بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی‌کاربردی

کاربرد مکانیک آسیب در پیش‌بینی بروز پارگی ورق در فرایند شکل‌دهی چرخشی با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود

استاد راهنما
دکتر مهدی سلمانی تهرانی

استاد مشاور
دکتر مهرداد پورسینا

پژوهشگر
سجاد مبینی دهکردی

زمستان 1389

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی آقای سجاد مبینی دهکردی جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی‌ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان «**کاربرد مکانیک آسیب در پیش‌بینی بروز پارگی ورق در فرایند شکل‌دهی چرخشی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود**» در تاریخ 1389/12/10 با حضور هیئت داوران زیر بررسی و با نمره‌ی19/3 مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

1. **استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر مهدی سلمانی تهرانی با مرتبه علمی استادیار** **امضا**

2. **استاد مشاور پایان‌نامه دکتر مهرداد پورسینا با مرتبه علمی استادیار** **امضا**

3. **استاد داور داخلی گروه دکتر حسین گلستانیان با مرتبه علمی دانش‌یار** **امضا**

4. **استاد داور داخلی گروه دکتر یعقوب طادی بنی با مرتبه علمی استادیار** **امضا**

دکتر بهزاد قاسمی

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تشکر و قدردانی

سپاس تمامی تورق این دفتر پیش‌کش آنکه به پاس او برمی‌خیزم و به عظمت بودنش تعظیم می‌کنم
و با نگاه بی‌کرانش اوج می‌گیرم
سپاس فراوان از آن او که مرا زیست برای آغاز و نیک بودن را در وجود من پروراند
پروردگارا همیشه و هر لحظه تو را یاد دارم

با تشکر و سپاس فراوان از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر مهدی سلمانی تهرانی که همواره از
راهنمایی‌ها و مساعدت‌های بی‌دریغشان بهره برده‌ام .

سجاد مبینی دهکردی
زمستان 1389

تقدیم:

به پدر و مادر مهربانم که در راه درک علم، دانش و معرفت زحمات زیادی را که مملو از عشق و محبت بود برایم کشیدند.

به همسر فداکارم که با حمایت‌های همه‌جانبه، همواره موجب سرور و دلگرمی من بوده است.

چکیده

فرایند شکل‌دهی چرخشی یک روش شکل‌دهی بدون براده‌برداری است که برای تولید جسم‌های توخالی متقارن محوری و بدون درز استفاده می‌شود. تغییرشکل در این فرایند، به‌واسطه‌ی اعمال نیروی نقطه‌ای و حرکت چرخشی قطعه‌کار انجام می‌پذیرد که طی آن قطعات تخت یا استوانه‌ای با حرکت محوری یا شعاعی به‌شکل قالب چرخان در می‌آیند.

یکی از مشکلات مهم و متداول در شکل‌دهی چرخشی، پارگی ورق در حین فرایند است که تأثیر به‌سزایی در بالا رفتن هزینه و کاهش نرخ تولید دارد. از این‌رو، پرداختن به مبحث پارگی ورق و عوامل حاکم بر آن، از اهمیت خاصی برخوردار است.

تا کنون فعالیت‌های تجربی بسیاری در این زمینه انجام شده است، که لازمه‌ی آن صرف وقت و هزینه‌ی بسیار بوده است. در این پایان‌نامه با استفاده از شبیه‌سازی اجزای‌محدود و بهره‌گیری از مکانیک آسیب به پیش‌بینی بروز پارگی در ورق پرداخته شده است. برای این کار ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS فرایند شکل‌دهی‌چرخشی شبیه‌سازی شده است. سپس با اضافه نمودن معیار آسیب نرم به مدل اجزای‌محدود، رشد پارامتر آسیب در اثر عوامل ایجاد کننده‌ی پارگی در ورق مورد بررسی قرار گرفته است.

به‌کمک مقایسه‌ی نتایج تجربی و نظری با نتایج شبیه‌سازی، نتایج نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، ارزیابی گردیدند. با در نظر گرفتن مدل آسیب نرم در شبیه‌سازی شد محل پارگی ورق پیش‌بینی گردید. در مرحله‌ی بعد به بررسی پارامتری شبیه‌سازی آسیب از جمله بررسی ضخامت بر نیروی شکل‌دهی، بررسی ضخامت بر کرنش شعاعی و بررسی اثر سرعت در محصول فرایند پرداخته شد. در نهایت توزیع آسیب در ضخامت‌های مختلف نشان داده شد.

مقایسه‌ی نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ناحیه‌ی آسیب بیشینه، همان ناحیه‌ای است که در آزمایش‌های تجربی پارگی ورق رخ داده است. در نتیجه مدل آسیب به‌کار گرفته شده، مدل مناسبی برای پیش‌بینی بروز پارگی ورق است. به‌علاوه رشد آسیب در ورق، عمدتاً زیر غلتک اتفاق می‌افتد. در فرایند شکل‌دهی چرخشی برشی با توجه به کاهش ضخامت بیشتر نسبت به فرایند شکل‌دهی چرخشی معمولی، در شرایط یکسان، رشد آسیب سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: فرایند شکل‌دهی چرخشی، شبیه‌سازی اجزای محدود، مکانیک آسیب، پارگی ورق

