

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

رشته‌ی مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید

عنوان

مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند پین فرمینگ ورق‌های فلزی با پیش‌کرنش الاستیک

نگارش

ناصر دبیری

استاد راهنما

دکتر سید هادی قادری

استاد مشاور

دکتر مهدی گردویی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور 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 خانم / آقای ناصر دبیری رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان: مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند پین فرمینگ ورق‌های فلزی با پیش‌گرنش الاستیک که در تاریخ سه شنبه ۹۳/۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار امتیاز: ۱۸/۸) 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

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر سید هادی قادری	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر مهدی گردویی	۲- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مجتبی قطعی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر محمد باقر نظری	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان
امضاء:



تقدیم

تقدیم به **پدر** و **مادر** عزیز و مهربانم که در تمام مراحل زندگی یار و یاور من بودند و از هیچ کمکی در جهت موفقیت من دریغ نکردند. دست آنها را می‌بوسم و امیدوارم کارهای کوچک من، بخشی از زحمات بزرگ آنها را جبران کند.

تشکر و قدردانی

خداوند بزرگ و متعال را شاکر و سپاسگزارم که سلامتی و توفیق تحصیل علم و دانش را به من عنایت فرمود.

از زحمات و کمک‌های بی‌دریغ و دلسوزانه‌ی استاد گرانقدر و عزیزم جناب آقای دکتر سید هادی قادری کمال تشکر و قدردانی را دارم. از استاد مشاور عزیزم، جناب آقای دکتر مهدی گردویی سپاسگزاری می‌کنم. همچنین از اساتید محترم دانشکده‌ی مهندسی مکانیک به‌خصوص استاد گرامی، جناب آقای دکتر مجتبی قطعی صمیمانه تشکر می‌کنم. شاگردی این اساتید را مایه‌ی افتخار خود دانسته و از خداوند متعال برای تمامی این عزیزان، سلامتی و موفقیت روزافزون در تمام مراحل زندگی را خواستارم. از جناب آقای مهندس جواد علی‌نژاد مدیر محترم واحد تحقیق و توسعه‌ی شرکت فنر لول ایران، به‌جهت همکاری ارزشمند در انجام آزمایش‌های تجربی سپاسگزارم.

از همه‌ی دوستانم به‌خصوص مهندس محسن قربان و مهندس فرید سالاری و تمامی کسانی که در طول دوران زندگی به‌نحوی به من کمک کردند، تشکر می‌کنم.

از خانواده‌ی عزیزم که وجودشان همیشه مایه‌ی دلگرمی من است، قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب ناصر دبیری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند پین فرمینگ ورق‌های فلزی با پیش‌کنش الاستیک تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ساجمه‌زنی یک عملیات سطحی معمول، جهت بهبود عمر خستگی قطعات فلزی مختلف است. این فرایند باعث ایجاد تنش پسماند فشاری نزدیک سطح قطعه شده که در جلوگیری از شروع ترک‌های سطحی و مقاومت در مقابل خوردگی تنش‌ی بسیار مفید است. پین فرمینگ روشی است که از فرایند ساجمه‌زنی مشتق شده و کاربرد عمده‌ی آن در صنایع هوایی جهت تولید قطعات نازک بزرگ با انحنای ملایم از جمله پنل‌ها و پوسته‌ی بال هواپیماها می‌باشد. این فرایند به دو دسته‌ی پین فرمینگ بدون پیش‌کرنش الاستیک (پین فرمینگ متداول) و پین فرمینگ با پیش‌کرنش الاستیک (استرس پین فرمینگ) قابل تقسیم است. در این پایان‌نامه، به مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایندهای ساجمه‌زنی و پین فرمینگ با و بدون پیش‌کرنش الاستیک ورق‌های فلزی پرداخته شد. جهت انجام آزمایش‌های تجربی از ساجمه‌های فولادی با قطرهای ۰/۴ mm و ۰/۶ mm و نوارهایی از جنس آلیاژهای آلومینیم Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ استفاده شد. برای اعمال پیش‌کرنش الاستیک، قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش متفاوت ∞ ، ۵۰۰ mm، ۳۷۵ mm و ۲۵۰ mm طراحی و ساخته شد. در بخش عددی با به‌کار بردن پارامترهای مشابه با آزمایش‌ها، ابتدا با استفاده از یک مدل سه‌بعدی با توزیع تصادفی ساجمه، به شبیه‌سازی فرایند ساجمه‌زنی پرداخته شد و در ادامه با استفاده از این مدل و در سه مرحله، فرایندهای پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ شبیه‌سازی شد. در مرحله‌ی اول، در یک تحلیل المان محدود ضمنی در نرم افزار آباکوس، ممان پیش‌خمش جهت ایجاد پیش‌کرنش الاستیک، به بلوکی آلومینیمی اعمال گردید. سپس در تحلیلی صریح، ضربات ساجمه‌ها روی بلوک آلومینیمی دارای پیش‌کرنش الاستیک، شبیه‌سازی و توزیع تنش‌ها درون بلوک به‌دست آمد. سرانجام در تحلیل ضمنی دیگر، با اعمال نیروهای کششی عکس‌العمل و ممان‌های خمشی عکس‌العمل که از مرحله‌ی قبل به‌دست آمد، شکل-دهی ورق آلومینیمی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد به‌ازای پارامترهای پینینگ یکسان، استرس پین فرمینگ در مقایسه با پین فرمینگ متداول انحنای بزرگتری در ورق ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش ممان پیش‌خمش (کاهش شعاع پیش‌خمش)، انحنای ایجاد شده در ورق در جهت اعمال پیش‌خمش افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی ورق‌های فلزی، روش المان محدود، تنش پسماند، ساجمه‌زنی، پین فرمینگ،

استرس پین فرمینگ

فهرست مطالب

د	تقدیم.....
ه	تشکر و قدردانی.....
و	تعهد نامه.....
ز	چکیده.....
ح	فهرست مطالب.....
ک	فهرست شکل ها.....
س	فهرست جدول ها.....
ع	فهرست نشانه ها.....
۱	فصل ۱ مقدمه.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ معرفی فرایند ساچمه زنی.....
۴	۱-۲-۱ پارامترهای فرایند ساچمه زنی.....
۵	۲-۲-۱ روش های کنترل فرایند ساچمه زنی.....
۵	۱-۲-۲-۱ شدت پینینگ.....
۸	۲-۲-۲-۱ پوشانندگی سطح.....
۸	۳-۲-۲-۱ زبری سطح.....
۸	۴-۲-۲-۱ تأثیر شدت پینینگ و پوشانندگی سطح روی تنش پسماند و زبری سطح.....
۹	۳-۱ فرایند پین فرمینگ.....
۹	۱-۳-۱ پین فرمینگ متداول.....
۱۱	۲-۳-۱ استرس پین فرمینگ.....
۱۱	۴-۱ پیشینه ی تحقیق.....
۱۱	۱-۴-۱ ساچمه زنی.....
۱۶	۲-۴-۱ پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ.....
۱۷	۱-۲-۴-۱ بارگذاری دمایی معادل.....
۱۹	۲-۲-۴-۱ بارگذاری فشاری معادل.....

۲۰	..... تنش‌های اعمالی	۳-۲-۴-۱
۲۴	..... اهداف پژوهش و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۵-۱
۲۷	.....	فصل ۲ آزمایش‌های تجربی
۲۸	..... مواد و روش‌ها	۱-۲
۲۸	..... ورق فلزی	۱-۱-۲
۲۹	..... ساچمه‌ی فولادی	۲-۱-۲
۳۰	..... قیده‌های پین فرمینگ	۳-۱-۲
۳۱	..... دستگاه ساچمه‌زنی	۴-۱-۲
۳۱	..... آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش	۲-۲
۳۲	..... اندازه‌گیری ارتفاع کمان	۳-۲
۳۳	..... آزمون سختی‌سنجی	۴-۲
۳۳	..... آماده‌سازی نمونه‌ها	۱-۴-۲
۳۵	..... اندازه‌گیری سختی	۲-۴-۲
۳۷	.....	فصل ۳ شبیه‌سازی المان محدود
۳۸	..... مدل برخورد یگانه	۱-۳
۴۱	..... مدل برخورد چندگانه	۲-۳
۴۲	..... شبیه‌سازی پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ	۳-۳
۴۹	.....	فصل ۴ نتایج و بحث
۵۰	..... نتایج شبیه‌سازی	۱-۴
۵۰	..... برخورد یگانه	۱-۱-۴
۵۳	..... برخورد چندگانه	۲-۱-۴
۶۱	..... پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ	۳-۱-۴
۷۶	..... نتایج تجربی	۲-۴
۷۶	..... شکل‌دهی ورق	۱-۲-۴
۸۱	..... اندازه‌گیری سختی	۲-۲-۴
۸۳	.....	فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۴	..... نتیجه‌گیری	۱-۵
۸۵	..... پیشنهادها	۲-۵

٨٧ منابع

٩١ Abstract

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- نمایش شماتیک تنش پسماند ایجاد شده به وسیله‌ی ساچمه‌زنی [۵]..... ۴
- شکل ۱-۲- اثر پارامترهای پینینگ روی پروفیل تنش پسماند [۷]..... ۵
- شکل ۱-۳- اندازه‌گیری شدت پینینگ توسط آزمایش آلمن [۹]..... ۶
- شکل ۱-۴- منحنی اشباع [۱۰]..... ۷
- شکل ۱-۵- تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی [۱۷]..... ۹
- شکل ۱-۶- متعادل شدن تنش‌های اعمالی و ایجاد تنش پسماند [۱۹]..... ۱۰
- شکل ۱-۲- منحنی تنش- کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ [۵۰]..... ۲۸
- شکل ۲-۲- منحنی تنش- کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم Al ۶۰۶۱-T۶ [۴۹]..... ۲۹
- شکل ۲-۳- ساچمه‌های فولادی به‌کار رفته در آزمایش، الف) قطر $d = ۰/۶$ mm
ب) قطر $d = ۰/۴$ mm..... ۲۹
- شکل ۲-۴- قیدهای پیش‌خمش طراحی شده برای مطالعه‌ی پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ،
الف) $Rp = \infty$ ب) $Rp = ۵۰۰$ mm ج) $Rp = ۳۷۵$ mm د) $Rp = ۲۵۰$ mm..... ۳۰
- شکل ۲-۵- نوارهای آلومینیمی آماده شده جهت آزمایش..... ۳۲
- شکل ۲-۶- بستن نوارهای آلومینیمی روی قیدهای پین فرمینگ..... ۳۲
- شکل ۲-۷- اندازه‌گیری ارتفاع کمان نوار آلومینیمی..... ۳۳
- شکل ۲-۸- دستگاه پولیش..... ۳۴
- شکل ۲-۹- نمونه‌ها پس از مانت و پولیش الف) ساچمه‌های فولادی ریختگی ب) ورق آلومینیمی..... ۳۵
- شکل ۲-۱۰- دستگاه سختی‌سنج میکرو ویکرز..... ۳۵
- شکل ۳-۱- هندسه‌ی مدل در برخورد یگانه برای آلیاژ Al ۷۰۷۵-T۶ با ضخامت $h = ۲$ mm..... ۳۹
- شکل ۳-۲- شکل شماتیکی از توزیع تصادفی ساچمه‌ها در حالت برخورد چندگانه..... ۴۱
- شکل ۳-۳- هندسه‌ی مدل در حالت برخورد چندگانه، الف) قطر ساچمه $d = ۰/۴$ mm ب) قطر ساچمه
 $d = ۰/۶$ mm..... ۴۲

- شکل ۳-۴- نمایش هندسی متغیرهای رابطه‌ی (۳-۳) ۴۴
- شکل ۳-۵ شکل شماتیکی از هندسه‌ی مدل در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی نوار آلومینیمی، الف) نوار از جنس T۶-Al ۶۰۶۱ ب) نوار از جنس T۶-Al ۷۰۷۵ ۴۸
- شکل ۴-۱- پروفیل توزیع تنش فون میسز اعمالی در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و قطر ساچمه $d = 0.6 \text{ mm}$ الف) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، ب) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۶۰۶۱ (تنش بر حسب MPa) ۵۱
- شکل ۴-۲- نمودارهای تنش اعمالی در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ الف) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، ب) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۶۰۶۱ ۵۲
- شکل ۴-۳- نمودارهای گودی ایجاد شده در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ الف) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، ب) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۶۰۶۱ ۵۳
- شکل ۴-۴- پروفیل توزیع تنش فون میسز اعمالی در برخورد چندگانه به‌ازای تعداد $n = 90$ ساچمه، سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و قطر ساچمه $d = 0.4 \text{ mm}$ الف) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، ب) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۶۰۶۱ (تنش بر حسب MPa) ۵۴
- شکل ۴-۵- نمودارهای تنش اعمالی در برخورد چندگانه به‌ازای تعداد $n = 90$ ساچمه و سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ الف) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، ب) برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۶۰۶۱ ۵۵
- شکل ۴-۶- مقایسه‌ی تنش اعمالی ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4 \text{ mm}$ ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6 \text{ mm}$ ۵۶
- شکل ۴-۷- مقایسه‌ی تنش اعمالی ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۶۰۶۱، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4 \text{ mm}$ ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6 \text{ mm}$ ۵۷
- شکل ۴-۸- مقایسه‌ی تنش پسماند ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم T۶-Al ۷۰۷۵، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4 \text{ mm}$ ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6 \text{ mm}$ ۵۸

شکل ۴-۹- مقایسه‌ی تنش پسماند ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم T۶-۶۱۰۶۱ Al، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4$ mm (ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6$ mm ۵۹

شکل ۴-۱۰- نمودار تنش پسماند به‌دست از شبیه‌سازی استرس پین فرمینگ در ممان‌های پیش‌خمش مختلف مربوط به کار میانو و همکاران [۲۱] ۶۰

شکل ۴-۱۱- پروفیل توزیع تنش ناشی از پیش‌خمش برای آلیاژ آلومینیم T۶-۷۵۷۵ Al به‌ازای شعاع پیش‌خمش $Rp = 250$ mm ۶۲

شکل ۴-۱۲- نمودار تنش خمشی ایجاد شده برای آلیاژ آلومینیم T۶-۷۵۷۵ Al به‌ازای شعاع پیش‌خمش $Rp = 250$ mm ۶۲

شکل ۴-۱۳- تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیمی از جنس T۶-۶۱۰۶۱ Al به‌ازای پروفیل‌های تنش به‌دست آمده از برخورد $n = 90$ ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm و سرعت $V = 75$ m/s، الف) $Rp = \infty$ (ب) $Rp = 500$ mm (ج) $Rp = 375$ mm (د) $Rp = 250$ mm (تغییر شکل بر حسب (mm) ۶۴

شکل ۴-۱۴- تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیمی از جنس T۶-۷۵۷۵ Al به‌ازای پروفیل‌های تنش به‌دست آمده از برخورد $n = 90$ ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm و سرعت $V = 75$ m/s، الف) $Rp = \infty$ (ب) $Rp = 500$ mm (ج) $Rp = 375$ mm (د) $Rp = 250$ mm (تغییر شکل بر حسب (mm) ۶۵

شکل ۴-۱۵- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیمی T۶-۷۵۷۵ Al در راستای x ، الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm ۶۷

شکل ۴-۱۶- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیمی T۶-۷۵۷۵ Al در راستای y ، الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm ۶۸

شکل ۴-۱۷- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیمی T۶-۶۱۰۶۱ Al در راستای x ، الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm ۶۹

شکل ۴-۱۸- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیمی T۶-۶۱۰۶۱ Al در راستای y ، الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm ۷۰

شکل ۴-۱۹- رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش بر واحد طول با ارتفاع کمان برای آلیاژ آلومینیم
Al ۷۰۷۵-T۶، الف) برای قطر ساچمه $d = ۰/۴$ mm (ب) برای قطر ساچمه $d = ۰/۶$ mm ... ۷۲

شکل ۴-۲۰- رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش بر واحد طول با شعاع انحنا برای آلیاژ آلومینیم
Al ۷۰۷۵-T۶، الف) برای قطر ساچمه $d = ۰/۴$ mm (ب) برای قطر ساچمه $d = ۰/۶$ mm ... ۷۳

شکل ۴-۲۱- رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش بر واحد طول با ارتفاع کمان برای آلومینیم
Al ۶۰۶۱-T۶، الف) برای قطر ساچمه $d = ۰/۴$ mm (ب) برای قطر ساچمه $d = ۰/۶$ mm ... ۷۴

شکل ۴-۲۲- رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش بر واحد طول با شعاع انحنا برای آلومینیم
Al ۶۰۶۱-T۶، الف) برای قطر ساچمه $d = ۰/۴$ mm (ب) برای قطر ساچمه $d = ۰/۶$ mm ... ۷۵

شکل ۴-۲۳- نوارهای از جنس Al ۶۰۶۱-T۶ پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = ۰/۴$ mm و زمان
پینینگ ۴ دقیقه، الف) $Rp = \infty$ (ب) $Rp = ۵۰۰$ mm (ج) $Rp = ۳۷۵$ mm
۷۶ $Rp = ۲۵۰$ mm (د)

شکل ۴-۲۴- نوارهای از جنس Al ۷۰۷۵-T۶ پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = ۰/۶$ mm و زمان
پینینگ ۵ دقیقه، الف) $Rp = \infty$ (ب) $Rp = ۵۰۰$ mm (ج) $Rp = ۳۷۵$ mm
۷۷ $Rp = ۲۵۰$ mm (د)

شکل ۴-۲۵- تأثیر ساچمه روی زبری سطح نمونه‌ها، الف) استفاده از قطر ساچمه $d = ۰/۴$ mm
۷۷ $d = ۰/۶$ mm (ب) استفاده از قطر ساچمه

شکل ۴-۲۶- مقایسه‌ی ارتفاع کمان نوار آلومینیمی به‌ازای برخورد ساچمه با قطر $d = ۰/۶$ mm در دو
حالت شبیه‌سازی و تجربی، الف) برای آلیاژ Al ۷۰۷۵-T۶ (ب) برای آلیاژ Al ۶۰۶۱-T۶ ۷۹

شکل ۴-۲۷- مقایسه‌ی شعاع انحنای نوار آلومینیمی به‌ازای برخورد ساچمه با قطر $d = ۰/۶$ mm در
دو حالت شبیه‌سازی و تجربی، الف) برای آلیاژ Al ۷۰۷۵-T۶ (ب) برای آلیاژ Al ۶۰۶۱-T۶ ۸۰

شکل ۴-۲۸- اثر ایجاد شده توسط فرورونده‌ی ویکرز روی نمونه‌ها ۸۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مشخصات نوارهای آل‌من [۱۰] ۶
- جدول ۱-۲- خصوصیات ورق‌های آلومینیمی [۴۹, ۵۰] ۲۸
- جدول ۱-۳- شیب‌های مورد نیاز جهت اعمال پیش‌خمش مورد نظر ۴۴
- جدول ۲-۳- ممان‌های پیش‌خمش و تنش‌های اولیه‌ی ایجاد شده ناشی از پیش‌خمش ۴۵
- جدول ۱-۴- ممان‌ها و نیروهای عکس‌العمل به‌دست آمده از تنش‌های اعمالی برای آلیاژهای آلومینیم
Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ ۶۱
- جدول ۲-۴- ارتفاع کمان و شعاع انحناهای به‌دست آمده از شبیه‌سازی برای آلیاژهای آلومینیم
Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ ۷۱
- جدول ۳-۴- ارتفاع کمان و شعاع انحناهای به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی برای آلیاژ آلومینیم
Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ ۷۸
- جدول ۴-۴- نتایج اندازه‌گیری سختی ۸۱

فهرست نشانه‌ها

t	زمان پینینگ	f_x, f_y	ارتفاع کمان در جهت x و y
HV_m	سختی ماده	ω_0	اولین فرکانس طبیعی سیستم
HV_s	سختی ساچمه	σ_y	تنش تسلیم
θ	شیب تیر	σ^c	تنش مرکب
R_p	شعاع پیش خمش	σ_x^c, σ_y^c	تنش‌های مرکب در جهت x و y
R_x, R_y	شعاع انحنا در جهت x و y	σ^{ind}	تنش اعمالی
h	ضخامت ورق	$\sigma_x^{ind}, \sigma_y^{ind}$	تنش‌های اعمالی در جهت x و y
μ	ضریب اصطکاک	σ^i	تنش اولیه ناشی از پیش خمش
ν	ضریب پواسون		تنش‌های ناشی از پیش خمش در جهت x و y
l	طول تیر	σ_x^i, σ_y^i	
t_1	عمق تنش پسماند فشاری بیشینه	σ^{res}	تنش پسماند
	عمقی که تنش پسماند از فشاری به کششی	σ^s	تنش کششی
t_2	تغییر می‌کند	σ^b	تنش خمشی
p	فشار	σ_{max}	تنش پسماند فشاری بیشینه
k_t	فاکتور تمرکز تنش سطحی	σ_{ten}	تنش پسماند کششی بیشینه
d	قطر ساچمه	σ_{sur}	تنش پسماند سطحی
ε	کرنش حقیقی	σ^b	تنش خمشی
C	ماتریس میرایی	n	تعداد ساچمه
M	ماتریس جرم	\dot{m}	جریان جرم
E	مدول یانگ	ρ	چگالی

ξ نسبت میرایی

نیروهای کششی عکس‌العمل، ناشی از تنش -

F_x, F_y های اعمالی در جهت‌های x و y

M_x^{pre} ممان پیش‌خمش در جهت x

ممان‌های خمشی عکس‌العمل، ناشی از تنش -

M_x, M_y های اعمالی در جهت‌های x و y

α میرایی متناسب با جرم

فصل اول

مقدمه

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ مقدمه

بشر از زمان‌های قدیم، سعی در بهبود خواص مواد مورد استفاده‌ی خود داشت. چکش کاری سرد فلزات به‌وسیله‌ی نخستین اسلحه‌سازها، صنعتگران فلز و آهنگران ماهر، موجب استحکام و مقاومت بیشتر آنها می‌شد. امروزه استفاده از ضربات ساچمه‌هایی با سرعت بالا، همان کاری را انجام می‌دهد که ضربات چکش در قدیم انجام می‌داد. این فرایند مکانیکی کنترل شده، در ابتدا به‌وسیله‌ی زیرلی^۱، شات بلاستینگ^۲ و بعدها به‌وسیله‌ی آلمن^۳، شات پینینگ (ساچمه‌زنی)^۴ نامیده شد [۱].

کاربردهای اولیه‌ی ساچمه‌زنی به سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ و به‌طور مشخص به شرکت جنرال موتورز برمی‌گردد. در ادامه، تلاش‌ها برای بهبود عمر خستگی قطعات حساس هواپیماها برای جنگ جهانی دوم توسط ارتش ایالات متحده، نیروی دریایی و هوایی و همچنین انجمن مهندسان اتومبیل، منجر به پیشرفت بیشتر این فرایند شد [۲].

امروزه ساچمه‌زنی به‌طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی و نیروگاهی استفاده می‌شود. دیسک‌های کمپرسور و توربین، پره‌ها، اسپیندل‌های چرخان، قطعات فرود هواپیما، فنر، چرخ‌دنده، شاتون، میل بادامک و میل پیچشی، نمونه قطعاتی هستند که معمولاً به‌وسیله‌ی ساچمه‌زنی تحت عملیات سطحی قرار می‌گیرند.

۱-۲ معرفی فرایند ساچمه‌زنی

ساچمه‌زنی، فرایند کارسردی است که به‌طور گسترده برای بهبود عمر خستگی قطعات فلزی استفاده می‌شود. این کار به‌وسیله‌ی بمباران سطح قطعه با ساچمه‌های کروی کوچک ساخته شده از فولاد

¹ Zimmerli

² Shot blasting

³ Almen

⁴ Shot peening

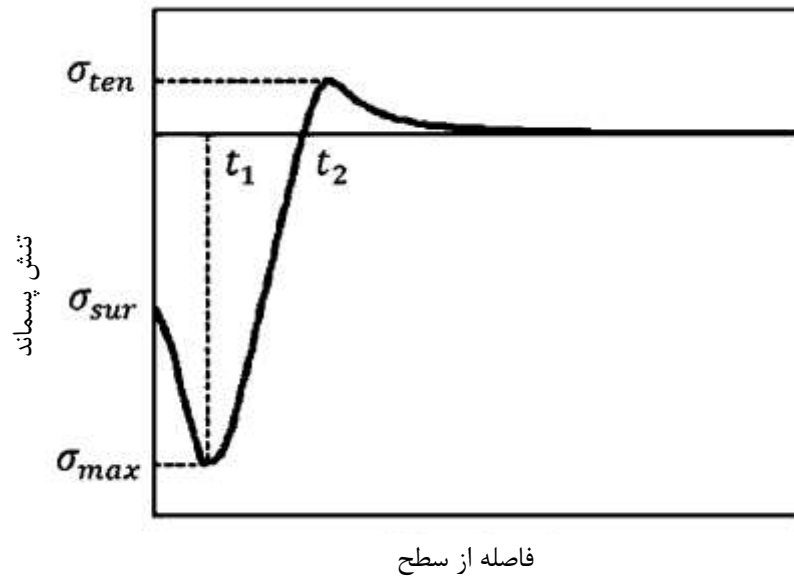
ریختگی سخت شده، برش سیم^۵ و دانه‌های سرامیکی یا شیشه‌ای، در سرعت نسبتاً بالا انجام می‌شود. در جریان اصابت ساچمه‌ها، یک فرورفتگی پلاستیک که با ناحیه‌ای الاستیک احاطه شده، شکل می‌گیرد. بعد از قطع تماس بین ساچمه و قطعه، ناحیه‌ی الاستیک زیر سطح، تمایل به بازگشت به حالت اولیه‌ی خود دارد؛ درحالی‌که ناحیه‌ی پلاستیک از این کار جلوگیری می‌کند. این تغییر شکل کشسان-مومسان ناهمگن، منجر به تولید میدان تنش پسماند فشاری در لایه‌های نزدیک به سطح می‌شود. همچنین برای نگهداشتن تعادل در قطعه‌ی پینینگ شده، یک میدان تنش پسماند کششی در عمق قطعه ایجاد می‌شود [۳].

میدان تنش پسماند فشاری سطحی، در جلوگیری از شکست زودرس تحت شرایط بارگذاری سیکلی خیلی مؤثر است؛ چرا که معمولاً ترک خستگی از سطوح بالایی قطعه و از ناحیه‌ای که در معرض تنش‌های کششی بالا قرار دارد، شروع می‌شود [۴].

شکل ۱-۱، میدان تنش پسماند نمونه‌ای را با پنج اصطلاح مهم آن که در زیر بیان شده، نشان می‌دهد.

- σ_{max} : تنش پسماند فشاری بیشینه
- σ_{sur} : تنش پسماند سطحی
- σ_{ten} : تنش پسماند کششی بیشینه
- t_1 : عمق تنش پسماند فشاری بیشینه
- t_2 : عمقی که علامت تنش پسماند از فشاری به کششی تغییر می‌کند.

⁵ Cut wire



شکل ۱-۱- نمایش شماتیک تنش پسماند ایجاد شده به وسیله‌ی ساچمه‌زنی [۵]

۱-۲-۱ پارامترهای فرایند ساچمه‌زنی

پارامترهای شناخته شده‌ی زیادی وجود دارند که تأثیر مهمی روی کارایی عملیات ساچمه‌زنی می‌گذارند.

این پارامترها را می‌توان در سه گروه زیر دسته‌بندی کرد [۶]:

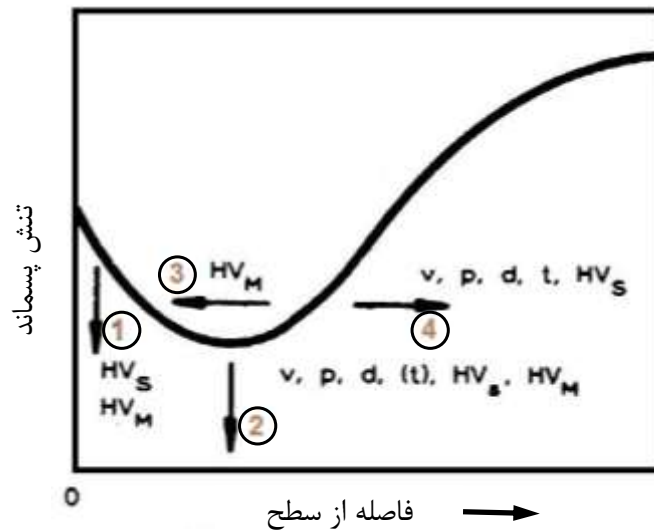
- پارامترهای مربوط به ساچمه: نوع، ابعاد، شکل، چگالی، سختی، استحکام تسلیم، سفتی.
- پارامترهای مربوط به قطعه‌کار: سختی، استحکام تسلیم، سفتی، کارسختی، ترکیب شیمیایی، شرایط پیش‌تنش.
- پارامترهای جریان ساچمه‌ها: نرخ جریان جرم، سرعت، زاویه‌ی برخورد، فاصله‌ی نازل تا قطعه-کار.

هرزوغ و همکاران [۷]، اثر پارامترهای ساچمه‌زنی را روی پروفیل تنش پسماند ایجاد شده، مورد

تحلیل قرار دادند. در این مطالعه، تأثیر سختی ماده‌ی قطعه‌کار HV_m ، سختی ساچمه HV_s ، قطر ساچمه

d ، سرعت ساچمه v ، جریان جرم ساچمه \dot{m} ، فشار p و زمان پینینگ t ، روی پروفیل تنش پسماند

مطابق شکل ۲-۱ نشان داده شد.



شکل ۱-۲- اثر پارامترهای پینینگ روی پروفیل تنش پسماند [۷]

در این شکل، پیکان ۱ نشان می‌دهد که مقدار تنش پسماند سطحی σ_{sur} ، با افزایش HV_S و HV_m افزایش می‌یابد. پیکان ۲، نشان می‌دهد که مقدار تنش پسماند بیشینه σ_{max} ، با افزایش t ، d ، p ، v ، HV_m و HV_S افزایش می‌یابد؛ پیکان ۳، نشان می‌دهد که عمق تنش پسماند بیشینه t_1 ، با افزایش HV_m کاهش می‌یابد و پیکان ۴، نشان می‌دهد t_1 ، با افزایش t ، d ، p ، v و HV_S افزایش می‌یابد.

۲-۲-۱ روش‌های کنترل فرایند ساچمه‌زنی

اندازه‌گیری شدت آلمن^۶ و پوشانندگی سطح^۷ دو روش مهم کنترلی هستند که برای اطمینان از تکرارپذیری فرایندهای ساچمه‌زنی و پین فرمینگ در صنعت استفاده می‌شوند.

