	ظرفیت گرمایی ویژه J/g-°C

## ۲-۲ آماده سازی نمونه‌ها

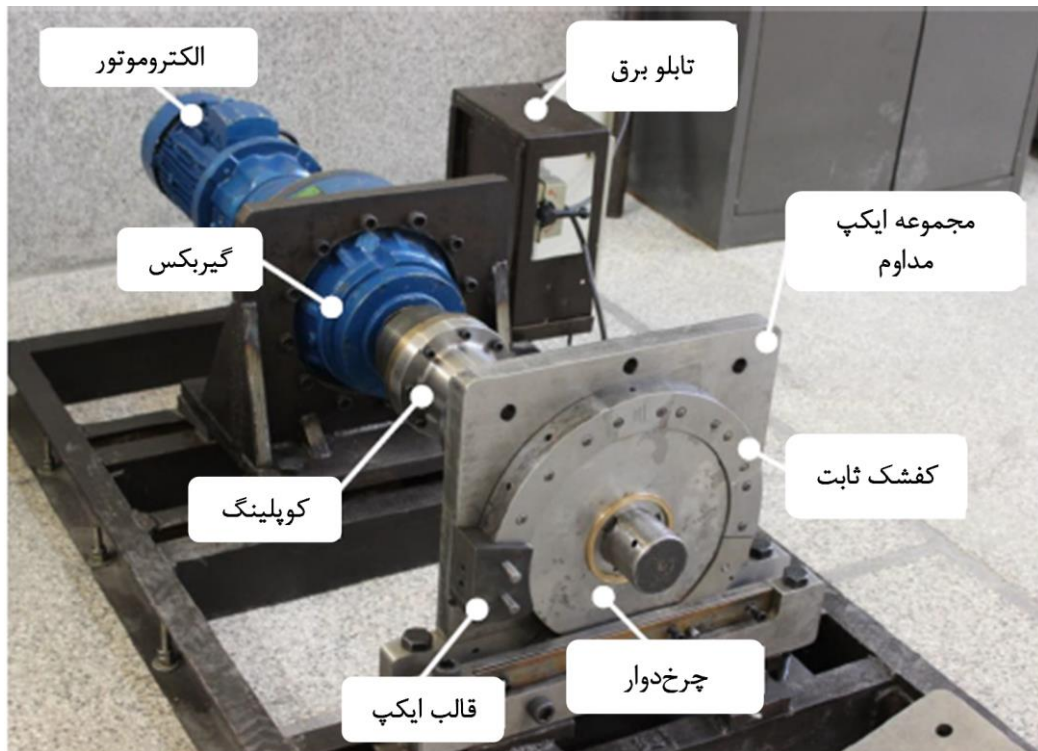
به منظور تهیه خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و ترسیم نمودار تنش-کرنش، از آزمون فشار نمونه-هایی به قطر ۸ mm و طول ۱۵ mm استفاده شده است. تعداد ۶ نمونه در ابتدا انتخاب شد. تعداد ۳ نمونه از این نمونه‌ها برای انجام فرایند آنیل در کوره و در دمای ۴۱۵ °C و به مدت ۳ ساعت قرار گرفته‌اند. از نمونه-های آنیل شده، دو نمونه در کوره و به تدریج سرد شده و یک نمونه از کوره خارج و در هوای آزاد سرد شد. برای آماده سازی نمونه مورد استفاده در فرایند ایکپ مداوم، از نمونه‌ای به قطر ۸ mm و طول ۷۵۰ mm استفاده شده است. این نمونه در ابتدا در دمای ۴۱۵ °C و به مدت ۳ ساعت تحت فرایند آنیل قرار می‌گیرد، سپس در کوره سرد می‌شود.



شکل ۱-۲ نمونه‌های اولیه آماده شده جهت اجرای فرایند آنیل و آزمون فشار

## ۱-۲-۲ اجرای فرایند ایکپ مداوم

تصویر ماشین ایکپ مداوم استفاده شده در این پژوهش در شکل ۲-۲ آورده شده است. قالب ایکپ استفاده شده در این ماشین دارای زوایای  $120^\circ$  و  $0^\circ$  به ترتیب برای زاویه برخورد کانال‌های قالب ( $\varphi$ ) و زاویه گوشه بیرونی قالب ( $\psi$ ) است. همچنین سطح مقطع کانال به کار رفته در قالب به شکل مربعی به ابعاد  $7/5 \text{ mm}$  است. ماشین ایکپ مداوم تشکیل شده از یک چرخ‌دوار که دارای یک شیار مربعی به ابعاد  $7/5 \text{ mm} \times 7/5 \text{ mm}$  می‌باشد و وظیفه آن تامین نیرو برای انجام فرایند است، کفشک ثابت که باعث ایجاد یک نیروی بازدارنده در فرایند می‌شود، قالب ایکپ که وظیفه آن ایجاد ساختار ریزدانه در نمونه اولیه است. اصطکاک ایجاد شده در اثر تماس نمونه اولیه با سه سطح از چرخ‌دوار باعث حرکت نمونه به سمت جلو می‌شود. سه سطح از چرخ‌دوار با نمونه اولیه در تماس است و سطح چهارم توسط کفشک ثابت پوشانده می‌شود که مانع از خروج نمونه از شیار چرخ‌دوار می‌شود. در آخر نمونه پس از خروج سطح مقطعی مطابق با سطح مقطع قالب ایکپ خواهد داشت.

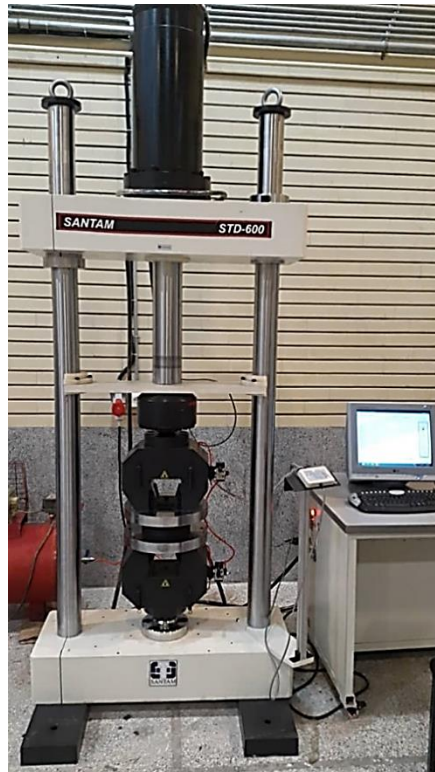


شکل ۲-۲ دستگاه ایکپ مداوم

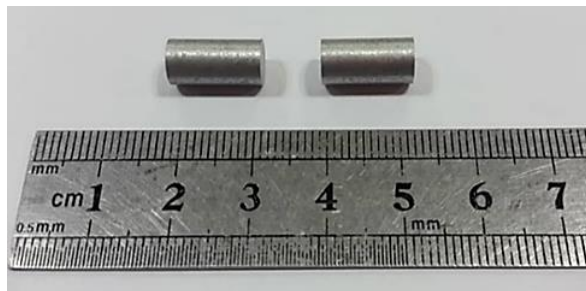
## ۲-۲-۲ آزمون فشار

پس از انجام فرایند ایکپ مداوم برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، به منظور به دست آوردن استحکام فشاری این آلیاژ تحت اجرا فرایند، آزمون فشار انجام شد. این آزمون براساس استاندارد ASTM E9 و توسط دستگاه سنتام STD-600 اجرا شده است (شکل ۲-۳). نمونه‌های آزمون فشار به طول ۱۲/۸ mm و قطر ۶/۴ mm تهیه شده است (شکل ۲-۴). این آزمون در دمای محیط و برای صحت‌سنجی دو بار تکرار شده است. مقادیر ضریب کرنش سختی ( $K$ ) و توان کرنش سختی ( $n$ ) آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ از منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار بدست خواهد آمد که با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۱-۲ می‌توان به ازای کرنش‌های مختلف مقادیر تنش در ماده را محاسبه کرد.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (1-2)$$



شکل ۲-۳ اجرای آزمون فشار نمونه‌های آلومینیوم با استفاده از دستگاه سنتام مدل STD-600



شکل ۲-۴ نمونه‌های آزمون فشار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پس از اجرای فرایند ایکپ مداوم

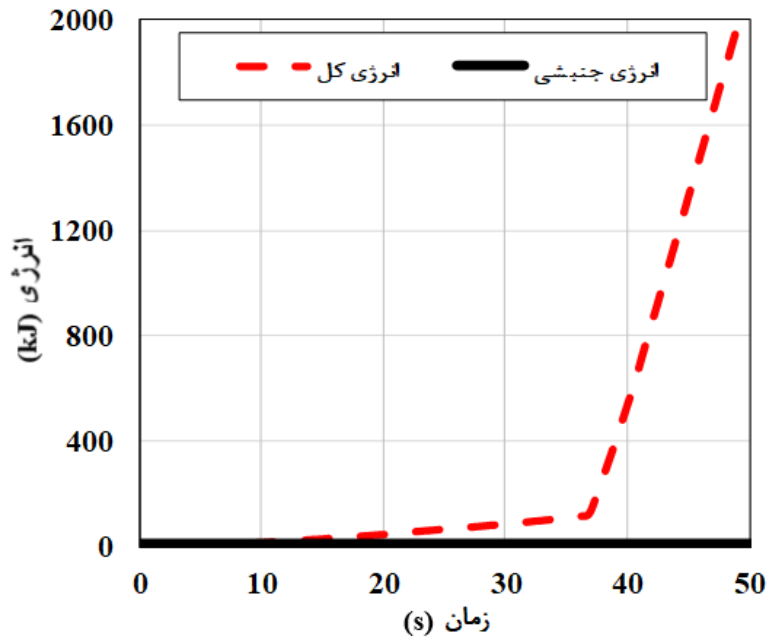
## ۲-۳ شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهار گوش

به منظور مدل‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش برای میله آلومینیوم ۷۰۷۵ از نرم‌افزار آباکوس ۱۴-۶ استفاده شده است. میله آلومینیوم به قطر ۸ mm و طول ۷۵۰ mm جهت انجام شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای کاهش زمان محاسبات از حل‌گر صریح<sup>۱</sup>، با روش بزرگ‌نمایی جرم<sup>۱</sup> برای افزایش

<sup>۱</sup> Explicit



زمان نمو پایداری حل و کاهش تعداد نمونه‌های زمانی استفاده شده است. در استفاده از این روش باید این موضوع را مد نظر قرار داد که کاهش بازه زمانی نباید موجب افزایش غیر واقعی انرژی جنبشی در فرایند شود؛ زیرا مقدار بیش از حد بزرگ‌نمایی باعث ایجاد پاسخ‌های نادرست می‌شود. همان طور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، مقایسه بین مقدار انرژی جنبشی و انرژی کل فرایند بیان‌کننده این است که کاهش بازه زمانی موجب افزایش غیر واقعی انرژی جنبشی در فرایند ایکپ مداوم نشده است.



شکل ۲-۵ مقایسه انرژی جنبشی با انرژی کل در شبیه‌سازی فرایند

طرح کلی مدل المان محدود ایکپ مداوم با مقاطع چهارگوش را می‌توان در شکل ۲-۶ مشاهده کرد. در این پژوهش قالب ایکپ، چرخ‌دوار و کفشک ثابت به صورت صلب گسسته<sup>۲</sup> طراحی شده است. میله آلومینیومی به صورت تغییر شکل‌پذیر<sup>۳</sup> طراحی شده و المان مورد استفاده برای مدل‌سازی میله از نوع C3D8R می‌باشد. جهت تعیین شرایط تماسی از تماس سطح به سطح<sup>۴</sup> با مدل اصطکاک کولمبی استفاده شده است؛ به صورتی

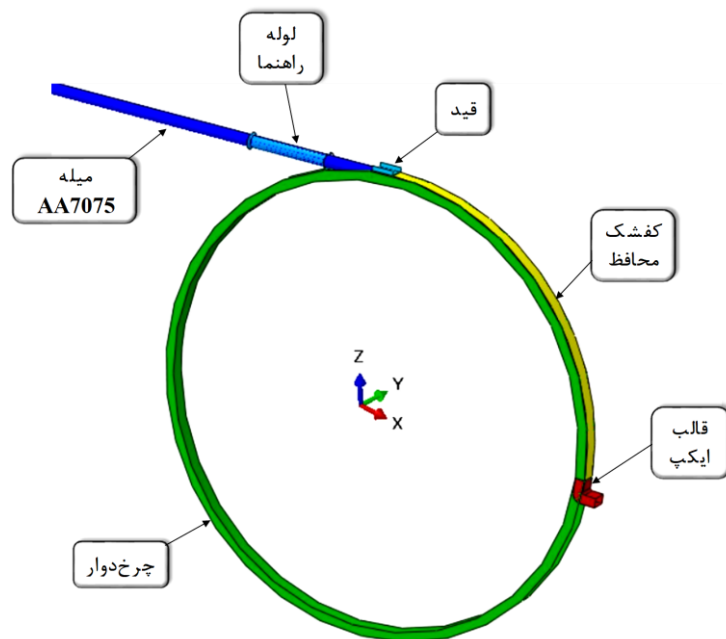
<sup>۱</sup> Mass scaling

<sup>۲</sup> Discrete rigid

<sup>۳</sup> Deformable

<sup>۴</sup> Surface-to-surface

که ضرایب اصطکاکی مختلف مطابق با جدول ۲-۳ بین میله و چرخ‌دوار و بین میله و کانال قالب وجود دارد. در راستای تعیین شرایط مرزی، قالب، کفشک ثابت، قید و لوله راهنما به صورت مقید انتخاب می‌شود و برای تامین گشتاور مورد نیاز فرایند قید جابه‌جایی دوران به چرخ‌دوار نسبت داده می‌شود. حرکت دورانی چرخ‌دوار براساس سرعت زاویه‌ای ثابت  $0.1 \text{ rad/s}$  تنظیم شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی میله آلومینیومی از منحنی تنش-کرنش حقیقی نشان داده شده در شکل ۲-۱ استفاده شده است. همچنین چگالی میله آلومینیومی  $2750 \text{ kg/m}^3$ ، ضریب پواسون  $0.33$  و مدول یانگ  $70 \text{ GPa}$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۶ مدل المان محدود فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش

## ۲-۴ روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM) نخستین بار در سال ۱۹۸۷ به منظور مدل‌سازی آزمایش‌ها تجربی ارائه شد و در ادامه برای آزمایش‌های عددی نیز توسعه یافت. روش سطح پاسخ به مجموعه روش‌های آماری و ریاضی گفته می‌شود که هدف آن بهینه کردن پاسخ (تابع خروجی) که تحت تاثیر پارامترهای ورودی مستقل است. بنابراین گام اول، یافتن تخمین مناسب از تابعی صحیح بین عوامل موثر و خروجی‌ها است. معمولاً از یک چند جمله‌ای مرتبه پایین در برخی از نواحی متغیرهای مستقل استفاده می‌شود؛ اگر پاسخ به خوبی توسط

تابعی خطی بر حسب متغیرهای مستقل مدل نشود، آنگاه تابع تقریب برای مدل مرتبه دوم<sup>۱</sup> مطابق با رابطه (۲-۲) استفاده خواهد شد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j \quad (2-2)$$

در این رابطه  $y$  تابع پاسخ،  $x_i$  متغیرهای مستقل،  $k$  تعداد متغیرهای مستقل،  $\beta_0$  تا  $\beta_{ij}$  مقادیر ثابت مجهول هستند که از تحلیل بدست می‌آیند. به این نکته هم باید توجه داشت که بعید است یک مدل چند جمله‌ای تقریب قابل قبولی برای رابطه تابعی صحیح در تمام فضای متغیرهای مستقل باشد، اما برای یک ناحیه نسبتاً کوچک معمولاً به خوبی کار می‌کند [44]. از مزایای این روش می‌توان به محاسبات آسان، قابل اجرا بودن برای هر سیستم دارای ورودی و خروجی، کاهش تعداد آزمایشات، بررسی اثرات متقابل موثر بر متغیر وابسته، بررسی متغیرهای پیوسته و مشخص کردن حساسیت پاسخ در برابر هر فاکتور اشاره کرد [45]. این روش دارای طرح‌های مختلفی می‌باشد که معروف‌ترین آن‌ها طرح مرکب مرکزی<sup>۲</sup>، باکس بنکن<sup>۳</sup>، دهلرت<sup>۴</sup> و دی-اپتیمال<sup>۵</sup> می‌باشد.

## ۲-۴-۱ طراحی آزمون ایکپ مداوم با روش سطح پاسخ

طراحی آزمایش<sup>۶</sup> روشی است که برای مشخص شدن ارتباط بین عوامل موثر یک فرایند (متغیرهای مستقل) و خروجی‌های آن (متغیرهای وابسته) استفاده می‌شود. روشی کارا برای انجام آزمایش‌ها، به گونه‌ای که داده‌های به دست آمده قابل تجزیه و تحلیل آماری بوده و نتایج با سطح اطمینان معینی ارائه می‌شوند. یکی از

<sup>۱</sup> Second-order

<sup>۲</sup> Central Composite Design (CCD)

<sup>۳</sup> Box-behnken design

<sup>۴</sup> Doehlert

<sup>۵</sup> D-optimal

<sup>۶</sup> Design of Experiment (DOE)

بهترین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ (RSM) می‌باشد که در مسائل آن، همانند دیگر روش‌های طراحی آزمایش، رابطه بین عوامل موثر و خروجی‌ها ناشناخته است [46].

یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های سطح پاسخ، روش طرح مرکب مرکزی است که با در نظر گرفتن تعداد عوامل موثر در فرایند و محدوده آنها، ماتریس آزمون را طراحی می‌کند. در این روش بر مبنای مقادیر مختلف  $\alpha$  سطوح مختلف برای هر متغیر ایجاد می‌شود (در پژوهش حاضر مقدار  $\alpha$  برابر  $1/3$  در نظر گرفته شده است). ماتریس طراحی برای پژوهش حاضر دارای ۳ سطح برای متغیرهای مستقل خواهد بود که به همراه مقادیر هر سطح در جدول ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۲-۳ پارامترهای مستقل فرایند با سطوح طراحی

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	پارامترهای مستقل
۱۵۰mm	۱۲۵mm	۱۰۰mm	شعاع چرخ‌دوار (A)
۲۷۰°	۱۸۰°	۹۰°	زاویه خم میله بر روی چرخ‌دوار (B)
۱۲۰°	۱۰۵°	۹۰°	زاویه برخورد کانال قالب (C)
۷۰°	۴۵°	۲۰°	زاویه گوشه بیرونی قالب (D)
۰/۵	۰/۴	۰/۳	ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار (E)
۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	ضریب اصطکاک بین میله و قالب (F)
۱/۴	۱/۲	۱	نسبت ابعادی سطح مقطع کانال (G)

با توجه به طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، برای تعداد ۷ پارامتر مستقل به عنوان ورودی، تعداد ۸۸ آزمایش تعیین شد. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل که برای گشتاور مورد نیاز فرایند (T)، استحکام ماده ( $\bar{\sigma}$ )، مقدار انحنای در میله پس از خروج از قالب ایکپ ( $\rho$ ) و یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله ( $STD_{\epsilon}$ ) بدست خواهد آمد، مدل‌سازی ریاضی برای این آزمایش‌ها به شکل یک معادله رگرسیونی خطی درجه ۲ ایجاد خواهد شد. این معادله آماری از نقاط داده‌های جدول عبور کرده و یا در نزدیکترین موقعیت نسبت به آنها قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر از نرم‌افزار مینی‌تب نسخه ۱۹ برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. آزمایش‌های طراحی شده با روش سطح پاسخ در جدول الف در قسمت پیوست مشخص شده‌اند.

## ۲-۵ شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی ابزاری برای مدل‌سازی برخی از فرایندهایی که شناخت کاملی از آن‌ها وجود ندارد. در واقع هرگاه بتوان پارامترهای ورودی و خروجی یک سیستم را استخراج نمود اما از معادلات سیستم (رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها) اطلاعاتی در دسترس نباشد، می‌توان از شبکه عصبی استفاده نمود. شبکه عصبی مصنوعی که الهام گرفته از شبکه عصبی مغز انسان است، دارای واحدهای محاسباتی به نام نرون است. همچنین ارتباطاتی بین این نرون‌ها وجود دارد، که هر یک از این ارتباطات دارای یک مقدار وزنی است. منظور از یادگیری در شبکه عصبی، محاسبه وزن‌های شبکه براساس وجود کمترین خطا بین خروجی پیش-بینی‌شده و خروجی واقعی است.

### ۲-۵-۱ ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی

بطور خلاصه می‌توان گفت هر شبکه عصبی مصنوعی از موارد زیر تشکیل شده است:

- نرون: که به آن واحد پردازش گفته می‌شود و تمامی پردازش‌ها و محاسبات در آن انجام می‌شود.
- اتصالات: به ارتباط بین نرون‌ها که بر اساس ساختار شبکه عصبی تعیین می‌شوند.
- وزن: به آن ضرایب اتصالات نیز گفته می‌شود.
- بایاس: ضربی مخصوص هر نرون که میزان قدرت نرون را مشخص می‌کند.
- تابع تبدیل
- توپولوژی شبکه
- نوع آموزش

شبکه عصبی مصنوعی تشکیل شده از تعداد زیادی نرون که با خط‌های جهت‌دار با هم در ارتباط‌اند. نرون‌ها به صورت طبیعی به روش‌های خاصی اتصال پیدا می‌کنند که این اتصال باعث ایجاد شبکه عصبی می‌شود. نحوه اتصال نرون‌ها می‌تواند به گونه‌ای باشد که شبکه‌های به وجود آمده تک لایه و یا چند لایه باشند. شبکه‌های چند لایه تشکیل شده از لایه ورودی، لایه خروجی و یک یا چند لایه پنهان که به صورت مستقیم

با داده‌های ورودی و خروجی متصل نیستند. وظیفه لایه ورودی توزیع مقادیر ورودی بدون هیچ‌گونه تاثیر بر روی سیگنال ورودی به لایه بعدی است. شبکه دارای یک لایه خروجی نیز می‌باشد که در آن پاسخ سیگنال-های ورودی ارائه می‌شود.

هر یک از نرون‌ها دارای یک تابع تحریک نیز می‌باشند. روندی که براساس آن وزن‌های شبکه تعیین می‌شوند، الگوریتم آموزشی شناخته می‌شود. در واقع اختلاف بین شبکه‌های عصبی مختلف، براساس تغییر در یکی از موارد زیر می‌باشد:

- ساختار شبکه (تعداد لایه‌ها و نحوه ارتباط بین آن‌ها)

- تابع تحریک نرون‌ها

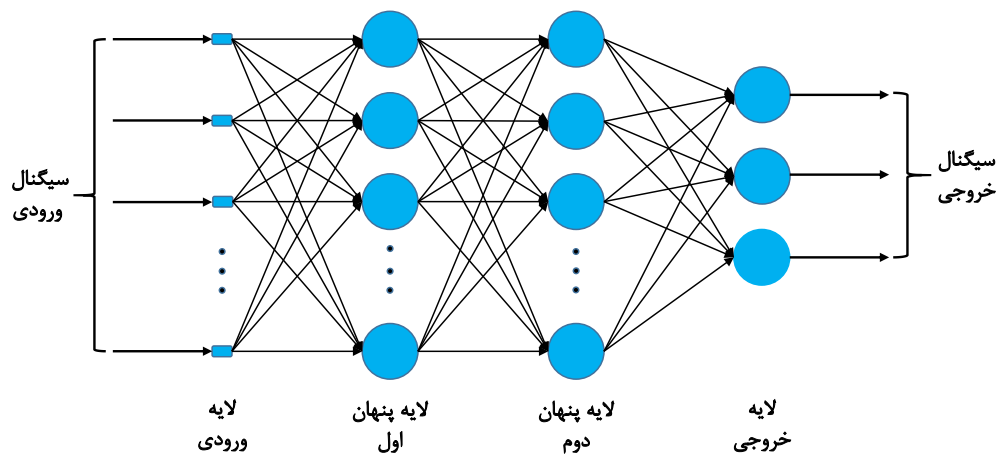
- الگوریتم آموزشی

در واقع تغییر در هر یک از موارد فوق، می‌تواند موجب تغییر در کلیت شبکه عصبی شود.

