



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق فلزی با مسیر ابزار پیوسته

ابراهیم کشاورزبان

اساتید راهنما

سیده‌های قادری

مهدی گردویی

بهمن ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ابراهیم کشاورزین رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق فلزی با مسیر ابزار پیوسته که در تاریخ ۹۳/۱۱/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: **بسیار خوب امتیاز ۱۸٫۵**) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر سیدهادی قادری	استادیار	تاسی
	دکتر مهدی گردویی	استادیار	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مجید محمدی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر سیدوحید حسینی	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

امضاء



تقدیم نامه

تقدیم به همسر مهربانم که با گذشت و فداکاری خویش سختی های مسیر کسب دانش را برایم آسان کرد.

سپاس‌گزاری

به مصداق حدیث شریف "مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ" شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقایان دکتر سیدهادی قادری و دکتر مهدی گردویی که با راهنمایی‌های کارساز و سازنده‌ی خود مرا در انجام این پروژه یاری رساندند، همچنین پدر و مادر عزیزم که دعاهایشان همواره بدرقه راهم بوده است؛ تشکر کنم.

تعهدنامه

اینجانب ابراهیم کشاورزبان دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک-گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق فلزی با مسیر ابزار پیوسته، تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری و 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 مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» 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 کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه 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.

چکیده

شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک روش انعطاف‌پذیر برای ساخت محصولات از ورق‌های فلزی است که به پانچ یا قالب مخصوص برای شکل‌دهی احتیاج ندارد. در این روش ورق اولیه به وسیله‌ی یک قالب نگهدارنده‌ی ساده، محکم نگه داشته شده و شکل نهایی قطعه، با جابه‌جایی‌های نسبی یک ابزار به کمک دستگاه کنترل عددی رایانه‌ای به دست می‌آید. این روش برای تولید قطعاتی که ساخت آنها با روش‌های دیگر بسیار پرهزینه یا غیر ممکن است، یا قطعات با تیراژ پایین مناسب می‌باشد. در این پایان‌نامه، فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای عرفچین کروی از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6061-O به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی، ابزار شکل‌دهی از جنس کاربید تنگستن با قطرهای ۸ و ۱۲ mm به کار رفت. برای حرکت ابزار دو نوع مسیر تعریف شد. در مسیر نوع اول، ابزار با حرکت روی یک مسیر پیوسته‌ی مارپیچ کروی با گام عمودی مشخص، از بزرگترین قطر به سمت مرکز در بیشترین عمق حرکت کرده، تماس ابزار با قطعه‌کار در طول شکل‌دهی قطع نمی‌شود. در مسیر نوع دوم که یک مسیر ناپیوسته است، ابزار ابتدا به اندازه‌ی گام معین عمودی روی محور قطعه حرکت کرده و به عمق جدید می‌رسد. سپس روی یک مسیر مارپیچ صفحه‌ای با گام شعاعی مشخص از مرکز به سمت بزرگترین شعاع در آن عمق حرکت می‌کند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از حل‌گر صریح نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام گرفت و با به کار بردن پارامترهای مشابه با آزمایش‌ها، اثر عوامل مؤثر بر شکل‌دهی از قبیل قطر ابزار، نوع مسیر حرکت و گام ابزار بررسی شد. نتایج مطالعه‌ی تجربی و عددی فرایند شکل‌دهی تدریجی نشان داد که، توزیع کرنش در مسیر ابزار نوع دوم در مقایسه با مسیر ابزار نوع اول بسیار بهبود می‌یابد. در ادامه، فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی به روش آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت و کرنش‌های به وجود آمده در آن با مقادیر مشابه در فرایند شکل‌دهی تدریجی مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که در فرایند شکل‌دهی تدریجی بدون پاره شدن ورق، کرنش‌های بسیار شدیدی به دست می‌آید، در حالی که در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، اعمال کرنش‌های بسیار پایین‌تر موجب پاره شدن ورق می‌شود. در انتها، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی مقایسه شد. حاصل مقایسه سازگاری خوبی بین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را نشان داد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی تدریجی، شبیه‌سازی المان محدود، کرنش ضخامت، شکل‌پذیری، کشش با سنبه‌ی سرکروی.

فهرست عنوان‌ها

چکیده.....	ج
تقدیم‌نامه.....	أ
سپاس‌گزاری.....	ت
فهرست عنوان‌ها.....	ح
فهرست شکل‌ها.....	ذ
فهرست جدول‌ها.....	ص
فهرست نشانه‌ها.....	ض
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- تعاریف	۳
۳-۱- کاربردها.....	۵
۴-۱- تاریخچه [۲]	۵
۵-۱- مروری بر تحقیقات پیشین	۶
۶-۱- اهداف و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۱۳
فصل ۲ آزمایش‌های تجربی.....	۱۵
۱-۲- مواد و تجهیزات آزمایش شکل‌دهی تدریجی	۱۶
۱-۱-۲- ورق فلزی.....	۱۶
۲-۱-۲- دستگاه اچ الکتروشیمیایی	۱۸
۳-۱-۲- قالب شکل‌دهی تدریجی ورق.....	۲۰
۴-۱-۲- ابزار شکل‌دهی	۲۲
۵-۱-۲- ماشین تراش CNC	۲۲
۲-۲- مواد و تجهیزات آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی	۲۳
۱-۲-۲- قالب فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی	۲۳
۲-۲-۲- دستگاه پرس هیدرولیک	۲۵

- ۲۶-۳-۲ آماده‌سازی ورق و انجام آزمایش شکل‌دهی تدریجی
 ۲۷-۱-۳-۲ مسیر ابزار نوع اول
 ۲۷-۲-۳-۲ مسیر ابزار نوع دوم
 ۲۸-۱-۲ آماده‌سازی ورق و انجام آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی

فصل ۳ شبیه‌سازی المان محدود..... ۳۱

- ۳۳-۱-۳ شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی
 ۳۳-۱-۱-۳ آماده‌سازی مدل
 ۳۵-۲-۱-۳ ناهمسانگردی پلاستیک ورق [۳۲]
 ۴۰-۳-۱-۳ شرایط مرزی
 ۴۳-۲-۳ شبیه‌سازی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۴۵

- ۴۶-۱-۴ نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی فرایند شکل‌دهی تدریجی
 ۴۹-۱-۱-۴ اثر ناهمسانگردی ورق بر توزیع کرنش
 ۵۲-۲-۱-۴ اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش
 ۵۳-۳-۱-۴ اثر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام مارپیچ) بر توزیع کرنش
 ۵۵-۴-۱-۴ اثر نوع مسیر ابزار بر توزیع کرنش
 ۵۶-۲-۴ نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی
 ۵۷-۱-۲-۴ اثر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش
 ۵۸-۲-۲-۴ تأثیر استفاده از روانکار بر توزیع کرنش
 ۶۰-۳-۴ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی
 ۶۰-۱-۳-۴ اثر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش
 ۶۴-۲-۳-۴ اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش
 ۶۶-۳-۳-۴ اثر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام مارپیچ) بر توزیع کرنش
 ۶۷-۴-۳-۴ تأثیر نوع مسیر ابزار بر میزان توزیع کرنش
 ۶۸-۵-۳-۴ تأثیر قطر ابزار، گام و نوع مسیر ابزار بر میزان خروج از دایروی بودن
 ۷۱-۴-۴ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی
 ۷۲-۱-۴-۴ اثر ناهمسانگردی در توزیع کرنش در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی
 ۷۴-۵-۴ مقایسه‌ی حالت‌های تجربی و عددی فرایند شکل‌دهی تدریجی
 ۷۴-۱-۵-۴ مقایسه‌ی اثر ناهمسانگردی بر میزان توزیع کرنش
 ۷۶-۲-۵-۴ مقایسه‌ی اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش
 ۷۷-۳-۵-۴ مقایسه‌ی اثر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام مارپیچ) بر توزیع کرنش
 ۷۸-۴-۵-۴ مقایسه‌ی اثر مسیر ابزار نوع دوم بر میزان شکل‌پذیری

- ۴-۶- مقایسه‌ی توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۸۰
- ۴-۷- پیشنهاد FLD برای ورق آلومینیوم AA6061-O در شکل‌دهی تدریجی ۸۲

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۳

- ۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۴
- ۵-۲- پیشنهادها ۸۵

منبع‌ها ۸۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- انواع فرایندهای شکل‌دهی تدریجی ورق ۴
- شکل ۱-۲- دستگاه تست کشش برای استخراج خصوصیات مکانیکی ورق ۱۷
- شکل ۲-۲- منحنی تنش - کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم AA6061-O ۱۷
- شکل ۳-۲- FLD آلیاژ آلومینیوم AA6061-O [۲۷] ۱۸
- شکل ۴-۲- دستگاه اچ الکتروشیمیایی استفاده شده برای مش بندی ورق آلومینیومی ۱۹
- شکل ۵-۲- ورق آلومینیومی مش بندی شده ۱۹
- شکل ۶-۲- قالب شکل‌دهی تدریجی ورق ۲۱
- شکل ۷-۲- ابزارهای شکل‌دهی به کار رفته در فرایند ISF ۲۲
- شکل ۸-۲- دستگاه تراش CNC در حال انجام فرایند ISF ۲۳
- شکل ۹-۲- مجموعه‌ی مونتاژی قالب فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۲۳
- شکل ۱۰-۲- قالب فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۲۵
- شکل ۱۱-۲- دستگاه پرس هیدرولیک استفاده شده در عملیات شکل‌دهی با قالب کشش سنبه‌ی سرکروی ۲۶
- شکل ۱۲-۲- شماتیک مسیر ابزار نوع اول (در آزمایش) ۲۷
- شکل ۱۳-۲- شماتیک مسیر ابزار نوع دوم (در آزمایش) ۲۸
- شکل ۱۴-۲- شماتیک شکل‌دهی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (در آزمایش) ۲۹
- شکل ۱-۳- کرنش ضخامتی برای اندازه‌ی المان مختلف ۳۴
- شکل ۲-۳- نمای سه بعدی انفجاری از مدل عددی استفاده شده برای شکل‌دهی تدریجی ۳۵
- شکل ۳-۳- کرنش‌های ضخامتی به دست آمده از سرعت‌های مختلف ۴۰
- شکل ۴-۳- مسیر ابزار نوع اول در شبیه‌سازی عددی ۴۲
- شکل ۵-۳- مسیر ابزار نوع دوم در شبیه‌سازی عددی در دو نمای سه بعدی (الف) و (ب) ۴۳
- شکل ۱-۴- مسیرهایی از مش‌های شماره‌گذاری شده برای فرایند ISF ۴۷

- شکل ۴-۲- ترسیم دایره برای به دست آوردن شعاع عرقچین کره‌ای که مش بر روی آن قرار دارد ۴۷
- شکل ۴-۳- شکل مش (الف) قبل از شکل دهی، (ب) بعد از شکل دهی ۴۸
- شکل ۴-۴- (الف) ضخامت سنج لوله، (ب) اندازه‌گیری ضخامت قطعه به وسیله‌ی ضخامت‌سنج، ۴۸
- شکل ۴-۵- مقایسه‌ی ضخامت اندازه‌گیری شده توسط ضخامت‌سنج با ضخامت به دست آمده بر اساس کرنش‌های طولی و عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۰/۵ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۴۹
- شکل ۴-۶- مقایسه‌ی ضخامت به اندازه‌گیری شده توسط ضخامت‌سنج با ضخامت به دست آمده بر اساس کرنش‌های طولی و عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۴۹
- شکل ۴-۷- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۵۰
- شکل ۴-۸- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۵۰
- شکل ۴-۹- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۵۱
- شکل ۴-۱۰- اثر ناهمسانگردی بر کرنش عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۵۱
- شکل ۴-۱۱- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۵۲
- شکل ۴-۱۲- اثر قطر ابزار بر کرنش طولی (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm) ۵۳
- شکل ۴-۱۳- اثر قطر ابزار بر ضخامت ورق (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm) ۵۳
- شکل ۴-۱۴- اثر گام ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۵۴
- شکل ۴-۱۵- اثر گام ابزار بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۵۴
- شکل ۴-۱۶- مقایسه‌ی کیفیت سطح برای گام‌های متفاوت (الف) گام ۰/۵ mm، (ب) گام ۰/۴ mm (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۵۵
- شکل ۴-۱۷- اثر نوع مسیر ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm) ۵۵
- شکل ۴-۱۸- اثر نوع مسیر ابزار بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm) ۵۶
- شکل ۴-۱۹- مسیرهایی از مش‌های شماره‌گذاری شده برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۵۷
- شکل ۴-۲۰- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، بدون استفاده از روانکار ۵۸
- شکل ۴-۲۱- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، بدون استفاده از روانکار ۵۸

- شکل ۴-۲۲- اثر استفاده از روانکار بر کرنش طولی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۵۹
- شکل ۴-۲۳- اثر استفاده از روانکار بر ضخامت در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۵۹
- شکل ۴-۲۴- مراحل تدریجی تشکیل عرقچین کروی در فرایند شکل‌دهی تدریجی (شامل ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱۰۰٪ انجام فرایند) ۶۰
- شکل ۴-۲۵- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۱
- شکل ۴-۲۶- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۲
- شکل ۴-۲۷- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۶۲
- شکل ۴-۲۸- اثر ناهمسانگردی بر کرنش عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۶۲
- شکل ۴-۲۹- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۶۳
- شکل ۴-۳۰- مقایسه‌ی کرنش طولی برای ورق همسانگرد و ناهمسانگرد (قطر ابزار ۸ mm، گام ۰/۵ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۳
- شکل ۴-۳۱- مقایسه‌ی ضخامت برای ورق همسانگرد و ناهمسانگرد (قطر ابزار ۸ mm، گام ۰/۵ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۴
- شکل ۴-۳۲- اثر قطر ابزار بر کرنش طولی (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm) ۶۵
- شکل ۴-۳۳- اثر قطر ابزار بر ضخامت ورق (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm) ۶۵
- شکل ۴-۳۴- اثر قطر ابزار بر کرنش طولی (ارتفاع عرقچین کره ۲۵ mm، گام ۱ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۶
- شکل ۴-۳۵- اثر قطر ابزار بر ضخامت ورق (ارتفاع عرقچین کره ۲۵ mm، گام ۱ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۶
- شکل ۴-۳۶- اثر گام ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۷
- شکل ۴-۳۷- اثر گام مارپیچ بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۶۷
- شکل ۴-۳۸- اثر نوع مسیر ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm) ۶۸
- شکل ۴-۳۹- اثر نوع مسیر ابزار بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm) ۶۸
- شکل ۴-۴۰- (الف) عرقچین کروی و صفحات برش xz ، yz و صفحات موازی با صفحه‌ی xy هر کدام به فاصله‌ی ۵mm از یکدیگر، (ب) برش عرقچین کروی با صفحه‌ی xz ، (ج) برش عرقچین کروی با صفحه‌ی $a-a$ به فاصله‌ی ۵ mm از صفحه‌ی xy ۷۰

- شکل ۴-۴۱- مراحل تدریجی تشکیل عرقچین کروی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (شامل ۰.۲۵٪، ۰.۵۰٪، ۰.۷۵٪ و ۱.۰۰٪ انجام فرایند) ۷۱
- شکل ۴-۴۲- مقایسه نیروی شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی تدریجی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۱ mm و مسیر ابزار نوع اول) با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۷۲
- شکل ۴-۴۳- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت x و y برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۷۳
- شکل ۴-۴۴- مقایسه‌ی ضخامت در جهت x و y برای فرایند سنبه‌ی سرکروی ۷۳
- شکل ۴-۴۵- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۷۴
- شکل ۴-۴۶- مقایسه‌ی ضخامت در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۷۵
- شکل ۴-۴۷- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت عمود بر نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۷۵
- شکل ۴-۴۸- مقایسه‌ی ضخامت در جهت عمود بر نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول) ۷۶
- شکل ۴-۴۹- مقایسه‌ی کرنش طولی در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۸ mm و گام ۰/۵ mm) ۷۶
- شکل ۴-۵۰- مقایسه‌ی ضخامت در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۸ mm و گام ۰/۵ mm) ۷۷
- شکل ۴-۵۱- مقایسه‌ی کرنش طولی در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm) ۷۷
- شکل ۴-۵۲- مقایسه‌ی ضخامت در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm) ۷۸
- شکل ۴-۵۳- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۷۸
- شکل ۴-۵۴- مقایسه‌ی ضخامت در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۷۹
- شکل ۴-۵۵- مقایسه‌ی کرنش طولی در خلاف جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۷۹

- شکل ۴-۵۶- مقایسه‌ی ضخامت در خلاف جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم) ۸۰
- شکل ۴-۵۷- مقایسه‌ی کرنش طولی در فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۸۱
- شکل ۴-۵۸- مقایسه‌ی تغییرات ضخامت در فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی ۸۱
- شکل ۴-۵۹- FLD پیشنهاد شده برای ورق آلومینیوم AA6061-O ۸۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- خواص مکانیکی ورق آلومینیومی AA6061-O به دست آمده از آزمایش تجربی ۱۶
- جدول ۲-۲- خواص مکانیکی فولاد SPK [۲۸] ۲۰
- جدول ۳-۲- خواص مکانیکی ابزار شکل‌دهی [۲۹] ۲۲
- جدول ۱-۴- مقایسه‌ی خروج از دایروی بودن با تغییر قطر ابزار، گام و نوع مسیر ابزار در شبیه‌سازی عددی ۷۰

فهرست نشانه‌ها

r_0	شعاع عرقچین کره	α	زاویه دیواره‌ی قالب کشش
h	عمق عرقچین کره	ε_1	کرنش اصلی
σ_{ij}	تنش	ε_2	کرنش فرعی
σ^0	تنش تسلیم مرجع	F_i	نیروی کشش در جهت i
تنش تسلیم در صورتی که σ_{ij} تنها تنش اعمال شده باشد		t	ضخامت ورق
$\bar{\sigma}_{ij}$	شده باشد	k	ضریب سفتی
r_i	ضریب ناهمسانگردی	E	مدول یانگ
n	توان کرنش سختی	ν	ضریب پواسن
ω	تعداد دوران ابزار برای شکل‌دهی	σ_y	استحکام تسلیم
D_0	قطر اولیه‌ی مش	σ_u	استحکام کششی
D_r	قطر بزرگ مش	h	ارتفاع عرقچین کره
D_θ	قطر کوچک مش	نسبت تنش تسلیم در جهت‌های i و j و R_{ij}	
ε_r	کرنش طولی	ρ	چگالی
ε_θ	کرنش عرضی	HRC	سختی راکول
ε_t	کرنش ضخامتی	$d\varepsilon_{ii}$	نموی کرنش
\bar{R}	شعاع نرمال شده‌ی عرقچین کره	X	جابه‌جایی ابزاری در راستای محور x
D	قطر ابزار شکل‌دهی	Y	جابه‌جایی ابزاری در راستای محور y
P	گام ابزار شکل‌دهی	Z	جابه‌جایی ابزاری در راستای محور z
s	زمان	V_Z	سرعت ابزاری در راستای محور z
		فاصله‌ی عمودی شعاع عرقچین کره از مرکز کره	
		m	

فصل ۱ مقدمه

۱-۱- مقدمه

فرایندهای شکل‌دهی سنتی ورق‌های فلزی به وسیله قالب انجام می‌شوند. به علت هزینه‌های اولیه‌ی بسیار بالا در این فرایندها، حجم تولید محصول باید زیاد باشد تا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه گردد. ولی در بازار رقابتی امروز، تنوع در تقاضاهای مشتریان بسیار زیاد است، یعنی محصولات باید در حجم کم تولید شوند، در نتیجه برای سازگار شدن با احتیاجات متغیر بازار، فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی باید بهبود یابند. از طرفی در فرایندهای شکل‌دهی سنتی ورق‌های فلزی، به دلیل سطح تماس گسترده‌ی سنبه و ورق، نیروی زیادی از طرف سنبه و ماتریس به ورق اعمال می‌شود که قابلیت شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهد.

یکی از فرایندهای شکل‌دهی سنتی ورق‌های فلزی برای ساخت انعطاف‌پذیر و کاهش نیروی شکل‌دهی، عملیات چرخکاری^۱ است. در این عملیات ورق فلزی بر روی سنبه دوار^۲ بسته شده و شروع به حرکت دورانی می‌کند؛ با حرکت خطی تدریجی ابزار بر روی ورق، به تدریج شکل مورد نظر در محصول نهایی ایجاد می‌شود. در این فرایند به دلیل کاهش سطح تماس ابزار و ورق، نیروی مورد نیاز تا حد زیادی کاهش می‌یابد؛ که این امر باعث افزایش قابلیت شکل‌پذیری ورق می‌شود. ولی با استفاده از این روش، فقط می‌توان قطعات متقارن را تولید کرد و قطعات پوسته‌ای شکل با شکل‌های پیچیده و نامتقارن را نمی‌توان با استفاده از فرایند چرخکاری تولید کرد.

به منظور کاهش سرمایه‌گذاری اولیه برای تولید محصول، کاهش نیروهای اعمال شده به ورق فلزی، افزایش قابلیت شکل‌پذیری ورق و تولید قطعات پوسته‌ای شکل با فرم‌های پیچیده و نامتقارن، استفاده از فرایندی نوین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی امری اجتناب‌ناپذیر است. نحوه طراحی این فرایند جدید باید به گونه‌ای باشد که از بروز بسیاری از معایب و محدودیت‌های مطرح شده در حین عملیات شکل‌دهی جلوگیری کند. این امر سبب می‌شود تا در مدت زمان مشخص، عملیات تغییر شکل پلاستیک در ناحیه کوچکی از ورق متمرکز گردد. بنابراین می‌توان بسیاری از آسیب‌های احتمالی در محصول نهایی را حذف کرد [۱].

^۱ Spinning

^۲ Mandrel

۲-۱- تعاریف

نوعی از فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی که در آن در هر لحظه فقط بخش کوچکی از محصول شکل‌دهی می‌شوند، شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی^۱ نامیده می‌شود. ورق به وسیله‌ی ابزاری که اندازه آن نسبت به اندازه محصول بسیار کوچک است، شکل‌دهی می‌شود. به منظور ایجاد حرکت ابزار می‌توان از ربات یا ماشین کنترل عددی رایانه‌ای (CNC) استفاده کرد. به کمک این دستگاه‌ها، ابزار شکل دلخواه را در فضا دنبال می‌کند. در واقع شکل‌دهی با حرکت تدریجی و برنامه‌ریزی شده ابزار بر روی ورق انجام می‌شود. در این فرایند، چون شکل قطعه با حرکت ابزار تعیین می‌شود و ورق ثابت است؛ با کنترل مستقل محورهای x و y ، ساخت اشکال نامتقارن نیز امکان‌پذیر است. از این‌رو به آن شکل‌دهی تدریجی نامتقارن ورق^۲ نیز می‌گویند که کاربردهای آن شامل شکل‌دهی متقارن هم می‌شود.

در فرایند ISF لبه‌های ورق مهار می‌شوند و به سمت داخل حرکت نمی‌کنند. در نتیجه، ضخامت دیواره‌ی ورق به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. وقتی از هیچ ساپورت اضافی در زیر ورق استفاده نشده باشد به آن شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای^۳ می‌گویند (شکل ۱-۱ الف) و اگر از یک قالب کامل (ساپورت کامل) یا بخشی از یک قالب (ساپورت جزئی) در زیر ورق استفاده شده باشد، به آن شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای^۴ می‌گویند (شکل ۱-۱ ب و ج). در انواع دیگر برای ایجاد اشکال پیچیده ممکن است از یک ابزار کوچک ثانویه که مستقل از ابزار اولیه کنترل می‌شود، به جای ساپورت استفاده شود که به آن شکل‌دهی تدریجی سینماتیکی^۵ می‌گویند. در نهایت ISF را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: یک خانواده از فرایندهای شکل‌دهی ورق که در آنها بر روی یک ورق کاملاً مهار شده، تغییر شکل موضعی شدید ایجاد می‌کنند و بدون لزوم احتیاج به قالب، شکل نهایی به وسیله‌ی جابه‌جایی ابزار، ایجاد می‌شود [۲].

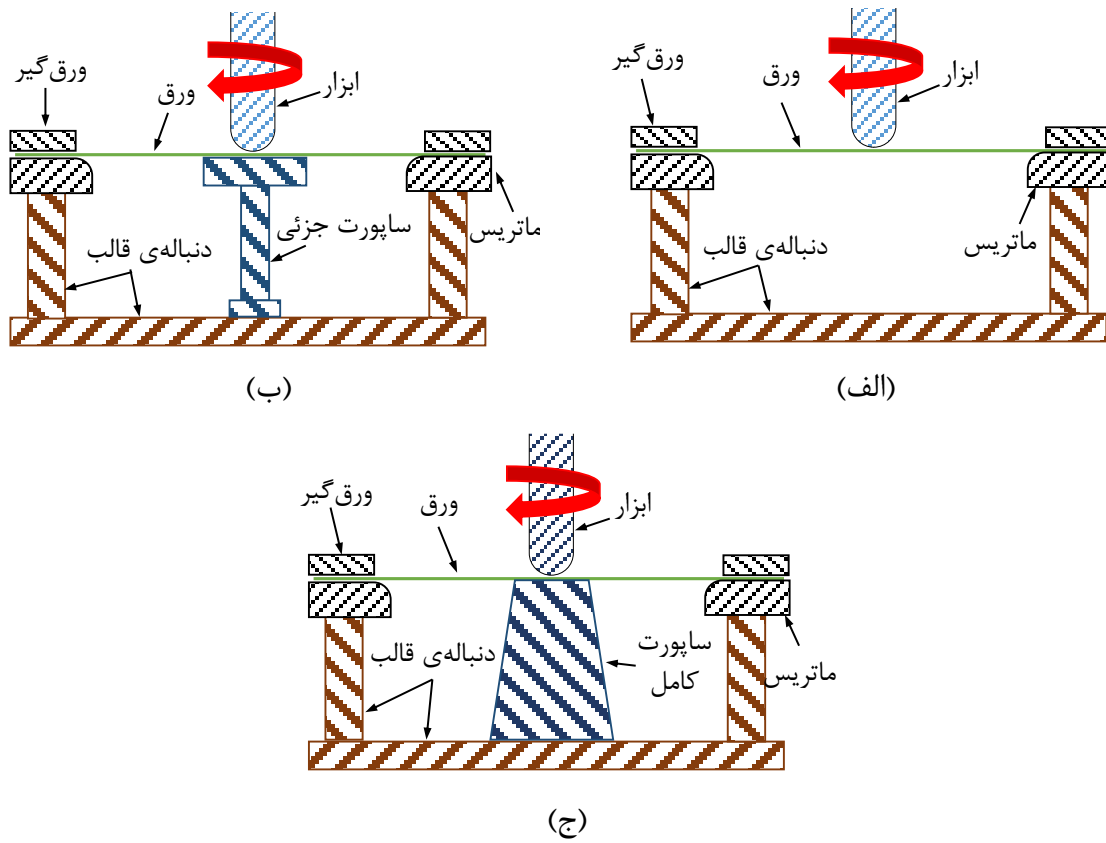
¹ Incremental Sheet Forming (ISF)

² Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF)

³ Single Point Incremental Forming (SPIF)

⁴ Two Point Incremental Forming (TPIF)

⁵ Kinematic Incremental Sheet Forming



شکل ۱-۱- انواع فرایندهای شکل‌دهی تدریجی ورق

(الف) شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای (SPIF)، (ب) شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای (TPIF) با ساپورت

جزئی، (ج) شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای (TPIF) با ساپورت کامل.

۱-۳- کاربردها

بسیاری از قطعات صنعتی که در خودروسازی یا صنایع نظامی به کار می‌روند؛ به روش کشش عمیق^۱ یا مهرزنی^۲ تولید می‌شوند. این محصولات در مراحل اولیه توسعه‌ی خود احتیاج به تولید نمونه دارند و چون هزینه‌ی ساخت قالب زیاد است، باید یک فرایند انعطاف‌پذیرتر برای ساخت نمونه جستجو کرد. فرایند شکل‌دهی تدریجی قادر به تولید سریع قطعات نمونه می‌باشد و در صورت لزوم اجازه‌ی انجام اصلاحات در آنها را می‌دهد تا قطعه‌ی نمونه‌ی دیگر، با کمترین هزینه ساخته شود [۳].

از طرفی بسیاری از قطعات در صنایع هوایی و نظامی دارای تیراژ پایین هستند و ساخت قالب برای این قطعات، صرفه‌ی اقتصادی ندارد. فرایند شکل‌دهی تدریجی با وجود آنکه فرایند کندی است، ولی زمان و هزینه‌ی لازم برای ساخت قالب در فرایندهای سنتی و عدم نیاز به ساخت قالب در فرایند ISF، تولید با این روش را از نظر اقتصادی برای این نوع قطعات توجیه‌پذیر می‌کند [۴]. همچنین بسیاری از قطعات که در صنایع پزشکی یا حتی در صنایع نظامی کاربرد دارند، دارای شکل‌های نامتقارن و پیچیده‌ای هستند و یا جنس ماده‌ی آنها طوری است که به راحتی به وسیله فرایندهای سنتی قابل شکل‌دهی نیستند. در فرایند ISF، به دلیل شکل‌دهی موضعی قطعه، قابلیت شکل‌پذیری ماده افزایش می‌یابد؛ همچنین چون محصول با حرکت ابزار شکل‌دهی بر روی ورق ثابت شکل‌دهی می‌شوند، این قطعات به راحتی قابل تولید می‌باشند [۵].

۱-۴- تاریخچه [۲]

سرچشمه‌ی اصلی شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی را می‌توان کارهای انجام شده توسط میسون از دانشگاه ناتینگهام دانست. میسون فرایندهای شکل‌دهی مناسب برای تولید با تیراژ کم را بازنگری کرد، سپس یک فرایند با استفاده از یک غلطک کره‌ای مجزا را پیشنهاد کرد که بتواند روی سطح قطعه‌کار در سه جهت محورهای مختصات حرکت کند. یعنی یک روش ساده برای تولید قطعات شکل‌دهی شده استفاده از غلطک‌های کره‌ای است که از یک سمت قطعه‌کار روی آن کار می‌کنند. روش پیشنهادی میسون، اصلی‌ترین قانون شکل‌دهی تدریجی یعنی ایجاد محیط‌های برجسته روی قطعه با استفاده از یک پانچ یا غلطک کوچک که شکل نهایی محصول را در فضا دنبال می‌کرد، بود. کارهای میسون توسط همکارش اپلیتن در یک همایش

¹ Deep Drawing

² Stamping

در کیوتو در سال ۱۹۸۴ ارائه شد و به نظر می‌آید پیشرفت‌ها در زمینه شکل‌دهی تدریجی ورق از آن به بعد روانه ژاپن شدند.

پیشگامان فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق در ژاپن ایسه‌کی و همکاران او بودند که با رجوع به کارهای میسون و فکرهای ذاتی او از مسیر ابزار سه بعدی یک ماشین فرز CNC، ساخت اولین قطعات نامتقارن محوری را نشان دادند. در آزمایش آنها، ورق در اطراف خود کاملاً محکم نگهداشته شده و جابه‌جا نمی‌شد، ضمن آن‌که از هیچ قالب اضافی در طرف دیگر ورق استفاده نشده بود. ابزار محیط‌هایی را از بیرون به سمت داخل ترسیم کرده و همزمان که به سمت مرکز ورق پیش می‌رفت، به تدریج به سمت پایین نیز حرکت می‌کرد. در نوع دیگری از فرایند که برای اولین بار توسط ماتسوبارا پیشنهاد شد، ورق که از اطراف خود کاملاً مهار شده بود، همزمان با حرکت ابزار به طور عمودی به سمت پایین حرکت می‌کرد؛ در حالی که از ناحیه مرکز خود ساپورت می‌شد. ابزار محیط‌هایی را از داخل به سمت بیرون ترسیم می‌کرد و به تدریج همراه با قسمت‌هایی از ورق که هنوز شکل‌دهی نشده بودند، به سمت پایین حرکت می‌کرد.

در سال ۱۹۹۷ یک کنفرانس در ژاپن با حضور چند محقق غربی برگزار شد. آنها به شدت تحت تأثیر سادگی فرایند شکل‌دهی تدریجی، که می‌توانست با استفاده از یک ماشین فرز CNC تجاری ساده انجام گیرد، قرار گرفتند. از آن تاریخ به بعد مطالعات گسترده‌ای روی فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، همزمان با ژاپن در جهان غرب نیز صورت گرفت که در بخش‌های بعد به طور مختصر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

۱-۵- مروری بر تحقیقات پیشین

در ISF، مسیر حرکت ابزار به وسیله برنامه‌ی قطعه‌ی تولید شده با استفاده از نرم‌افزار ساخت به کمک کامپیوتر^۱ کنترل می‌شود. در شبیه‌سازی عددی فرایند نیز، ابزار باید دقیقاً همان مسیر آزمایشگاهی را طی کند، تا نتایج قابل اتکا باشند. ولی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، فایل "جی-کد" تولید شده به وسیله نرم‌افزارهای CAM را به طور مستقیم قبول نمی‌کنند، همچنین مسیر ابزار تولید شده به وسیله نرم‌افزار شبیه‌سازی را نمی‌توان به طور مستقیم وارد نرم‌افزار CAM کرد [۶].

مسیر ابزار نقش حیاتی در دقت هندسی قطعه، صافی سطح، زمان فرایند و توزیع یکنواخت ضخامت بازی می‌کند، بنابراین ایجاد مسیر ابزار مناسب یک مرحله‌ی مهم در شکل‌دهی تدریجی است و برای تولید موفق

^۱ Computer Aided Manufacturing (CAM)

قطعات، بسیار حیاتی است [۷]. در نوع خاصی از مسیر حرکت ابزار در ISF که مسیر ابزار پروفیل^۱ نامیده می‌شود، ابزار در یک صفحه تا زمانی که به نقطه‌ی اولیه‌اش برسد حرکت می‌کند، سپس با یک پله با عمق مشخص به سمت پایین حرکت کرده پس از رسیدن به صفحه‌ی بعدی، مسیری مشابه سیکل قبلی را می‌پیماید و این فرایند تا زمانی که هندسه‌ی قطعه کامل شود، ادامه می‌یابد. مسیر ابزار پروفیل هر هندسه‌ی پیچیده‌ای را می‌تواند تولید کند، اما اثر ابزار بر روی قطعه‌ی تولیدی باقی می‌ماند که برای قطعاتی که زیبایی آنها مهم است ممکن است، مجاز نباشد. در نوع دیگر مسیر حرکت ابزار در ISF که مسیر ابزار مارپیچ نامیده می‌شود، ابزار به‌صورت مارپیچ در امتداد محیط قطعه‌کار حرکت می‌کند؛ در حالی که فاصله یک نقطه از سیکل از نقطه متناظر آن در سیکل بعدی ثابت و مساوی با عمق پله است [۶]. در مسیر ابزار مارپیچ اثر ابزار بر روی سطح قطعه‌ی تولید شده باقی نمی‌ماند و توزیع ضخامت یکنواختی را ایجاد می‌کند.