۱-۲-۲-۱ شدت پینینگ

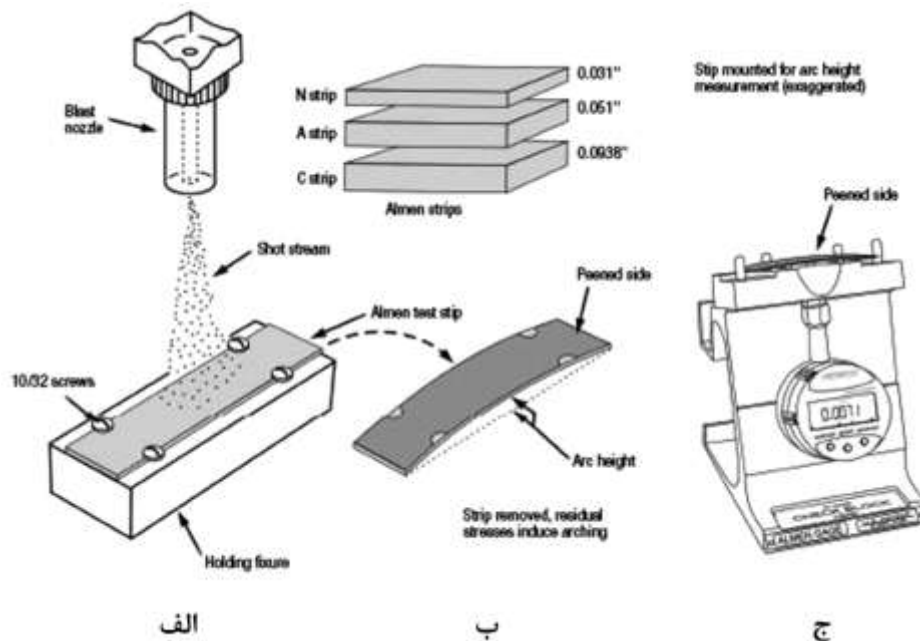
شدت پینینگ، به مقدار انرژی جنبشی منتقل شده از جریان ساچمه‌ها به قطعه‌کار در حین فرایند ساچمه‌زنی مربوط می‌شود. آلمن و بلک [۸]، روشی به نام آزمایش آلمن^۸ برای تعیین شدت پینینگ

^۶ Almen intensity

^۷ Surface coverage

^۸ Almen test

معرفی کردند. این روش مطابق شکل ۱-۳ الف، شامل پینینگ نوارهای آزمایشی استاندارد از جنس فولاد فنر SAE1070 با ابعاد معین بوده که روی یک قید نگهدارنده بسته می‌شوند.



شکل ۱-۳- اندازه‌گیری شدت پینینگ توسط آزمایش آلمن [۹]

مشخصات این نوارهای آزمایشی که اصطلاحاً نوارهای آلمن^۹ نامیده می‌شوند، در جدول ۱-۱ آورده شده است.

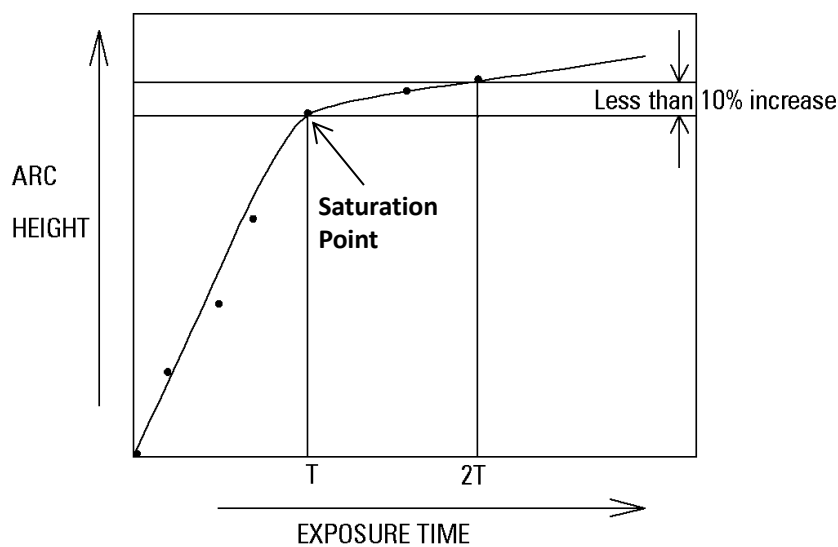
جدول ۱-۱- مشخصات نوارهای آلمن [۱۰]

نوع نوار	ضخامت (mm)	طول (mm)	عرض (mm)
N	0.787 ± 0.25	۷۵/۸ تا ۷۶/۶	۱۸/۹ تا ۱۹/۰۵
A	1.295 ± 0.25	۷۵/۸ تا ۷۶/۶	۱۸/۹ تا ۱۹/۰۵
C	2.387 ± 0.25	۷۵/۸ تا ۷۶/۶	۱۸/۹ تا ۱۹/۰۵

براساس شکل ۱-۳ ب، وقتی نوار آزمایشی از قید نگهدارنده خارج می‌شود، انحنایی به خود می‌گیرد. در واقع شدت پینینگ، اندازه‌گیری ارتفاع کمان نوار تغییر شکل داده است که توسط ابزاری به نام

^۹ Almen strips

سنجهی آلمن^{۱۰} انجام می‌گیرد (شکل ۱-۳). شدت بالاتر (ارتفاع کمان بزرگ‌تر) به این معنی است که مقدار بیشتری انرژی جنبشی به قطعه کار منتقل شده است. برای این منظور، در یک فرایند معلوم، تعداد معینی از نوارها با پارامترهای پینینگ یکسان و در زمان‌های ساچمه‌زنی متفاوت تحت پینینگ قرار می‌گیرند. از رسم نمودار ارتفاع کمان نوارهای مختلف بر حسب زمان‌های ساچمه‌زنی، منحنی مطابق شکل ۱-۴ به دست می‌آید که منحنی اشباع^{۱۱} نامیده می‌شود.



شکل ۱-۴- منحنی اشباع [۱۰]

نقطه‌ی اشباع، نقطه‌ای روی منحنی اشباع خواهد بود که در آن نقطه، با دوبرابر شدن زمان ساچمه‌زنی، کمتر از ۱۰ درصد افزایش در ارتفاع کمان به وجود بیاید. دستورالعمل و مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری شدت پینینگ در استانداردهای SAEJ442، SAEJ443 و SAE-AMS 2430 آورده شده است.

¹⁰ Almen gauge

¹¹ Saturation curve

۱-۲-۲ پوشاندگی سطح

پوشاندگی به صورت نسبت مساحت پوشیده شده با فرورفتگی‌های پینینگ به مساحت کل سطح تعریف شده، بر حسب درصد بیان می‌شود. بازرسی چشمی، روشی استاندارد برای ارزیابی پوشاندگی می‌باشد. بنا به دلایل عملی، پوشاندگی بیشینه‌ای که به صورت چشمی قابل ارزیابی است در حدود ۹۸٪ می‌باشد؛ زیرا درصد پوشاندگی ۱۰۰٪ به سختی قابل تشخیص خواهد بود. بنابراین بر اساس استاندارد SAEJ2277، پوشاندگی سطح ۹۸٪ معمولاً به عنوان پوشاندگی کامل در نظر گرفته می‌شود [۵].

۱-۲-۲-۳ زبری سطح

ساقچه‌زنی، در قطعه تولید تنش پسماند فشاری نموده در حالی که همزمان باعث افزایش زبری سطح نیز می‌شود. از آنجاکه تنش پسماند فشاری اثر مفید و زبری سطح اثر مخرب داشته بنابراین، نتایج ساقچه‌زنی به سبک سنگین کردن بین این دو نتیجه بستگی خواهد داشت.

۱-۲-۲-۴ تأثیر شدت پینینگ و پوشاندگی سطح روی تنش پسماند و زبری سطح

با توجه به کارهای انجام گرفته در این زمینه می‌توان نتایج این کارها را به صورت زیر بیان کرد:

- تأثیر شدت پینینگ روی پروفیل تنش پسماند: شدت پینینگ فقط روی عمق تنش پسماند فشاری t_1 ، تأثیر دارد. با افزایش شدت پینینگ، t_1 افزایش می‌یابد که اثر مفیدی در جلوگیری در انتشار ترک دارد. شدت پینینگ، تأثیر مهمی روی تنش پسماند سطحی σ_{sur} و تنش پسماند بیشینه σ_{max} ندارد [۷، ۱۱، ۱۲].
- تأثیر پوشاندگی سطح روی پروفیل تنش پسماند: افزایش پوشاندگی سطح، باعث افزایش عمق تنش پسماند فشاری t_1 شده و تأثیر قابل توجهی روی تنش پسماند سطحی σ_{sur} و تنش پسماند بیشینه σ_{max} ندارد [۱۲، ۱۳].
- تأثیر شدت پینینگ روی زبری سطح: با افزایش شدت پینینگ، زبری سطح افزایش می‌یابد [۱۴].

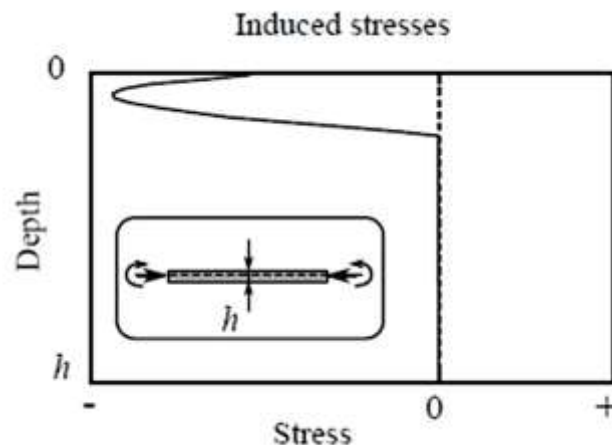
- تأثیر پوشاندگی سطح روی زبری سطح: افزایش پوشاندگی سطح، منجر به افزایش قابل توجهی در زبری سطح خواهد شد [۱۳].

۳-۱ فرایند پین فرمینگ^{۱۲}

۱-۳-۱ پین فرمینگ متداول

ساجمه‌زنی قطعات نازک، باعث ایجاد انحنا در آنها می‌شود. استفاده از ساجمه‌زنی جهت اعمال شکل - دهی، پین فرمینگ نامیده می‌شود. پین فرمینگ، فرایند بدون قالبی است که از سال ۱۹۶۰ به‌طور گسترده برای شکل‌دهی قطعات مختلف هواپیما استفاده می‌شود [۱۵].

بعد از آن که سطح قطعه به‌صورت متوالی با ساجمه‌های سرعت بالا ضربه زده شد؛ لایه‌ی پلاستیک نازکی، باعث ایجاد تنش فشاری روی لایه‌ی بالایی و تنش کششی در زیر نقاط ضربه خواهد شد. مطابق شکل ۱-۵، برای قطعه‌ی مقید شده، ضربات ساجمه‌ها منجر به ایجاد تنش‌های نامتعادل داخلی، تحت عنوان تنش‌های اعمالی^{۱۳} در قطعه می‌شوند [۱۶].



شکل ۱-۵- تنش‌های اعمالی ناشی از ساجمه‌زنی [۱۷]

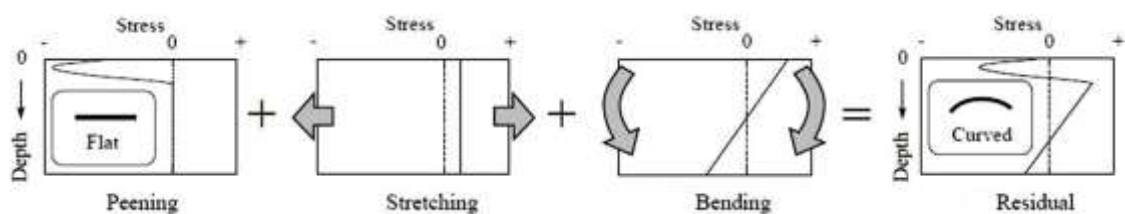
¹² Peen forming

¹³ Induced stresses

پس از برداشتن قیده‌ها، مطابق شکل ۱-۶ قطعه تمایل به کشیده شدن و خم شدن پیدا می‌کند. این موضوع مشابه با ایجاد تنش‌های کششی و خمشی درون قطعه، جهت ایجاد تعادل است. در نهایت این اتفاق منجر به ایجاد تنش‌های پسماند^{۱۴} درون قطعه می‌شود. تنش‌های پسماند، تنش‌های خود متعادلی هستند که بعد از برداشتن قیود خارجی، در قطعه باقی می‌مانند. بنابراین رابطه‌ای به شکل زیر بین تنش‌های موجود برقرار می‌شود [۱۸]:

$$\sigma^{res} = \sigma^{ind} + \sigma^s + \sigma^b \quad (1-1)$$

در رابطه‌ی (۱-۱)، σ^{res} تنش پسماند، σ^{ind} تنش اعمالی، σ^s تنش کششی و σ^b تنش خمشی می‌باشند.



شکل ۱-۶- متعادل شدن تنش‌های اعمالی و ایجاد تنش پسماند [۱۹]

از مزایای پین فرمینگ می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۰]:

۱. افزایش استحکام خستگی و خوردگی تنشی^{۱۵} و مقاومت در برابر ترک
۲. شکل‌دهی با استفاده از تنش‌های پسماند فشاری
۳. انجام فرایند بدون نیاز به قالب و در دمای اتاق
۴. اصلاح کجی‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده به وسیله دیگر فرایندهای ساخت
۵. انعطاف‌پذیر بودن فرایند به دلیل امکان تغییر ساده پارامترهای فرایند.

¹⁴ Residual stresses

¹⁵ Stress corrosion

۱-۳-۲ استرس پین فرمینگ^{۱۶}

پین فرمینگ متداول، باعث توزیع تنش پسماند همسانگرد در قطعه شده و بنابراین انحنای یکسان در همه‌ی جهات ایجاد می‌کند. در نتیجه قطعه تقریباً شکل کروی به‌خود می‌گیرد. برای قطعاتی مانند پوسته‌ی بال که انحنا در یک جهت بیشتر از جهت دیگر است از تکنیکی به‌نام استرس پین فرمینگ استفاده می‌شود. در این فرایند قطعه ابتدا به‌وسیله‌ی خمش یا کشش تحت پیش‌کرنش الاستیک قرار گرفته و سپس ناحیه‌ی مورد نظر، ساچمه‌زنی می‌شود. پس از فرایند، انحنا در جهتی که تحت پیش‌کرنش الاستیک قرار دارد بیشتر از جهت دیگر خواهد بود. همچنین در مقایسه‌ی با پین فرمینگ متداول، استرس پین فرمینگ انحنای بزرگ‌تری ایجاد می‌کند [۲۱].

۱-۴ پیشینه‌ی تحقیق

۱-۴-۱ ساچمه‌زنی

ساچمه‌زنی فرایندی مرکب از خواص کشسانی و مومسانی به‌علاوه‌ی اثرات استاتیکی و دینامیکی است. بنابراین بررسی این فرایند نیازمند فهم کامل رفتار مکانیکی ساچمه و قطعه در نرخ‌های کرنش کم و زیاد است [۲۲]. العبید [۲۳]، توزیع تنش پسماند را در قطعه‌کار مورد مطالعه قرار داده و بیان‌هایی تئوری برای پارامترهای فرایند بر اساس مدل جدید انبساط حفره‌ی کروی، ارائه کرد. کوبایاشی و همکاران [۲۴]، مکانیزم تنش پسماند فشاری ساچمه‌زنی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها آزمایش‌های فشار استاتیکی و ضربه‌ی دینامیکی را با استفاده از یک ساچمه‌ی فولادی روی صفحه‌ی فولادی تخت انجام دادند. در آزمایش‌های استاتیکی، تنش پسماند فشاری در نزدیکی مرکز محل فرورفتگی ساچمه ایجاد شد. اما در آزمایش‌های دینامیکی، در نزدیکی مرکز محل فرورفتگی ساچمه، تنش کششی و خارج از محدوده‌ی فرورفتگی، تنش پسماند فشاری ایجاد شد.

¹⁶ Stress peen forming

شبیه‌سازی‌های عددی اجزای مطالعه‌ی پارامتری فرایند ساچمه‌زنی را به ما می‌دهد. این موضوع می‌تواند آگاهی خوبی راجع به فرایند و فهم بهتر مکانیزم آن فراهم آورد. یکی از اولین شبیه‌سازی‌های عددی توسط العبید [۲۵]، انجام گرفت. او از المان‌های پیوسته سه‌بعدی با ۹ لایه در راستای ضخامت برای قطعه‌کار استفاده کرد.

شبیه‌سازی‌های اولیه‌ی ساچمه‌زنی شامل برخورد یک یا دو ساچمه و برای مطالعه‌ی اثر پارامترهای ساچمه، جریان و قطعه‌کار بود. الحسنی [۲۶]، شبیه‌سازی عددی برخورد یک ساچمه روی قطعه را ارائه و برخورد یگانه‌ی یک ساچمه را با زاویه‌ی برخورد مایل امتحان کرد.

مگید و همکاران [۴]، به مدل‌سازی و شبیه‌سازی میدان تنش پسماند ایجاد شده از فرایند ساچمه‌زنی پرداختند. آنها طی یک تحلیل دینامیکی الاستیک-پلاستیک، فرورفتگی‌های کروی تکی و دوتایی را با استفاده از ساچمه‌های کروی صلب و قطعات فلزی و توسط مدل المان محدود سه‌بعدی، مورد آزمایش قرار دادند. آنها اثر سرعت، ابعاد و شکل ساچمه روی منحنی‌های تنش معادل، کرنش‌های پلاستیک معادل و تنش‌های پسماند باربرداری را بررسی کردند. همچنین اثر فاصله‌ی جدایش بین دو ساچمه در برخورد همزمان، روی میدان تنش پسماند بررسی گردید. نتایج کار آنها نشان داد که عمق لایه‌ی فشرده شده، تنش‌های پسماند سطحی و زیرسطحی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر سرعت ساچمه، شکل ساچمه و فاصله‌ی جدایش بین ساچمه‌ها در برخورد همزمان بوده و به میزان کمتری متأثر از نرخ کرنش سختی قطعه می‌باشد.

شیفینر و جن هلینگ [۲۷]، از یک مدل متقارن محوری برای شبیه‌سازی پروفیل تنش پسماند در صفحه‌ای کشسان-مومسان و با پارامترهای پینینگ مختلف، استفاده کردند. آنها همچنین اثر ساچمه‌های مجاور را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که برهم‌کنش بین ساچمه‌های مجاور باید در نظر گرفته شود.

هانگ و همکارانش [۲۸]، با استفاده از تحلیل دینامیکی اجزا محدود سه‌بعدی، ضربه‌ی یک ساچمه را روی قطعه‌ی فلزی بررسی کردند. آنها ابتدا مدل خود را با استفاده از مطالعات عددی منتشر شده‌ی

دیگر، صحت‌سنجی کردند. مطالعه‌ی پارامتری برای بررسی اثر قطر ساچمه، سرعت ضربه، زاویه‌ی برخورد و خواص ماده‌ی قطعه‌کار روی پروفیل تنش پسماند به‌دست آمده، توسط آنها انجام گرفت. نتایج کار آنها به شرح ذیل می‌باشد:

- قطر ساچمه، اثر ناچیزی روی بزرگی تنش پسماند سطحی و بیشینه‌ی تنش پسماند زیرسطحی دارد؛ اما عمق ناحیه‌ی تنش پسماند با افزایش قطر ساچمه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.
- با افزایش سرعت ضربه‌ی ساچمه، تنش پسماند سطحی و بیشینه‌ی تنش پسماند زیرسطحی، برای ماده‌ی الاستیک-کاملاً پلاستیک بدون تغییر باقی می‌ماند؛ اما برای مورد کرنش‌سختی پلاستیک به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.
- زمانی‌که زاویه برخورد ساچمه قائم یا نزدیک به قائم باشد، مفیدترین حالت تنش پسماند فشاری درون قطعه ایجاد خواهد شد.
- برای ماده‌ی الاستیک-کاملاً پلاستیک، بزرگی تنش پسماند، با افزایش تنش تسلیم اولیه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.
- عمق ناحیه‌ی تنش پسماند فشاری همیشه زمانی‌که پارامتر کرنش‌سختی افزایش می‌یابد، زیاد می‌شود.

سلول‌های تقارن^{۱۷} برای در نظر گرفتن اثر تعداد بیشتر ضربات روی حالت تنش پسماند، به‌همراه ایجاد هزینه‌ی محاسباتی کم ارائه شدند. مگید و همکاران [۳]، یک تحلیل اجزا محدود الاستیک-پلاستیک دینامیکی برای فرایند ساچمه‌زنی، با استفاده از مدل برخورد چندگانه‌ی نزدیک به واقعیت و با استفاده از ماده‌ی حساس به نرخ کرنش، انجام دادند. آنها با استفاده از سلول تقارن، اثر ضربه‌ی تعداد زیادی از

¹⁷ Symmetry cells

ساجمه‌های صلب و تغییرشکل‌پذیر روی قطعه‌ی فولادی استحکام بالا AISI ۴۳۴۰ را بررسی کردند. نتایج کار آنها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- اثرات نرخ کرنش، باعث افزایش بیشینه‌ی تنش پسماند فشاری و کاهش عمق ناحیه‌ی پلاستیک می‌شود.
- استفاده از ساجمه‌های تغییرشکل‌پذیر، منجر به کاهش تند تنش پسماند در قطعه و افزایش تغییر شکل‌های پلاستیک در ساجمه می‌شود. همچنین مقدار بیشینه‌ی تنش پسماند در قطعه و عمق ناحیه‌ی فشاری کاهش می‌یابد.
- برخوردهای چندگانه در مقایسه با برخوردهای تکی و دوتایی، باعث ایجاد توزیع‌های یکنواخت تنش پسماند و کرنش پلاستیک، در زیر لایه‌ی سطحی می‌شوند.
- افزایش سرعت از ۵۰ m/s تا ۱۰۰ m/s باعث افزایش بیشینه‌ی کرنش پلاستیک معادل و عمق لایه‌ی فشرده شده می‌شود. تأثیر سرعت ساجمه روی بزرگی بیشینه‌ی تنش پسماند فشاری فقط برای برخوردهای در سرعت پایین، قابل توجه است.

همچنین مدل‌های برخورد چندگانه با الگوهای از پیش تعریف شده‌ی فرورفتگی‌ها و شرایط مرزی محدود یا بدون تقارن، به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفت. مجذوبی و همکاران [۲۲]، با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA فرایند پین فرمینگ با برخوردهای چندگانه و در سرعت‌های مختلف را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی، پروفیل‌های تنش پسماند فشاری را به دست آورده و اثرات سرعت و پوشاندگی پینینگ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که، توزیع تنش پسماند، تا حد زیادی به سرعت برخورد وابسته بوده و افزایش سرعت تا نقطه‌ای خاص، باعث بهبود توزیع تنش پسماند می‌شود. افزایش بیشتر سرعت، ممکن است تنش پسماند بیشینه را کاهش دهد. همچنین، حالت یکنواختی از تنش در تعداد ساجمه‌ی خاص قابل دستیابی است.

کیم و همکارانش [۲۹]، یک مدل اجزا محدود سه‌بعدی، برای بررسی توزیع تنش پسماند به دست آمده از برخوردهای چندگانه‌ی ساجمه‌های زاویه‌دار ارائه کردند. آنها با استفاده از این مدل برای ساجمه‌زنی

زاویه‌دار، ارتباط بین تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی را با فاکتورهایی مانند ضریب دمپینگ رایلی در ماده، اصطکاک دینامیکی و وابستگی به نرخ ماده آزمایش کرده و این فاکتورها را به صورت نظام‌مند در یک مدل اجزا محدود، با هم یکپارچه‌سازی کردند. مدل اجزا محدود به ترتیب با ساچمه‌ی صلب، ساچمه‌ی الاستیک و ساچمه‌ی پلاستیک به کار گرفته شد. این مدل با داده‌های تجربی بدست آمده از تفرق اشعه‌ی ایکس، صحت‌سنجی شد. مدل اجزا محدود با ساچمه‌های پلاستیک، بیشترین تطابق را با نتایج حاصل از تفرق اشعه‌ی ایکس نشان دادند.

در نهایت، مدل‌های برخورد تصادفی برای در نظر گرفتن طبیعت تصادفی ساچمه‌زنی، معرفی شدند. وانگ و همکاران [۳۰]، تحلیل اجزا محدودی از ضربات تصادفی چندگانه‌ی ایجاد شده در فرایند پین فرمینگ ارائه کردند. آنها یک الگوریتم دینامیکی صریح جهت مدل‌سازی حدود ۱۰۰۰ ضربه و الگوریتمی استاتیکی جهت شبیه‌سازی برگشت فنری را برای دستیابی به شکل انحنادار نهایی ناشی از ساچمه‌زنی روی یک نمونه‌ی کوچک از آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳۵۱، با هم ترکیب کردند. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌ها نشان داد که، مدل‌سازی اجزا محدود ضربه، قادر به ارزیابی اثرات ماکروسکوپی ساچمه‌زنی (برای مثال انحنا) بعلاوه‌ی اثرات میکروسکوپی (به طور مثال پلاستیسیته‌ی موضعی و تنش‌های پسماند) خواهد بود.

دای و شو [۳۱]، از مدل برخورد با مکان‌های برخورد تصادفی برای مطالعه‌ی فرایندهای ساچمه‌زنی و تغییر شکل پلاستیک شدید استفاده کردند. آنها از مقایسه‌ی این دو فرایند نتیجه گرفتند که انرژی جنبشی، ضخامت لایه تغییر شکل داده، کرنش پلاستیک بیشینه و تنش پسماند فشاری بیشینه در فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید از فرایند ساچمه‌زنی بیشتر است.

میائو و همکاران [۵]، یک مدل سه‌بعدی تصادفی برای شبیه‌سازی شدت ساچمه‌زنی، پوشاندگی و زبری سطح با برخوردهای قائم و مایل ارائه کردند. برای هر یک از این کمیت‌ها، رابطه‌ای تجربی برای مربوط ساختن آنها به تعداد ساچمه‌ها به دست آمد. آنها مشاهده کردند برای تعداد برخورد مشابه، برخوردهای قائم در مقایسه با برخوردهای مایل، ارتفاع کمان و زبری سطح بیشتری ایجاد می‌کند.

زیمرمن و همکاران [۳۲]، ترتیب برخورد تصادفی و منظم را مقایسه کرده و توزیع تنش پسماند ایجادشده را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که پروفیل تنش پسماند متوسط محاسبه شده به ترتیب برخورد حساس بوده و مدل تصادفی در مقایسه با مدل منظم، نیازمند تعداد بیشتری برخورد برای رسیدن به پوشانندگی معین است که کرنش‌های پلاستیک تجمعی محاسبه شده را افزایش می‌دهد. همچنین درحالی‌که هر دو برخورد منظم و تصادفی منجر به پیش‌بینی‌های خوبی راجع به تنش‌های پسماند می‌شوند، مدل تصادفی، توپوگرافی سطحی واقعی تری حاصل می‌کند.

مایلوناس و لاییس [۳۳]، اثرات پارامترهای فرایند ساچمه‌زنی کنترل‌شده روی ماده‌ی مورد نظر، بررسی کردند. برای این منظور، آنها یک مدل سه‌بعدی اجزا محدود که شامل صفحه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم AA 7449-TV651 و ساچمه‌های فولادی کرووی صلب بود را برای شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی ارائه کردند. همچنین مطالعه‌ی پارامتری سرعت ساچمه و زاویه‌ی برخورد روی محصولات ساچمه‌زنی کنترل شده، برای چهار نوع ساچمه (S110, S230, S330, S550) انجام گرفت. مدل کشسان-مومسان ماده‌ی مورد استفاده برای صفحه‌ی آلومینیومی، براساس آزمایش‌های تجربی نرخ کرنش بالا و به‌وسیله‌ی مدل ماده‌ی کوپر-سیموندز^{۱۸} بیان شد. مدل عددی ارائه شده، بیشتر برای پیش‌بینی اثر سرعت ساچمه، زاویه‌ی تماس و اندازه‌ی ساچمه روی پروفیل تنش پسماند اعمالی، استفاده شد. همچنین این مدل عددی برای برای پیش‌بینی زبری سطح، فاکتور تمرکز تنش هندسی (K_t) و درصد کارسرد، مورد استفاده قرار گرفت.

۱-۴-۲ پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ

کارهای عددی و نظری متعددی برای مطالعه‌ی توزیع تنش پسماند و تغییر شکل قطعه پس از پین فرمینگ متداول انجام گرفته است. الحسنی [۱۸]، فرض کرد که پروفیل تنش پسماند، مجموعی از تنش اتساعی معادل و تنش خمشی معادل است که برای متعادل کردن تنش‌های اعمالی به‌کار می‌روند.

¹⁸ Cowper-Symonds

ون لوچن و همکاران [۱۶] و ون لوچن و کرامر [۳۴]، برای مرتبط ساختن تنش‌های اعمالی و ارتفاع کمان (خیز) نوارهای آلمن، روابط تجربی از آزمایش‌ها به دست آوردند.

ون لوچن [۱۶]، روشی برای پیش‌بینی الگوی پینینگ و برای مینیمم کردن شدت پینینگ مورد نیاز برای فرم دادن شکلی خاص با استفاده از یک بسته‌ی المان محدود همراه با یک نرم‌افزار بهینه‌سازی ایجاد کرد. این روش پروفیل تنش اعمالی را به‌عنوان مجموعی از تنش خمشی و تنش اتساعی ساده‌سازی کرده و تنش اعمالی کلی مورد نیاز در بالا و پایین قطعه را براساس فرم شکل‌دهی قطعه محاسبه می‌کند. آزمایش‌های ساچمه‌زنی متعدد با شدت‌های پینینگ متفاوت برای مربوط ساختن تنش‌های اعمالی به شدت پینینگ و ارتفاع کمان ایجاد شده، انجام گرفت. یک شکل استوانه‌ای از ورقی مستطیلی ایجاد و برای آزمایش نرم‌افزار ایجاد شده، استفاده شد. در مقایسه با مقادیر هدف، درصد خطای ۳۰٪ الی ۵۲٪ در ۹ نقطه‌ی اندازه‌گیری به دست آمد.

روش‌های شبیه‌سازی عددی پین فرمینگ را می‌توان به سه دسته‌ی زیر تقسیم کرد [۱۷]:

- (۱) استفاده از بارگذاری دمایی معادل
- (۲) استفاده از بارگذاری فشاری معادل
- (۳) استفاده از تنش‌های اعمالی

۱-۲-۴-۱ بارگذاری دمایی معادل

امکان استفاده از بارگذاری دمایی معادل برای مدل کردن پین فرمینگ، به‌وسیله‌ی هومر و ون لوچن [۳۵] بیان شد اما اطلاعات، خیلی کم بود. گرادیان‌های دمایی ساده، برای شبیه‌سازی اثرات خمش و اتساع معادل در پین فرمینگ، استفاده شد. بارهای دمایی با استفاده از روابط تجربی تعیین شدند.