کار با شبکه عصبی به سه مرحله آموزش، ارزیابی و آزمون تقسیم می‌شود. در مرحله آموزش، الگوهای موجود در داده‌های ورودی به شبکه آموزش داده می‌شوند. هر شبکه برای آموزش این الگوها از قانون خاص استفاده می‌کند. در مرحله ارزیابی قدرت شبکه عصبی در ایجاد پاسخ‌های قابل قبول برای ورودی‌هایی که عضو مجموع آموزش نیستند سنجیده می‌شود. در مرحله آزمون نیز شبکه عصبی برای عملکردی که به آن منظور طراحی شده است، استفاده می‌شود. هدف از آموزش شبکه، رسیدن به شرایطی است که شبکه قادر به پاسخگویی صحیح به داده‌های ارائه شده در آموزش شبکه و همچنین داده‌های مشابه و متفاوت از ورودی‌هایی که از آنها برای آموزش شبکه استفاده شده است، باشد. برتری عمده‌ای که شبکه‌های عصبی آموزش داده شده در محاسبات کلاسیک دارند، این است که نتایج مورد نیاز با تلاش کمتر و سریع‌تر قابل دسترس هستند. این برتری در مسائلی با محاسبات طولانی بسیار مفید و موثر خواهد بود [47].

## ۲-۵-۲ شبکه پرسپترون چند لایه

یکی از مهم‌ترین شبکه‌های عصبی پرکاربرد شبکه‌های پرسپترون چند لایه<sup>۱</sup> می‌باشد. شبکه‌های پرسپترون از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه پنهان تشکیل می‌شوند (شکل ۲-۷). در این شبکه‌ها نرون هر لایه تنها به نرون لایه بعدی متصل خواهد بود. در این ساختار هر نرون به غیر از نرون‌های لایه ورودی که هیچ عملی را انجام نمی‌دهند که در این صورت وزن ثابت برابر یک دارد، عمل دریافت و پردازش داده‌ها از نرون‌های دیگر را انجام می‌دهد. در آخر اطلاعات پردازش شده در خروجی نرون‌ها قرار می‌گیرد. در این شبکه‌ها به دلیل قدرت انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی، می‌توان نکات‌های غیر خطی را با دقت بالا انجام داد.



شکل ۲-۷ ساختار شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون با دو لایه پنهان

الگوریتم آموزشی شبکه‌های پرسپترون الگوریتم پس‌انتشار خطا می‌باشد. نحوه عملکرد الگوریتم پس‌انتشار خطا بدین صورت است که مقادیر ورودی و خروجی را به شبکه داده؛ پس از آن الگوریتم میزان خطا و تفاوت بین مقادیر محاسبه شده و مقدار دلخواه را مورد محاسبه قرار می‌دهد. هدف اصلی این الگوریتم تنظیم وزن‌ها است که با قرار دهی مقادیر وزنی به صورت تصادفی سعی در به حداقل رسانیدن خطا را دارد [47].

<sup>۱</sup> Multi Layer Perceptron (MLP)

## ۲-۵-۳ شبکه عصبی مورد استفاده و بهینه‌سازی آن

در این پژوهش از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا استفاده شده است. همان طور که قبلاً گفته شد شبکه‌های عصبی پرسپترون از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه پنهان تشکیل شده‌اند. تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی براساس تعداد پارمترهای ورودی و خروجی مسئله در نظر گرفته می‌شوند؛ که در این پژوهش ۷ پارامتر ورودی و ۴ پارامتر خروجی خواهیم داشت. در حالی که می‌توان تعداد لایه‌های پنهان و همچنین تعداد نرون‌های هر لایه پنهان را در مسئله انتخاب کنیم. بنابراین برای ایجاد یک شبکه با بهترین عملکرد و کمترین خطا، ساختار شبکه را می‌توان بهینه کرد.

در پژوهش حاضر، متغیرهای طراحی این مسئله بهینه‌سازی، تعداد نرون‌های موجود در هر لایه پنهان می‌باشد. لازم به ذکر است که شبکه عصبی با یک لایه پنهان نیاز به بهینه‌سازی ندارد. مسئله بهینه‌سازی شبکه در شبکه‌هایی با تعداد دو، سه و چهار لایه پنهان صورت می‌گیرد. روابط زیر بیانگر این مسئله می‌باشند:

$$X_{2HL} = [N_1, N_2]^T \quad (۳-۲)$$

$$X_{3HL} = [N_1, N_2, N_3]^T \quad (۴-۲)$$

$$X_{4HL} = [N_1, N_2, N_3, N_4]^T \quad (۵-۲)$$

در روابط بالا  $N_i$  تعداد نرون‌های لایه پنهان  $i$  ام است. علاوه بر این، تابع هزینه مسئله بهینه‌سازی را مقدار میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> در نظر می‌گیرند که مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (O_d - O_p)^2} \quad (۶-۲)$$

در رابطه فوق،  $n$  تعداد نرون‌های موجود در مسئله می‌باشد.  $O_d$  و  $O_p$  به ترتیب خروجی‌های مطلوب و پیش‌بینی شده می‌باشند.

تابع انتقال مورد استفاده در مسئله، تابع سیگموئید می‌باشد که ساختار این تابع را می‌توان در رابطه زیر مشاهده کرد:

<sup>۱</sup> Mean Square Error (MSE)



$$F_{\text{logsig}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (۷-۲)$$

تعداد نرون‌ها در هر لایه پنهان در بازه [۱، ۵۰] تغییر می‌کند. داده‌های اولیه پس از نرمال‌سازی در بازه [۰، ۱] به صورت تصادفی تقسیم می‌شوند. ۷۰ درصد از نمونه‌های اولیه برای آموزش، ۱۵ درصد از نمونه‌های اولیه برای اعتبار سنجی و ۱۵ درصد آخر برای آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش تعداد ۸۸ داده که حاصل از طراحی آزمایش‌ها است برای ایجاد شبکه عصبی استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی تعداد نرون‌ها در هر لایه در پژوهش حاضر با الگوریتم‌های بهینه‌ساز PSO و WOA صورت می‌گیرد. معیار انتخاب بهترین شبکه تشکیل شده، کمترین مقدار میانگین مربعات خطا (MSE) می‌باشد. علاوه بر مقدار میانگین مربعات خطا از ضریب رگرسیون برای هر خروجی نیز جهت مقایسه شبکه‌ها با تعداد لایه‌های پنهان مختلف استفاده شده است. در این بهینه‌سازی تعداد جمعیت اولیه در هر دو الگوریتم بهینه‌ساز ۱۰ و تعداد تکرار شبکه ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر برای بهینه‌سازی تعداد نرون‌ها از دو الگوریتم ازدحام ذرات و وال استفاده شده است که در ادامه هر یک از آن‌ها توضیح داده می‌شوند.

## ۲-۶ الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد که بر مبنای تولید تصادفی جمعیت اولیه عمل می‌کند. این الگوریتم بر گرفته از حرکت گروهی پرندگان می‌باشد که در آن هر عضو در گروه توسط بردار سرعت و بردار موقعیت در فضای جستجو معرفی می‌گردد. در زمان‌های مختلف موقعیت جدید هر ذره با توجه به بردار سرعت فعلی، بهترین موقعیت یافت شده توسط آن ذره و بهترین موقعیت یافت شده توسط بهترین ذره موجود گروه به روز رسانی می‌شود. این الگوریتم در ابتدا فقط برای پارامترهای پیوسته معرفی شد اما به دلیل استفاده از پارامترهای گسسته در برخی مسائل، این الگوریتم به حالت گسسته نیز ارائه شد. در الگوریتم با حالت گسسته موقعیت هر ذره با مقادیر باینری صفر و یک معرفی شد که در آن مقدار هر ذره می‌تواند از صفر به یک و یا از یک به صفر تغییر کند. مقدار سرعت هر ذره در این الگوریتم به عنوان احتمال تغییر هر ذره، یک تعریف می‌شود [48].

## ۲-۶-۱ تعاریف اولیه الگوریتم ازدحام ذرات

با فرض یک فضای  $n$  بعدی،  $i$  امین ذره در این فضا با بردار موقعیت  $X_i$  به شکل زیر توصیف می‌شود:

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in}) \quad (۸-۲)$$

برداری سرعت این ذره  $i$  ام نیز با بردار  $V_i$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{id}) \quad (۹-۲)$$

بهترین موقعیت یافت شده توسط ذره  $i$  ام با  $P_{i.best}$  تعریف می‌شود؛ همچنین برای بروزرسانی محل هر ذره از رابطه‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۲ استفاده شده است.

$$P_{i.best} = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{id}) \quad (۱۰-۲)$$

$$V_i(t) = W \times V_i(t-1) + c_1 \times rand_1 \times (P_{i.best} - X_i(t-1)) + c_2 \times rand_2 \times (P_{g.best} - X_i(t-1)) \quad (۱۱-۲)$$

$$X_i = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (۱۲-۲)$$

در روابط فوق؛

$W$ : ضریب وزنی اینرسی می‌باشد که میزان تأثیر بردار سرعت تکرار قبل ( $V_i(t)$ ) بر روی بردار سرعت در تکرار فعلی ( $V_i(t+1)$ ) را نشان می‌دهد.

$C_1$ : ضریب ثابت آموزش (حرکت در مسیر بهترین مقدار ذره مورد بررسی)

$C_2$ : ضریب ثابت آموزش (حرکت در مسیر بهترین ذره یافت شده در بین کل جمعیت)

$rand_1, rand_2$ : دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر تا یک

$V_i(t-1)$ : بردار سرعت در هر تکرار ( $t-1$ ) ام

$X_i(t-1)$ : بردار موقعیت در هر تکرار ( $t-1$ ) ام

برای جلوگیری از افزایش سرعت بیش از حد هر ذره (واگرا شدن بردار سرعت) تغییرات سرعت در محدوده

$V_{min}$  تا  $V_{max}$  قرار می‌گیرد. حد بالا و پایین سرعت در هر مسئله با توجه به نوع آن مشخص می‌شود [48].

$$V_{min} \leq V \leq V_{max}$$

## ۲-۶-۲ انتخاب تصادفی جمعیت اولیه ذرات

به تعیین تصادفی محل اولیه ذرات با توزیع یکنواخت در فضای حل (فضای جستجو)، تولید تصادفی جمعیت اولیه گفته می‌شود. مرحله تولید تصادفی جمعیت اولیه تقریباً در تمامی الگوریتم‌های بهینه‌سازی وجود دارد. تفاوت این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های بهینه‌ساز این است که علاوه بر محل تصادفی اولیه ذرات، مقداری برای سرعت اولیه هر ذره در نظر می‌گیرد. البته مقدار سرعت اولیه را می‌توان صفر نیز در نظر گرفت.

## ۲-۶-۳ انتخاب تعداد ذرات اولیه

با افزایش تعداد ذرات اولیه، تعداد تکرارهای لازم برای همگرا شدن الگوریتم کاهش می‌یابد. برخی بر این باورند که با کاهش تعداد تکرار می‌توان زمان اجرای برنامه برای رسیدن به هم‌گرایی را کاهش داد که تصوری غلط است. هرچند که با افزایش ذرات اولیه تعداد تکرارها کاهش می‌یابد اما افزایش تعداد ذرات باعث می‌شود الگوریتم در مرحله ارزیابی ذرات زمان بیشتری را صرف نماید که این افزایش در زمان ارزیابی باعث افزایش زمان اجرای الگوریتم برای رسیدن به هم‌گرایی با وجود کاهش در تعداد تکرار می‌شود. پس افزایش تعداد ذرات نمی‌تواند موجب کاهش زمان اجرای الگوریتم مورد استفاده شود. تصور غلط دیگری که وجود دارد این است که می‌توان با کاهش تعداد ذرات اولیه، زمان اجرای الگوریتم را کاهش داد، اما برای این که الگوریتم به جواب بهینه برسد تعداد تکرارها افزایش می‌یابد که در نهایت هیچ تغییری در زمان اجرای برنامه برای رسیدن به پاسخ ایجاد نمی‌کند و زمان اجرای برنامه کاهش نمی‌یابد. همچنین کاهش تعداد ذرات اولیه باعث به دام افتاده الگوریتم در مینیم‌های محلی می‌شود و الگوریتم از رسیدن به مینیم اصلی باز بماند. اگر شرایط هم‌گرایی را تعداد تکرار در نظر بگیریم، هر چند با کاهش تعداد ذرات اولیه زمان اجرا الگوریتم کاهش پیدا می‌کند اما جواب حاصل حل بهینه نخواهد بود. چرا که الگوریتم به طور ناقص اجرا شده است. در حالت کلی تعداد جمعیت اولیه با توجه به مسئله تعیین می‌شود [48]. در این پژوهش تعداد جمعیت ۱۰ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۶-۴ ثبت بهترین موقعیت برای هر ذره و بهترین موقعیت در بین کل ذرات

با توجه به شماره تکرار در این مرحله دو حالت قابل بررسی خواهد بود:

در تکرار اول  $t = 1$  خواهد بود. در این حالت بهترین محل یافت شده برای ذره، موقعیت فعلی آن ذره در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{i,best} = X_i(t) \quad , i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13-2)$$

$$cost(P_{i,best}) = cost(X_j(t)) \quad (14-2)$$

در تکرارهای بعدی مقدار هزینه به دست آمده برای هر ذره، با مقدار بهترین هزینه به دست آمده برای تمامی ذرات مقایسه می‌شود. در صورتی که مقدار هزینه کمتر از بهترین هزینه ثبت شده برای این ذره باشد، این هزینه جایگزین هزینه قبل خواهد شد. در غیر این صورت تغییری در محل و هزینه ثبت شده برای این ذره اعمال نمی‌گردد؛ یعنی:

$$\begin{cases} \text{if } cost(X_i(t)) < cost(P_{i,best}) \\ \quad \text{else not change} \\ \text{cost}(P_{i,best}) = cost(X_j(t)) \\ \quad P_{i,best} = X_i(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15-2)$$

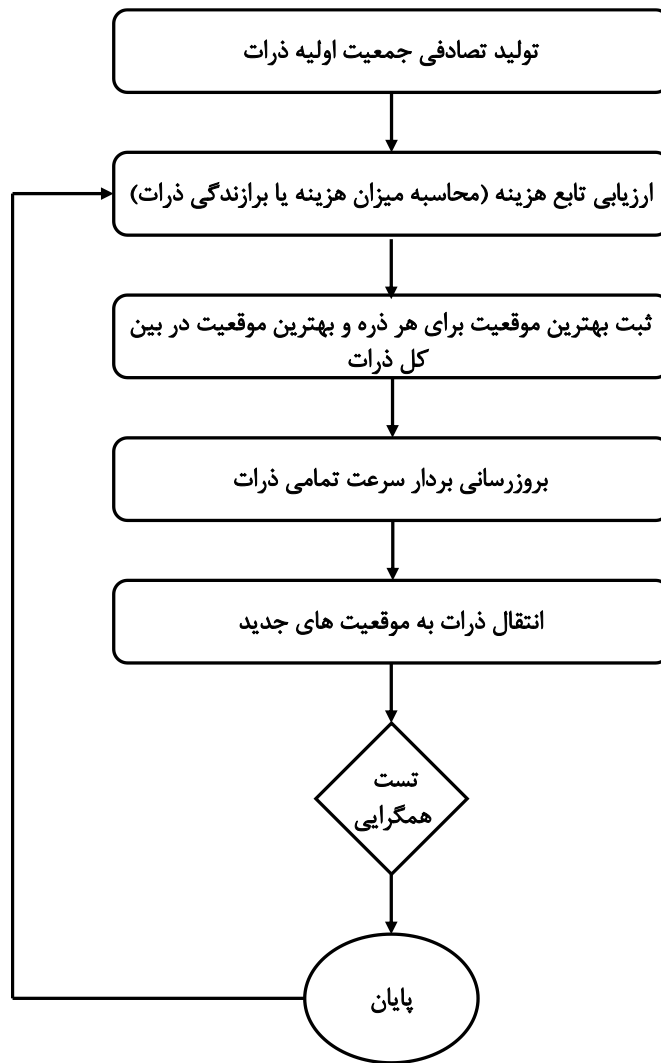
سرعت تمامی ذرات توسط رابطه زیر به روز رسانی می‌شود:

$$V_i(t) = W \times V_i(t-1) + c_1 \times rand_1 \times (P_{i,best} - X_i(t-1)) + c_2 \times rand_2 \times (P_{g,best} - X_i(t-1)) \quad (16-2)$$

در رابطه فوق مقادیر  $W$ ،  $c_1$  و  $c_2$  با توجه به مسئله مورد نظر و به روش تجربی تعیین می‌شوند. مقدار  $W$  باید کمتر از یک در نظر گرفته شود زیرا اگر بزرگتر از یک انتخاب شود، مقدار  $V(t)$  تا رسیدن به واگرایی همواره افزایش پیدا می‌کند. هرچند در تئوری می‌توان برای مقدار  $W$  منفی نیز در نظر گرفت اما در استفاده از الگوریتم پیشنهاد نمی‌شود چرا که منفی در نظر گرفتن مقدار  $W$  باعث ایجاد نوسان در  $V(t)$  می‌شود. مقادیر  $c_1$  و  $c_2$  نیز نباید بیش از حد بزرگ در نظر گرفته شوند چرا که باعث انحراف ذرات از مسیر خود می‌شود [48].

## ۲-۶-۵ آزمون هم‌گرایی

در الگوریتم ازدحام ذرات مانند تمامی الگوریتم‌های بهینه‌ساز، آزمون هم‌گرایی انجام می‌شود. برای بررسی الگوریتم روش‌های بسیاری وجود دارد. به عنوان مثال در ابتدا می‌توان تعدادی تکرار مشخص کرد و در هر مرحله بررسی کرد که آیا تعداد تکرار به مقدار از پیش تعیین شده رسیده است یا نه. اگر تعداد تکرارها کوچک‌تر از مقدار از پیش تعیین شده باشد، آن‌گاه به مرحله ۲ برگشته و در غیر این صورت الگوریتم پایان می‌یابد. روش دیگری که در آزمون هم‌گرایی الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد این است که اگر در چند تکرار متوالی به عنوان مثال ۱۵ یا ۲۰ تکرار تغییری در جهت بهبود هزینه هر ذره ایجاد نشد، آن‌گاه الگوریتم پایان می‌پذیرد و در غیر این صورت به مرحله ۲ باز می‌گردد. دیاگرام گردش (روندنما) الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۲-۸ نمایش داده شده است [48].

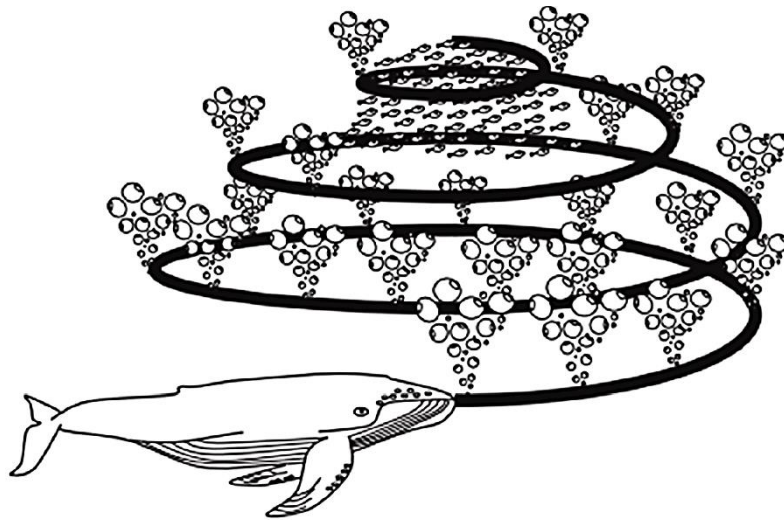


شکل ۲-۸ روندنما الگوریتم ازدحام ذرات

## ۲-۷ الگوریتم وال

الگوریتم وال یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت می‌باشد که بر گرفته از رفتار دسته جمعی نهنگ‌های کوهان‌دار در زمان شکار می‌باشد. جالب‌ترین نکته در مورد نهنگ‌ها، روش شکار آن‌ها است که به آن حباب‌تور می‌گویند. روش غذایی در نهنگ‌ها با ایجاد حباب‌های مختلف در طول یک دایره که مسیری شبیه به عدد 9 می‌باشد صورت می‌گیرد. رفتار نهنگ‌ها تا قبل از سال ۲۰۱۱ بر اساس مشاهدات سطحی بررسی شده بود تا این که گولدموگن و همکارانش به بررسی رفتار این نهنگ‌ها با استفاده از

حسگرهایی پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود بر روی ۹ نهنگ، ۳۰۰ روش تغذیه حباب تور را ثبت کرده و در دو دسته مارپیچ‌های به سمت بالا<sup>۱</sup> و حلقه‌های دوپل<sup>۲</sup> تقسیم کرده‌اند. در روش مارپیچ به سمت بالا، نهنگ‌ها تا عمق ۱۲ m پایین رفته سپس با ایجاد حباب‌هایی به شکل مارپیچ در اطراف طعمه به سمت سطح آب باز می‌گردند. روش حلقه‌های دوپل دارای سه مرحله می‌باشد که عبارت‌اند از حلقه مرجانی، حلقه دم (حرکتی که در آن نهنگ‌ها دم خود را به سطح آب می‌زنند)، حلقه شکار. لازم به ذکر است که روش حباب تور، رفتار منحصر به فردی است که فقط در نهنگ‌های کوهان‌دار مشاهده می‌شود [49].



شکل ۲-۹ رفتار تغذیه حباب‌تور وال کوهان‌دار [49]

## ۲-۷-۱ فرایند محاصره شکار

نهنگ‌های کوهان‌دار می‌توانند محل شکار را تشخیص دهند، پس از تشخیص محل شکار دور آن حلقه می‌زنند. با توجه به این که موقعیت طراحی بهینه در فضای جستجو از قبل شناخته شده نیست، الگوریتم بهینه‌ساز وال با فرض بهترین جواب فعلی که شکار هدف یا جواب نزدیک به بهینه است پیش می‌رود. پس از تشخیص بهترین هدف، سایر عوامل سعی در اصلاح موقعیت خود نسبت به بهترین موقعیت یافت شده می‌کنند. این رفتار را می‌توان در روابط زیر مشاهده کرد:

<sup>۱</sup> Upward spirals

<sup>۲</sup> Double loops

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^* - \vec{A}(t)| \quad (۱۷-۲)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (۱۸-۲)$$

در روابط بالا  $t$  بیانگر تعدا تکرار فعلی، مقادیر  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  بردارهای ضریب،  $X^*$  بردار مکان بهترین جواب به دست آمده و  $\vec{X}$  معرف بردار مکان می‌باشد. باید توجه داشت که در صورت ایجاد جواب بهتر پس از هر تکرار مقدار  $X^*$  باید به روز رسانی شود.

مقادیر بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  با توجه به روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند:

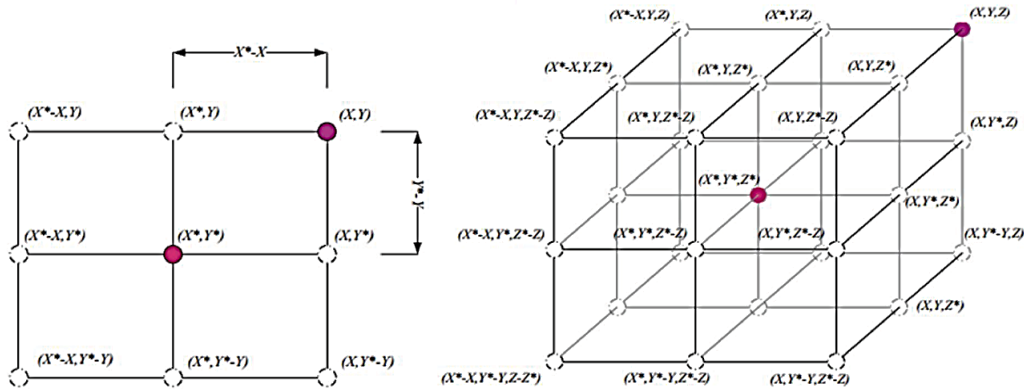
$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (۱۹-۲)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (۲۰-۲)$$

$\vec{a}$  بردار کاهش خطی در تکرارها مختلف از دو به صفر و  $\vec{r}$  بردار تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. شکل ۲-۱۰ مقدار بردار  $\vec{a}$  در یک مسئله دو بعدی را نشان می‌دهد. موقعیت هر عامل جستجو  $(X, Y)$  را می‌توان براساس بهترین موقعیت فعلی  $(X^*, Y^*)$  به روز رسانی کرد. با تنظیم مقادیر بردار  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  می‌توان مکان‌های بهینه‌ی که در اطراف یک عامل وجود دارد را به دست آورد. در شکل ۲-۱۰ نیز می‌توان نحوه به روز رسانی موقعیت یک عامل جستجو را در فضای سه بعدی مشاهده کرد. قابل توجه است که می‌توان با تنظیم مقدار بردار  $\vec{r}$  امکان رسیدن به هر مکان از فضای جستجو رسید. با توجه به روابط ذکر شده می‌توان این امکان را برای هر عامل جستجو فراهم ساخت تا موقعیت خود را نسبت به بهترین موقعیت فعلی به روز رسانی کرد و حلقه زدن به دور شکار را شبیه‌سازی کرد.

