



دانشکده مهندسی مکانیک  
گروه جامدات

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل عددی و تجربی فرایند کشش هیدرومکانیکی  
ورق‌های چند لایه الیاف - فلزی

علیرضا سعادت فرد

اساتید راهنما

مهدی گردویی

عبدالحسین جلالی آقچای

بهمن ۱۳۹۴

## تقدیم نامہ

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

## سپاس‌گزاری

با تحمید ذات مقدس حضرت حق (جل جلاله) که توان انجام این پژوهش را به من عطا نمود و سلام و صلوات بر وجود پاک نبی اکرم (صلی الله علیه و آله و سلم) و اهل بیت مطهر ایشان و یگانه منجی عالم بشریت، قائم آل محمد (عج الله فرجه)؛ بر خود واجب می‌دانم تا از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی گردویی که در راستای انجام این پژوهش راهنمای اینجانب بودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم. در اینجا لازم است تا از تمامی اساتید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و سایر اعضای هیئت علمی و مسئولین دانشگاه صنعتی شاهرود که در دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد از حضورشان بهره‌ی علمی و معنوی بردم تشکر نمایم. در پایان از جناب آقای دکتر عبدالحسین جلالی آقچای، جناب آقای مهندس ابوالفضل طاهرخانی، مهندس امیرحسین ابوالقاسمی، مهندس فرزاد رحمنی، مهندس امید ارجمند و تمامی افرادی که در طی انجام این پژوهش اینجانب را صمیمانه همراهی و یاری نمودند، کمال سپاس‌گزاری را دارم.

## تعهدنامه

اینجانب علیرضا سعادت فرد دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان **تحلیل عددی و تجربی فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق های چند لایه الیاف- فلزی**، تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی متعهد می شوم؛

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های دیگر پژوهش گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود متعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه شاهرود" یا "*Shahrood University of Technology*" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمامی افرادی که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده) شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

از جمله ورق‌های مواد مرکب پر کاربرد در صنایع هوافضا، چندلایه‌های الیاف-فلزی FML می‌باشد که شکل‌دهی آن به روش‌های سنتی، به علت قابلیت شکل‌پذیری پایین دشوار است. لذا در این تحقیق با استفاده از فناوری کشش هیدرومکانیکی، قابلیت کشش این ورق‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ساخت FML از ورق آلومینیوم AA1050-O و هسته مواد مرکب ساخته شده از الیاف شیشه با رزین پلی‌یورتان استفاده شد. از یک دستگاه پرس گرم هیدرولیکی با کنترل دما و زمان حرارت‌دهی برای تولید FML استفاده شد. لوح اولیه گرد در داخل قالب کشش مجهز به سیستم ورق‌گیر نصب و توسط پرس با تجهیزات هیدرومکانیکی شکل داده شد. تأثیر پارامترهای فرایند شامل فشار پیش‌بالج، فشار نهایی محفظه و نسبت کشش بر روی ارتفاع کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. در بخش تحلیل عددی از حل گر صریح نرم افزار آباکوس ۶،۱۳،۴ استفاده شد. ورق فلزی به صورت ماده کشسان-مومسان مدل شد. از رفتار ناهمسانگردی ورق صرف نظر گردید و معیار آسیب FLD برای مدل‌سازی پارگی در ورق مورد استفاده قرار گرفت. همچنین منحنی مشخصه‌ی فرایند کشش هیدرومکانیکی شامل فشار محفظه‌ای بر حسب نسبت کشش برای ورق‌های مواد مرکب تولیدشده، به دست آمد. نتایج نشان داد که کشش هیدرومکانیکی با فشار پیش‌بالج ۳۵ بار منجر به تولید عمیق‌ترین قطعات سالم می‌شود. همچنین با افزایش نسبت کشش تا ۲/۲۵، محدوده‌ی فشار محفظه‌ای مطلوب برای تولید یک قطعه سالم محدودتر خواهد شد. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان داد که مدل‌سازی المان محدود از دقت قابل قبولی در تخمین شکل‌پذیری FML برخوردار است.