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	الف
فهرست مطالب	1
فهرست شکل‌ها	4
فهرست جدول‌ها	6
فصل اول: مقدمه	7
1-1- مقدمه	7
1-2- تاریخچه‌ی فرایند شکل‌دهی چرخشی	8
1-3- تقسیم‌بندی‌های فرایند شکل‌دهی چرخشی	9
1-3-1- فرایند شکل‌دهی چرخشی معمولی	10
1-3-2- فرایند شکل‌دهی برشی	11
1-3-3- فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله	13
1-4- کاربردها و محصولات شکل‌دهی چرخشی	15
1-5- مروری بر پژوهش‌های پیشین	16
1-6- جنبه‌ی نوآوری پایان‌نامه	20
1-7- مروری بر ساختار پایان‌نامه	20
فصل دوم: مکانیک آسیب	21
2-1- مقدمه	21
2-2- تاریخچه‌ی مکانیک آسیب	22
2-3- مفهوم فیزیکی و مکانیکی آسیب	23
2-3-1- انواع حالت‌های آسیب	23
2-3-2- پارامتر آسیب	25
2-3-3- مفهوم تنش مؤثر	26
2-3-4- اصل کرنش معادل	27
2-3-5- اثرات آسیب	28
2-4- اندازه‌گیری آسیب	28
2-4-1- تغییرات مدول الاستیسیته	29

2-4-2- انتشار امواج فوق‌صوت 29
2-4-3- آزمایش ریزسختی یا میکروهاردنس 30
2-5- ترمودینامیک آسیب 31
2-5-1- تابع پتانسیل حالت برای آسیب همسان‌گرد 34
2-5-2- اثر بسته شدن عیوب میکروسکوپی 36
2-6- قوانین سینتیک رشد آسیب 37
2-6-1- آستانه‌ی آسیب و آغاز ترک مزوسکوپی 38
2-6-2- فرمول‌بندی قانون آسیب همسان‌گرد 39
2-6-3- تعیین پارامترهای مادی آسیب 41

فصل سوم: مدل‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی چرخشی 44
3-1- مقدمه 44
3-2- تعریف مساله 45
3-3- مدل اجزای محدود 45
3-4- ویژگی‌های رفتار ماده 46
3-5- اصول شبیه‌سازی آسیب در نرم‌افزار 46
3-5-1- معیار آسیب نرم 47
3-5-2- معیار جانسون- کوک 48
3-5-3- معیار برشی 48
3-5-4- معیار نمودار حد شکل‌دهی (FLD) 49
3-5-5- معیار نمودار تنش حد شکل دهی (FLSD) 50
3-5-6- معیار مارسینیاک- کوکزینسکی (M-K) 50
3-5-7- معیار نمودار حد شکل‌دهی موشنبورن- سان (MSFLD) 51
3-5-8- معرفی اصول حاکم بر مدل آسیب نرم و استخراج پارامترهای لازم 52
3-6- نوع و گام‌های تحلیل 53
3-7- الگوریتم تماس 54
3-8- شرایط مرزی و بارگذاری 55
3-9- تعیین نوع المان و شبکه‌بندی 55
3-9-1- المان‌های قابل استفاده در شبیه‌سازی آسیب به‌کمک نرم‌افزار ABAQUS 56
3-9-2- همگرایی شبکه‌بندی 57
3-10- جمع‌بندی 58

فصل چهارم: ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شکل‌دهی چرخشی 59
4-1- مقدمه 59

4-2- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی چرخشی 59
4-2-1- بررسی شبه‌استاتیک بودن نتایج شبیه‌سازی 59
4-2-2- مقایسه‌ی نتایج با نتایج تجربی موجود 60
4-3- بررسی پارامتری نتایج شبیه‌سازی 61
4-3-1- بررسی ضخامت بر نیروی شکل‌دهی 61
4-3-2- بررسی ضخامت بر کرنش شعاعی 62
4-3-3- بررسی اثر سرعت شکل‌دهی در محصول فرایند 62
4-4- جمع‌بندی 63

فصل پنجم: بحث و بررسی بر روی نتایج مکانیک آسیب در شکل‌دهی چرخشی 65
5-1- مقدمه 65
5-2-پیاده‌سازی مدل آسیب نرم در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی چرخشی 66
5-2-1-نتایج مکانیک آسیب 66
5-2-2- نتایج تجربی پارگی در فرایند شکل‌دهی چرخشی 68
5-3- بررسی پارامتری نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مکانیک آسیب 69
5-3-1- بررسی اثر ضخامت بر کرنش شعاعی 69
5-3-2- بررسی اثر سرعت شکل‌دهی در محصول فرایند 71
5-3-3- بررسی توزیع آسیب در جهت ضخامت ورق 71
5-4- جمع‌بندی 71

فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات 73
6-1- جمع‌بندی، نتیجه‌گیری 73
6-2- پیشنهادات 77