با توجه به مفاهیم ذکر شده می‌توان فضای  $n$  بعدی را نیز مورد ارزیابی قرار داد. در این حالت عوامل جستجو حول بهترین جواب به دست آمده تا کنون حرکت می‌کنند. همان طور که در گذشته نیز بیان شد نهنگ‌های کوهان‌دار با رفتار حباب تور به شکار طعمه می‌پردازند.



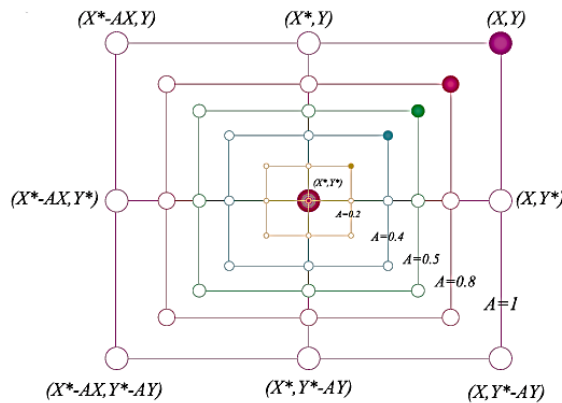


شکل ۲-۱۰ بردارهای مکان دو بعدی و سه بعدی و مکان‌های احتمالی بعدی [49]

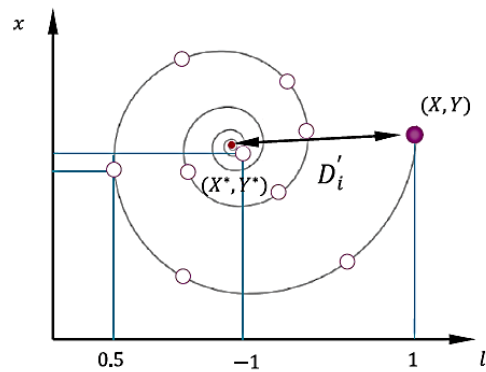
## ۲-۷-۲ روش حمله شبکه حبابی (مرحله بهره‌برداری)

مدل‌سازی ریاضی رفتار شبکه حبابی نهنگ‌های کوله‌دار به دو روش انجام می‌شود که در ادامه به آن می‌پردازیم:

روش اول؛ مکانیز حلقه زدن انقباضی: این رفتار را می‌توان با کاهش مقدار  $\vec{a}$  موجود در رابطه ۲-۱۹ مشاهده کرد. با توجه به این محدود نوسان  $\vec{A}$  به واسطه کاهش  $\vec{a}$  به وجود می‌آید. به عبارت دیگر مقدار تصادفی  $\vec{A}$  در بازه  $[-a, a]$  است که در این قسمت  $\vec{a}$  در طی تکرارها، از دو به صفر کاهش پیدا می‌کند. با تنظیم مقدار تصادفی  $\vec{A}$  در بازه  $[-1, 1]$  مکان‌های جدید عامل جستجو را می‌توان در هر جایی بین موقعیت اولیه عامل و موقعیت بهترین عامل فعلی، معرفی کرد. با توجه به شکل ۲-۱۱ ب که موقعیت‌های ممکن از  $(X, Y)$  به سمت  $(X^*, Y^*)$  را نشان می‌دهد می‌توان از طریق  $0 \leq A \leq 1$  در فضای دو بعدی به دست آورد.



ب



الف

شکل ۲-۱۱ مکانیزم جستجوی شبکه حبابی در الگوریتم وال؛ الف) موقعیت مارپیچی، ب) حلقه زدن انقباضی [49]

روش دوم؛ به روز رسانی موقعیت مارپیچی: با توجه به شکل ۲-۱۱ الف در ابتدا فاصله بین وال واقع در موقعیت  $(X, Y)$  و شکار واقع در موقعیت  $(X^*, Y^*)$  را می‌توان محاسبه کرد. در ادامه یک معادله مارپیچی بین موقعیت وال و موقعیت طعمه به وجود می‌آید که می‌توان حرکت مارپیچی شکل نهنگ‌های کوهان‌دار را بر طبق رابطه زیر شبیه‌سازی کرد.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} \cdot e^{bi} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (21-2)$$

$$\vec{D} = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (22-2)$$

رابطه ۲-۲۲ بیانگر فاصله  $i$  امین وال تا طعمه (بهترین جواب به دست آمده تا کنون) می‌باشد.  $b$  ثابتی است که شکل مارپیچ لگاریتمی را مشخص می‌کند و عددی تصادفی در بازه  $[-1, 1]$  می‌باشد.

باید توجه داشت که حرکت نهنگ‌های کوله‌دار در اطراف طعمه به صورت هم‌زمان هم به شکل دایره انقباضی و هم در امتداد یک مسیر مارپیچی شکل می‌باشد. به منظور مدل‌سازی این رفتار هم‌زمان، فرض می‌کنیم که احتمال ۵۰ درصد می‌توان برای به روز رسانی موقعیت وال‌ها در طی فرایند بهینه‌سازی از مکانیزم حلقه زدن انقباضی یا مدل مارپیچی استفاده کرد. مدل ریاضی به شرح زیر می‌باشد.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bi} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (23-2)$$

در این رابطه  $p$  عدد تصادفی در باز  $[0, 1]$  است.

## ۳-۷-۲ جستجوی طعمه (مرحله اکتشاف)

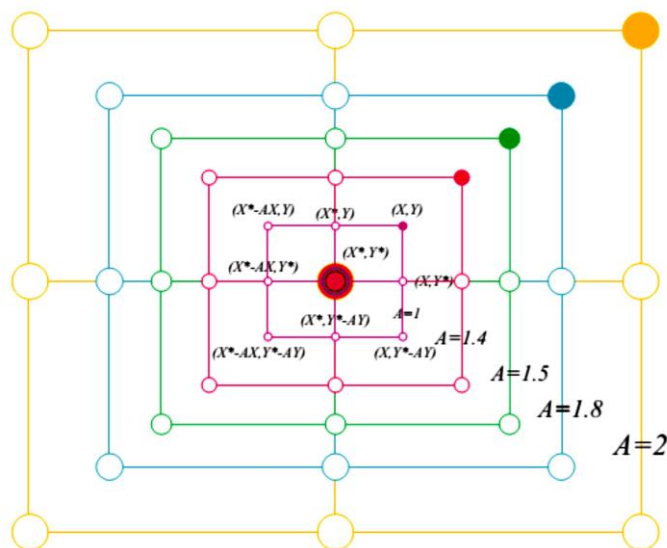
روش‌های مبتنی بر تغییرات بردار  $\vec{A}$  را می‌توان برای جستجوی طعمه نیز به کار برد. در واقع نهنگ‌های کوهان‌دار عمل جستجو را به صورت تصادفی و براساس موقعیت یکدیگر انجام می‌دهند. پس بنابراین از مقادیر تصادفی  $\vec{A}$  بزرگ‌تر از یک و کوچک‌تر از منفی یک استفاده می‌کنیم تا عامل جستجو از یک وال مرجع دوری کند. در این مرحله موقعیت عامل جستجو براساس عامل جستجوی انتخاب شده تصادفی به روز رسانی می‌شود. بر خلاف مرحله بهره‌برداری که موقعیت عامل جستجو براساس بهترین عامل جستجوی یافت شده تا کنون انتخاب می‌شود. این مکانیزم و  $|\vec{A}| > 1$  تأکید بر روی اکتشاف دارد و به الگوریتم وال این اجازه را می‌دهد تا جستجوی سراسری انجام دهد. مدل ریاضی این روش به شرح زیر می‌باشد.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - X| \quad (24-2)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (25-2)$$

در روابط بالا  $\vec{X}_{rand}$  بیانگر یک بردار مکان تصادفی از یک وال تصادفی از میان جمعیت فعلی می‌باشد.

در شکل ۲-۱۲ بعضی از موقعیت‌های ممکن در اطراف یک جواب مشخص با  $|\vec{A}| > 1$  را می‌توان مشاهده کرد.



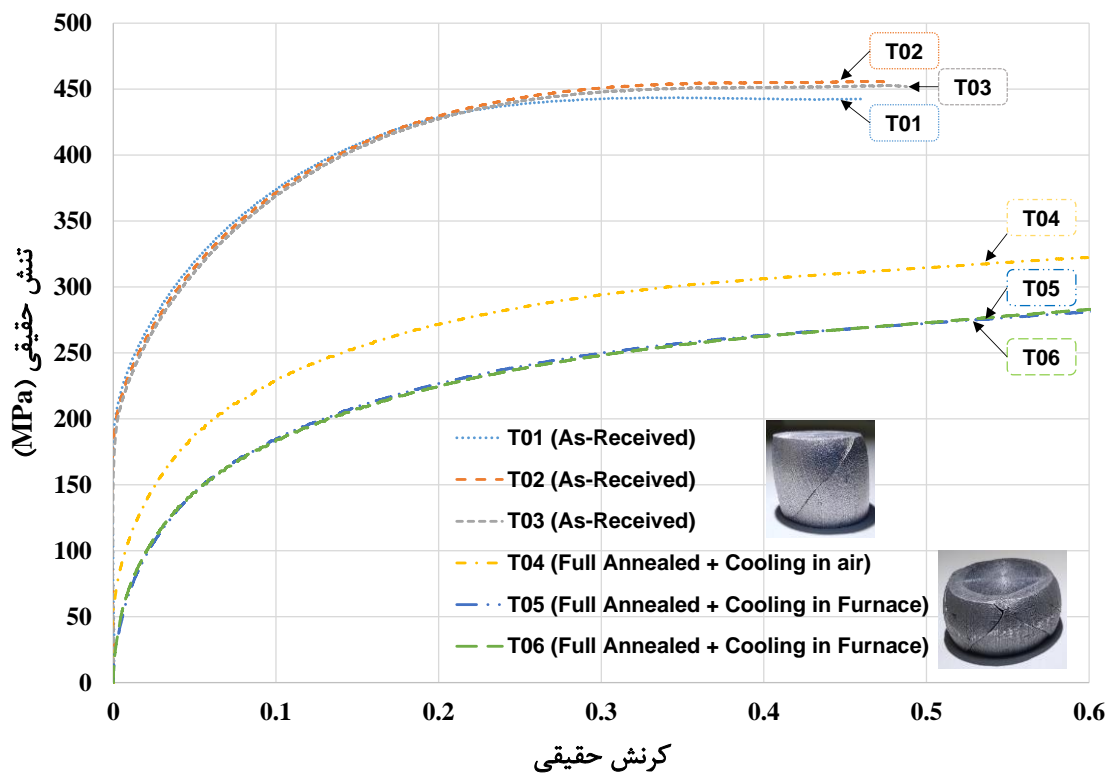
شکل ۲-۱۲ مکانیزم اکتشاف پیاده سازی شده در الگوریتم وال [49]

الگوریتم وال با توجه به مجموعه جواب‌های تصادفی عمل می‌کند. پس از هر تکرار عامل‌های جستجو موقعیت خود نسبت به یکدیگر را یا براساس بهترین جواب یافت شده تا کنون و یا براساس عامل جستجوی انتخاب شده تصادفی به روز رسانی می‌کنند. مقدار پارامتر  $a$  برای فراهم کردن امکان بهره‌برداری و اکتشاف از دو به صفر کاهش می‌یابد. در به روز رسانی موقعیت عامل‌های جستجو اگر  $|\vec{A}| > 1$  باشد از جستجوی تصادفی استفاده می‌کنیم و اگر  $|\vec{A}| > 1$  باشد از بهترین جواب برای این به روز رسانی استفاده می‌شود. الگوریتم وال با توجه به مقدار  $p$  می‌تواند بین حرکت مارپیچ و یا دایره‌ای جابه‌جا شود. در آخر الگوریتم وال با ارضای یکی از معیارهای خاتمه به کار خود پایان می‌دهد.

## فصل ۳ : نتایج و بحث

## ۳-۱ آزمون فشار

پس از آماده سازی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به قطر و طول به ترتیب ۸ mm و ۱۵ mm، تحت فرایند آنیل قرار می‌گیرند. به منظور دستیابی به رفتار مکانیکی محصول و ترسیم نمودار تنش- کرنش این نمونه‌ها از آزمون فشار استفاده شده است. تعداد ۶ نمونه جهت انجام آزمون فشار انتخاب شده است. تعداد ۳ نمونه به صورت اولیه و بدون هیچ گونه عملیات حرارتی آماده شده است. تعداد ۳ نمونه در کوره جهت انجام فرایند آنیل در دمای  $415^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۳ ساعت قرار گرفته‌اند. از ۳ نمونه آنیل شده ۲ نمونه در کوره و یک نمونه در هوای آزاد سرد شده است. نمودار تنش-کرنش این نمونه‌ها را می‌توان در شکل ۳-۱ مشاهده کرد.



شکل ۳-۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه آلومینیوم ۷۰۷۵ اولیه و آنیل شده

با توجه به شکل، نمونه‌های اولیه کرنش کمتری از نمونه‌های آنیل شده تحمل می‌کنند تا به شکست می‌رسند. در نتیجه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ اولیه شکل‌پذیری مناسب ندارد و نمی‌توان از آن برای فرایند ایکپ مداوم استفاده کرد (در اجرای فرایند هم این امر به وضوح مشخص شد و میله آلومینیومی اولیه در حین اجرای فرایند تکه تکه شد). نمونه‌های آنیل شده رفتار بهتری نسبت به نمونه‌های اولیه از خود نشان داده و

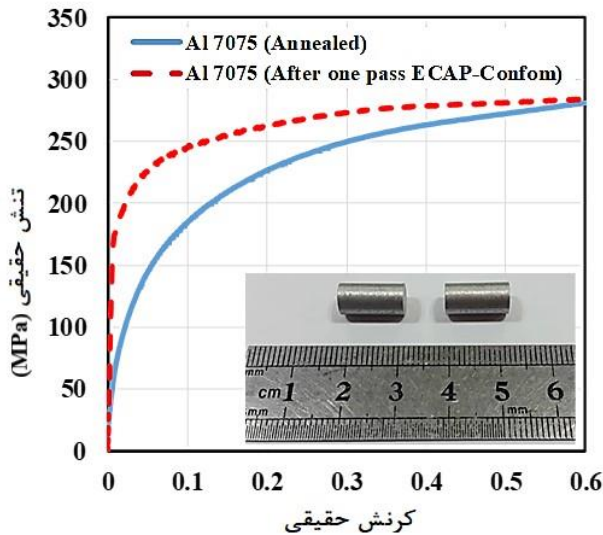
کرنش بیشتری را تا شکست تحمل می‌کنند. این امر تایید می‌کند که آنیل نمونه اولیه باعث بهبود خاصیت شکل‌پذیری آلومینیوم ۷۰۷۵ شده است. بنابراین از نمونه‌های آنیل شده در دمای  $415^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ ساعت و سپس سرد شده در کوره در ادامه پژوهش استفاده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آزمون فشار مقادیر ضریب کرنش سختی و توان کرنش سختی به ترتیب برابر  $318\text{ MPa}$  و  $0.23$  بدست آمد و از آن‌ها برای اعمال رفتار ماده در کرنش‌های مختلف در شبیه‌سازی استفاده شده است.

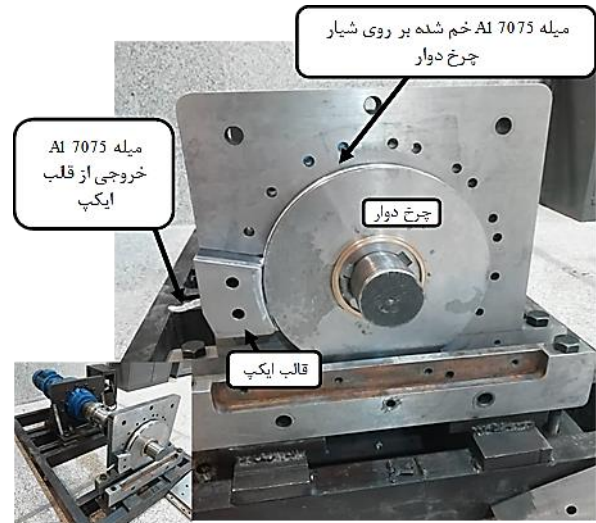
### ۳-۲ فرایند ایکپ مداوم

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش، آزمون تجربی این فرایند برای میله آلومینیوم ۷۰۷۵ به قطر  $8\text{ mm}$  تحت شرایط ذکر شده در جدول ۳-۱ اجرا شده است. در این آزمون میله آلومینیومی به محض وارد شدن درون شیار روی چرخ دوار، با توجه به اصطکاک بین میله و دیوارهای شیار چرخ‌دوار به داخل کشیده شده و روی چرخ‌دوار خم شده و پس از حدود  $270^{\circ}$  چرخش حول چرخ‌دوار با زبانه قالب برخورد کرده و از درون قالب ایکپ خارج می‌شود (شکل ۳-۲ الف). برای بدست آوردن استحکام تسلیم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ بعد از یک پاس ایکپ مداوم، آزمون فشار بر روی نمونه‌های ایکپ مداوم شده با استفاده از دستگاه سنتام STD-600 در دمای محیط و نسبت ابعادی (ارتفاع به قطر) برابر ۲ اجرا شد. نتایج آزمون فشار نشان می‌دهد که استحکام تسلیم میله آلومینیومی از  $55\text{ MPa}$  به  $180\text{ MPa}$  افزایش یافته است؛ تقریباً  $2/3$  برابر استحکام نمونه اولیه است. منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ قبل و بعد از اجرای فرایند ایکپ مداوم در شکل ۳-۲ ب نمایش داده شده است. با مقایسه مقدار توان کرنش سختی ( $n$ ) نمونه‌های آلومینیومی قبل و بعد از اجرای فرایند ایکپ مداوم می‌توان مشاهده کرد که توان کرنش سختی میله آلومینیومی از  $0.23$  به  $0.1$  کاهش یافته است. مشخص می‌شود که برخلاف افزایش استحکام تسلیم ماده؛ انعطاف‌پذیری میله آلومینیومی بعد از اجرای فرایند، حدوداً ۵۵ درصد کاهش یافته است. پس از شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیومی تحت شرایط ذکر شده در جدول ۳-۱، میزان استحکام تسلیم ماده ایکپ شده برابر  $195\text{ MPa}$  بدست آمده است که با مقایسه با استحکام تسلیم ماده بعد

از اجرای یک پاس فرایند ایکپ مداوم (مقدار استحکام تسلیم میله با استفاده از خط ۰/۲ درصد برابر با  $180 \text{ MPa}$  بدست آمد) مشخص می‌شود که نتایج حدود ۷/۵ درصد اختلاف دارد که خطای قابل قبولی است و نشان از دقت مطلوب شبیه‌سازی المان محدود دارد.



ب



الف

شکل ۳-۲ الف) مجموعه ایکپ مداوم مقطع چهارگوش میله آلومینیومی ۷۰۷۵؛ ب) منحنی تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده و یک پاس ایکپ مداوم شده

جدول ۳-۱ پارامترهای مورد استفاده در اجرای فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵

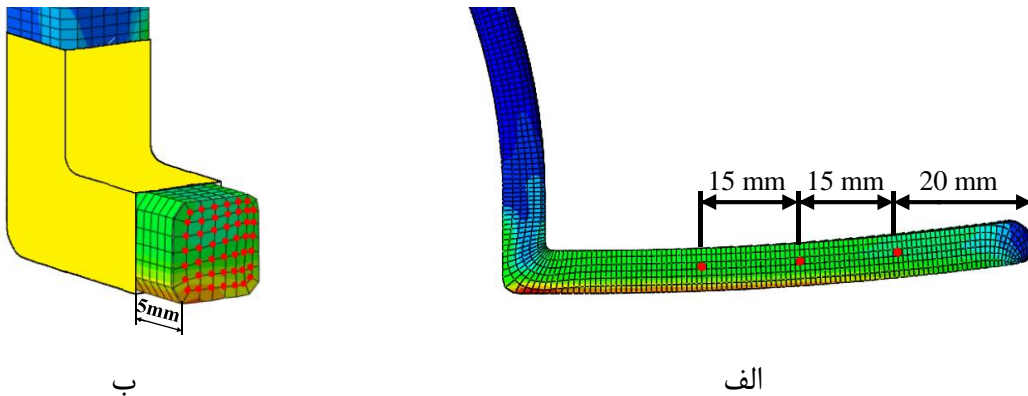
ضریب اصطکاک میله و قالب ( $\mu_d$ )	ضریب اصطکاک میله و چرخ‌دوار ( $\mu_r$ )	شعاع چرخ‌دوار (R)	ابعاد کانال قالب (mm)	زاویه خم میله بر روی چرخ-دوار ( $\omega$ )	زاویه گوشه بیرونی قالب ( $\psi$ )	زاویه برخورد کانال قالب ( $\varphi$ )
۰/۱	۰/۴	۱۵۰ mm	۷/۵ × ۷/۵	۲۷۰°	۰°	۱۲۰°

### ۳-۳ شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم

پس از اطمینان از دقت مطلوب شبیه‌سازی المان محدود، با استفاده از جدول طراحی آزمایش‌ها که در فصل قبل توضیح داده شد شبیه‌سازها اجرا گردید. مقدار گشتاور فرایند، بیشترین استحکام تسلیم موجود در فرایند، توزیع کرنش در سطح نمونه و مقدار انحنای میله پس از خروج از قالب ایکپ را به عنوان پارامترهای خروجی فرایند ایکپ مداوم ثبت شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها را می‌توان در جدول ب در قسمت پیوست مشاهده کرد.



به منظور تعیین میزان انحنای میله پس از خروج از قالب، در ابتدا تعداد ۳ نقطه با فاصله مساوی از هم روی میله انتخاب می‌شوند. پس از انجام فرایند ایکپ مداوم، مختصات این سه نقطه ثبت و در یکی از نرم‌افزارهای طراحی این نقاط ترسیم می‌شوند. با عبور دادن یک دایره از این سه نقطه می‌توان شعاع انحنا را بدست آورد (شکل ۳-۳ الف). مقدار معکوس شعاع انحنا برابر میزان انحنا یا تابیدگی میله پس از خروج از قالب در نظر گرفته می‌شود. به جهت تعیین میزان توزیع کرنش در سطح مقطع میله، پس از عبور میله از قالب ایکپ به فاصله ۵ mm از لبه قالب مقطعی زده شده است. با اندازه‌گیری مقادیر کرنش در گره‌های موجود در این سطح مقطع چگونگی نحوه توزیع کرنش در سطح مقطع میله بدست می‌آید (شکل ۳-۳ ب).



شکل ۳-۳ الف) تعیین میزان انحنای میله پس از خروج از قالب ایکپ، ب) تعیین توزیع کرنش در سطح مقطع میله

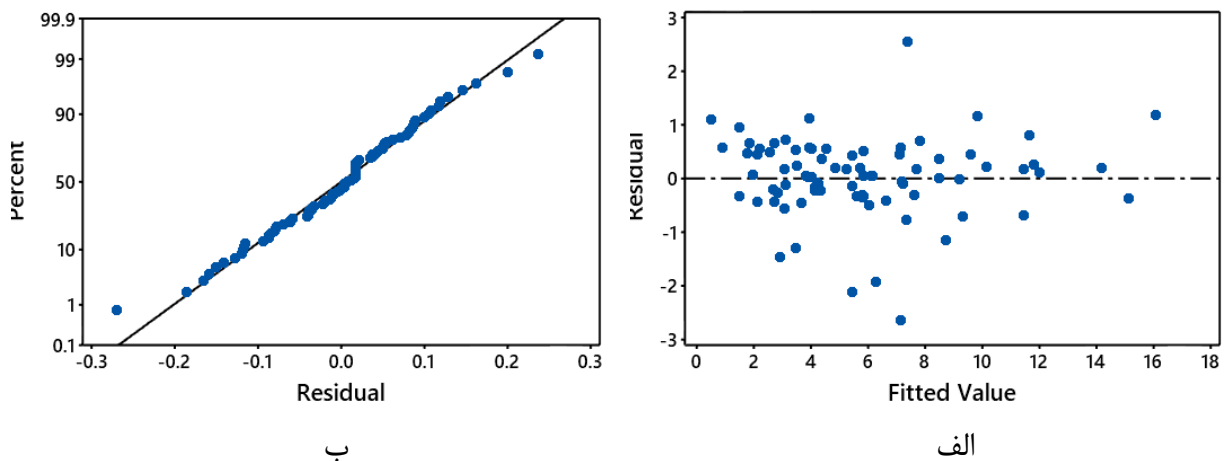
### ۴-۳ روش سطح پاسخ

#### ۱-۴-۳ صحت‌سنجی تحلیل واریانس<sup>۱</sup>

نتیجه‌گیری قطعی از نمودارها و نتایج ارائه شده مستلزم تایید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می‌پردازد. از طریق بررسی

<sup>۱</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

نمودار باقیمانده‌ها، برقراربودن فرض نرمال بودن داده‌ها<sup>۱</sup> و همچنین اگر باقیمانده‌ها از هیچ الگویی پیروی نکنند؛ برقراری فرض استقلال<sup>۲</sup> برای متغیرهای پاسخ و به طور کلی، صحت فرض‌های نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن تایید می‌گردد. با اثبات صحت فرض‌های یاد شده، می‌توان به نتایج تحلیل واریانس که در جدول‌ها و شکل‌هایی که در ادامه آورده شده، اعتماد کرد. پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگویی<sup>۳</sup> در شکل ۳-۴ الف نمایانگر برقراری فرض استقلال و همچنین عدم وجود نقاط پرت در شکل ۳-۴ ب نشان‌دهنده برقراربودن فرض نرمال بودن داده‌هاست. این شکل‌ها صحت فرض‌های نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تایید می‌کند. لازم به ذکر است که در تحلیل واریانس، متغیرهایی در فرایند مؤثر هستند که مقدار P آن‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۵٪ از ۰/۰۵ کمتر باشد. بر این اساس می‌توان از اثر عواملی که P آن‌ها از ۰/۰۵ بیشتر است، صرف‌نظر کرد.