جاده‌ها [۸]، در قطعات شکل‌دهی شده با مسیر مارپیچ، نوعی پیچش و تورفتگی مشاهده کرد. وی برای غلبه بر این مشکل، یک مسیر ابزار پروفیل دوجهتی را پیشنهاد کرد. در این نوع مسیر، ابزار در هر سیکل متوالی، جهت حرکت خود را تغییر می‌دهد؛ در نتیجه پیچش حداقل شده و باعث می‌شود دقت هندسی قطعات شکل‌دهی شده بالا رود. همچنین مسیر ابزار پروفیل دو جهته با نمودی توزیع شده، توسط وی پیشنهاد شد. در این نوع مسیر، ابزار یک سیکل را کامل می‌کند و یک ربع از سیکل، قبل از آن که ابزار به سمت سیکل بعدی حرکت کند به آن اضافه می‌شود. با انجام این کار، موقعیت شروع یک سیکل، با سیکل بعدی متفاوت شده و اثر ابزار بر روی قطعه دیگر قابل رؤیت نخواهد بود. همچنین چون نیروی شکل‌دهی در امتداد لبه‌ی قطعه به طور یکنواخت توزیع می‌شود، دقت هندسی قطعه نیز بالا خواهد رفت.

نرم‌افزارهای CAM فقط برای قطعات متقارن می‌توانند حرکت مارپیچی تولید کنند، برای غلبه بر این مشکل اسکيوئت و همکاران [۸]، روشی برای تبدیل مسیر پروفیل به مسیر مارپیچ پیشنهاد کردند. برنامه‌ی آنها برای هر هندسه‌ی ایجاد شده به وسیله‌ی مسیر پروفیل، مسیر مارپیچ تولید می‌کرد. کورا سورش و همکاران [۶]، روشی برای وارد کردن مسیرهای حرکت ابزار تولید شده با استفاده از بسته‌های CAM، به نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی پیشنهاد کردند. بلاگا و همکاران [۷]، تأثیر مسیر ابزار بر روی توزیع کرنش، لاغرشدگی نسبی و نیروی شکل‌دهی در فرایند ISF را مورد بررسی قرار دادند. آنها توزیع کرنش و نیروی شکل‌دهی همگن‌تر و دارای مقادیر کمتر را برای مسیر ابزار مارپیچ مشاهده کردند. راجیو موله‌وترا و همکاران [۹]، به منظور کاهش زمان شکل‌دهی، روشی برای تولید مسیر ابزار مارپیچی اتوماتیک با عمق پله‌ی متغیر برای

^۱ Profile tool path

قطعات متقارن و نامتقارن پیشنهاد کردند. در این روش گام ماریپیچ بر اساس ارزیابی داده‌های فرایند در طول ساخت قطعه تعدیل می‌شد و یک انعطاف‌پذیری بالا در شکل‌دهی تدریجی را تضمین می‌کرد.

یکی از بزرگترین مشکلاتی که در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی پیش می‌آید، پدیده‌ی برگشت فنری^۱ است. در فرایند ISF به دلیل وجود کرنش‌های ارتجاعی، پس از برداشته شدن فشار ابزار، ورق تمایل دارد به حالت اولیه‌ی خود بازگردد، این اثر که برگشت فنری نامیده می‌شود، در صورتی که در طراحی اولیه مورد توجه قرار نگرفته باشد، موجب تغییر تolerانس‌ها و ابعاد محصول می‌شود. برخی از مطالعات صورت گرفته در این زمینه، نشان دادند که آزاد شدن تنش یکی از عوامل اساسی است که دقت هندسی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و خطای شکل‌دهی با کاهش تنش پسماند، طراحی مسیر ابزار مناسب و اتخاذ فرایند آنیل کردن، می‌تواند بهبود یابد [۸]. وی هونگ یو و همکاران [۱۰]، روش ارزیابی برگشت فنری بر پایه تصحیح خطای شکل‌دهی را پیشنهاد کردند، که به صورت اختلاف بین مقادیر تئوری و واقعی از تصحیح (جبران) در امتداد جهت اندازه‌گیری تعریف می‌شود. فی و همکاران [۱۱] ابتدا مدل شبیه‌سازی برگشت فنری را با مدل تجربی مقایسه کردند و مشاهده نمودند که نتایج تجربی و عددی مشابه هستند. سپس برای تحلیل برگشت فنری ورق، اختلاف زاویه قبل و بعد از برگشت فنری در برش متقارن قطعه مخروطی ناقص را به عنوان شاخص تجربی برگشت فنری به حساب آوردند.

آنها عوامل موثر در شکل‌دهی تدریجی را که شامل: نسبت استحکام تسلیم به مدول الاستیک ورق، ضخامت ورق، قطر سر ابزار، ارتفاع قطعه‌کار شکل‌دهی شده، نصف زاویه‌ی سر قطعات شکل‌دهی شده، عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام ابزار) می‌شد را به ترتیب با A, B, C, D, E و F نمایش دادند و میزان اثرگذاری هر یک از عوامل در برگشت فنری را به صورت زیر استخراج کردند.

$$E > D > C > A > F > B$$

وحدتی و همکاران [۱۲]، اثر پارامترهایی همچون: اندازه‌ی گام عمودی ابزار، ضخامت ورق، قطر ابزار، نرخ پیشروی ابزار و سرعت دورانی اسپیندل را بر پدیده‌ی برگشت فنری در شکل‌دهی تدریجی ورق آلومینیومی AA1050-O به صورت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برگشت فنری با کاهش اندازه‌ی گام عمودی، افزایش ضخامت ورق، افزایش قطر ابزار، افزایش سرعت

¹ Spring Back

پیشروی و افزایش سرعت اسپیندل؛ کاهش می‌یابد. همچنین پارامترهای قطر ابزار، ضخامت ورق و اندازه‌ی گام عمودی ابزار را به عنوان مؤثرترین پارامترها بر میزان برگشت فنری معرفی کردند.

در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، به خاطر این واقعیت که برای یک جنس و ضخامت خاص ورق، زاویه‌ی دیواره بیشینه‌ی محدودی است؛ بسیاری از هندسه‌های خاص، نمی‌توانند شکل‌دهی شوند. چون اگر زاویه‌ی دیواره‌ی قطعه از این زاویه خاص تجاوز کند، قطعه در طول ساخت خراب خواهد شد. محدودیت انتخاب زاویه برای یک جنس و ضخامت خاص ورق در فرایند SPIF می‌تواند به طور مستقیم از قانون سینوس‌ها به دست آید. با این فرض که فقط کرنش‌های صفحه‌ای ایجاد می‌شوند، قانون سینوس‌ها (۱-۱)، می‌تواند برای تخمین ضخامت ورق پس از شکل‌دهی، از ضخامت اولیه‌ی ورق، با اعمال زاویه‌ی دیواره‌ی α به کار رود.

$$1-1 \quad \text{ضخامت ورق اولیه} = \text{ضخامت ورق پس از شکل‌دهی} \times \sin(90^\circ - \alpha)$$

به طور تجربی تایید شده است که فرایند کما بیش از این قانون پیروی می‌کند [۱۳]. از قانون سینوس‌ها می‌توان برداشت کرد که هرچقدر شیب زاویه‌ی دیواره تندتر باشد، ناحیه‌ی شکل‌دهی شده لاغرتر می‌شود. برای افزایش زاویه‌ی دیواره‌ی بیشینه، یک روش افزایش ضخامت اولیه‌ی ورق می‌تواند باشد؛ ولی این روش دارای محدودیت‌های خاص خود در زمینه‌ی حداکثر بار ماشین و ویژگی‌های ضخامت قطعه‌ی نهایی است. راه دیگر، انتقال مواد از ناحیه‌های دیگر ماده به قسمت‌های شیب‌دار، با هدف توزیع مجدد ماده در آن قسمت‌ها است [۱۴].

وربرت و همکاران [۱۳]، دو مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی 70° از ورق Al3003-O با ضخامت ۱/۲ mm را، یک بار به صورت تک مرحله‌ای و بار دیگر به صورت چند مرحله‌ای با زاویه‌های میانی 50° و 60° ، شکل‌دهی کرده و پروفیل‌های ضخامت آنها را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که ضخامت دیواره‌ی مخروط به دست آمده از مسیر ابزار چند مرحله‌ای به طور قابل توجهی بیشتر از ضخامت دیواره‌ی مخروط به دست آمده از مسیر ابزار تک مرحله‌ای است. در آزمایش دیگر آنها طی ۵ مرحله، یک ورق از جنس Al3103-O به ضخامت ۱/۵ mm را ابتدا به مخروط با زاویه‌ی دیواره‌ی 50° و سپس با 10° افزایش در هر مرحله به استوانه‌ی قائم تبدیل کردند. آنها پروفیل‌های ضخامت اندازه‌گیری شده از مخروط‌ها در پله‌های مختلف و ضخامت به دست آمده از قانون سینوس‌ها برای زاویه 75° (زاویه‌ی بیشینه برای ورق در شکل‌دهی تک مرحله‌ای) رسم کردند و مشاهده نمودند که ضخامت در باریک‌ترین نقطه در زاویه‌ی 90° به کمتر از ضخامت

کمینه‌ی پیش‌بینی شده توسط قانون سینوس‌ها برای زاویه 75° است. قطعه‌کار تولید شده در این حالت نزدیک به حالت خرابی بود.

بزرگترین مشکل در تولید به روش شکل‌دهی ورق‌ها، محدودیت در تغییر شکل مجاز ورق تا ناحیه پارگی است که گذر از این ناحیه به ایجاد ترک‌هایی در نقاط مختلف محصول منجر می‌شود. حد نهایی کرنش، به کرنشی گفته می‌شود که ادامه شکل‌دهی پس از آن منجر به تولید قطعه‌ی معیوب می‌شود و به فاکتورهای از جمله نوع ماده، ناهمگنی هندسی و خواص مکانیکی ماده، شیوه و تاریخچه‌ی بارگذاری، شرایط دما، نرخ کرنش، اصطکاک و ضخامت بستگی دارد. یکی از روش‌های مفید در تعیین حد شکل‌پذیری و جلوگیری از پارگی ورق‌ها، استفاده از منحنی حد شکل‌دهی^۱ (FLD) می‌باشد. این منحنی علاوه بر میزان شکل‌پذیری، مرز کرنش مجاز برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی را نیز تعیین می‌کند [۱۵]. FLD به عنوان ابزاری برای تخمین شکل‌پذیری در فرایند ISF استفاده می‌شود. در فرایند ISF کرنش‌های بزرگتری می‌تواند به دست آید، بر این اساس FLD به دست آمده از فرایندهای سنتی نمی‌تواند برای تحلیل فرایند ISF مؤثر باشد [۱۶]. فیلیس و همکاران [۱۷]، FLD برای شکل‌دهی تدریجی در ناحیه‌ی $\epsilon_2 > 0$ (ϵ_{minor}) را تعیین کردند. آنها نشان دادند که این منحنی در ناحیه‌ی ذکر شده، دارای شیب منفی بوده و از FLDهای فرایندهای سنتی بسیار بالاتر است. تیسزا [۱۸] FLD را هم برای $\epsilon_2 > 0$ و هم برای $\epsilon_2 < 0$ تعیین کرد. وی نشان داد که شکل‌پذیری در شکل‌دهی تدریجی بسیار بیشتر از شکل‌دهی سنتی است و بیشترین اختلاف در شرایط کرنش صفحه‌ای اتفاق می‌افتد. با شروع از این مقدار بیشینه، شکل‌پذیری در هر دو جهت راست و چپ کاهش می‌یابد. همچنین شکل‌پذیری در شکل‌دهی تدریجی با افزایش ضخامت، افزایش می‌یابد.

کیم و پارک [۱۹] آزمایش تولید شیار مستقیم بر روی ورق AA1050 را انجام دادند تا عوامل تأثیرگذار در شکل‌پذیری از قبیل نوع ابزار، اندازه‌ی ابزار، عمق نفوذ ابزار در هر مرحله، اصطکاک بین ابزار-ورق و ناهمسانگردی صفحه‌ای ورق را بررسی و مطالعه کنند. معیار شکل‌پذیری آنها، مجموع کرنش اصلی و کرنش فرعی بود که به صورت اسکالر ($\epsilon_1 + \epsilon_2$) نمایش داده می‌شود. آنها از ابزارهای سر کروی و ساچمه‌ای با قطرهای مختلف، یک بار با استفاده از روانکار و بار دیگر بدون استفاده از روانکار، برای ایجاد شیار روی ورق، یک بار در جهت نورد و بار دیگر عمود بر جهت نورد، استفاده کردند و به نتایج زیر رسیدند:

¹ Forming Limit Di

- شکل‌پذیری ورق وقتی از ابزار ساچمه‌ای استفاده می‌شود نسبت به وقتی که از ابزار سر کروی استفاده می‌شود، بیشتر است.
- وجود اصطکاک به میزان کم در سطح تماس ورق - ابزار باعث بهبود شکل‌پذیری می‌شود.
- هرچه قدر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله کمتر باشد، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد.
- در اثر وجود ناهمسانگردی صفحه‌ای، شکل‌پذیری در جهت‌های مختلف حرکت ابزار متفاوت به دست آمد.

نیروی لازم برای شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، بسیار کمتر از نیروی لازم برای شکل‌دهی در فرایندهای سنتی مانند کشش عمیق می‌باشد. همچنین برخلاف فرایندهای سنتی ابعاد قطعه بر میزان این نیروها اثر ندارد، با این وجود پیش‌بینی این نیروها برای طراحی ابزارآلات و تعیین توان لازم دستگاه ضروری است [۲۰]. ضمن آنکه، یکی از مهمترین عوامل در دقت قطعه‌ی نهایی در فرایند شکل‌دهی تدریجی، نیروی شکل‌دهی می‌باشد که به ابزار وارد می‌شود. در واقع، نیروهای شکل‌دهی باعث انحراف ابزار از مسیر ایده‌آل و پایین آمدن دقت هندسی قطعات می‌شود [۲۱]. جوست دفلو و همکاران [۱]، نیروهای به وجود آمده در فرایند شکل‌دهی تدریجی را به صورت تجربی با استفاده از نیروسنج رومیزی^۱ که تجهیزات شکل‌دهی تدریجی شامل ورق آلومینیومی و نگهدارنده‌ی آن بر روی آن نصب می‌شود، اندازه‌گیری کردند و تأثیر چهار پارامتر فرایندی اندازه‌ی فاصله‌ی عمودی بین نقاط متوالی، قطر ابزار، شیب دیواره‌ی قطعات و ضخامت ورق فلزی را بر نیروی شکل‌دهی بررسی کردند. آنها همچنین تأثیر روغنکاری و هندسه‌ی قطعه‌ی مورد آزمایش بر نیروی شکل‌دهی، در فرایند شکل‌دهی تدریجی را با یک سری آزمایش مورد مطالعه قرار دادند؛ در ضمن پیش‌بینی خرابی قطعه بر پایه‌ی شکل منحنی نیرو را توضیح دادند. آزمایش‌های آنها بر پایه‌ی تولید قطعه‌ای با هندسه‌ی ساده‌ی یک مخروط ناقص بود و نیروهای F_x ، F_y و F_z در سه جهت منطبق بر سیستم مختصات کارتزین اندازه‌گیری شدند. سپس این سه جزء نیرو، به صورت بردار نیروی کل، جمع برداری شدند. آنها در بررسی‌های خود بر روی منحنی نیروی شکل‌دهی مشاهده کردند که این منحنی به محض آغاز شکل‌دهی، از صفر شروع می‌شود. در ادامه با افزایش عمق، نیرو به سرعت افزایش می‌یابد تا زمانی که عمق به جایی می‌رسد که نیروها تمایل دارند تقریباً ثابت بمانند. آنها ادعا کردند که این به دو دلیل اتفاق می‌افتد: یکم، تا زمانی که تعدادی از محیط‌ها ساخته شوند، ابزار ناحیه تماسی کاملاً درگیر با ورق ندارد و دوم، بر نیروی به وجود آمده با شروع کردن نزدیک لبه‌ی صفحه‌ی پشتی باید غلبه شود. برای اثبات

^۱ Table Type Dynamometer

تکرارپذیری نتایج، آنها با شش بار تولید یک مخروط با پارامترهای فرایندی یکسان، نیروی به دست آمده در هر یک از آزمایش‌ها را با هم مقایسه کردند و نتایج قابل قبولی را به دست آوردند. در ادامه آنها اثر هر یک از متغیرهای فرایند بر روی نیروی شکل‌دهی را بررسی کرده و مشاهده نمودند که اگر اندازه‌ی قطر ابزار، اندازه‌ی پله‌ی عمودی، زاویه‌ی دیواره یا ضخامت ورق افزایش یابد، بر همان اساس نیرو افزایش خواهد یافت. ضمن آن‌که، اندازه‌ی پله‌ی عمودی کمترین اهمیت را دارد و بنابراین در راستای کمتر شدن زمان تولید قطعه، می‌تواند بدون خطای زیاد افزایش یابد.

شرایط حاکم بر تغییر شکل در SPIF، موضوع بحث در جامعه‌ی شکل‌دهی فلزات بوده است. برخی پژوهشگران ادعا کرده‌اند که این تغییر شکل در اثر کشش اتفاق می‌افتد، در حالی که برخی دیگر برش را عامل اصلی تغییر شکل در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای دانسته‌اند. بررسی شرایط احتمالی شکست مواد در ناحیه‌ی جاری شدن بین دیواره‌ی شیب‌دار و شعاع گوشه ورق با این واقعیت که کشش بیشتر از برش، وضعیت حاکم بر تغییر شکل در SPIF است؛ سازگار است. ام.بی.سیلوا و همکاران [۲۲]، یک مدل تحلیلی که قادر است اصول شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای (SPIF) را بر اساس تحلیل غشایی با شرایط کرنش صفحه‌ای و متقارن چرخشی بیان کند، ایجاد کردند. آنها با مقایسه‌ی کرنش‌های حدی SPIF و کرنش‌های حدی به دست آمده از منحنی‌های حد شکل‌دهی سنتی، مشاهده کردند که این کرنش‌ها وقتی در فضای کرنش‌های اصلی (ϵ_1, ϵ_2) رسم شوند، بسیار بالاتر از حد کرنش‌های به دست آمده از فرایندهای سنتی شکل‌دهی ورق قرار می‌گیرند. برای پیوند کرنش‌های نمودار حد شکل‌دهی سنتی با کرنش‌های حدی SPIF، حالت‌های خرابی در این دو روش را یکسان فرض کردند و گلوبی شدن را معیار حدی در نظر گرفتند و گفتند که اگر کرنش‌های حدی SPIF بیش از نمودار حد شکل‌دهی باشد، می‌تواند به این معنی باشد که فرض گلوبی شدن، به عنوان حد در SPIF، نادرست می‌باشد. آنها با اندازه‌گیری دقیق تغییر ضخامت با عمق در امتداد دو برش عرضی نصف النهاری قطعه‌ی مخروط ناقص با زاویه‌ی کشش مختلف که از ورق آلومینیومی AA1050-H111 با ضخامت اولیه‌ی ۱ mm ساخته شده‌اند، نشان دادند که تغییر شکل پلاستیک با نازک شدن یکنواخت تا لحظه‌ی شکست اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر هیچ مدرک تجربی وجود ندارد که قبل از رسیدن به شروع شکست، گلوبی شدن موضعی اتفاق افتاده باشد. همچنین به دلیل وجود سطح کرنش‌های بسیار بالاتر از منحنی حد شکل‌دهی فرایندهای شکل‌دهی سنتی نشان داد که قطعات SPIF، بدون گلوبی شدن شکل‌دهی می‌شوند و مکان هندسی کرنش‌های شکست در SPIF بیشتر شبیه به نمودار حد شکل‌دهی شکست است.

دوفلو و همکاران [۲۳]، برای بهبود دقت ابعادی و کاهش برگشت فزنی در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، ناحیه‌ی تماس ابزار - ورق را با تابش پرتو لیزر به صورت موضعی حرارت‌دهی کردند به طوری که همزمان با حرکت ابزار از یک سمت ورق، تفنگ لیزر از سمت دیگر ورق در راستای آن حرکت می‌کرد. آنها مشاهده کردند که با این روش، نیروهای فرایند کاهش یافته و شکل‌پذیری و دقت ابعادی برای طیف وسیعی از مواد افزایش قابل توجهی می‌کند.

دیتریچ و همکاران [۲۴]، فرایند شکل‌دهی تدریجی را از نقطه نظر اثرات زیست محیطی با فرایندهای شکل‌دهی سنتی مقایسه کردند. این مقایسه زنجیره‌ی تأمین قطعات (تولید مجموعه قالب، تولید ورق آلومینیوم و ...) را نیز شامل می‌شد. نتایج مطالعه‌ی آنها نشان داد که فرایند ISF از نقطه نظر اثرات زیست محیطی برای نمونه‌سازی و تولید با حجم کم بسیار مفید است.

کیانگ فن و همکاران [۲۵]، ورق تیتانیوم Ti-6Al-4V را که در صنایع هوا - فضا بسیار کاربرد دارد، را به صورت ISF گرم، شکل‌دهی کرده و عوامل مؤثر بر کیفیت سطح در شکل‌دهی را مطالعه و بررسی کردند. بررسی‌های آنها نشان داد که استفاده از روانکار MoS_2 با ضخامت فیلم $20 \mu\text{m}$ برای ورق به ضخامت mm ۱، در دماهای $600^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ بهترین کیفیت سطح با کمترین میزان اکسید شدگی ورق را به دست می‌دهد.

تاکانو و همکاران [۲۶]، امکان بازیابی سرد ورق‌های فلزی ضایعاتی را به وسیله فرایند شکل‌دهی تدریجی مورد مطالعه قرار دادند. آنها ابتدا ضایعات، که در قسمت‌های مختلف دارای شکل‌ها و ضخامت‌های مختلف بودند، را به صورت ورق‌های مسطح (دارای ضخامت‌های غیر یکنواخت) درآورده و حد شکل‌دهی آنها را با حد شکل‌دهی ورق‌های سالم (دارای ضخامت یکنواخت) مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که حد شکل‌دهی در هر دو ورق مشابه هم هستند. آنها نتیجه گرفتند که بازیافت سرد ورق‌های ضایعاتی فلزی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی، امکان‌پذیر است.

۱-۶- اهداف و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق (ISF)، بر اساس تغییر شکل پلاستیک موضعی در ورق‌های فلزی نازک می‌باشد. هرچند این فرایند در مقایسه با روش‌های شکل‌دهی سنتی از قبیل مهرزنی، کند می‌باشد. ولی کاهش هزینه‌ها در اثر حذف سنبه و قالب، آن را به فرایندی جذاب برای نمونه‌سازی سریع و تولید با حجم کم تبدیل نموده است. فرایند ISF به شدت به مسیر ابزار شکل‌دهی که بر روی دقت ابعادی و توزیع ضخامت

اثر می‌گذارد، وابسته است. در نتیجه توزیع یکنواخت ضخامت احتیاج به بهینه‌سازی دقیق تنظیمات فرایند و تعریف مسیرهای بهینه‌ی شکل‌دهی دارد. در این پایان‌نامه، ابتدا با انجام آزمایش تجربی با استفاده از مسیر ابزار نوع اول، کرنش‌ها و توزیع ضخامت در قطعه‌کار اندازه‌گیری شده است. در این نوع مسیر، ابزار با حرکت روی یک مسیر پیوسته‌ی مارپیچ‌کروی با گام عمودی مشخص، از بزرگترین قطر به سمت مرکز در بیشترین عمق حرکت می‌کند و تماس ابزار با قطعه‌کار در طول شکل‌دهی قطع نمی‌شود. سپس با هدف بهبود شکل‌پذیری و دستیابی به توزیع ضخامت یکنواخت‌تر، مسیر ابزار نوع دوم تعریف شد که یک مسیر ناپیوسته است، در این مسیر ابزار ابتدا به اندازه‌ی گام معین عمودی روی محور قطعه حرکت کرده و به عمق جدید می‌رسد. سپس روی یک مسیر مارپیچ‌صفحه‌ای با گام شعاعی مشخص از مرکز به سمت بزرگترین شعاع در آن عمق حرکت می‌کند. شبیه‌سازی المان محدود مسیر ابزار نوع اول با استفاده از قابلیت زیربرنامه‌ی^۱ VDISP و شبیه‌سازی مسیر حرکت ابزار نوع دوم با استفاده از قابلیت دامنه^۲ در حل‌گر صریح آباکوس^۳ انجام شده است. سپس اثر پارامترهایی چون قطر ابزار و عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام) بر توزیع کرنش هم به صورت عددی و هم به صورت تجربی بررسی شده است. و در ادامه، با انجام آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، توزیع کرنش در فرایند ISF با توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی سنتی کشش با سنبه‌ی سرکروی مقایسه شده است. در پایان نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی با هم مقایسه شده است. در ادامه‌ی این پایان‌نامه، منظور ISF، شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای است.

پایان‌نامه‌ی حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول، مقدمه‌ای راجع به فرایند و ویژگیها و پارامترهای دخیل در آن آورده شده است. همچنین اشاره‌ای به پژوهش‌های پیشین در این زمینه و اهداف پایان‌نامه شده است. فصل دوم، به آزمایش‌های تجربی اختصاص دارد. در فصل سوم، به شبیه‌سازی‌های المان محدود پرداخته شده است. در فصل چهارم، نتایج پایان‌نامه و در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه شده است.

¹ User Subroutine

² Amplitude

³ Abaqus/Explicit

فصل ۲ آزمایش‌های تجربی

۱-۲- مواد و تجهیزات آزمایش شکل‌دهی تدریجی

۱-۱-۲ ورق فلزی

ورق استفاده شده در این آزمایش از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6061-O می‌باشد. خصوصیات این ورق که با آزمایش کشش به وسیله‌ی دستگاه تست کشش سروهیدرولیک Instron 8802 (شکل ۱-۲) به دست آمده، در جدول ۱-۲ و منحنی تنش- کرنش و FLD آن به ترتیب در شکل ۲-۲ و ۳-۲ آورده شده است.

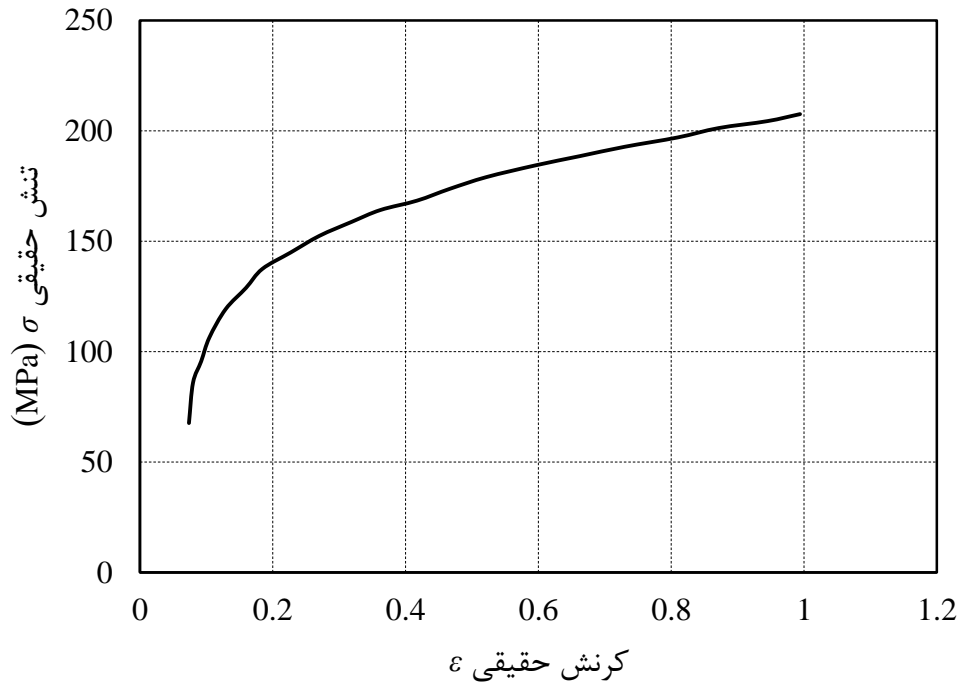
برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی ورق آلومینیومی، سه نمونه‌ی آزمایشی در سه جهت نورد، عمود بر جهت نورد و با زاویه 45° نسبت به جهت نورد، هر کدام به ابعاد $12/5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ برش زده شده است. با انجام آزمایش، مقادیر کرنش عرضی و کرنش ضخامتی در هر سه نمونه به دست می‌آید. حال با تقسیم کرنش عرضی بر کرنش ضخامتی در هر یک از نمونه‌ها، مقادیر ضریب ناهمسانگردی r_0 ، r_{45} و r_{90} به ترتیب برای جهت‌های نورد، زاویه 45° نسبت به جهت نورد و عمود بر جهت نورد به دست می‌آید.

جدول ۱-۲- خواص مکانیکی ورق آلومینیومی AA6061-O به دست آمده از آزمایش تجربی

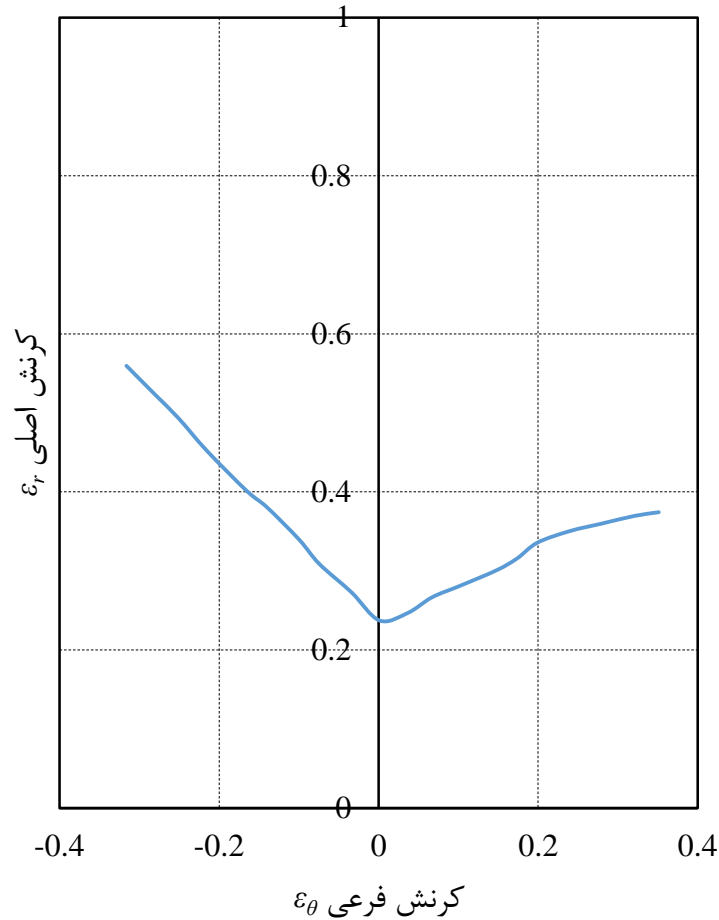
زاویه نسبت به جهت نورد	ضریب ناهمسانگردی r	چگالی ρ (kg/m^3)	مدول یانگ E (GPa)	ضریب پواسون ν	استحکام تسلیم σ_y (MPa)	استحکام کششی σ_u (MPa)
0°	۰/۵۶۳۷۴	۲۷۰۰	۷۵	۰/۳	۴۹/۹۲۸	۱۱۶/۹۸
45°	۰/۶۵۰۳۶۹	۲۷۰۰	۷۵	۰/۳	۷۳/۱۶۱	۱۱۷/۷۲
90°	۰/۴۴۲۷۰۳	۲۷۰۰	۷۵	۰/۳	۵۰/۲۶۲	۱۱۶/۱



شکل ۲-۱- دستگاه تست کشش برای استخراج خصوصیات مکانیکی ورق



شکل ۲-۲- منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم AA6061-O

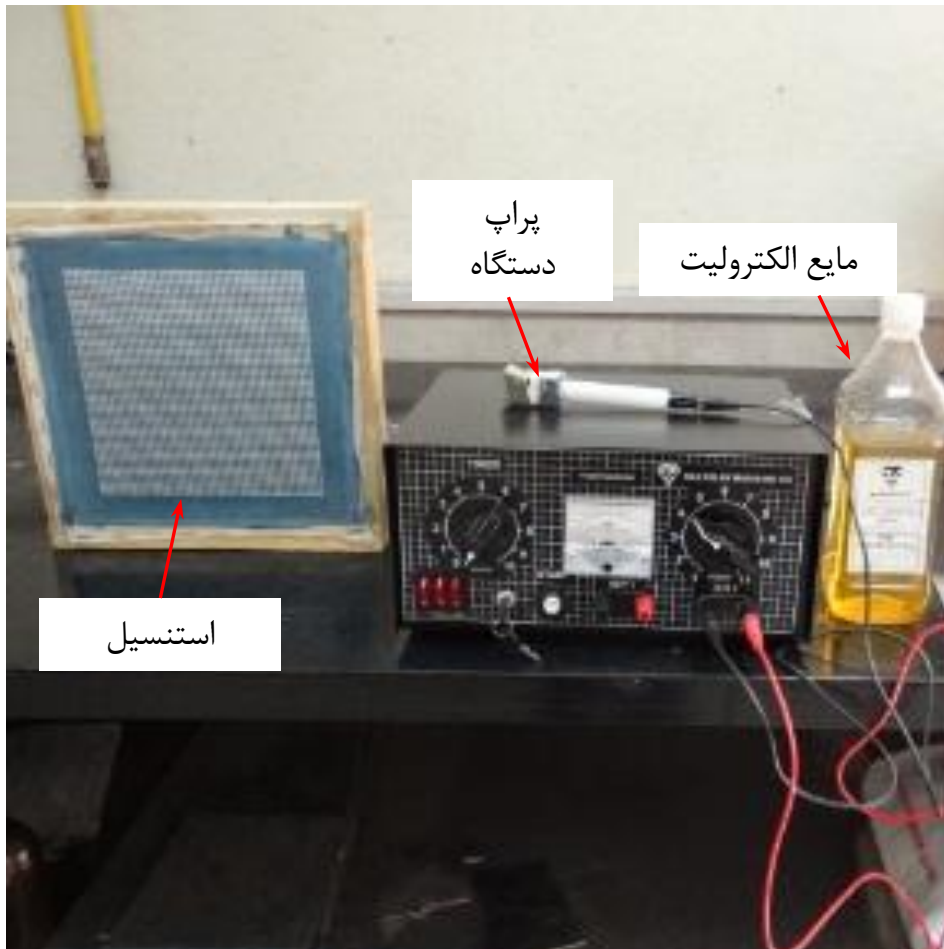


شکل ۲-۳- FLD آلیاژ آلومینیوم AA6061-O [۲۷]

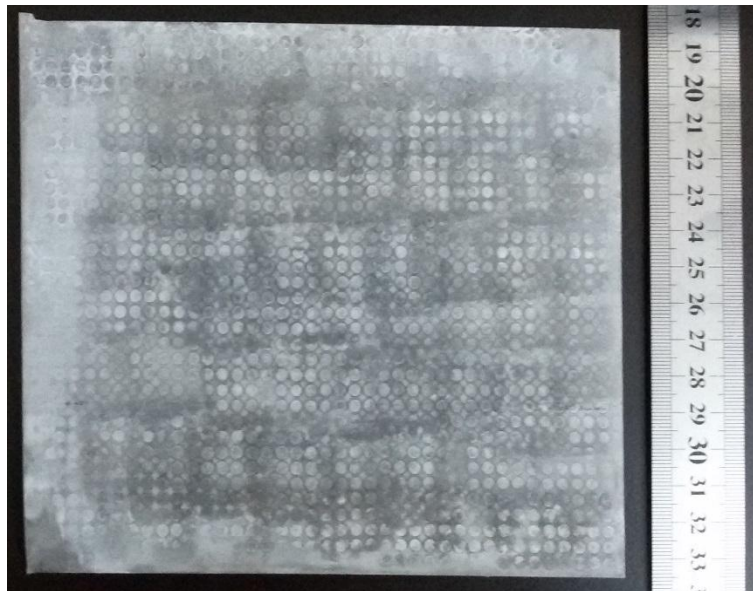
۲-۱-۲ دستگاه اچ الکتروشیمیایی

برای آنکه بتوان میزان کرنش اعمال شده بر روی ورق در اثر عملیات شکل‌دهی را اندازه‌گیری کرد، لازم است ورق قبل از عملیات شکل‌دهی مش‌بندی شود. برای این کار از دستگاه اچ الکتروشیمیایی (شکل ۲-۴) استفاده شده است. در این دستگاه از طریق عبور جریان الکتریسیته از فلز با واسطه‌ی مایع الکترولیت مخصوص آن فلز و استنسیل، طرح یا کاراکترهای روی استنسیل، بر روی فلز حک می‌شود. عمق حکاکی قابل تنظیم از ۳ تا ۱۰۰ میکرون (۰/۰۰۳ تا ۰/۱ mm) است.