لورس و پریور [۳۶]، از دما و ضریب انبساط گرمایی برای ایجاد پروفیل تنش نامتعادل در المان‌های پوسته استفاده کردند. با اعمال دماهای متفاوت به نقاط انتگرال‌گیری مقطع^{۱۹} المان‌های پوسته، توزیعی

¹⁹ Section points

از کرنش‌های دمایی متناظر با پروفیل تنش اعمالی اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها، به دست می‌آید. کرنش‌های دمایی، توزیع متفاوتی از تنش در سراسر ضخامت پوسته ایجاد کرده و باعث تغییر شکل سازه می‌شود. آنها به منظور ایجاد توزیع تنش غیر یکنواخت که از فرایند پین فرمینگ به دست می‌آید، از زیرروال^{۲۰} بارگذاری گرمایی UTEMP نرم‌افزار آباکوس، برای اعمال پروفیل‌های دمایی به مدل پوسته-ی چندلایه استفاده کردند. آزمایش تجربی آنها روی یک نوار آلومینیومی مورد استفاده در صنایع هوایی، انجام گرفت. ابعاد نوار ۵۰ mm × ۱۵۰ mm و ضخامت آن ۴ mm بود که با استفاده از ساچمه‌ای با قطر ۰/۵ mm و پوشاندگی ۱۰۰٪، تحت فرایند پینینگ قرار گرفت. تغییر شکل ایجاد شده، شعاع انحنايي در حدود ۱/۴ m را ایجاد کرد. همچنین آنها در آزمایش‌های دیگر، فرایند پینینگ را روی پنل بال به صورت یک‌طرفه و دوطرفه انجام دادند.

زنگ [۳۷] و هوانگ [۳۸]، شیوه‌ی مشابهی را با تکیه بر روابط تجربی به جای پروفیل‌های تنش اعمالی پیش‌بینی یا اندازه‌گیری شده، مورد بحث قرار دادند. مدل‌های المان محدود برای پنل استحکام‌یافته‌ی یکپارچه و شکل‌دهی یک فرم زینی، به صورت مختصر توسط آنها ارائه شد.

گاردینر و پلاتس [۳۹]، روشی مشابه را برای مطالعه‌ی استرس پین فرمینگ به کار بردند. بارگذاری دمایی معادل، برای بررسی اثر خمش اولیه روی تنش محاسبه شده بعد از پینینگ، استفاده شد. وانگ و همکاران [۴۰]، از بارگذاری دمایی برای ایجاد کرنش‌های پلاستیک موضعی در المان‌های پوسته-ی چندلایه استفاده کرد. سیکل بارگذاری معادل آنها، شامل ۴ مرحله بود:

۱. مقید کردن همه‌ی درجات آزادی المان پوسته
۲. اعمال یک توزیع دمایی برای اتساع همیشگی سطح پینینگ شده
۳. یکسان‌سازی دما
۴. آزاد کردن شرایط مرزی

²⁰ Subroutine

این کار باعث ایجاد تغییر شکلی معادل با تغییر شکل ایجاد شده به وسیله‌ی پین فرمینگ می‌شود. واحد بارگذاری، مشابه با ایجاد پوشاندگی پلاستیک تقریباً ۸۰ درصد، تعریف شد. عمق کرنش‌های پلاستیک، به صورت تحلیلی از معادله‌ای که پارامترهای ساچمه و قطعه را با ابعاد فرورفتگی مرتبط می‌کند، تعیین شد.

یامادا و همکاران [۴۱]، از بارگذاری دمایی برای ایجاد کرنش‌های پلاستیک موضعی، معادل با کرنش‌های ایجاد شده با ساچمه‌زنی استفاده کردند. روش آنها روی توزیع ضرایب انبساط گرمایی و یک سیکل دمایی، تکیه داشت. در زمانی که دما از T_0 به T_1 افزایش می‌یابد، از عدم تطابق انبساط بین نواحی با ضریب انبساط گرمایی کم و زیاد، کرنش‌های پلاستیک ایجاد می‌شود. به محض بازگرداندن دما به مقدار اولیه‌ی T_0 ، اتساع پلاستیک سطح منجر به افزایش طول و خمش قطعه مشابه با ساچمه‌زنی می‌شود. از تعریف ضرایب انبساط گرمایی و سیکل دمایی، اطلاعات کمی در دسترس بود.

۱-۴-۲-۲ بارگذاری فشاری معادل

گراستی و اندرو [۴۲]، شبیه‌سازی‌های ضربه را انجام داد و ایجاد کرنش‌های پلاستیک را به صورت یک سری لایه مشاهده کرد. بر اساس این نتیجه، با اعمال فشار به المان‌های نزدیک سطح، یک لایه‌ی فشرده شده^{۲۱} ایجاد می‌شود. مرحله‌ی اول، شامل در معرض فشار قرار دادن لایه‌هایی از المان‌های پیوسته‌ی نزدیک سطح است تا اینکه آنها موازی با سطح، به صورت دائمی کشیده شوند. در طول این مرحله، جابجایی‌های نرمال گره‌های کف، بسته می‌شود. در مرحله‌ی دوم، فشار و شرایط مرزی برداشته شده و فرم تغییر شکل داده، محاسبه می‌شود. فشار با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره می‌شود.

²¹ Squeezed layer

۱-۴-۲-۳ تنش‌های اعمالی

هان و همکارانش [۴۳]، یک راه‌حل ترکیبی دومرحله‌ای المان محدود/المان گسسته^{۲۲} و صریح/ضمنی^{۲۳}، برای شبیه‌سازی فرایند پین فرمینگ ارائه کردند. در مرحله‌ی اول، از طریق ساچمه‌زنی ناحیه‌ی کوچکی از قطعه‌کار به‌وسیله‌ی تحلیل دینامیکی صریح، پروفیل‌های پسماند شامل تنش، کرنش و کرنش پلاستیک مؤثر به‌دست می‌آیند. در ادامه با وارد کردن پروفیل‌های پسماند به‌عنوان شرایط اولیه در تحلیل استاتیکی ضمنی مرحله‌ی دوم، تغییر شکل نهایی و توزیع تنش در کل قطعه‌کار به‌دست خواهد آمد. قابلیت کاربرد روش ارائه شده، از طریق پین فرمینگ یک نوار آزمایش، مشخص شد و نتایج عددی، سازگاری خوبی با نتایج تجربی داشتند. مزیت این روش آن است که ابعاد قابل قبول مدل FE/DE، اجازه می‌دهد که مسائل مربوط به پین فرمینگ واقعی با هزینه‌ها و زمان محاسبات قابل قبول، شبیه‌سازی شود.

گاریپی و همکارانش [۴۴]، ابزارهای کمی عددی تجربی را برای کاربردهای پین فرمینگ، به‌وسیله‌ی مطالعه‌ی یک مورد ساده پینینگ نوارهای آلومینیومی AA ۲۰۲۴ به ابعاد آلمن و در قید آلمن، بررسی کردند. آنها مدل دینامیکی تصادفی موجود را با بهینه کردن ابعاد، بهبود دادند. مدل ضربه‌ی دینامیکی و قانون ساختاری ماده‌ی به‌کار رفته توسط آنها، پیش‌بینی خوبی از تنش‌های اعمالی فرایند پین فرمینگ برای نوار ضخیم آلومینیومی و در دو سرعت ساچمه‌ی $34/6 \text{ m/s}$ و $66/2 \text{ m/s}$ ، ایجاد کرد. همچنین آنها جنبه‌ی حساسیت به توالی فرایند شکل‌دهی را بررسی کرده و مدل اجزا محدودی بر پایه‌ی پوسته، ارائه کردند.

گاریپی و همکارانش [۱۷]، بررسی‌های بیشتری روی استفاده از روش‌های عددی در مدل کردن فرایند پین فرمینگ انجام دادند. آنها برای پیش‌بینی ایجاد انحنای پینل‌های پوسته‌ی بال شامل دیواره‌های

²² Finite Element/Discrete Element

²³ Explicit/Implicit

تقویت کننده، تکنیک‌های شبیه‌سازی دینامیکی و استاتیکی را با هم ترکیب کردند. نتایج شبیه‌سازی-های اجزا محدود، ارتباط خوبی با رفتارهای تجربی مربوط به پینینگ نوارهای موازی و پینینگ پنل‌ها داشت. اگرچه این روش در فرم کنونی آن در پیش‌بینی تأثیر افزایش طول لب‌های موفق نبوده است. گاریپی و همکارانش [۴۵]، با استفاده از آزمایش‌های با مقیاس کوچک، اثر مسیر پینینگ و شرایط مرزی را به صورت عددی و تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها مدلی ساده برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های نمویی، زمانی که جریان ساچمه روی نمونه‌ها حرکت می‌کند، ارائه کردند. پارامترهای مدل به صورت آزمایشگاهی تنظیم و سپس برای صحت‌سنجی روی هندسه‌ی متفاوت، اعمال شد. تحلیل‌های اجزا محدود، به درستی پیچیدگی توزیع شعاع ناشی از مسیر پینینگ و قیدهای اعمالی به نمونه را در طی پینینگ پیش‌بینی کرد. آنها به این نتیجه رسیدند که بعد از تنظیم عددی عملیات، شبیه‌سازی‌های پین فرمینگ نمویی می‌تواند به طور مناسب وابستگی به الگوهای پینینگ و شرایط مرزی را پیش‌بینی کرده و به شرح پدیده‌های منجر به شکل نهایی، کمک کند. همچنین غیر خطی بودن هندسی می‌تواند تأثیر مهمی روی فرم تغییر شکل یافته داشته و بایستی در شبیه‌سازی مورد توجه قرار بگیرد.

بیشتر مطالعات روی استرس پین فرمینگ بر پایه‌ی آزمایش‌ها و روابط تجربی بوده و کارهای کمی در زمینه‌ی شبیه‌سازی المان محدود آن انجام گرفته است. باومن [۱۵]، خلاصه‌ای راجع به فرایند پین فرمینگ، تکنیک‌های کاربرد آن، متغیرهای فرایند، محدودیت‌های آن ارائه کرد. او توضیحاتی در مورد انواع دستگاه‌های مورد استفاده برای پین فرمینگ و نکاتی در مورد طراحی آن‌ها و همچنین نکاتی در مورد شکل‌دهی کانتورهای ساده و پیچیده در پوسته‌ی بال هواپیماها به کمک فرایند پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ بیان کرد.

کوپ و بال [۴۶]، اصولی راجع به فرایند استرس پین فرمینگ با ممان پیش‌خمش یا با نیروی پیش-کشش بیان کردند. آنها نشان دادند در فشار پینینگ مشابه، ناحیه‌ی پلاستیک در منطقه‌ی برخورد ساچمه در حالت پین فرمینگ بعلاوه‌ی پیش‌کشش از حالت پین فرمینگ بعلاوه‌ی پیش‌خمش و پین

فرمینگ بدون پیش تنش، عمیق تر است. همچنین پین فرمینگ قطعه‌ی دارای پیش تنش، می‌تواند باعث کوتاه شدن زمان تولید شود. آنها از یک مدل اجزا محدود دوبعدی برای شبیه‌سازی برخورد یک ساچمه استفاده کردند. تحقیقات آنها نشان داد که اگر نرخ کرنش برای قطعه به حساب آورده شود، انحنای مقعر با ایجاد فرورفتگی‌های عمیق، برای حالت متقارن محوری می‌تواند محاسبه شود.

لی [۴۷]، خصوصیات استرس پین فرمینگ را با استفاده از روابط تئوری و از طریق انجام آزمایش‌هایی، مورد بحث و بررسی قرار داد. او دو نمونه ورق آلومینیمی یکسان به ضخامت ۲ mm، یکی به ابعاد $76 \times 76 \text{ mm}^2$ و دیگری به ابعاد $76 \times 19 \text{ mm}^2$ را تحت استرس پین فرمینگ قرار داد. همچنین طی یک مثال عملی، فرایند استرس پین فرمینگ یک پنل بال یکپارچه را ارائه کرد. نتایج آزمایش‌های او نشان داد که:

- اگر در حین پین فرمینگ پنل بال، در یک جهت پیش‌خمشی الاستیک ایجاد کنیم؛ کانتور انحنا در آن جهت افزایش پیدا خواهد کرد و در همان زمان کانتور انحنا در جهت دیگر کاهش پیدا خواهد کرد.

شعاع انحنا در جهت پیش‌خمشی، به صورت معکوس با فشار پینینگ، اندازه‌ی ساچمه و مقدار پیش‌خمشی تحت شرایط پین فرمینگ اشباع شده، متناسب بوده اما مستقل از فاصله‌ی نازل دستگاه تا قطعه می‌باشد. گاردینر و پلاتس [۳۹]، پروفیل تنش اعمالی منحصر به استرس پین فرمینگ را به وسیله‌ی اعمال توزیع‌های دمایی در المان‌های پوسته، شبیه‌سازی کردند. در این مورد، پروفیل‌های دمایی متفاوت برای ایجاد اثرات مختلف در جهت‌های x و y ، در عمق قطعه اعمال شدند تا اینکه انحنای مختلف در هر جهت بتواند تولید شود. نتایج نشان دادند که استرس پین فرمینگ در مقایسه با پین فرمینگ، انحنای بزرگ‌تری در جهت دارای پیش‌تنش ایجاد می‌کند.

میائو و همکارانش [۴۸]، ارتباط کمی بین اشباع‌شدگی، پوشانندگی سطح و زبری سطح را با توجه به زمان پینینگ، بر روی نوارهای آزمایشی آلومینیوم ۲۰۲۴ Al، بررسی کردند. آنها تأثیر سرعت و زمان پینینگ روی پروفیل‌های تنش پسماند و زبری سطح را به صورت تجربی اندازه‌گیری و ارائه کردند.

همچنین ارتباط کمی بین ممان پیش خمش و ارتفاع کمان نوارهای باریک و نوارهای مربعی آلومینیومی، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج قابل توجه بدست آمده توسط آنها را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- در زمان پینینگ یکسان، با افزایش سرعت پینینگ، زبری متوسط سطح و فاکتور تمرکز تنش سطح افزایش می یابد.
- در زمان پینینگ یکسان، با افزایش سرعت پینینگ و همچنین در سرعت پینینگ یکسان، با افزایش زمان پینینگ، تنش پسماند فشاری بیشینه، عمق تنش پسماند فشاری بیشینه و عمق تنش پسماند فشاری، افزایش می یابد.
- زمان و سرعت پینینگ، روی تنش پسماند سطح تأثیر کمی دارند.
- با افزایش سرعت ساچمه زنی، زمان پینینگ یا تعداد پاس ها برای رسیدن به حالت اشباع و پوشانندگی کاهش یافته، درحالی که ارتفاع کمان و زبری سطح در حالت اشباع و پوشانندگی، افزایش می یابد.
- در مقایسه با پین فرمینگ رایج، تحت شرایط پینینگ یکسان برای نوارهای باریک و مربعی، استرس پین فرمینگ ارتفاع کمان بزرگ تری تولید می کند.
- با افزایش ممان پیش خمش، ارتفاع کمان به دست آمده در جهت پیش خمش، افزایش یافته و تقریباً تمایل به حالت خطی دارد.
- تحت شرایط یکسان شکل دهی، استرس پین فرمینگ نیازمند انرژی پینینگ کمتری بوده و فاکتور تمرکز تنش سطحی کمتری ایجاد می کند که می تواند عمر خستگی قطعه ای تغییر شکل داده را بهبود بخشد.

میائو و همکارانش [۲۱]، یک مدل عددی سه مرحله ای برای شبیه سازی فرایندهای پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ ارائه کردند. در مرحله اول، ممان پیش خمش به صفحه ای از جنس آلومینیوم اعمال شد. در مرحله دوم، ضربات ساچمه ها روی صفحه شبیه سازی شده و تنش های ایجاد شده

(تنش‌های اعمالی و پسماند) به دست آمدند. در نهایت، تحلیل مرحله‌ی سوم جهت به دست آوردن ارتفاع کمان‌ها و شعاع‌های انحنا، انجام شد. آنها از این مدل برای ایجاد ارتباط بین ممان پیش‌خمش و ارتفاع کمان‌ها و پروفیل‌های تنش پسماند به دست آمده، استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که:

- فرایند پین فرمینگ، نه تنها در سطح بالایی بلکه در سطح پایینی قطعه نیز تولید تنش پسماند فشاری می‌کند.
- در مقایسه با پین فرمینگ رایج، فرایند استرس پین فرمینگ تنش پسماند سطحی بزرگتری (هم در سطح بالایی و هم در سطح پایینی قطعه) و تنش پسماند فشاری بیشینه، تولید می‌کند.
- در مقایسه با پین فرمینگ، فرایند استرس پین فرمینگ، تنش پسماند کششی بیشینه‌ی بزرگتری درون قطعه ایجاد می‌کند.

۱-۵ اهداف پژوهش و مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

با توجه به رشد و اهمیت صنایع هوافضا در دنیا، نیاز به تحقیق و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های ساخت و تولید مورد استفاده در این صنایع امری ضروری است. فرایند ساچمه‌زنی به‌عنوان یک عملیات سطحی مؤثر در افزایش عمر خستگی و جلوگیری از خوردگی تنشی، سالهاست که در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی، هوافضا و قطعه‌سازی در داخل و خارج از کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما علیرغم پژوهش‌های نظری و عملی راجع به فرایندهای پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ و استفاده از این فرایندها در تولید محصول در خارج از کشور، تاکنون تحقیق خاصی در داخل کشور در این زمینه انجام نگرفته است. بنابراین با توجه به نیاز کشور، لزوم بررسی و پژوهش در این حوزه احساس می‌شود. تحقیق حاضر سعی کرده گامی کوچک در این زمینه بردارد.

اکثر پژوهش‌های حاضر، تنها یک فرایند را به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار داده‌اند. بنابراین در این پایان‌نامه شبیه‌سازی عددی همزمان فرایند ساچمه‌زنی، پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ مورد

بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین با طراحی قید آلمن با چهار شعاع پیش‌خمش متفاوت، فرایند پین فرمینگ با و بدون پیش‌بار روی آلیاژهای آلومینیوم سری ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ مورد آزمایش قرار خواهد گرفت.

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 پژوهش شده است. فصل دوم، به آزمایش‌های تجربی اختصاص دارد. در فصل سوم، به شبیه‌سازی‌های المان محدود پرداخته شده است. در فصل چهارم، نتایج پژوهش و در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه شده است.

فصل دوم

آزمایش‌های تجربی

فصل ۲ آزمایش‌های تجربی

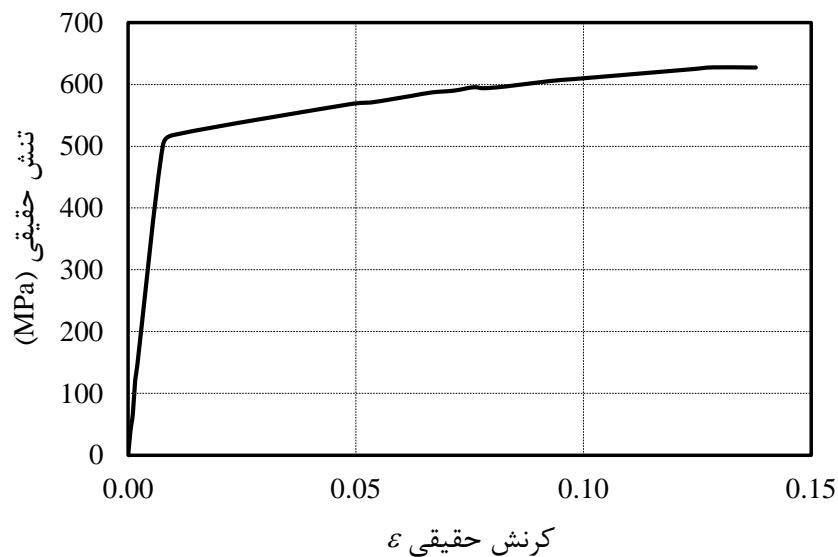
۱-۲ مواد و روش‌ها

۱-۱-۲ ورق فلزی

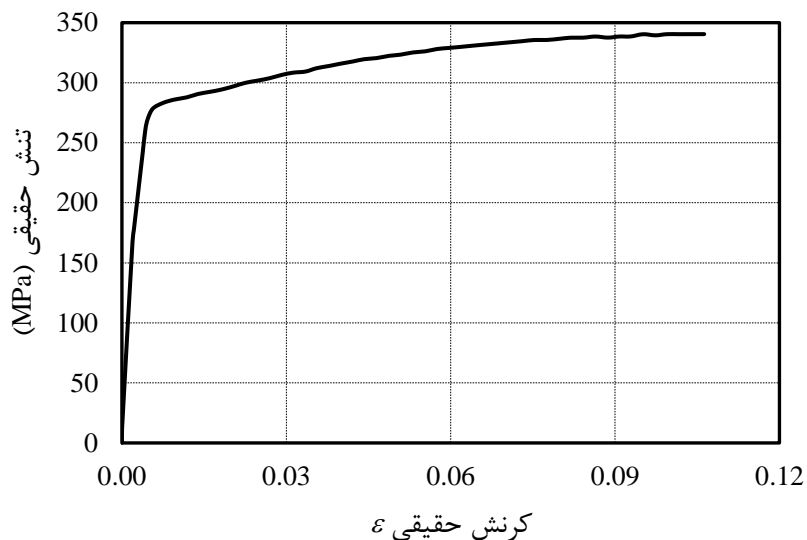
ورق استفاده شده در آزمایش از جنس آلیاژهای آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ و Al ۶۰۶۱-T۶ می‌باشد. خصوصیات این ورق‌ها در جدول ۱-۲ آورده شده است. منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژهای آلومینیم Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ به ترتیب در شکل ۱-۲ و شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- خصوصیات ورق‌های آلومینیمی [۴۹، ۵۰]

جنس ورق	ضخامت h (mm)	چگالی ρ (Kg/m ³)	مدول یانگ E (GPa)	ضریب پواسون ν	تنش تسلیم σ_y (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)
Al ۷۰۷۵-T۶	۲	۲۷۰۰	۷۰/۵	۰/۳۳	۵۰۲	۵۵۲
Al ۶۰۶۱-T۶	۱/۵	۲۷۰۰	۶۹/۶	۰/۳۳	۲۷۸	۳۱۰



شکل ۱-۲- منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ [۵۰]



شکل ۲-۲- منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-T۶ [۴۹]

۲-۱-۲ ساچمه‌ی فولادی

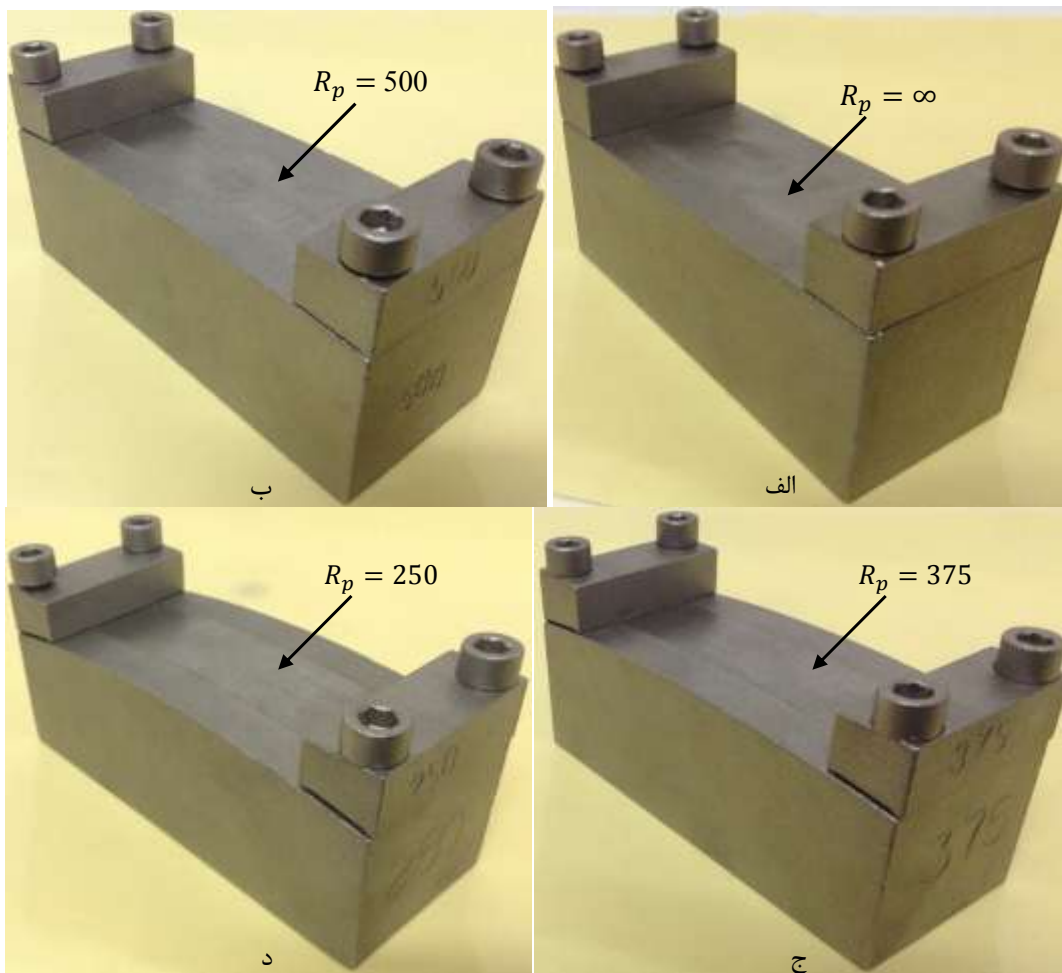
در این آزمایش از ساچمه‌های فولادی کرووی با روش تولید ریختگی و دو قطر ۰/۴ mm و ۰/۶ mm استفاده شده است. سختی متوسط این ساچمه‌ها حدود ۴۴۳ HV اندازه‌گیری شد. شکل ۲-۳، ساچمه‌های فولادی استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- ساچمه‌های فولادی به کار رفته در آزمایش، الف) قطر $d = 0.6$ mm ب) قطر $d = 0.4$ mm

۲-۱-۳ قیدهای بین فرمینگ

برای ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها حین فرایند نیاز به طراحی قیدهایی برای این کار است. همچنین وظیفه‌ی دیگر این قیدها، ایجاد پیش‌خمش الاستیک در قطعه می‌باشد. برای این منظور، قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش متفاوت ∞ ، 500 mm، 375 mm و 250 mm مطابق شکل ۲-۴، برای مطالعه‌ی فرایندهای بین فرمینگ و استرس بین فرمینگ طراحی و ساخته شد. بنابراین می‌توان با انجام آزمایش‌ها نتایج به‌دست آمده در دو حالت با و بدون پیش‌خمش را مقایسه کرد. به‌علاوه، اثر شعاع‌های پیش‌خمش مختلف در انحنای نهایی نمونه‌ها قابل بررسی است.



شکل ۲-۴- قیدهای پیش‌خمش طراحی شده برای مطالعه‌ی بین فرمینگ و استرس بین فرمینگ، الف) $R_p = \infty$ ب) $R_p = 500$ mm ج) $R_p = 375$ mm د) $R_p = 250$ mm

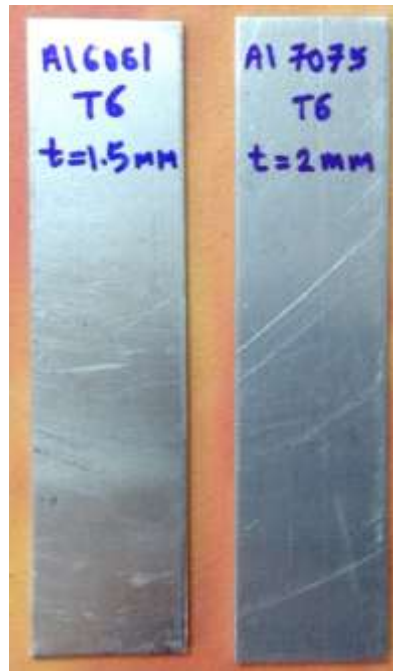
۲-۱-۴ دستگاه ساچمه‌زنی

در ماشین‌های ساچمه‌زنی، معمولاً از نیروی باد یا نیروی گریز از مرکز جهت پرتاب ساچمه استفاده می‌شود. در نوع اول، ساچمه‌ها به کمک نیروی باد از درون نازل یا نازل‌هایی به سمت قطعه پرتاب می‌شوند. در نوع دوم، ساچمه‌ها به کمک یک چرخ دوار و با استفاده از نیروی گریز از مرکز به سمت قطعه پرتاب می‌شود. نوع اول معمولاً برای تعداد قطعات کم و تolerانس‌های دقیق‌تر به‌خصوص در صنایع هوایی استفاده می‌شوند. نوع دوم برای تعداد قطعات خیلی زیاد خصوصاً صنایع اتومبیل رایج هستند [۹].

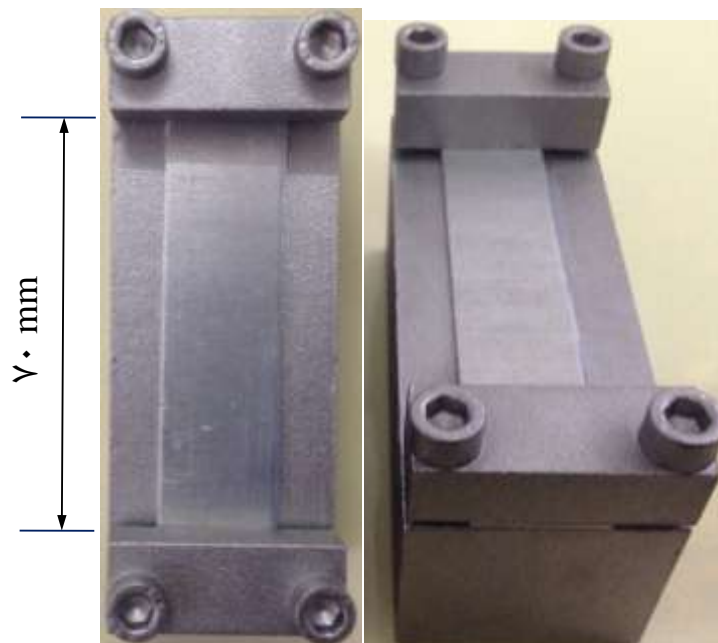
جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه‌های ساچمه‌زنی موجود در شرکت فنر لول ایران استفاده گردید. این دستگاه‌ها از نوع اول هستند. نوارهای آلومینیم پس از بسته شدن روی قیدهای پیش‌خمش، درون محفظه‌ی دستگاه قرار می‌گیرند.