شکل ۳-۴ (الف) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته، (ب) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده

<sup>۱</sup> Normality assumption

<sup>۲</sup> Independence assumption

<sup>۳</sup> Structureless

## ۳-۴-۲ تحلیل واریانس

برای بررسی دقیق پارامترهای موثر در این فرایند باید به دقت اثر عامل‌های اصلی و اثرات تقابلی آن‌ها را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد. به همین منظور ابتدا نمودار اثرات نرمال عوامل<sup>۱</sup> در فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیومی را بر روی میزان گشتاور موردنیاز فرایند (T)، استحکام تسلیم ماده ( $\bar{\sigma}$ )، یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله ( $STD_{\epsilon}$ ) و مقدار انحنای میله خروجی ( $\rho$ ) بررسی خواهد شد. بر طبق این نمودارها هرچه فاصله عامل از خط مورب بیشتر باشد، تاثیر آن عامل بر روی فرایند معنادارتر خواهد بود. لذا می‌توان با در نظر گرفتن عواملی که بیشترین اثر را دارند، تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس و مدل رگرسیونی برای هر پاسخ را ارائه کرد. لازم به یادآوری است که در جدول تحلیل واریانس مقدار P کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده آن است که عامل متناظر تاثیری معنادار بر میزان پاسخ دارد.

بررسی نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی میزان گشتاور موردنیاز فرایند نشان‌دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، شعاع چرخ‌دوار (A)، زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب (G)، زاویه خم میله بر روی چرخ‌دوار (B) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) بیشترین تاثیر را بر فرایند (به ترتیب از مقدار بیشتر به کمتر) دارند. همچنین در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی BG بر روی فرایند معنادارتر است (شکل ۳-۵ الف). حال با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۳-۲) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۳-۱) ارائه می‌شود. همانطور که در جدول ۳-۲ مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل اصطکاک بین میله و سطوح قالب ایکپ (F) با ۴۸/۸۶ درصد بیشترین تاثیر را بر میزان گشتاور مورد نیاز فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ دارد. لازم به ذکر است که میزان ضریب تعیین یا ضریب همبستگی (R-Sq) مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (۳-۱) برابر ۹۳/۵۴ درصد است. ضریب تعیین کیفیت برازش

<sup>۱</sup> Normal plot

داده‌ها را با مدل مشخص می‌کند، که هر چه مقدار آن به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، قدرت مدل برازش یافته بیشتر می‌باشد. حذف پارامترها براساس نمودار اثرات نرمال باعث کاهش در مقدار ضریب همبستگی مدل شده است.

$$T \text{ (kN.m)} = 11.39 + 0.0379A - 0.03609B + 0.0593C - 0.0914D + 2.2F - 15.20G \\ - 0.000996A \times C + 0.4578A \times F + 0.0575A \times G + 0.03411B \times G \\ + 0.000884C \times D - 0.669C \times F - 0.2127D \times F + 60.1F \times G \quad (1-3)$$

بر طبق نمودار اثرات نرمال عوامل برای میزان استحکام تسلیم میله آلومینیومی (شکل ۳-۵ ب) مشخص شد که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، زاویه گوشه بیرونی قالب (D) و نسبت ابعادی کانال قالب (G) عوامل تاثیر گذار می‌باشند و در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی مرتبه دوم GG یا  $G^2$  بر روی فرایند اثر معنادارتری دارد. با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۳-۲) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۳-۲) ارائه می‌شود. مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عامل زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) با ۵۱/۱۴ درصد بیشترین تاثیر را بر میزان استحکام تسلیم ایجاد شده در میله آلومینیوم ۷۰۷۵ دارد.

$$\bar{\sigma} = 866.8 - 1.527C - 0.1915D + 207.5E - 33F - 712G + 310.1G^2 + 4.07C \times F \\ - 516E \times F - 119.1E \times G \quad (2-3)$$

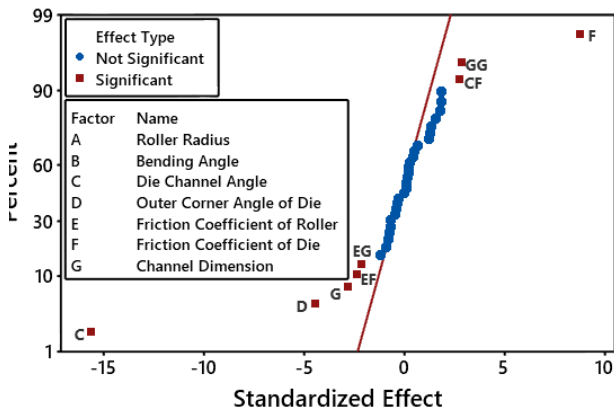
نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی میزان یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله آلومینیوم ۷۰۷۵ نشان دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) تاثیرگذار بوده و در بین اثرات تقابلی، اثر تقابلی CF بر روی فرایند اثر معنادارتری است (شکل ۳-۵ ج). با در نظر گرفتن این عوامل تحلیل واریانس اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول ۳-۲) و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۳-۳) ارائه می‌شود.

$$STD_{\epsilon} = -1.152 + 0.01189C - 0.01756D + 0.401E + 12.36F + 1.435G + 0.000190C \times D \\ - 0.0983C \times F - 0.01593C \times G - 0.0420D \times F - 6.08E \times F + 3.16F \times G \quad (3-3)$$

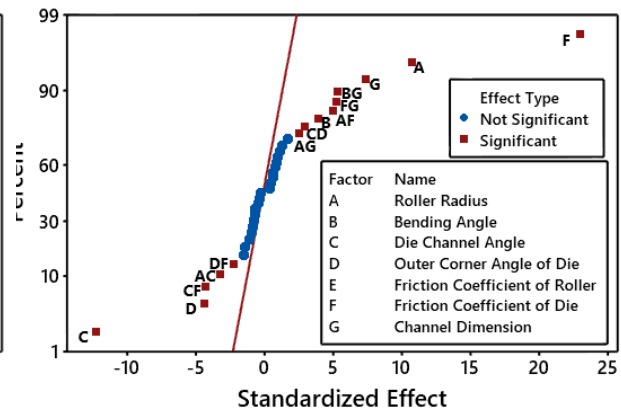
برطبق نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ (شکل ۳-۵ د) عوامل اصلی زاویه برخورد کانال‌های قالب (C)، ضریب اصطکاک بین میله و قالب ایکپ (F)، نسبت ابعادی کانال قالب (G) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) عوامل تاثیر گذار بر انحنای میله می‌باشند و در بین اثرات تقابلی نیز، اثر تقابلی CF بر روی آن اثر معنادارتری است. با در نظر گرفتن این شرایط تحلیل واریانس اجرا و مدل رگرسیونی حاکم بر مسئله (رابطه ۳-۴) ارائه می‌شود. همانطور که در جدول ۳-۲ مشاهده می‌شود از بین

پارامترهای متغیر، عامل زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) با ۲۹/۲۰ درصد بیشترین تاثیر را بر میزان یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله آلومینیومی دارد.

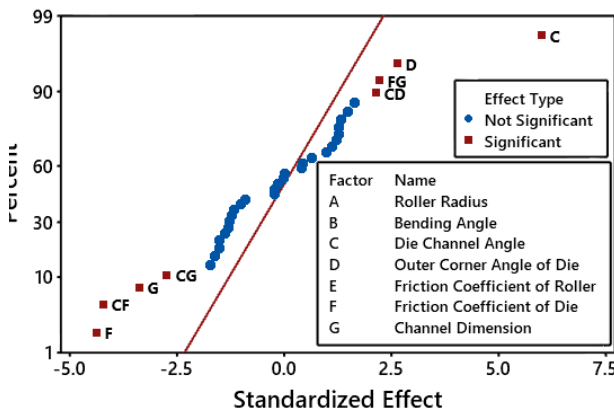
$$\rho = -0.0995 + 0.001359C - 0.000377D + 0.182F + 0.0433G + 0.000004C \times D - 0.00428C \times F - 0.000692C \times G + 0.1685F \times G \quad (۴-۳)$$



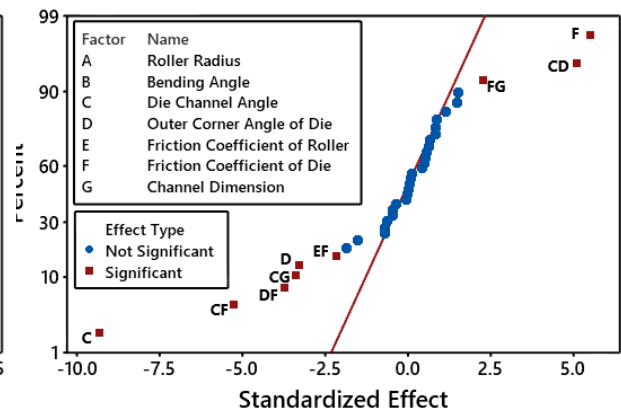
ب



الف



د



ج

شکل ۳-۵ نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی (الف) گشتاور مورد نیاز، (ب) استحکام تسلیم میله، (ج) یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله، (د) انحنای میله خروجی

جدول ۲-۳ جدول تحلیل واریانس برای پاسخ‌های مورد نظر در بررسی فرایند ایکپ مداوم

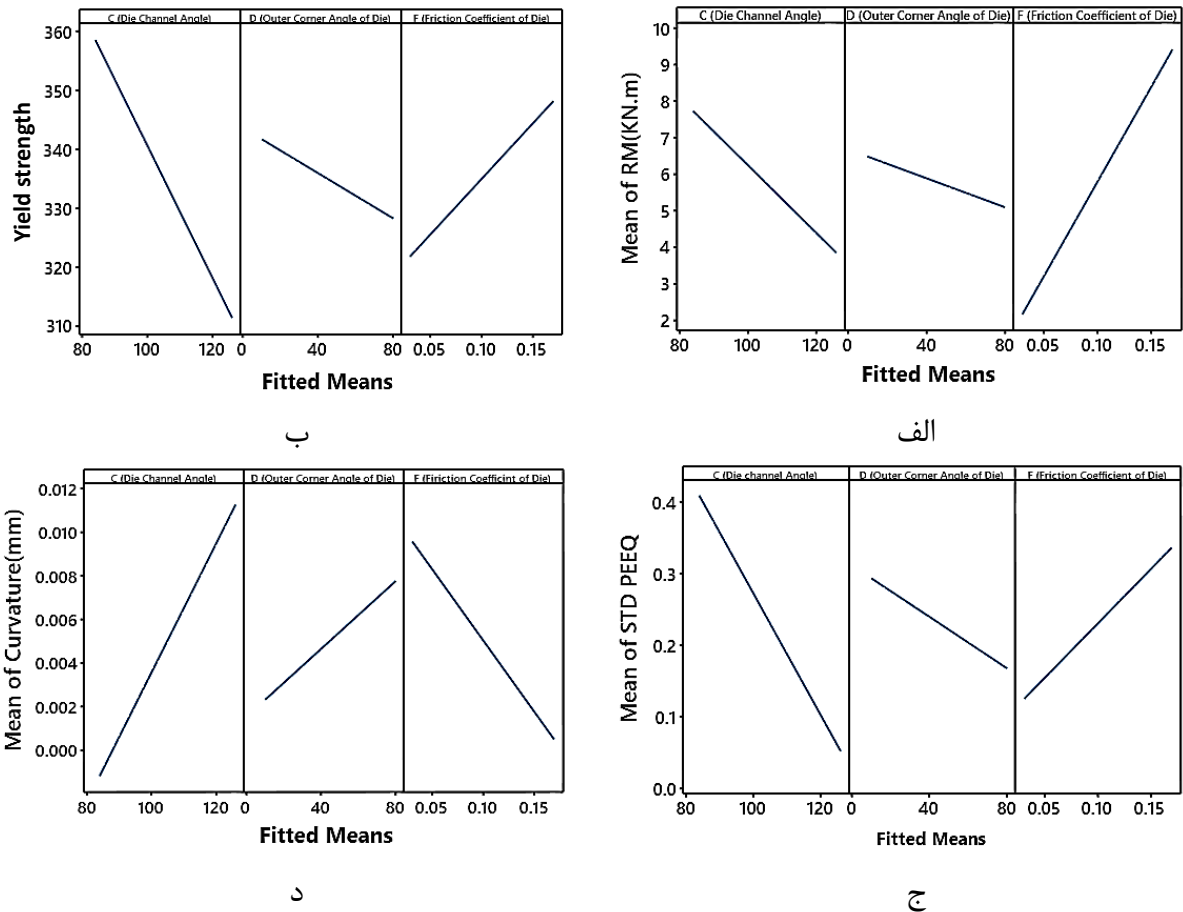
انحنای میله پس از خروج از قالب ( $\rho$ )		یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله ( $STD_\varepsilon$ )		استحکام تسلیم میله ( $\bar{\sigma}$ )		گشتاور فرایند ایکپ مداوم (T)		پاسخ
مقدار P	درصد مشارکت	مقدار P	درصد مشارکت	مقدار P	درصد مشارکت	مقدار P	درصد مشارکت	عامل
۷۴/۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۷۴/۰۹	۰/۰۰	۸۴/۵۲	۰/۰۰	۹۳/۵۴	مدل
----	----	----	----	----	----	۰/۰۰	۱۰/۵۹	A
----	----	----	----	----	----	۰/۰۰	۱/۳۹	B
۱۸/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۹/۲۰	۰/۰۰	۵۱/۱۴	۰/۰۰	۱۳/۹۸	C
۳/۴۵	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲	۳/۶۳	۰/۰۰	۴/۱۵	۰/۰۰	۱/۸۰	D
----	----	۰/۱۳۷	۰/۷۷	----	----	----	----	E
۹/۵۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰/۲۰	۰/۰۰	۱۶/۰۷	۰/۰۰	۴۸/۸۶	F
۵/۷	۰/۰۰۱	----	----	۰/۰۰۵	۱/۶۴	۰/۰۰	۵	G
----	----	----	----	----	----	----	----	C <sup>2</sup>
----	----	----	----	----	----	----	----	F <sup>2</sup>
----	----	----	----	۰/۰۰	۷/۵	----	----	G <sup>2</sup>
----	----	----	----	----	----	۰/۰۰۱	۰/۹۷	AC
----	----	----	----	----	----	----	----	AE
----	----	----	----	----	----	۰/۰۰	۲/۲۷	AF
----	----	----	----	----	----	۰/۰۱۳	۰/۵۷	AG
----	----	----	----	----	----	۰/۰۰	۲/۶۱	BG
۲/۲۹	۰/۰۳۷	۰/۰۰	۸/۶۷	----	----	۰/۰۰۴	۰/۷۶	CD
۸/۹۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۹/۲۸	۰/۰۰۶	۱/۶	۰/۰۰	۱/۷۴	CF
۳/۷۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۳/۹	----	----	----	----	CG
----	----	۰/۰۰	۴/۷۱	----	----	۰/۰۲۱	۰/۴۹	DF
----	----	۰/۰۳۵	۱/۵۸	۰/۰۱۹	۱/۱۵	----	----	EF
----	----	----	----	۰/۰۲۹	۰/۹۸	----	----	EG
۲/۴۶	۰/۰۳۱	۰/۰۲۸	۱/۷۱	----	----	۰/۰۰	۲/۵	FG
----	۲۵/۹	----	۲۵/۹۱	----	۱۵/۴۸	----	۶/۴۶	خطا
----	۱۰۰	----	۱۰۰	----	۱۰۰	----	۱۰۰	کل

### ۳-۴-۳ اثرات اصلی پارامترها

با توجه به جدول تحلیل واریانس پاسخها (جدول ۳-۲) مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک بین میله و قالب (F)، زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) و زاویه گوشه بیرونی قالب (D) بر روی تمامی پاسخها اثر معناداری دارند. به همین منظور در ادامه نحوه تاثیر این عوامل بر روی تمامی پاسخها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همانطور که در جدول تحلیل واریانس مربوط به میزان گشتاور فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ مشخص است، ضریب اصطکاک سطوح قالب و زوایای آن بر میزان گشتاور فرایند تاثیر معناداری دارند. این موضوع در شکل ۳-۶ الف نیز به وضوح قابل مشاهده است؛ به گونه‌ای که با افزایش زوایای قالب میزان گشتاور کاهش می‌یابد؛ که مقدار این کاهش با تغییر زاویه برخورد کانال‌های قالب (C) شدیدتر است. از طرفی با افزایش مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح میله و قالب ایکپ (F) مقدار گشتاور فرایند ایکپ مداوم به میزان ۳۵۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

می‌توان به این نکته نیز اشاره کرد که مقدار محدوده تغییرات کرنش ایجاد شده در میله برای تغییرات اصطکاک و زاویه گوشه بیرونی قالب حدوداً یکسان اما عکس یکدیگر است. مشاهده می‌شود که نحوه تاثیر شرایط اصطکاکی درون قالب ایکپ و زوایای آن بر روی میزان استحکام تسلیم میله و یکنواختی توزیع کرنش در آن، از لحاظ شکل ظاهری رفتاری مشابه با یکدیگر دارند. بدین معنی که افزایش زوایای قالب موجب کاهش استحکام تسلیم میله و بهبود یکنواختی توزیع کرنش در میله می‌گردد. از طرفی افزایش ضریب اصطکاک میزان استحکام تسلیم میله را افزایش می‌دهد (شکل ۳-۶ ب) و باعث افزایش پارامتر یکنواختی توزیع کرنش (شکل ۳-۶ ج) و در نتیجه پراکندگی کرنش در سطح مقطع میله افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۶ چگونگی تاثیر ضریب اصطکاک بین میله و قالب، زاویه برخورد کانال‌های قالب و زاویه گوشه بیرونی قالب بر؛  
الف) گشتاور فرایند، ب) استحکام تسلیم میله، ج) یکنواختی کرنش، د) انحنای میله آلومینیومی

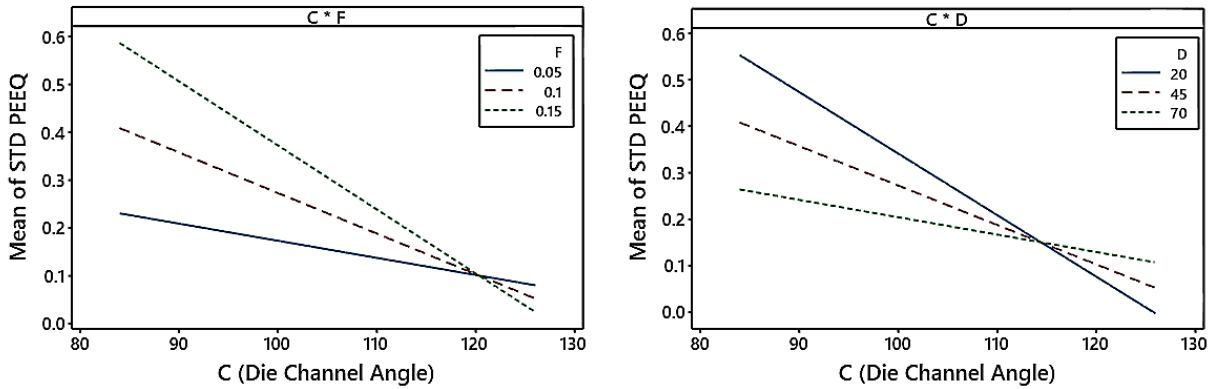
در شکل ۳-۶ د مشاهده می‌گردد که افزایش زوایای قالب باعث افزایش انحنای میله آلومینیومی خروجی از قالب شده که امری نامطلوب خواهد بود. از طرفی افزایش ضریب اصطکاک در درون قالب باعث بهبود کیفیت میله خروجی با کاهش انحنا خواهد شد.

### ۳-۴-۴ اثرات تقابلی پارامترها

اگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود داشته باشد، نتیجه‌گیری بدون در نظر گرفتن این اثرات فاقد اعتبار علمی خواهد بود. با توجه به جدول ۳-۲ و با بررسی مقادیر P و درصد مشارکت (با فرض بالاتر از ۴ درصد) می‌توان دریافت که میزان یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله آلومینیومی از اثرات تقابلی بین ضریب اصطکاک درون قالب و زوایای قالب ایکپ (CF و DF)، و همچنین اثر تقابلی بین دو زاویه قالب (CD) تاثیر

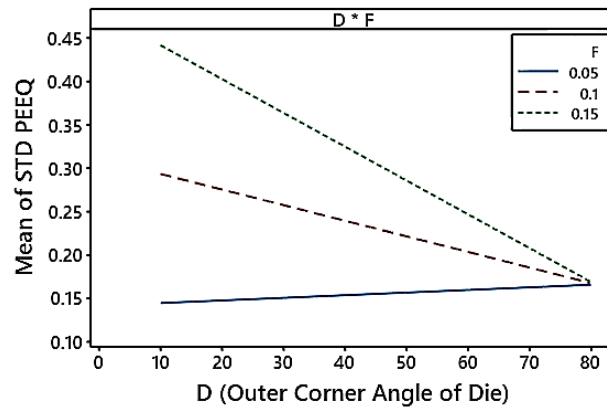


می‌پذیرد. علاوه بر این اثر تقابلی بین دو زاویه قالب (CD) بر روی میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده در میله آلومینیومی نیز اثرگذار است. در شکل ۷-۳ این اثرات تقابلی برای میزان یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله نمایش داده شده است.