مش‌های ایجاد شده به وسیله این دستگاه دایره‌هایی به قطر ۳/۳۵ mm بر روی ورق آلومینیومی هستند. در شکل ۲-۵ ورق آلومینیومی پس از عملیات مش‌بندی نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- دستگاه اچ الکتروشیمیایی استفاده شده برای مش بندی ورق آلومینیومی



شکل ۲-۵- ورق آلومینیومی مش بندی شده

۳-۱-۲ قالب شکل‌دهی تدریجی ورق

قالب طراحی شده برای فرایند شکل‌دهی تدریجی در شکل ۲-۶ (الف) نشان داده شده است که از اجزای زیر تشکیل شده است:

ماتریس

ماتریس (شکل ۲-۶ (ب))، بخشی از قالب شکل‌دهی است که ورق بر روی آن قرار می‌گیرد و دارای حفره‌ای است که ورق به درون آن هل داده شده و عملیات شکل‌دهی انجام می‌شود. در این مطالعه ماتریس از فولاد SPK (جدول ۲-۲) ساخته شده و دارای طول و عرض مساوی ۱۵۰ mm و ارتفاع ۲۰ mm می‌باشد. در ضمن دو سطح بالا و پایین آن سنگ زده شده و صاف و صیقلی گردیده است.

جدول ۲-۲- خواص مکانیکی فولاد SPK [۲۸]

چگالی ρ (kg/m ³)	مدول یانگ E (GPa)	ضریب پواسون ν	سختی HRC	استحکام تسلیم σ_y (MPa)	استحکام کششی σ_u (MPa)
۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۲۷	۵۸	۱۰۰۰	۱۴۰۰

حفره‌ی ماتریس که در مرکز آن قرار گرفته است به قطر ۸۸/۵ mm می‌باشد. چون لبه‌ی حفره‌ی ماتریس نباید باعث پاره شدن ورق در حین عملیات شکل‌دهی شود، لبه‌ی حفره در صفحه‌ی بالایی ماتریس (سطحی که ورق روی آن قرار می‌گیرد) به شعاع ۸ mm گرد می‌شود.

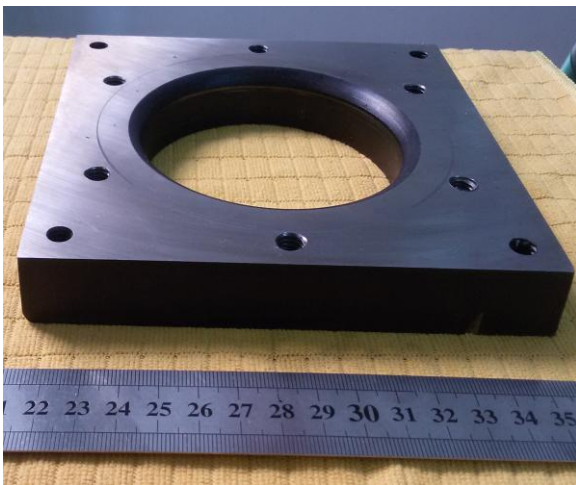
ورق‌گیر^۱

ورق‌گیر (شکل ۲-۶ (ج))، یک تسمه‌ی فلزی است که ورق را از چهار طرف محکم نگه می‌دارد تا فرایند شکل‌دهی با دقت صورت پذیرفته، از کشش ناخواسته‌ی ورق و جریان فلز به درون ناحیه شکل‌دهی جلوگیری شود. در این مطالعه ورق‌گیر همانند ماتریس از فولاد SPK (جدول ۲-۲) ساخته شده و دارای طول و عرض مساوی ۱۵۰ mm و ارتفاع ۱۵ mm می‌باشد. در ضمن دو سطح بالا و پایین آن سنگ زده شده و صاف و صیقلی گردیده است و برای آنکه ابزار شکل‌دهی به راحتی بر روی ورق حرکت کرده و هیچ برخوردی با ورق‌گیر نداشته باشد، در مرکز آن سوراخی به قطر ۱۰۵ mm ایجاد شده است.

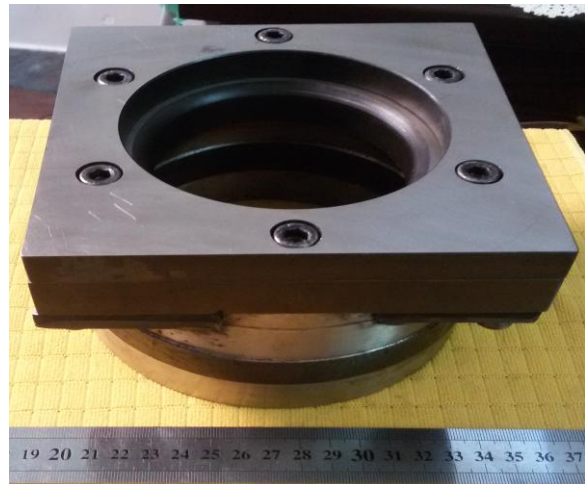
¹ Blank Holder

دنباله‌ی قالب

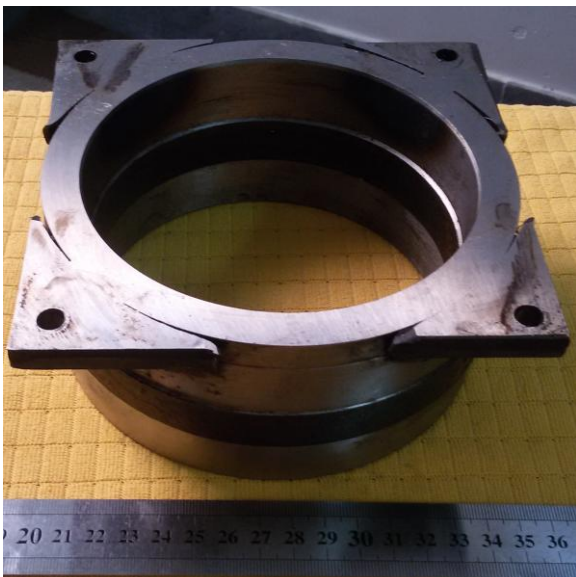
دنباله‌ی قالب (شکل ۲-۶ (د))، قسمتی از قالب است که مجموعه‌ی ماتریس، ورق و ورق‌گیر بر روی آن قرار می‌گیرد و بر روی سه نظام دستگاه CNC محکم بسته نگه داشته می‌شود تا فضای کافی برای حرکت ابزار شکل‌دهی بر روی ورق ایجاد شود و عملیات شکل‌دهی صورت گیرد. در این مطالعه از یک لوله‌ی آهنی به قطر بیرونی ۱۵۰ mm، قطر داخلی ۱۲۰ mm و ارتفاع ۷۵ mm برای ساخت دنباله‌ی قالب استفاده گردید. ورق‌گیر، ماتریس و دنباله‌ی قالب پس از ساخته شدن توسط پیچ‌های آلن به یکدیگر محکم بسته می‌شوند تا به صورت قالب شکل‌دهی تدریجی ورق قابل استفاده گردند.



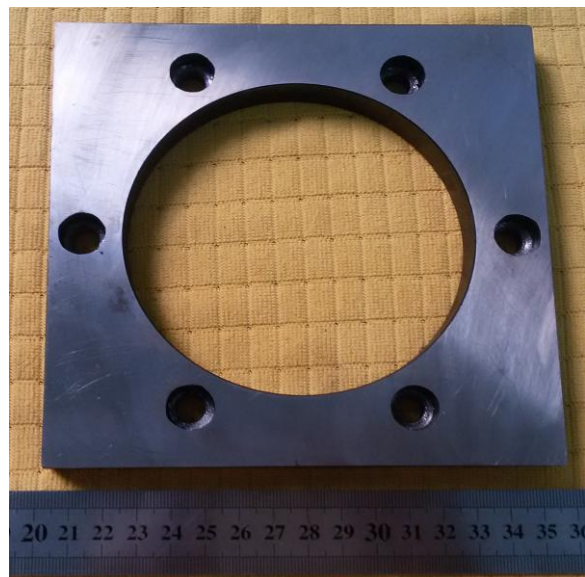
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

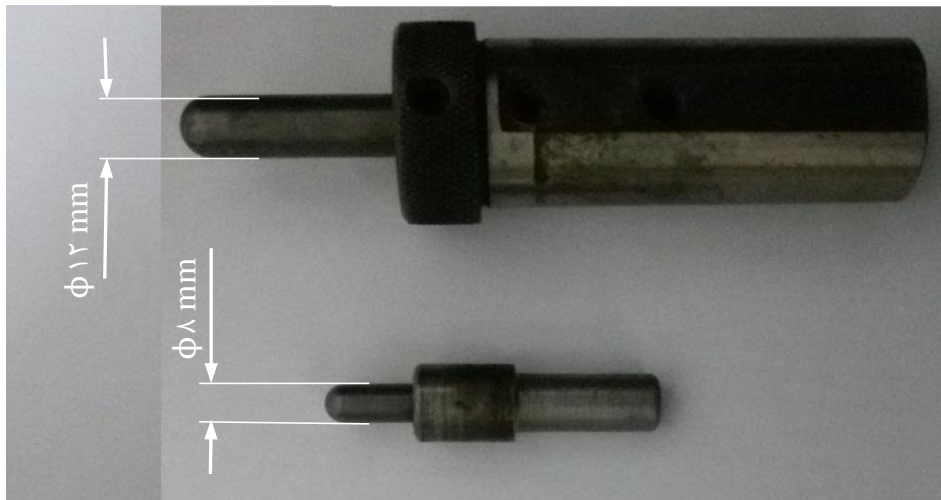
شکل ۲-۶- قالب شکل‌دهی تدریجی ورق (الف) قالب مونتاژ شده، (ب) ماتریس، (ج) ورق‌گیر، (د) دنباله قالب.

۴-۱-۲ ابزار شکل‌دهی

ابزار شکل‌دهی به کار رفته در این مطالعه (شکل ۲-۷)، میله‌هایی استوانه‌ای از جنس تنگستن کارباید (جدول ۳-۲) هستند که به ترتیب دارای قطرهای ۸ و ۱۲ mm می‌باشند تا اثر قطر ابزار بر میزان کرنش و صافی سطح بررسی گردد. سر این میله‌ها به صورت نیمکره‌ای صاف و صیقلی، سنگ زده شده است.

جدول ۳-۲- خواص مکانیکی ابزار شکل‌دهی [۲۹]

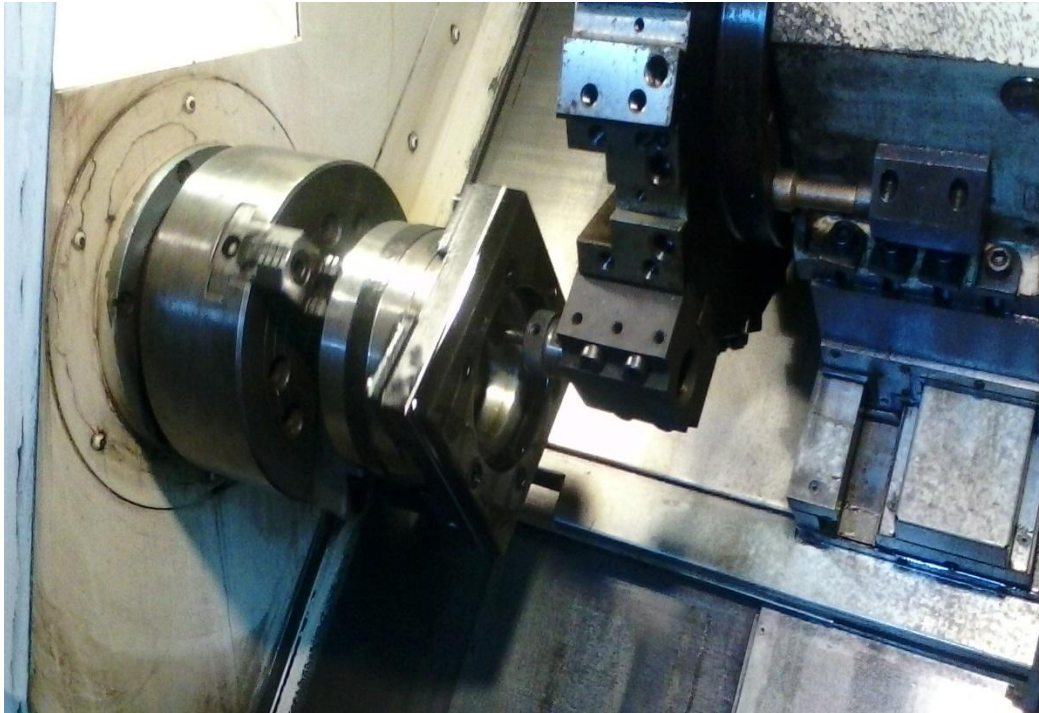
سختی HRC	مدول یانگ E (GPa)	چگالی ρ (kg/m ³)
۸۲	۹۰۰	$۱۵/۶۳ \times ۱۰^۳$



شکل ۲-۷- ابزارهای شکل‌دهی به کار رفته در فرایند ISF

۵-۱-۲ ماشین تراش CNC

ماشین تراش CNC استفاده شده در فرایند ISF، که در شکل ۲-۸ در حال انجام عملیات شکل‌دهی تدریجی نشان داده شده است. ماشین تراش مدل TC-20 ساخت ماشین سازی تبریز است، که سیستم کنترل آن مدل 802-C زیمنس می‌باشد. ابزار شکل‌دهی به ابزارگیر دستگاه بسته شده و دارای حرکت خطی است و ورق آلومینیومی که به قالب شکل‌دهی بسته شده بر روی سه نظام دستگاه قرار گرفته و دارای حرکت دورانی است.



شکل ۲-۸- دستگاه تراش CNC در حال انجام فرایند ISF

۲-۲- مواد و تجهیزات آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی

نمونه‌ی ورق اولیه‌ی به کار رفته در آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی، همان ورق آلومینیوم AA6061-O می‌باشد (بخش ۲-۱-۱)، که با استفاده از دستگاه اچ الکتروشیمیایی مش‌هایی دایره‌ای شکل به قطر $3/35$ mm بر روی آن ایجاد شده است (بخش ۲-۱-۲).

۲-۲-۱ قالب فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

قالب طراحی شده برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی در شکل ۲-۹ نشان داده شده است که از اجزای زیر تشکیل شده است:



شکل ۲-۹- مجموعه‌ی مونتاژی قالب فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

ماتریس

ماتریس فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (شکل ۲-۱۰ الف))، از فولاد VCN200 ساخته شده است و دارای سختی HRC ۳۵-۴۰ می‌باشد. این ماتریس به صورت استوانه‌ای به قطر ۲۱۰ mm و ارتفاع ۵۰ mm می‌باشد که برای جلوگیری از جریان فلز به درون ناحیه‌ی شکل‌دهی، حفره‌ی ترمز^۱ بر روی آن کار گذاشته شده است. در ضمن دو سطح بالا و پایین ماتریس سنگ زده شده و صاف و صیقلی گردیده است.

حفره‌ی ماتریس که در مرکز آن قرار گرفته است به قطر ۸۸/۵ mm می‌باشد. همانند ماتریس فرایند JSF، برای جلوگیری از پارگی ورق در هنگام شکل‌دهی، لبه‌ی حفره‌ی ماتریس به شعاع ۸ mm گرد شده است.

ورق‌گیر

ورق‌گیر طراحی شده برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (شکل ۲-۱۰ ب))، به صورت استوانه‌ای به قطر ۲۰۰ mm و ارتفاع ۴۰ mm می‌باشد، همانند ماتریس از فولاد VCN200 ساخته شده است و دارای سختی HRC ۳۵-۴۰ می‌باشد. زائده‌ی ترمز^۲ نگه دارنده‌ی ورق، ورق را به درون حفره‌ی ترمز ماتریس هل داده و از جریان فلز به درون ناحیه‌ی شکل‌دهی جلوگیری می‌کند. برای هدایت دقیق سنبه به درون ماتریس برای عملیات شکل‌دهی، حفره‌ای به اندازه‌ی ۸۵/۲ mm در مرکز نگه دارنده‌ی ورق ایجاد شده است.

سنبه‌ی شکل‌دهی سرکروی

سنبه‌ی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، به قطر ۸۵ mm و ارتفاع ۱۲۰ mm (شکل ۲-۱۰ ج)) می‌باشد که بر روی ورق آزمایش که بین ماتریس و نگه دارنده‌ی ورق محکم بسته شده است، به سمت پایین حرکت کرده و عملیات شکل‌دهی را انجام می‌دهد. سنبه نیز از جنس فولاد VCN200 و دارای سختی HRC ۴۰-۳۵ می‌باشد.

غلتک تنظیم یکنواختی نیرو

برای آنکه نیرو کاملاً به طور عمودی بر روی ورق وارد شود و از اعمال نیروی جانبی در حین عملیات شکل‌دهی جلوگیری شود، یک غلتک بین سنبه‌ی شکل‌دهی و پیستون دستگاه پرس قرار داده می‌شود (شکل ۲-۱۰ د)). این غلتک از دو استوانه‌ی کوچک تشکیل شده است که یکی دارای حفره و دیگری دارای

^۱ Female Bead

^۲ Male Bead

زائده‌ای به شکل عرقچینی از کره می‌باشد. این غلتک نیز از جنس فولاد VCN200 و دارای سختی HRC ۳۵-۴۰ می‌باشد.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲-۱۰- قالب فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (الف) ماتریس، (ب) نگه دارنده‌ی ورق، (ج) سنبه‌ی سرکروی، (د) غلتک تنظیم یکنواختی نیرو.

۲-۲-۲ دستگاه پرس هیدرولیک

پرس هیدرولیک استفاده شده در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، پرس ژاوا آریا^۱ ۱۰۰ تن، با چهار میله راهنما می‌باشد که در شکل ۲-۱۱ در حال انجام فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی نشان داده شده است. این دستگاه مجهز به واحد کنترل می‌باشد که امکان تنظیم سرعت حرکت رم و ثبت نیرو و جابه‌جایی پرس در هر لحظه را میسر می‌سازد.

^۱ Jav Aria

مشخصات دستگاه:

- حداکثر سرعت ۱ mm/s
- کورس حرکتی ۵۰۰ mm
- قابلیت استخراج منحنی نیرو-جابجایی
- ابعاد پرس ۸۰۰ mm × ۶۰۰ mm



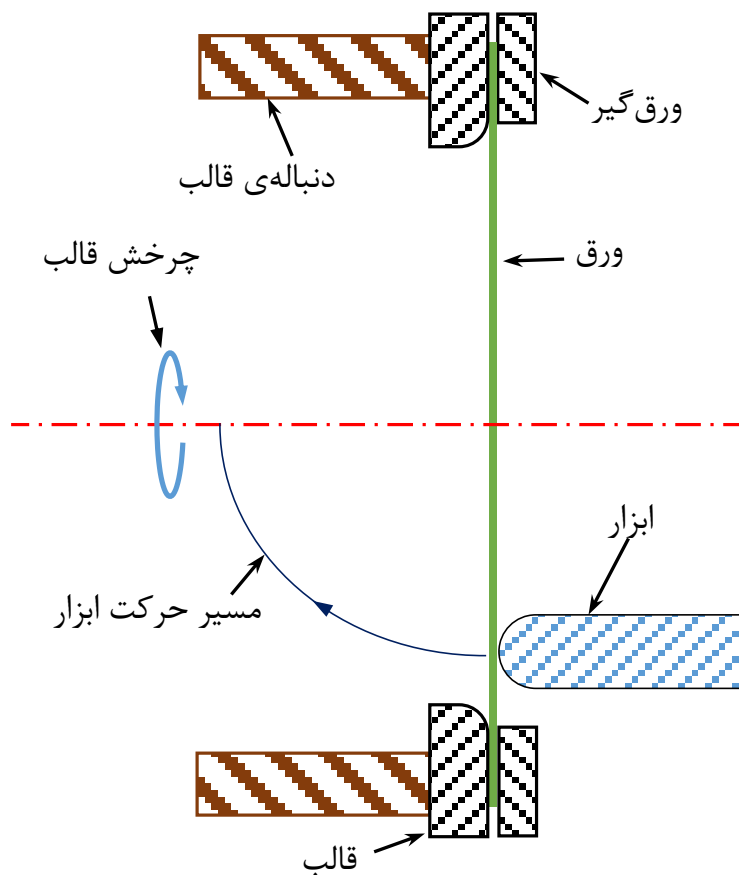
شکل ۲-۱۱- دستگاه پرس هیدرولیک استفاده شده در عملیات شکل‌دهی با قالب کشش سنبه‌ی سرکروی

۲-۳- آماده‌سازی ورق و انجام آزمایش شکل‌دهی تدریجی

برای انجام آزمایش، ورق آلومینیومی به شکل مربعی به ضلع ۱۵۰ mm برش خورده و توسط دستگاه اچ الکتروشیمیایی مش‌هایی دایره‌ای شکل به قطر ۳/۳۵ mm بر روی ورق آلومینیومی ایجاد می‌شود. پس از آن سوراخ‌هایی به منظور عبور پیچ از داخل ورق بر روی آن ایجاد می‌شود. اکنون ورق که برای انجام آزمایش آماده شده است، بر روی قالب شکل‌دهی محکم بسته شده و مجموعه‌ی آنها بر روی سه نظام دستگاه تراش CNC بسته می‌شود. برای شکل‌دهی ورق دو نوع مسیر ابزار تعریف شده است:

۲-۳-۱ مسیر ابزار نوع اول

در این نوع مسیر، سه نظام دستگاه که قالب به آن بسته شده است با سرعت دورانی متغیر که بیشینه‌ی آن ۱۰ rpm است، می‌چرخد و سرعت حرکت خطی تعریف شده برای آن ۲ m/min می‌باشد. هنگامی که ورق در درون قالب دارای حرکت دورانی است، ابزار شکل‌دهی به صورت خطی بخشی از یک مسیر دایروی را می‌پیماید (شکل ۲-۱۲). میزان پیشروی ابزار در هر دور در دستگاه معادل گام مارپیچ می‌باشد. به این ترتیب با ترکیب حرکت دورانی قالب و حرکت خطی ابزار مسیری مارپیچ کروی برای شکل‌دهی ورق پدید می‌آید.

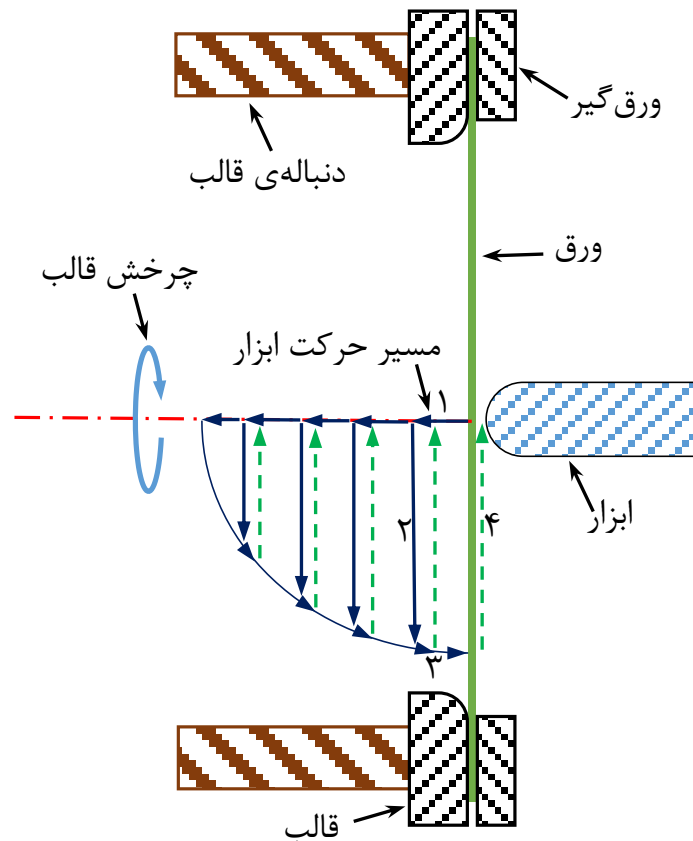


شکل ۲-۱۲- شماتیک مسیر ابزار نوع اول (در آزمایش)

۲-۳-۲ مسیر ابزار نوع دوم

در نوع دوم تعریف مسیر ابزار، همانند نوع اول سه نظام دستگاه که قالب به آن بسته شده است با سرعت دورانی متغیر که بیشینه‌ی آن ۱۰ rpm است، می‌چرخد و سرعت حرکت خطی تعریف شده برای آن ۲ m/min می‌باشد. ولی برخلاف نوع اول، ابزار در محیط عرقچین کوه حرکت نمی‌کند بلکه با قرار گرفتن دستگاه در حالت خشن کاری، ابزار به صورت سیکل‌های پی‌درپی و به تدریج عرقچین کوه را شکل‌دهی

می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است، ابزار در مسیر افقی (۱)، با یک گام مشخص به ورق نفوذ کرده، سپس با حرکت شعاعی (۲) به سمت بزرگترین شعاع در آن عمق حرکت می‌کند، با ترکیب حرکت دورانی قالب و حرکت شعاعی ابزار در این مسیر، یک مسیر مارپیچ تشکیل می‌شود و سرعت پیشروی شعاعی ابزار، اندازه‌ی گام مارپیچ را تعیین می‌کند. در ادامه، با حرکت ابزار در مسیر دایروی (۳)، شکل‌دهی یک گام عمودی از عرقچین کره کامل می‌شود. در انتها با حرکت سریع در مسیر (۴)، ابزار به مرکز عرقچین می‌رود. به این ترتیب یک چرخه‌ی شکل‌دهی کامل می‌شود.



شکل ۲-۱۳- شماتیک مسیر ابزار نوع دوم (در آزمایش)

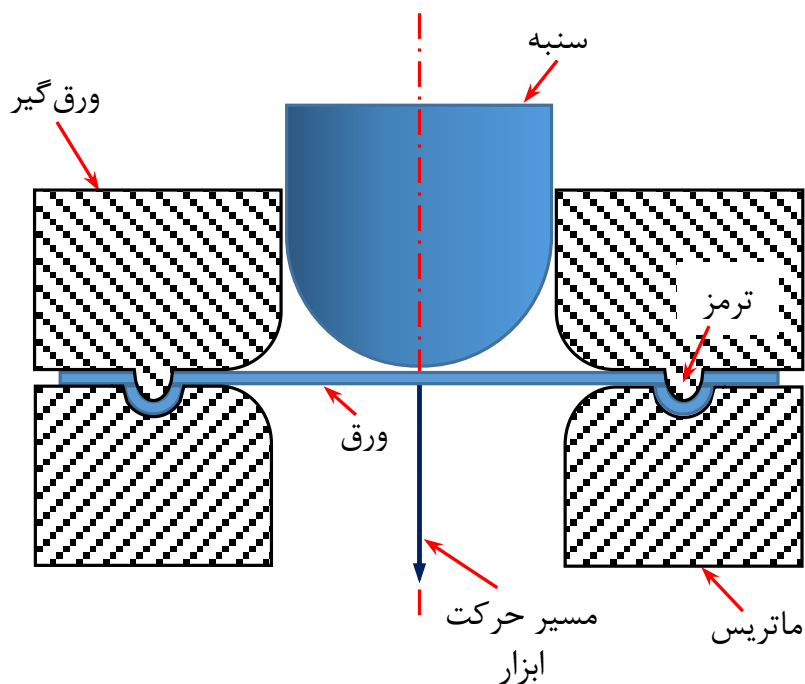
۲-۱- آماده‌سازی ورق و انجام آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی

برای انجام آزمایش، ورق آلومینیومی به شکل مربعی به ضلع 150 mm برش خورده و توسط دستگاه اچ الکتروشیمیایی مش‌هایی دایره‌ای شکل به قطر $3/35 \text{ mm}$ بر روی ورق آلومینیومی ایجاد می‌شوند. اکنون ورق که برای انجام آزمایش آماده شده است، بر روی قالب فرایند کشش با سنبه‌ی نیمکروی گذاشته شده و پیچ‌های آن به صورت نه چندان محکم بسته می‌شوند. سپس مجموعه‌ی قالب بر روی دستگاه پرس گذاشته شده و نیروی $7/5$ تن بر روی ورق گیر اعمال می‌شود تا ورق بین ماتریس و ورق گیر محکم نگه داشته شود.

همزمان با اعمال این نیرو پیچ‌های قالب بسته می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که نیروی ورق‌گیر که توسط پیچ‌ها اعمال می‌شود ثابت و یکنواخت و برابر مقدار ذکر شده است. اکنون سنبه بر روی ورق گذاشته شده و به آرامی به سمت پایین حرکت می‌کند. در هنگام حرکت سنبه نیروی وارد به ابزار از طریق مونیتور دستگاه کنترل می‌شود تا همواره روندی افزایشی داشته باشد. به محض اینکه نیرو شروع به کم شدن کرد، به این معنی است که ورق آزمایش دچار ترک یا پارگی شده است؛ در این حالت فوری دکمه خلاصی^۱ دستگاه فشار داده می‌شود تا مسیر حرکت سنبه به سمت بالا تغییر کند و عملیات شکل‌دهی متوقف گردد. فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، با انجام سه آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت:

- بدون استفاده از روانکار
- با استفاده از گریس به عنوان روانکار
- با استفاده از روغن و نایلون به عنوان روانکار

در هر سه آزمایش، کشش تا لحظه‌ی پاره شدن ورق ادامه می‌یابد. در شکل ۲-۱۴ فرایند فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴- شماتیک شکل‌دهی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (در آزمایش)

^۱ Releas

فصل ۳ شبیه‌سازی المان محدود

امروزه شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چون می‌توان اطلاعات زیادی در مورد اجرای فرایند و تغییر تدریجی بعضی متغیرهای آن را به وسیله برنامه‌های المان محدود گوناگون تخمین زد که می‌تواند به بهبود فرایند شکل‌دهی کمک کند.

شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی شامل مراحل زیر است:

- آماده‌سازی مدل (ورق، ابزار، ورق‌گیر و ...)
- تولید مسیرهای ابزار برای کنترل جابه‌جایی آن
- ساخت مدل المان محدود، اعمال شرایط مرزی، تعریف مشخصات ماده، پارامترهای تماسی و ...
- حل مدل

به دلیل آنکه شکل‌دهی ورق‌های فلزی باعث ایجاد کرنش‌های بزرگی در ماده می‌شود باید الگوریتم مناسبی در نرم‌افزار المان محدود برای آن تعریف شود [۴]. برای شبیه‌سازی‌های فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ انتخاب مناسبی است. این نرم‌افزار محیط کاملی است که فضایی ساده و کاربر پسند برای ساختن مدل‌ها، انجام تحلیل، مشاهده و بررسی مراحل تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارد.

یک تحلیل کامل در برنامه آباکوس معمولاً از سه مرحله تشکیل شده‌است:

- مرحله‌ی پیش از حل^۲
- مرحله‌ی حل^۳
- مرحله‌ی پس از حل^۴

مرحله‌ی پیش از حل، به چندین ماژول^۵ تقسیم شده است و هر ماژول بخشی از پروسه مدل‌سازی را بر عهده دارد. برای مثال ماژول‌هایی برای تعریف هندسه مدل، خصوصیات مصالح و انجام مش‌بندی اختصاص داده شده است. با انتقال از یک ماژول به ماژول دیگر و انجام عملیات مدل‌سازی مرتبط با آن ماژول و تکرار این کار تا آخرین ماژول، مدل اجزای محدود ساخته خواهد شد. وقتی که ساختن مدل به اتمام رسید، نرم‌افزار

^۱ Abaqus

^۲ Abaqus/CAE

^۳ Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit

^۴ Abaqus/Viewer

^۵ Module

آباکوس یک فایل ورودی می‌سازد و مدل ساخته شده را به بخش حل‌گر نرم‌افزار تحویل می‌دهد. حل‌گرهای استاندارد آباکوس و صریح آباکوس فایل ورودی را خوانده و تحلیل را انجام می‌دهند و در حین تحلیل کاربر را در جریان روند تحلیل قرار می‌دهند. سپس در مرحله‌ی پس از حل، پایگاه داده‌ی اطلاعات خروجی ساخته می‌شود و از ماژول نمایش^۱ برای خواندن از پایگاه داده اطلاعات خروجی و نمایش آن‌ها استفاده می‌شود. [۳۰].