۲-۲ آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش

این آزمایش نسبت به حالت واقعی در مقیاس کوچک انجام می‌گیرد. بنابراین نمونه‌های آزمایش مطابق شکل ۲-۵، به‌صورت نوارهایی با طول ۱۰۰ mm و عرض ۲۰ mm و در جهت نورد آماده شدند. به علت استفاده از ساچمه‌هایی با دو قطر متفاوت و همچنین ۴ قید موجود، از هر نوع ورق آلومینیمی تعداد ۸ نمونه آماده شد. پس از بستن نمونه‌ها روی قیدها مطابق شکل ۲-۶، نمونه‌ها درون دستگاه قرار گرفتند. همچنین با توجه به گیره‌بندی دو انتهای نوارها، تنها ۷۰ mm از طول نوار تحت ساچمه‌زنی قرار می‌گیرد. نمونه‌های از جنس آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ به مدت ۵ دقیقه و نمونه‌های از جنس آلیاژ آلومینیم Al ۶۰۶۱-T۶ به مدت ۴ دقیقه، تحت ساچمه‌زنی با ساچمه‌های با قطر ۰/۴ mm و ۰/۶ mm قرار گرفتند.



شکل ۲-۵- نوارهای آلومینیومی آماده شده جهت آزمایش

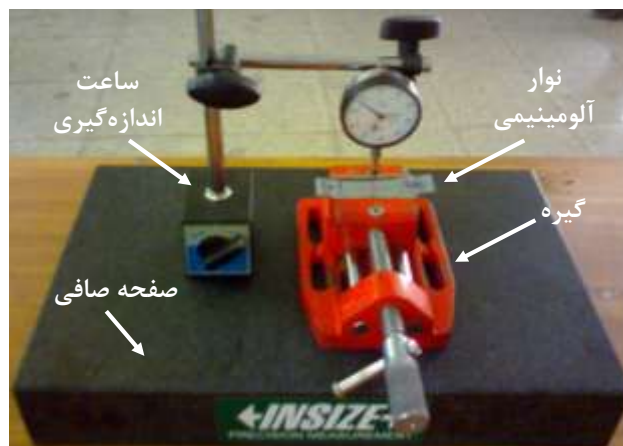


شکل ۲-۶- بستن نوارهای آلومینیومی روی قیدهای پین فرمینگ

۲-۳ اندازه‌گیری ارتفاع کمان

برای اندازه‌گیری ارتفاع کمان نوار آلومینیومی، از ساعت اندازه‌گیری استفاده شده است. به این ترتیب که مطابق شکل ۲-۷، نوار آلومینیومی از سمت مقعر به گیره بسته شده و گیره روی صفحه صافی قرار

می‌گیرد. از قبل محدوده‌ی اندازه‌گیری با خطوط میانی عرضی و طولی روی نوار آلومینیمی مشخص می‌گردد. ساعت اندازه‌گیری را در مرکز نوار صفر کرده و با توجه به طول ساچمه‌زنی شده‌ی نوار، بیشترین ارتفاع لبه‌ی نوار از مرکز خوانده می‌شود.



شکل ۲-۷- اندازه‌گیری ارتفاع کمان نوار آلومینیمی

۴-۲ آزمون سختی‌سنجی

۲-۴-۱ آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور انجام بعضی از آزمون‌ها از جمله سختی‌سنجی، نمونه‌ها باید دارای سطوحی صیقلی بوده و ثابت نگه‌داشته شوند. یکی از راه‌های ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها مانت^{۲۴} کردن آنها است. این کار از طریق ثابت کردن نمونه در ماده‌ای پلیمری انجام می‌شود. برای این کار از شیوه‌ی مانت سرد استفاده شد. مانت سرد در مواردی که ماده‌ی مانت شونده دمای ذوب پایین داشته یا برای مانت پرسی گرم، شکننده باشد استفاده می‌شود. پلیمر مانت سرد از مخلوط یک نوع رزین^{۲۵} و یک نوع هاردنر^{۲۶} تشکیل می‌شود. این دو جزء با نسبت وزنی رزین به هاردنر ۱ به ۰/۴۵، توزیع شده و در ظرف‌های جداگانه و روی گرمکن به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۵۰°C حرارت داده می‌شوند. حرارت دادن باعث می‌شود که در هنگام مخلوط کردن، این دو ماده با هم واکنش داده و سفت شده و باعث محکم نگه‌داشتن نمونه‌ها شود.

²⁴ Mounting

²⁵ Resin

²⁶ Hardener

سپس مخلوط را در قالب‌هایی که از قبل با گریس چرب شده و نمونه‌ها درون آنها قرار داده شده، می‌ریزیم. بسته به حرارت مخلوط و مدت هم‌زدن، بین ۱ تا ۱۰ ساعت طول می‌کشد تا رزین کاملاً سفت شود. سپس نمونه‌ها از قالب مانت خارج شده و آماده‌ی استفاده در آزمون‌های بعدی می‌شود. پس از مانت کردن، نمونه‌ها با کمک دستگاه پولیش مطابق شکل ۸-۲ سمباده‌زنی و پولیش می‌شوند. جهت سمباده‌زنی از کاغذهای سمباده به ترتیب با شماره‌های ۱۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ یعنی از دانه‌درشت به دانه‌ریز استفاده می‌شود. پس از سمباده‌زنی نمونه‌ها پولیش می‌شوند. در مرحله‌ی اول، پولیش با خمیر ۳-۴ میکرون و در مرحله‌ی بعدی با خمیر ۵/۰-۱ میکرون انجام می‌شود تا سطح نمونه‌ها کاملاً صیقلی و آینه‌ای شود. پس از این مراحل، نمونه‌ها آماده‌ی آزمون‌های بعدی می‌شوند. شکل ۲-۹، ساچمه‌های فولادی و نمونه‌های بریده شده از نوار آلومینیمی مورد آزمایش را پس از مانت و پولیش نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸- دستگاه پولیش



ب

الف

شکل ۲-۹- نمونه‌ها پس از مانت و پولیش الف) ساچمه‌های فولادی ریختگی ب) ورق آلومینیومی

۲-۴-۲ اندازه‌گیری سختی

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها، از دستگاه میکرو سختی‌سنج ویکرز متعلق به شرکت کوپا پژوهش استفاده شد (شکل ۲-۱۰). این دستگاه شامل سه اسکوپ نوری و یک فرورونده‌ی ویکرز می‌باشد که به یک رایانه متصل بوده و خروجی را نمایش می‌دهد. فرورونده ویکرز، به شکل یک هرم با قاعده‌ی مربعی و با زاویه‌ی رأس ۱۳۶ درجه است. این فرورونده بسته به نیاز از ۰/۰۱ Kgf تا ۱ Kgf به جسم نیرو وارد کرده و در آن نفوذ می‌کند. فرورونده به مدت ۱۰ ثانیه نیرو به جسم وارد کرده و سپس به حالت اولیه بازمی‌گردد. با وارد شدن بار، اثری به شکل لوزی روی جسم باقی می‌ماند که با مشخص کردن قطرهای این لوزی، نرم‌افزار به صورت خودکار سختی را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۲-۱۰- دستگاه سختی‌سنج میکرو ویکرز

فصل سوم
شبیه‌سازی المان محدود

فصل ۳ شبیه‌سازی المان محدود

با وجود توسعه‌ی راه‌حل‌های شبیه‌سازی پین فرمینگ از اواخر سال ۱۹۹۰، پارامترهای شکل‌دهی هنوز بر اساس داده‌ها و روابط به‌دست آمده از آزمایش‌ها، روش‌های هندسی و سعی و خطا تنظیم می‌شوند [۱۶، ۳۴]. اغلب برای رسیدن به شکل مورد نظر، آزمایش‌های تجربی هزینه‌بر، ضروری است. به‌علاوه، معمولاً برای هر قطعه، قیدهای اندازه‌گیری اختصاصی برای رسیدن به تolerانس مورد نظر، نیاز خواهد بود. بنابراین کاهش آزمایش‌های فیزیکی و تکراری با تحلیل‌های المان محدود دقیق برای تعیین پارامترهای مناسب پینینگ، زمان فرایند و هزینه‌های تولید را کاهش خواهد داد [۱۷].

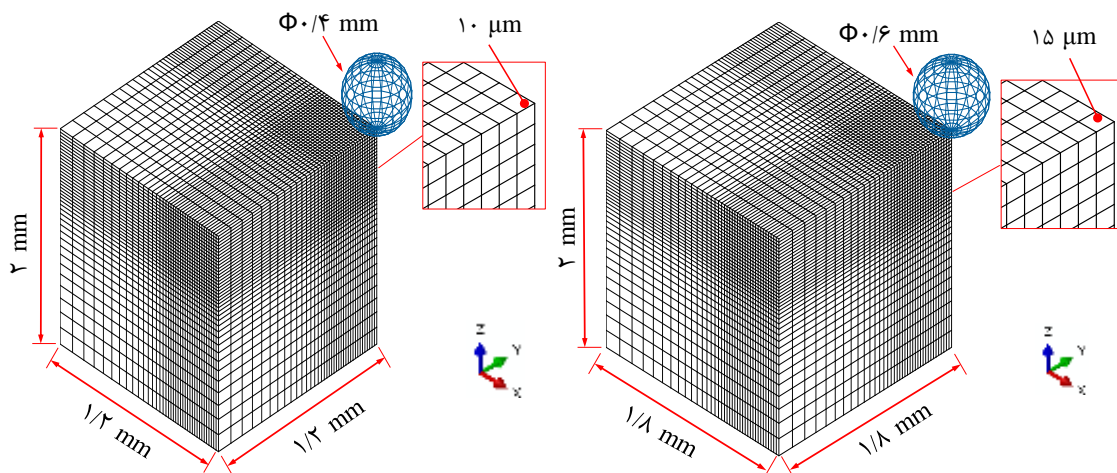
همان‌طور که در فصل اول نیز بیان شد، روش‌های شبیه‌سازی عددی فرایند پین فرمینگ را می‌توان به سه دسته‌ی بارگذاری دمایی معادل، بارگذاری فشاری معادل و تنش‌های اعمالی تقسیم کرد [۱۷]. روش بارگذاری فشاری معادل (روش لایه‌ی فشرده‌شده)، فرایند پین فرمینگ را با فرض فشرده‌سازی لایه‌ی سطحی مدل و استفاده از المان‌های پیوسته مدل کرده که به علت زیاد شدن تعداد المان‌ها، نیازمند زمان محاسباتی زیادی خواهد بود [۴۰، ۴۴]. روش بارگذاری دمایی معادل نیز روش حساسی بوده و کالیبره کردن این روش با پین فرمینگ واقعی مشکل است [۴۰]. بنابراین در این پژوهش از روش تنش‌های اعمالی استفاده شده است.

۳-۱ مدل برخورد یگانه^{۲۷}

برای مدل کردن برخورد تعداد زیادی ساچمه، بهتر است ابتدا برخورد یک ساچمه را مورد بررسی قرار دهیم. با این کار، پارامترهای مناسب مورد نیاز شبیه‌سازی از جمله: ابعاد مدل، اندازه‌ی المان‌ها، شرایط مرزی و ... برای ما مشخص خواهد شد. به‌منظور امکان مقایسه‌ی نتایج، در شبیه‌سازی عددی از پارامترهای مشابه با آزمایش‌های تجربی استفاده می‌کنیم. بنابراین جهت شبیه‌سازی از ساچمه‌های کرومی فولادی با قطرهای $d = 0.4 \text{ mm}$ و $d = 0.6 \text{ mm}$ و با سرعت اولیه‌ی $V = 75 \text{ m/s}$ و ورق

²⁷ Single impact

آلومینیمی استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی ساچمه‌ها صلب فرض شده‌اند. این صلبیت به علت بیشتر بودن تنش تسلیم و سختی ساچمه‌های فولادی نسبت به ورق آلومینیمی در نظر گرفته شده است [۴]. مدل هندسی ورق فقط ناحیه‌ی نزدیک به ضربه را در نظر می‌گیرد که این ناحیه، منطقه‌ای است که تنش‌های اعمالی در آن ایجاد می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که ابعاد محدوده‌ی اثر برخورد از سه برابر قطر ساچمه تجاوز نمی‌نماید [۵۱] و با ابعاد در نظر گرفته شده برای ورق، یافتن تغییر شکل‌ها و پروفیل‌های تنش اعمالی امکان‌پذیر است. همچنین به دلیل تقارن، یک‌چهارم ورق مدل شده و از یک‌چهارم وزن ساچمه استفاده می‌شود. المان استفاده شده برای ورق آلومینیمی از نوع پیوسته سه‌بعدی آجری شکل انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) می‌باشد. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر، اندازه‌ی المان‌ها نزدیک ناحیه‌ی برخورد، کوچک در نظر گرفته شده‌اند. برای همگرا شدن تنش اعمالی در این ناحیه، اندازه‌ی المان طبق پیشنهاد ارائه شده در [۵۲]، کوچک‌تر مساوی 0.025 قطر ساچمه d در نظر گرفته شد. برای کاستن از حجم محاسبات، اندازه‌ی المان‌ها به سمت خارج ناحیه‌ی برخورد، افزایش داده شده است. به عنوان نمونه، شکل ۳-۱ هندسه‌ی مدل در برخورد یگانه را برای آلیاژ Al ۷۰۷۵-T۶ با ضخامت $h = 2 \text{ mm}$ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- هندسه‌ی مدل در برخورد یگانه برای آلیاژ Al ۷۰۷۵-T۶ با ضخامت $h = 2 \text{ mm}$

ورق مورد نظر از جنس آلیاژهای آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ با ضخامت $h = 2 \text{ mm}$ و Al ۶۰۶۱-T۶ با ضخامت $h = 1/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است که دارای خواص کشسانی و مومسانی با سخت‌شوندگی همسان گرد و مستقل از نرخ کرنش می‌باشد. منحنی‌های تنش-کرنش و خصوصیات آلیاژهای آلومینیم مورد استفاده، در فصل دوم آورده شده است. برخورد ساچمه با ورق باعث انتشار موج تنش در ماده می‌شود. به علت اتلاف داخلی، شدت موج تنش با گذشت زمان کاهش می‌یابد. برای اعمال این میرایی و رسیدن به شرایط پایدار در کمینه‌ی زمان لازم برای انجام محاسبات، مطابق رابطه‌ی (۱-۳)، برای ماده، میرایی متناسب با جرم در نظر گرفته شده است [۵۲].

$$C = \alpha M \quad (1-3)$$

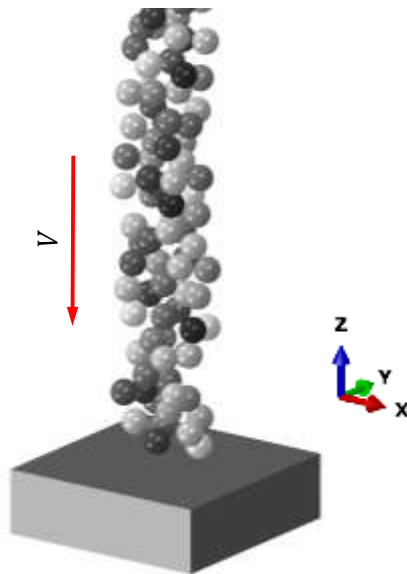
در این رابطه C ماتریس میرایی، M ماتریس جرم و α فاکتور میرایی متناسب با جرم است و $\omega_0 = 2\xi$. ξ نسبت میرایی است و $0 < \xi < 1$ و معمولاً $\xi = 0/5$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ω_0 اولین فرکانس طبیعی سیستم است که از رابطه‌ی (۲-۳) قابل محاسبه می‌باشد [۵۲].

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-3)$$

در رابطه‌ی فوق، E ، ρ و h ، به ترتیب مدول یانگ، چگالی و ضخامت ورق می‌باشد. بر اساس روابط فوق، در شبیه‌سازی‌ها برای آلیاژ Al ۷۰۷۵-T۶، $\alpha = 4 \times 10^6$ و برای آلیاژ Al ۶۰۶۱-T۶، $\alpha = 5 \times 10^6$ در نظر گرفته شد. علاوه بر در نظر گرفتن شرایط مرزی تقارن حول صفحه‌های YZ و ZX ، گره‌های سطح روبروی ناحیه‌ی برخورد نیز مقید می‌شود. مدل برهم‌کنش بین ساچمه و ورق به صورت رفتار مماسی طبق قانون کولمب با ضریب اصطکاک $\mu = 0/47$ در نظر گرفته شده است [۵۱]. برای تحلیل برخورد از حل گر صریح نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید.

۲-۳ مدل برخورد چندگانه^{۲۸}

پس از مطالعه‌ی برخورد یک ساچمه، به برخورد تعداد بیشتری ساچمه می‌پردازیم. از آنجایی که این فرایند ماهیت تصادفی دارد، نیاز است که موقعیت ساچمه‌ها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که به واقعیت نزدیک باشد. برای این منظور، مکان ساچمه‌ها در فضا با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای نرم‌افزار متلب، به صورت تصادفی تعیین می‌شود. شکل ۲-۳ توزیع تصادفی ساچمه‌ها را در حالت برخورد چندگانه نشان می‌دهد.

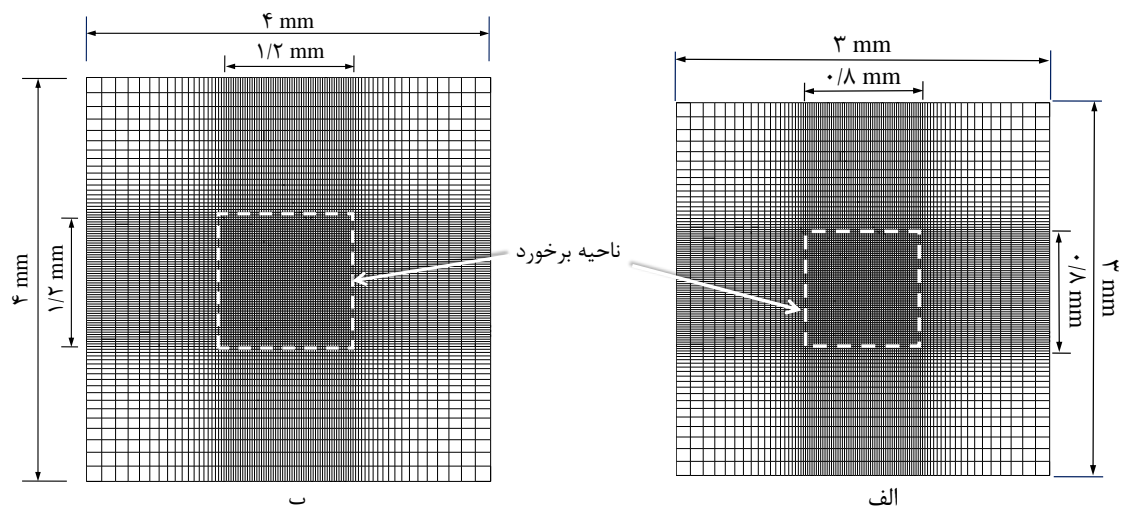


شکل ۲-۳- شکل شماتیکی از توزیع تصادفی ساچمه‌ها در حالت برخورد چندگانه

در تعیین تصادفی مکان ساچمه‌ها، همواره برنامه کنترل می‌کند که ساچمه‌ها در هم فرورفتگی نداشته باشند. همچنین فاصله‌ی عمودی مرکز ساچمه‌ها از هم به صورتی تعیین می‌شود که بین دو برخورد متوالی تأخیر زمانی مشخصی وجود داشته باشد. خروجی برنامه‌ی متلب، فایل متنی خوانش شده به وسیله حل گر صریح آباکوس می‌باشد. در این شبیه‌سازی، تعداد $n = 90$ ساچمه با سرعت اولیه‌ی عمودی یکسان $V = 75 \text{ m/s}$ مورد استفاده قرار گرفته است. در صورت استفاده از ساچمه‌ی با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ ، ابعاد مدل $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ با ناحیه‌ی برخورد مرکزی $1/2 \text{ mm} \times 1/2 \text{ mm}$ و در صورت استفاده از ساچمه‌ی با قطر $d = 0.4 \text{ mm}$ ، ابعاد مدل $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ با ناحیه‌ی برخورد مرکزی

²⁸ Multiple impact

نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تحلیل برخورد یگانه و همچنین توجه به حجم محاسبات، ابعاد در نظر گرفته شده برای ورق مناسب می‌باشد. ناحیه‌ی مرکزی در نظر گرفته شده در حقیقت حجم نماینده‌ی ورق در ابعاد واقعی می‌باشد که ماده، اطراف آن را مهار نموده است. با فرض آنکه فرایند ساچمه‌زنی به صورت یکنواخت انجام می‌شود، می‌توان از توزیع تنش اعمالی در این ناحیه‌ی نماینده برای یافتن تغییر شکل کل ورق استفاده کرد. سایر مشخصات مدل از جمله نوع المان، شرایط مرزی و تماسی و جنس ورق مشابه مدل برخورد یگانه می‌باشد. به علت حجیم بودن محاسبات از یک رایانه‌ی ۱۲ هسته‌ای برای پردازش استفاده شد.



شکل ۳-۳- هندسه‌ی مدل در حالت برخورد چندگانه، الف) قطر ساچمه $d = 0.4 \text{ mm}$ ب) قطر ساچمه $d = 0.6 \text{ mm}$

۳-۳ شبیه‌سازی پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ

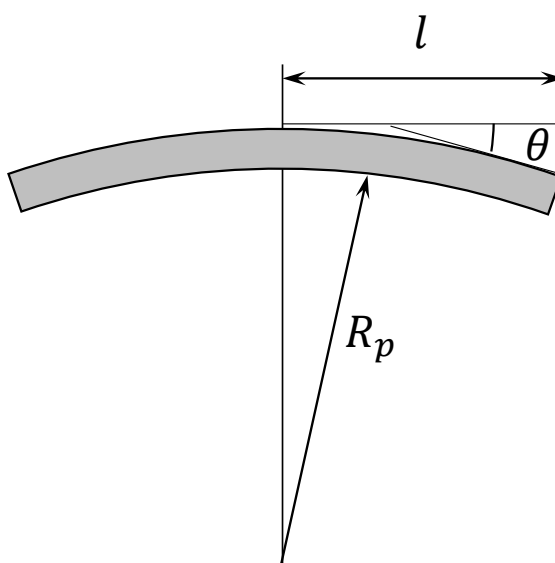
در شبیه‌سازی فرایند پین فرمینگ، ورق در حالت تخت نگه داشته شده سپس فرایند ساچمه‌زنی انجام می‌گیرد. در حالیکه در فرایند استرس پین فرمینگ، ابتدا ورق با اعمال پیش‌خمش تحت پیش‌کرنش الاستیک قرار گرفته و سپس عملیات ساچمه‌زنی انجام می‌شود. بنابراین با توجه به توضیحات فوق، می‌توان روند شبیه‌سازی را به سه مرحله تقسیم کرد. در مرحله‌ی اول، طی یک تحلیل ضمنی ورق تحت پیش‌خمش الاستیک قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم، ورق دارای پیش‌خمش، وارد حل گر صریح

شده و تحت ضربات ساچمه قرار می‌گیرد. در انتها نیز با استفاده از تنش‌های اعمالی ایجاد شده و به کمک المان پوسته در تحلیل ضمنی دیگر، شبیه‌سازی شکل‌دهی صورت می‌گیرد. همچنین فرض شده ورق فاقد تنش‌های پسماند اولیه ناشی از فرایند تولید ورق است.

برای شبیه‌سازی پین فرمینگ، در مرحله‌ی اول پیش‌خمش اعمال نمی‌شود زیرا ورق باید در حالت تخت قرار داشته باشد. ولی در مورد استرس پین فرمینگ با توجه به استفاده از قیدهای با شعاع‌های ۵۰۰ mm، ۳۷۵ mm و ۲۵۰ mm در آزمایش‌های تجربی، ممان پیش‌خمش مربوط به هر کدام از این شعاع‌ها به بلوک آلومینیومی اعمال می‌شود. ابعاد مدل، مشابه با ابعاد بیان شده در مدل برخورد چندگانه و خصوصیات ماده نیز طبق توضیحات بیان شده در مدل برخورد یگانه در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان شرایط مرزی، برای صفحه‌ی میانی بلوک آلومینیومی که در راستای y تعریف شده، تقارن نسبت به محور x در نظر گرفته شده و جهت اعمال پیش‌خمش، شیب متناسب با شعاع‌های پیش‌خمش، به بلوک اعمال می‌شود. این شیب با توجه به روابط مربوط به خیز و شیب تیرها و ارتباط بین شعاع خمش و شیب تیر، از رابطه‌ی (۳-۳) قابل محاسبه است.

$$\theta = \frac{l}{R_p} \quad (3-3)$$

در رابطه‌ی (۳-۳)، θ ، l و R_p به ترتیب شیب تیر، طول تیر و شعاع پیش‌خمش می‌باشد که به‌صورت شماتیک در شکل ۳-۴، نمایش داده شده است.



شکل ۳-۴- نمایش هندسی متغیرهای رابط‌ی (۳-۳)

جدول ۳-۱، شعاع‌های پیش‌خمش و شیب‌های محاسبه شده از رابط‌ی ۳-۳ را برای مدل‌های مورد نظر نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱- شیب‌های مورد نیاز جهت اعمال پیش‌خمش مورد نظر

شیب جهت اعمال پیش‌خمش θ	شعاع پیش‌خمش R_p (mm)	ابعاد مدل (mm^2)
۰	∞	۴×۴
۰/۰۰۴	۵۰۰	
۰/۰۰۵۳	۳۷۵	
۰/۰۰۸	۲۵۰	
۰	∞	۳×۳
۰/۰۰۳	۵۰۰	
۰/۰۰۴	۳۷۵	
۰/۰۰۶	۲۵۰	

همچنین با استفاده از روابط مربوط به خمش خالص، می‌توان تنش اولیه و ممان خمشی ناشی از پیش‌خمش را به کمک رابط‌ی (۳-۴) و (۳-۵) به دست آورد.

$$\sigma_x^i = \sigma_x^{iMax} = \frac{Eh}{2R_p} \quad (۴-۳)$$

$$M_x^{pre} = \frac{EI}{R_p} = \frac{Eh^3}{12R_p} \quad (۵-۳)$$

در روابط فوق، σ_x^i ، E ، h و R_p به ترتیب ممان خمشی ناشی از پیش‌خمش در جهت x بر واحد طول (ممان پیش‌خمش)، تنش اولیه‌ی ناشی از پیش‌خمش، مدول یانگ ورق، ضخامت ورق، ممان اینرسی ورق و شعاع پیش‌خمش می‌باشند. از آنجایی که ورق فقط در جهت x خم شده و در جهت y آزاد است، بنابراین $\sigma_y^i = 0$ در نظر گرفته می‌شود. جدول ۳-۲، ممان پیش‌خمش و تنش‌های ناشی از خم کردن با شعاع‌های پیش‌خمش مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به کمتر بودن این تنش‌ها از تنش تسلیم ورق آلومینیومی، پیش‌خمش اعمالی حالت الاستیک دارد.

جدول ۳-۲- ممان‌های پیش‌خمش و تنش‌های اولیه‌ی ایجاد شده ناشی از پیش‌خمش

ممان پیش‌خمش بر واحد طول M_x^{pre} (N.mm/mm)	تنش پیش‌خمش σ_x^i (MPa)	شعاع پیش‌خمش R_p (mm)	تنش تسلیم σ_y (MPa)	جنس ورق
۰	۰	∞	۵۰۲	Al ۷۰۷۵-T۶
۹۴	۱۴۱	۵۰۰		
۱۲۵/۳	۱۸۸	۳۷۵		
۱۸۸	۲۸۲	۲۵۰	۲۷۸	Al ۶۰۶۱-T۶
۰	۰	∞		
۳۹/۱۵	۱۰۴/۴	۵۰۰		
۵۲/۲	۱۳۹/۲	۳۷۵		
۷۸/۳	۲۰۸/۸	۲۵۰		

در مرحله‌ی دوم، مدل به‌همراه تنش‌های ایجاد شده از مرحله‌ی اول وارد حل‌گر صریح شده و تحت ضربات ساچمه قرار می‌گیرد. ساچمه‌زنی بلوک دارای پیش‌خمش، مشابه مدل برخورد چندگانه انجام می‌شود. جابه‌جایی‌های گره‌های سطح پائینی و سطوح جانبی مدل، مقید شده است.