ب

الف

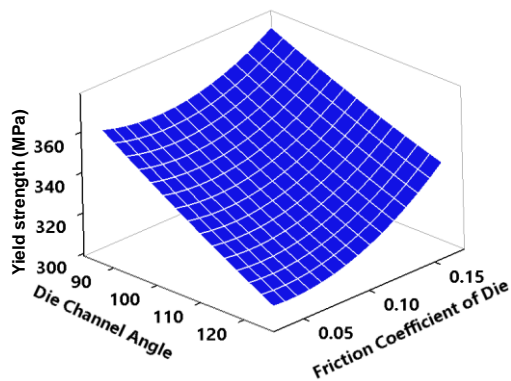


ج

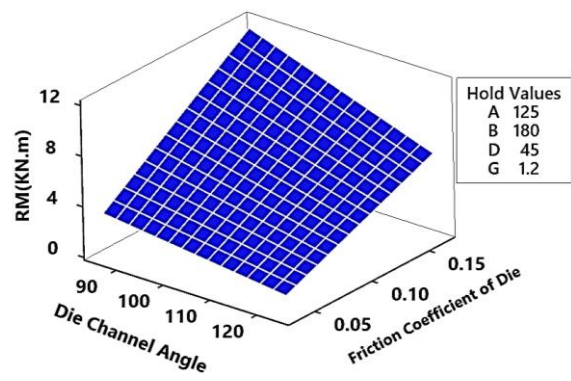
شکل ۷-۳ اثرات تقابلی پارامترها بر یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله آلومینیومی؛ الف) اثر تقابلی بین زوایای قالب (CD)، ب) اثر تقابلی بین اصطکاک قالب و زاویه برخورد کانال قالب (CF)، ج) اثر تقابلی بین اصطکاک قالب و زاویه گوشه آن (DF)

همانطور که پیشتر ذکر شد با توجه به جدول ۲-۳ مشاهده شد که اثر تقابلی CF بر روی تمامی پارامترهای خروجی تاثیر دارد. برای بررسی بهتر و دقیق‌تر، سطح پاسخ سه بعدی مربوط به اثر زاویه برخورد کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب (CF) بر روی پارامترهای خروجی در شکل ۸-۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۸-۳ الف، حداکثر میزان گشتاور مورد نیاز فرایند ایکپ مداوم تحت شرایطی ایجاد خواهد شد که زاویه کانال قالب در کمترین مقدار خود و ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد. لازم به ذکر

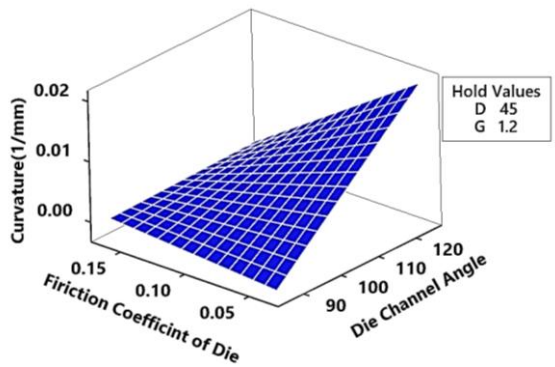
است که در حالتی که زاویه کانال قالب در کمترین مقدار خود ( $90^\circ$ ) ثابت در نظر گرفته شده باشد با افزایش ضریب اصطکاک قالب، شیب تغییرات گشتاور شدید خواهد بود اما در مقدار بزرگتر زاویه قالب این شیب کندتر است. با ثابت در نظر گرفتن زاویه کانال قالب در کمترین حالت با افزایش ضریب اصطکاک قالب شیب کرنش ایجاد شده در میله تند بوده که با افزایش زاویه کانال قالب به سمت بیشترین مقدار این شیب کرنش کندتر خواهد بود. از طرفی نیز بیشترین مقدار استحکام تسلیم ایجاد شده در میله زمانی خواهد بود که مقدار زاویه کانال قالب در کمترین و ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد (شکل ۳-۸ ب). با توجه به شکل ۳-۸ ج بیشترین مقدار پارامتر یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله زمانی رخ می‌دهد که مقدار زاویه کانال قالب در کمترین حالت و مقدار ضریب اصطکاک قالب در بیشترین حالت خود باشد؛ این بدان معنی است که در این حالت توزیع کرنش در سطح مقطع میله یکنواختی خوبی ندارد. با توجه به شکل ۳-۸ د مشاهده می‌شود که کمترین میزان انحنا در میله خروجی در کمترین مقدار ضریب اصطکاک قالب و زاویه آن رخ خواهد داد که با ثابت در نظر گرفتن ضریب اصطکاک قالب در کمترین حالت با افزایش زاویه کانال قالب شیب تغییرات افزایشی انحنا در میله خروجی تند خواهد بود.



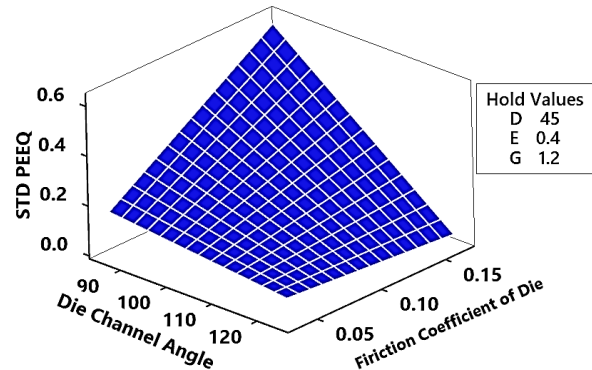
ب



الف



د



ج

شکل ۳-۸ چگونگی تاثیر اثر تقابلی بین ضریب اصطکاک قالب و زاویه برخورد کانال قالب (CF) بر پاسخ‌ها؛ الف) گشتاور فرایند ایکپ مداوم، ب) استحکام تسلیم میله، ج) یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله، د) انحنا در میله خروجی از قالب ایکپ

### ۳-۴-۵ حالت بهینه به روش سطح پاسخ

اغلب مهندسان تمایل دارند به شرایط بهینه پارامترهای ورودی هر فرایند که می‌تواند منجر به مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای خروجی، به جهت رسیدن به کیفیت مطلوب باشد، دست پیدا کنند. همانطور که ذکر شد برخی از پاسخ‌ها اثر عکس روی یکدیگر دارند و افزایش در یکی منجر به کاهش دیگری می‌شود، به عبارت دیگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود دارد. در نتیجه باید حالتی را انتخاب نمود که هر یک از پاسخ‌ها به سطحی قابل قبول از مطلوبیت<sup>۱</sup> دست یابند. برای این کار از قسمت بهینه‌ساز پاسخ<sup>۲</sup> نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است.

به منظور افزایش بهره‌وری در فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش از میله آلومینیوم ۷۰۷۵، نیاز است که متغیرهای پاسخ تحت کنترل قرار گیرند. لذا هدف مطلوب در این پژوهش کاهش گشتاور موردنیاز فرایند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله خروجی (یا کاهش انحراف معیار میزان کرنش)، افزایش میزان استحکام تسلیم میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ به عنوان یک پارامتر کیفی محصول

<sup>۱</sup> Desirability

<sup>۲</sup> Response Optimizer

می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، نرم‌افزار مینی‌تب با دقت ۹۸ درصدی تابع مطلوبیت خود، مقادیر موجود در جدول ۵ را برای پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم پیش‌بینی کرده است. تحت این شرایط مقادیر گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنا میله خروجی توسط نرم‌افزار مینی‌تب به ترتیب برابر  $۲/۰۵۳ \text{ kN.m}$ ،  $۳۶۹/۹۵ \text{ MPa}$ ،  $۰/۰۸۱۴$  و  $۰/۰۰۰۶ \text{ mm}$  پیش‌بینی شده است.

جدول ۳-۳ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵

نسبت ابعادی	ضریب	ضریب اصطکاک	زاویه گوشه	زاویه خم میله	شعاع
سطح مقطع	اصطکاک بین	بین میله و چرخ-	بیرونی قالب	بر روی چرخ-	چرخ‌دوار
کانال قالب	میله و قالب	دوار غلتک ( $\mu_f$ )	( $\psi$ )	دوار	(R)
(a/b)	( $\mu_d$ )			( $\alpha$ )	
۰/۹۴	۰/۰۳۷	۰/۵۳	$۷۳/۵^\circ$	$۹۰^\circ$	$۹۲/۵$

با شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم تحت پارامترهای ورودی پیش‌بینی شده موجود در جدول ۳-۳ مقادیر پاسخ برای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنا میله خروجی از قالب به ترتیب برابر  $۲/۰۸۲ \text{ kN.m}$ ،  $۳۷۰ \text{ MPa}$ ،  $۰/۰۷۳۹$  و  $۰/۰۰۱۵ \text{ mm}$  بدست آمده است. مقایسه بین این مقادیر با مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب مشخص می‌کند که متوسط خطایی حدود ۱۷ درصد بین نتایج وجود دارد (بر طبق رابطه ۳-۵). در این رابطه  $R_{\text{Minitab}}$  و  $R_{\text{FEM}}$  به ترتیب بیانگر مقدار پاسخ حاصل از مینی‌تب و شبیه‌سازی است.

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{R_{\text{Minitab}} - R_{\text{FEM}}}{R_{\text{FEM}}} \right| \times 100 \quad (۳-۵)$$

### ۳-۵ شبکه عصبی مصنوعی

همانطور که در فصل قبل ذکر شد، در پژوهش حاضر از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شده است که برای انتخاب تعداد لایه‌ها و نرون‌های این شبکه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و وال (WOA) استفاده شده است. در ادامه نتایج حاصل از این بخش ارائه شده است.

### ۳-۵-۱ بهینه‌سازی شبکه عصبی با الگوریتم ازدحام ذرات

در بهینه‌سازی شبکه عصبی با الگوریتم ازدحام ذرات، تعداد ذرات اولیه را برابر ۱۰ در نظر گرفته و شبکه تشکیل شده را به تعداد ۵۰۰ بار تکرار می‌کنیم. در این الگوریتم بهینه‌ساز، شبکه‌هایی با تعداد دو، سه و چهار لایه پنهان مورد بررسی قرار می‌گیرند. معیار انتخاب بهترین شبکه تشکیل شده، میزان میانگین مربعات خطا می‌باشد. مقدار ضریب رگرسیون به ازای هر خروجی در لایه‌های مختلف، در جدول ۳-۴ آورده شده است. برای بررسی نحوه تاثیر تعداد لایه‌های پنهان، ابتدا از یک شبکه عصبی پرسپترون یک لایه با تعداد ۱ تا ۵۰ نرون در لایه پنهان آن استفاده شده است. مقدار کمترین میانگین مربعات خطا در شبکه عصبی تک لایه با تعداد ۱۴ نرون، برابر ۰/۰۰۶۷ می‌باشد. با مقایسه این مقدار با مقدار میانگین مربعات خطای مربوط به هر شبکه با تعداد لایه‌ها و نرون‌های مختلف می‌توان روند بهبود شبکه را ملاحظه کرد. درصد بهبود شبکه‌های تشکیل شده با تعداد لایه‌های پنهان دو، سه و چهار را می‌توان در جدول ۳-۵ مشاهده کرد.

جدول ۳-۴ درصد ضریب رگرسیون به ازای تمامی پارامترها و تک تک پارامترهای خروجی در الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات

تعداد لایه‌های پنهان	درصد ضریب رگرسیون کل مدل	درصد ضریب رگرسیون به ازای گشتاور	درصد ضریب رگرسیون به ازای استحکام تسلیم	درصد ضریب رگرسیون به ازای انحنا	درصد ضریب رگرسیون به ازای توزیع کرنش
۲	۰/۹۸۵۶۲	۰/۹۶۵۹۴	۰/۹۷۳۰۸	۰/۹۶۴۱۹	۰/۹۸۴۰۴
۳	۰/۹۸۰۰۷	۰/۹۷۰۳۷	۰/۹۵۵۸۸	۰/۹۴۰۷۸	۰/۹۸۶۳۲
۴	۰/۹۷۷۱۶	۰/۹۸۰۰۱	۰/۹۳۸۲۸	۰/۹۵۵۸۲	۰/۹۷۳۳۹

با توجه به درصد ضریب رگرسیون کل مدل در جدول ۳-۴ می‌توان که با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، شبکه عصبی پرسپترون با دو لایه پنهان بهترین شبکه خواهد بود. ضریب رگرسیون در شبکه با دو لایه پنهان برابر ۰/۹۸۵۶۲ می‌باشد که در مقایسه با شبکه‌هایی با سه و چهار لایه پنهان عددی بیشتر و نزدیک به ۱ می‌باشد. در ضرایب رگرسیون هرچه درصد رگرسیون به ۱ نزدیک‌تر باشد مدل دارای ارزش بیشتری می‌باشد.

جدول ۳-۵ مشخصات شبکه‌های عصبی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات

تعداد لایه‌های پنهان	تعداد نرون‌های هر لایه	مقدار میانگین مربعات خطا	درصد بهبود نسبت به یک لایه پنهان
۲	[۴۰, ۷]	۰/۰۰۲۷	۶۰
۳	[۳۷, ۲۱, ۱۸]	۰/۰۰۳۵	۴۸
۴	[۴۳, ۳۵, ۲۷, ۹]	۰/۰۰۴۲	۳۷

همانطور که در جدول ۳-۵ مشاهده می‌شود، مقدار میانگین مربعات خطا در شبکه با دو لایه پنهان برابر ۰/۰۰۲۷ است که میزان این خطا از خطای شبکه‌های عصبی با تعداد لایه‌های پنهان سه و چهار کمتر است. درصد بهبود این شبکه نسبت به شبکه با یک لایه پنهان برابر ۶۰ درصد است که در مقایسه با شبکه‌های سه و چهار لایه پنهان که به ترتیب ۴۸ و ۳۷ درصد بهبود داشته‌اند، از درصد بهبود بالاتری برخوردار است. در تشکیل این شبکه از ۴۰ نرون در لایه پنهان اول و ۷ نرون در لایه پنهان دوم استفاده شده است.

### ۳-۵-۲ بهینه‌سازی شبکه عصبی با الگوریتم WOA

به منظور بهینه‌سازی شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم وال، از تعداد ذرات اولیه‌ای برابر ۱۰ و تکرار ۵۰۰ استفاده شده است. در الگوریتم وال مطابق الگوریتم ازدحام ذرات، شبکه‌های با دو، سه و چهار لایه پنهان مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مقایسه و درصد بهبود هر شبکه با تعداد لایه‌های پنهان مختلف از شبکه عصبی با یک لایه پنهان استفاده می‌شود. همانطور که ذکر شد، بهترین شبکه تشکیل شده با یک لایه پنهان دارای خطایی برابر ۰/۰۰۶۷ و تعداد نرون ۱۴ می‌باشد. درصد ضرایب رگرسیون برای شبکه‌هایی با دو، سه و چهار لایه پنهان را می‌توان در جدول ۳-۶ مشاهده کرد. همچنین درصد میانگین مربعات خطا، درصد بهبود هر شبکه تشکیل شده نسبت به شبکه با یک لایه پنهان و تعداد نرون در هر لایه پنهان را نیز می‌توان در جدول ۳-۷ مشاهده کرد.

جدول ۳-۶ درصد ضریب رگرسیون به ازای تمامی پارامترها و تک تک پارامترهای خروجی در الگوریتم بهینه‌ساز وال

تعداد لایه‌های پنهان	درصد ضریب رگرسیون کل مدل	درصد ضریب رگرسیون به ازای گشتاور	درصد ضریب رگرسیون به ازای استحکام تسلیم	درصد ضریب رگرسیون به ازای انحنای توزیع کرنش	درصد ضریب رگرسیون به ازای توزیع کرنش
۲	۰/۹۸۰۹۲	۰/۹۵۷۳۵	۰/۹۶۲۸۱	۰/۹۸۶۹۵	۰/۹۶۲۷۲
۳	۰/۹۷۹۲۴	۰/۹۶۴۹۳	۰/۹۴۹۴۱	۰/۹۶۶۰۵	۰/۹۸۰۹۹
۴	۰/۹۷۶۰۲	۰/۹۴۸۸۳	۰/۹۴۵۲۸	۰/۹۷۹۱۶	۰/۹۷۱۴۹

در جدول ۳-۶ می‌توان درصد ضریب رگرسیون برای شبکه‌های عصبی با تعداد لایه‌های مختلف بهینه شده با الگوریتم وال را مشاهده کرد. با نزدیک شدن درصد ضریب رگرسیون به ۱، مدل تشکیل شده از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. درصد ضریب رگرسیون در شبکه با دو لایه پنهان برابر ۰/۹۸۰۹۲ می‌باشد که نسبت به شبکه‌هایی با سه و چهار لایه پنهان که ضرایبی به ترتیب ۰/۹۷۹۲۴ و ۰/۹۷۶۰۲ دارند، از اهمیت و

ارزش بیشتری برخوردار می‌باشد. ضرایب رگرسیون به ازای گشتاور، استحکام تسلیم میله، میزان انحنای میله پس از خروج از قالب و توزیع کرنش را می‌توان در جدول ۳-۶ مشاهده کرد.

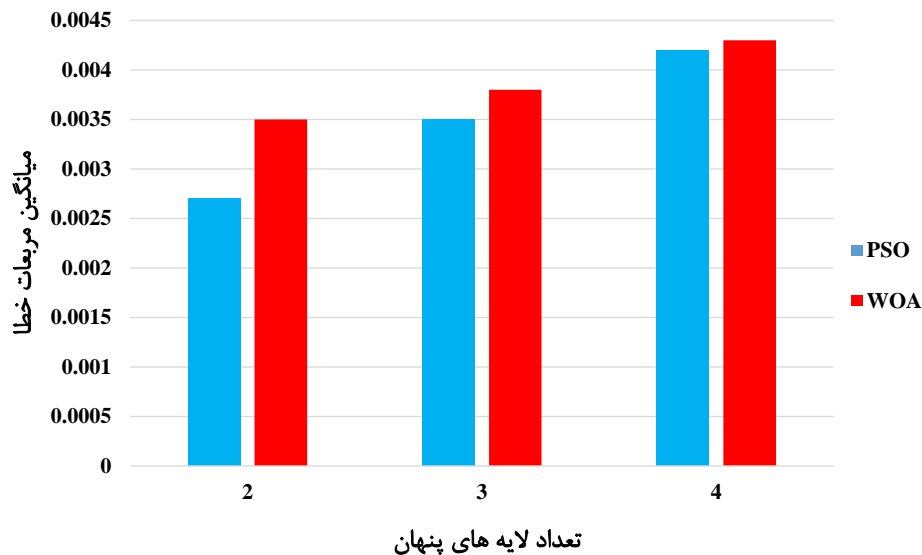
جدول ۳-۷ مشخصات شبکه‌های عصبی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم وال

تعداد لایه‌های پنهان	تعداد نرون‌های هر لایه	مقدار میانگین مربعات خطا	درصد بهبود نسبت به یک لایه پنهان
۲	[۱۲, ۶]	۰/۰۰۳۵	۴۸
۳	[۱۰, ۹, ۱۰]	۰/۰۰۳۸	۴۳
۴	[۲۱, ۲۲, ۸, ۲۲]	۰/۰۰۴۳	۳۶

با توجه به درصد میانگین مربعات خطا که در جدول ۳-۷ مشاهده می‌شود بهترین شبکه عصبی تشکیل شده با الگوریتم بهینه‌ساز وال که دارای کمترین خطای میانگین مربعات نیز می‌باشد، شبکه با دو لایه پنهان و خطای ۰/۰۰۳۵ است. این شبکه دارای ۴۸ درصد بهبود نسبت به شبکه با یک لایه پنهان می‌باشد که نسبت به شبکه با سه و چهار لایه که درصد بهبودی به ترتیب ۴۳ و ۳۶ دارند، از ارزش و اهمیت بیشتری برخوردار است. تعداد نرون‌ها در شبکه با دو لایه پنهان که به عنوان بهترین شبکه ایجاد شده با الگوریتم وال معرفی شده در لایه پنهان اول ۱۲ و در لایه پنهان دوم ۶ نرون است. تعداد نرون‌ها در لایه‌های مختلف شبکه‌های با سه و چهار لایه پنهان را نیز می‌توان در جدول ۳-۷ مشاهده کرد.

### ۳-۵-۳ مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌ساز در ایجاد شبکه عصبی

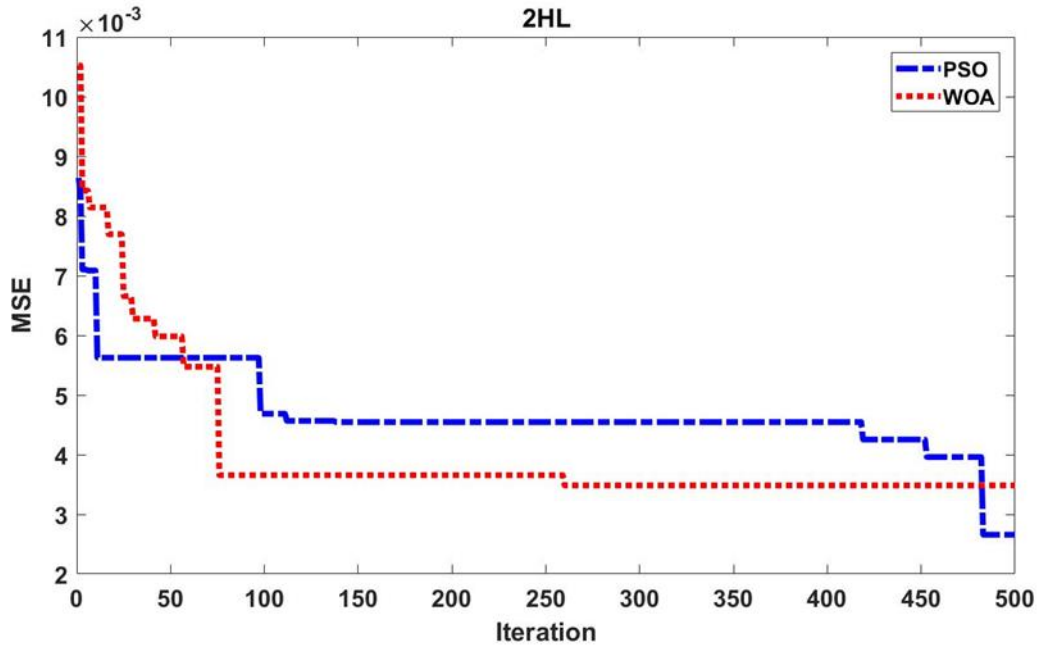
به منظور انتخاب بهترین شبکه عصبی تشکیل شده با الگوریتم‌های بهینه‌ساز، شبکه‌ها با دو، سه و چهار لایه پنهان را با هم مقایسه می‌کنیم. معیار انتخاب بهترین شبکه مقدار میانگین مربعات خطا می‌باشد. میانگین مربعات خطا در الگوریتم ازدحام ذرات برای شبکه با دو، سه و چهار لایه پنهان به ترتیب ۰/۰۰۲۷، ۰/۰۰۳۵ و ۰/۰۰۴۲ می‌باشد. با افزایش تعداد لایه‌های پنهان در الگوریتم ازدحام ذرات میزان میانگین مربعات خطا نیز افزایش می‌یابد. از الگوریتم بهینه‌ساز وال نیز برای بهینه‌سازی شبکه عصبی و تعیین بهترین شبکه استفاده شده است. مقدار میانگین مربعات خطا گزارش شده در الگوریتم وال برای شبکه با دو، سه و چهار لایه پنهان به ترتیب ۰/۰۰۳۵، ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۰۴۳ می‌باشد. در الگوریتم وال نیز مشابه الگوریتم ازدحام ذرات می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد لایه‌های پنهان مقدار میانگین مربعات خطا نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳-۹).



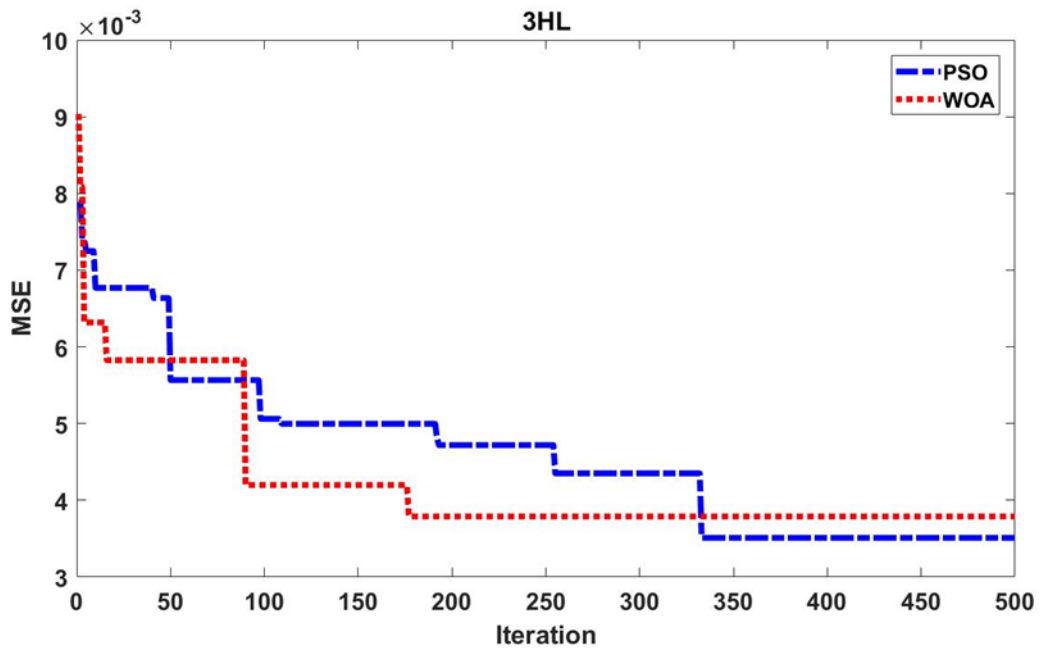
شکل ۳-۹ مقایسه درصد میانگین مربعات خطا در شبکه با تعداد لایه‌های مختلف بهینه شده با دو الگوریتم PSO و WOA

در شکل ۳-۹ مقدار میانگین مربعات خطا در شبکه‌های ایجاد شده با لایه‌های پنهان مختلف را می‌توان مشاهده کرد. نتایج الگوریتم ازدحام ذرات در شبکه با دو، سه و چهار لایه پنهان همواره از الگوریتم وال بهتر بوده است. در شکل ۳-۱۰ تغییرات تابع هدف را در تکرارهای مختلف در شبکه‌ها با دو، سه و چهار لایه پنهان می‌توان مشاهده کرد. در شکل ۳-۱۰ الف مقایسه تغییرات تابع هدف شبکه با دولایه پنهان در الگوریتم‌های PSO و WOA را می‌توان مشاهده کرد. تغییرات تابع هدف در الگوریتم WOA از تکرار تقریباً ۲۵۰ به بعد ثابت شده و مقدار میانگین مربعات خطا هیچ تغییری نداشته است. اما در الگوریتم PSO آخرین تغییرات تابع هدف در تکرار تقریباً ۴۸۰ می‌باشد که مقدار میانگین مربعات خطا در کمترین مقدار خود قرار می‌گیرد. مقدار خطا در الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم WOA کمتر بوده و نتایج از اهمیت و ارزش بیشتری برخوردار هستند. مقایسه تغییرات تابع هدف در شبکه با سه لایه پنهان در شکل ۳-۱۰ ب قابل مشاهده است. تغییرات تابع هدف در الگوریتم WOA از تکرار تقریباً ۱۷۰ به بعد ثابت شده است. این تغییرات در الگوریتم PSO از تکرار تقریباً ۳۴۰ به بعد ثابت می‌شود. نمودار تغییرات تابع هدف نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم WOA است. مقایسه عملکرد دو الگوریتم بهینه‌ساز در شبکه با چهار لایه پنهان را می‌توان در شکل ۳-۱۰ ج مشاهده کرد. الگوریتم WOA از تکرار تقریباً ۲۱۰ به بعد روندی ثابت داشته است و الگوریتم PSO نیز از تکرار ۳۷۰ به بعد روند ثابت شده است. نمودار نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم WOA در شبکه با چهار لایه پنهان است.