منابع 75

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل 1-1- نمایش فرایند شکل‌دهی چرخشی 8
شکل 1-2- انواع فرایندهای شکل‌دهی چرخشی 10
شکل 1-3- قطعات تولید شده به‌روش شکل‌دهی چرخش 11
شکل 1-4- نمایش مراحل انجام و مکانیزم شکل‌دهی چرخشی معمولی 11
شکل 1-5- مشخصات هندسی قطعه‌کار و قالب در شکل‌دهی برشی 12
شکل 1-6- فرایند شکل‌دهی برشی با استفاده از قطعه پیش‌فرم برای قالب با دیواره منحنی 13
شکل 1-7- تجهیزات و محصول فرایند شکل‌دهی چرخشی قطعات بزرگ 13
شکل 1-8- فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله با سه غلتک 14
شکل 1-9- مکانیزم حرکت ابزار در شکل‌دهی چرخشی لوله به‌صورت مستقیم 15
شکل 1-10- مکانیزم حرکت ابزار در شکل‌دهی چرخشی لوله به‌صورت معکوس 15
شکل 1-11- برخی از قطعات تولید شده با استفاده از فرایند شکل‌دهی چرخشی 16
شکل 2-1- آسیب نرم در نوعی فولاد 24
شکل 2-2- آسیب ترد در نوعی سرامیک 24
شکل 2-3- آسیب خزشی در نوعی آلیاژ با پایه‌ی نیکل 25
شکل 2-4- مفهوم پارامتر آسیب 25
شکل 2-5- مفهوم فیزیکی تانسور مرتبه‌ی دوم آسیب 26
شکل 2-6- المان حجمی تحت بار گذاری 27
شکل 2-7- اندازه‌گیری پارامتر آسیب با استفاده از تغییرات مدول الاستیسیته 29
شکل 2-8- تعیین پارامترهای مادی به‌کمک آزمون کشش برای نوعی فولاد 42
شکل 3-1- نمایی از هندسه مدل‌های شبیه‌سازی شده فرایند شکل‌دهی چرخشی با قالب‌های مختلف 45
شکل 3-2- مکانیزم‌های سه‌گانه‌ی شکست فلزات 47
شکل 3-3- نمودار حد شکل‌دهی (FLD) 50
شکل 3-4- شیار مجازی در نظر گرفته شده در مدل M-K 51
شکل 3-5- (الف) نمودار حد شکل‌دهی متعارف (FLD) 52

(ب) نمودار حد شکل‌دهی موشنبورن-سان (MSFLD)
شکل 3-6- مقایسه‌ی سرعت افزایش هزینه‌ی محاسباتی دو روش حل صریح و ضمنی، بر حسب افزایش درجه‌های آزادی 54
شکل 3-7- المان C3D8R 56
شکل 3-8- نمایش ورق شبکه‌بندی شده در شبیه‌سازی شکل‌دهی چرخشی 56
شکل 3-9- کرنش‌های شعاعی برای شبکه‌بندی‌های مختلف 57
شکل 3-10- همگرایی شبکه‌بندی 57
شکل 4-1- مقایسه‌ی انرژی جنبشی و انرژی درونی کل، برای فرایند نمونه‌ی مورد بررسی 59
شکل 4-2- نتایج کرنش تئوری، اجزای محدود وتجربی شکل‌دهی چرخشی 60
شکل 4-3- نیروی شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی چرخشی برای ضخامت‌های مختلف 60
شکل 4-4- تغیرات کرنش شعاعی با ضخامت‌های مختلف در شکل‌دهی چرخشی 61
شکل 4-5- افزایش چروکیدگی در شکل‌دهی چرخشی 62
شکل 5-1- توزیع آسیب در شکل‌دهی چرخشی با قالب مخروطی 66
شکل 5-2- توزیع آسیب در شکل‌دهی چرخشی با قالب نیم‌کره 67
شکل 5-3- نتایج تجربی در نشان دادن محل بروز پارگی در فرایند شکل‌دهی چرخشی با قالب مخروطی 68
شکل 5-4- نتایج تجربی در نشان دادن محل بروز پارگی در فرایند شکل‌دهی چرخشی با قالب نیم‌کره 68
شکل 5-5- مقایسه کرنش شعاعی در ضخامت‌های مختلف برای حالت‌های آسیب و بدون آسیب 69
شکل 5-6- توزیع آسیب در ضخامت‌های مختلف 70

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول 2-1- معادلات ساختاری کرنشی برای ماده‌ی بدون آسیب و ماده‌ی همراه با آسیب	28
جدول 2-2- متغیرهای حالت و متغیرهای وابسته	31
جدول 2-3- قوانین حاکم بر آسیب همسان‌گرد	41
جدول 3-1- جنس و مشخصات قطعه‌کار مورد نیاز و محصول	46