در این پایان‌نامه، شبیه‌سازی فرایند به استفاده از حل‌گر صریح آباکوس که قادر به حل سریع و آسان مسائل غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد، انجام شده است.

۳-۱- شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی

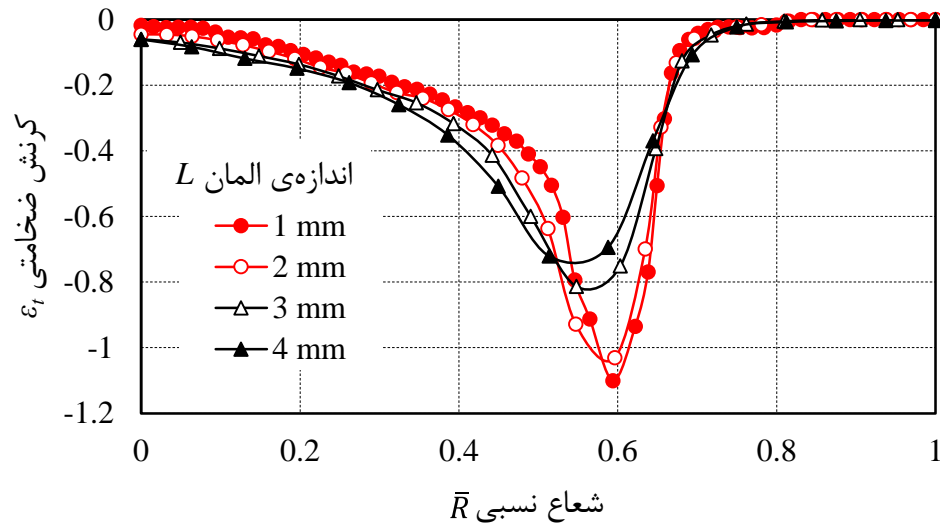
۳-۱-۱ آماده‌سازی مدل

در حالتی که یکی از ابعاد مدل (ضخامت آن) در برابر دو بعد دیگر بسیار کوچک‌تر باشد و تنش‌ها در جهت ضخامت مدل قابل نظر کردن باشد، از المان پوسته برای مدل‌سازی سازه‌ها استفاده می‌شود. ورق اولیه‌ی استفاده شده در این مطالعه که به ابعاد $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ و به ضخامت $1/2 \text{ mm}$ می‌باشد. این ورق با استفاده از المان پوسته‌ی مربعی انتگرال کاهش یافته^۲ با ۵ نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت مدل شده است، که برای کاهش زمان محاسبه و شبیه‌سازی نیز مناسب است. ورق در چهار گوشه آن کاملاً مقید شده و هیچ‌گونه حرکتی در راستای محورهای مختصات ندارد. جنس ورق، آلومینیوم AA6061-O می‌باشد که ویژگی‌های مکانیکی آن (جدول ۲-۱ و شکل‌های ۲-۲ و ۲-۳) در ماژول تعریف خصوصیات مصالح وارد می‌شوند در این مطالعه تحلیل سه بعدی کامل با اعمال شرایط ناهمسانگردی^۳ برای ورق مورد آزمایش انجام شده است، که در بخش ۲-۳ آورده شده است. اندازه‌ی المان استفاده شده برای ورق $2 \text{ mm} = L$ می‌باشد که این اندازه پس از بررسی تأثیر اندازه بر میزان کرنش ضخامتی (ϵ_t) مطابق شکل ۳-۱ مورد تأیید قرار گرفت. در این شکل و شکل‌های مشابه بعدی در این پایان‌نامه، \bar{R} شعاع نسبی می‌باشد که با تقسیم شعاع عرقچین کره در هر لحظه (R) بر نصف طول ورق اولیه ($R_0 = 75 \text{ mm}$) به دست می‌آید.

¹ Visualization

² S4R

³ Anisotropy

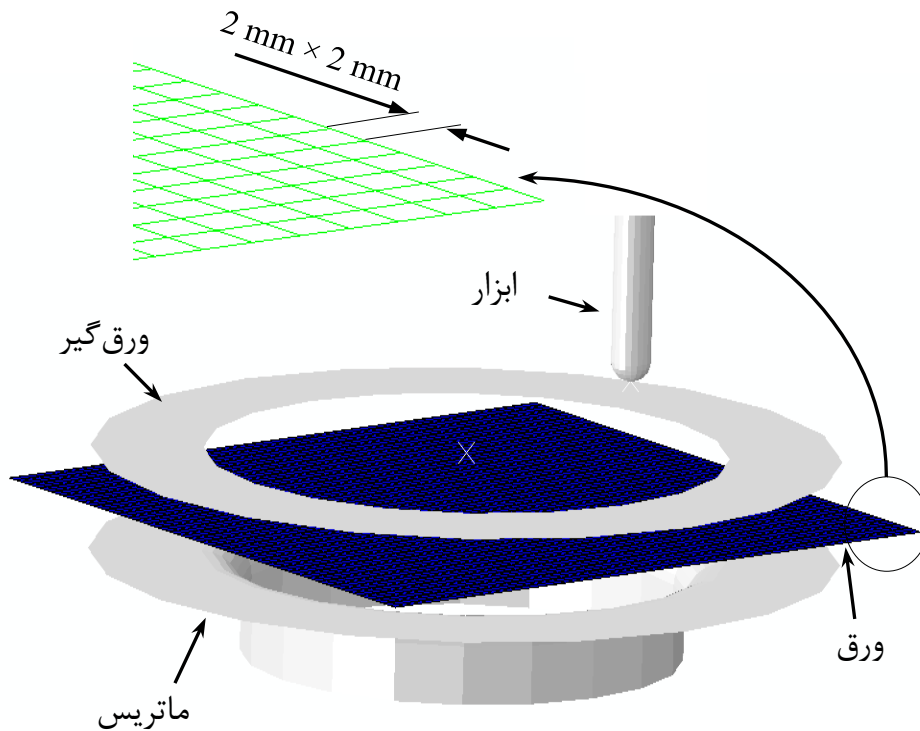


شکل ۳-۱- کرنش ضخامتی برای اندازه‌ی المان مختلف

در آزمایش تجربی ورق گیر و ماتریس از جنس فولاد SPK و ابزار شکل‌دهی از جنس تنگستن کارباید ساخته شده بود. این قطعات دارای سختی زیادی هستند و در هنگام انجام فرایند شکل‌دهی تقریباً دچار هیچ تغییر شکلی نمی‌شوند. بنابراین در شبیه‌سازی عددی، قطعات از نوع پوسته‌ی صلب تحلیلی سه‌بعدی^۱ برای مدل کردن آنها در نظر گرفته شده است، که از طرف دیگر باعث کاهش زمان تحلیل نیز می‌شود. ورق گیر به صورت صفحه‌ای با قطر خارجی ۱۵۰ mm و قطر داخلی ۱۰۵ mm مدل شده است. ماتریس نیز با قطر خارجی

۱۵۰ mm، قطر داخلی ۸۸/۵ mm، ارتفاع ۲۰ mm و شعاع پخ گوشه ۸ mm مدل شده است. همانند آزمایش تجربی، برای بررسی اثر قطر ابزار بر نیروی شکل‌دهی، ابزار با قطرهای ۶ mm، ۸ mm و ۱۲ mm مدل شده است. در شکل ۳-۲ نمای سه بعدی انفجاری از مدل عددی استفاده شده برای شکل‌دهی تدریجی به همراه نمای برش خورده از ورق شکل‌دهی مش‌بندی شده، در محیط نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است.

^۱ 3D Analytical Rigid Body



شکل ۳-۲- نمای سه بعدی انفجاری از مدل عددی استفاده شده برای شکل‌دهی تدریجی

۲-۱-۳ ناهمسانگردی پلاستیک ورق [۳۲]

در نرم‌افزار آباکوس، رفتار تسلیم ناهمسانگرد با استفاده از نسبت تنش تسلیم R_{ij} ^۱ مدل می‌شود که با توجه به تنش تسلیم مرجع σ^0 (تعریف شده بر اساس پلاستیسیته ماده) به دست می‌آید. به طوریکه اگر σ_{ij} به عنوان تنها تنش غیر صفر به کار رود، تنش تسلیم مربوطه $R_{ij}\sigma^0$ می‌شود.

تابع تسلیم هیل^۲ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad ۱-۳$$

که F, G, H, L, M, N ثابت‌های ناهمسانگردی ماده هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F = \frac{(\bar{\sigma}^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad ۲-۳$$

$$G = \frac{(\bar{\sigma}^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad ۳-۳$$

$$H = \frac{(\bar{\sigma}^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad ۴-۳$$

^۱ Yield Stress Ratio

^۲ Hill's Potential Function

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad ۵-۳$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad ۶-۳$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{12}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad ۷-۳$$

$\bar{\sigma}_{ij}$ ، مقدار تنش تسلیم اندازه‌گیری شده است وقتی σ_{ij} به عنوان تنها مؤلفه تنش غیر صفر اعمال می‌شود، می‌باشند. σ^0 تنش تسلیم مرجع تعریف شده توسط کاربر^۱ که برای تعریف پلاستیسیته فلز مشخص شده است، می‌باشد. $\tau^0 = \sigma^0 / \sqrt{3}$ و نسبت‌های تنش تسلیم ناهمسانگرد به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\sigma^0}; R_{22} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\sigma^0}; R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\sigma^0}; R_{12} = \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\tau^0}; R_{13} = \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\tau^0}; R_{23} = \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\tau^0} \quad ۸-۳$$

به خاطر شکل تابع تسلیم همه این نسبت‌ها باید مثبت باشند. اگر ثابت‌های F ، G و H مثبت باشند به این معنی است که تابع تسلیم خوب تعریف شده است. هرچند اگر یک یا تعدادی از این ثابت‌ها منفی شوند، چون مقدار زیر رادیکال منفی می‌شود، ممکن است تابع تسلیم برای برخی از حالت‌های تنش تعریف نشوند.

قانون جریان^۲ به صورت زیر است:

$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{d\lambda}{f} \mathbf{b} \quad ۹-۳$$

که از تعریف بالا داریم:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} -G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) + H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ -F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) \\ 2N\sigma_{12} \\ 2M\sigma_{13} \\ 2L\sigma_{23} \end{bmatrix} \quad ۱۰-۳$$

تعریف رفتار ناهمسانگرد بر اساس نسبت‌های کرنش (مقادیر r لنکفورد^۳)

همان طور که در بالا بحث شد، تابع تسلیم ناهمسانگرد هیل در آباکوس توسط کاربر تعریف می‌شود و شامل نسبت‌های تنش تسلیم در جهت‌های مختلف با توجه به یک تنش مرجع می‌باشد. هرچند در بعضی موارد از قبیل کاربردهای شکل‌دهی ورق، یافتن اطلاعات مواد ناهمسانگرد که از نسبت‌های کرنش عرضی به کرنش

^۱ the user-defined reference yield stress

^۲ flow rule

^۳ Lankford's r-values

ضخامتی به دست می‌آیند، معمول است. برای تبدیل نسبت‌های کرنش به نسبت‌های تنش که برای آباکوس قابل فهم هستند، یک سری روابط ریاضی لازم می‌باشد.

در شکل‌دهی ورق‌های فلزی فقط با شرایط تنش صفحه‌ای مواجه هستیم. در سطح ورق جهت‌های x و y را به ترتیب جهت نورد و جهت عمود بر جهت نورد در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که Z نیز جهت ضخامت ورق باشد. از نقطه نظر طراحی، نوعی از ناهمسانگردی که در آن ورق در سطح خود همسانگرد باشد ولی در جهت ضخامت افزایش استحکام داشته باشد مطلوب است، که به آن ناهمسانگردی عرضی^۱ می‌گویند. نوع دیگر ناهمسانگردی، ورق در جهت‌های مختلف در سطح خود دارای استحکام‌های متفاوت است که به آن ناهمسانگردی صفحه‌ای^۲ می‌گویند.

در آزمایش کشش ساده که در جهت x انجام شده است، قانون جریان برای تابع تسلیم هیل نسبت‌های کرنش نمویی را به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$d\varepsilon_{11} : d\varepsilon_{22} : d\varepsilon_{33} = G + H : -H : -G \quad 11-3$$

بنابراین نسبت کرنش عرضی به کرنش ضخامتی که به مقدار r لنکفورد مشهور است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_x = \frac{d\varepsilon_{22}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{H}{G} \quad 12-3$$

به طور مشابه برای آزمایش کشش انجام شده در جهت Y نسبت‌های کرنش نمویی و r لنکفورد به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$d\varepsilon_{11} : d\varepsilon_{22} : d\varepsilon_{33} = -H : F + H : -F \quad 13-3$$

$$r_y = \frac{d\varepsilon_{11}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{H}{F} \quad 14-3$$

¹ Transverse Anisotropy

² Planar Anisotropy

ناهمسانگردی عرضی

یک ماده ناهمسانگرد عرضی، ماده‌ای است که در آن $r_x = r_y$ باشد. اگر σ^0 در مدل پلاستیسیته ماده مساوی با $\bar{\sigma}_{11}$ تعریف شود؛ داریم:

$$R_{11} = R_{22} = 1 \quad ۱۵-۳$$

و با استفاده از رابطه بالا داریم:

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_x + 1}{2}} \quad ۱۶-۳$$

اگر $r_x = 1$ باشد، ماده $R_{33} = 1$ شده و ماده همسانگرد خواهد شد.

ناهمسانگردی صفحه‌ای

هرگاه $r_x \neq r_y$ شود، مقادیر R_{11} ، R_{22} و R_{33} همگی متفاوت خواهند بود و ناهمسانگردی از نوع صفحه‌ای خواهد شد. اگر σ^0 در مدل پلاستیسیته ماده مساوی با $\bar{\sigma}_{11}$ تعریف شود؛ داریم:

$$R_{11} = 1 \quad ۱۷-۳$$

و با استفاده از رابطه بالا داریم:

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_y(r_x + 1)}{r_x(r_y + 1)}} \quad \& \quad R_{33} = \sqrt{\frac{r_y(r_x + 1)}{(r_x + r_y)}} \quad ۱۸-۳$$

اگر $r_x = r_y = 1$ باشد، ماده $R_{22} = R_{33} = 1$ شده و ماده همسانگرد خواهد شد.

ناهمسانگردی کامل^۱

تاکنون فقط بارگذاری اعمال شده در جهت محورهای ماهمسانگرد مورد بررسی قرار گرفت. برای استخراج یک مدل ناهمسانگرد کامل، ورق باید در یک جهت غیر از جهت‌های ناهمسانگردی بارگذاری شود. فرض کنید در یک آزمایش کشش ساده بارگذاری در جهتی اعمال می‌شود که با محور X ورق زاویه α بسازد. پس از اعمال معادلات تعادل، مؤلفه‌های تنش غیر صفر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

^۱ General Anisotropy

$$\sigma_{11} = \sigma \cos^2 \alpha ; \sigma_{22} = \sigma \sin^2 \alpha ; \sigma_{12} = \sigma \sin \alpha \cos \alpha \quad 19-3$$

که σ تنش کششی اعمال شده می‌باشد. با جایگذاری این مقادیر در معادلات جریان داریم:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{11} &= [(G + H)\cos^2 \alpha - H \sin^2 \alpha] \frac{\sigma}{f} d\lambda \\ d\varepsilon_{22} &= [(G + H)\cos^2 \alpha - H \sin^2 \alpha] \frac{\sigma}{f} d\lambda \\ d\varepsilon_{33} &= -[F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha] \frac{\sigma}{f} d\lambda \\ d\gamma_{12} &= [N \sin \alpha \cos \alpha] \frac{\sigma}{f} d\lambda \end{aligned} \quad 20-3$$

با فرض تغییرات هندسی کوچک، نمودی کرنش عرضی (نمودی کرنش در زاویه سمت راست به جهت بارگذاری α) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$d\varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{2}} = d\varepsilon_{11} \sin^2 \alpha + d\varepsilon_{22} \cos^2 \alpha - 2d\gamma_{12} \sin \alpha \cos \alpha \quad 21-3$$

و برای مقادیر r لنکفورد داریم:

$$r_\alpha = \frac{d\varepsilon_{\alpha+\frac{\pi}{2}}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{H + (2N - F - G - 4H)\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha} \quad 22-3$$

یکی از معمول‌ترین آزمایش‌ها، بارگذاری در جهتی است که $\alpha = 45^\circ$ باشد:

$$r_{45} = \frac{2N - (F + G)}{2(F + G)} \quad 23-3$$

یا

$$\frac{N}{G} = (r_{45} + \frac{1}{2})(1 + \frac{r_x}{r_y}) \quad 24-3$$

اگر σ^0 در مدل پلاستیسیته ماده مساوی با $\bar{\sigma}_{11}$ تعریف شود؛ داریم:

$$R_{11} = 1 \quad 25-3$$

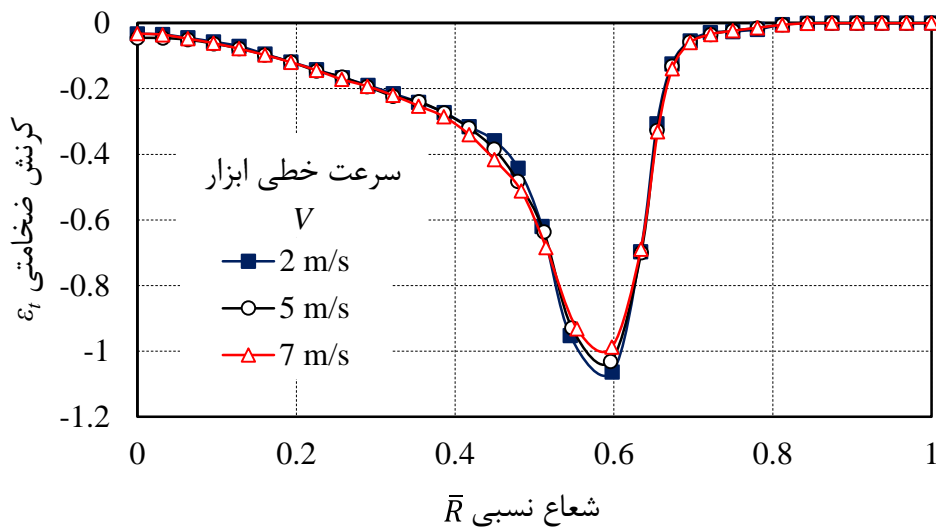
R_{22} و R_{33} همان مقادیری هستند که برای ناهمسانگردی صفحه‌ای یا عرضی محاسبه شدند و با استفاده از روابط بالا داریم:

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3(r_x + 1) r_y}{(2r_{45} + 1)(r_x + r_y)}} \quad 26-3$$

نوع ناهمسانگردی ورق آلومینیومی AA6061-O مطالعه شده در این پایان‌نامه، ناهمسانگرد کامل فرض شده است. در نتیجه طبق رابطه‌ی (۳-۲۳) $R_{11} = 1$ است و با داشتن مقادیر r_x ، r_y و r_{45} از جدول ۱-۲، با استفاده از رابطه‌های ۱۸-۳ و ۲۶-۳ مقادیر $R_{22} = 0.922594$ و $R_{33} = 0.829361$ و $R_{12} = 0.947046$ به دست می‌آیند.

۳-۱-۳ شرایط مرزی

در آزمایش تجربی (همان طور که در بخش ۱-۲-۲ و ۲-۲-۲ اشاره شد) سرعت خطی ابزار شکل‌دهی ۲ m/min می‌باشد که اعمال این سرعت در شبیه‌سازی عددی زمان بسیار زیادی خواهد برد. بنابراین جهت بالا بردن سرعت شبیه‌سازی لازم است سرعت بالا رود. سرعت ابزار به کار رفته در شبیه‌سازی $V = 5$ m/s می‌باشد که پس از بررسی تأثیر میزان سرعت بر اندازه‌ی کرنش مطابق شکل ۳-۳ مورد تأیید قرار گرفت. سرعت‌های بالاتر باعث چروکیدگی ورق در هنگام شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی می‌شود، در نتیجه قابل قبول نیستند.



شکل ۳-۳- کرنش‌های ضخامتی به دست آمده از سرعت‌های مختلف

تعریف مسیر ابزار نوع اول

در شکل ۳-۴، مسیر ابزار نوع اول در شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است، که به صورت یک مارپیچ کروی^۱ می‌باشد. در این حالت برعکس حالت تجربی، ورق که به قالب بسته شده است، ثابت است و هیچ حرکتی ندارد و شکل‌دهی فقط با حرکت ابزار صورت می‌گیرد. در این نوع مسیر، تماس‌های بین ابزار - ورق، قالب - ورق و ورق‌گیر - ورق همگی از نوع پناستی^۲ و با ضریب اصطکاک ۰/۱ در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی توسط مسیری که ابزار در طول فرایند می‌پیماید، تعیین می‌شود. این مسیر با استفاده از زیربرنامه‌ی نوع VDISP که به وسیله‌ی نرم‌افزار ویژوال استودیو^۳ نوشته شده است تعیین می‌شود. زیر برنامه‌ی نوشته شده توسط کامپایلر فرترن^۴ با نرم‌افزار آباکوس جفت^۵ شده و به این ترتیب ابزار مسیر نوشته شده در زیر برنامه را طی می‌کند. در مسیر ابزار نوع اول، مسیر حرکت به شکل عرقچینی از یک کره به صورت مارپیچ با گام P_h است و روابط زیر در زیربرنامه‌ی مربوط به آن قرار داده می‌شود:

$$Z = V_z \times s \quad ۲۷-۳$$

$$X = \frac{\sin\left(\arccos\left(\frac{Z}{h}\right)\right) \times r_0 \times \cos(\omega\pi Z)}{h} \quad ۲۸-۳$$

$$Y = \frac{\sin\left(\arccos\left(\frac{Z}{h}\right)\right) \times r_0 \times \sin(\omega\pi Z)}{h} \quad ۲۹-۳$$

که در آن h ارتفاع عرقچین کره، ω تعداد دوران‌های لازم برای رسیدن به ارتفاع عرقچین کره، s زمان، V_z سرعت در راستای محور Z ، r_0 شعاع اولیه عرقچین کره (بزرگترین شعاع) و X ، Y و Z به ترتیب جا به جایی در راستای محورهای مختصات x ، y و z می‌باشند. اگر h با r_0 مساوی شود، عرقچین کره تبدیل به یک نیمکره خواهد شد. ارتفاع P_h نیز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$P_h = h/\omega \quad ۳۰-۳$$

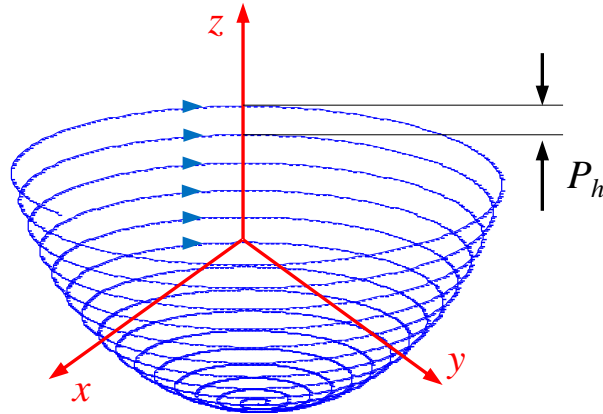
¹ Spherical Spirial

² Penalty

³ Visua Studio

⁴ Fortran Compiler

⁵ Link



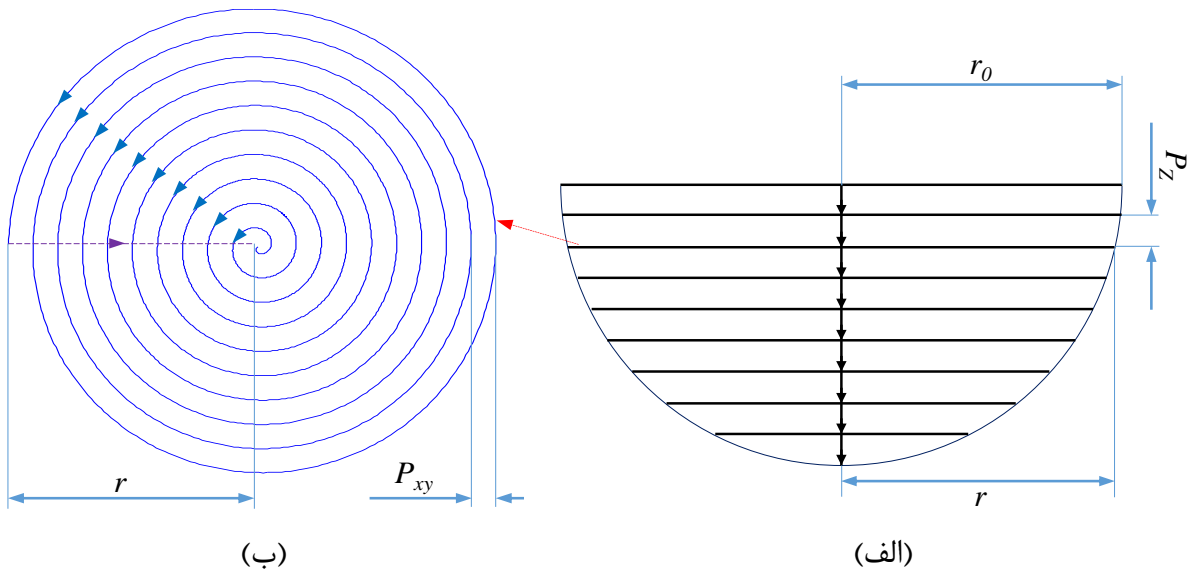
شکل ۳-۴- مسیر ابزار نوع اول در شبیه‌سازی عددی

تعریف مسیر ابزار نوع دوم

در مسیر ابزار نوع دوم در شبیه‌سازی عددی، ابزار به صورت یک مارپیچ در عمق‌های مشخص از مرکز آن عمق به سمت محیط عرقچین کره حرکت کرده و به تدریج و به صورت گام به گام قطعه‌کار را شکل‌دهی می‌کند. در شکل ۳-۵ (الف)، این مسیر نشان داده شده است، که یک مسیر با شعاع اولیه‌ی r_0 و گام عمودی P_z می‌باشد و در عمقی که شعاع عرقچین r شده است شکل مارپیچ مربوط به آن در شکل ۳-۵ (ب) نشان داده شده است. این مارپیچ دارای گام افقی P_{xy} می‌باشد. مانند تعریف مسیر ابزار نوع اول، در نوع دوم تعریف مسیر ابزار نیز، تماس‌های بین ابزار - ورق، قالب - ورق و ورق‌گیر - ورق همگی از نوع پنالتی و با ضریب اصطکاک $0/1$ در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی توسط مسیری که ابزار در طول فرایند می‌پیماید، تعیین می‌شود. مسیر حرکت ابزار با استفاده از یک کد عددی که به وسیله نرم‌افزار متلب^۱ برای امپلیتود^۲ جابه‌جایی و چرخش ابزار نوشته شده است تعیین می‌شود.

^۱ Matlab

^۲ Amplitude



شکل ۳-۵- مسیر ابزار نوع دوم در شبیه‌سازی عددی در دو نمای سه بعدی (الف) و (ب)

۳-۲- شبیه‌سازی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

مدل آباکوس فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، کاملاً مشابه فرایند شکل‌دهی تدریجی می‌باشد (بخش ۲-۱-۱)، تنها تفاوت در اندازه‌ی قطر ابزار شکل‌دهی می‌باشد که برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی برابر با ۸۵ mm است. همچنین همانند فرایند شکل‌دهی تدریجی، ورق آزمایش در این فرایند نیز ناهمسانگرد فرض شده است.

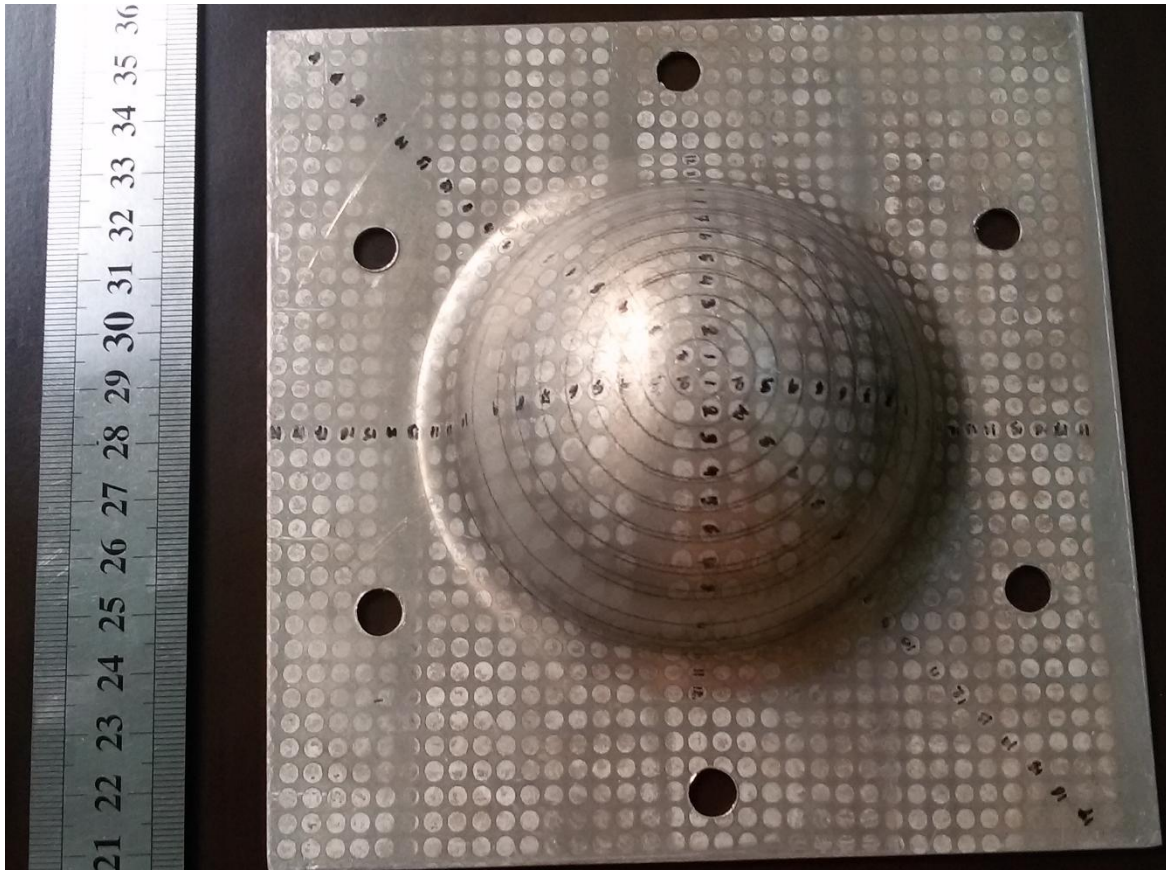
ابزار (سنبه) با سرعت 0.13 m/s به سمت پایین حرکت کرده و عملیات شکل‌دهی را انجام می‌دهد.

فصل ۴ نتایج و بحث

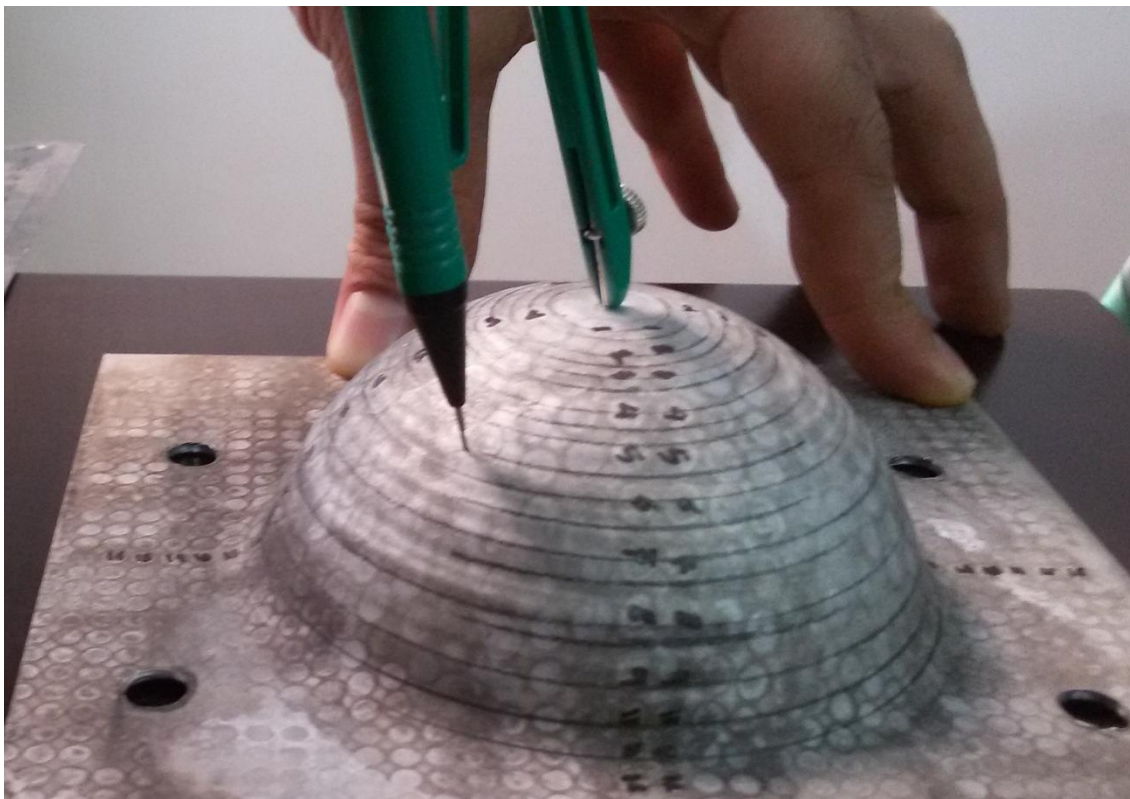
۴-۱- نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی فرایند شکل دهی تدریجی

برای مطالعه‌ی کرنش‌های اعمال شده بر روی ورق آلومینیومی پس از انجام فرایند شکل دهی، که ورق اولیه را به صورت عرقچینی از کره با قطر داخلی بیشینه‌ی $86/1$ mm و ارتفاع داخلی $38/25$ mm می‌رساند، مسیرهایی از مش‌ها مطابق شکل ۴-۱ از مرکز عرقچین تا محیط خارجی ورق در جهت‌های مختلف شماره‌گذاری شده و قطر بزرگ و قطر کوچک مش‌های این مسیرها اندازه‌گیری شده‌اند. سپس همان طور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، به مرکز نیمکره و به شعاع بیرونی‌ترین قسمت مش‌های اندازه‌گیری شده، به وسیله‌ی پرگار دایره‌هایی رسم شده و شعاع هر یک از دایره‌ها به عنوان شعاع عرقچین نیمکره برای آن مش تعیین می‌گردد. با تقسیم شعاع‌های به دست آمده بر نصف طول ورق اولیه (بزرگترین شعاع عرقچین)، شعاع نسبی \bar{R} به دست می‌آید. شکل ۴-۳ (الف)، مش به قطر D_0 را قبل از تغییر شکل و شکل ۴-۳ (ب)، همان مش را پس از تغییر شکل با قطر بزرگ D_r و قطر کوچک D_θ به صورت شماتیک نشان می‌دهد. با استفاده از روابط ۴-۱ تا ۴-۳، مقادیر کرنش شعاعی (ϵ_r)، کرنش محیطی (ϵ_θ) و کرنش ضخامتی (ϵ_t) برای هر یک از مش‌های شماره‌گذاری شده، تعیین می‌گردد. حال با داشتن اندازه‌ی کرنش‌ها در شعاع‌های مختلف، نمودار کرنش‌ها بر حسب شعاع نسبی \bar{R} برای هر آزمایش، قابل ترسیم است.