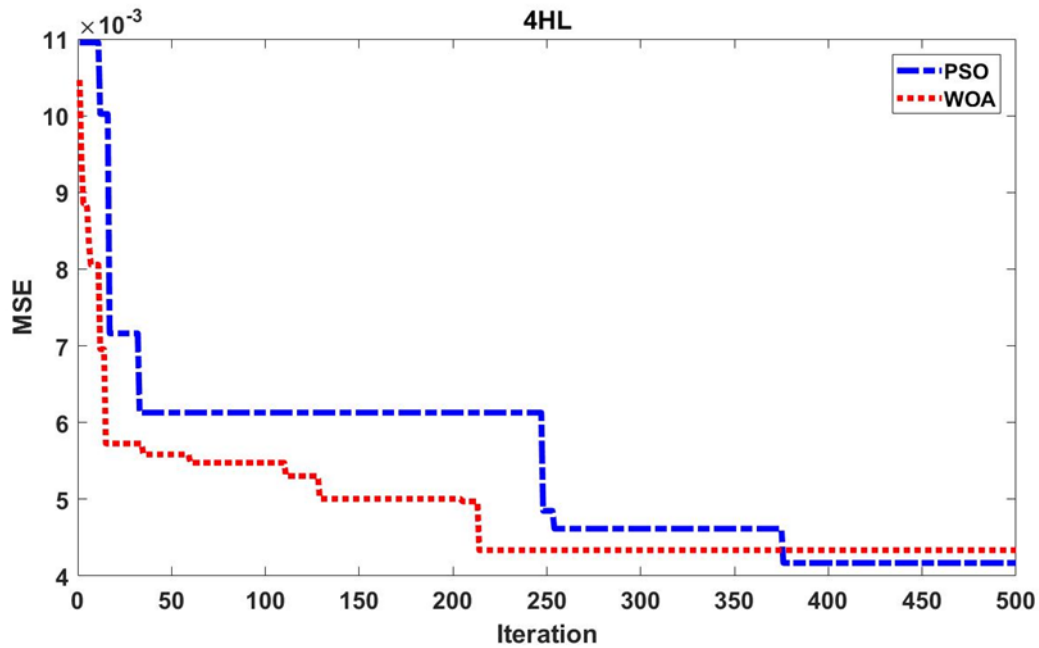




الف



ب



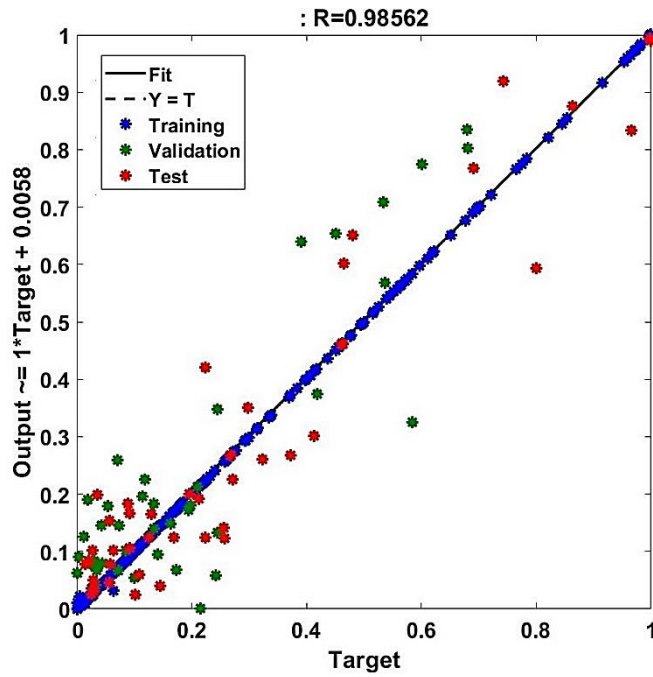
ج

شکل ۳-۱۰ مقایسه کاهش میانگین مربعات خطا در تعداد تکرارهای مختلف برای الف) شبکه‌ای با دو لایه پنهان، ب) شبکه‌ای با سه لایه پنهان، ج) شبکه با چهار لایه پنهان

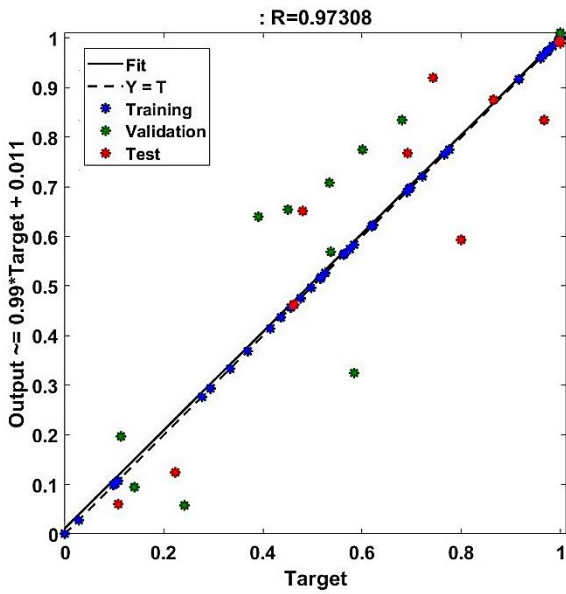
### ۳-۵-۴ معرفی بهینه‌ترین شبکه

به منظور ادامه روند بهینه‌سازی از میان شبکه تشکیل شده در الگوریتم‌های بهینه‌ساز PSO و WOA، شبکه با دو لایه پنهان در الگوریتم PSO به دلیل کمترین میانگین مربعات خطا در بین شبکه‌های تشکیل شده با لایه‌های پنهان مختلف انتخاب شده است. مقدار میانگین مربعات خطا در این شبکه برابر ۰/۰۰۲۷ می‌باشد. یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چند متغیره، تکنیک رگرسیون خطی می‌باشد. براساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته وجود دارد. شکل ۳-۱۱ نمودارهای رگرسیون شبکه انتخاب شده را نشان می‌دهد. داده‌های شبکه شامل سه بخش آموزش، اعتبار سنجی و آزمایش می‌باشند که در رنگ بندی مختلف مشخص شده‌اند. از داده‌های موجود خطی به نام Fit عبور داده می‌شود. تمرکز داده‌ها حول خط  $Y=T$  باعث منطبق شدن خط Fit بر خط  $Y=T$  می‌شود. منطبق شدن این دو خط بیانگر این است که نمونه دارای خطا کمتر، و از ارزش بیشتری برخوردار می‌باشد. شکل ۳-۱۱ الف نشان دهنده درصد رگرسیون کل با مقدار ۰/۹۸۵۶۲ می‌باشد که خطایی قابل قبول می‌باشد. همچنین درصد رگرسیون به ازای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحنای میله پس از خروج از قالب و توزیع کرنش در سطح

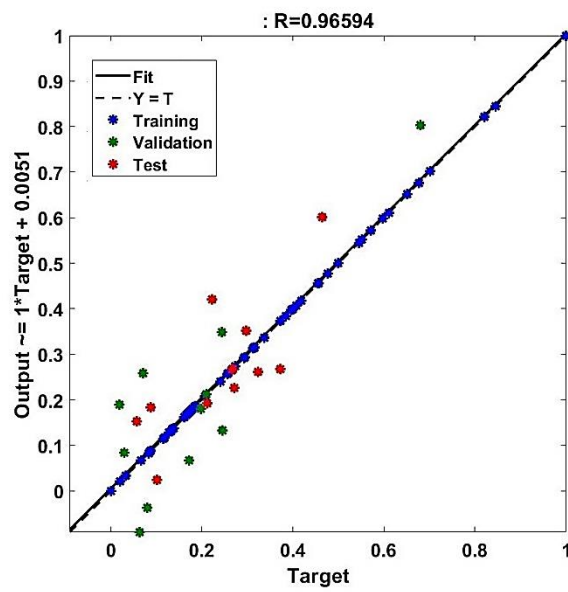
مقطع میله به ترتیب برابر ۰/۹۶۵۹۴، ۰/۹۷۳۰۸، ۰/۹۶۴۱۹، ۰/۹۸۴۰۴ می‌باشند که خطاهای قابل قبول جهت ادامه روند است.



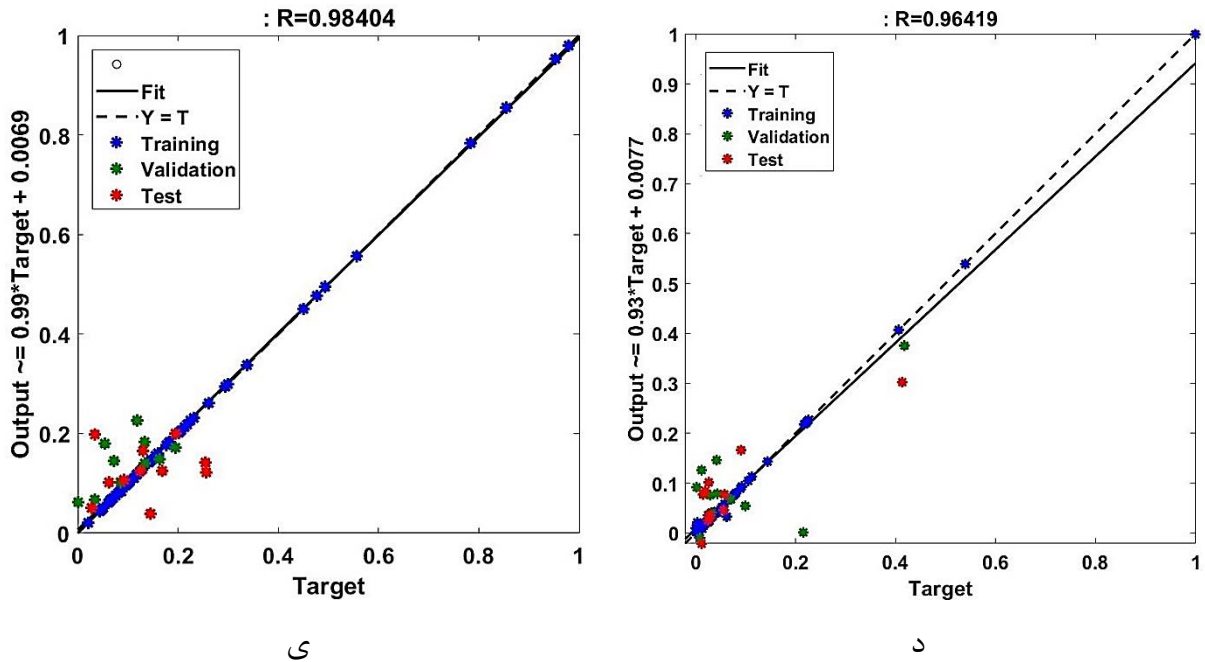
الف



ج

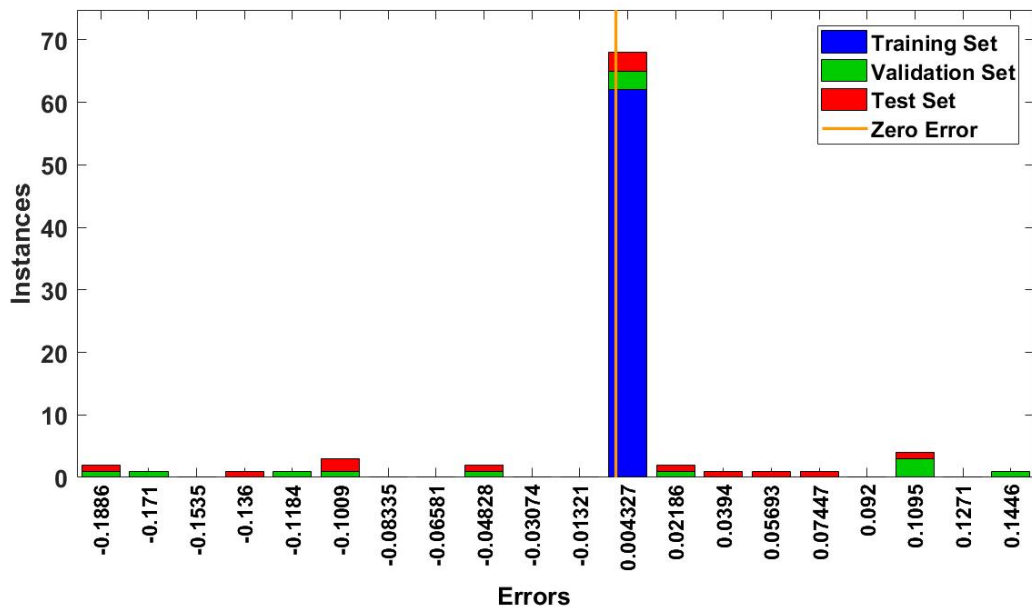
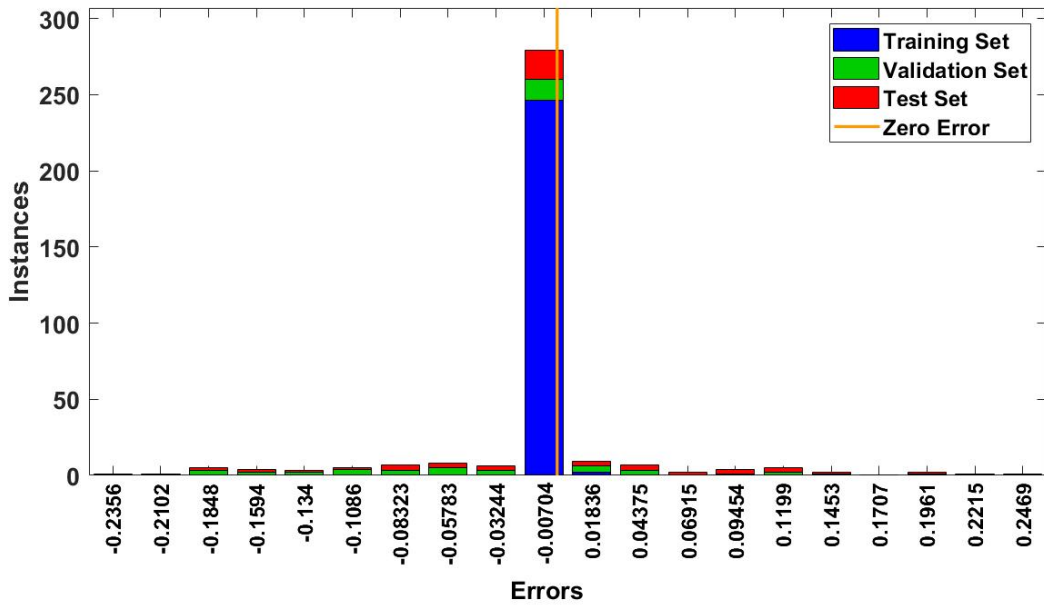


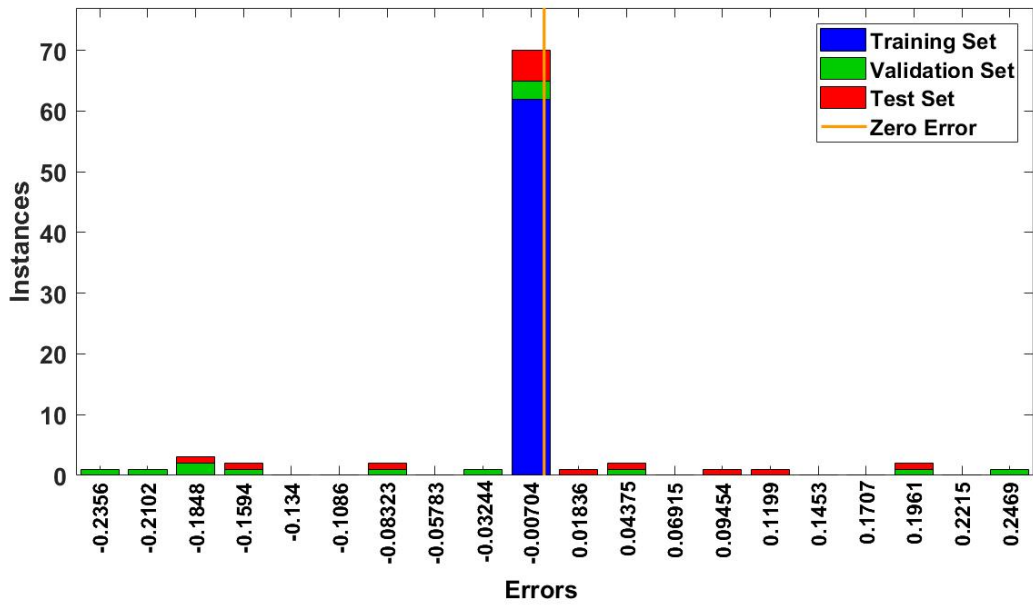
د



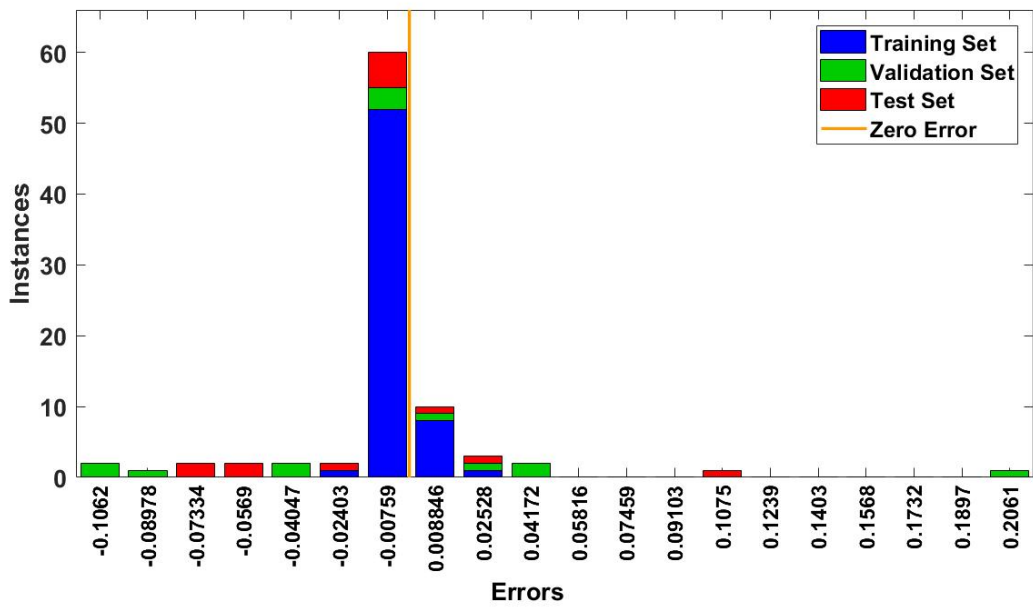
شکل ۳-۱۱ نمودار ضرایب رگرسیونی الف) نمودار ضریب رگرسیون کل، ب) نمودار ضریب رگرسیون به ازای گشتاور، ج) نمودار ضریب رگرسیون به ازای استحکام تسلیم میله، د) نمودار ضریب رگرسیون به ازای انحنای میله پس از خروج از قالب، ی) نمودار ضریب رگرسیون به ازای توزیع کرنش

شکل ۳-۱۲ نمودارهای هیستوگرام شبکه بهینه انتخاب شده را نشان می‌دهد. در این نمودارها داده‌ها در سه دسته آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش با رنگ‌بندی مختلف مشخص شده‌اند. تمرکز داده‌ها حول خطای صفر بیانگر ارزش آزمون انجام شده می‌باشد. در شکل ۳-۱۲ الف که نمودار هیستوگرام کل می‌باشد اکثر داده‌ها حول خطا  $0.00704$  قرار گرفته‌اند که خطایی نزدیک به صفر می‌باشد. مقدار خطا در نمودارهای هیستوگرام به ازای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحنای میله پس از خروج از قالب و توزیع کرنش در سطح مقطع میله به ترتیب برابر  $0.004327$ ،  $0.00704$ ،  $0.00759$ ،  $0.007158$  می‌باشد که خطاهایی قابل قبول است.

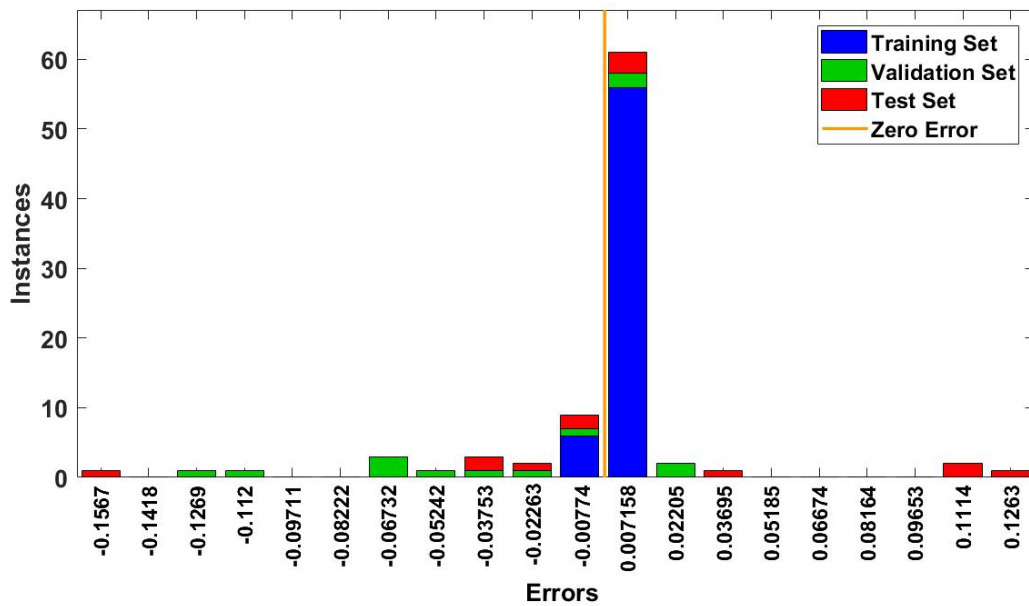




ج



د



ی

شکل ۳-۱۲ نمودار هیستوگرام الف) نمودار هیستوگرام کل، ب) نمودار هیستوگرام به ازای گشتاور، ج) نمودار هیستوگرام به ازای استحکام تسلیم میله، د) نمودار هیستوگرام به ازای انحنا میله پس از خروج از قالب، ی) نمودار هیستوگرام به ازای توزیع کرنش

### ۳-۶ بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

در فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهار گوش میله آلومینیوم ۷۰۷۵ در جهت افزایش بهره‌وری متغیرهای پاسخ باید تحت کنترل قرار گیرند. میزان حداقل و حداکثر مقادیر حاصل از شبیه‌سازی برای متغیرهای پاسخ به عنوان قیدهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. هدف در این پژوهش کاهش گشتاور موردنیاز فرایند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله خروجی (یا کاهش انحراف معیار میزان کرنش)، افزایش میزان استحکام تسلیم میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، الگوریتم ازدحام ذرات با خطایی برابر ۱/۲۲۲۶، مقادیر موجود در جدول ۳-۸ را برای پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم پیش‌بینی کرده است. تحت این شرایط مقادیر گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنا میله خروجی توسط الگوریتم ازدحام ذرات به ترتیب برابر ۲/۸۳ kN.m، ۳۶۹/۹۹MPa و ۰/۱۷۹۵ mm و ۰/۰۰۰۸ mm پیش‌بینی شده است.