فصل اول

مقدمه

1-1- مقدمه

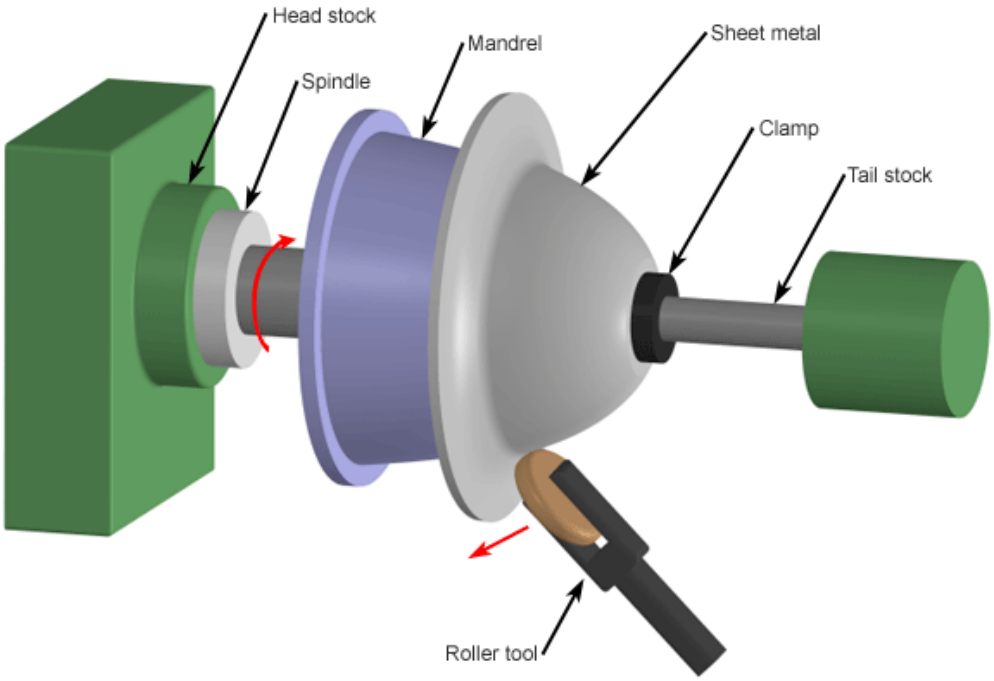
در این فصل سعی می‌شود با ارائه‌ی چشم‌اندازی مناسب به موضوع، ساختار و محتوای پایان‌نامه تبیین شود. ابتدا مقدمه‌ی کوتاهی درباره‌ی آشنایی با فرایند شکل‌دهی چرخشی و مهمترین مزایای این فرایند ارائه خواهد شد. در ادامه برای مرور سابقه‌ی تحقیقاتی این فرایند، تاریخچه‌ی کوتاهی از پژوهش‌های قبلی گردآوری شده است. در انتها با جمع‌بندی کارهای قبلی، جنبه‌ی نوآوری، اهداف و ساختار پایان‌نامه تشریح می‌شود.

1-2- تاریخچه‌ی فرایند شکل‌دهی چرخشی

شکل‌دهی چرخشی به 3000 سال پیش از میلاد مسیح بازمی‌گردد و از هنرهای مصریان باستان است. از ساخت ماشین‌های شکل‌دهی چرخشی بیش از 75 سال می‌گذرد که از ماشین‌های تراش تا ماشین‌های هیدرولیک و CNC توسعه پیدا کردند که در شکل (1-1) نمایش داده است.

به‌صورت کلی شکل‌دهی چرخشی به گروهی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات که قابلیت تولید حجم‌های توخالی و بدون درز با محور تقارن را دارند، اطلاق می‌شود. تغییر شکل در این فرایندها به واسطه‌ی اعمال نیروی نقطه‌ای و حرکت چرخشی قطعه‌کار انجام می‌پذیرد. در این روش، ماده اولیه عمدتا به شکل ورق است که بین قالب و ابزار شکل‌دهی تحت فشار قرار گرفته و شکل می‌گیرد.

در این فرایند، قطعه‌کار در ناحیه‌ی بین قالب دوار و مرغک بسته می‌شود و ابزار به‌صورت محوری و یا ترکیب محوری و شعاعی حرکت می‌کند و در محل تماس تغییر شکل دائمی ایجاد می‌شود. یکی از مشکلاتی که در زمینه‌ی تولید ورق به‌روش شکل‌دهی چرخشی وجود دارد، ایجاد پارگی در ورق در حین عملیات است که علاوه بر کاهش راندمان تولید موجب بروز آسیب‌دیدگی در تجهیزات می‌شود.



شکل 1-1 نمایش فرایند شکل‌دهی چرخشی

پارگی ورق می‌تواند ناشی از عوامل گوناگونی باشد که با مطالعه‌ی این عوامل و تعیین میزان اثر آن‌ها، می‌توان با اعمال محدودیت‌ها و قیود مناسب، از احتمال ایجاد پارگی در ورق کاست. آسیب یک فرایند فیزیکی پیش‌رونده است که در نهایت منجر به شکست ماده می‌شود. مکانیک آسیب (Damage Mechanics) با به‌کارگیری مجموعه‌ای از متغیرهای مکانیکی به بررسی این روند تخریب می‌پردازد. در این تحقیق با بهره‌گیری از مکانیک آسیب به پیش‌بینی پارگی ورق در حین فرایند شکل‌دهی چرخشی پرداخته می‌شود. فرایند شکل‌دهی چرخشی یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای تولید قطعات متقارن و تو خالی است که به نحو چشمگیری اقتصادی و ارزان است. بنا به مدارک و اسناد تاریخی، شکل‌دهی چرخشی فلزات از روزگار مصریان باستان شناخته شده است و برای ساخت بشقاب‌های نقره‌ای از آن استفاده شده است. اما گفته می‌شود که پایه‌های اصلی صنعت شکل‌دهی فلزات در ابتدای قرن دهم میلادی توسط چینی‌ها بنا نهاده شده است [1]. ابتدای این فرایند را می‌توان از تولید کوزه‌ی رسی با یک وسیله‌ی دستی در زمان مصر باستان جستجو کرد و بعد از رشد این فرایند از آن جا در قرن 15 در چین و سپس در زمان ادوارد سوم در انگلستان و سرانجام در قرن 19 در امریکا گسترش پیدا کرد و در شروع قرن 20 این روش به‌صورت علمی پیشرفت کرد که تکرارپذیری و تلرانس ابعادی اهمیت چندانی نداشت ولی همچنان نیازمند تجربه و مهارت کارپرداز بود [1]. طی سال‌های متمادی فرایند شکل‌دهی چرخشی فلزات، روشی غیر قابل تغییر باقی ماند. در آن سال‌ها اصولا از فلزات نرم مانند آلومینیم، مس و غیره با ضخامت کم برای شکل‌دهی چرخشی استفاده می‌شد. اما فلزات سخت و ورق‌های ضخیم را نمی‌توانستند به‌وسیله‌ی این روش شکل‌دهی نمایند. کم‌کم با گسترش نیازهای