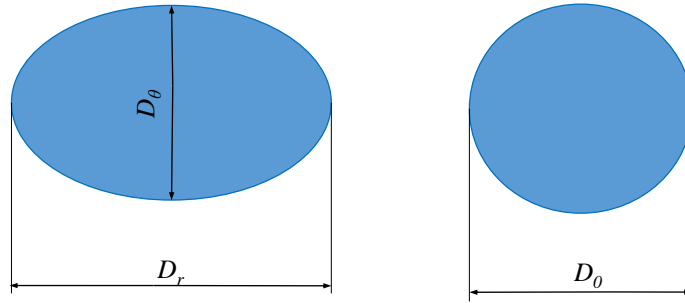
در این پایان‌نامه مطالعه‌ی توزیع کرنش برای هر یک از آزمایش‌ها، با بررسی کرنش طولی و ضخامت نمونه‌های به دست آمده از آنها صورت گرفت. ضخامت قطعه‌ی شکل دهی شده، همان‌طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است به وسیله‌ی ضخامت‌سنج قابل اندازه‌گیری است. از طرف دیگر با استفاده از رابطه‌ی ۴-۴ و داشتن ضخامت اولیه و کرنش ضخامتی نیز می‌توان ضخامت را اندازه‌گیری کرد. در این رابطه t_0 ضخامت اولیه‌ی ورق و t ضخامت قطعه‌ی شکل دهی شده در \bar{R} های مختلف است. در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶، ضخامت به دست آمده از رابطه‌ی ۴-۴ و ضخامت اندازه‌گیری شده توسط ضخامت‌سنج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در آزمایش مربوط به شکل ۴-۵، شکل دهی با استفاده از ابزاری به قطر 12 mm و گام $0/5$ mm در مسیر ابزار نوع اول صورت گرفت و در آزمایش مربوط به شکل ۴-۶، شکل دهی با استفاده از همان ابزار با گام 3 mm در مسیر دوم صورت گرفت. مطالعه‌ی این شکل‌ها، نشان می‌دهد که اختلاف نمودار ضخامت به دست آمده از رابطه‌ی ۴-۴ و ضخامت اندازه‌گیری شده توسط ضخامت‌سنج بسیار ناچیز است و در با تقریب خوبی برای بقیه‌ی آزمایش‌ها، می‌توان ضخامت به دست آمده از رابطه‌ی ۴-۴ را به عنوان ضخامت قطعه در نظر گرفت.



شکل ۴-۱- مسیرهایی از مش‌های شماره‌گذاری شده برای فرایند ISF



شکل ۴-۲- ترسیم دایره برای به دست آوردن شعاع عرقچین کره‌ای که مش بر روی آن قرار دارد



(ب)

(الف)

شکل ۴-۳- شکل مش (الف) قبل از شکل دهی، (ب) بعد از شکل دهی

$$\varepsilon_r = \ln\left(\frac{D_r}{D_0}\right) \quad 1-4$$

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{D_\theta}{D_0}\right) \quad 2-4$$

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \quad 3-4$$

$$t = t_0 \times \exp(\varepsilon_t) \quad 4-4$$

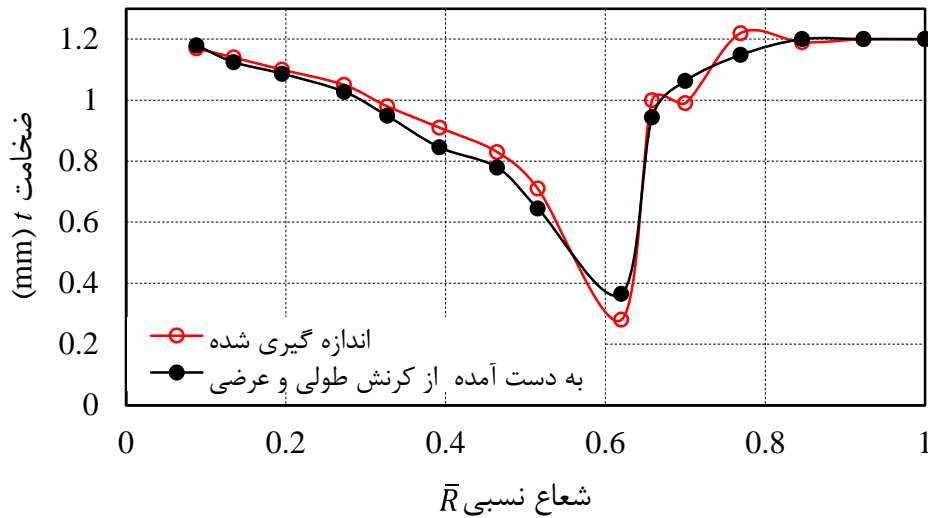


(ب)



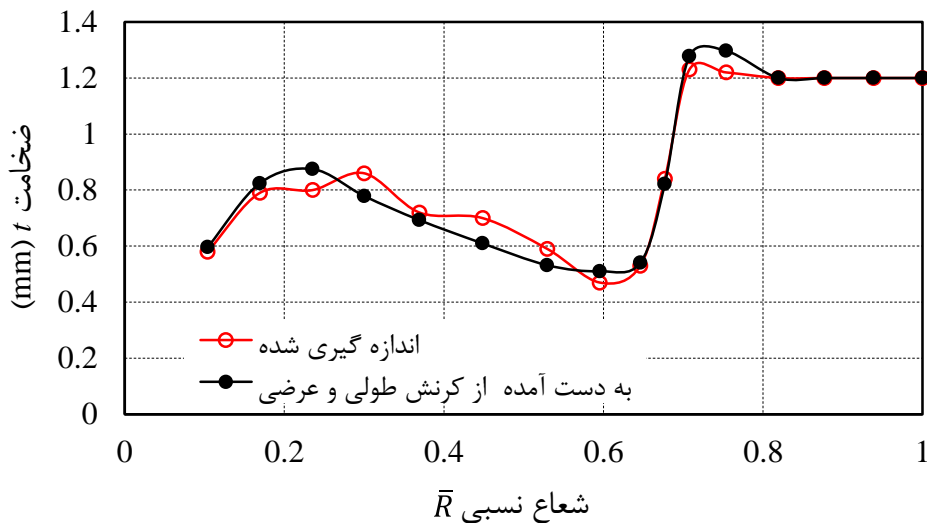
(الف)

شکل ۴-۴- (الف) ضخامت سنج لوله، (ب) اندازه گیری ضخامت قطعه به وسیله ضخامت سنج،



شکل ۴-۵- مقایسه‌ی ضخامت اندازه‌گیری شده توسط ضخامت‌سنج با ضخامت به دست آمده بر اساس

کرنش‌های طولی و عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۰/۵ mm و مسیر ابزار نوع اول)



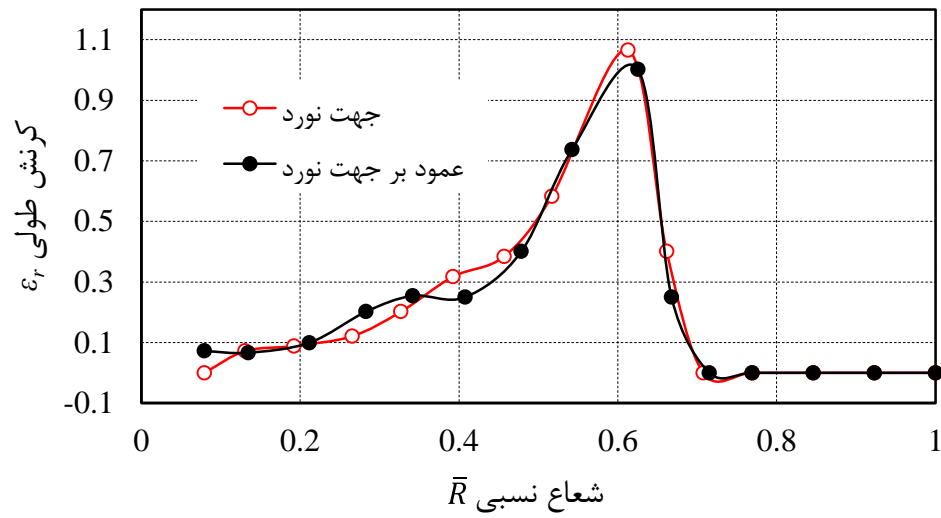
شکل ۴-۶- مقایسه‌ی ضخامت به اندازه‌گیری شده توسط ضخامت‌سنج با ضخامت به دست آمده بر اساس

کرنش‌های طولی و عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

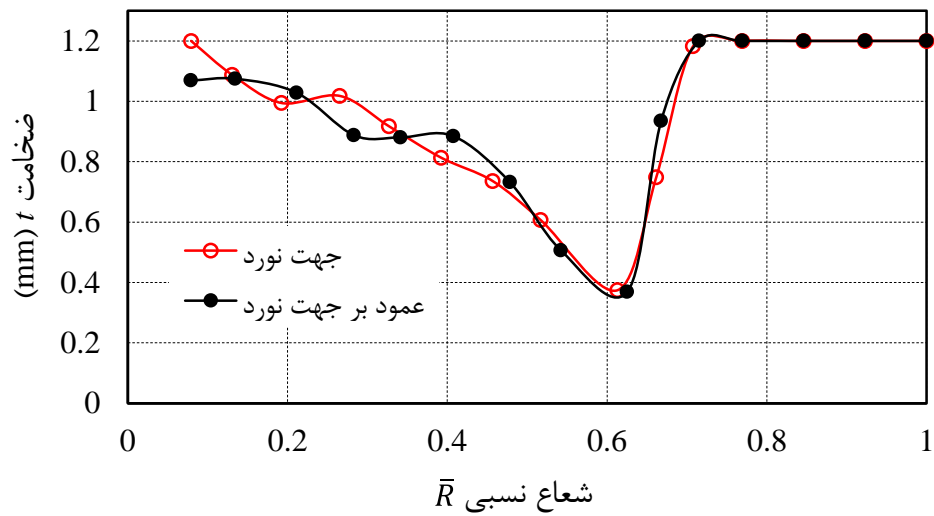
۴-۱-۱ اثر ناهمسانگردی ورق بر توزیع کرنش

تأثیر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش، با مطالعه‌ی اندازه کرنش طولی و ضخامت در جهت‌های نورد و عمود بر جهت نورد مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸، به ترتیب تأثیر ناهمسانگردی بر اندازه کرنش طولی و ضخامت ورق را نشان می‌دهند؛ هنگامی که از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول برای شکل‌دهی استفاده شد. شکل‌های ۴-۹، ۴-۱۰ و ۴-۱۱، به ترتیب تأثیر ناهمسانگردی بر

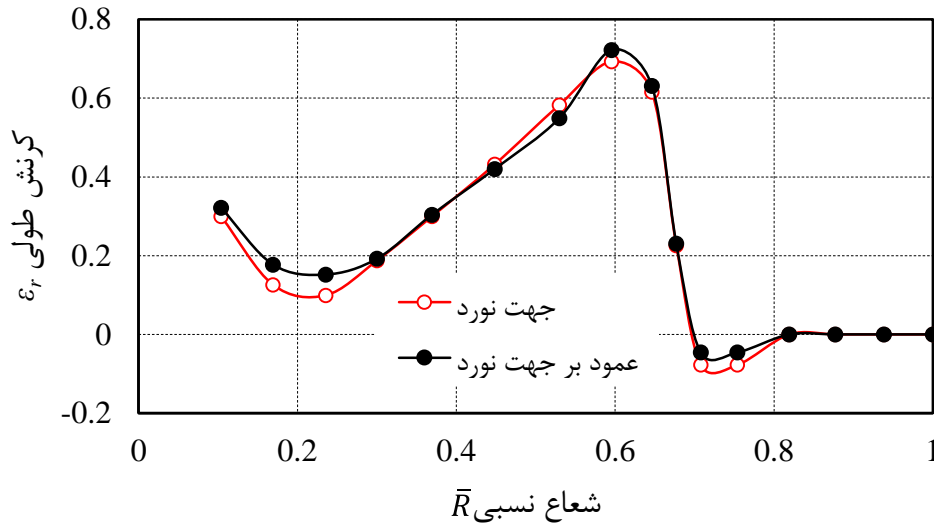
اندازه کرنش طولی، کرنش عرضی و ضخامت ورق را نشان می‌دهند؛ هنگامی که از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم برای شکل‌دهی استفاده شد.



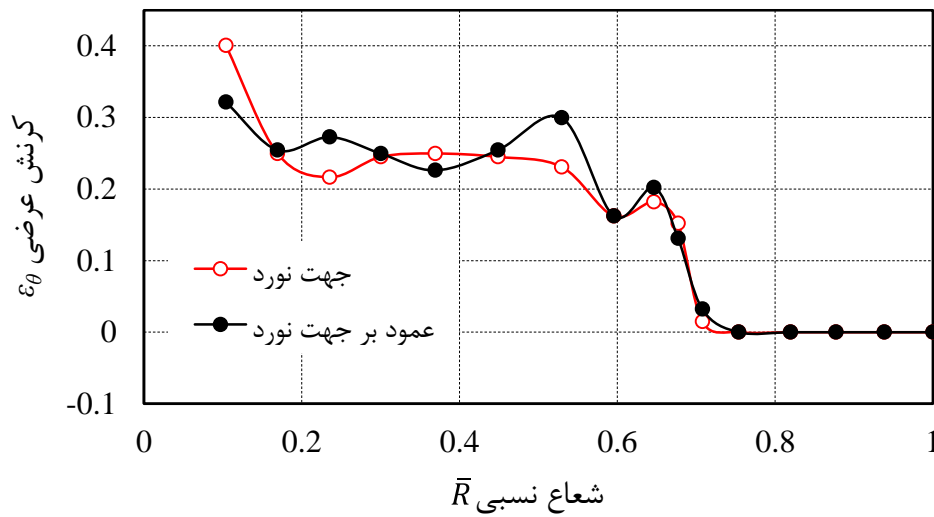
شکل ۴-۷- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



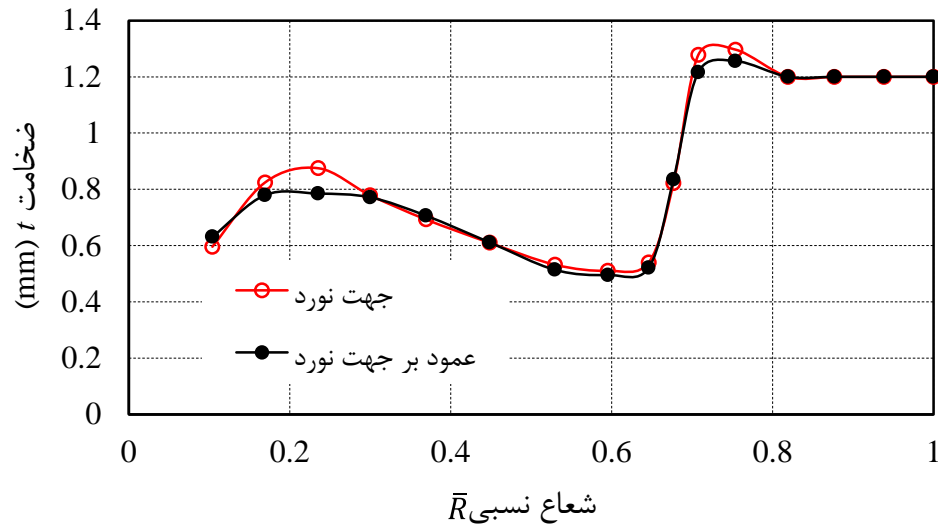
شکل ۴-۸- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



شکل ۴-۹- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)



شکل ۴-۱۰- اثر ناهمسانگردی بر کرنش عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

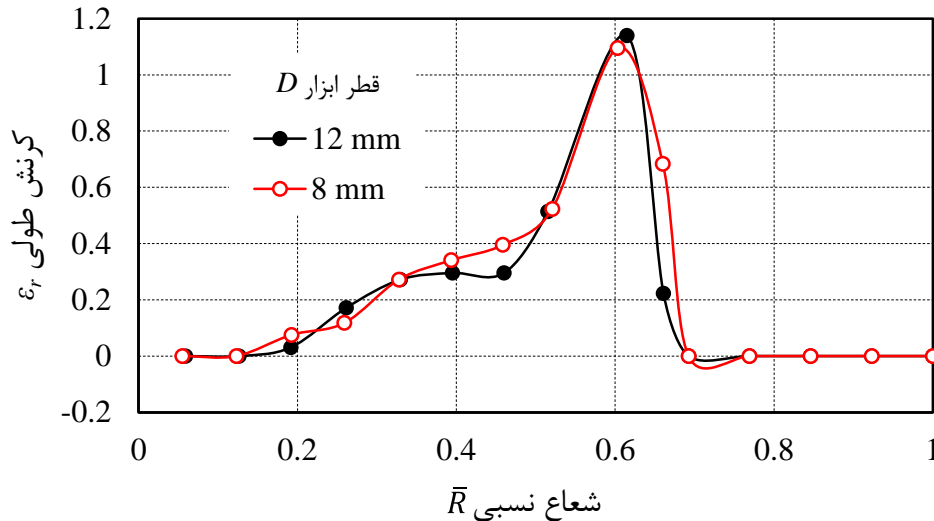


شکل ۴-۱۱- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

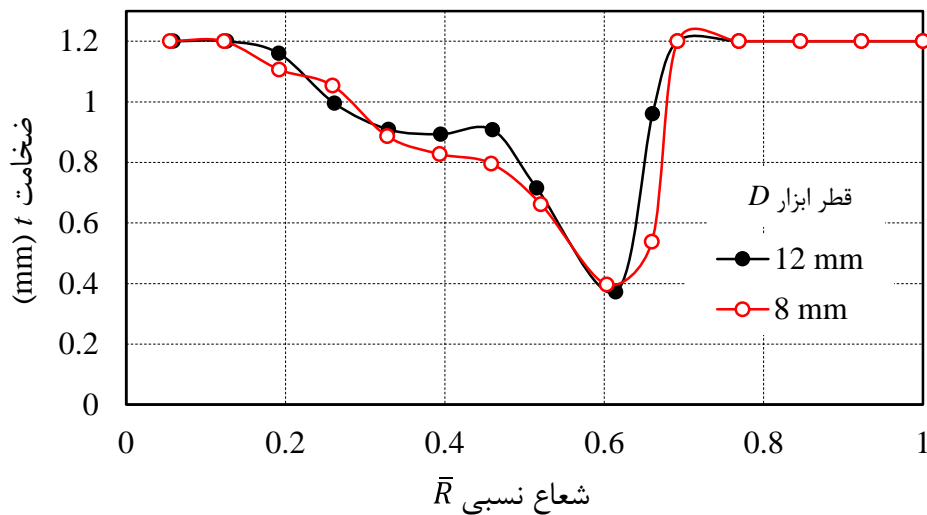
با بررسی نمودارهای فوق، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر ناهمسانگردی بر میزان شکل‌پذیری در هر دو نوع مسیر ابزار قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

۴-۱-۲ اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش

قاعده‌ی کلی و ثابت شده‌ای که از آزمایش‌های محققان پیشین به دست آمد این است که با افزایش قطر ابزار، نیروی لازم برای شکل‌دهی افزایش ولی میزان کرنش‌های به وجود آمده در ورق کاهش خواهد یافت. بررسی اثر قطر ابزار بر میزان کرنش طولی و ضخامت در این تحقیق، نشان می‌دهد که وقتی میزان کرنش بسیار زیاد و ورق در آستانه‌ی پارگی قرار گرفته باشد، اثر قطر ابزار بر میزان توزیع کرنش قابل صرفه نظر کردن است. در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ اندازه‌ی کرنش طولی و ضخامت در جهت نورد، هنگامی که شکل‌دهی با استفاده از دو ابزار به قطرهای ۸ mm و ۱۲ mm در مسیر ابزار نوع اول و با گام ۰/۵ mm صورت گرفت، با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۱۲- اثر قطر ابزار بر کرنش طولی (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm)

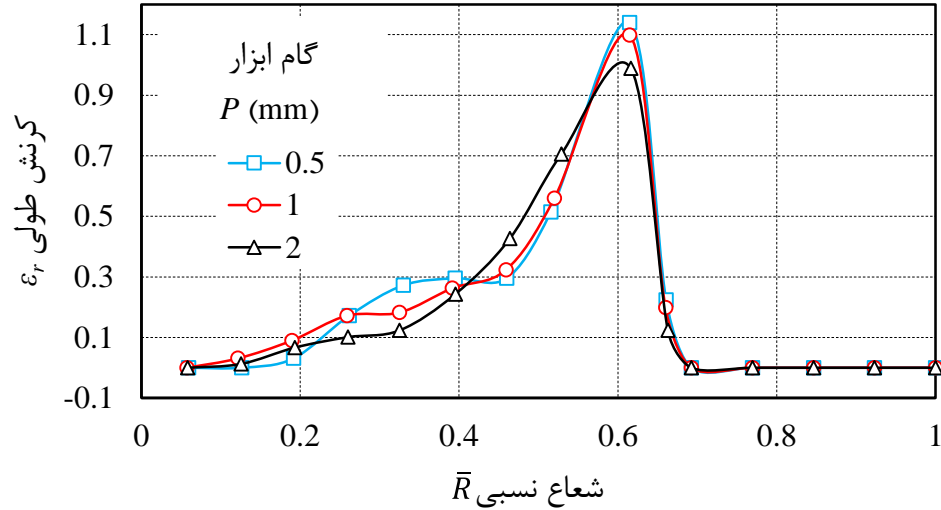


شکل ۴-۱۳- اثر قطر ابزار بر ضخامت ورق (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm)

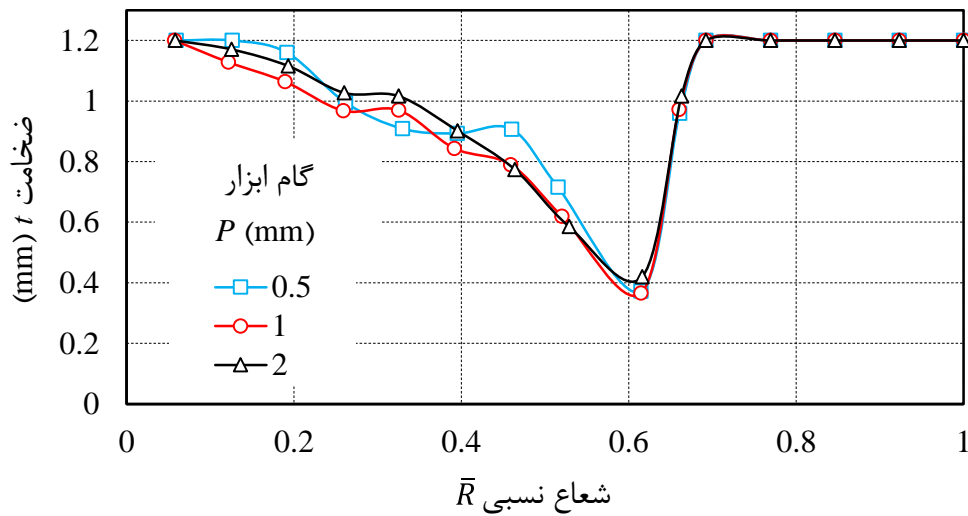
۴-۱-۳ اثر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام ماریپچ) بر توزیع کرنش

همان طور که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است، با افزایش گام اندازه بیشینه کرنش طولی اندکی کاهش می‌یابد که در نتیجه آن کاهش ضخامت اندکی بهبود خواهد یافت (شکل ۴-۱۵)، از طرفی زمان شکل‌دهی نیز با افزایش گام کاهش خواهد یافت که باعث کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. ولی شکل ۴-۱۶ به وضوح کاهش کیفیت سطح به وجود آمده از افزایش گام را نشان می‌دهد. این میزان کاهش کیفیت سطح اگر در مقایسه با کاهش زمان شکل‌دهی به دست آمده از افزایش گام، قابل چشم‌پوشی باشد، برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌توان از گام‌های بزرگتری برای شکل‌دهی استفاده کرد.

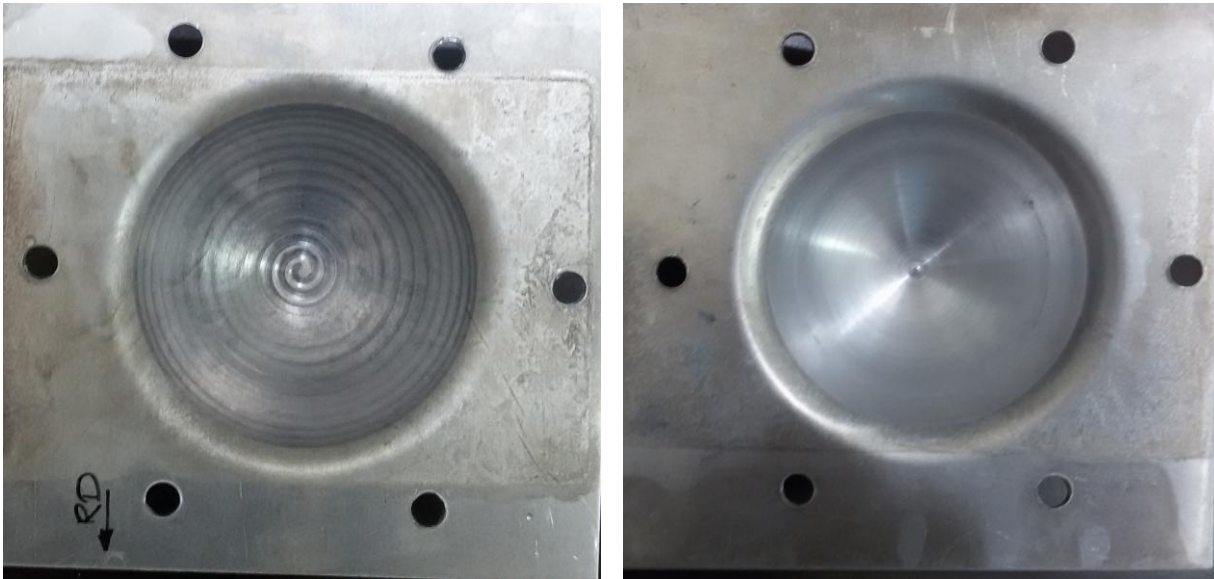
در این آزمایش، اندازه‌ی کرنش طولی و ضخامت در جهت نورد، وقتی شکل‌دهی با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm در مسیر ابزار نوع اول و با گام‌های ۰/۵ mm، ۱ mm، ۲ mm انجام گرفت؛ با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۱۴- اثر گام ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



شکل ۴-۱۵- اثر گام ابزار بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



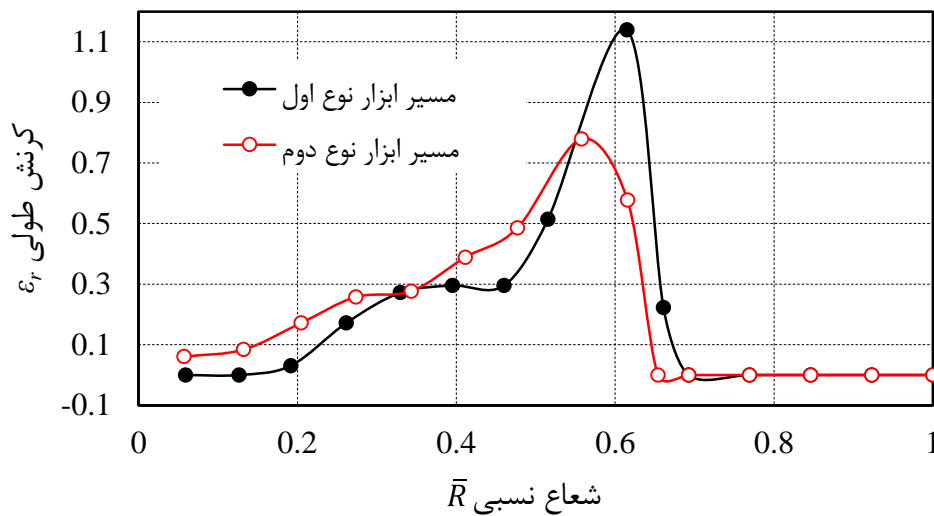
(ب)

(الف)

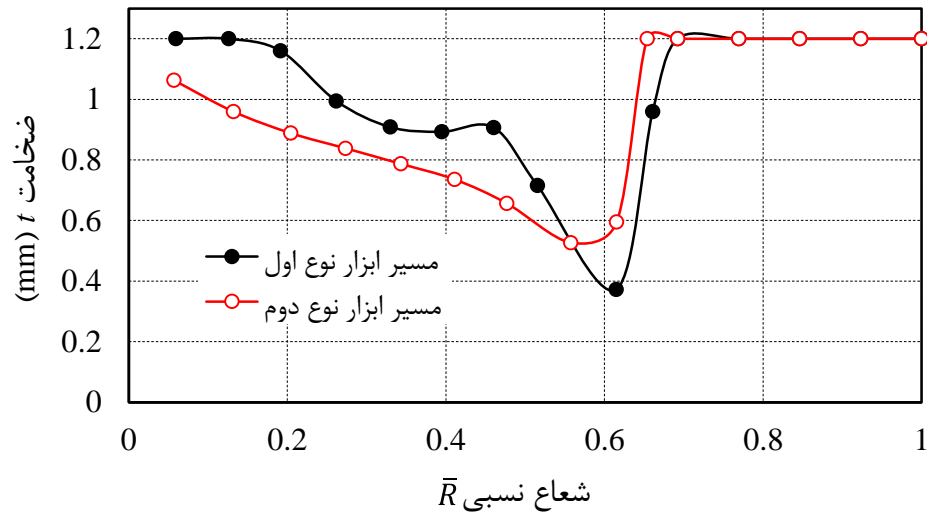
شکل ۴-۱۶- مقایسه‌ی کیفیت سطح برای گام‌های متفاوت (الف) گام 0.5 mm، (ب) گام 0.4 mm. (قطر ابزار 12 mm و مسیر ابزار نوع اول)

۴-۱-۴ اثر نوع مسیر ابزار بر توزیع کرنش

برای بررسی تأثیر نوع مسیر ابزار بر توزیع کرنش، ورق آزمایش با استفاده از ابزاری به قطر 12 mm و اعمال گام 0.5 mm، یک بار با استفاده از مسیر ابزار نوع اول و بار دیگر با استفاده از مسیر ابزار نوع دوم شکل‌دهی شده و تغییرات کرنش طولی و ضخامت در هر دو مسیر ابزار با یکدیگر مقایسه شدند. این تغییرات به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱۷- اثر نوع مسیر ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار 12 mm و گام 0.5 mm)

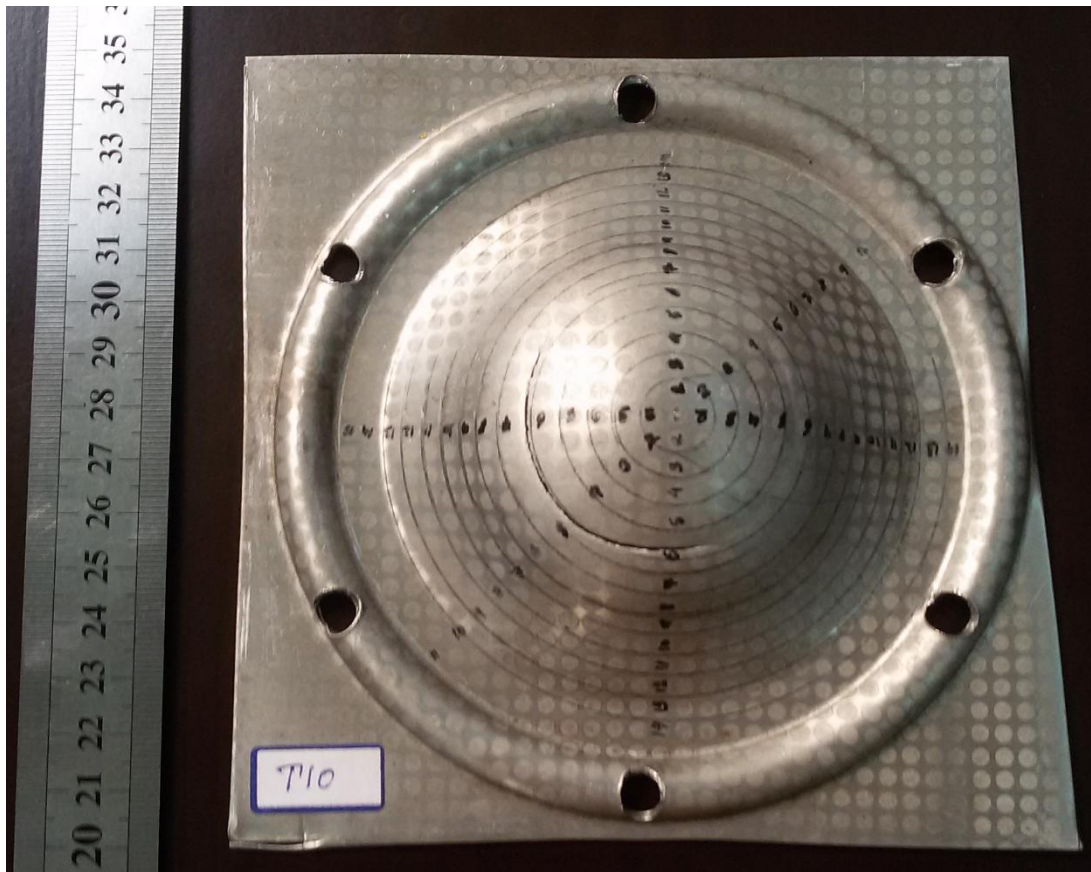


شکل ۴-۱۸- اثر نوع مسیر ابزار بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm)

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که در مسیر ابزار نوع دوم، میزان کرنش طولی و کاهش ضخامت بسیار کمتر است. در نتیجه شکل‌پذیری با تغییر نوع مسیر ابزار به میزان قابل توجهی بهبود یافته است.