جدول ۳-۸ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ با الگوریتم PSO

نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب (a/b)	اصطکاک بین میله و قالب ( $\mu_d$ )	اصطکاک بین میله و چرخ دوار ( $\mu_r$ )	زاویه گوشه بیرونی قالب ( $\psi$ )	زاویه برخورد کانال قالب ( $\varphi$ )	زاویه خم میله بر روی چرخ- دوار ( $\alpha$ )	شعاع چرخ دوار (R)
۱/۲۲	۰/۰۳۵	۰/۴۳	۱۲/۵°	۹۷/۸۵°	۲۷۰/۶۷°	۹۲/۵

با شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم تحت پارامترهای ورودی پیش‌بینی شده موجود در جدول ۳-۸ مقادیر پاسخ برای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی از قالب به ترتیب برابر ۲/۵۵ kN.m، ۳۶۲/۵ MPa، ۰/۱۳۶۶ و ۰/۰۰۰۶۸ mm بدست آمده است. مقایسه بین این مقادیر با مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات مشخص می‌کند که متوسط خطایی حدود ۱۵ درصد بین نتایج وجود دارد (بر طبق رابطه ۳-۶). در این رابطه  $R_{PSO}$  و  $R_{FEM}$  به ترتیب بیانگر مقدار پاسخ حاصل از الگوریتم ازدحام ذرات و شبیه‌سازی است.

$$\%Error = \left| \frac{R_{PSO} - R_{FEM}}{R_{FEM}} \right| \times 100 \quad (۳-۶)$$

### ۳-۷ بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با استفاده از الگوریتم وال

به منظور بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهار گوش میله آلومینیوم ۷۰۷۵ از الگوریتم بهینه‌ساز وال نیز استفاده شده است. در جهت تعیین قیود بهینه‌سازی مقادیر حداقل و حداکثر برای متغیرهای پاسخ حاصل از شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. هدف از بهینه‌سازی در این فرایند کاهش گشتاور موردنیاز فرایند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله خروجی (یا کاهش انحراف معیار میزان کرنش)، افزایش میزان استحکام تسلیم میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ می‌باشد. برای دستیابی به این هدف الگوریتم وال با خطایی برابر ۱/۲۲۹۰، مقادیر موجود در جدول ۳-۹ را برای پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم پیش‌بینی کرده است. تحت شرایط ذکر شده مقادیر گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی توسط الگوریتم وال به ترتیب برابر ۲/۹۲ kN.m، ۳۶۹/۳۸ MPa و ۰/۱۸۲۵ و ۰/۰۰۱ mm پیش‌بینی شده است.



جدول ۳-۹ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ در الگوریتم WOA

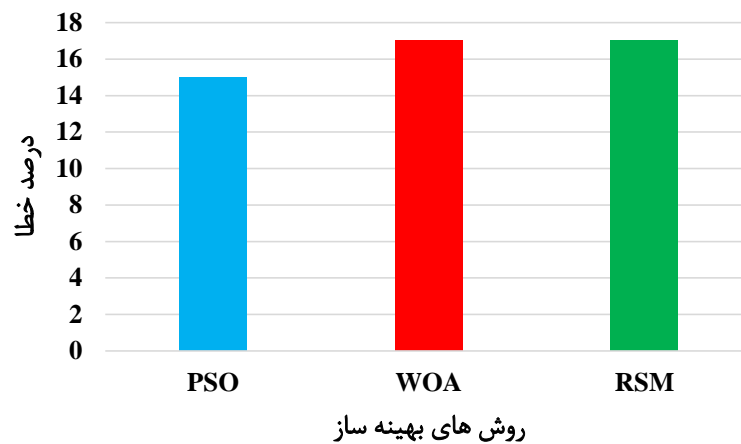
نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب (a/b)	ضریب اصطکاک بین میله و قالب ( $\mu_d$ )	ضریب اصطکاک بین میله و چرخ دوار غلتک ( $\mu_r$ )	زاویه گوشه بیرونی قالب ( $\psi$ )	زاویه برخورد کانال قالب ( $\varphi$ )	زاویه خم میله بر روی چرخ دوار ( $\alpha$ )	شعاع چرخ دوار (R)
۰/۹۴	۰/۰۳۵	۰/۵۳	۱۲/۵°	۱۰۴/۶°	۲۹۷°	۹۹/۵۹

با شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم تحت پارامترهای ورودی پیش‌بینی شده موجود در جدول ۳-۹ مقادیر پاسخ برای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی از قالب به ترتیب برابر ۲/۵۲ kN.m، ۳۷۰ MPa، ۰/۱۳۸۴ و ۰/۰۱۳ mm بدست آمده است. مقایسه بین این مقادیر با مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوریتم بهینه‌ساز وال مشخص می‌کند که متوسط خطایی حدود ۱۷ درصد بین نتایج وجود دارد (بر طبق رابطه ۳-۷). در این رابطه  $R_{WOA}$  و  $R_{FEM}$  به ترتیب بیانگر مقدار پاسخ حاصل از الگوریتم وال و شبیه‌سازی است.

$$\%Error = \left| \frac{R_{WOA} - R_{FEM}}{R_{FEM}} \right| \times 100 \quad (۳-۷)$$

### ۳-۸ مقایسه روش‌های بهینه‌سازی PSO و WOA با روش RSM

نتایج پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط روش‌های بهینه‌سازی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند بر طبق پارامترهای ورودی پیش‌بینی شده با این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۳-۱۳ درصد خطای بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج حاصل از روش‌های بهینه‌سازی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در پژوهش حاضر، الگوریتم ازدحام ذرات با خطای حدود ۱۵ درصد، دارای کمترین میزان اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. از طرفی الگوریتم وال و روش سطح پاسخ خطایی حدود ۱۷ درصد دارند.



شکل ۳-۱۳ مقایسه روش‌های بهینه‌سازی

## فصل ۴ : نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۴-۱ نتیجه‌گیری

در این پژوهش چگونگی تاثیر پارامترهای مختلف فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ با مقطع چهارگوش از قبیل شعاع چرخ‌دوار ( $R$ )، زاویه‌ی خم میله بر روی چرخ‌دوار ( $\alpha$ )، زاویه برخورد کانال‌های قالب ( $\varphi$ )، زاویه گوشه خارجی قالب ( $\psi$ )، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار ( $\mu_f$ )، ضریب اصطکاک بین میله و کانال قالب ( $\mu_d$ ) و نسبت ابعادی سطح مقطع کانال قالب ( $a/b$ ) بر روی گشتاور مورد نیاز فرایند ( $T$ )، میزان استحکام تسلیم میله ( $\bar{\sigma}$ )، میزان انحنای میله آلومینیومی پس از خروج از قالب ( $\rho$ ) و یکنواختی توزیع کرنش ( $STD_\epsilon$ ) در سطح مقطع میله با استفاده از روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و استفاده از دو الگوریتم بهینه‌ساز PSO و WOA مورد بررسی قرار داده شده است. هدف انتخاب مقادیر بهینه هر یک از پارامترها برای بهبود عملکرد فرایند ایکپ مداوم است. صحت‌سنجی مدل المان محدود فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ با اجرا و مقایسه نتایج تجربی و عددی این فرایند انجام شد. در ادامه مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر ارائه شده است:

- در شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیومی با مقطع چهارگوش، میزان استحکام تسلیم میله ایکپ شده برابر ۱۹۵ MPa بدست آمده است. میزان استحکام تسلیم ماده بعد از اجرای یک پاس فرایند ایکپ مداوم به صورت تجربی از مقدار ۵۵ MPa به ۱۸۰ MPa افزایش یافته است. مقایسه مقادیر تنش تجربی و عددی فرایند اختلافی حدود ۷/۵ درصدی داشته که نشان از دقت مطلوب مدل المان محدود فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ دارد.
- تحلیل واریانس مربوط به میزان گشتاور فرایند ایکپ مداوم میله آلومینیوم ۷۰۷۵ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک سطوح قالب و زوایای آن بر میزان گشتاور فرایند تاثیر معناداری دارند. مشاهده می‌گردد که پارامتر اصطکاک بین میله و سطح قالب ایکپ ( $F$ ) بیشترین تاثیر را با میزان درصد مشارکت حدود ۴۹ درصد بر روی میزان گشتاور فرایند دارد. به طوری که با افزایش مقدار ضریب

اصطکاک بین سطوح میله و قالب (F) مقدار گشتاور فرایند ایکپ مداوم به میزان ۳۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

- مشاهده می‌شود با افزایش زوایای قالب یکنواختی کرنش در سطح مقطع میله بهبود یافته، از طرفی افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش مقدار پارامتر یکنواختی کرنش و یا به عبارتی باعث پراکندگی کرنش در سطح مقطع میله می‌شود. همچنین افزایش زوایای قالب باعث افزایش انحنای میله آلومینیومی خروجی از قالب نیز می‌شود که از نظر کیفی نامطلوب خواهد بود. از طرفی افزایش ضریب اصطکاک در درون قالب باعث بهبود کیفیت میله خروجی با کاهش انحنا خواهد شد اما این افزایش اصطکاک، افزایش گشتاور و نیروی اعمالی را هم در پی خواهد داشت.

- به منظور افزایش بهره‌وری در فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهارگوش از میله آلومینیوم ۷۰۷۵، بهینه‌سازی فرایند با هدف کاهش گشتاور فرایند، یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع میله خروجی، افزایش میزان استحکام تسلیم میله و کاهش میزان انحنای میله خروجی از قالب ایکپ به عنوان یک پارامتر کیفی محصول انجام شد. نرم‌افزار مینی‌تب با دقت ۹۸ درصدی مقادیر بهینه را به ترتیب برای پارامترهای شعاع چرخ‌دوار، زاویه‌ی خم میله، زاویه کانال قالب، زاویه گوشه قالب، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار، ضریب اصطکاک بین میله و قالب و نسبت ابعادی کانال برابر  $92/5 \text{ mm}$ ،  $297^\circ$ ،  $90^\circ$ ،  $73/5^\circ$ ،  $0/53$ ،  $0/37$  و  $0/94$  بدست آورده است. با استفاده از این مقادیر بهینه میزان گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنا میله خروجی توسط نرم‌افزار مینی‌تب به ترتیب برابر  $2/053 \text{ kN.m}$ ،  $369/95 \text{ MPa}$ ،  $0/0814$  و  $0/006 \text{ mm}$  پیش‌بینی شده است.

- در شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقادیر بهینه پارامترها؛ مقادیر پاسخ برای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی از قالب را به ترتیب برابر  $2/082 \text{ kN.m}$ ،  $370 \text{ MPa}$ ،  $0/0739$  و  $0/0015 \text{ mm}$  بدست آمده است. مقایسه بین مقادیر عددی

با مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب حاکی است که متوسط خطایی حدود ۱۷ درصد بین نتایج وجود دارد.

• از بین پارامترها، زوایای کانال قالب و ضریب اصطکاک بین میله و قالب بر روی تمامی پاسخ‌ها تاثیری معنادار دارد. از طرفی پارامتر زاویه برخورد کانال قالب (C) بیشترین تاثیر را بر روی استحکام تسلیم میله، یکنواختی توزیع کرنش و میزان انحنای میله خروجی به ترتیب با مقدار درصد مشارکت ۵۱/۱۴، ۲۹/۲۰ و ۱۸/۰۱ دارد.

• برای مدل‌سازی فرایند ایکپ مداوم از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه استفاده شده است. تعداد لایه‌ها و نرون‌های هر لایه توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و وال انتخاب شد. در نهایت شبکه عصبی پرسپترون دو لایه بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات با میانگین مربعات خطا ۰/۰۰۲۷ به عنوان بهترین شبکه انتخاب شده است.

• در مقایسه دو الگوریتم بهینه‌ساز PSO و WOA در ایجاد شبکه بهینه، الگوریتم PSO همواره نتایج بهتری نسبت به الگوریتم WOA داشته است.

• بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با استفاده از دو الگوریتم ازدحام ذرات و وال با هدف افزایش بهره‌وری فرایند ایکپ مداوم اجرا شد. برای رسیدن به این هدف، الگوریتم ازدحام ذرات با خطایی برابر ۱/۲۲۲۶، مقادیر بهینه را به ترتیب برای پارامترهای شعاع چرخ‌دوار، زاویه خم میله، زاویه کانال قالب، زاویه گوشه قالب، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار، ضریب اصطکاک بین میله و قالب و نسبت ابعادی کانال برابر ۹۲/۵ mm، ۲۷۰/۶۷°، ۹۷/۸۵°، ۱۲/۵°، ۰/۴۳، ۰/۰۳۵ و ۱/۲۲ بدست آورده است. با استفاده از این مقادیر بهینه میزان گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی توسط الگوریتم ازدحام ذرات به ترتیب برابر ۲/۸۳kN.m، ۳۶۹/۹۹ MPa، ۰/۱۷۹۵ و ۰/۰۰۰۸ mm پیش‌بینی شده است.

• در شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقادیر بهینه پارامترها با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات؛ مقادیر پاسخ برای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای

میله خروجی از قالب را به ترتیب برابر  $2/55 \text{ kN.m}$ ،  $362/5 \text{ MPa}$ ،  $0/1366$  و  $0/0068 \text{ mm}$  بدست آمده است. مقایسه بین مقادیر عددی با مقادیر پیش‌بینی شده الگوریتم ازدحام ذرات نشان می‌دهد که متوسط خطایی حدود ۱۵ درصد بین نتایج وجود دارد.

- برای بهینه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقطع چهار گوش میله آلومینیوم  $7075$  از الگوریتم بهینه‌ساز وال نیز استفاده شده است. الگوریتم وال با خطایی برابر  $1/2290$ ، مقادیر بهینه را به ترتیب برای پارامترهای شعاع چرخ‌دوار، زاویه‌ی خم میله، زاویه کانال قالب، زاویه گوشه قالب، ضریب اصطکاک بین میله و چرخ‌دوار، ضریب اصطکاک بین میله و قالب و نسبت ابعادی کانال برابر  $99/59 \text{ mm}$ ،  $297^\circ$ ،  $104/6^\circ$ ،  $12/5^\circ$ ،  $0/53$ ،  $0/035$  و  $0/94$  بدست آورده است. تحت شرایط ذکر شده مقادیر گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی توسط الگوریتم وال به ترتیب برابر  $2/92 \text{ kN.m}$ ،  $369/38 \text{ MPa}$ ،  $0/1825$  و  $0/001 \text{ mm}$  پیش‌بینی شده است.

- با توجه به شبیه‌سازی فرایند ایکپ مداوم با مقادیر بهینه پارامترها در الگوریتم وال؛ مقادیر پاسخ برای گشتاور، استحکام تسلیم میله، انحراف معیار توزیع کرنش و شعاع انحنای میله خروجی از قالب را به ترتیب برابر  $2/52 \text{ kN.m}$ ،  $370 \text{ MPa}$ ،  $0/1384$  و  $0/0013 \text{ mm}$  بدست آمده است. مقایسه بین مقادیر عددی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوریتم وال نشان دهنده این است که متوسط خطایی حدود ۱۷ درصد بین نتایج وجود دارد.

- مقایسه بین حالت‌های بهینه پیش‌بینی شده توسط سه روش RSM، PSO و WOA نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با خطای ۱۵ درصد کمترین میزان خطا را داشته و روش‌های RSM و WOA هر کدام با مقدار خطای ۱۷ درصد در رتبه دوم قرار دارند. این مقایسه نشان می‌دهد که روش RSM در مقایسه با دو الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، بر خلاف سادگی و کم هزینه‌تر بودن دقت مطلوبی داشته و می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب در نظر گرفته شود.

## ۴-۲ ارائه پیشنهادها

به منظور ارتقاء موضوع پایان‌نامه برای ادامه تحقیق موارد پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد:

۱. در نظر گرفتن رفتار حساسیت به نرخ کرنش برای ماده و اثر سرعت لغزش نسبی بر ضریب اصطکاک و به

تبع آن اثر سرعت انجام فرایند بر متغیرهای محصول

۲. بررسی اثر دمای فرایند در ایکپ مداوم گرم برای میله آلومینیوم ۷۰۷۵

۳. اجرای پژوهش مشابه برای انجام فرایند در کانال با سطح مقطع گرد

۴. صحت‌سنجی نتایج تحلیلی با استفاده از دیگر پارامترهای خروجی از جمله گشتاور و انحنای میله پس از

خروج از قالب

۵. مطالعه عددی و تجربی فرایند ایکپ مداوم برای چند مرحله

۶. استفاده از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌ساز در بهینه‌سازی فرایند.

۷. ساخت دستگاه ایکپ مداوم با استفاده از داده‌های بهینه بدست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز



جدول الف) آزمایش‌های طراحی شده به روش سطح پاسخ

G	F	E	D	C	B	A	
۱	۰/۱۵	۰/۳	۲۰	۱۲۰	۹۰	۱۵۰	۱
۱/۲	۰/۱	۰/۴	۴۵	۱۰۵	۱۸۰	۱۲۵	۲
۱	۰/۰۵	۰/۵	۷۰	۹۰	۲۷۰	۱۰۰	۳
۱	۰/۱۵	۰/۳	۲۰	۹۰	۹۰	۱۰۰	۴
۱	۰/۱۵	۰/۵	۲۰	۱۲۰	۲۷۰	۱۵۰	۵
۱/۲	۰/۱	۰/۲۷	۴۵	۱۰۵	۱۸۰	۱۲۵	۶
۱/۴	۰/۱۵	۰/۵	۲۰	۱۲۰	۹۰	۱۵۰	۷
۱/۴	۰/۱۵	۰/۳	۲۰	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۸
۱	۰/۰۵	۰/۳	۲۰	۱۲۰	۲۷۰	۱۵۰	۹
۱/۴	۰/۰۵	۰/۵	۲۰	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۱۰
۱/۴	۰/۱۵	۰/۳	۷۰	۱۲۰	۲۷۰	۱۰۰	۱۱
۱/۴	۰/۱۵	۰/۳	۷۰	۹۰	۲۷۰	۱۵۰	۱۲
۱/۴	۰/۰۵	۰/۳	۲۰	۹۰	۹۰	۱۰۰	۱۳
۱	۰/۱۵	۰/۳	۷۰	۹۰	۲۷۰	۱۰۰	۱۴
۱	۰/۱۵	۰/۳	۷۰	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۱۵
۱	۰/۰۵	۰/۵	۷۰	۹۰	۹۰	۱۵۰	۱۶
۱/۴	۰/۱۵	۰/۵	۷۰	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۱۷
۱/۴	۰/۱۵	۰/۳	۲۰	۹۰	۹۰	۱۵۰	۱۸
۱	۰/۰۵	۰/۳	۷۰	۹۰	۲۷۰	۱۵۰	۱۹
۱/۴	۰/۰۵	۰/۳	۷۰	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۲۰
۱/۲	۰/۱	۰/۴	۴۵	۸۵/۵	۱۸۰	۱۲۵	۲۱
۱	۰/۰۵	۰/۳	۲۰	۹۰	۹۰	۱۵۰	۲۲
۱/۲	۰/۱	۰/۴	۴۵	۱۰۵	۶۳	۱۲۵	۲۳
۱	۰/۱۵	۰/۵	۷۰	۱۲۰	۲۷۰	۱۰۰	۲۴
۱/۴۶	۰/۱	۰/۴	۴۵	۱۰۵	۱۸۰	۱۲۵	۲۵
۱	۰/۰۵	۰/۵	۲۰	۹۰	۹۰	۱۰۰	۲۶
۱	۰/۱۵	۰/۵	۲۰	۹۰	۲۷۰	۱۰۰	۲۷
۱/۴	۰/۱۵	۰/۳	۷۰	۱۲۰	۹۰	۱۵۰	۲۸

1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	29
1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	3·
1/2	·/·35	·/4	45	1·5	18·	125	31
1/2	·/1	·/4	77/5	1·5	18·	125	32
1/4	·/·5	·/5	7·	12·	27·	1··	33
1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	34
1/4	·/·5	·/5	2·	12·	27·	15·	35
1/4	·/15	·/3	2·	12·	27·	15·	36
1/4	·/15	·/5	2·	9·	27·	15·	37
1	·/·5	·/5	7·	12·	9·	1··	38
1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	39
1	·/·5	·/3	2·	12·	9·	1··	4·
1	·/15	·/3	2·	12·	27·	1··	41
1/4	·/15	·/5	7·	9·	9·	15·	42
1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	43
1/2	·/1	·/4	12/5	1·5	18·	125	44
1/4	·/·5	·/3	2·	12·	9·	15·	45
1	·/·5	·/5	2·	12·	27·	1··	46
1	·/15	·/5	7·	9·	27·	15·	47
1	·/15	·/3	2·	9·	27·	15·	48
1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	49
1/2	·/1	·/4	45	1·5	297	125	5·
1/2	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	51
1	·/·5	·/5	2·	12·	9·	15·	52
1/4	·/·5	·/5	7·	12·	9·	15·	53
1/4	·/·5	·/3	7·	9·	9·	15·	54
1/4	·/·5	·/5	2·	9·	9·	15·	55
·/94	·/1	·/4	45	1·5	18·	125	56
1	·/15	·/5	2·	9·	9·	15·	57
1	·/·5	·/3	7·	9·	9·	1··	58
1/4	·/·5	·/5	7·	9·	9·	1··	59
1/2	·/1	·/4	45	124/5	18·	125	6·

1/4	·/15	·/5	2.	12.	27.	10.	61
1	·/15	·/5	7.	9.	9.	10.	62
1/4	·/15	·/5	2.	9.	9.	10.	63
1/4	·/15	·/3	2.	9.	27.	10.	64
1/2	·/1	·/4	45	105	18.	92/5	65
1	·/05	·/3	7.	12.	27.	10.	66
1	·/05	·/3	7.	12.	9.	15.	67
1/2	·/1	·/4	45	105	18.	157/5	68
1/4	·/05	·/3	2.	12.	27.	10.	69
1	·/05	·/5	7.	12.	27.	15.	70
1/4	·/05	·/3	7.	9.	27.	10.	71
1	·/05	·/3	2.	9.	27.	10.	72
1/2	·/1	·/4	45	105	18.	125	73
1/4	·/15	·/3	7.	9.	9.	10.	74
1/2	·/1	·/53	45	105	18.	125	75
1/4	·/15	·/5	7.	9.	27.	10.	76
1	·/15	·/5	2.	12.	9.	10.	77
1	·/05	·/5	2.	9.	27.	15.	78
1/4	·/05	·/3	2.	9.	27.	15.	79
1	·/15	·/3	7.	9.	9.	15.	80
1	·/15	·/3	7.	12.	27.	15.	81
1/4	·/15	·/5	7.	12.	27.	15.	82
1/4	·/05	·/3	7.	12.	27.	15.	83
1/2	·/1	·/4	45	105	18.	125	84
1	·/15	·/5	7.	12.	9.	15.	85
1/4	·/05	·/5	2.	9.	27.	10.	86
1/2	·/165	·/4	45	105	18.	125	87
1/4	·/05	·/5	7.	9.	27.	15.	88