صنعت به قطعات متقارن توخالی و دقیق‌تر از نظر ابعادی، این فرایند نیز روند تکاملی خود را طی نمود. اولین ماشین الکتریکی در سال 1930 اختراع شد و استفاده از ابزار با پیش‌روی خودکار را امکان‌پذیر کرد [1]. در سال 1945 اولین ماشین تراش هیدرولیکی ابداع شد که مقدمه‌ای برای برش مواد سخت بود و همچنان هدایت ابزار دستگاه با دست کاربر تامین می‌شد. در اوایل 1970 افزایش تقاضا برای تولید سریع و با کیفیت باعث ایجاد ماشین‌های CNC شد که همچنان نیازمند مهارت کاربر بود. سرانجام در سال 1980 ماشین‌های CNC مجهز به سیستم تمام خودکار شدند و وظیفه‌ی کاربر را ساده‌تر و نیازمندی به مهارت را کاهش داد [1].

به‌دنبال آن در طراحی دستگاه‌های شکل‌دهی چرخشی وظیفه‌ی هدایت ابزارهای شکل‌دهی به‌جای دست کاربر به عهده‌ی تجهیزات مکانیکی گذاشته شد و به این ترتیب اولین پایه‌های فرایند شکل‌دهی چرخشی ماشینی یا قدرتی گذاشته شد. به‌وسیله‌ی این فرایند امکان شکل‌دهی چرخشی فلزات سخت‌تر و با ضخامت بیشتر به‌وجود آمد [2].

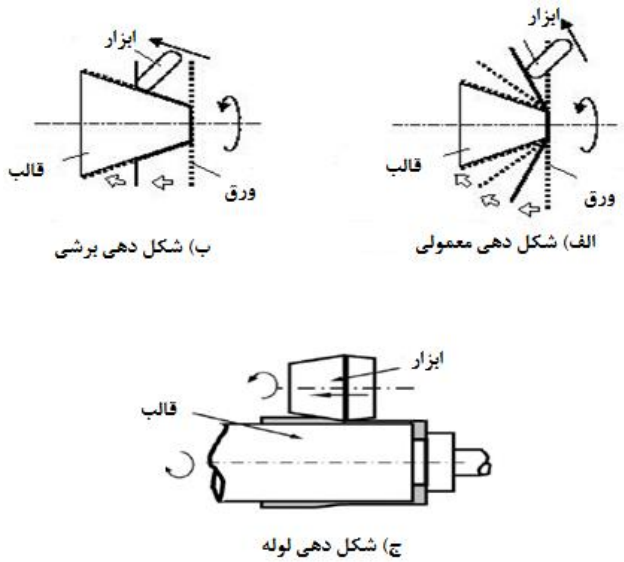
در طول سال‌های اخیر فرایند شکل‌دهی چرخشی به‌طور همزمان در چندین کشور از جمله سوئد، آلمان، انگلستان، ژاپن، چین و ایالات متحده‌ی آمریکا توسعه‌ی فراوانی یافته است. در پی آن روش‌های دیگری از این نوع فرایند مانند شکل‌دهی برشی و شکل‌دهی چرخشی لوله یا فلوفرمینگ معرفی شدند [3]. با پیشرفت موتور توربین گازی هواپیماها، نیاز به فرایندهای شکل‌دهی چرخشی و دیگر فرایندهای مربوط به آن‌ها برای تولید قطعات مورد نیاز بیش از پیش احساس شد و این عامل بسیار مهمی در پیشرفت و توسعه این فرایندها شد.

دقت ابعادی قطعات تولیدی و اقتصادی بودن این فرایندها دو عامل مهم در گسترش گرایش به استفاده از این فرایندها در صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت هوافضا بود. از این‌رو به‌علت اهمیت صنایع هوافضا و تسلیحات برای قدرت‌های جهانی، گسترش و توسعه فرایندهای شکل‌دهی چرخشی روند فزاینده‌ای پیدا کرد، به گونه‌ای که امروز تولید تسلیحات پیشرفته و کلیدی مانند موتور موشک‌ها بدون استفاده از فرایندهای شکل‌دهی چرخشی ممکن نیست. البته با پررنگ‌تر شدن نقش اقتصاد در معادلات قدرت در جهان، استفاده از این فرایند در سایر صنایع نیز رو به افزایش است. امروزه بیشتر تجهیزات و ماشین‌آلاتی که در این زمینه برای تولید قطعات دقیق استفاده می‌شوند، به سیستم کنترل عددی با قابلیت برنامه پذیری پیشرفته مجهز هستند. در اواسط قرن 20 نیازمندی به ورق‌های ضخیم با تلرانس ابعادی بالا باعث ایجاد ماشین‌های اتوماتیک شکل‌دهی چرخشی شد و ترکیب توان هیدرولیکی و اتوماسیون باعث توسعه تکنیک‌های فرایند شکل‌دهی با جریان مواد شده و به انعطاف‌پذیری بیشتر این فرایند منجر شد [3].