۴-۲- نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

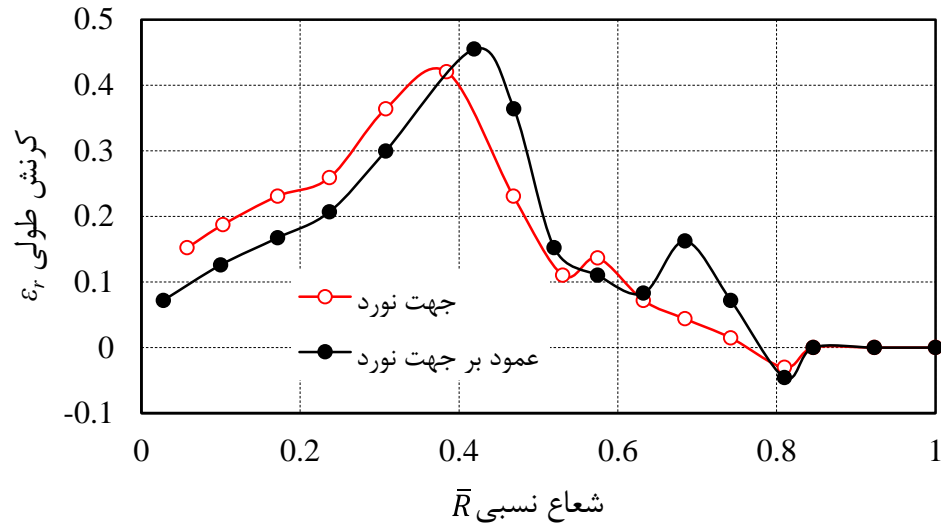
در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی نیز همانند فرایند شکل‌دهی تدریجی، برای مطالعه کرنش‌های اعمال شده بر روی ورق آلومینیومی پس از انجام فرایند شکل‌دهی، مسیرهایی از مش‌ها مطابق شکل ۴-۱۹ از مرکز عرقچین کره تا محیط خارجی ورق در جهت‌های مختلف شماره‌گذاری شده و قطر بزرگ و قطر کوچک مش‌های این مسیرها اندازه‌گیری می‌شوند. سپس به مرکز عرقچین کره و به شعاع بیرونی‌ترین قسمت مش‌های اندازه‌گیری شده، به وسیله‌ی پرگار دایره‌هایی رسم شده و شعاع هر یک از دایره‌ها به عنوان شعاع عرقچین نیمکره برای هر یک از مش‌ها تعیین می‌گردد. با تقسیم شعاع هر کدام از عرقچین‌ها بر نصف طول ورق اولیه (بزرگترین شعاع عرقچین)، شعاع نسبی \bar{R} به دست می‌آید. پس از اندازه‌گیری قطرهای بزرگ و کوچک مش‌های هر مسیر، با استفاده از روابط ۴-۱ تا ۴-۳، مقادیر کرنش شعاعی (ϵ_r) ، کرنش محیطی (ϵ_θ) و کرنش ضخامتی (ϵ_t) برای هر شعاع تعیین می‌گردد. حال با داشتن اندازه‌ی کرنش‌ها در شعاع‌های مختلف، نمودار کرنش‌ها بر حسب شعاع نسبی \bar{R} برای هر آزمایش، قابل ترسیم است.



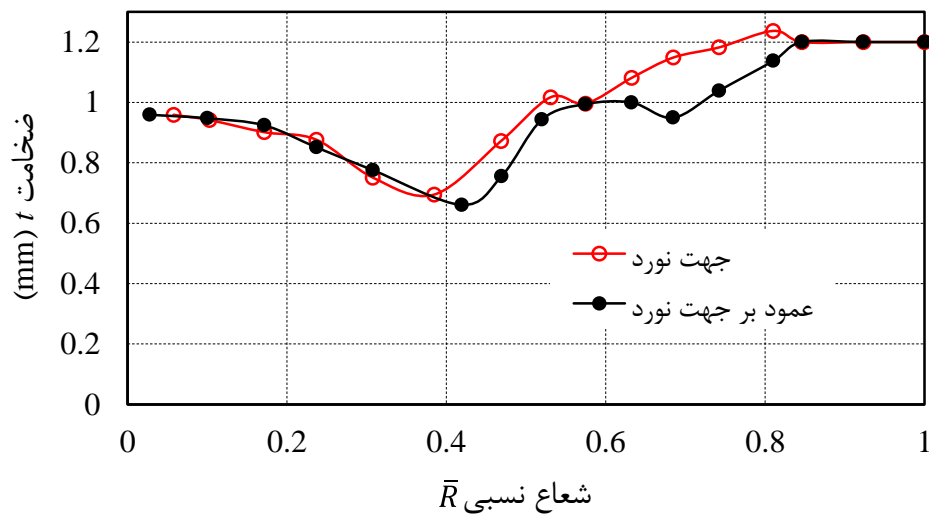
شکل ۴-۱۹- مسیرهایی از مش‌های شماره‌گذاری شده برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

۴-۲-۱ اثر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش

تأثیر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش، با مطالعه‌ی اندازه کرنش طولی و ضخامت در جهت‌های نورد و عمود بر جهت نورد مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱، به ترتیب تأثیر ناهمسانگردی بر اندازه کرنش طولی و ضخامت ورق را نشان می‌دهند؛ هنگامی که فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، بدون استفاده از روانکار انجام شده است.



شکل ۴-۲۰- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، بدون استفاده از روانکار

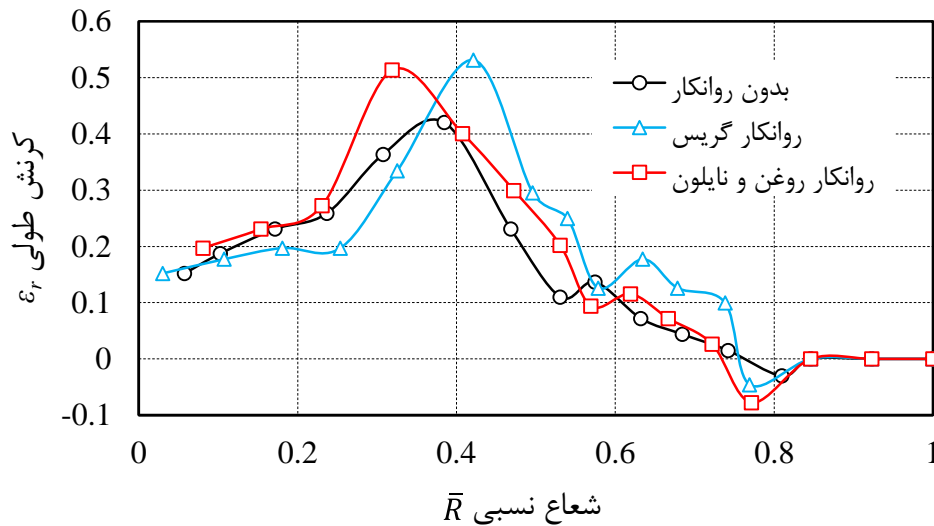


شکل ۴-۲۱- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، بدون استفاده از روانکار

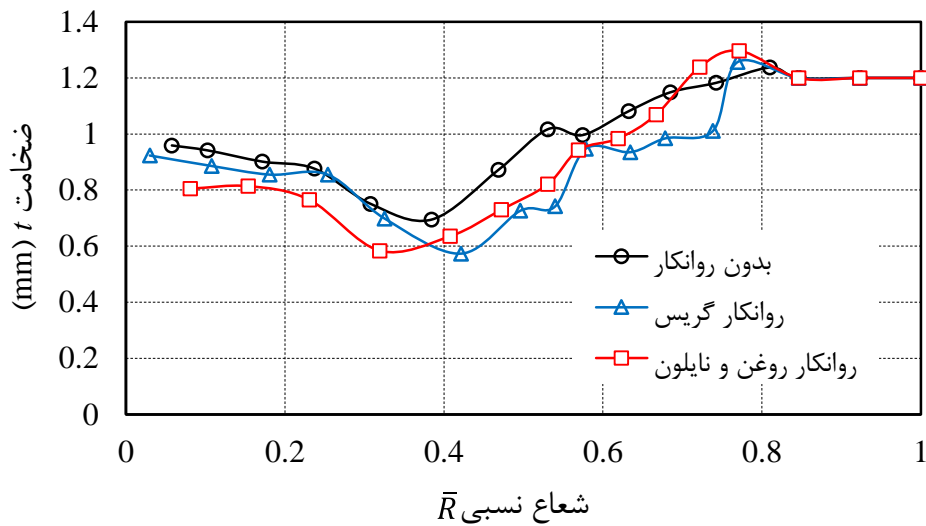
با بررسی نمودارهای فوق، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر ناهمسانگردی بر میزان توزیع کرنش در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی، قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

۴-۲-۲- تأثیر استفاده از روانکار بر توزیع کرنش

شکل‌های ۴-۲۲ و ۴-۲۳، مقادیر کرنش طولی و ضخامت ورق اندازه‌گیری شده در جهت نورد را برای هر سه آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۲- اثر استفاده از روانکار بر کرنش طولی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

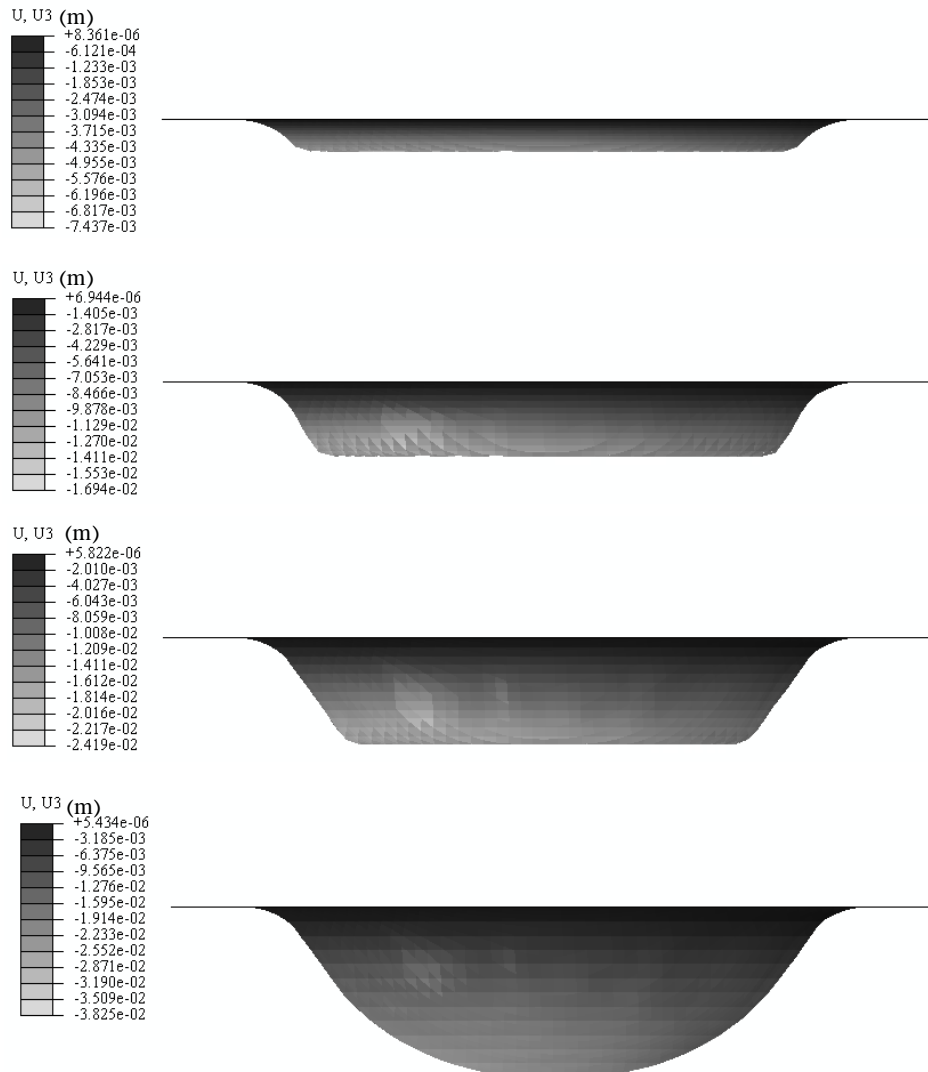


شکل ۴-۲۳- اثر استفاده از روانکار بر ضخامت در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

در آزمایش کشش با سنبه‌ی سرکروی، بیشترین کرنش در لحظه‌ی شکست به وجود می‌آید. با بررسی نمودارهای فوق، مشاهده می‌شود که در لحظه‌ی شکست با استفاده از روانکار، کرنش طولی در حدود ۰/۵۳ و ضخامت در حدود ۰/۵۵ به دست می‌آید، درحالی‌که بدون استفاده از روانکار اندازه‌ی کرنش طولی در حدود ۰/۴۳ و ضخامت در حدود ۰/۷ به دست آمده است. در نتیجه می‌توان گفت که شکل‌پذیری، در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی با استفاده از روانکار بهبود یافته است.

۴-۳- نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی

شکل ۴-۲۴ مراحل تدریجی شکل‌گیری عرقچین کروی به قطر ۸۸/۵ mm و ارتفاع ۳۸/۲۵ mm در فرایند شکل‌دهی تدریجی را نشان می‌دهد. این مراحل برای هر دو نوع مسیر ابزار یکسان می‌باشد.

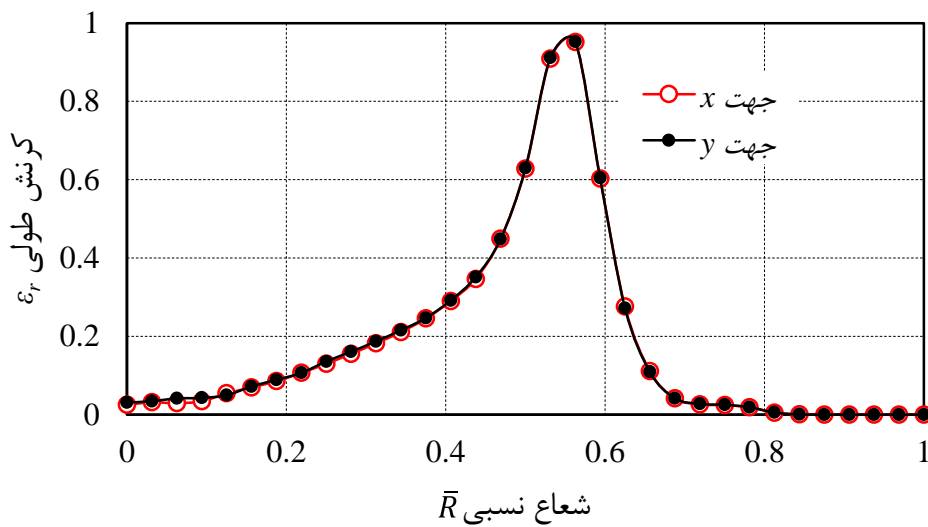


شکل ۴-۲۴- مراحل تدریجی تشکیل عرقچین کروی در فرایند شکل‌دهی تدریجی (شامل ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ انجام فرایند)

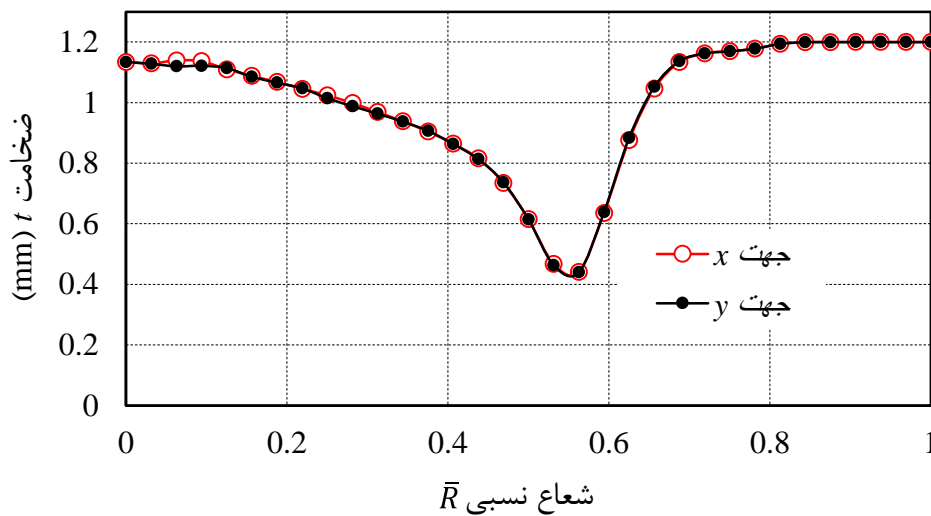
۴-۳-۱ اثر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش

تأثیر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش در شبیه‌سازی عددی، با مطالعه‌ی اندازه کرنش طولی و ضخامت در جهت‌های x و y ورق آلومینیومی مدل شده، به دست می‌آید. در واقع در شبیه‌سازی عددی جهت x به عنوان

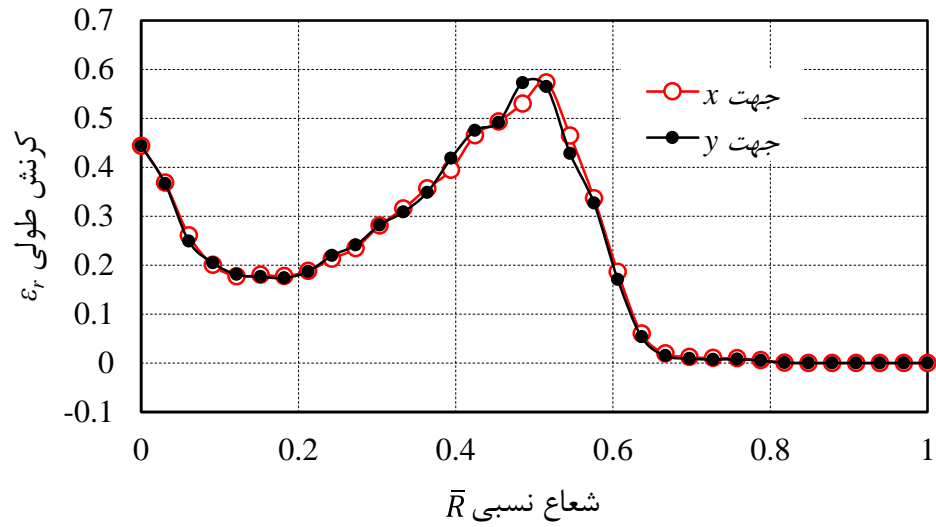
جهت نورد و جهت y به عنوان جهت عمود بر نورد فرض شده است. شکل‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۶، به ترتیب تأثیر ناهمسانگردی بر اندازه کرنش طولی و ضخامت ورق را نشان می‌دهند؛ هنگامی که از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول برای شکل‌دهی استفاده شد. شکل‌های ۴-۲۷، ۴-۲۸ و ۴-۲۹ نیز، به ترتیب تأثیر ناهمسانگردی بر اندازه کرنش طولی، کرنش عرضی و ضخامت ورق را نشان می‌دهند؛ هنگامی که از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم برای شکل‌دهی استفاده شد. با بررسی این نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش در هر دو نوع مسیر ابزار قابل چشم‌پوشی است.



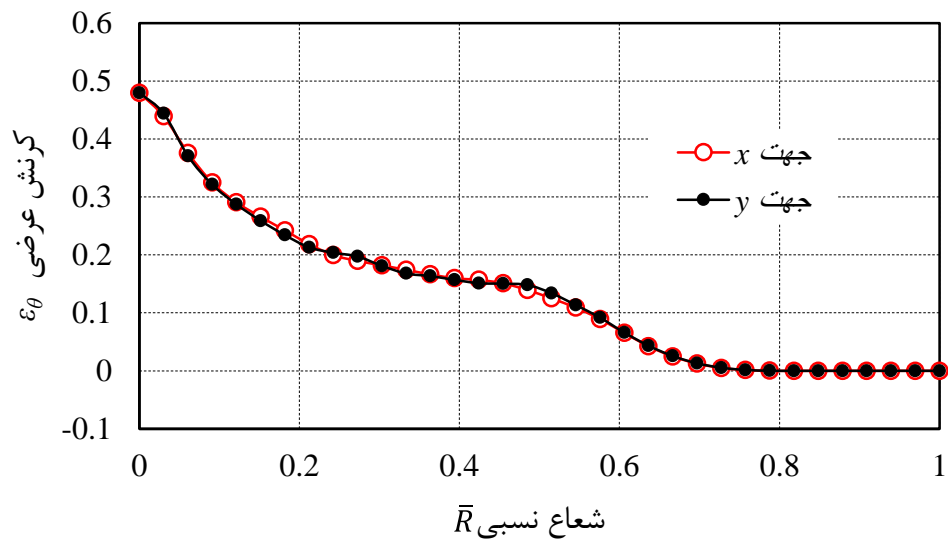
شکل ۴-۲۵- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



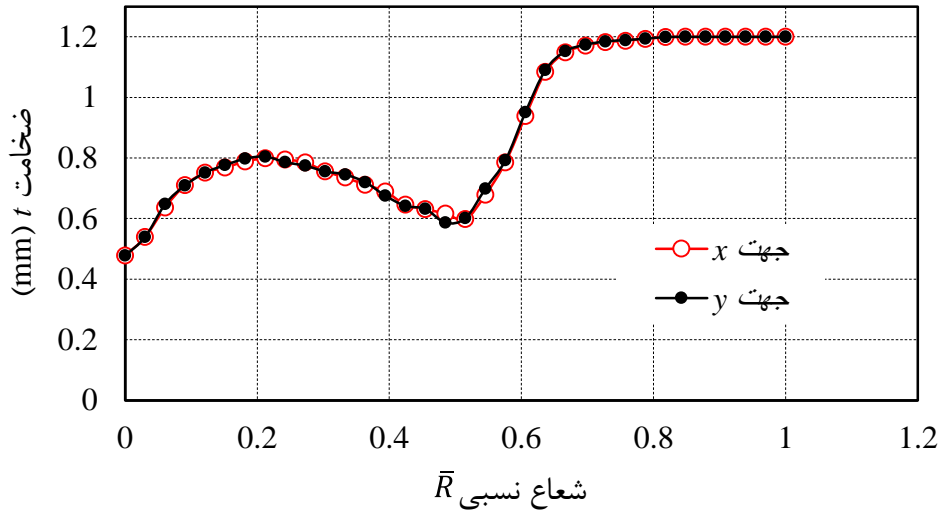
شکل ۴-۲۶- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



شکل ۴-۲۷- اثر ناهمسانگردی بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

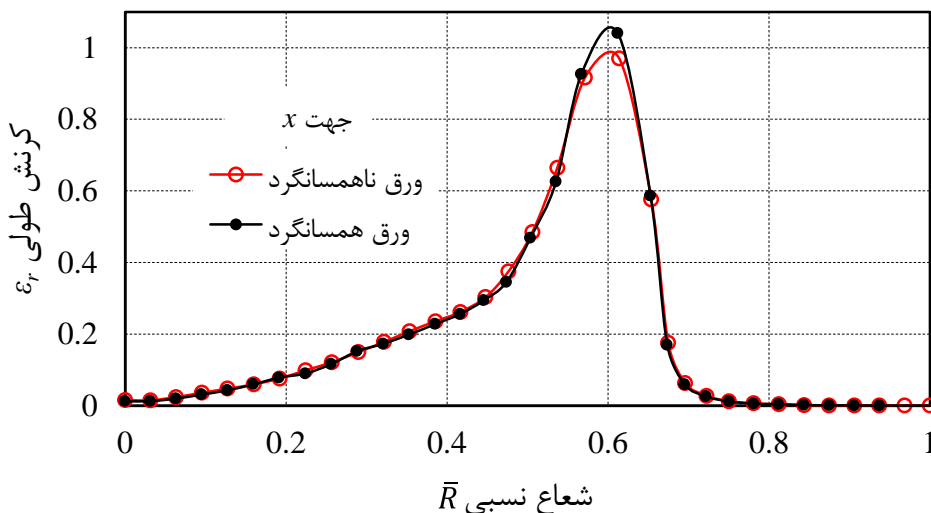


شکل ۴-۲۸- اثر ناهمسانگردی بر کرنش عرضی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)



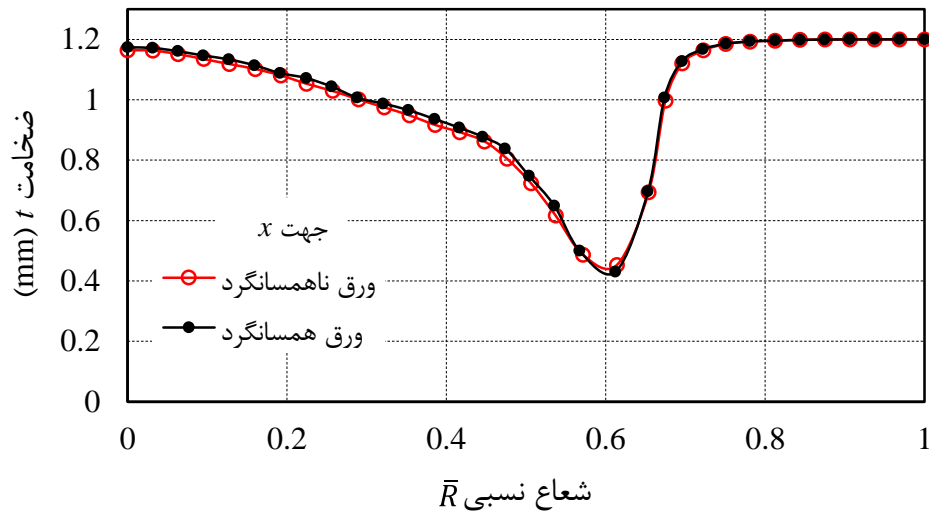
شکل ۴-۲۹- اثر ناهمسانگردی بر ضخامت (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

مطالعه‌ی توزیع کرنش در جهت نورد و عمود بر جهت نورد در حالت‌های آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان داد که اثر ناهمسانگردی بر توزیع کرنش بسیار ناچیز است. در اینجا سؤالی که مطرح می‌شود این است که، فرض ورق همسانگرد، چه تفاوتی در نتایج شبیه‌سازی فرایند ایجاد می‌کند؟ برای پاسخ به این سوال در شکل‌های ۴-۳۰ و ۴-۳۱، کرنش طولی و ضخامت در شکل‌دهی دو ورق همسانگرد و ناهمسانگرد به صورت شبیه‌سازی در جهت x ورق، با یکدیگر مقایسه شده است. در این آزمایش از ابزاری به قطر ۸ mm هنگامی که مسیر نوع اول را با گام ۰/۵ mm طی می‌کند، استفاده شده است.



شکل ۴-۳۰- مقایسه‌ی کرنش طولی برای ورق همسانگرد و ناهمسانگرد (قطر ابزار ۸ mm، گام ۰/۵ mm و

مسیر ابزار نوع اول)

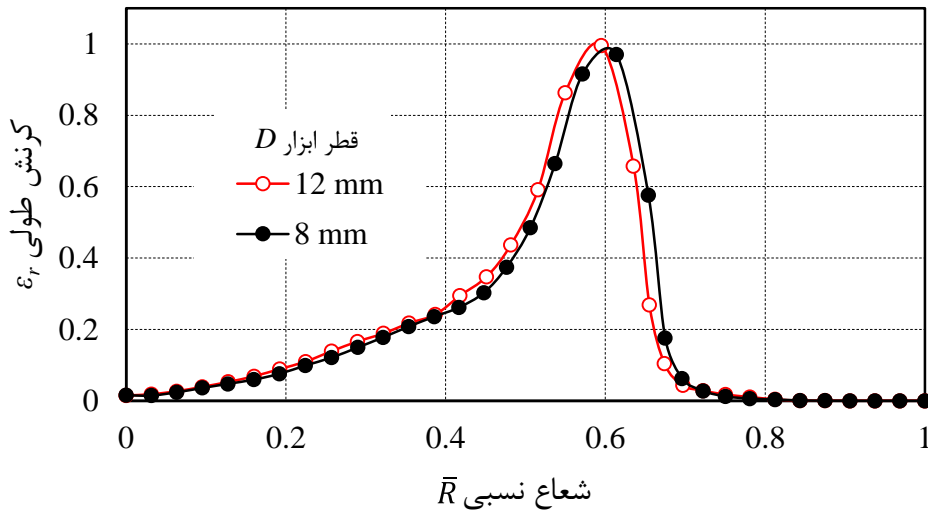


شکل ۴-۳۱- مقایسه‌ی ضخامت برای ورق همسانگرد و ناهمسانگرد (قطر ابزار ۸ mm، گام ۰/۵ mm و مسیر ابزار نوع اول)

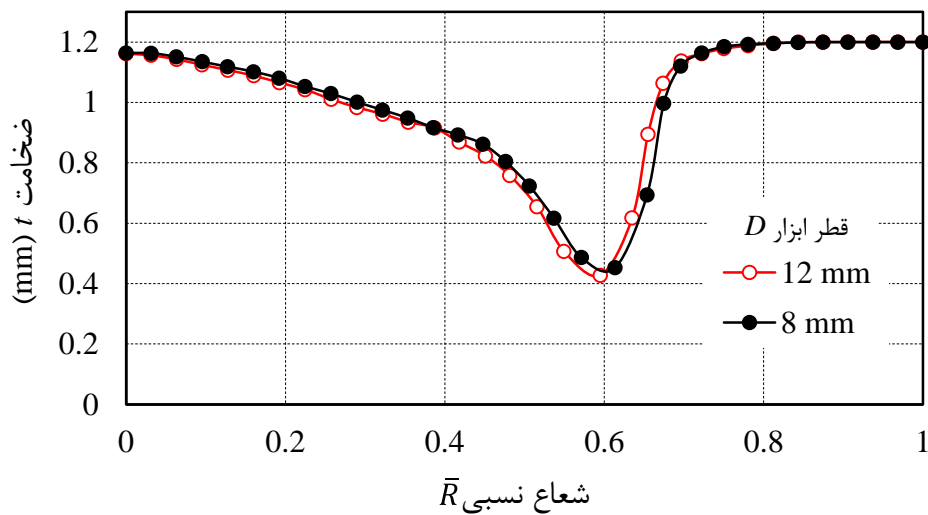
شکل‌های بالا نشان می‌دهد که تفاوت ناچیزی بین کرنش طولی و ضخامت برای ورق همسانگرد و ورق ناهمسانگرد وجود دارد.

۴-۳-۲ اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش

تأثیر قطر ابزار بر توزیع کرنش در شبیه‌سازی عددی فرایند در شکل‌های ۴-۳۲ و ۴-۳۳ نشان داده شده است، این نمودارها با بررسی تغییرات کرنش طولی و ضخامت، در شکل‌دهی با استفاده از ابزارهایی به قطرهای ۸mm و ۱۲ mm و با تعریف مسیر ابزار نوع اول برای گام ۰/۵ mm به دست آمده است. همانند آزمایش تجربی، نتایج شبیه‌سازی عددی نیز تغییر قابل ملاحظه‌ای در شکل‌پذیری ورق در اثر تغییر قطر ابزار را نشان نمی‌دهد.