---

جدول ب) نتایج شبیه‌سازی با توجه به طراحی آزمایش‌ها پیش‌بینی شده

توزیع کرنش	انحنای (1/mm)	استحکام تسلیم (MPa)	گشتاور (kN.m)	
۰/۱۲۴۳	۰/۰۰۱۳	۳۴۴/۰۴۱	۷/۵۶۰۳	۱
۰/۱۶۴۸	۰/۰۰۲	۳۳۳/۰۴۲	۵/۴۸۳۷	۲
۰/۲۴۵۲	۰/۰۰۳۹	۳۵۰/۸۵۸	۳/۳۷۱۱	۳
۰/۶۰۰۵	۰/۰۰۱۹	۳۷۰	۸/۴۹۴۲	۴
۰/۱۱۹۳	۰/۰۰۲۷	۳۶۴/۲۴۴	۶/۲۳۳۶	۵
۰/۱۶۹۰	۰/۰۰۱۷	۳۳۲/۶۳۳	۵/۸۶۳۵	۶
۰/۰۵۹۹	۰/۰۰۱۲	۳۲۴/۲۰۵	۷/۵۹۲۶	۷
۰/۱۰۱۹	۰/۰۰۱	۳۵۲/۳۶۷	۵/۵۲۱۹	۸
۰/۱۲۲۲	۰/۰۶۵۸	۳۰۸/۶۶۸	۱/۱۵۹۵	۹
۰/۰۷۳۳	۰/۰۰۲۹	۳۱۰/۸۹۸	۱/۶۲۶۲	۱۰
۰/۱۰۹۶	۰/۰۰۵۴	۳۴۸/۶۷۸	۷/۱۵۴۶	۱۱
۰/۴۹۲۷	۰/۰۰۰۱	۳۷۰	۱۴/۳۷۸۳	۱۲
۰/۲۷۲۵	۰/۰۰۱۵	۳۶۸/۲۷	۳/۲۷۵۱	۱۳
۰/۲۶۶۱	۰/۰۰۱۸	۳۶۹/۷۷۲	۶/۱۹۳۳	۱۴
۰/۱۵۷۴	۰/۰۰۷۵	۳۳۱/۲۴۳	۳/۸۷۸۶	۱۵
۰/۲۴۲۵	۰/۰۰۳	۳۵۴/۵۵۱	۴/۱۲۸۰	۱۶
۰/۱۰۰۷	۰/۰۰۵۱	۳۲۹/۷۵۲	۴/۱۴۸۶	۱۷
۰/۹۰۰۳	۰/۰۰۰۴	۳۷۰	۱۴/۷۶۷۹	۱۸
۰/۳۰۲۰	۰/۰۰۲	۳۵۳/۸۸۳	۳/۰۰۷۹	۱۹
۰/۱۲۵۹	۰/۰۱۴۳	۳۰۸/۰۰۳	۱/۴۹۴۸	۲۰
۰/۱۶۸۹	۰/۰۰۴۲	۳۷۰	۸/۵۲۰۱	۲۱
۰/۱۶۶۳	۰/۰۰۱	۳۶۹/۹۱۸	۵/۲۹۲۱	۲۲
۰/۱۱۱۸	۰/۰۰۰۸	۳۳۲/۲۲۲	۴/۳۳۸۷	۲۳
۰/۱۷۳۷	۰/۰۰۶۶	۳۳۸/۱۸۷	۵/۱۰۰۰	۲۴
۰/۰۸۹۳	۰/۰۰۰۵	۳۳۵/۳۹۸	۶/۲۲۴۶	۲۵
۰/۲۵۹۰	۰/۰۰۱۳	۳۶۷/۵۷۸	۳/۷۵۷۴	۲۶
۰/۱۸۵۳	۰/۰۰۰۱	۳۷۰	۴/۴۹۹۵	۲۷
۰/۱۳۶۸	۰/۰۰۵۳	۳۴۹/۰۴۶	۷/۸۸۶۵	۲۸
۰/۱۶۵۰	۰/۰۰۲	۳۳۳	۵/۴۵۳۷	۲۹
۰/۱۶۴۵	۰/۰۰۲	۳۳۲/۹۸	۵/۴۶۶۷	۳۰

•/1421	•/••51	321/453	2/5479	31
•/1731	•/••48	328/147	5/•947	32
•/•929	•/•142	3•9/•34	2/1796	33
•/1647	•/••2	333/12	5/4587	34
•/1•26	•/••45	336/686	3/9361	35
•/•829	•/••22	341/381	11/6433	36
1/•265	•/•••4	37•	17/26•2	37
•/2•35	•/•276	341/434	1/4625	38
•/1649	•/••2	332/955	5/4787	39
•/1••5	•/••59	32•/264	1/6912	4•
•/1843	•/••14	356/264	4/7485	41
•/2533	•/•••3	37•	1•/7797	42
•/1646	•/••2	333/135	5/4687	43
•/•865	•/••21	333/971	5/8928	44
•/•672	•/••39	3•8/716	2/7924	45
•/1144	•/••62	34•/8•6	2/2332	46
•/2359	•/••18	369/927	8/6415	47
•/9995	•/••21	37•	12/•58•	48
•/1649	•/••2	332/965	5/4527	49
•/1398	•/•••1	339/919	9/9383	5•
•/1648	•/••2	333/•16	5/48•7	51
•/135•	•/••7	335/4	2/4879	52
•/1256	•/•146	3•8/299	2/5767	53
•/2347	•/••22	337/945	3/9362	54
•/34•3	•/•••6	37•	5/3139	55
•/2973	•/••18	367/7•6	4/5755	56
•/5195	•/••35	37•	12/4647	57
•/296•	•/••38	348/81	2/579•	58
•/1576	•/•••3	342/535	2/4525	59
•/1•53	•/••95	3•3/186	4/1441	6•
•/•738	•/•••9	36•/685	7/1428	61
•/2•85	•/••19	37•	5/9441	62

•/۱۸۲۹۲	•/۰۰۰۳	۳۷۰	۸/۱۸۳۹۵	۶۳
۱/۰۴۶۸	•/۰۰۰۷	۳۷۰	۱۲/۱۱۸۲	۶۴
•/۱۵۷۷	•/۰۰۰۱۷	۳۳۶/۸۲۴	۴/۰۵۶۴	۶۵
•/۱۳۱۴	•/۰۲۷۳	۳۱۶/۶۱۳	۲/۰۶۶۱	۶۶
•/۱۳۶۲	•/۰۳۵۶	۳۰۱/۲۵۹	۲/۴۹۵۱	۶۷
•/۱۸۱۸	•/۰۰۰۱۸	۳۳۳/۰۶۷	۷/۷۱۸۷	۶۸
•/۰۳۸۹	•/۰۰۰۲۸	۳۱۷/۸۶۳	۲/۲۸۸۵	۶۹
•/۱۹۴۴	•/۰۲۶۸	۳۳۷/۳۹۳	۳/۰۶۰۱	۷۰
•/۱۴۲۷	•/۰۰۰۱۸	۳۴۹/۲۴۷	۳/۲۰۸۹	۷۱
•/۱۸۷۵	•/۰۰۰۰۷	۳۷۰	۳/۸۲۶۳	۷۲
•/۱۶۴۸	•/۰۰۰۰۲	۳۳۳/۰۲۵	۵/۴۷۰۷	۷۳
•/۵۳۶۸	•/۰۰۰۲۹	۳۷۰	۷/۳۴۳۷	۷۴
•/۱۶۴۱	•/۰۰۰۱۹	۳۳۲/۶۰۳	۵/۴۲۵۶	۷۵
•/۳۳۴۹	•/۰۰۰۰۷	۳۷۰	۹/۲۰۶۱	۷۶
•/۱۲۴۴	•/۰۰۰۰۲	۳۴۸/۰۰۲	۴/۵۳۰۷	۷۷
•/۲۰۰۲	•/۰۰۰۰۷	۳۷۰	۵/۰۳۴۳	۷۸
•/۲۴۷۷	•/۰۰۰۱۱	۳۶۸/۸۹۱	۶/۵۸۸۳	۷۹
•/۲۲۳۶	•/۰۰۰۲۳	۳۶۸/۱۱۹	۱۰/۰۴۷۷	۸۰
•/۲۲۱۹	•/۰۰۱۴۷	۳۴۳/۸۶۸	۳/۳۴۴۴	۸۱
•/۱۰۴۴	•/۰۰۰۱۴	۳۲۶/۶۲۲	۱۰/۳۶۲۵	۸۲
•/۱۵۱۰	•/۰۰۰۱۵	۳۰۸/۰۲۷	۴/۰۳۰۷	۸۳
•/۱۶۴۴	•/۰۰۰۰۲	۳۳۳/۰۳۸	۵/۴۴۹۷	۸۴
•/۱۶۹۴	•/۰۰۰۶۱	۳۳۴/۲۸۳	۶/۳۶۵۰	۸۵
•/۳۷۹۸	•/۰۰۰۱۱	۳۶۷/۲۳۴	۳/۹۸۵۵	۸۶
•/۲۱۶۷	•/۰۰۰۱۸	۳۶۹/۹۱۳	۱۰/۹۹۱۴	۸۷
•/۱۳۵۱	•/۰۰۰۰۵	۳۴۰/۰۲۹	۵/۵۵۶۴	۸۸

---

## کد بهینه‌سازی الگوریتم PSO

```
clc, clear, close all
c1=2.02;
c2=2.02;
tic
it=1000;
N_p=20;
N_v=7;
x1= rand(1,N_p); %
x2= rand(1,N_p); %
x3= rand(1,N_p); %
x4= rand(1,N_p); %
x5= rand(1,N_p); %
x6= rand(1,N_p); %
x7= rand(1,N_p); %
XX=[x1;x2;x3;x4;x5;x6;x7];
% % XX=[Xx Gbest];
for j=1:1:N_p
    f(j)=Fitness_4P_N(XX(:,j));
end
V=zeros(N_v,N_p);
Pbest=XX;
fPbest=f;
Gbest=Pbest(:,u);
fGbest=fG
thmax=0.9;thmin=0.2;
k=0;
for i=1:1:it
    k=k+1;
    th=0.7;
    Vnew=th.*V+c1*rand(N_v,N_p).*(Pbest-XX)+c2*rand(N_v,N_p).*(Gbest*ones(1,N_p)-XX);
    for j=1:1:N_p
        f(j)=Fitness_4P_N(Xnew(:,j));
    end
    for j=1:1:N_p
        if f(j)>fPbest(j)
            Pbest(:,j)=Xnew(:,j);
            fPbest(j)=f(j);
        end
    end
    [fG,u1]=max(f);
    if fG>fGbest
        Gbest=Xnew(:,u1);
    end
    if mod(k,10)==0
        end
        FG(k)=fGbest;
        XX=Xnew;
        V=Vnew;
    end
end
disp([' Time = ' num2str(toc) ])
save opt_result_4P_N Gbest fGbest FG
```

## کد بهینه‌سازی الگوریتم WOA

```
clc, clear, close all
tic
SearchAgents_no=20; % Number of search agents
Max_iteration=1000; % Maximum number of iterations
% Load details of the selected benchmark function
lb=0;
ub=1;
dim=7;
fobj = @Fitness_4P_N;
[Best_score,Best_pos,WOA_cg_curve]=WOA(SearchAgents_no,Max_iteration,lb,ub,dim,fobj);
Time=toc
save opt_result_WOA Time Best_score Best_pos WOA_cg_curve

% The Whale Optimization Algorithm
function
[Leader_score,Leader_pos,Convergence_curve]=WOA(SearchAgents_no,Max_iter,lb,ub,dim,
fobj)
% initialize position vector and score for the leader
Leader_pos=zeros(1,dim);
Leader_score=inf; %change this to -inf for maximization problems
%Initialize the positions of search agents
Positions=initialization(SearchAgents_no,dim,ub,lb);
Convergence_curve=zeros(1,Max_iter);
t=0;% Loop counter
% Main loop
Leader_score=10;
while t<Max_iter
    for i=1:size(Positions,1)
        % Return back the search agents that go beyond the boundaries of the search space
        Flag4ub=Positions(i,*)>ub;
        Flag4lb=Positions(i,*)<lb;
        Positions(i,*)=(Positions(i,*)*(~(Flag4ub+Flag4lb)))+ub.*Flag4ub+lb.*Flag4lb;
        % Calculate objective function for each search agent
        fitness=fobj(Positions(i,));
        % Update the leader
        if fitness<Leader_score % Change this to > for maximization problem
            Leader_score=fitness; % Update alpha
        end
    end
    a=2-t*((2)/Max_iter); % a decreases linearly from 2 to 0 in Eq. (2.3)
    % a2 linearly decreases from -1 to -2 to calculate t in Eq. (3.12)
    a2=-1+t*((-1)/Max_iter);
    % Update the Position of search agents
    for i=1:size(Positions,1)
        r1=rand(); % r1 is a random number in [0,1]
```



```

r2=rand(); % r2 is a random number in [0,1]
A=2*a*r1-a; % Eq. (2.3) in the paper
C=2*r2; % Eq. (2.4) in the paper
b=1; % parameters in Eq. (2.5)
l=(a2-1)*rand+1; % parameters in Eq. (2.5)
p = rand(); % p in Eq. (2.6)
for j=1:size(Positions,2)
    if p<0.5
        if abs(A)>=1
            rand_leader_index = floor(SearchAgents_no*rand()+1);
            D_X_rand=abs(C*X_rand(j)-Positions(i,j)); % Eq. (2.7)
            Positions(i,j)=X_rand(j)-A*D_X_rand; % Eq. (2.8)
        elseif abs(A)<1
            D_Leader=abs(C*Leader_pos(j)-Positions(i,j)); % Eq. (2.1)
            Positions(i,j)=Leader_pos(j)-A*D_Leader; % Eq. (2.2)
        end
    elseif p>=0.5
        distance2Leader=abs(Leader_pos(j)-Positions(i,j));
        % Eq. (2.5)
        Positions(i,j)=distance2Leader*exp(b.*l).*cos(l.*2*pi)+Leader_pos(j);
    end
end
end
t=t+1;
Convergence_curve(t)=Leader_score;
[t Leader_score]
end

% This function initialize the first population of search agents
function Positions=initialization(SearchAgents_no,dim,ub,lb)
Boundary_no= size(ub,2); % numnber of boundaries
% If the boundaries of all variables are equal and user enter a single
% number for both ub and lb
if Boundary_no==1
    Positions=rand(SearchAgents_no,dim).*(ub-lb)+lb;
end
% If each variable has a different lb and ub
if Boundary_no>1
    for i=1:dim
        ub_i=ub(i);
        lb_i=lb(i);
        Positions(:,i)=rand(SearchAgents_no,1).*(ub_i-lb_i)+lb_i;
    end
end
end

```

- [1] Y. T. Zhu, T. C. Lowe, and T. G. Langdon, "Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation," *Scr. Mater.*, vol. 51, no. 8, pp. 825–830, 2004.
- [2] مقصودلو ح، (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی خواص مکانیکی یک ایمپلنت تیتانیومی تولید شده با روش پرسکاری در کانال همسان زاویه‌دار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [3] J. W. Bray, "Properties and selection: Nonferrous alloys and special purpose materials," *ASM Met. Handb.*, vol. 92, 1990.
- [4] R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, and Y. Zhu, "Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later," *Jom*, vol. 68, no. 4, pp. 1216–1226, 2016.
- [5] جهان بخش موالو ح، (۱۳۹۵)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی فرایند ECAP بر رفتار خواص دمای بالای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی.
- [6] C. Xu, Z. Horita, and T. G. Langdon, "The evolution of homogeneity in an aluminum alloy processed using high-pressure torsion," *Acta Mater.*, vol. 56, no. 18, pp. 5168–5176, 2008.
- [7] C. Republic et al., "Eu high pressure torsion and its application for grain refinement in medium carbon steel Jozef zrnik," *Roznov pod Radhostem*, pp. 4–8, 2010.
- [8] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, "Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process," *Acta Mater.*, vol. 47, no. 2, pp. 579–583, Jan. 1999.
- [9] N. Tsuji, K. Shiotsuki, H. Utsunomiya, and Y. Saito, "Low temperature superplasticity of ultra-fine grained 5083 aluminium alloy produced by accumulative roll-bonding," in *Materials science forum*, 1999, vol. 304, pp. 73–78.
- [10] مخبریان ب، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تاثیر فرایند ECAP بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای  $Al5754$  و  $Al7075$ ، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان.
- [11] V. V. Stolyarov, Y. E. Beigel'zimer, D. V. Orlov, and R. Z. Valiev, "Refinement of microstructure and mechanical properties of titanium processed by twist extrusion and

- subsequent rolling,” *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 99, no. 2, pp. 204–211, 2005.
- [12] M. I. Latypov, I. V Alexandrov, Y. E. Beygelzimer, S. Lee, and H. S. Kim, “Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 60, pp. 194–200, 2012.
- [13] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, “Processing of metals by equal-channel angular pressing,” *J. Mater. Sci.*, vol. 6, no. 12, pp. 2835–2843, 2001.
- [14] M. M. Moshksar, A. Afsari, and S. Y. Ahmadi, “Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing,” *Modares Mech. Eng.*, vol. 14, no. 15, pp. 257–266, 2015.
- [15] C. Xu and T. G. Langdon, “Influence of a round corner die on flow homogeneity in ECA pressing,” *Scr. Mater.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–4, 2003.
- [16] C. Xu and T. G. Langdon, “The development of hardness homogeneity in aluminum and an aluminum alloy processed by ECAP,” *Springer Tracts Mech. Eng.*, pp. 1542–1550, 2007.
- [17] Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto, and T. G. Langdon, “Development of  $\text{nanoscale}$  ne grained structures using severe plastic deformation,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 16, no. December, pp. 1239–1245, 2000.
- [18] M. F. Gigliotti and S. Amancherla, “Effect of friction, backpressure and strain rate sensitivity on material flow during equal channel angular extrusion,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 406, pp. 102–109, 2005.
- [19] A. Jäger, V. Gärtnerova, and K. Tesař, “Microstructure and anisotropy of the mechanical properties in commercially pure titanium after equal channel angular pressing with back pressure at room temperature,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 644, pp. 114–120, 2015.
- [20] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, “An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing,” *Acta Mater.*, vol. 45, no. 11, pp. 4733–4741, Nov. 1997.
- [21] G. J. Raab, R. Z. Valiev, T. C. Lowe, and Y. T. Zhu, “Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 382, no. 1–2, pp. 30–34, Sep. 2004.
- [22] M. Prell, C. Xu, and T. G. Langdon, “The evolution of homogeneity on longitudinal sections during processing by ECAP,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 480, pp. 449–455, 2008.
- [23] J. Kim, Y. Nishida, H. Arima, and T. Ando, “Microstructure of Al – Si – Mg alloy

- processed by rotary-die equal channel angular pressing,” *Mater. Lett.*, vol. 57, pp. 1689–1695, 2003.
- [24] A. Azushima and K. Aoki, “Properties of ultrafine-grained steel by repeated shear deformation of side extrusion process,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 337, pp. 45–49, 2002.
- [25] A. Azushima et al., “CIRP Annals - Manufacturing Technology Severe plastic deformation ( SPD ) processes for metals,” *Manuf. Technol.*, vol. 57, pp. 716–735, 2008.
- [26] R. Z. Valiev and T. G. Langdon, “Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 51, pp. 881–981, 2006.
- [27] J. Lee, J. Suh, and J. Ahn, “Work-Softening Behavior of the Ultrafine-Grained Al Alloy Processed by High-Strain-Rate , Dissimilar-Channel Angular Pressing,” *Metall. Mater. Trans.*, vol. 34, no. March, 2003.
- [28] J. Alkorta and J. Gil, “On the impossibility of multi-pass equal-channel angular drawing,” *Scr. Mater.*, vol. 47, pp. 13–18, 2002.
- [29] H. Utsunomiya, K. Hatsuda, T. Sakai, and Y. Saito, “Continuous grain refinement of aluminum strip by conshearing,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 372, pp. 199–206, 2004.
- [30] L. Li and J. Virta, Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure, vol. 27. 2011.
- [31] C. Etherington, “Conform - a New Concept for the Continuous Extrusion Forming of Metals.,” *Am. Soc. Mech. Eng.*, no. 73-WA/PT-2, pp. 893–900, 1973.
- [32] W. Wei, W. Zhang, K. X. Wei, Y. Zhong, G. Cheng, and J. Hu, “Finite element analysis of deformation behavior in continuous ECAP process,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 516, no. 1–2, pp. 111–118, Aug. 2009.
- [33] S. Xu, G. Zhao, X. Ren, and Y. Guan, “Numerical investigation of aluminum deformation behavior in three-dimensional continuous confined strip shearing process,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 476, no. 1–2, pp. 281–289, 2008.
- [34] K. Nakashima, Z. Horita, and M. Nemoto, “influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing,” *Acta mater*, vol. 46, no. 5, pp. 1589–1599, 1998.
- [35] J. Gholami, M. Sedighi, and M. Pourbashiri, “Effect of die channel angle and friction coefficient in ECAP-Conform process for Al-6061 alloy,” in *Proceedings of Iran International Aluminum Conference*, 2014.
- [36] M. Murashkin et al., “Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in

- ultrafine-grained Al 6101 alloy processed via ECAP-conform,” *Metals (Basel)*, vol. 5, no. 4, pp. 2148–2164, 2015.
- [37] C. Xu, S. Schroeder, P. B. Berbon, and T. G. Langdon, “Principles of ECAP-Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy,” *Acta Mater.*, vol. 58, no. 4, pp. 1379–1386, 2010.
- [38] A. R. Shahab, S. A. A. Akbari Mousavi, S. Ranjbar Bahadori, and S. M. Ebrahimi, “The Comparison between Continuous Confined Strip Shearing (C2S2) and ECAP Conform in Regard to Equivalent Plastic Strain Distribution for Al 1100,” *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.*, vol. 05, pp. 400–409, Jan. 2012.
- [39] J. F. Derakhshan, M. H. Parsa, and H. R. Jafarian, “Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 747, pp. 120–129, 2019.
- [40] H. Ghaforian Nosrati, K. Khalili, and M. Gerdooei, “Theoretical and Numerical Investigation of Required Torque in ECAP-Conform Process,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 51, no. 2, pp. 519–528, 2020.
- [41] H. G. Nosrati, K. Khalili, and M. Gerdooei, “Theoretical and experimental evaluation of no-slip feeding condition in ECAP-Conform of a square-section metallic rod,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 112, no. 1, pp. 375–385, 2021.
- [42] J. G. Kaufman and A. S. M. International, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. 2000.
- [43] S. Entezami and M. Honarpisheh, “A Study on the Hardness of 7075 and 5052 Aluminum Alloys in the Equal Channel Angular Rolling Process,” *Bull. la Société R. des Sci. Liège*, vol. 85, no. 1, pp. 879–889, 2016.
- [44] A. Freddi and M. Salmon, “Design of Experiment,” in *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, no. 1, 2019, pp. 127–158.
- [45] P. Taylor et al., “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments Book Reviews,” no. June 2013, pp. 1–4, 2012.
- [46] شوقی ع، (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بهبود انتقال حرارت داخلی با تشکیل دوباره لایه مرزی به وسیله سیلندر توری به روش RSM، دانشکده مکانیک، دانشگاه فردوسی.
- [47] نصیرپور ن، (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مدل‌سازی فرایند رنگ‌زدایی پساب نساجی با استفاده از باکتری پلوروتوس استراتوس توسط شبکه عصبی مصنوعی، دانشکده شیمی، دانشگاه پیام نور مرکز

تهران شمال.

[48] گلی م، (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، طراحی و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بهینه PID به

کمک الگوریتم بهینه‌ساز PSO، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.

[49] قنبرپورگلوجه ا، (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، حل مساله‌ی مسیریابی وسیله نقلیه با استفاده از

الگوریتم نهنگ، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه پیام نور مرکز ری.

## Abstract

The existing limitations of the Equal-Channel Angular Pressing (ECAP) have been led to the development of methods for continuous processes. These limitations include the short length of the workpiece, the discontinuity of the process and the discarding of the beginning and end edges of the workpiece, the limitation of the stroke, and needed to excess parts for removing the material in the channel of the ECAP die. Due to these factors, the ECAP process is not efficient and cost-effective in mass production. In recent years, researchers have paid special attention to methods of Severe Plastic Deformation (SPD) continuously, such as the ECAP-Conform process. In the present study aiming to a comprehensive knowledge in the ECAP-Conform process, the influence of effective parameters on the ECAP-Conform process of AA7075 aluminum and their optimization have been investigated. The aim is to achieve maximum stress, minimum torque, and minimum rod curvature as well as to result a more uniform strain distribution. Influence of the wheel radius, the bending angle, the die channel angle, the outer corner of die channel angle, the friction coefficient between rod and wheel, the friction coefficient between the rod and die and the dimensional ratio of die channel are examined on required torque, Yield strength, the curvature of the output rod and the uniformity of the strain distribution at the cross-section of the rod. For this purpose, 88 experiments were designed based on the Response Surface Method (RSM) in the Minitab software and their simulations (after validation) were performed using Abaqus software. To model the ECAP-Conform process of the aluminum rod, multilayer perceptron Artificial Neural Network (ANN) has been used. To find the number of layers as well as the number of neurons in each layer, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and the Whale Optimization Algorithm (WOA) have been used. The optimized two-layer perceptron neural network with the PSO algorithm was selected as the best neural network with an mean square error rate of 0.0027. Based on it, the optimization of the ECAP-Conform process has been implemented by PSO and WOA algorithms. The results show that the parameters of the die channel angles and the friction coefficient between the rod and the die have a significant effect on all responses. Comparing the results of optimization methods and simulations shows that the PSO algorithm has the lowest error with an error of about 15%, and the RSM and the WOA algorithm, both have an error of 17%.

**Keywords:** Aluminum 7075, Optimization, ECAP-Conform, Response Surface Method, Artificial Neural Network, Particle Swarm Optimization Algorithm, Whale Optimization Algorithm



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering**

**Title**

**Design and optimization of ECAP-Conform parameters to improve the mechanical specification of the product**

**By: Sadegh Moradi**

**Supervisor:**

**Dr. Mahdi Gerdooei**

**Advisors:**

**Dr. Seyed Mojtaba Varedi-Koulaei**

**Hasan Ghaforian Nosrati**

**February 2021**