**کلمات کلیدی:** چندلایه الیاف-فلزی، FML، کشش هیدرومکانیکی، فشار محفظه‌ای، منحنی مشخصه،

نسبت کشش

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- **عنوان:** بررسی تجربی قابلیت شکل‌دهی ورق‌های چندلایه الیاف- فلزی در فرایند کشش هیدرومکانیکی

**نویسندگان:** علیرضا سعادت‌فرد، مهدی گردویی، عبدالحسین جلالی آقچای، ابوالفضل طاهرخانی.  
**ارسال شده برای:** سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک ایران، تهران، دانشگاه مالک اشتر.  
**وضعیت نهایی:** پذیرش نهایی.

2- **Title:** Investigation of Anisotropy Effect on Springback of Fiber Metal Laminate in Hat-shaped Bending.

**Author:** Keipour, S., Gerdooei, M., Mazinianian, H. and Saadatfard, A

**Submitted to:** The Biennial International Conference on Experimental Solid Mechanics (X-Mech 2016)

**Final situation:** Oral presentation

## فهرست عنوان‌ها

أ.....	تقدیم‌نامه
ب.....	سیاس‌گزارى
ت.....	تعهدنامه
ث.....	چکیده
ج.....	لیست مقالات مستخرج از پایان‌نامه
ح.....	فهرست عنوان‌ها
ذ.....	فهرست شکل‌ها
ش.....	فهرست جدول‌ها
ص.....	فهرست نشانه‌ها
۱.....	فصل ۱ مقدمه
۲.....	۱-۱ معرفی مواد مرکب
۳.....	۲-۱ معرفی مواد مرکب الیاف- فلز (FML)
۶.....	۱-۲-۱ تاریخچه
۷.....	۲-۲-۱ شکل‌پذیری
۸.....	۳-۲-۱ رفتار خستگی
۹.....	۴-۲-۱ مقاومت ضربه
۹.....	۵-۲-۱ خوردگی
۱۰.....	۶-۲-۱ مقاومت به شعله
۱۱.....	۳-۱ فرایندهای شکل‌دادن ورق بر پایه فشار سیال
۱۱.....	۱-۳-۱ هیدروفرمینگ ورق
۱۵.....	۲-۳-۱ فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی
۱۹.....	۴-۱ پیشینه تحقیق
۲۱.....	۵-۱ اهداف و ویژگی‌های پایان‌نامه
۲۲.....	۶-۱ معرفی فصول آتی پایان‌نامه
۲۳.....	فصل ۲ شرح فعالیت تجربی: ساخت مواد و اجرای فرایند شکل‌دهی



۲۳	۱-۲ مقدمه
۲۴	۱-۲ ساخت FML
۲۴	۱-۲-۲ ورق فلزی مورد استفاده
۲۶	۲-۲-۲ هسته مواد مرکب (پیش آغشته)
۲۷	۳-۲-۲ روش ساخت FML
۳۰	۳-۲ آزمون کشش هیدرومکانیکی
۳۰	۱-۳-۲ انتخاب پارامترها و طراحی آزمایش
۳۰	۲-۳-۲ تجهیزات آزمایش
۳۳	۴-۲ آزمون‌های تجربی کشش هیدرومکانیکی

### فصل ۳ شبیه‌سازی عددی فرایند کشش هیدرومکانیکی FML

۳۷	۱-۳ مقدمه
۳۸	۲-۳ تعریف مدل المان محدود
۳۸	۱-۲-۳ هندسه فرایند
۳۹	۲-۲-۳ مراحل انجام تحلیل
۴۰	۳-۲-۳ نحوه مدل‌سازی فرایند
۴۱	۴-۲-۳ نسبت کشش
۴۲	۵-۲-۳ سطوح اصطکاکی
۴۳	۶-۲-۳ تعیین شرایط مرزی و نیروهای اعمالی جهت شکل‌دهی
۴۴	۷-۲-۳ تعیین مراحل شکل‌دهی
۴۴	۸-۲-۳ شبکه‌بندی
۴۶	۹-۲-۳ تعریف منحنی تغییرات فشار