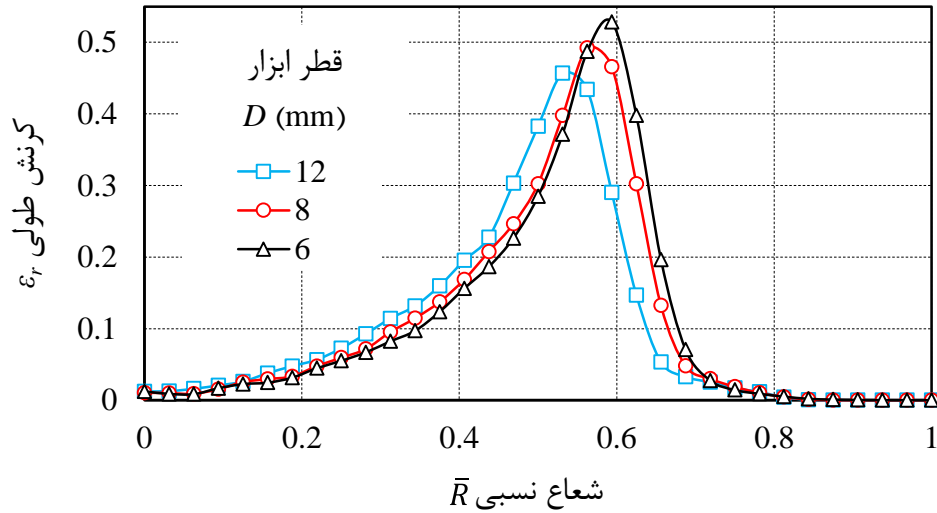


شکل ۴-۳۲- اثر قطر ابزار بر کرنش طولی (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm)

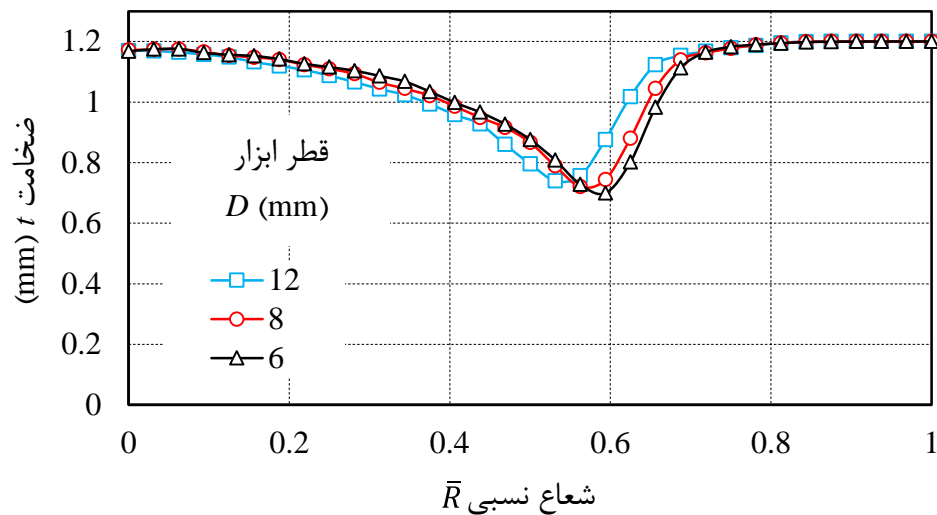


شکل ۴-۳۳- اثر قطر ابزار بر ضخامت ورق (مسیر ابزار نوع اول و گام ۰/۵ mm)

برای بررسی دقیق‌تر اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی تدریجی، عرقچینی از کره به ارتفاع ۲۵ mm با استفاده از ابزارهایی به قطر ۶ mm، ۸ mm و ۱۲ mm با تعریف مسیر ابزار نوع اول و گام ۱ mm شبیه‌سازی شده و کرنش طولی و ضخامت در آنها با یکدیگر مقایسه شده است که در شکل‌های ۴-۳۴ و ۴-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۴- اثر قطر ابزار بر کرنش طولی (ارتفاع عرقچین کره ۲۵ mm، گام ۱ mm و مسیر ابزار نوع اول)



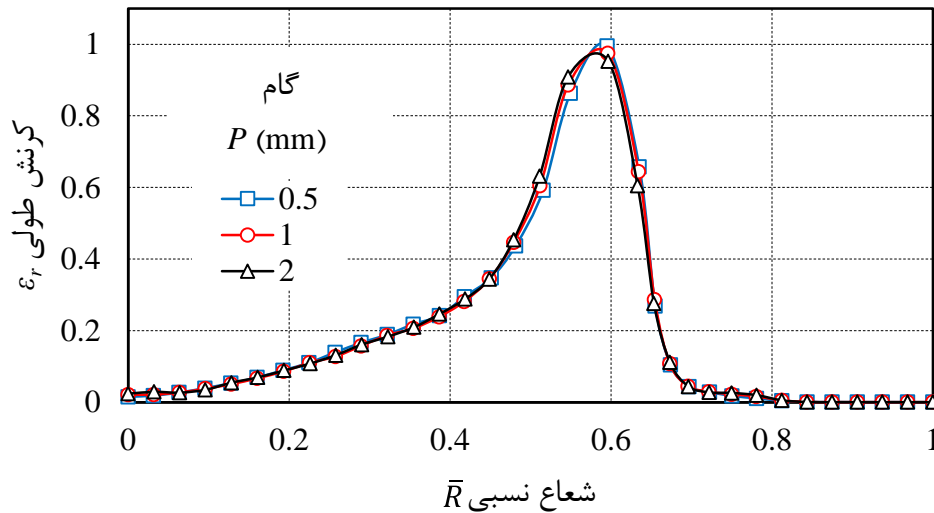
شکل ۴-۳۵- اثر قطر ابزار بر ضخامت ورق (ارتفاع عرقچین کره ۲۵ mm، گام ۱ mm و مسیر ابزار نوع اول)

همان طور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش قطر ابزار به ترتیب از ۶ به ۸ و ۱۲ میلی‌متری کرنش طولی از حدود ۰/۵۴ به حدود ۰/۴۹ و حدود ۰/۴۵ کاهش می‌یابد و کمینه‌ی ضخامت نیز از حدود ۰/۷ به ۰/۷۲ و ۰/۷۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

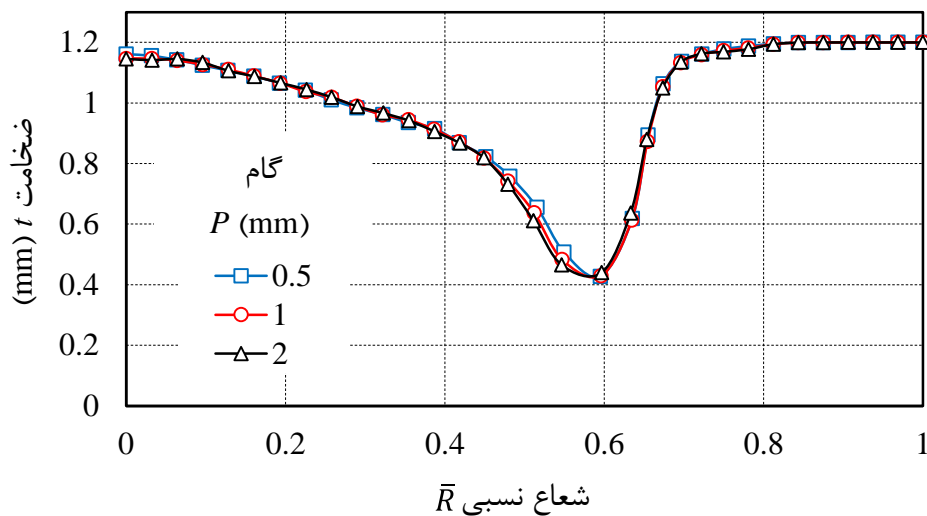
۴-۳-۳- اثر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام مارپیچ) بر توزیع کرنش

تأثیر گام مارپیچ بر توزیع کرنش، در شکل‌های ۴-۳۶ و ۴-۳۷ نشان داده شده است، این نمودارها با بررسی تغییرات کرنش طولی و ضخامت، در شکل‌دهی با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm و با گام مارپیچ‌های

شبهه‌سازی عددی نیز تفاوت ناچیزی در میزان شکل‌پذیری، با تغییر گام مارپیچ را نشان می‌دهد.



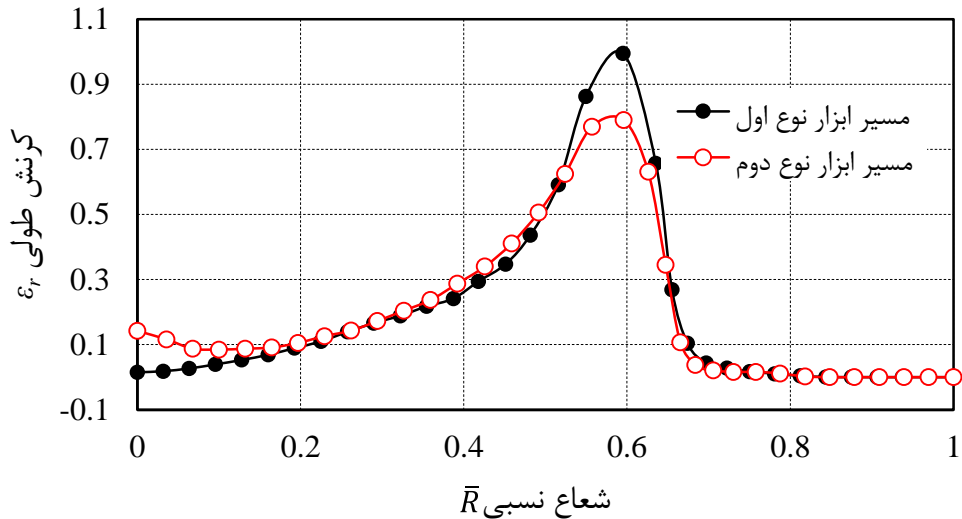
شکل ۴-۳۶- اثر گام ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



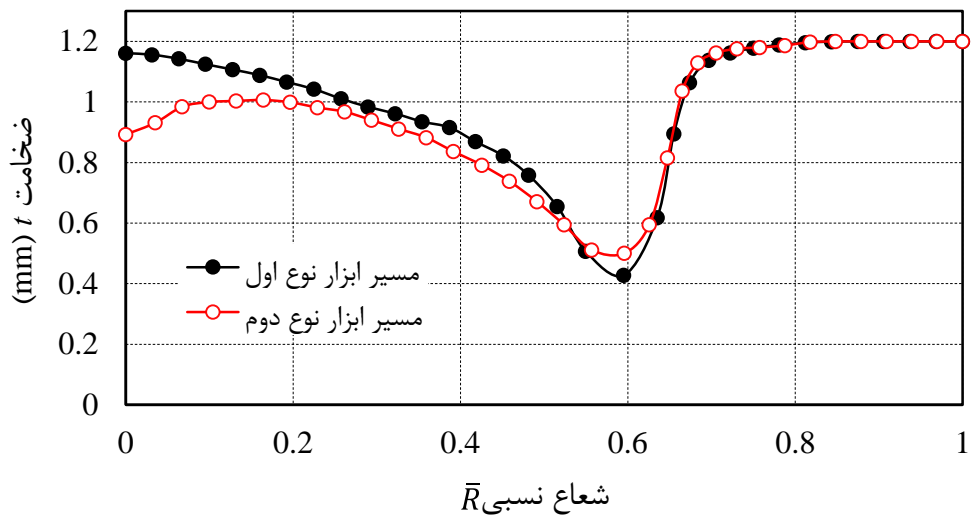
شکل ۴-۳۷- اثر گام مارپیچ بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)

۴-۳-۴ تأثیر نوع مسیر ابزار بر میزان توزیع کرنش

برای بررسی تأثیر نوع مسیر ابزار بر توزیع کرنش، شبهه‌سازی با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm و اعمال گام ۰/۵ mm، یک بار با استفاده از مسیر ابزار نوع اول و بار دیگر با استفاده از مسیر ابزار نوع دوم انجام شده و تغییرات کرنش طولی و ضخامت در هر دو مسیر ابزار با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این تغییرات به ترتیب در شکل‌های ۴-۳۸ و ۴-۳۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۳۸- اثر نوع مسیر ابزار بر کرنش طولی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm)



شکل ۴-۳۹- اثر نوع مسیر ابزار بر ضخامت ورق (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm)

همانند آزمایش تجربی، این نمودارها نیز نشان می‌دهد که در مسیر ابزار نوع دوم، میزان کرنش طولی و کاهش ضخامت بسیار کمتر است.

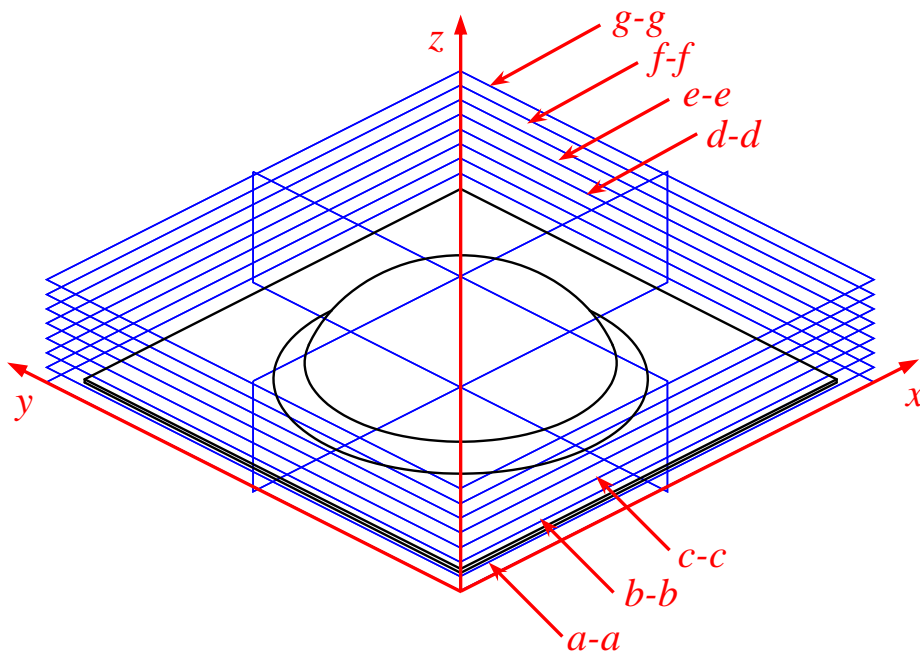
۴-۳-۵ تأثیر قطر ابزار، گام و نوع مسیر ابزار بر میزان خروج از دایروی بودن

در شکل ۴-۴۰ (الف)، یک عرقچین کرومی نشان داده شده است که با صفحات yz ، xz و همچنین صفحات موازی با صفحه xy به نام‌های $a-a$ ، $b-b$ ، $c-c$ ، $d-d$ ، $e-e$ ، $f-f$ ، $g-g$ برش زده شده‌اند. فاصله‌ی این صفحات موازی از یکدیگر به ترتیب ۵ mm می‌باشد. در شکل ۴-۴۰ (ب) و (ج)، به ترتیب مقطع برش خورده با صفحه xz و صفحه $a-a$ نشان داده شده‌اند، که توسط دو دایره‌ی هم مرکز یکی محیط بر مقطع برش

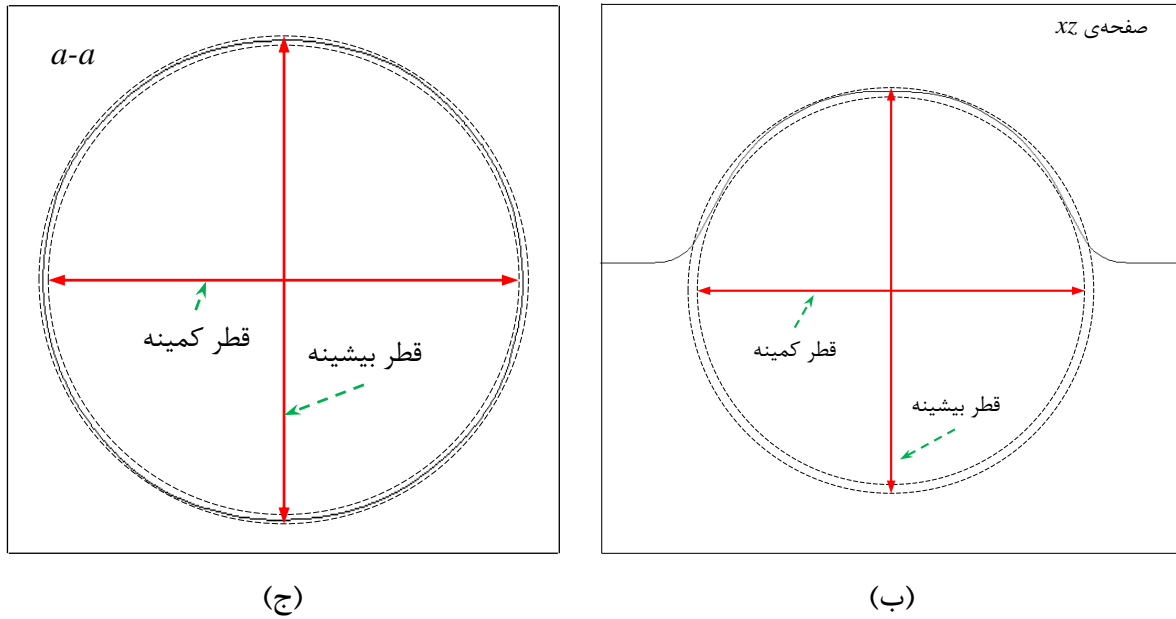
خورده و دیگری محاط بر آن احاطه شده است. اختلاف شعاع این دو دایره، میزان خروج از دایروی بودن را نشان می‌دهد. برای پیدا کردن مرکز مقطع برش خورده با صفحه ی xz بدین ترتیب می‌باشد:

$$r_0^2 + m^2 = (h + m)^2 \quad ۵-۴$$

که در آن r_0 شعاع و h عمق عرقچین می‌باشد که برابر با $۴۴/۲۵$ و $۳۸/۲۵$ mm می‌باشند. در نتیجه m که فاصله‌ی عمودی شعاع عرقچین از مرکز کره می‌باشد به راحتی قابل محاسبه است. جدول ۴-۱، مقایسه‌ی هریک از مقاطع برش خورده با صفحات فوق را در سه آزمایش مختلف نشان می‌دهد. آزمایش اول با استفاده از ابزاری به قطر ۸ mm با گام $۰/۵$ mm در مسیر ابزار نوع اول، آزمایش دوم با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام ۴ mm در مسیر ابزار نوع اول و آزمایش سوم با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام $۰/۵$ mm در مسیر ابزار نوع دوم انجام شده است.



(الف)



شکل ۴-۴۰-الف) عرقچین کروی و صفحات برش xz و yz و صفحات موازی با صفحه‌ی xy هر کدام به فاصله‌ی ۵mm از یکدیگر، (ب) برش عرقچین کروی با صفحه‌ی xz ، (ج) برش عرقچین کروی با صفحه‌ی xy به فاصله‌ی ۵ mm از صفحه‌ی xy .

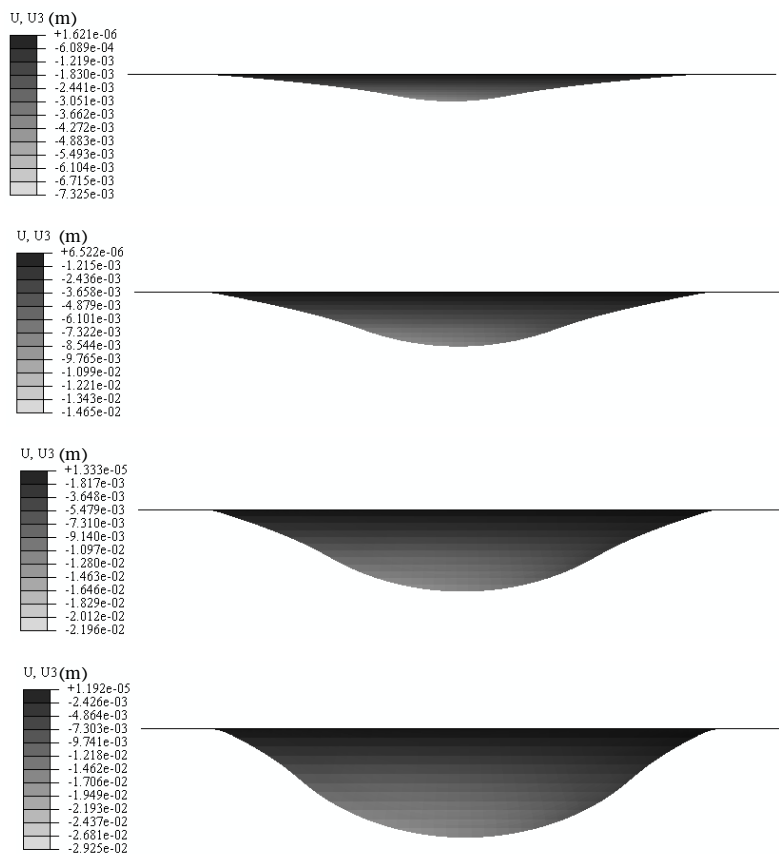
جدول ۴-۱- مقایسه‌ی خروج از دایروی بودن با تغییر قطر ابزار، گام و نوع مسیر ابزار در شبیه‌سازی عددی

صفحه‌ی برش	فاصله از مرکز (mm)	خروج از دایروی بودن برای (P=0.5, D=12) و مسیر ابزار (نوع دوم) (mm)	خروج از دایروی بودن برای (P=0.5, D=8) و مسیر ابزار (نوع اول) (mm)	خروج از دایروی بودن برای (P=4, D=12) و مسیر ابزار (نوع اول) (mm)
$a-a$	۵	۱/۵	۱/۳	۱/۲
$b-b$	۱۰	۱/۵	۳	۱/۲
$c-c$	۱۵	۱/۵	۱/۸	۱/۲
$d-d$	۲۰	۱/۲	۱/۶	۱/۵
$e-e$	۲۵	۱/۲۵	۱/۳	۱/۲۵
$f-f$	۳۰	۱/۲	۰/۹	۱/۲
$g-g$	۳۵	۰/۹۵	۱/۲	۱/۲۵
xz	۰	۱/۲	۱/۹۸	۱/۹
yz	۰	۱/۷	۲	۲/۴

۴-۴- نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

شکل ۴-۴۱ مراحل تدریجی شکل‌گیری عرقچین کروی برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی را نشان می‌دهد.

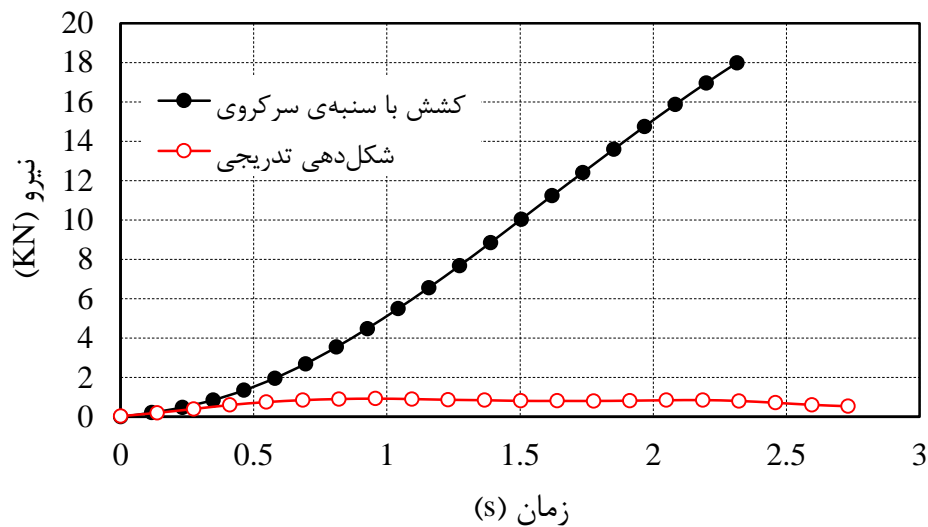
این شکل شامل چهار مرحله است که به ترتیب ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ انجام فرایند را نشان می‌دهد. بر خلاف مراحل تدریجی شکل‌گیری عرقچین در فرایند ISF که در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است، در این فرایند، شکل‌دهی به صورت موضعی انجام نمی‌شود، بلکه آن قسمتی از ورق که در ناحیه کشش قرار می‌گیرد، به طور همزمان شکل‌دهی می‌شود. در نتیجه در مقایسه با فرایند شکل‌دهی تدریجی به نیروی شکل‌دهی بسیار زیادی نیاز است. برای مقایسه‌ی کرنش‌های به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با حالت تجربی، شبیه‌سازی تا رسیدن به عمق ۲۹/۲۵ mm ادامه می‌یابد.



شکل ۴-۴۱- مراحل تدریجی تشکیل عرقچین کروی در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی (شامل ۲۵٪،

۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ انجام فرایند)

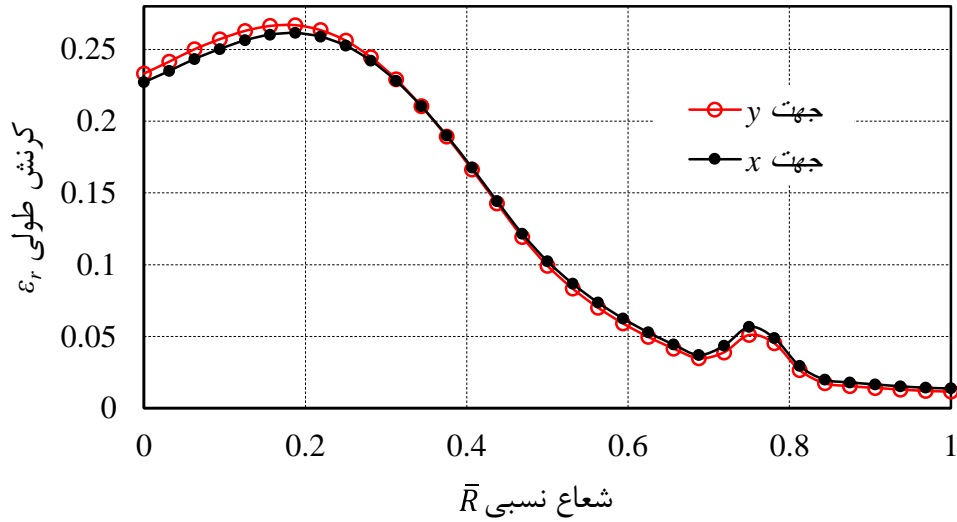
در شکل ۴-۴۲ نیروی لازم برای شکل‌دهی فرایند ISF و نیروی لازم برای شکل‌دهی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی به صورت شبیه‌سازی عددی، با یکدیگر مقایسه شده است. شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm و با تعریف مسیر نیز از نوع اول و گام ۱ mm انجام گرفت. شبیه‌سازی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی نیز با استفاده از یک سنبه به قطر ۸۵ mm و عمق نفوذ ۲۹/۲۵ mm صورت گرفت. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد نیروی شکل‌دهی در فرایند ISF در مقایسه با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی بسیار ناچیز است.



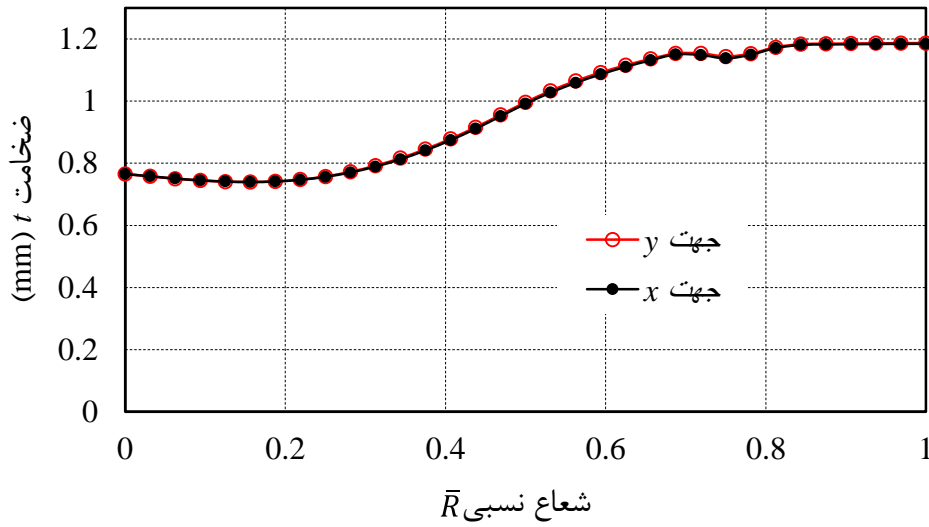
شکل ۴-۴۲- مقایسه نیروی شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی تدریجی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۱ mm و مسیر ابزار نوع اول) با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

۴-۴-۱ اثر ناهمسانگردی در توزیع کرنش در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

در شکل‌های ۴-۴۳ و ۴-۴۴، به ترتیب کرنش طولی و ضخامت در شبیه‌سازی فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی برای عرقچین کره به ارتفاع ۲۹/۲۵ mm، در جهت‌های نورد و عمود بر جهت نورد بایکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۴۳- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت x و y برای فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی



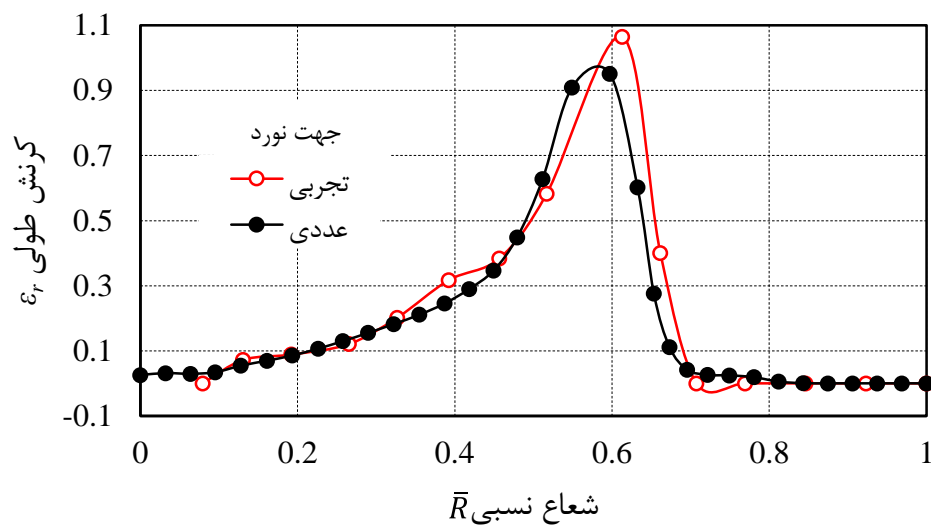
شکل ۴-۴۴- مقایسه‌ی ضخامت در جهت x و y برای فرایند سنبه‌ی سرکروی

می‌توان نتیجه گرفت که در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی نیز، همانند فرایند شکل‌دهی تدریجی اثر ناهمسانگردی قابل چشم‌پوشی است.

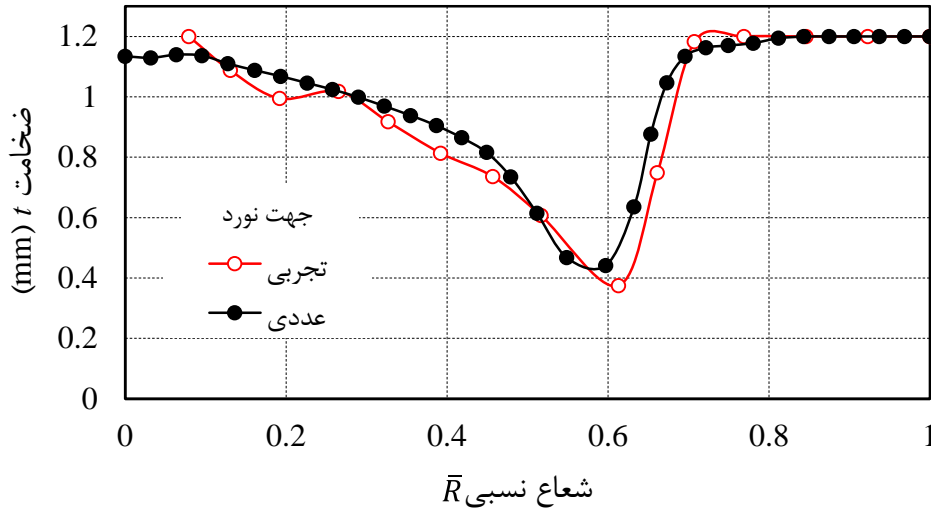
۴-۵- مقایسه‌ی حالت‌های تجربی و عددی فرایند شکل‌دهی تدریجی

۴-۵-۱ مقایسه‌ی اثر ناهمسانگردی بر میزان توزیع کرنش

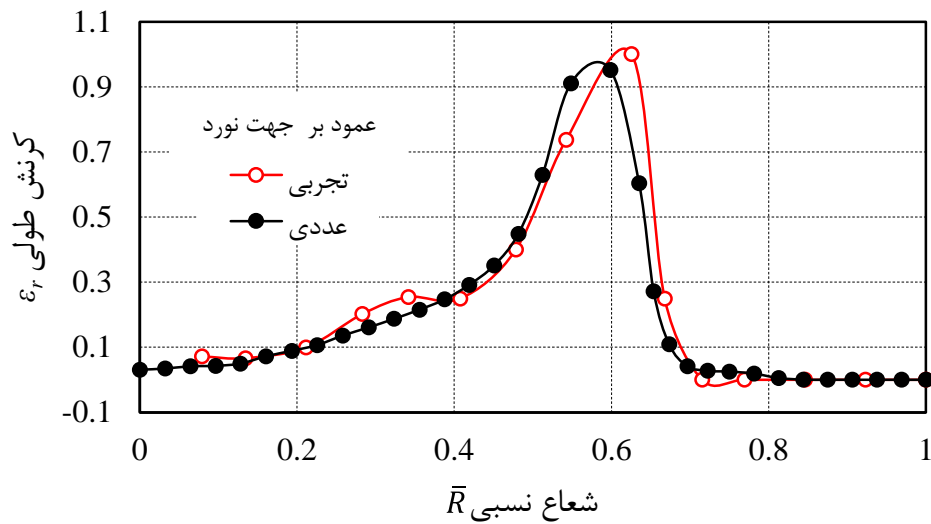
در این بخش تأثیر ناهمسانگردی بر میزان توزیع کرنش، در دو حالت آزمایش تجربی (بخش ۴-۱-۱) و شبیه‌سازی عددی (بخش ۴-۳-۱) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل‌های ۴-۴۵ و ۴-۴۶، به ترتیب کرنش طولی و ضخامت ورق را در جهت نورد و شکل‌های ۴-۴۷ و ۴-۴۸ نیز، کرنش طولی و ضخامت ورق را در جهت عمود بر نورد، در شکل‌دهی با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm با گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول، در دو حالت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، با یکدیگر مقایسه کرده است.