با انجام فرایند ساچمه‌زنی در مرحله‌ی دوم، تنش‌های مرکبی به‌صورت مجموعی از تنش‌های اولیه ناشی از پیش‌خمش و تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی در قطعه ایجاد می‌شود [۵۳]. روابط (۶-۳) و (۷-۳)، بیان‌کننده‌ی این تنش‌ها می‌باشد.

$$\sigma_x^c = \sigma_x^i + \sigma_x^{ind} \quad (۶-۳)$$

$$\sigma_y^c = \sigma_y^i + \sigma_y^{ind} \quad (۷-۳)$$

در روابط (۶-۳) و (۷-۳)، σ^c ، σ^i و σ^{ind} به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تنش‌های مرکب، تنش‌های اولیه ناشی از پیش‌خمش و تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی است. بنابراین تنش‌های اعمالی ناشی از ساچمه‌زنی از روابط (۸-۳) و (۹-۳) قابل محاسبه است.

$$\sigma_x^{ind} = \sigma_x^c - \sigma_x^i \quad (۸-۳)$$

$$\sigma_y^{ind} = \sigma_y^c \quad (۹-۳)$$

تنش‌های اعمالی منجر به ایجاد نیروهای کششی و ممان‌های خمشی عکس‌العمل در قطعه می‌شود. این نیروها و ممان‌ها بر واحد طول از روابط (۱۰-۳) تا (۱۳-۳) قابل محاسبه است [۱۸]:

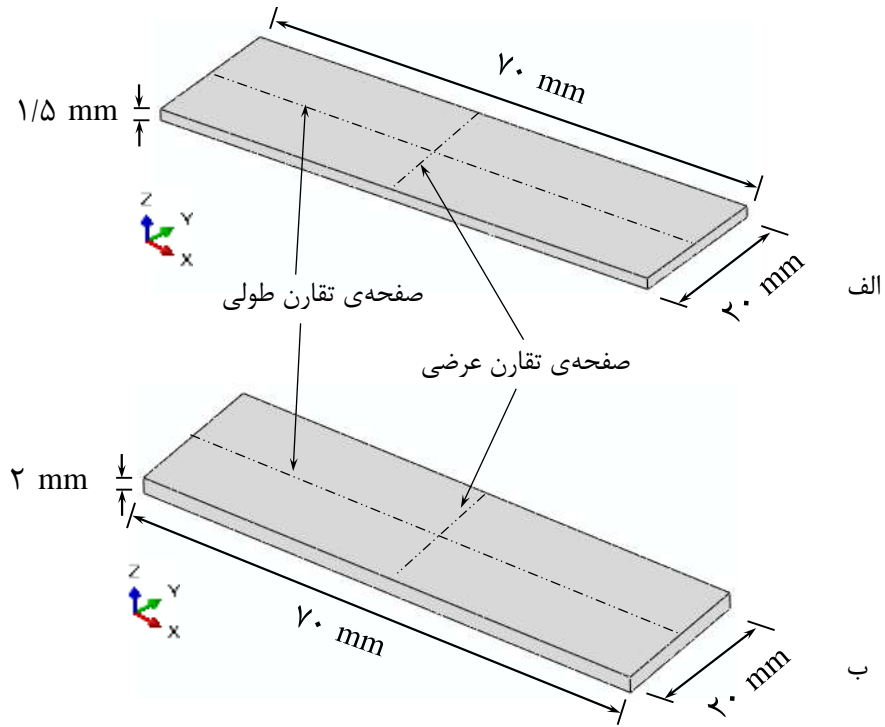
$$F_x = \int_0^h \sigma_x^{ind} dz \quad (۱۰-۳)$$

$$F_y = \int_0^h \sigma_y^{ind} dz \quad (۱۱-۳)$$

$$M_x = \int_0^h \sigma_x^{ind} \left(\frac{h}{2} - z\right) dz \quad (۱۲-۳)$$

$$M_y = \int_0^h \sigma_y^{ind} \left(\frac{h}{2} - z\right) dz \quad (۱۳-۳)$$

در مرحله‌ی سوم، با استفاده از نتایج به‌دست آمده از مراحل قبل، فرایند شکل‌دهی ورق شبیه‌سازی می‌شود. برای این منظور نواری آلومینیمی با خواصی که پیشتر ذکر شد و ابعاد $70 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ مشابه با آزمایش‌ها، در نظر گرفته شده است. البته لازم به‌ذکر است، طولی از ورق که تحت ساچمه‌زنی قرار گرفته، مدل‌سازی شده است. جهت مدل‌سازی از مدل پوسته با ۱۱ نقطه‌ی انتگرال‌گیری، در حل‌گر استاندارد نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. نوع المان به‌کار رفته، از نوع پوسته‌ی ۴ گره انتگرال‌گیری کاهش‌یافته S4R است. ابعاد المان‌ها نیز $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. در این مدل، مبدأ مختصات در مرکز نوار در نظر گرفته شده و جابه‌جایی در جهت‌های x ، y و z و دوران حول محور z برای این نقطه گرفته شده است. همچنین جهت جلوگیری از حرکت جسم صلب و داشتن شکلی متقارن، برای این مدل دو صفحه‌ی تقارن عرضی و طولی تعریف شده که صفحه‌ی تقارن طولی نسبت به محور y و صفحه‌ی تقارن عرضی نسبت به محور x تقارن دارد. شکل ۳-۵، هندسه‌ی نوار آلومینیمی را در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی نشان می‌دهد. در انتها، جهت محاسبه‌ی تغییر شکل نوار آلومینیمی، ممان‌های خمشی و نیروهای کششی بر واحد طول در جهت x و y (M_x ، M_y و F_x ، F_y) که از مرحله‌ی قبل به‌دست خواهد آمد، به لبه‌های مدل پوسته اعمال می‌شود.



شکل ۳-۵ شکل شماتیکی از هندسه‌ی مدل در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی نوار آلومینیومی، نوار از جنس الف) نوار از جنس AI ۶۰۶۱-T۶ ب) نوار از جنس AI ۷۰۷۵-T۶

فصل چہارم

نتایج و بحث

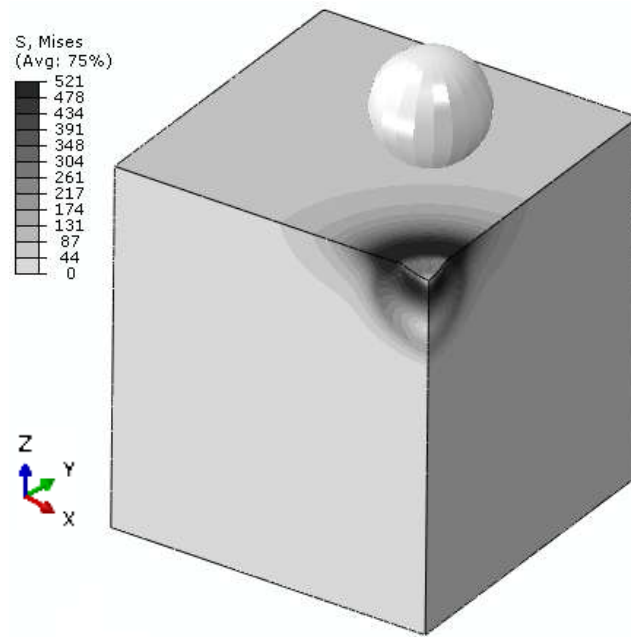
فصل ۴ نتایج و بحث

۴-۱ نتایج شبیه‌سازی

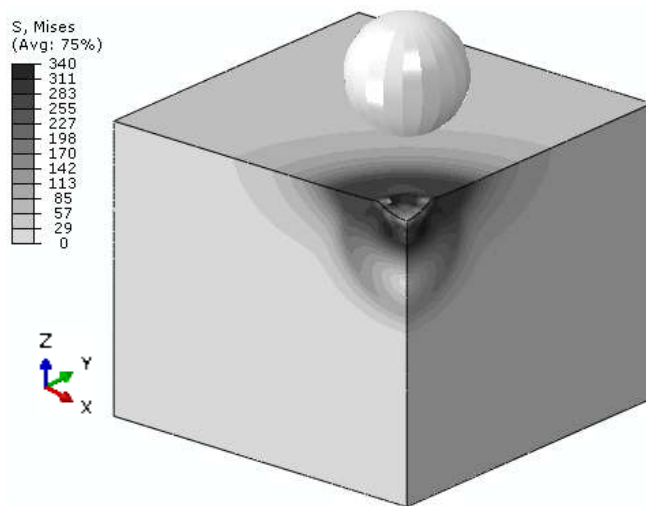
۴-۱-۱ برخورد یگانه

شکل ۴-۱ (الف و ب)، پروفیل تنش اعمالی در ورق را در سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ برای دو آلیاژ به کار رفته و به‌ازای ساچمه‌ی با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، مدل به‌کار رفته ناحیه‌ی متأثر از برخورد را در بر گرفته است، به‌گونه‌ای که می‌توان توزیع تنش و همچنین تغییر شکل ایجاد شده را در این ناحیه به‌دست آورد.

شکل ۴-۲ (الف و ب) و شکل ۴-۳ (الف و ب)، به‌ترتیب نمودارهای تنش اعمالی در فاصله‌های مختلف از سطح برخورد و گودی ایجاد شده در سطح نمونه را به‌ازای ساچمه‌های با دو قطر مختلف و سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. از نمودارها مشاهده می‌شود که افزایش قطر ساچمه، باعث افزایش عمق تنش‌ها و عمق گودی ایجاد شده در ماده شده اما در تنش سطحی و تنش فشاری و کششی بیشینه، تغییری ایجاد نکرده است. هانگ و همکارانش [۲۸] نیز در شبیه‌سازی برخورد یک ساچمه به نتیجه‌ی مشابهی دست یافته بودند. از مقایسه‌ی نمودارهای الف و ب شکل ۴-۲، می‌توان دریافت که با افزایش سختی و تنش تسلیم ماده، عمق تنش فشاری در ماده کاهش یافته و تنش‌های فشاری و کششی بیشینه، افزایش یافته است. این موضوع با نتایج مطالعات هرزوغ و همکارن [۷] همخوانی دارد. به‌همین ترتیب از مقایسه‌ی نمودارهای الف و ب شکل ۴-۳، می‌توان دید که افزایش سختی و تنش تسلیم ماده، باعث کاهش عمق گودی ایجاد شده در ماده شده است.

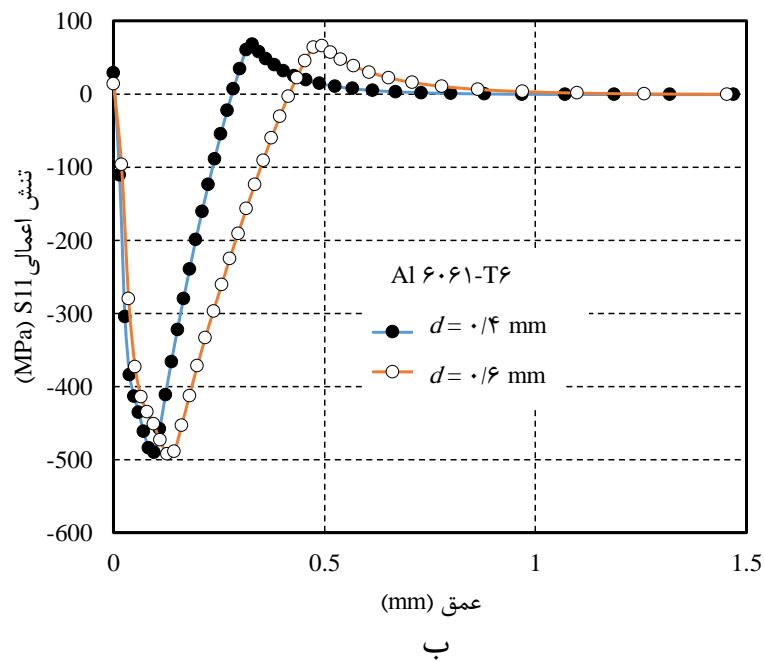
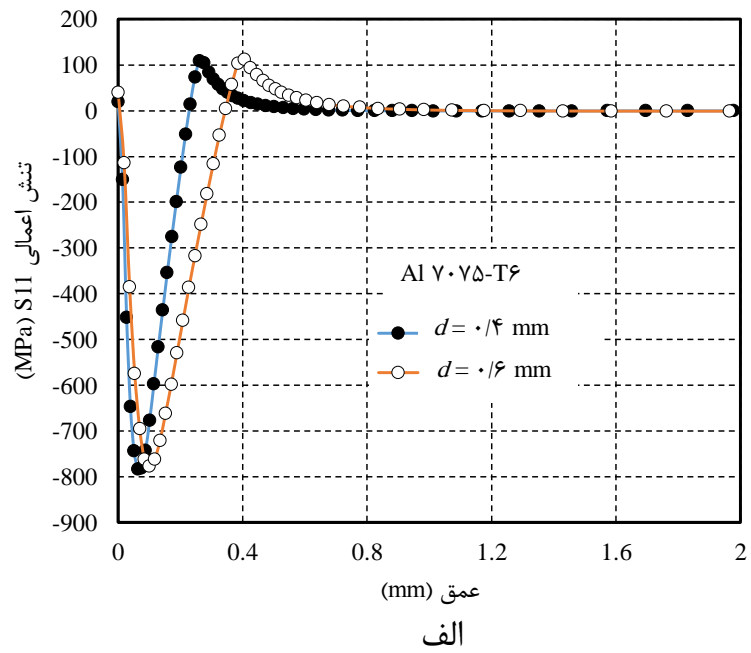


(الف)

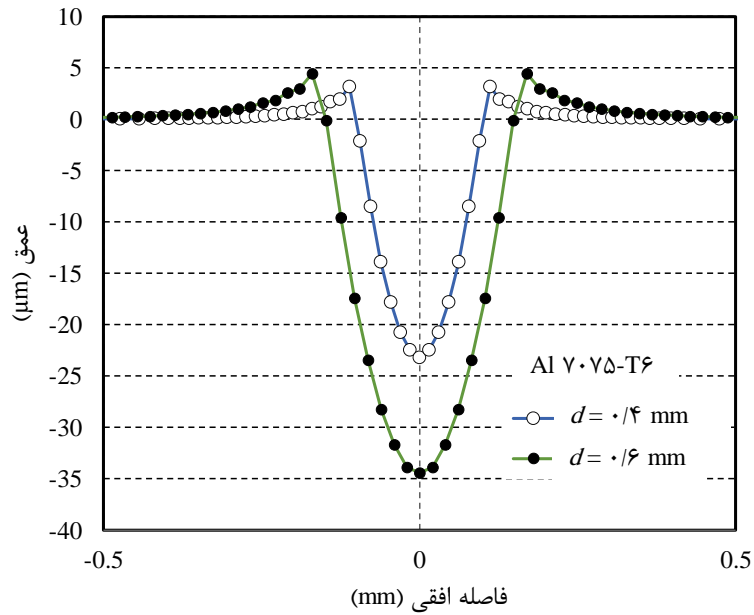


(ب)

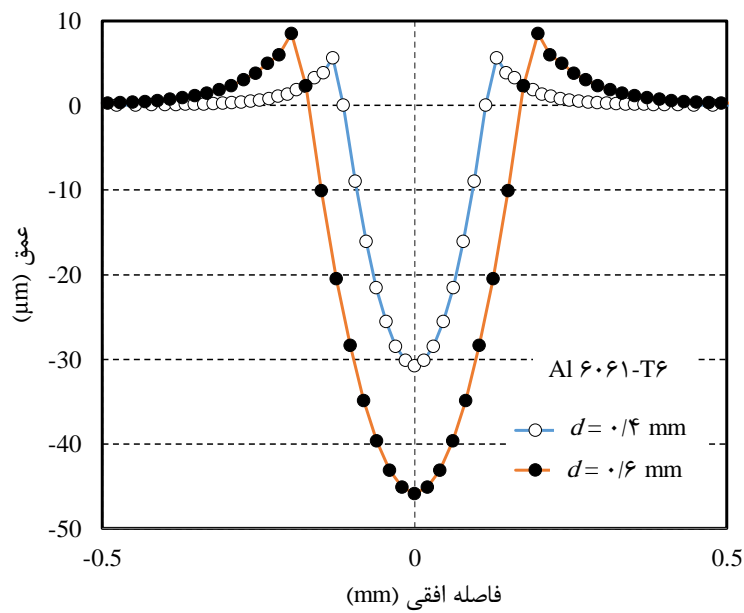
شکل ۴-۱- پروفیل توزیع تنش فون میسز اعمالی در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و قطر ساچمه $d = 0.6 \text{ mm}$ (الف) برای آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-T۶ (تنش بر حسب MPa) (ب) برای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶



شکل ۴-۲- نمودارهای تنش اعمالی در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75$ m/s، الف) برای آلیاژ آلومینیوم Al 7075-T6، ب) برای آلیاژ آلومینیوم Al 6061-T6



الف



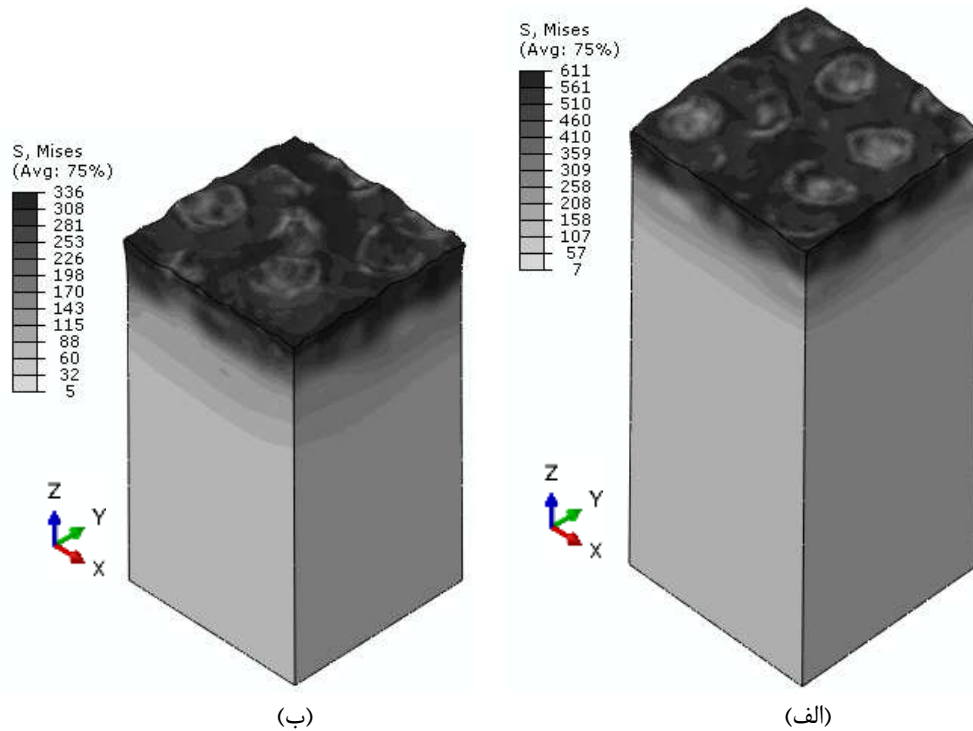
ب

شکل ۴-۳- نمودارهای گودی ایجاد شده در برخورد یگانه به‌ازای سرعت برخورد $V = 75$ m/s (الف) برای آلیاژ آلومینیوم $Al\ 7075-T6$ ، (ب) برای آلیاژ آلومینیوم $Al\ 6061-T6$

۲-۱-۴ برخورد چندگانه

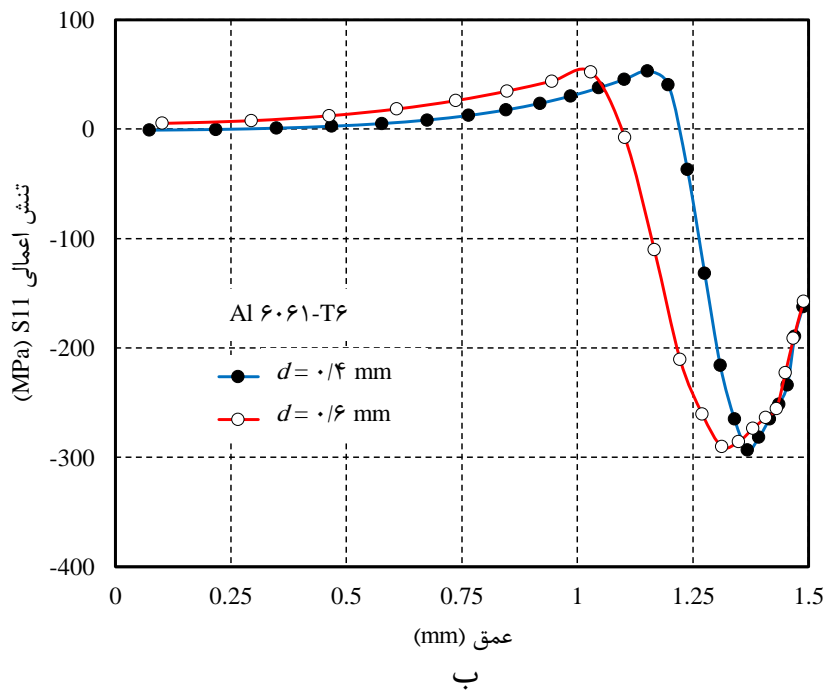
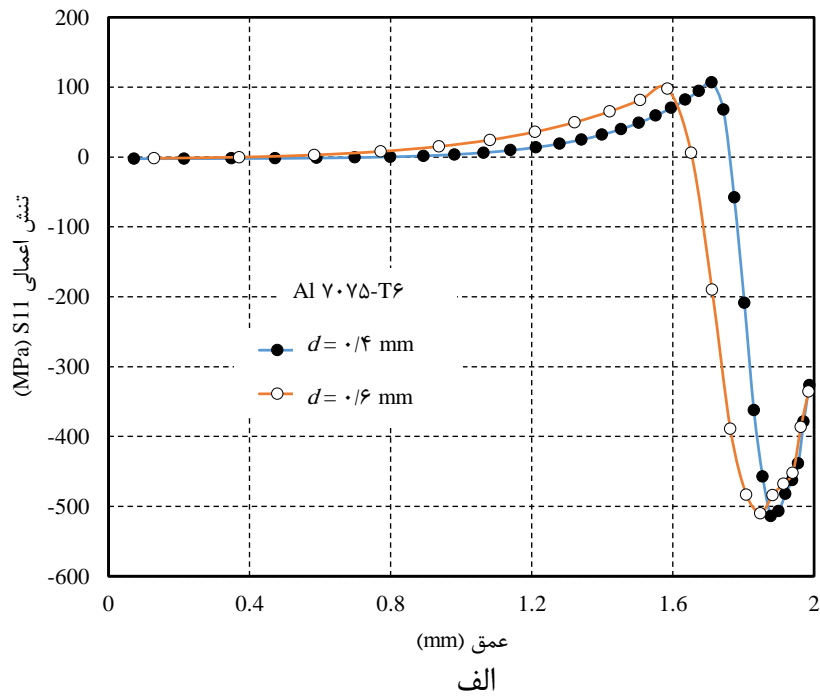
شکل ۴-۴ (الف و ب)، توزیع تنش اعمالی را در ناحیه‌ی مرکزی دو مدل آلومینیومی، پس از برخورد $n = 90$ ساچمه با سرعت اولیه‌ی $V = 75$ m/s نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که توزیع تنش در ناحیه‌ی برخورد، یکنواخت نیست. بنابراین، برای به‌دست آوردن مقدار متوسط تنش اعمالی در

فاصله‌های مختلف از سطح نمونه در ناحیه‌ی مرکزی، باید از همه‌ی المان‌های با عمق یکسان، تنش میانگین محاسبه شود. با توجه به ابعاد مدل و تعداد لایه‌ها و تعداد المان‌ها در هر لایه در راستای ضخامت، این کار با نوشتن یک برنامه‌ی متلب و به‌کارگیری آن انجام شد.



شکل ۴-۴- پروفیل توزیع تنش فون میسز اعمالی در برخورد چندگانه به‌ازای تعداد $n = 90$ ساچمه، سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و قطر ساچمه $d = 0.4 \text{ mm}$ برای آلیاژ آلومینیم ۶-T۶-۷۵ (الف) برای آلیاژ آلومینیم ۶-T۶-۷۵ (ب) برای آلیاژ آلومینیم ۶-T۶-۶۱ (تنش بر حسب MPa)

شکل ۴-۵ (الف و ب)، نمودارهای تنش اعمالی را در راستای ضخامت به‌ازای ساچمه‌های با دو قطر مختلف و در سرعت برخورد $V = 75 \text{ m/s}$ و تعداد $n = 90$ ساچمه نشان می‌دهد. در این حالت نیز مشاهده می‌شود همانند برخورد یگانه، با افزایش قطر ساچمه، عمق تنش‌ها در ماده افزایش یافته ولی در مقدار تنش سطحی و تنش فشاری و کششی بیشینه، تغییر قابل توجهی دیده نمی‌شود. همچنین از مقایسه‌ی نمودارهای الف و ب شکل ۴-۵، می‌توان دید که با افزایش سختی و تنش تسلیم ماده، عمق تنش فشاری در ماده کاهش یافته و تنش‌های فشاری و کششی بیشینه، افزایش یافته است.

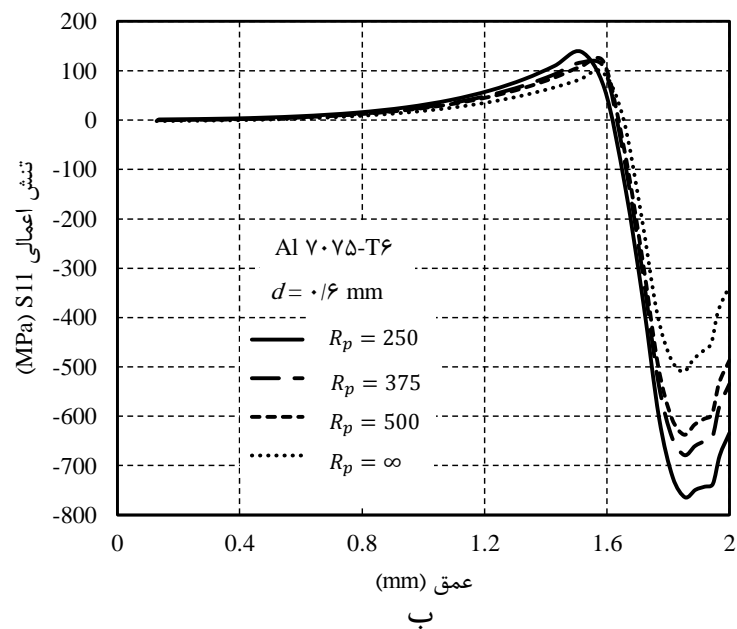
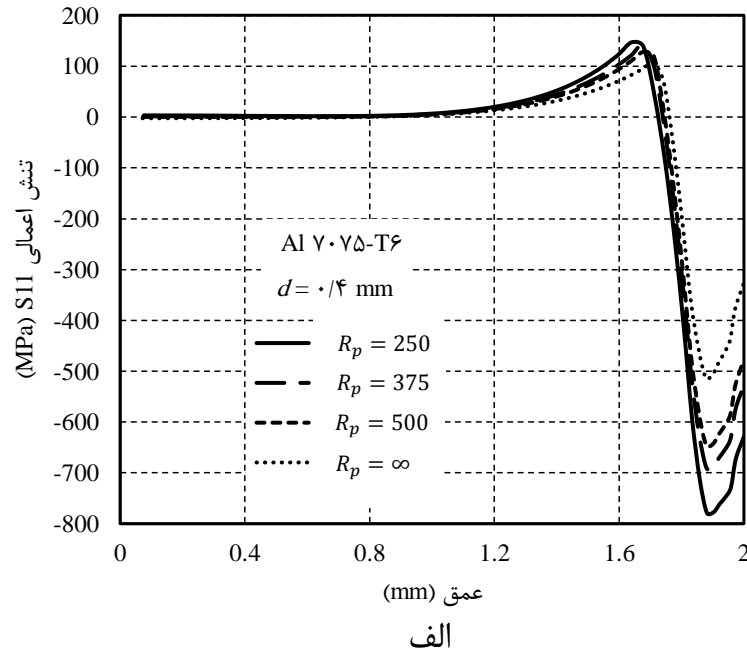


شکل ۴-۵- نمودارهای تنش اعمالی در برخورد چندگانه به‌ازای تعداد $n = 90$ ساچمه و سرعت برخورد $V = 75$ m/s، (الف) برای آلیاژ آلومینیوم Al 7075-T6، (ب) برای آلیاژ آلومینیوم Al 6061-T6

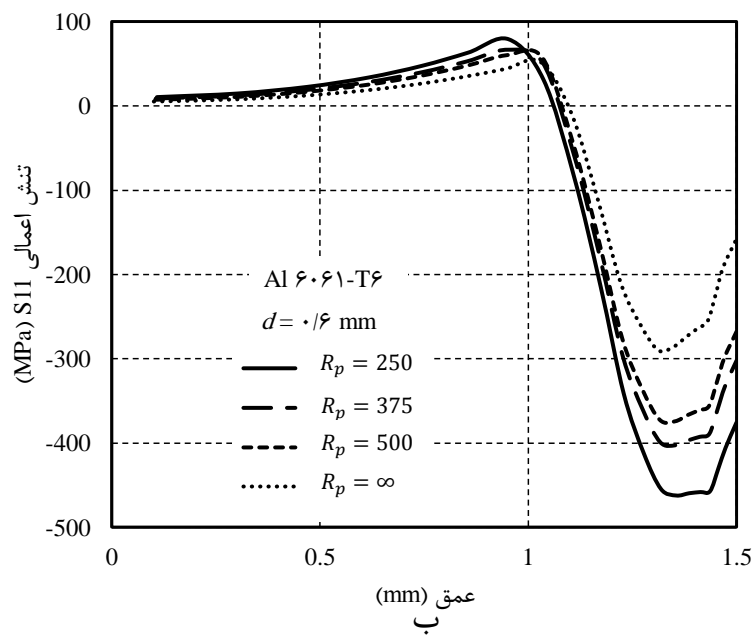
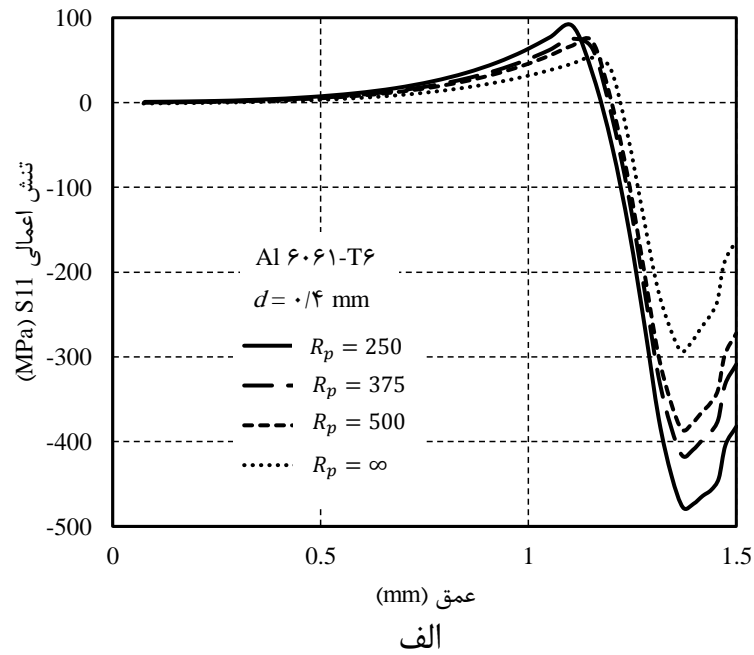
شکل ۴-۶ (الف و ب) و شکل ۴-۷ (الف و ب)، مقایسه‌ی بین تنش اعمالی ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد برخورد $n = 90$ ساچمه، به‌ترتیب برای آلیاژ آلومینیوم

Al ۷۰۷۵-T۶ و آلیاژ آلومینیم Al ۶۰۶۱-T۶، با قطر ساچمه‌ی $d = ۰/۴$ mm و $d = ۰/۶$ mm را نشان

می‌دهد.