3-1- تقسیم‌بندی‌های فرایند شکل دهی چرخشی

فرایند شکل‌دهی چرخشی بسته به مکانیزم تغییرشکل به سه نوع اصلی قابل تفکیک است. تغییرشکل در نخستین گروه با مکانیزم خم‌کاری انجام می‌پذیرد و تغییر ضخامت محسوسی اتفاق نمی‌افتد که در اصطلاح شکل‌دهی چرخشی معمولی[1] نامیده می‌شود. دسته‌ی دوم شکل‌دهی برشی[2] است که در آن مکانیـزم

[1] Conventional Spinning
[2] Shear Forming



شکل 1-2 انواع فرایندهای شکل‌دهی چرخشی [1]

شکل‌دهی همراه با نیروی برشی و لغزش لایه‌های فلز همراه است وکاهش ضخامت به‌وضوح قابل مشاهده است. سرانجام فلوفرمینگ[3] که مکانیزم آن شباهت زیادی با اکستروژن دارد که در شکل (1-2) نشان داده شده‌اند.

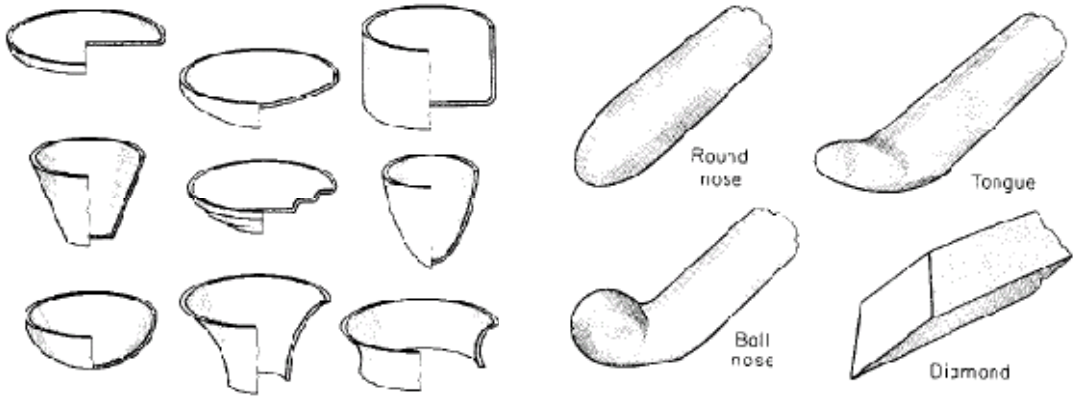
این روش را می‌توان یکی از روش‌های مدل‌سازی[4] برای ورق‌های گران‌قیمت در نظر گرفت. مزیت‌های این روش شکل‌دهی عبارت است از: انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت پایانی مناسب، پایین بودن هزینه ماشین‌آلات، افزایش قابلیت اتوماسیون، کاهش ترک‌ها، توانایی ماشین‌کاری مواد سخت، کاهش دورریز مواد، تنوع در عملکرد و احتیاج به یک‌بار تنظیم‌کردن بازه‌ی زمانی مطلوب.

1-3-1- فرایند شکل‌دهی چرخشی معمولی

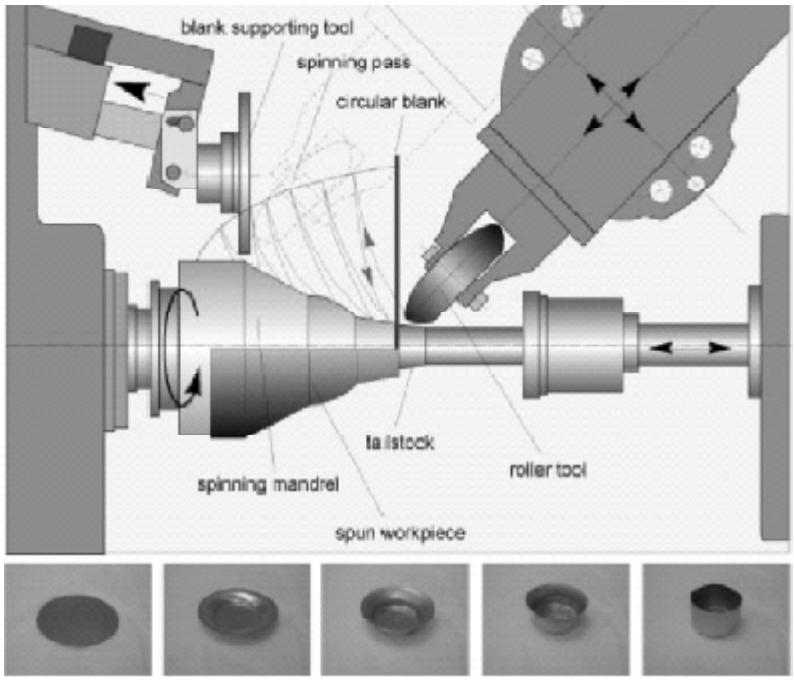
این فرایند یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شکل‌دهی چرخشی به‌شمار می‌رود که معمولاً برای تولید قطعه‌کارهایی با شکل‌های مخروطی، کروی و استوانه‌ایی کاربرد دارد. در این روش ابزار با فشار ورق را طی چند مرحله به روی قالب در حال چرخش هدایت می‌کند که به‌دلیل تعداد پاس‌های انجام شده در این روش، تغییر ضخامت محسوسی در محصول نهایی وجود ندارد. درنتیجه مقدار تغییر ضخامت مجاز در این نوع شکل‌دهی تاثیر خاصی نداشته و بستگی به مهارت و تجربه اپراتور دارد که بتواند محصول سالمی تولید کند. فلزاتی که در فرایندهای شکل‌دهی کار سرد دیگر آسیب‌پذیر هستند با این روش به سادگی می‌توانند شکل‌دهی شوند. در این روش ورق بین قالب و مرغک دستگاه قرار دارد وتوسط ابزارهای گوناگونی روی قالب خم می‌شود. ابزارها انواع مختلفی دارنـد، از جمله: ابزار زبانه‌دار، ابزار گرد و ابزار توپی و همچنیـن ابزار برش. در شکل (1-3) نمونه‌هایی از این ابزار به‌همراه قطعاتی که با این روش تولید می‌شود آورده شده است. ورق گرد روی قالب بر روی سه‌نظام دستگاه تراش افقی نصب می‌شود و طی چندین بارحرکت رفت ابزار، به قالب