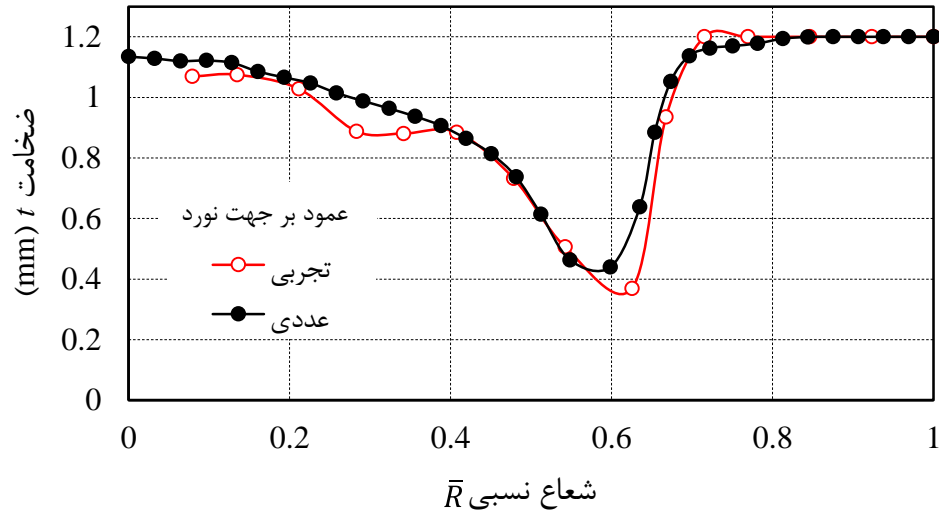
شکل ۴-۴۵- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



شکل ۴-۴۶- مقایسه‌ی ضخامت در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



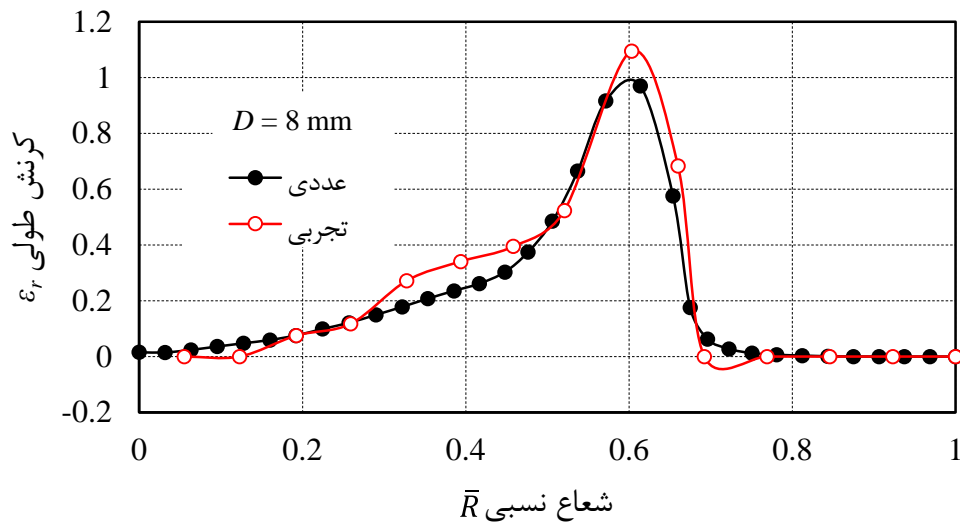
شکل ۴-۴۷- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت عمود بر نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار mm ۱۲، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)



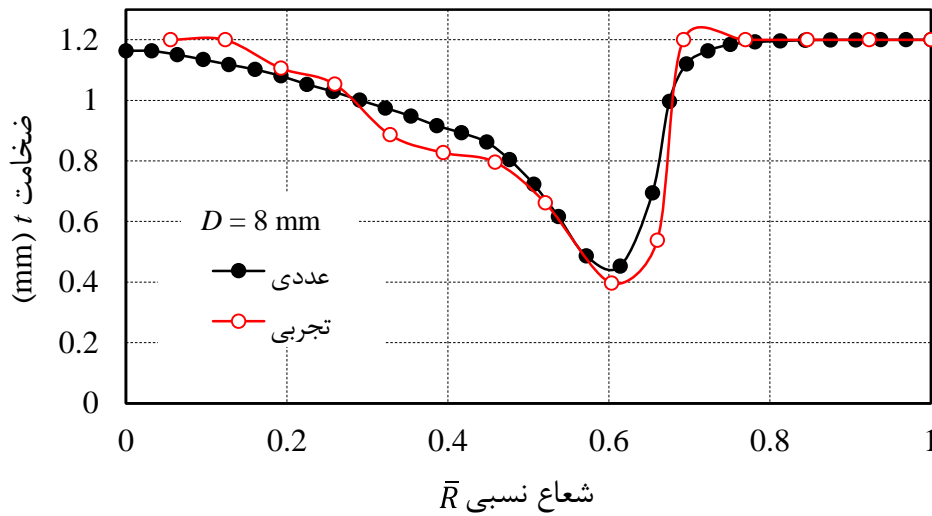
شکل ۴-۴۸- مقایسه‌ی ضخامت در جهت عمود بر نور در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۲ mm و مسیر ابزار نوع اول)

۴-۵-۲ مقایسه‌ی اثر قطر ابزار بر توزیع کرنش

در این بخش، شکل‌دهی عرقچین کره با استفاده از ابزاری به قطر ۸ mm و گام ۰/۵ mm در مسیر ابزار نوع اول در دو حالت تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شدند، که در شکل‌های ۴-۴۹ و ۴-۵۰ نشان داده شده‌اند.



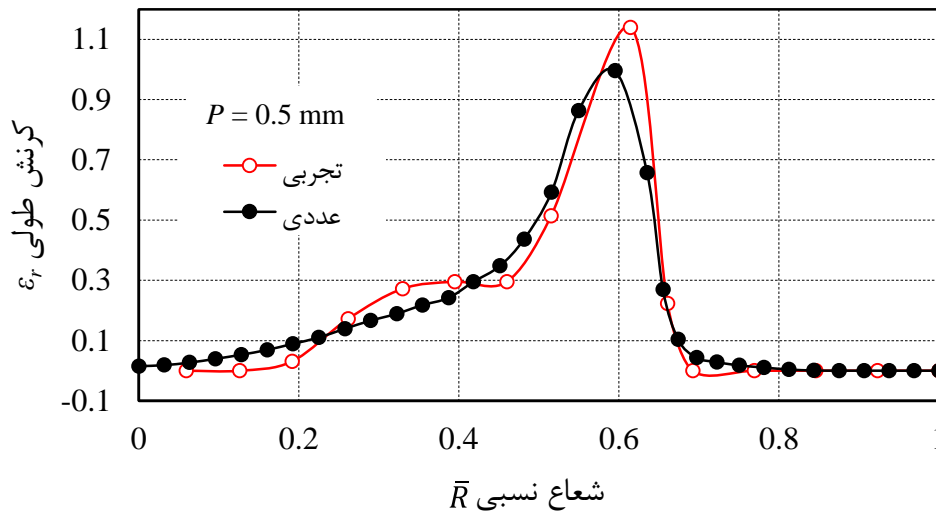
شکل ۴-۴۹- مقایسه‌ی کرنش طولی در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۸ mm و گام ۰/۵ mm)



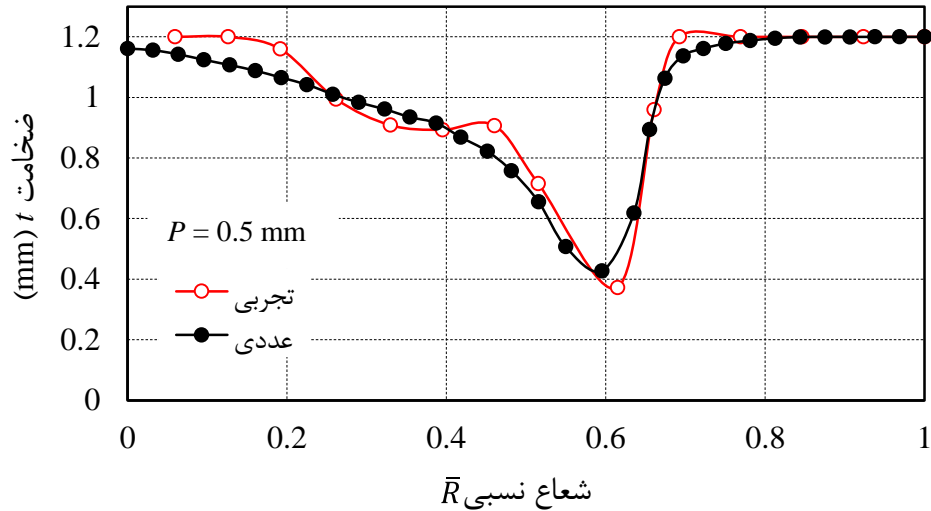
شکل ۴-۵۰- مقایسه‌ی ضخامت در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۸ mm و گام ۰/۵ mm)

۴-۵-۳ مقایسه‌ی اثر عمق نفوذ ابزار در هر مرحله (گام مارپیچ) بر توزیع کرنش

در این بخش، شکل‌دهی عرقچین کره با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm در دو حالت تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شدند، که در شکل‌های ۴-۵۱ و ۴-۵۲ نشان داده شده‌اند.



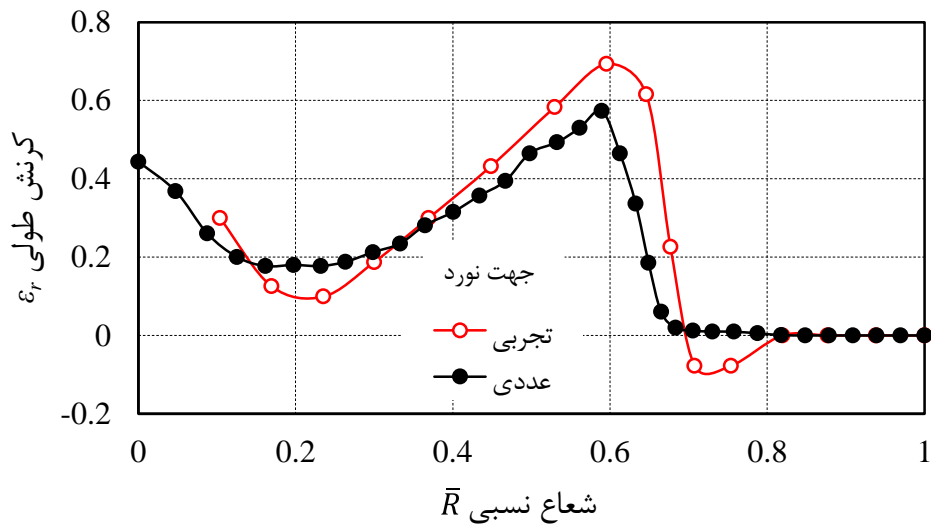
شکل ۴-۵۱- مقایسه‌ی کرنش طولی در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm)



شکل ۴-۵۲- مقایسه‌ی ضخامت در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm)

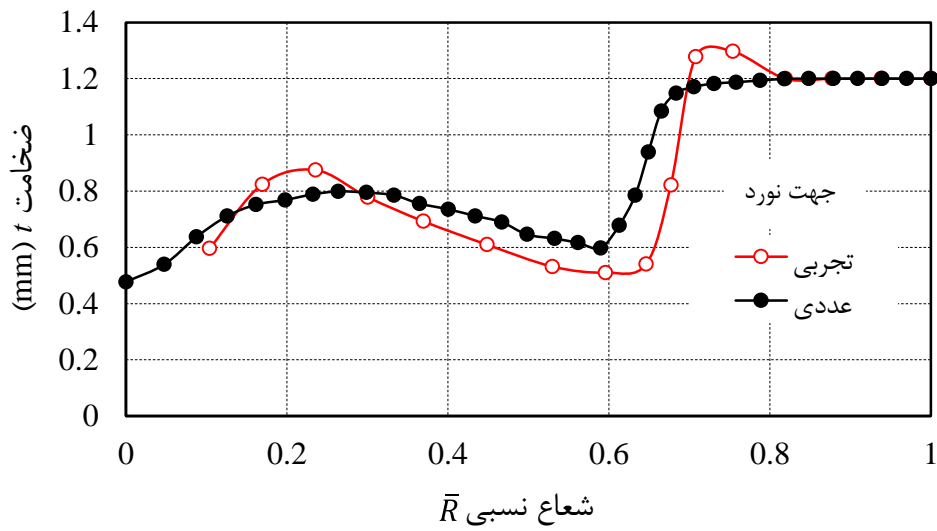
۴-۵-۴ مقایسه‌ی اثر مسیر ابزار نوع دوم بر میزان شکل‌پذیری

در این بخش، شکل‌دهی عرقچین کره با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm و گام ۳ mm، در دو حالت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای مسیر ابزار نوع دوم در جهت‌های نورد و عمود بر جهت نورد با یکدیگر مقایسه شده‌اند، که در شکل‌های ۴-۵۳، ۴-۵۴، ۴-۵۵ و ۴-۵۶ نشان داده شده‌اند.



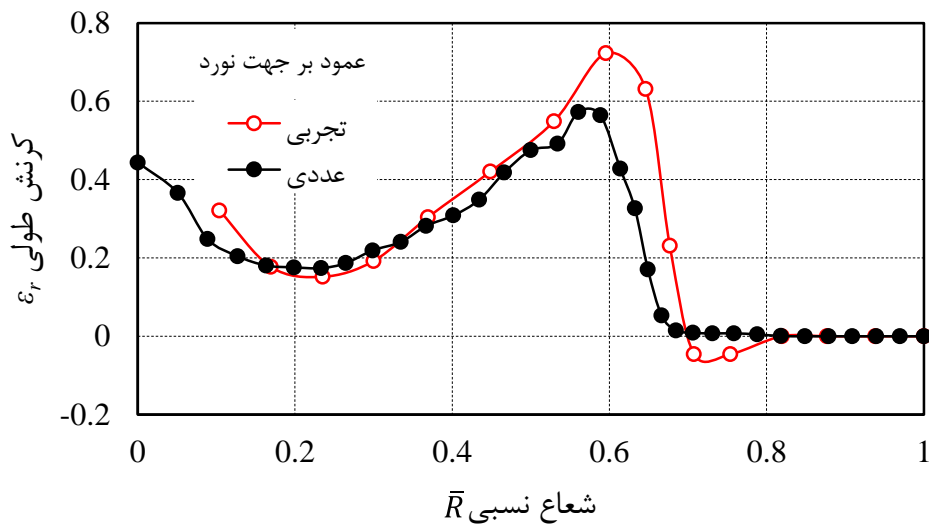
شکل ۴-۵۳- مقایسه‌ی کرنش طولی در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام

۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)



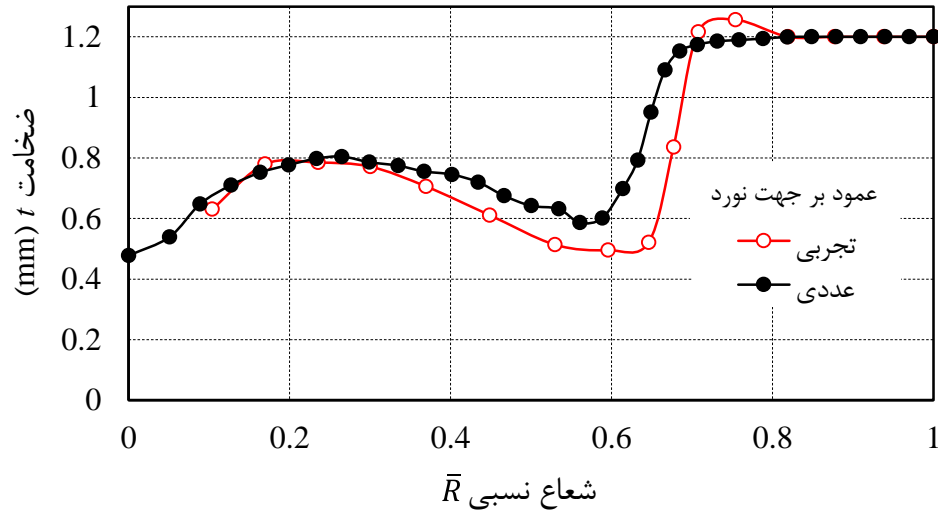
شکل ۴-۵۴- مقایسه‌ی ضخامت در جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm

و مسیر ابزار نوع دوم)



شکل ۴-۵۵- مقایسه‌ی کرنش طولی در خلاف جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm،

گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

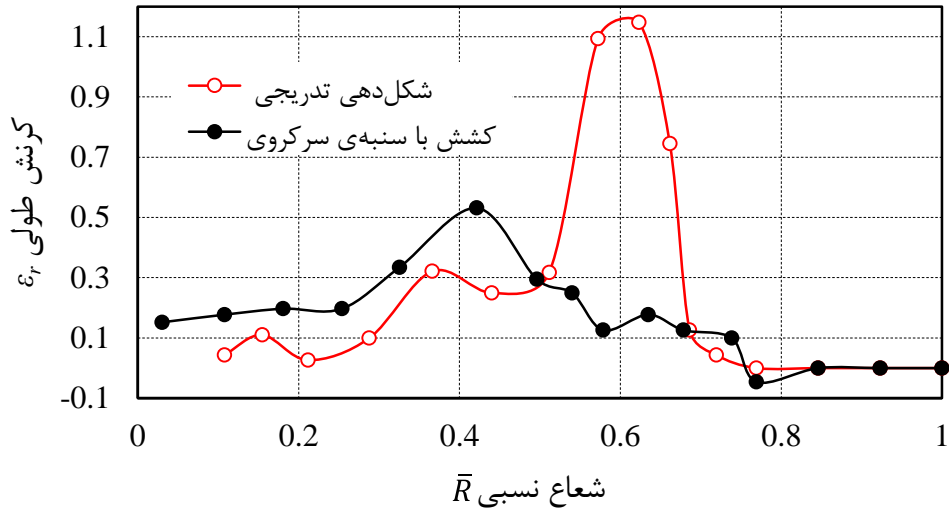


شکل ۴-۵۶- مقایسه‌ی ضخامت در خلاف جهت نورد در دو حالت تجربی و عددی (قطر ابزار ۱۲ mm، گام ۳ mm و مسیر ابزار نوع دوم)

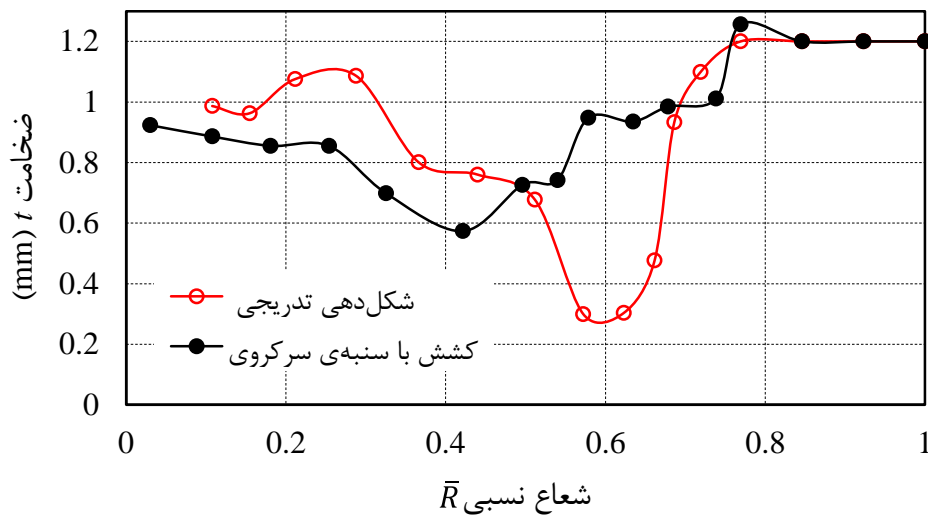
در این بخش شکل‌پذیری در دو حالت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، با تغییر پارامترهای گوناگون، با یکدیگر مقایسه شدند. نتیجه این است که با شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، می‌توان با دقت خوبی میزان شکل‌پذیری را پیشگویی کرد.

۴-۶- مقایسه‌ی توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

در شکل‌های ۴-۵۷ و ۴-۵۸ به ترتیب کرنش طولی و ضخامت در فرایند شکل‌دهی تدریجی و فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی با یکدیگر مقایسه شدند. فرایند شکل‌دهی تدریجی با استفاده از ابزاری به قطر ۱۲ mm و گام ۴ mm و مسیر ابزار نوع اول انجام گرفت که یک عرقچین کره به قطر بیشینه‌ی ۸۸/۵ mm و ارتفاع ۳۸/۲۵ mm تولید می‌کند. در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی نیز از یک سنبه‌ی سرکروی به قطر ۸۵ mm استفاده شده است، که یک عرقچین کره به ارتفاع ۲۹/۲۵ mm تولید می‌کند.



شکل ۴-۵۷- مقایسه‌ی کرنش طولی در فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

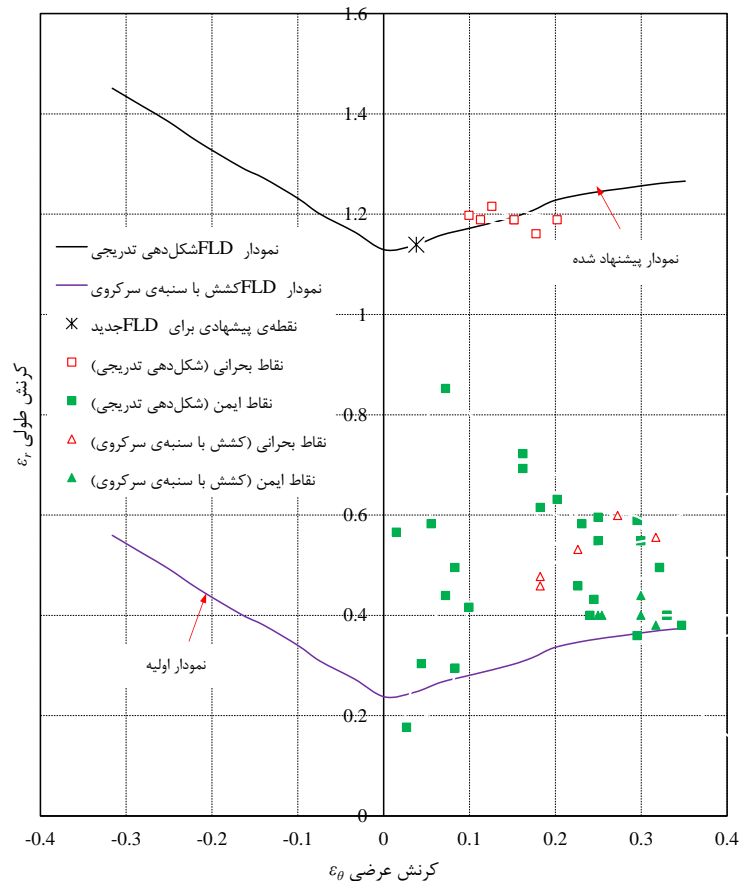


شکل ۴-۵۸- مقایسه‌ی تغییرات ضخامت در فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی

مقایسه‌ی نمودارهای فوق نشان می‌دهد که در فرایند شکل‌دهی تدریجی بدون پاره شدن ورق، کرنش بیشینه در حدود $1/15$ و کمترین ضخامت کمتر از 0.3 mm به دست می‌آید؛ اما در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی با رسیدن کرنش به حدود 0.55 ورق پاره می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که در فرایند شکل‌دهی تدریجی، شکل‌پذیری ورق به طور محسوسی بهبود می‌یابد.

۷-۴- پیشنهاد FLD برای ورق آلومینیوم AA6061-O در شکل‌دهی تدریجی

در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق آلومینیوم بیشترین کاهش ضخامت برای قطعه‌کار، با استفاده از ابزار به قطر ۱۲ mm و گام ۰/۵ mm، هنگامی که مسیر ابزار نوع اول برای حرکت آن تعریف شد، به دست آمد. در این آزمایش ضخامت ورق در کمترین نقطه به حدود ۰/۳۷ mm رسید و در این نقطه، کرنش طولی ۱/۱۳۹ $\epsilon_r =$ و کرنش عرضی $\epsilon_\theta = ۰/۰۳۸$ به دست آمد. با تعیین مکان این نقطه در FLD و جابه‌جا کردن منحنی به این نقطه، FLD آلومینیوم AA6061-O برای فرایند شکل‌دهی تدریجی پیشنهاد می‌شود که در شکل ۴-۵۹ نشان داده شده است. در ادامه، کرنش‌های طولی و عرضی در چند نقطه‌ی ایمن در فرایند شکل‌دهی تدریجی، نقاطی که به آستانه‌ی پارگی نرسیده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند. از شکل ۴-۵۹ می‌توان مشاهده کرد که این نقاط در بالای نمودار FLD فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی قرار گرفته است، که افزایش شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی تدریجی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵۹- FLD پیشنهاد شده برای ورق آلومینیوم AA6061-O

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم AA6061-O با روش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی، ابزار شکل‌دهی از جنس کاربید تنگستن با قطرهای ۸ mm و ۱۲ mm به کار رفت. برای حرکت ابزار دو نوع مسیر تعریف شد، در مسیر نوع اول، ابزار با حرکت روی یک مسیر پیوسته‌ی مارپیچ کروی با گام عمودی مشخص، از بزرگترین قطر به سمت مرکز در بیشترین عمق حرکت می‌کند و تماس ابزار با قطعه‌کار در طول شکل‌دهی قطع نمی‌شود. در مسیر نوع دوم که یک مسیر ناپیوسته است، ابزار ابتدا به اندازه‌ی گام معین عمودی روی محور قطعه حرکت کرده و به عمق جدید می‌رسد. سپس روی یک مسیر مارپیچ صفحه‌ای با گام شعاعی مشخص از مرکز به سمت بزرگترین شعاع در آن عمق حرکت می‌کند. در مسیر نوع اول، گام ابزارها به ترتیب ۰/۵ mm، ۱ mm، ۲ mm، ۳ mm و

۴ mm و در مسیر نوع دوم، گام ابزارهای افقی و شعاعی با یکدیگر مساوی و دارای مقادیر به ترتیب ۰/۵ mm، ۳ mm و ۴ mm بودند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از حل گر صریح نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام گرفت و با به کار بردن پارامترهایی مشابه با آزمایش‌ها، اثر هر یک از عوامل مؤثر بر شکل‌دهی بررسی شد. مطالعه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی در شکل‌دهی عرقچین کره به ارتفاع ۳۸/۲۵ mm نشان داد که:

- با تغییر قطر ابزار، تغییر چندانی در توزیع کرنش ایجاد نمی‌شود. اما وقتی اثر قطر ابزار در شبیه‌سازی شکل‌دهی عرقچین کره به ارتفاع ۲۵ mm مورد مطالعه قرار گرفت، مشاهده شد که با افزایش قطر ابزار، توزیع کرنش‌ها اندکی بهبود می‌یابد.
- با افزایش گام در هر دو مسیر، توزیع کرنش اندکی بهبود می‌یابد، ولی اثر ابزار بر روی قطعه‌ی شکل‌دهی شده به صورت تجربی، به طور محسوسی قابل مشاهده است.
- توزیع کرنش به دست آمده در جهت نورد با توزیع کرنش به دست آمده در جهت عمود بر نورد، تفاوت چندانی ندارد.
- توزیع کرنش به دست آمده در مسیر ابزار نوع دوم بسیار کمتر از مسیر ابزار نوع اول است.

همچنین مقایسه‌ی فرایند شکل‌دهی تدریجی با فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی نشان داد که در فرایند شکل‌دهی تدریجی بدون پاره شدن ورق، کرنش طولی ۱/۱۷ قابل دست‌یابی است؛ در حالیکه در فرایند کشش با سنبه‌ی سرکروی رسیدن کرنش طولی به حدود ۰/۴۵ باعث پارگی ورق می‌شود.

۵-۲- پیشنهادها

در این پایان‌نامه، فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق آلومینیومی AA6061-O به روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. به دلیل شکل‌پذیری خوب این آلومینیوم، فرایند در دمای اتاق انجام شد. حال اگر نیاز باشد ورق‌هایی که دارای شکل‌پذیری خوبی نیست، شکل‌دهی شود، برای بهبود شکل‌پذیری باید دمای ورق را بالا برد. در فرایند شکل‌دهی تدریجی این کار به کمک لیزر^۱ انجام می‌شود. به این صورت که ابزار شکل‌دهی از یک سمت ورق را شکل‌دهی می‌کند و یک پرتو لیزر از سمت دیگر ورق، همزمان با ابزار حرکت می‌کند و ورق را به صورت موضعی حرارت‌دهی می‌کند. با انجام این فرایند هم شکل‌پذیری و هم دقت ابعادی قطعه‌ی شکل‌دهی شده بهبود می‌یابد. در ادامه‌ی مطالعه‌ی فرایند شکل‌دهی تدریجی در این دانشگاه، پیشنهاد می‌شود فرایند شکل‌دهی تدریجی به کمک لیزر، برای یک ورق با قابلیت شکل‌پذیری پایین، مانند منیزیم AZ31، به صورت شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گیرد.

^۱ Laser Assisted Incremental Forming

منبعها

- [1] J. Duflou, Y. Tunçkol, A. Szekeres, P. Vanherck, and Y. Tunckol, "Experimental study on force measurements for single point incremental forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1, pp. 65–72, Jul. 2007.
- [2] W. C. C. Emmens, G. Sebastiani, and a. H. H. Van den Boogaard, "The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 8, pp. 981–997, Jun. 2010.
- [3] G. Ambrogio, L. Filice, and G. L. L. Manco, "Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31," *CIRP Ann. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 257–260, Jan. 2008.
- [4] H. Arfa, R. Bahloul, and H. BelHadjSalah, "Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 6, no. 4, pp. 483–510, Jun. 2013.
- [5] G. Ambrogio, L. De Napoli, L. Filice, F. Gagliardi, and M. Muzzupappa, "Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 162, pp. 156–162, May 2005.
- [6] K. Suresh, A. Khan, and S. P. Regalla, "Tool Path Definition for Numerical Simulation of Single Point Incremental Forming," *Procedia Eng.*, vol. 64, pp. 536–545, Jan. 2013.
- [7] A. Blaga, O. Bolaga, V. Oleksik, and R. Breaz, "Influence of tool path on main strains, thickness reduction and forces in single point incremental forming process," *Proc. Manuf. Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 191–196, 2011.
- [8] S. Jadhav, *Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine*. Shaker Verlag GmbH, Germany, 2004.
- [9] R. Malhotra, N. Reddy, and J. Cao, "Automatic 3D spiral toolpath generation for single point incremental forming," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 132, no. 6, 2010.
- [10] H. Wei, W. Chen, and L. Gao, "Springback Investigation on Sheet Metal Incremental Formed Parts," no. 1, pp. 225–229, 2011.
- [11] F. Han, J. Mo, H. Qi, R. Long, X. Cui, and Z. Li, "Springback prediction for incremental sheet forming based on FEM-PSO technology," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 23, no. 4, pp. 1061–1071, Apr. 2013.
- [12] M. Vahdati, M. Sedighi, and H. Khoshkish, "An Analytical Model to Reduce Spring-Back in Incremental Sheet Metal Forming (ISMF) Process," *Adv. Mater. Res.*, vol. 83–86, pp. 1113–1120, Dec. 2009.

- [13] J. Verbert, B. Belkassam, C. Henrard, A. M. Habraken, J. Gu, H. Sol, B. Lauwers, and J. R. Duflou, "Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. 1, pp. 1203–1206, 2008.
- [14] D. Young and J. Jeswiet, "Wall thickness variations in single-point incremental forming," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 218, no. 11, pp. 1453–1459, 2004.
- [15] نادری مسعود، قرمزی مهدی، "نگرشی جدید در پیش بینی حد شکل پذیری ورق‌های جداره نازک"، *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی هوانوردی*، 1390،
- [16] J.-J. Park and Y.-H. Kim, "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 140, no. 1–3, pp. 447–453, Sep. 2003.
- [17] D.-T. Nguyen and Y.-S. Kim, "A numerical study on establishing the forming limit curve and indicating the formability of complex shape in incremental sheet forming process," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 14, no. 12, pp. 2087–2093, Dec. 2013.
- [18] M. Tisza, "General overview of sheet incremental forming," *Manuf. Eng.*, vol. 55, no. 1, pp. 113–120, 2012.
- [19] Y. H. Kim and J. J. Park, "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130, pp. 42–46, 2002.
- [20] سید محمد جواد میرنیا، بیژن ملایی داریانی، "پیش بینی حد بالای نیروی مماسی در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی"، *دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران*، 1390،
- [21] ب. م. علی پوراسد، "بررسی عددی نیروی شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق فلزی"، *دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران*، 1390،
- [22] M. B. Silva, M. Skjødt, A. G. Atkins, N. Bay, P. a F. Martins, and M. Skjoedt, "Single- point incremental forming and formability–failure diagrams," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 43, no. 1, pp. 15–35, Jan. 2008.
- [23] J. R. R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, and H. De Baerdemaeker, "Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement," *CIRP Ann. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 273–276, Jan. 2007.
- [24] M. A. Dittrich, T. G. Gutowski, J. Cao, J. T. Roth, C. Xia, V. Kiridena, F. Ren, H. Henning, and Z. C. Xia, "Exergy analysis of incremental sheet forming," *Prod. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 169–177, 2012.
- [25] G. Fan, F. Sun, X. Meng, L. Gao, and G. Tong, "Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 49, no. 9–12, pp. 941–947, Dec. 2010.

- [26] H. Takano, K. Kitazawa, and T. Goto, "Incremental forming of nonuniform sheet metal: Possibility of cold recycling process of sheet metal waste," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 3, pp. 477–482, Mar. 2008.
- [27] "database of Auto Form."
- [28] D. Peckner and B. I. Melvin, *Handbook of Stainless Steels*. McGraw-Hill New York, 1977.
- [29] ع. . . و. نژاد, *جداول و استانداردهای طراحی و ماشین‌سازی*. نشر طراح, ۱۳۸۶.
- [30] "روند تحلیل و المان‌های موجود در نرم افزار آباکوس" [Online]. Available: <http://www.fatan.ir/software/abaqus/process-analysis-elements-abaqus-software>.
- [31] ضیایی و پیغاله, *راهنمای مدلسازی با نرم افزار abaqus*
- [32] "Abaqus 6.12 Documentation\Abaqus Analysis User's Manual\Materials\23.2.6 Anisotropic yield/creep."

Abstract

Single point incremental forming is a flexible sheet metal forming technology, which does not require any dedicated die or punch to form a shape. In this method the final shape of the component is obtained by the CNC relative movements of a simple and small punch which deform a clamped blank into the desired shape. These methods are useful for making shapes which are very costly or impossible to produce with other methods and for small quantity production. In this thesis, experimental and numerical study of single point incremental forming process of aluminum alloy aa6061-o were conducted. Two tungsten carbide forming tools of 8 and 12 mm in diameter were used in the experiments. Two types of tool paths were employed. In the first tool path type, the tool moves on a continuous spherical helix path with certain pitch from the largest diameter toward the center in lowermost point, and the contact of tool with workpiece is not interrupted during the forming. In the second one, the path is discontinuous. The tool firstly moves on the axis of the workpiece with a certain normal penetration to the new depth. Thereafter, it moves on a planar helix with a certain radial pitch, from center towards the largest radius in the current depth. Finite element simulations were carried out using Abaqus/explicit software. Considering conditions similar to those in the experiments, effects of major parameters involved in forming such as tool diameter, tool path type and tool normal penetration were studied,. Results of experimental and numerical studies of incremental forming process reveal that strain distribution is considerably improved in second tool path type. The hemispherical punch stretching process was studied experimentally and numerically. The strains obtained in this method were compared with those obtained in the incremental forming process. This comparison showed that very large strains can be achieved in incremental forming without any fracture in sheet, while in the conventional stretching process the sheet fails at significantly smaller strains. Finally, the comparison of the numerical and experimental results revealed a very good agreement between them.

Keywords: Incremental sheet forming, Finitite elements simulation, Thickness stain, Formability, Hemispherical punch stretching process.



دانشگاه شاهرود

University of Shahrood

Faculty of Mechanic

Numerical and Experimental Study on Single Point Incremental
Sheet Metal Forming With a Continuous Tool Path

Ibrahim Keshavarzian

Supervisor:

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

Dr. Mahdi Gerdooei

February 2015