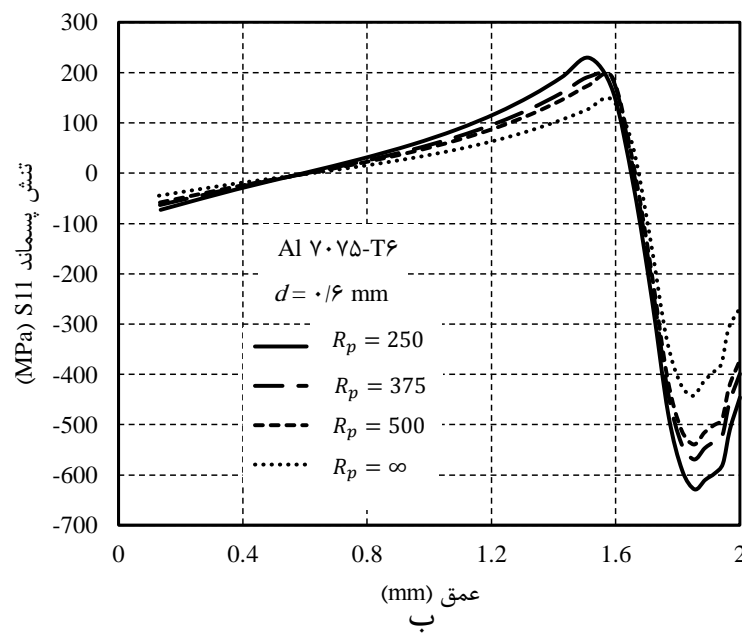
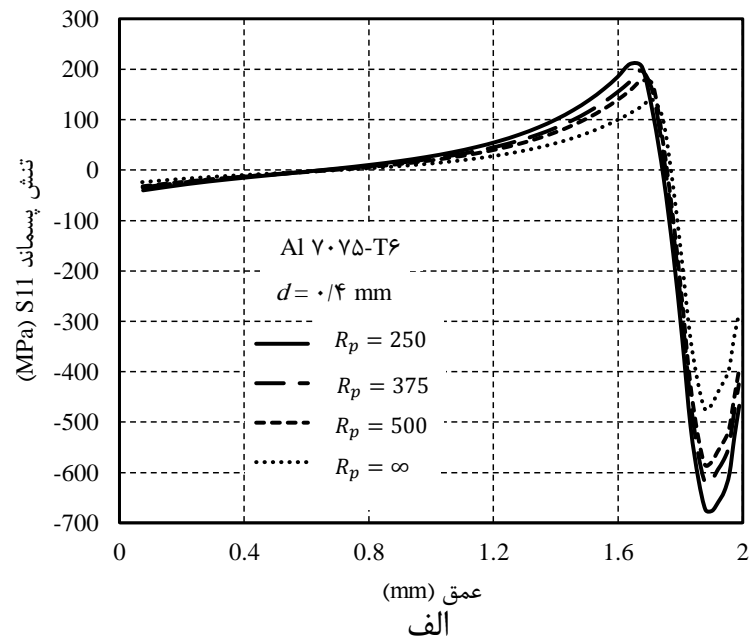


شکل ۴-۶- مقایسه‌ی تنش اعمالی ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = ۹۰$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶، (الف) قطر ساچمه‌ی $d = ۰/۴$ mm (ب) قطر ساچمه‌ی $d = ۰/۶$ mm

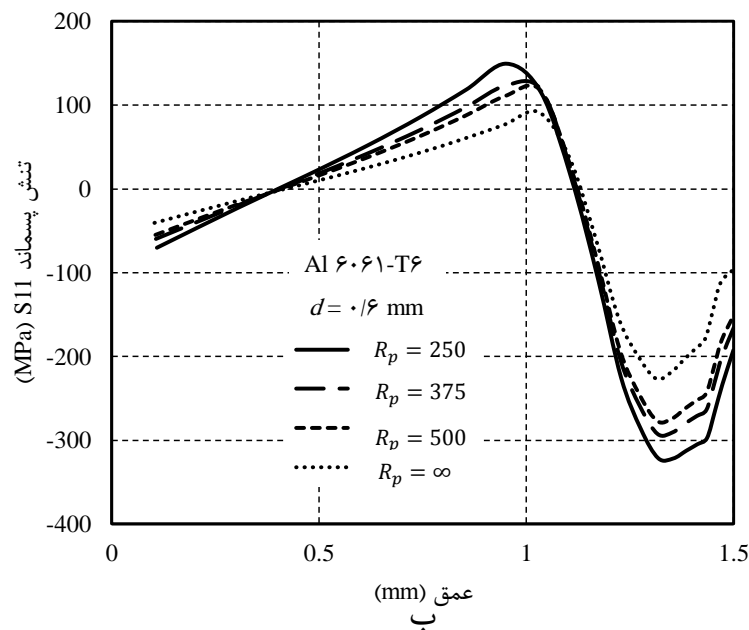
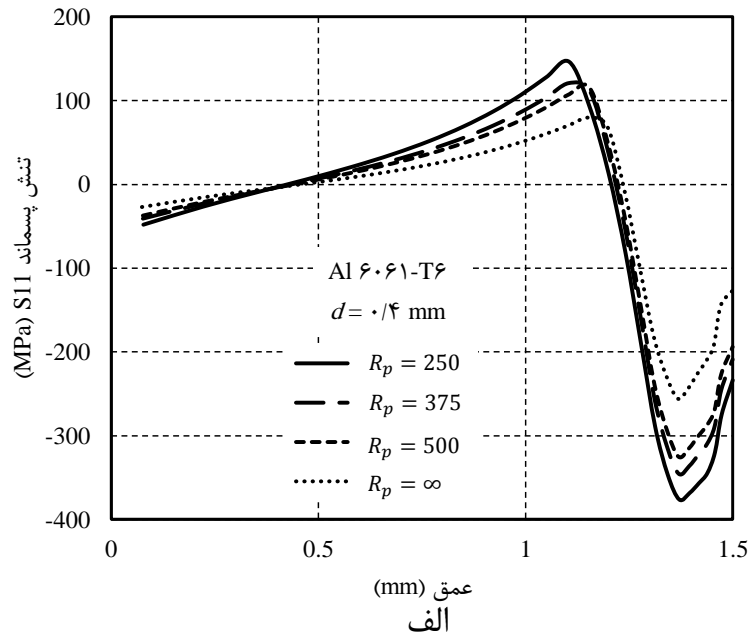


شکل ۴-۷- مقایسه‌ی تنش اعمالی ایجاد شده در مدل به‌زای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم Al 6061-T6، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4$ mm (ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6$ mm

شکل ۴-۸ (الف و ب) و شکل ۴-۹ (الف و ب)، تنش پسماند ایجاد شده در مدل به‌زای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد برخورد $n = 90$ ساچمه، به‌ترتیب برای آلیاژ آلومینیم Al 7075-T6 و آلیاژ آلومینیم Al 6061-T6، با قطر ساچمه‌ی $d = 0.4$ mm و $d = 0.6$ mm را نشان می‌دهد.



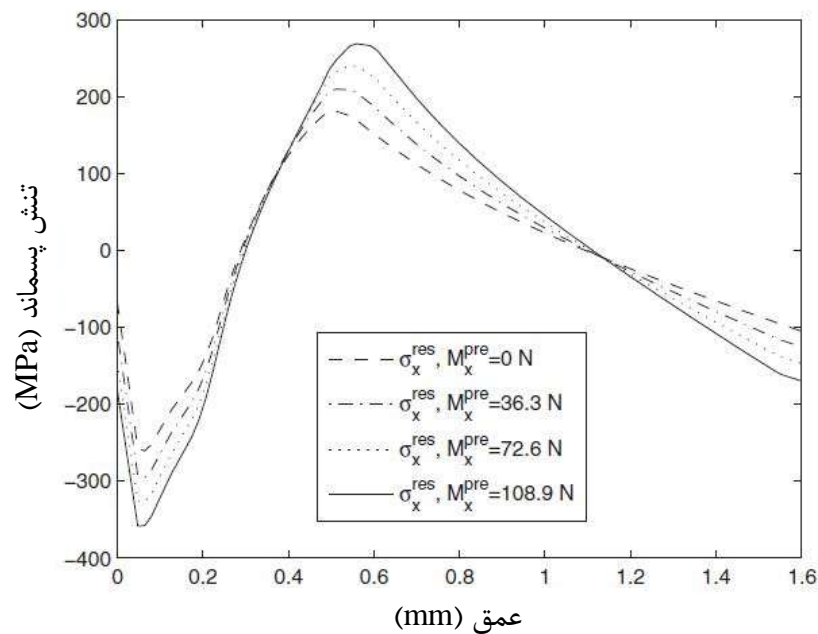
شکل ۴-۸- مقایسه‌ی تنش پسماند ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیوم Al 7075-T6، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4$ mm ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6$ mm



شکل ۴-۹- مقایسه‌ی تنش پسماند ایجاد شده در مدل به‌ازای شعاع‌های پیش‌خمش مختلف و تعداد $n = 90$ ساچمه برای آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-T۶، الف) قطر ساچمه‌ی $d = 0.4$ mm (ب) قطر ساچمه‌ی $d = 0.6$ mm

شکل‌های ۴-۶ الی ۴-۹ نشان می‌دهند، پیش‌خمش تأثیر به‌سزایی در تنش‌های ایجاد شده در قطعه دارد. از این شکل‌ها می‌توان دریافت، با کاهش شعاع پیش‌خمش یا به عبارت دیگر با افزایش ممان پیش‌خمش در جهت x ، تنش پسماند فشاری سطحی و تنش اعمالی فشاری سطحی و همچنین تنش پسماند فشاری بیشینه و تنش اعمالی فشاری بیشینه، در جهت x افزایش پیدا می‌کنند. در ضمن، مقادیر

تنش‌های ایجاد شده در جهت x (تنش اعمالی و تنش پسماند) که از فرایند استرس پین فرمینگ به دست آمده از مقادیری که از فرایند پین فرمینگ رایج ($R_p = \infty$) به دست آمده، بزرگ‌تر است. شکل ۴-۱۰، نمودارهای تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی فرایند استرس پین فرمینگ در ممان‌های پیش‌خمش مختلف را که توسط میائو و همکارانش [۲۱] به دست آمده، نشان می‌دهد. آنها در کار خود از ورق آلومینیومی Al ۲۰۲۴-T۳ و تعداد ۴۸ ساچمه‌ی سرامیکی با قطر ۰/۵ mm و سرعت ۶۶/۲۲ m/s استفاده کرده بودند. مشاهده می‌شود نمودارهای به دست آمده توسط آنها مشابه نمودارهای آورده شده در شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ بوده و نکات گفته شده، در مورد این نمودارها نیز صدق می‌کند.



شکل ۴-۱۰- نمودار تنش پسماند به دست از شبیه‌سازی استرس پین فرمینگ در ممان‌های پیش‌خمش مختلف مربوط به کار میائو و همکاران [۲۱]

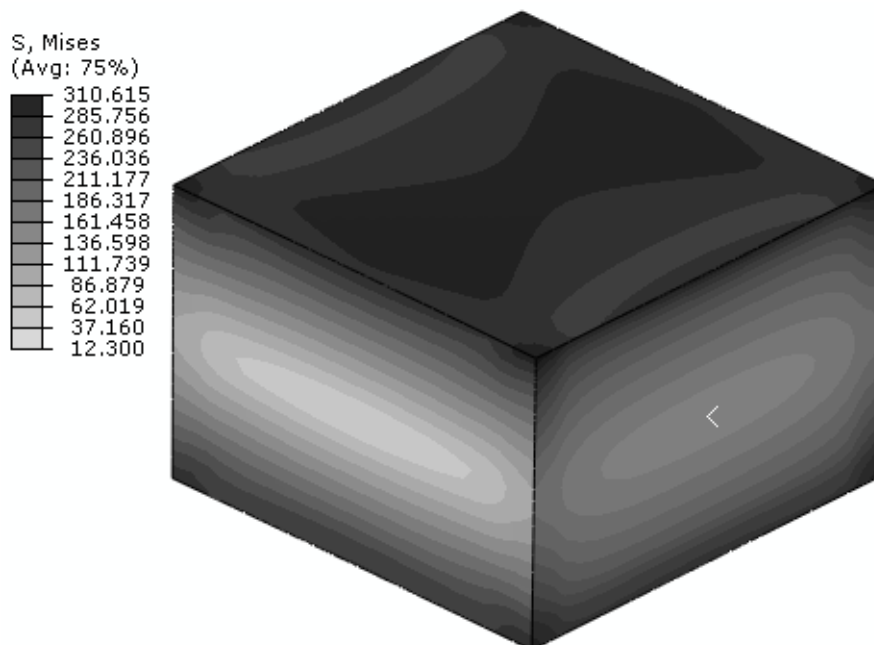
جدول ۴-۱، ممان‌های خمشی بر واحد طول و نیروهای کششی بر واحد طول محاسبه شده از تنش‌های اعمالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در فصل ۳ بیان شد این ممان‌ها و نیروها (F_y , F_x و M_y , M_x) در مرحله‌ی شبیه‌سازی شکل‌دهی، برای محاسبه‌ی تغییر شکل نوار آلومینیومی به لبه‌های مدل پوسته اعمال می‌شوند.

جدول ۴-۱- ممان‌ها و نیروهای عکس‌العمل به‌دست آمده از تنش‌های اعمالی برای آلیاژهای آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ و Al ۶۰۶۱-T۶

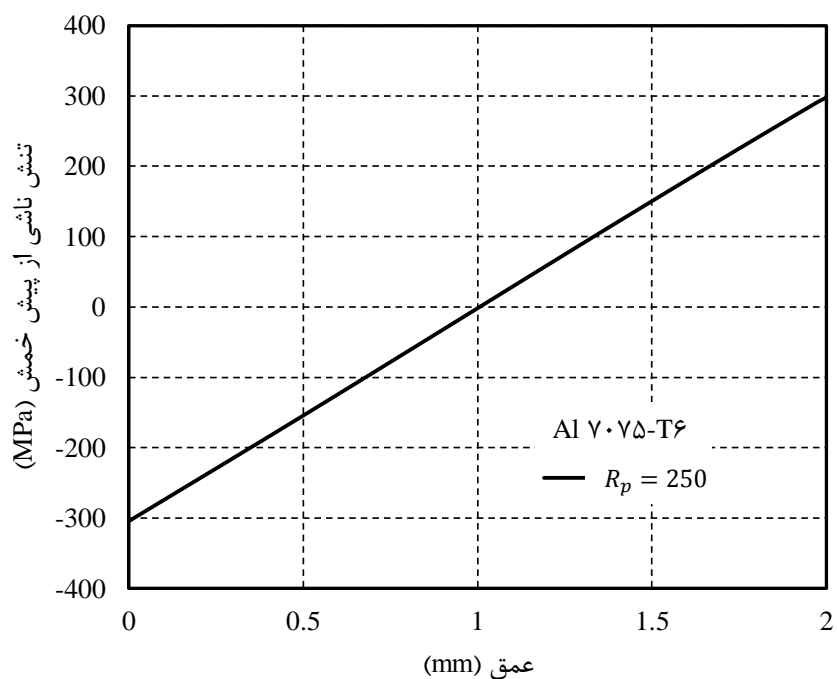
نیروی کششی بر واحد طول در جهت x و y (N/mm)		ممان خمشی بر واحد طول در جهت x و y (N)		شعاع پیش‌خمش R_p (mm)	قطر ساچمه (mm)	ابعاد مدل (mm ^۲)	جنس ورق
F_y	F_x	M_y	M_x				
۸۸/۸۵	۹۰/۱۷	۹۴/۶۱	۹۵/۴۹	∞	۰/۶	۴×۴	Al ۷۰۷۵-T۶
۸۹/۸۸	۱۲۱/۱۱	۸۸/۱۰	۱۲۸/۶۸	۵۰۰			
۹۰/۳۲	۱۳۲/۰۵	۸۶/۱۰	۱۴۰/۱۸	۳۷۵			
۹۰/۶۴	۱۵۵/۷۶	۸۱/۶۵	۱۶۴/۸۵	۲۵۰			
۵۸/۴۰	۵۹/۰۱	۶۰/۸۳	۶۱/۴۷	∞	۰/۴	۳×۳	
۵۸/۳۶	۸۱/۲۳	۵۵/۳۵	۸۶/۷۸	۵۰۰			
۵۸/۲۹	۸۹/۳۴	۵۳/۴۴	۹۵/۷۹	۳۷۵			
۵۷/۵۵	۱۰۶/۵۲	۴۹/۳۶	۱۱۴/۷۶	۲۵۰			
۶۱/۲۸	۶۰/۴۵	۴۸/۳۳	۴۷/۶۰	∞	۰/۶	۴×۴	Al ۶۰۶۱-T۶
۶۳/۰۵	۸۴/۷۲	۴۵/۵۹	۶۶/۲۱	۵۰۰			
۶۳/۵۸	۹۳/۱۶	۴۴/۷۵	۷۲/۴۵	۳۷۵			
۶۴/۰۳	۱۱۱/۰۹	۴۲/۸۴	۸۵/۸۷	۲۵۰			
۴۱/۲۴	۴۰/۱۰	۳۲/۲۴	۳۱/۴۹	∞	۰/۴	۳×۳	
۴۱/۹۲	۵۸/۶۶	۲۹/۵۹	۴۶/۱۳	۵۰۰			
۴۲/۰۲	۶۵/۴۵	۲۸/۶۷	۵۱/۳۶	۳۷۵			
۴۱/۶۰	۷۹/۷۳	۲۶/۶۷	۶۲/۲۲	۲۵۰			

۴-۱-۳ بین فرمینگ و استرس بین فرمینگ

شکل ۴-۱۱، پروفیل توزیع تنش ناشی از پیش‌خمش و شکل ۴-۱۲، نمودار تنش خمشی ایجاد شده برای آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ به‌ازای شعاع پیش‌خمش $R_p = 250$ mm را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-۱۲ مشخص است تنش در نیمه‌ی بالایی بلوک آلومینیمی کششی و در نیمه‌ی پایینی آن فشاری است.



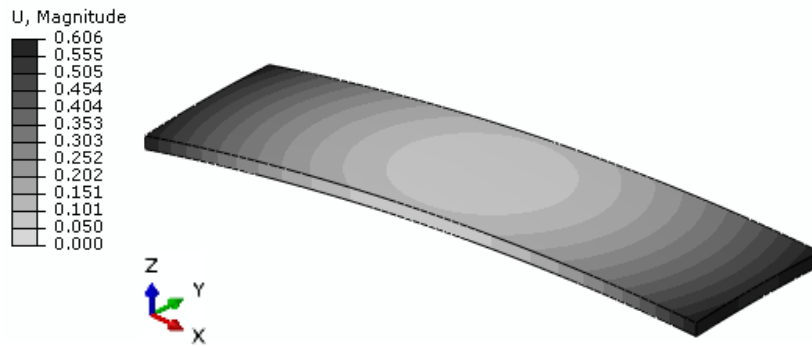
شکل ۴-۱۱- پروفیل توزیع تنش ناشی از پیش خمش برای آلیاژ آلومینیم $Al\ 7075-T6$ به ازای شعاع پیش خمش $R_p = 250\ mm$



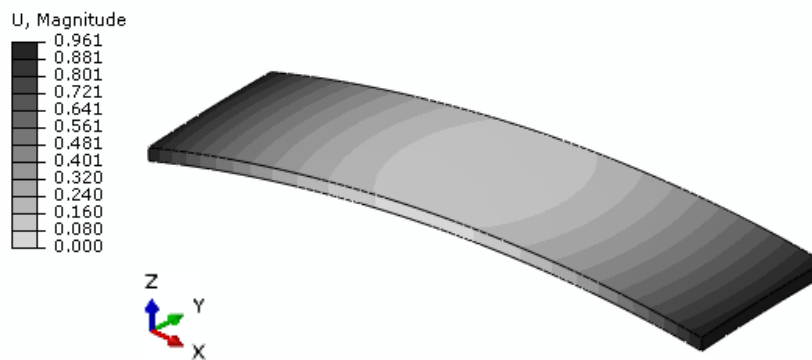
شکل ۴-۱۲- نمودار تنش خمشی ایجاد شده برای آلیاژ آلومینیم $Al\ 7075-T6$ به ازای شعاع پیش خمش $R_p = 250\ mm$

شکل ۴-۱۳، تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیومی از جنس Al ۶۰۶۱-T۶ را به ازای پروفیل‌های تنش به دست آمده از برخورد $n = ۹۰$ ساچمه با قطر $d = ۰/۴$ mm و سرعت $V = ۷۵$ m/s، نشان می‌دهد. برای وضوح بیشتر تغییر شکل‌ها با بزرگ‌نمایی ۴ برابر نشان داده شده است.

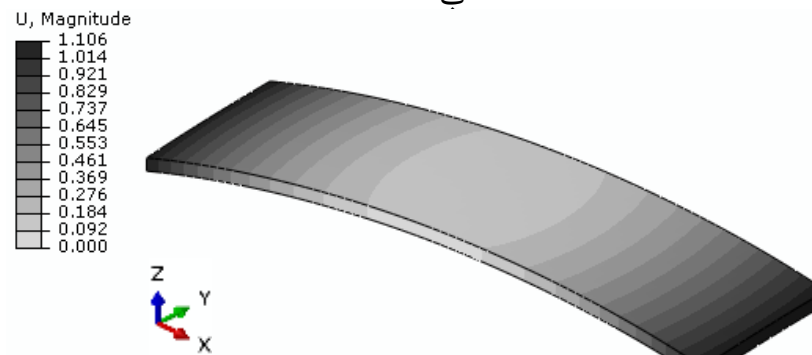
شکل ۴-۱۴ تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیومی از جنس Al ۷۰۷۵-T۶ را به ازای پروفیل‌های تنش به دست آمده از برخورد $n = ۹۰$ ساچمه با قطر $d = ۰/۶$ mm و سرعت $V = ۷۵$ m/s، نشان می‌دهد. برای وضوح بیشتر تغییر شکل‌ها با بزرگ‌نمایی ۲ برابر نشان داده شده است.



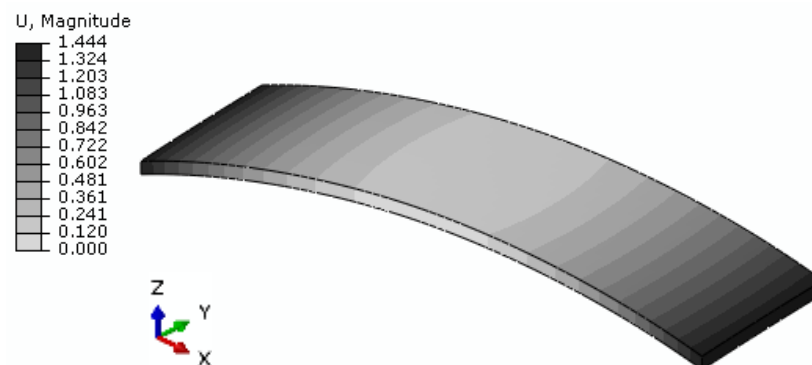
الف



ب



ج

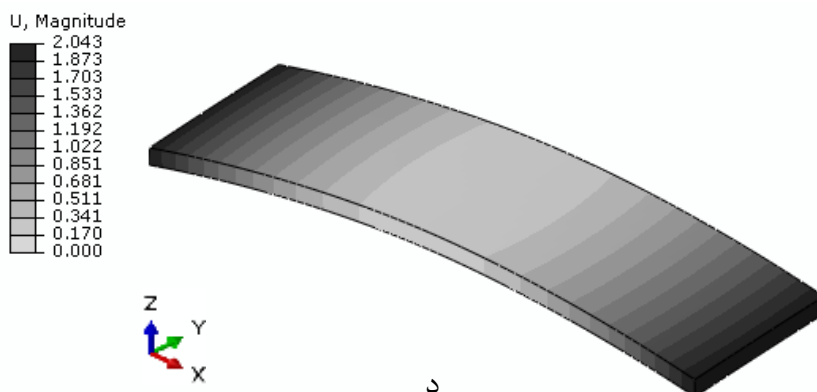
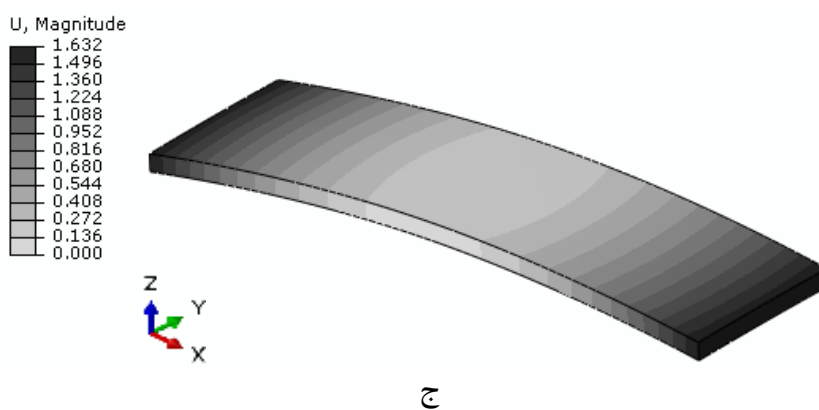
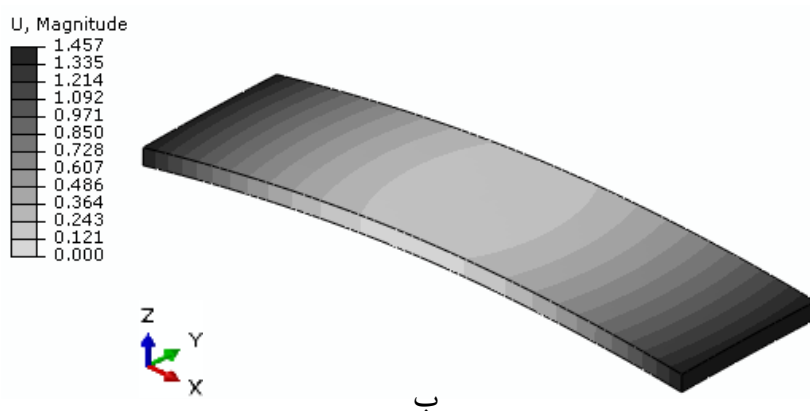
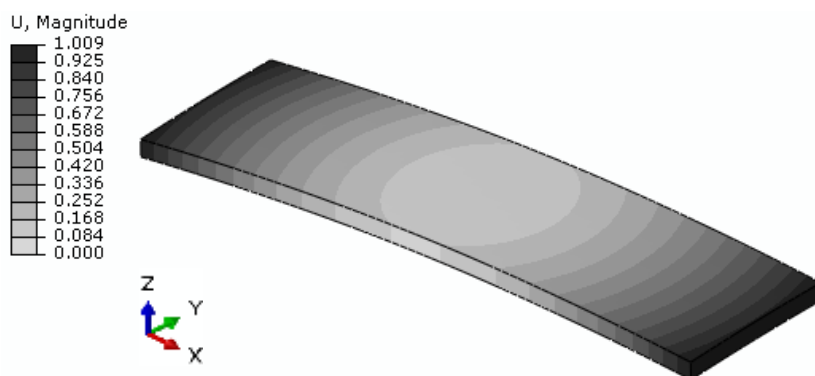


د

شکل ۴-۱۳- تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیومی از جنس Al ۶۰۶۱-T۶ به‌ازای پروفیل‌های تنش به‌دست

آمده از برخورد $n = 90$ ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm و سرعت $V = 75$ m/s (الف) $R_p = \infty$ (ب) $R_p = 500$ mm

(ج) $R_p = 375$ mm (د) $R_p = 250$ mm (تغییر شکل بر حسب mm)

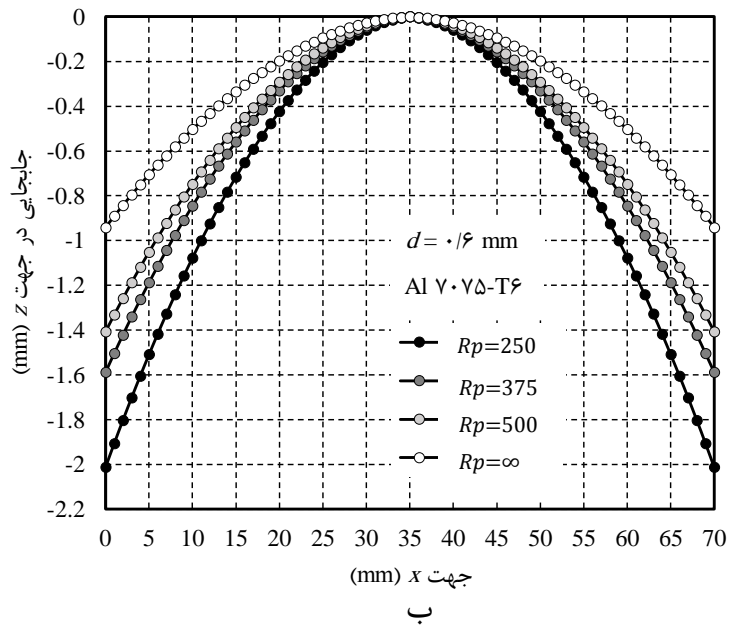
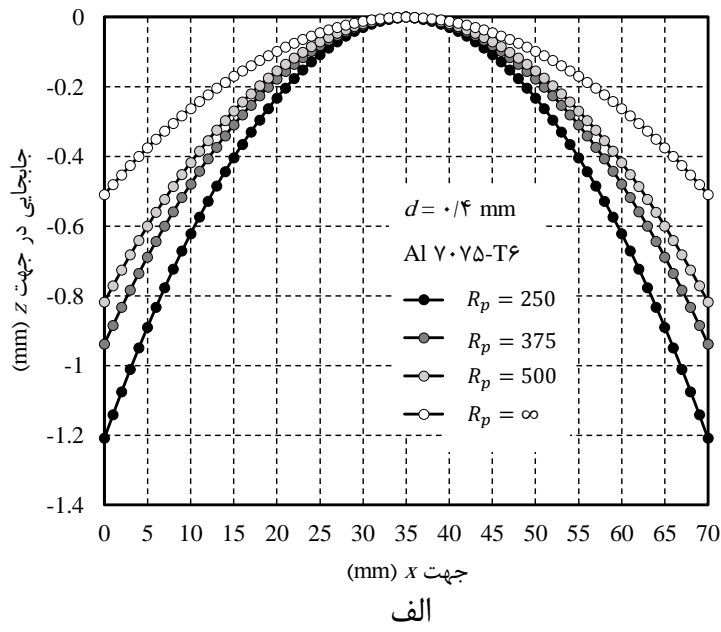


شکل ۴-۱۴- تغییر شکل ایجاد شده در نوارهای آلومینیمی از جنس Al ۷۰۷۵-T۶ به‌ازای پروفیل‌های تنش به‌دست

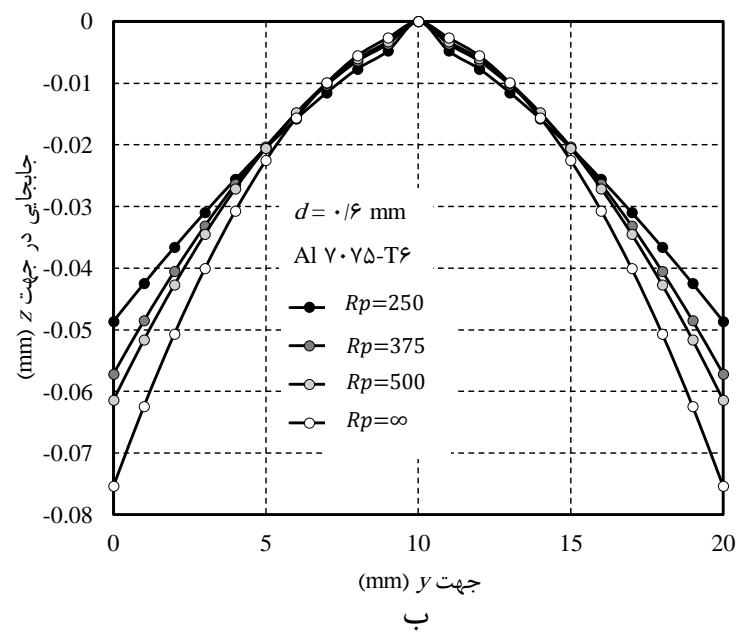
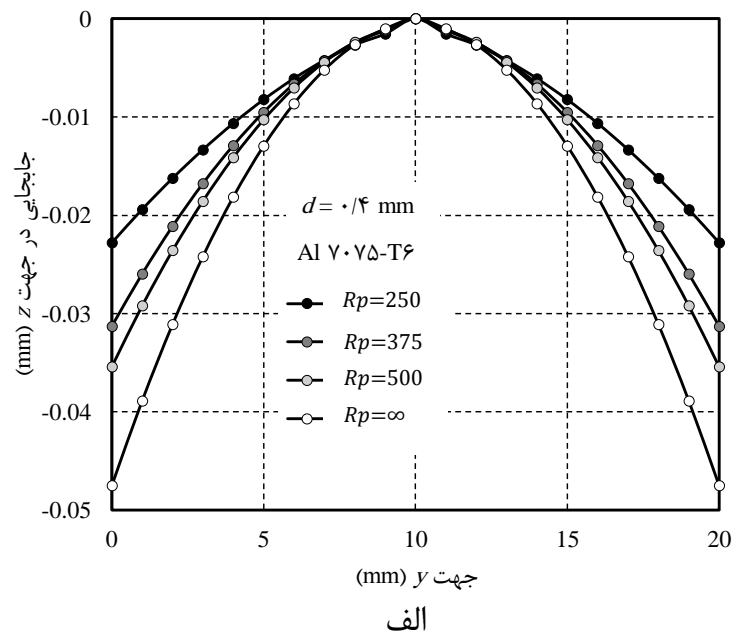
آمده از برخورد $n = ۹۰$ ساچمه با قطر $d = ۰/۶$ mm و سرعت $V = ۷۵$ m/s (الف) $R_p = \infty$ (ب) $R_p = ۵۰۰$ mm

(ج) $R_p = ۳۷۵$ mm (د) $R_p = ۲۵۰$ mm (تغییر شکل بر حسب mm)

شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ نمودارهای جابه‌جایی در جهت z را برای نوار آلومینیمی Al ۷۰۷۵-T۶، در شعاع‌های پیش‌خمش مختلف، به ترتیب در راستای x و y نشان می‌دهد. در شکل ۴-۱۵ (الف و ب)، می‌توان مشاهده کرد که با کاهش شعاع پیش‌خمش یا به عبارت دیگر افزایش ممان پیش‌خمش در جهت x ، انحنای ایجاد شده در این جهت افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان دید که انحنای ایجاد شده در شعاع پیش‌خمش $R_p = \infty$ یعنی زمانی که ورق در حالت تخت قرار دارد نسبت به حالتی که دارای پیش‌خمش است، بیشتر است. از مقایسه‌ی دو حالت الف و ب شکل ۴-۱۵ نیز می‌توان دید که افزایش قطر ساچمه، انحنای بزرگتری را در جهت x ایجاد کرده است. در مقابل از شکل ۴-۱۶ می‌توان دریافت که با کاهش شعاع پیش‌خمش در جهت x ، انحنای ایجاد شده در جهت y کاهش می‌یابد.