[3] Flow Forming
[4] Prototyping

می‌چسبد و شکل مطلوب خود را می‌گیرد که در شکل (1-4) مکانیزم و مراحل تولید محصول با این روش نشان داده شده است.



شکل 1-3 سمت چپ، قطعات تولید شده با روش شکل‌دهی چرخش معمولی. سمت راست، بعضی ابزارهای مورد استفاده در این روش [2]



شکل1-4 نمایش مراحل انجام و مکانیزم شکل‌دهی چرخشی معمولی [4]

در انتهای فرایند چنان‌چه نیاز به برش انتهای محصول باشد، درحالی‌که قطعه روی قالب است با تعویض ابزار با ابزار برشی مخصوص عمل دوربرداری محصول انجام می‌شود. این روش به طور وسیعی برای قطعات کوچک و بزرگ با ضخامت کم مورد استفاده قرار می‌گیرد که در واقع قابلیت شکل‌دهی در این روش بستگی به تجهیزات مورد استفاده و ضخامت و استحکام اولیه‌ی قطعه‌کار دارد.

هزینه‌ی پایین، سرمایه‌گذاری کم اولیه برای ماشین‌آلات، زمان کم و کمترین تغییر در ابزار برای قطعه‌کار جدید را می‌توان از مزایای این روش نسبت به فرایندهای مشابه مانندکشش عمیق نام برد. اما از

معایب آن سرعت کند این فرایند است که به‌همین دلیل از این روش در ساخت نمونه‌های اولیه و آزمایشگاهی و یا تولید با حجم پایین استفاده می‌شود. اما برای تولید قطعات مخروطی این روش نسبت به کشش عمیق برتری دارد [2].

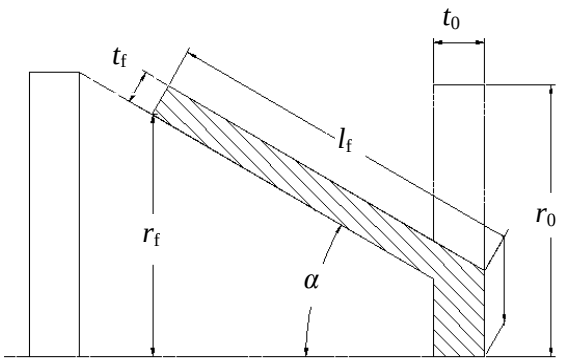
1-3-2- فرایند شکل‌دهی برشی

در این فرایند شکل‌دهی، جریان مواد در محور حرکت ابزار انتقال پیدا می‌کند و می‌تواند در یک مرحله عملیات قطعات مخروطی و کروی محدب و مقعر را تولید کند. زمان عملیات این نوع شکل‌دهی کوتاه‌تر از شکل‌دهی معمولی است. این فرایند به نام شکل‌دهی آهنگری‌چرخشی هم معروف است که به‌دلیل فشاری که ابزار بر روی قالب وارد می‌کند مانند آهنگری است. قطعه‌کار گرد که به‌وسیله‌ی مرغک به قالب نگه داشته شده، توسط حرکت پیوسته‌ی ابزار در یک مرحله روی قالب می‌نشیند. کاهش ضخامت در این روش توسط قانون سینوسی تعریف می‌شود که ضخامت حاصل را می‌توان ضخامت سینوسی نامید. همان‌طور که در شکل(1-5) مشخص است، اگر t_0 ضخامت اولیه دیسک، α نیم‌زاویه‌ی مخروطی باشد، t_f ضخامت نهایی مخروط از رابطه‌ی (1-1) به‌دست می‌آید. این رابطه قانون سینوسی در شکل‌دهی چرخشی نامیده می‌شود [2].

$$t_f=t_0 \sin \alpha \qquad (1\text{-}1)$$

غلتک تنها در ناحیه‌ی کوچک و محدودی با سطح بیرونی قطعه‌کار در تماس است که در این ناحیه تغییر شکل پلاستیک روی می‌دهد. مزیت شکل‌دهی در ناحیه‌ای کوچک و محدود این است که برای تغییر شکل به نیروی کمی نیاز است. در نتیجه نیروی اعمالی برای تغییر شکل فلز در شکل‌دهی چرخشی کمتر از روش‌های شکل‌دهی دیگر است. به‌همین دلیل ابزار مورد استفاده در این فرایند کوچکتر و کم‌هزینه‌تر خواهند بود. در این روش می‌توان فلزاتی با استحکام بالا و با قطر زیاد را با نیرو و انرژی و همچنین هزینه‌ی پایین‌تر نسبت به سایر روش‌ها شکل‌دهی نمود [3].