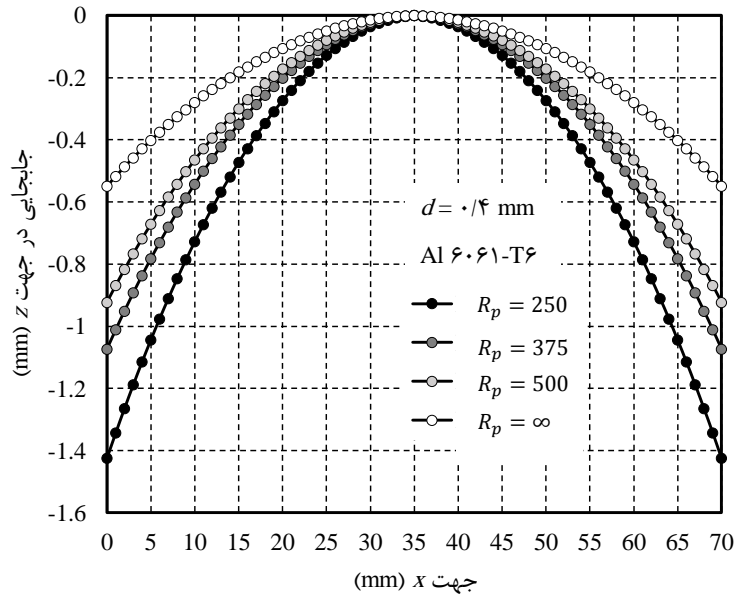
شکل ۴-۱۵- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیومی Al 7075-T6 در راستای x (الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm



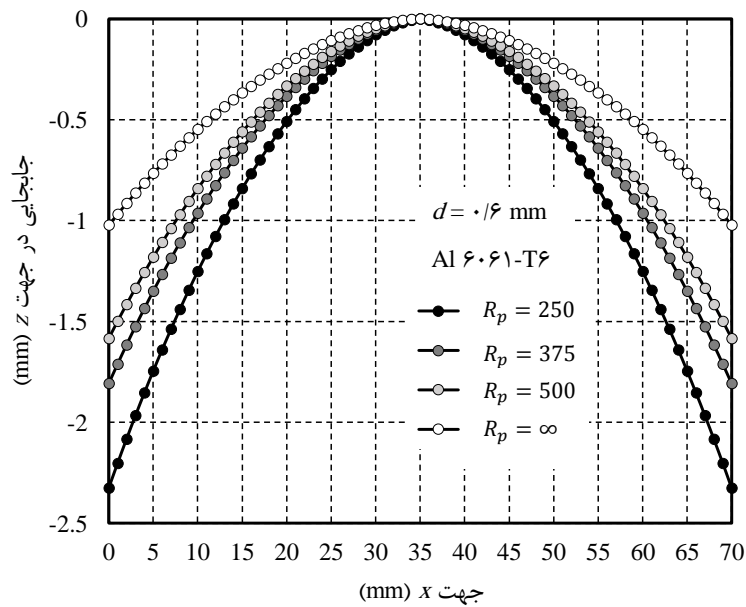
شکل ۴-۱۶- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیومی Al 7075-T6 در راستای y ، الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4 \text{ mm}$ (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$

شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ نمودارهای جابه‌جایی در جهت z را برای نوار آلومینیومی Al 6061-T6، در شعاع‌های پیش‌خمش مختلف، به ترتیب در راستای x و y نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مطالب گفته شده در مورد اشکال ۴-۱۵ و ۴-۱۶، در مورد این نمودارها نیز صادق است. با توجه به شکل‌های ذکر

شده، از مقایسه‌ی دو آلیاژ آلومینیم $Al\ 7075-T6$ و $Al\ 6061-T6$ ، می‌توان دریافت با افزایش سختی و تنش تسلیم ورق آلومینیمی، انحنای ایجاد شده در آن کاهش می‌یابد.

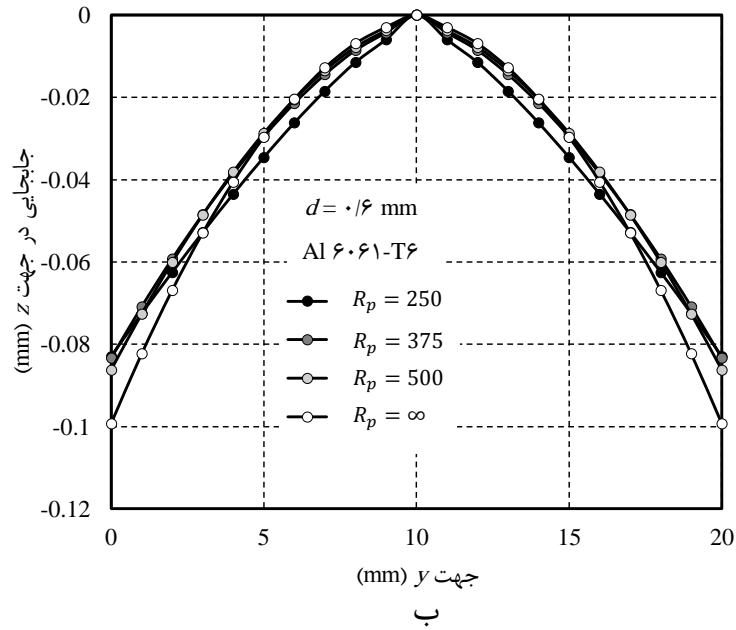
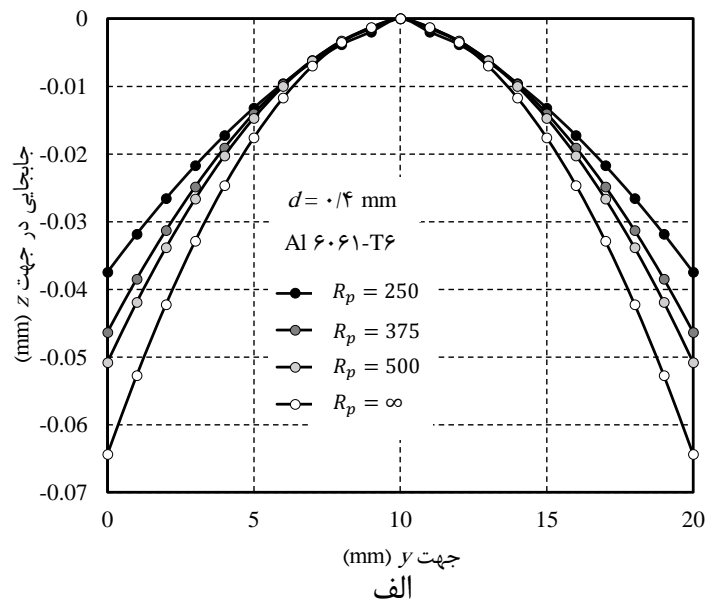


الف



ب

شکل ۴-۱۷- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیمی $Al\ 6061-T6$ در راستای x (الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4\text{ mm}$ (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6\text{ mm}$



شکل ۴-۱۸- نمودار جابجایی در جهت z برای نوار آلومینیومی Al ۶۰۶۱-T۶ در راستای y ، الف) برای ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm (ب) برای ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm

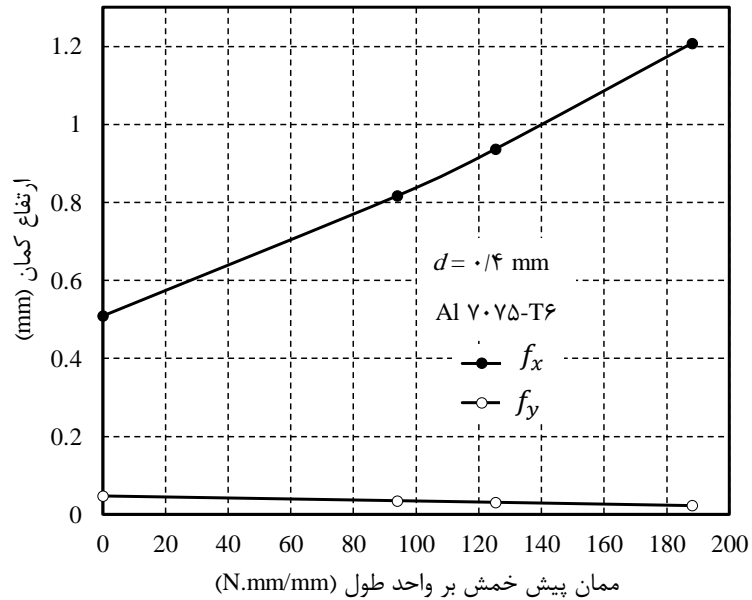
در جدول ۴-۲، ارتفاع کمان و شعاع انحنای نوارهای آلومینیومی شبیه‌سازی شده، برای آلیاژهای آلومینیوم Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ آورده شده است.

جدول ۴-۲- ارتفاع کمان و شعاع انحنای به دست آمده از شبیه سازی برای آلیاژهای آلومینیم T۶-۷۵-۷۰ Al و T۶-۶۱-۶۰ Al

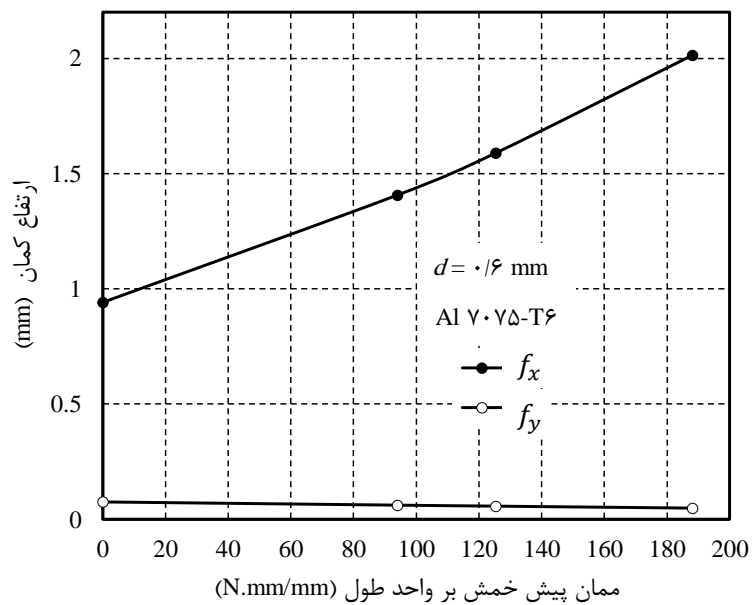
شعاع انحنا در جهت x و y (mm)		ارتفاع کمان در جهت x و y (mm)		شعاع پیش خمش R_p (mm)	قطر ساچمه (mm)	جنس ورق
R_y	R_x	f_y	f_x			
۶۶۳/۱۷	۶۵۱/۱۷	۰/۰۷۵۴	۰/۹۴۱۳	∞	۰/۶	Al ۷۰۷۵-T۶
۸۱۴/۳۶	۴۳۶/۰۳	۰/۰۶۱۴	۱/۴۰۷	۵۰۰		
۸۷۵/۶۹	۳۸۶/۲۶	۰/۰۵۷۱	۱/۵۸۹	۳۷۵		
۱۰۲۸/۸۳	۳۰۵/۲۸	۰/۰۴۸۶	۲/۰۱۳	۲۵۰		
۱۰۵۲/۶۶	۱۲۰۳/۵۹	۰/۰۴۷۵	۰/۵۰۹	∞	۰/۴	
۱۴۱۲/۴۵	۷۵۰/۱۰	۰/۰۳۵۴	۰/۸۱۷	۵۰۰		
۱۵۹۷/۴۶	۶۵۴/۱۵	۰/۰۳۱۳	۰/۹۳۷	۳۷۵		
۲۱۹۲/۹۹	۵۰۷/۶۴	۰/۰۲۲۸	۱/۲۰۸	۲۵۰		
۵۰۳/۵۷	۵۹۹/۲۴	۰/۰۹۹۳	۱/۰۲۳	∞	۰/۶	Al ۶۰۶۱-T۶
۵۸۰/۰۹	۳۸۷/۲۳	۰/۰۸۶۲	۱/۵۸۵	۵۰۰		
۵۹۹/۵۶	۳۳۹/۴۹	۰/۰۸۳۴	۱/۸۰۹	۳۷۵		
۶۰۳/۱۸	۲۶۴/۳۸	۰/۰۸۲۹	۲/۳۲۷	۲۵۰		
۷۷۶/۴۳	۱۱۱۵/۹۴	۰/۰۶۴۴	۰/۵۴۹	∞	۰/۴	
۹۸۴/۲۸	۶۶۴/۷۸	۰/۰۵۰۸	۰/۹۲۲	۵۰۰		
۱۰۷۹/۹۴	۵۷۱/۳۷	۰/۰۴۶۳	۱/۰۷۳	۳۷۵		
۱۳۳۳/۳۵	۴۳۰/۵۴	۰/۰۳۷۵	۱/۴۲۵	۲۵۰		

با توجه به شکل ۴-۱۵ الی شکل ۴-۱۸ و جدول ۴-۲ می توان گفت، بین فرمینگ رایج انحنای همسانگردی در جهت های x و y ایجاد می کند، درحالی که استرس بین فرمینگ انحنای متفاوتی در جهت های x و y ایجاد می کند. بعلاوه، به ازای پارامترهای پینینگ یکسان، استرس بین فرمینگ در مقایسه با بین فرمینگ رایج، جابجایی بزرگتری در جهت z ایجاد کرده است. همچنین مشاهده می شود با افزایش ممان پیش خمش (کاهش شعاع پیش خمش)، جابجایی ایجاد شده در جهت z افزایش پیدا می کند.

شکل ۴-۱۹ الی شکل ۴-۲۲، رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش با ارتفاع کمان و شعاع انحنای ایجاد شده در نوار آلومینیومی را برای دو آلیاژ آلومینیوم Al ۶۰۶۱-T۶ و Al ۷۰۷۵-T۶ و دو قطر ساچمه‌ی $d = ۰/۴ \text{ mm}$ و $d = ۰/۶ \text{ mm}$ نشان می‌دهد.

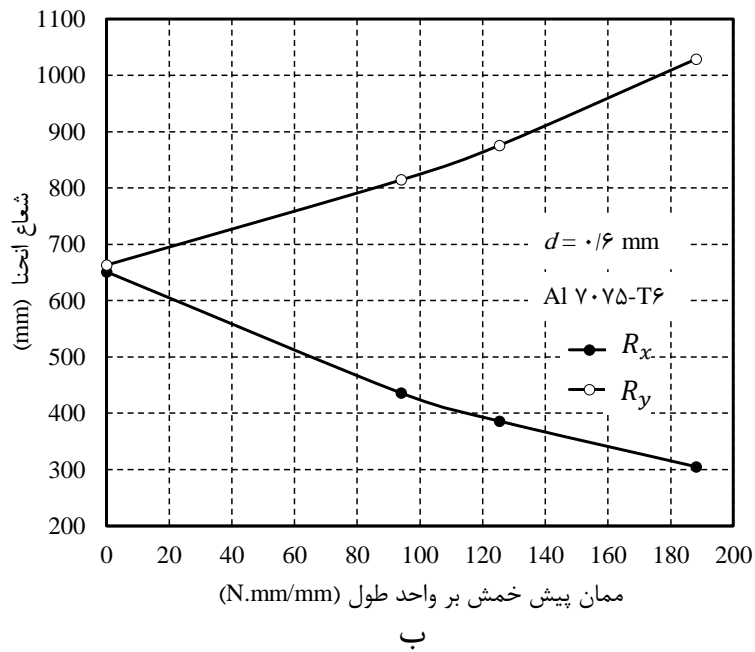
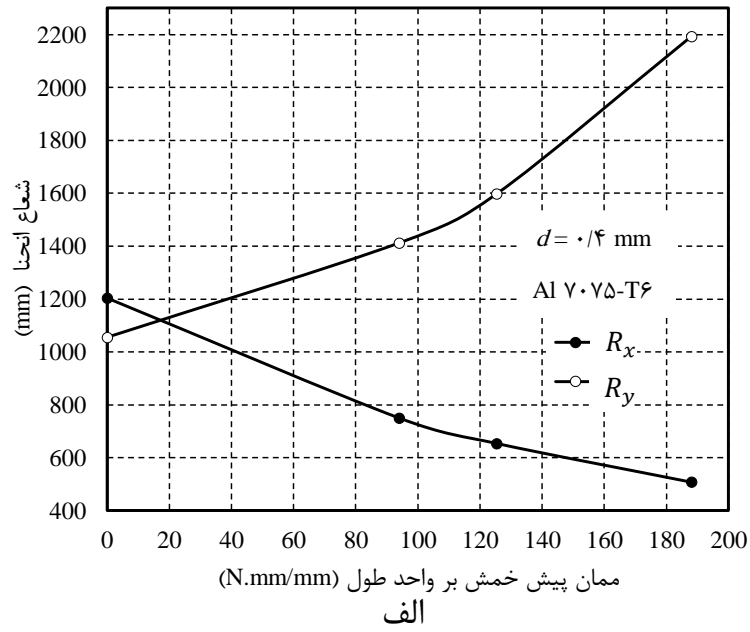


الف

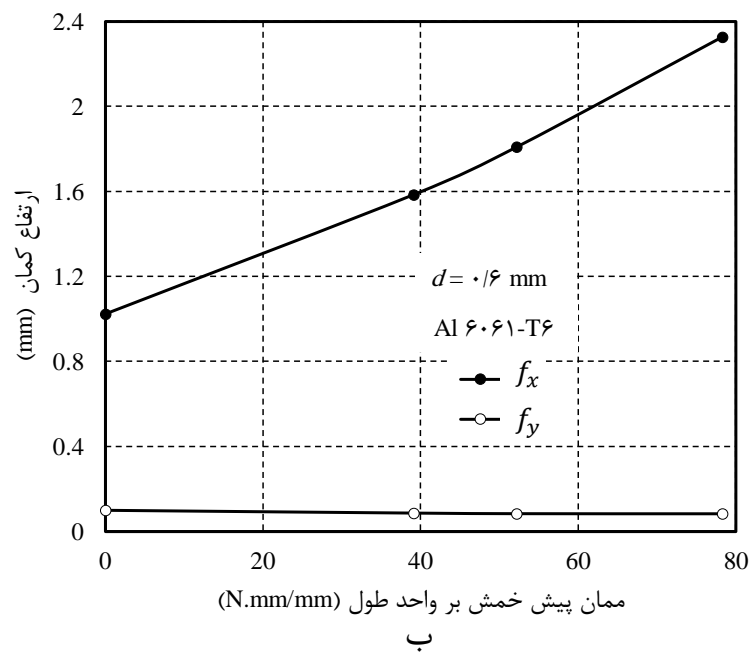
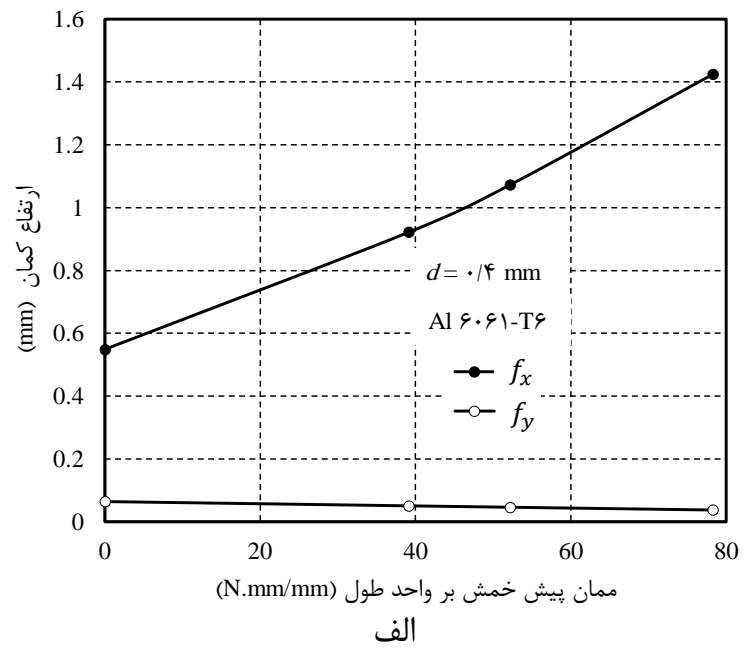


ب

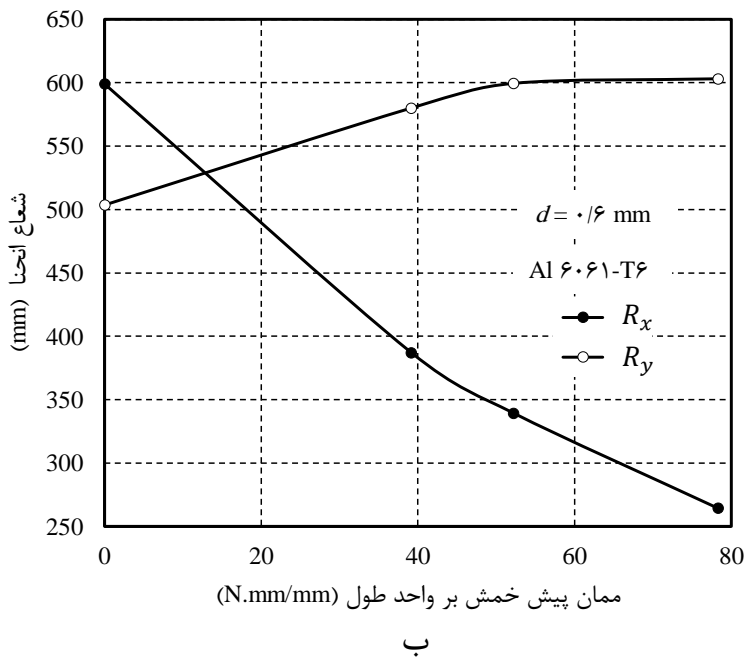
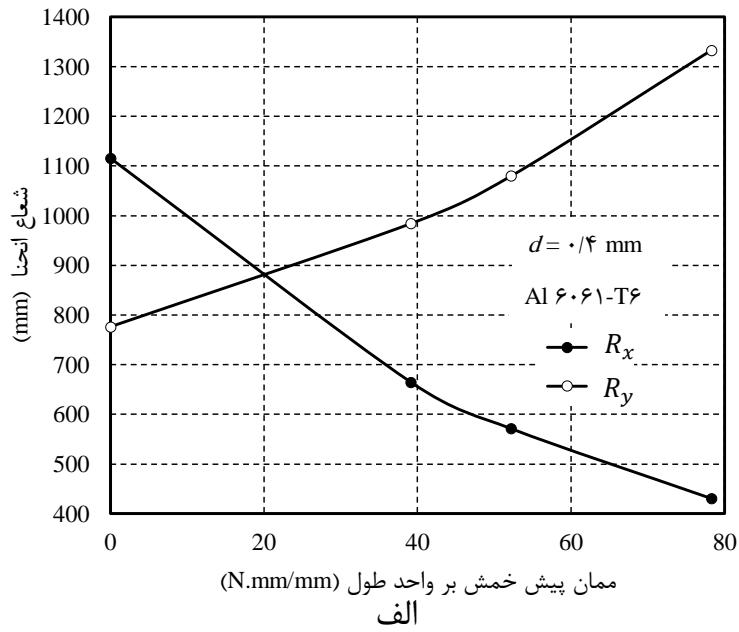
شکل ۴-۱۹- رابطه‌ی بین ممان پیش‌خمش بر واحد طول با ارتفاع کمان برای آلیاژ آلومینیوم Al ۷۰۷۵-T۶،
 الف) برای قطر ساچمه $d = ۰/۴ \text{ mm}$ ب) برای قطر ساچمه $d = ۰/۶ \text{ mm}$



شکل ۴-۲۰- رابطه‌ی بین ممان پیش خمش بر واحد طول با شعاع انحنا برای آلیاژ آلومینیم Al 7075-T6، الف) برای قطر ساچمه $d = 0.4 \text{ mm}$ (ب) برای قطر ساچمه $d = 0.6 \text{ mm}$



شکل ۴-۲۱- رابطه‌ی بین ممان پیش خمش بر واحد طول با ارتفاع کمان برای آلیاژ آلومینیم Al 6061-T6. الف) برای قطر ساچمه $d = 0.4 \text{ mm}$ ب) برای قطر ساچمه $d = 0.6 \text{ mm}$



شکل ۴-۲۲- رابطه‌ی بین ممان پیش خمش بر واحد طول با شعاع انحنا برای آلیاژ آلومینیوم Al 6061-T6، الف) برای قطر ساچمه $d = 0.4$ mm (ب) برای قطر ساچمه $d = 0.6$ mm

با توجه به جدول ۴-۲ و شکل ۴-۱۹ الی شکل ۴-۲۲، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

❖ با افزایش ممان پیش خمش، ارتفاع کمان در جهت x (f_x) افزایش و ارتفاع کمان در جهت y

(f_y) کاهش می‌یابد.

❖ با افزایش ممان پیش خمش، شعاع انحنا در جهت x (R_x) کاهش و شعاع انحنا در جهت y (R_y) افزایش می‌یابد.

❖ در مورد استرس پین فرمینگ، شعاع انحنا در جهت x (R_x) کوچک‌تر از شعاع انحنا در جهت y (R_y) است.

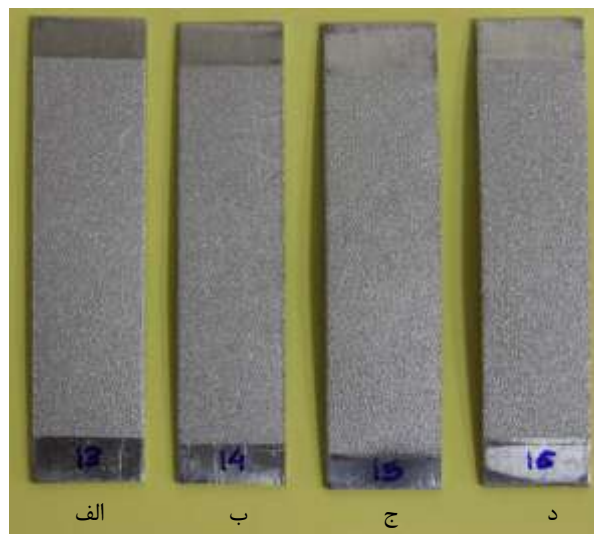
❖ استرس پین فرمینگ در مقایسه با پین فرمینگ متداول ($M_x^{pre}=0$)، ارتفاع کمان در جهت x (f_x) بزرگ‌تر و ارتفاع کمان در جهت y (f_y) کوچکتری ایجاد می‌کند.

میائو و همکارانش [۲۱] نیز در مطالعه‌ی استرس پین فرمینگ، به نتایجی مشابه با نتایج فوق دست یافته بودند.

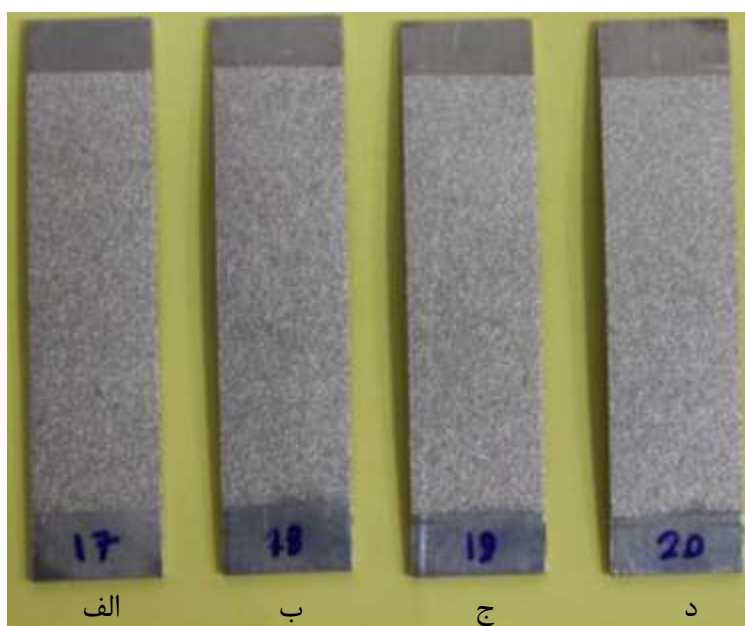
۲-۴ نتایج تجربی

۱-۲-۴ شکل‌دهی ورق

شکل ۴-۲۳، نوارهای از جنس Al ۶۰۶۱-T۶ را پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm و زمان پینینگ ۴ دقیقه نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴-۲۴، نوارهای از جنس Al ۷۰۷۵-T۶ را پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = 0.6$ mm و زمان پینینگ ۵ دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۳- نوارهای از جنس Al ۶۰۶۱-T۶ پس از ساچمه‌زنی با ساچمه با قطر $d = 0.4$ mm و زمان پینینگ ۴ دقیقه، (الف) $R_p = \infty$ (ب) $R_p = 50.0$ mm (ج) $R_p = 375$ mm (د) $R_p = 250$ mm



شکل ۴-۲۴- نوارهای از جنس Al 7075-T6 پس از ساچمه زنی با ساچمه با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ و زمان پینینگ ۵ دقیقه، الف ($R_p = \infty$) ب ($R_p = 500 \text{ mm}$) ج ($R_p = 375 \text{ mm}$) د ($R_p = 250 \text{ mm}$)

شکل ۴-۲۵، تأثیر قطر ساچمه را روی زبری سطح نمونه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت، افزایش قطر ساچمه باعث افزایش زبری سطح می‌شود.



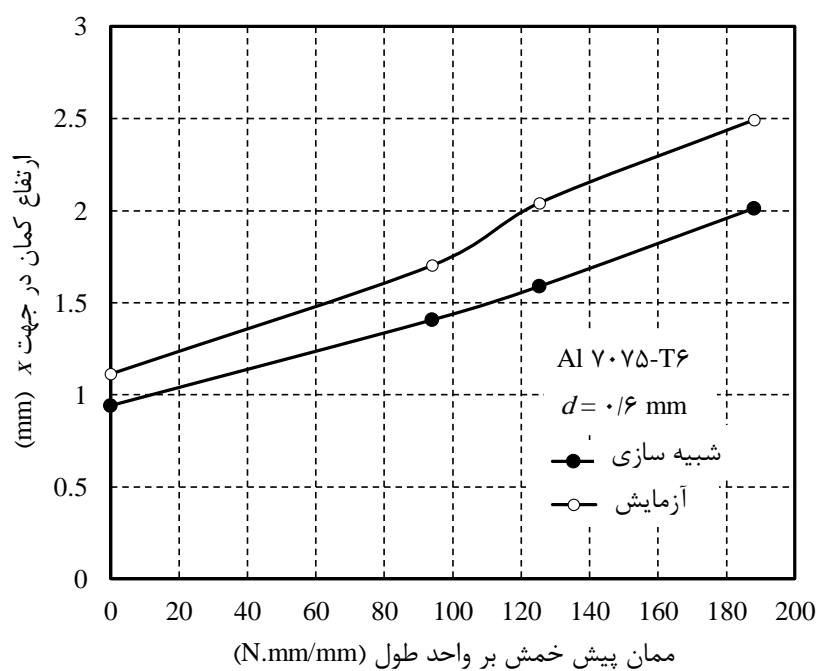
شکل ۴-۲۵- تأثیر ساچمه روی زبری سطح نمونه‌ها، الف) استفاده از قطر ساچمه $d = 0.4 \text{ mm}$ ب) استفاده از قطر ساچمه $d = 0.6 \text{ mm}$

در جدول ۳-۴، ارتفاع کمان و شعاع انحنای نوارهای آلومینیمی به دست آمده از آزمایش‌های تجربی، برای آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ و Al ۶۰۶۱-T۶ آورده شده است.

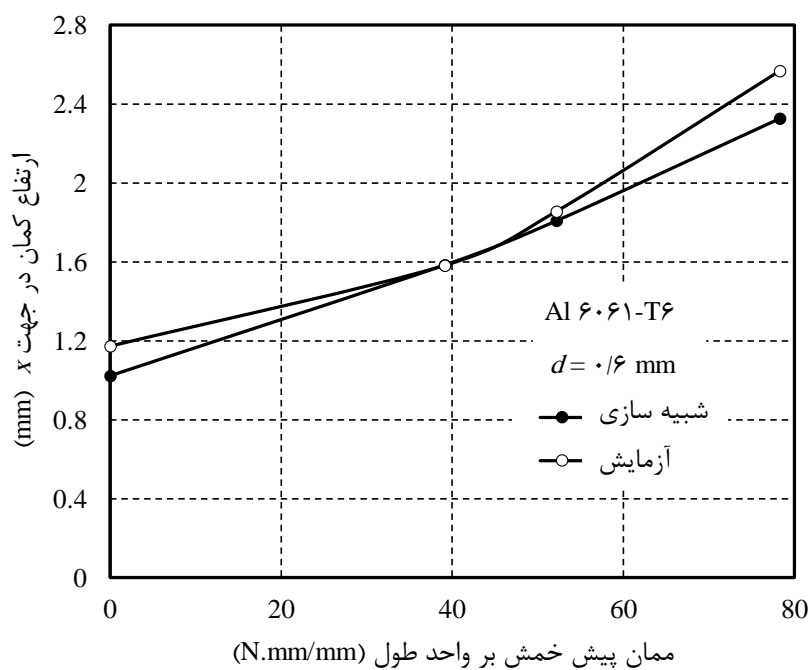
جدول ۳-۴- ارتفاع کمان و شعاع انحنای به دست آمده از آزمایش‌های تجربی برای آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ و Al ۶۰۶۱-T۶

شعاع انحنا در جهت R_x (mm) x	ارتفاع کمان در جهت f_x (mm) x	شعاع پیش- خم R_p (mm)	قطر ساجمه (mm)	جنس ورق
۵۵۰/۸۷	۱/۱۱۳	∞	۰/۶	Al ۷۰۷۵-T۶
۳۶۰/۵۱	۱/۷۰۳	۵۰۰		
۳۰۰/۹۷	۲/۰۴۲	۳۷۵		
۲۴۶/۹۳	۲/۴۹۳	۲۵۰		
۵۲۲/۷۵۲	۱/۱۷۳	∞	۰/۶	Al ۶۰۶۱-T۶
۳۸۷/۷۲	۱/۵۸۳	۵۰۰		
۳۳۰/۷۲	۱/۸۵۷	۳۷۵		
۲۳۹/۷	۲/۵۶۹	۲۵۰		

در شکل ۴-۲۶، ارتفاع کمان نوار آلومینیمی به‌ازای برخورد ساجمه با قطر $d = ۰/۶$ mm به ترتیب برای آلیاژ آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ و Al ۶۰۶۱-T۶، در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی با مقایسه شده است.



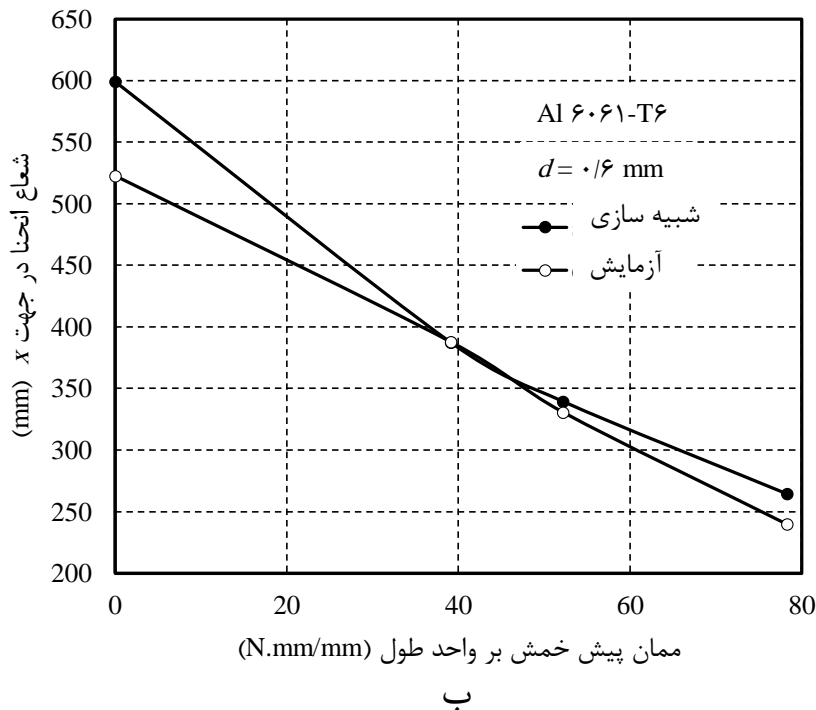
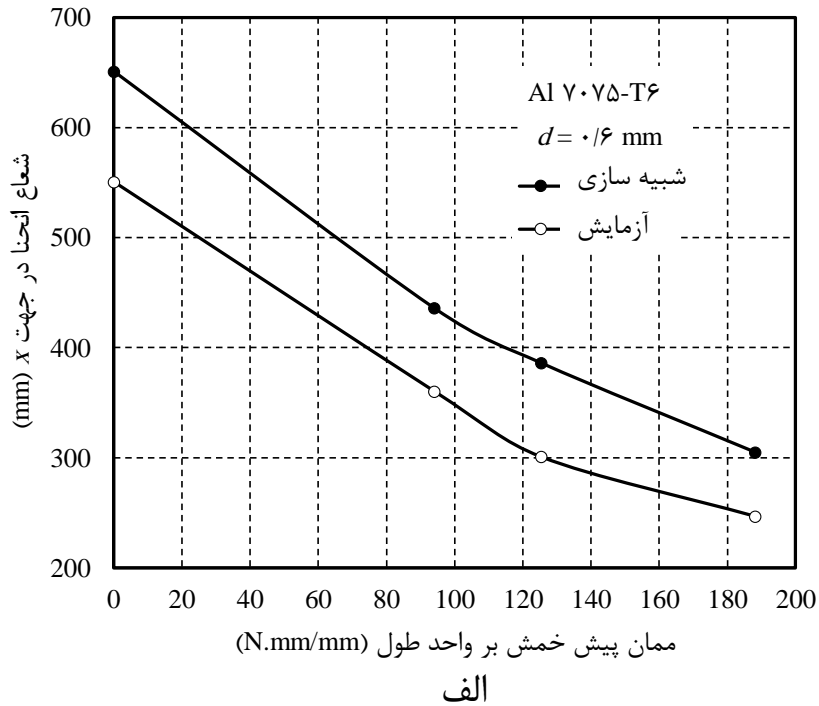
الف



ب

شکل ۴-۲۶- مقایسه‌ی ارتفاع کمان نوار آلومینیومی به‌ازای برخورد ساچمه با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی، الف) برای آلیاژ Al 7075-T6 ب) برای آلیاژ Al 6061-T6

شکل ۴-۲۷، شعاع انحنای نوار آلومینیمی به‌ازای برخورد ساچمه با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ را به‌ترتیب برای آلیاژ آلومینیم $\text{Al } 7075\text{-T6}$ و $\text{Al } 6061\text{-T6}$ ، در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی با هم مقایسه کرده است.



شکل ۴-۲۷- مقایسه‌ی شعاع انحنای نوار آلومینیمی به‌ازای برخورد ساچمه با قطر $d = 0.6 \text{ mm}$ در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی، الف) برای آلیاژ $\text{Al } 7075\text{-T6}$ (ب) برای آلیاژ $\text{Al } 6061\text{-T6}$

با توجه به جدول ۳-۴ و شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۲۷، می‌توان گفت در بخش تجربی نیز مانند بخش شبیه‌سازی، با افزایش ممان پیش‌خمش (کاهش شعاع پیش‌خمش) در جهت x ، ارتفاع کمان در جهت x افزایش و شعاع انحنا در جهت x کاهش می‌یابد. با توجه به کم بودن ارتفاع کمان نوار آلومینیمی در جهت y و در دسترس نبودن وسیله‌ی اندازه‌گیری با دقت بالا، نتایج مربوط به ارتفاع کمان و شعاع انحنا در جهت y بیان نشده است.

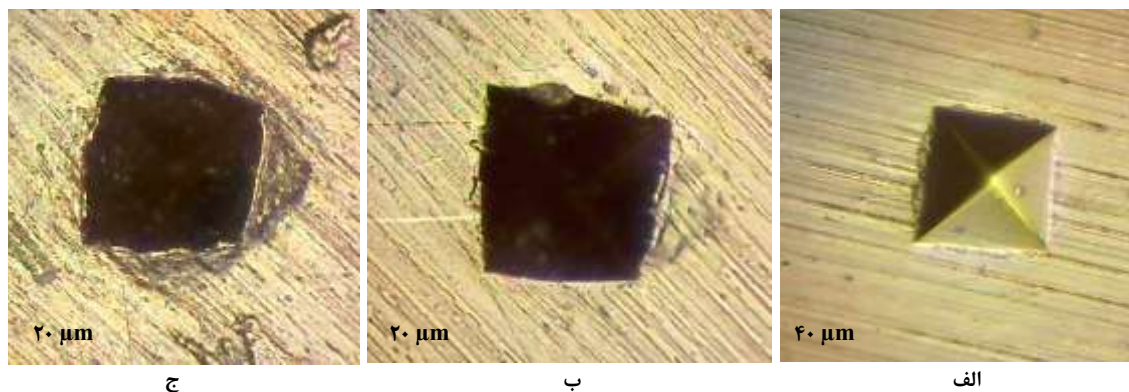
اختلاف بین نتایج تجربی و عددی می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. از جمله اینکه دستگاه ساچمه‌زنی استفاده شده، مختص فرایند پین فرمینگ نبوده و بنابراین نمی‌توان کنترل زیادی روی پارامترهای فرایند داشت. همچنین ورق آلومینیمی به کار رفته نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد و داشتن اطلاعات دقیق‌تری راجع به خواص ورق، به دقیق‌تر شدن شبیه‌سازی عددی کمک کند. بنابراین برای انطباق بیشتر نتایج شبیه‌سازی و تجربی، از یک سو باید جزئیات بیشتری از فرایند را در شبیه‌سازی المان محدود مد نظر قرار داده و از سوی دیگر بایستی با بهبود آزمایش‌ها، شرایط مناسب و کنترل شده‌تری برای انجام فرایند ایجاد کرد.

۴-۲-۲ اندازه‌گیری سختی

پس از اندازه‌گیری سختی، نتایج مطابق با جدول ۴-۴ برای نمونه‌ها به دست آمد. شکل ۴-۲۸، اثر فرورفتگی ایجاد شده روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴- نتایج اندازه‌گیری سختی

نمونه	سختی بر حسب ویکرز (HV)
ساچمه‌ی فولادی ریختگی	۵۰۰
ورق آلومینیمی از جنس Al ۷۰۷۵-T۶	۱۷۰
ورق آلومینیمی از جنس Al ۶۰۶۱-T۶	۸۵



شکل ۴-۲۸- اثر ایجاد شده توسط فرورونده‌ی ویکرز روی نمونه‌ها

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، به مطالعه‌ی فرایندهای ساچمه‌زنی، پین فرمینگ و استرس پین فرمینگ از طریق شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی پرداخته شد. در شبیه‌سازی عددی، ابتدا جهت شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی یک مدل المان محدود سه‌بعدی ایجاد شد. در این مورد ابتدا از بررسی مدل برخورد یگانه‌ی ساچمه، پارامترهای مناسب مورد نیاز جهت شبیه‌سازی از جمله: ابعاد مدل، اندازه‌ی المان‌ها، شرایط مرزی و ... به دست آمد. سپس با استفاده از این نتایج، مدل چندگانه‌ی برخورد تصادفی تعداد بیشتری ساچمه ایجاد شد. بر اساس این مدل المان محدود تصادفی سه‌بعدی، در طی روندی سه‌مرحله‌ای به شبیه‌سازی فرایند پین فرمینگ با و بدون پیش‌کرنش الاستیک پرداخته شد. در مرحله‌ی اول، در یک تحلیل المان محدود ضمنی در نرم افزار آباکوس، ممان پیش‌خمش جهت ایجاد پیش‌کرنش الاستیک، به بلوکی آلومینیمی اعمال گردید. سپس در تحلیل صریح، ضربات ساچمه‌ها روی بلوک آلومینیمی دارای پیش‌کرنش الاستیک، شبیه‌سازی و توزیع تنش‌ها درون بلوک به دست آمد. سرانجام در تحلیل ضمنی دیگر، با اعمال نیروهای کششی عکس‌العمل و ممان‌های خمشی عکس‌العمل به المان پوسته، شکل‌دهی ورق آلومینیمی شبیه‌سازی شد. جهت انجام آزمایش‌های تجربی از ساچمه‌های فولادی با قطرهای ۰/۴ mm و ۰/۶ mm و نوارهایی از جنس آلیاژهای آلومینیم Al ۷۰۷۵-T۶ و Al ۶۰۶۱-T۶ استفاده شد. همچنین برای اعمال پیش‌کرنش الاستیک، قیدهایی با چهار شعاع پیش‌خمش متفاوت ∞ ، ۵۰۰ mm، ۳۷۵ mm و ۲۵۰ mm طراحی و ساخته شد. نتایج نشان داد به‌ازای پارامترهای پینینگ یکسان، استرس پین فرمینگ در مقایسه با پین فرمینگ متداول انحنای بزرگتری در ورق ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش ممان پیش‌خمش (کاهش شعاع پیش‌خمش)، انحنای ایجاد شده در جهت اعمال پیش‌خمش افزایش می‌یابد.

۲-۵ پیشنهادها

در پایان‌نامه‌ی حاضر فرض‌ها و ساده‌سازی‌های انجام گرفته که بهتر است در کارهای آینده مورد توجه و بررسی بیشتر قرار گیرد. در مورد مدل المان محدود سه‌بعدی تصادفی مربوط به فرایند ساچمه‌زنی، می‌توان بیان کرد:

- در توزیع تصادفی ساچمه‌ها، فرض شده که فاصله‌ی بین هر ساچمه تأثیر کمی روی نتایج دارد. بنابراین بهتر است مطالعات بیشتری با فواصل ساچمه‌ی متفاوت انجام گیرد تا تأثیر این موضوع روشن شود.

- در شبیه‌سازی‌ها، ماده مستقل از نرخ کرنش در نظر گرفته شده، بنابراین پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده اثر حساسیت به نرخ کرنش بررسی شده و همچنین در مورد قانون ساختاری ماده نیز مطالعات بیشتری صورت گیرد.

- در بحث آزمایشگاهی، با توجه به محدودیت امکانات، اندازه‌گیری تنش پسماند نمونه‌های ساچمه‌زنی شده انجام نگرفته است. توصیه می‌شود در کارهای آینده تنش پسماند اندازه‌گیری و پروفیل حاصل با پروفیل تنش پسماند به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی مقایسه شود.

- در کار حاضر ورق به‌صورت همسانگرد در نظر گرفته شده که در مطالعات آینده می‌توان اثر ناهمسانگردی ورق را نیز مورد بررسی قرار داد.

- بهینه‌سازی مدل سه‌بعدی تصادفی ساچمه‌زنی، بحثی است که می‌تواند به آن پرداخته شود.

در این پایان‌نامه، مطالعه‌ای مقدماتی روی فرایند استرس پین فرمینگ انجام گرفت و نتایج فقط روی ورق‌ی با ابعاد کوچک و با شکل ساده به‌دست آمد. مطالعات آینده می‌تواند روی قطعات با ابعاد بزرگ‌تر و اشکال پیچیده‌تر یا قطعات دارای استحکام‌دهنده که به پنل‌ها و پوسته‌های بال واقعی نزدیک‌تر هستند، متمرکز شود.

منابع

- [1] E. Hawkinson and B. Hotel, "Shot peening history," *SAE ISTC Division*, vol. 20, pp. 1-7, 1962.
- [2] J. Champaigne, "History of Shot Peening Specifications," *Shot Peener*, vol. 20, p. 12, 2006.
- [3] S. Meguid, G. Shagal, and J. Stranart, "3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, pp. 119-134, 2002.
- [4] S. Meguid, G. Shagal, J. Stranart, and J. Daly, "Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 31, pp. 179-191, 1999.
- [5] H. Miao, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, "On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening," *Advances in Engineering Software*, vol. 40, pp. 1023-1038, 2009.
- [6] S. Kyriacou, "Shot peening mechanics, a theoretical study," in *Proceedings of the Sixth International Conference on Shot Peening, San Francisco, CA, 1996*, pp. 505-16.
- [7] R. Herzog, W. Zinn, B. Scholtes, and H. Wohlfahrt, "The significance of Almen intensity for the generation of shot peening residual stresses," *stress*, vol. 10, p. 11, 1996.
- [8] J. O. Almen and P. H. Black, *Residual stresses and fatigue in metals*: McGraw-Hill New York, 1963.
- [9] J. Champaigne .The little book on shot peening [Online]. Available: www.shotpeener.com/learning/tlb.pdf
- [10] D. Kirk, "Shot peening," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 71, pp. 349-361, 1999.
- [11] M. Torres and H. Voorwald, "An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel," *International Journal of Fatigue*, vol. 24, pp. 877-886, 2002.
- [12] R. Fathallah, G. Inglebert, and L. Castex, "Prediction of plastic deformation and residual stresses induced in metallic parts by shot peening," *Materials science and technology*, vol. 14, pp. 631-639, 1998.
- [13] A. Bignonnet, L. Picouet, H. Lieurade, and L. Castex, "The application of shot peening to improve the fatigue life of welded steel structures," in *Proceedings of the 3rd Conference on Steel in Marine Structures*, 1987, pp. 669-678.
- [14] G. Balcar and F. Maltby, "Basic curves of surface finish after glass bead peening," in *Proceedings of the 1st International Conference on Shot Peening. Paris, France, 1981*, pp. 295-301.
- [15] D. Baughman, "An overview of peen forming technology," in *Proceedings of the 2nd international conference on shot peening*, 1984, pp. 28-33.
- [16] R. VanLuchene, J. Johnson, and R. Carpenter, "Induced stress relationships for wing skin forming by shot peening," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 4, pp. 283-290, 1995.

- [17] A. Gariépy, J. Cyr, A. Levers, C. Perron, P. Bocher, and M. Lévesque, "Potential applications of peen forming finite element modelling," *Advances in Engineering Software*, vol. 52, pp. 60-71, 2011.
- [18] S. Al-Hassani, "Mechanical aspects of residual stress development in shot peening," 1981.
- [19] A. Gariépy, S. Larose, C. Perron, P. Bocher, and M. Lévesque, "On the effect of the peening trajectory in shot peen forming," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 69, pp. 48-61, 2013.
- [20] www.metalimprovement.com.
- [21] H. Y. Miao, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, "Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation," *Advances in Engineering Software*, vol. 42, pp. 963-975, 2011.
- [22] G. Majzoubi, R. Azizi, and A. Alavi Nia, "A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164, pp. 1226-1234, 2005.
- [23] Y. Al-Obaid, "Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis," *Mechanics of Materials*, vol. 19, pp. 251-260, 1995.
- [24] M. Kobayashi, T. Matsui, and Y. Murakami, "Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening," *International Journal of Fatigue*, vol. 20, pp. 351-357, 1998.
- [25] Y. Al-Obaid, "A rudimentary analysis of improving fatigue life of metals by shot-peening," *Journal of applied mechanics*, vol. 57, pp. 307-312, 1990.
- [26] S. Al-Hassani, K. Kormi, and D. Webb, "Numerical simulation of multiple shot impact," in *Proceedings of the 7th International Conference on Shot Peening ICSP-7, Warsaw, Poland, 1999*.
- [27] K. Schiffner and C. Droste gen Helling, "Simulation of residual stresses by shot peening," *Computers & structures*, vol. 72, pp. 329-340, 1999.
- [28] T. Hong, J. Y. Ooi, and B. A. Shaw, "A numerical study of the residual stress pattern from single shot impacting on a metallic component," *Advances in Engineering Software*, vol. 39, pp. 743-756, 2008.
- [29] T. Kim, H. Lee, H. C. Hyun, and S. Jung, "Effects of Rayleigh damping, friction and rate-dependency on 3D residual stress simulation of angled shot peening," *Materials & Design*, vol. 46, pp. 26-37, 2013.
- [30] T. Wang, J. Platts, and A. Levers, "Finite element impact modelling for shot peen forming," in *ICSP-8, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002*, pp. 540-6.
- [31] K. Dai and L. Shaw, "Comparison between shot peening and surface nanocrystallization and hardening processes," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 463, pp. 46-53, 2007.
- [32] M. Zimmermann, V. Schulze, and J. Hoffmeister, "Finite element modelling of coverage effects during shot peening of IN718: Dedicated to Professor Dr. Hermann Riedel on the occasion of his 65th birthday," *International Journal of Materials Research*, vol. 101, pp. 951-962, 2010.
- [33] G. I. Mylonas and G. Labeas, "Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction," *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, pp. 4480-4494, 2011.
- [34] R. VanLuchene and E. Cramer, "Numerical modeling of a wing skin peen forming process," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 5, pp. 753-760, 1996.

- [35] S. Homer and R. Van Luchene, "Aircraft wing skin contouring by shot peening," *Journal of materials shaping technology*, vol. 9, pp. 89-101, 1991.
- [36] A. Levers and A. Prior, "Finite element analysis of shot peening," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80, pp. 304-308, 1998.
- [37] Y. Zeng, "Finite element simulation of shot peen forming," in *ICSP8, Garmisch-Partenkirchen, Germany*, 2002, p. 554.
- [38] X. Huang, Y. Zeng, and Z. Li, "Finite element simulation of peen forming process for the saddle shape," in *Technology and Innovation Conference, 2006. ITIC 2006. International*, 2006, pp. 1240-1242.
- [39] D. Gardiner and M. Platts, "Towards peen forming process optimisation," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Shot Peening, Warsaw, Poland*, 1999, pp. 235-243.
- [40] T. Wang, M. J. Platts, and A. Levers, "A process model for shot peen forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, pp. 15-20, 2006.
- [41] T. Yamada, M. Ikeda, T. Takahashi, S. Sugimoto, and T. Ohta, "Development of shot peening for wing integral skin for continental business jets," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 39, pp. 57-61, 2002.
- [42] L. Grasty and C. Andrew, "Shot peen forming sheet metal: finite element prediction of deformed shape," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 210, pp. 361-366, 1996.
- [43] K. Han, D. Owen, and D. Peric, "Combined finite/discrete element and explicit/implicit simulations of peen forming process," *engineering computations*, vol. 19, pp. 92-118, 2002.
- [44] A. Gariépy, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, "Shot peening and peen forming finite element modelling – Towards a quantitative method," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 48, pp. 2859-2877, 2011.
- [45] A. Gariépy, S. Larose, C. Perron, P. Bocher, and M. Lévesque, "On the effect of the orientation of sheet rolling direction in shot peen forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 926-938, 2013.
- [46] R. Kopp and H.-W. Ball, "Recent Developments in Shot Peen Forming," in *Proceedings of the 3rd international conference on shot peening*, 1987, pp. 297-308.
- [47] L. Kuohsiang, "Using stress peen-forming process for integrally stiffened wing panels," in *Proceedings of the 1st international conference on shot peening*, 1981, pp. 555-564.
- [48] H. Y. Miao, "Numerical and Theoretical Study of Shot Peening and Stress Peen Forming Process," *École Polytechnique de Montréal*, 2010.
- [49] K. Viveros, R. Ambriz, A. Amrouche, A. Talha, C. García, and D. Jaramillo, "Cold hole expansion effect on the fatigue crack growth in welds of a 6061-T6 aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, 2014.
- [50] M. Rahmat, R. Oskouei, R. Ibrahim, and R. Singh Raman, "The effect of electroless Ni-P coatings on the fatigue life of Al 7075-T6 fastener holes with symmetrical slits," *International Journal of Fatigue*, vol. 52, pp. 30-38, 2013.
- [51] M. Lasपालas, J. Gómez, F. Martín de la Escalera, R. Sánchez, and M. A. Jiménez, "Simulation of Peen Forming Process of Aluminum Aeronautic Panel," presented at the 2011 Simulia Customer Conference, 2011.
- [52] T. Kim, H. Lee, H. C. Hyun, and S. Jung, "A simple but effective FE model with plastic shot for evaluation of peening residual stress and its experimental

-
- validation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 5945-5954, 2011.
- [53] H. Y. Miao, D. Demers, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, "Experimental study of shot peening and stress peen forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 2089-2102, 2010.

Abstract

Shot peening is a well-known process to improve fatigue life of various metallic components. This process lead to producing compressive residual stress near the surface of components that is beneficial to preventing initiating surface cracks and resistance to stress corrosion cracking. Peen forming is a method that is derived from shot peening and major application of this process is in aeronautic industries to produce large thin components with gentle curvatures such as aircraft panels and wing skins. This process can be divided into two categories; conventional peen forming and stress peen forming. In this thesis, numerical and experimental study of shot peening process and peen forming process with and without elastic pre-strain of sheet metals were conducted. In order to perform experimental tests, steel shots with 0.4 mm and 0.6 mm diameter and aluminum alloys Al 7075-T6 and Al 6061-T6 strips was used. In addition, for applying elastic pre-strain, fixtures with four different pre-bending radii ∞ , 500 mm, 375 mm and 250 mm were designed and manufactured. In numerical section, using same parameters as applied in experiments, first by using a 3D model with random distribution of shot, shot peening process is simulated and then employing this model, peen forming and stress peen forming were simulated in a three step procedure. In the first step, using implicit solver of Abaqus software, pre-bending moment is applied onto an aluminum block in order to produce elastic pre-strain. Then by in an explicit analysis, shot impacts onto an aluminum block with elastic pre-strain were simulated and the induced stress distribution inside block was obtain. Finally, in another implicit analysis, applying the reaction stretching forces and bending moments obtained from previous step, aluminum sheet metal forming is simulated. Results of experimental and numerical simulations were compared. The results shows that with same peening parameters, compared with conventional peen forming, stress peen forming produces larger curvatures in sheet metal. Furthermore, with increasing pre-bending moment (reducing pre-bending radius), the resultant curvature in the sheet in the direction of the applied pre-bending increases.

Keywords: Sheet metal forming, Finite element method, Residual stress, Shot peening, Peen forming, Stress peen forming



Shahrood University
Department of Mechanical Engineering

Thesis for Master of Science
In
Mechanical Engineering

Title
Numerical and Experimental Study on Stress Peen Forming of Sheet
Metals

Written by
Nasser Dabiri

Supervisor
Dr. Seyed Hadi Ghaderi

Advisor
Dr. Mahdi Gerdooei

September 2014