مقدار محدوده‌ی نیم‌زاویه‌ی مخروط که برای فرایند شکل‌دهی برشی تعریف شده $12°$ تا $80°$ می‌باشد که با توجه به محدودیت کاهش ضخامت برای فلزات در هر فرایند، گاهی احتیاج به بیش از یک مرحله برای شکل‌دهی است که میان هر مرحله عملیات بازپخت برای حفظ خواص ماده و تنش‌زدایی انجام می‌شود. به قطعاتی که در یک مرحله به زاویه‌ای مناسب برای مرحله بعدی می‌رسند، قطعات پیش‌فرم گفته می‌شود که برای محاسبه‌ی ضخامت نهایی قطعه‌کار در مرحله بعدی از رابطه‌ی (1-2) استفاده می‌شود.



شکل 1-5 مشخصات هندسی قطعه‌کار و قالب در شکل‌دهی برشی

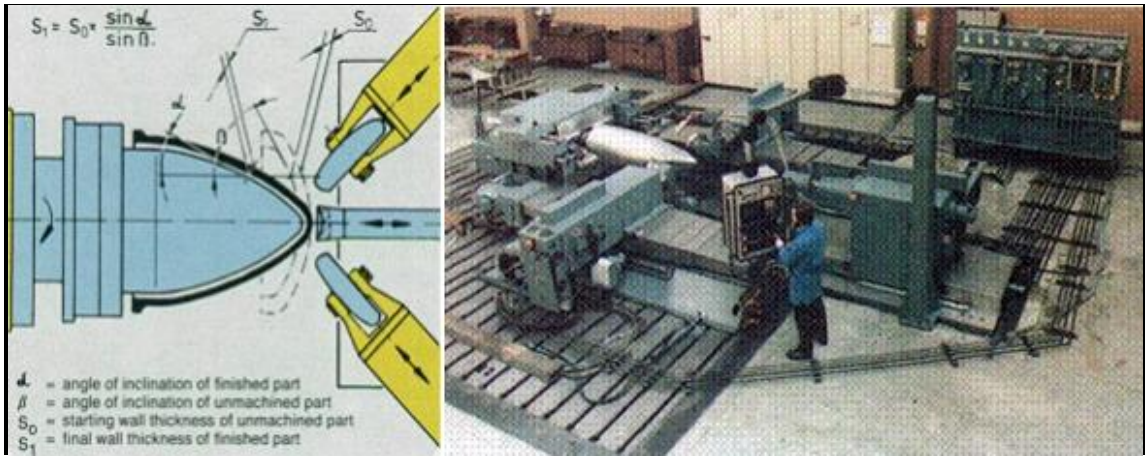
$$t_f = t_0 \frac{\sin a}{\sin b} \qquad (2\text{-}1)$$

که α زاویه‌ی قالب دوم و β زاویه‌ی قطعه پیش‌فرم است. همچنین t_0 ضخامت قطعه‌ی پیش‌فرم و t_f ضخامت نهایی از مرحله‌ی دوم است [26].

نمونه‌ایی از فرایند دو مرحله‌ای شکل‌دهی برشی همراه با دو غلتک که در آن ابزار با CNC سه‌محوره کنترل می‌شود، و برای تولید دماغه‌ی موشک به‌کار می‌رود در شکل (1-6) نشان داده شده است.

با بسط و توسعه‌ی قانون سینوسی می‌توان ضخامت دیواره‌ی پیش‌فرم را برای انواع قطعات با شکل و انحنای خاص، طراحی و محاسبه کرد.

یکی از مشکلات شکل‌دهی برشی شکل‌های نیم‌کره‌ایی این است که در قطب نیم‌کره، ضخامت محوری قطعه‌کـار با اندازه‌ی ضخـامت پیش‌فرم اولیه برابر است و هر چه به دایره استوایی نزدیک‌تر می‌شویم ضخامت محوری افزایش می‌یابد. در نتیجه از نظر تئوری چون معکوس سینوس صفر درجه به‌سمت بی‌نهایت میل می‌کند، ضخامت در این دایره به‌سمت بی‌نهایت میل می‌کند. این بدین معنی است که ضخامت قطعه در قطر خارجی نیم‌کره برابر صفر خواهد بود. همان‌طور که آزمایش‌های عملی نشان می‌دهد، این موضوع درست نیست. در واقع در زاویه‌های کمتر از $30°$ قانون سینوسی برقرار نیست و عملیات شکل‌دهی برشی به فلوفرمینگ تبدیل می‌شود [3].



شکل 1-6 فرایند شکل‌دهی برشی با استفاده از قطعه‌ی پیش‌فرم برای قالب با دیواره‌ی منحنی‌شکل [5]