### فصل ۴ ارائه‌ی نتایج و بحث

۴۹	۱-۴ مقدمه
۵۰	۲-۴ نتایج عددی
۵۰	۱-۲-۴ بررسی صحت نتایج عددی با مقایسه نتایج تجربی در نسبت کشش ۲
۵۲	۲-۲-۴ توزیع ضخامت در روش عددی
۵۷	۳-۲-۴ تغییرات فشار سیال نسبت به کورس پرس
۵۸	۴-۲-۴ ارتفاع کشش
۶۰	۵-۲-۴ انحراف معیار کرنش
۶۲	۳-۴ نتایج تجربی
۶۳	۱-۳-۴ ارائه‌ی نمونه‌های FML شکل‌دهی شده در روش تجربی

۶۵.....	۲-۳-۴ اثر فشار پیش‌بالج بر ارتفاع کشش در آزمون‌های تجربی
۶۵.....	۳-۳-۴ منحنی مشخصه فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق FML در آزمون‌های تجربی
۶۶.....	۴-۳-۴ اثر فشار پیش‌بالج بر منحنی مشخصه فرایند در آزمون‌های تجربی
۶۷.....	۵-۳-۴ تغییرات ضخامت ورق در نمونه‌های تجربی
۷۲.....	۴-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی
۷۲.....	۱-۴-۴ مقایسه ضخامت ورق در روش تجربی و عددی در نسبت کشش ۲
۷۳.....	۲-۴-۴ مقایسه اثر فشار پیش‌بالج بر حد کشش در روش تجربی و عددی
۷۴.....	۳-۴-۴ مقایسه تفاوت ضخامت پوسته‌ها در نسبت کشش ۲ از روش تجربی و عددی
۷۴.....	۴-۴-۴ مقایسه منحنی مشخصه فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق FML بین دو روش تجربی و عددی
۷۵.....	و عددی

## ۷۷..... فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷۷.....	۱-۵ نتیجه‌گیری
۷۹.....	۲-۵ پیشنهادها

## ۸۰..... منابع‌ها

## ۸۳..... پیوست

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تصویر انفجاری از صفحه‌های ورقه‌ای متقارن (+۴۵ / -۴۵ / -۴۵) ..... ۳
- شکل ۲-۱: طبقه‌بندی ورق‌های FML [۵] ..... ۵
- شکل ۳-۱: کاربرد FML در هواپیمای ایرباس A-۳۸۰ [۵] ..... ۶
- شکل ۴-۱: تصویر پل‌زنی ترک توسط الیاف [۵] ..... ۷
- شکل ۵-۱: چند نوع از استرینگر ساخته‌شده از گلاره در چیدمان ۳/۲ [۱۰] ..... ۸
- شکل ۶-۱: رفتار رشد ترک گلاره ۲ تک جهت، گلاره ۳ متعامد، آرال ۲ و 2024-T3 برای یک بارگذاری بدنه [۲] ..... ۸
- شکل ۷-۱: مقایسه‌ی عملکرد ضربه سرعت‌پایین ورق مواد 2024-T3، گلاره ۳ و گلاره ۴ [۲] ..... ۹
- شکل ۸-۱: مقایسه‌ی آسیب خوردگی در FML و ورق تک لایه‌ی [۲] ..... ۱۰
- شکل ۹-۱: آزمون سوزاندن درب هواپیما برای بررسی بعد از سقوط [۲] ..... ۱۰
- شکل ۱۰-۱: کشش عمیق با فشار نگهدارنده سیال [۱۲] ..... ۱۲
- شکل ۱۱-۱: شکل دادن ورق با فشار سیال ویسکوز [۱۲] ..... ۱۲
- شکل ۱۲-۱: فرایند هیدرو فرم [۱۳] ..... ۱۳
- شکل ۱۳-۱: فرایند کشش عمیق هیدرو دینامیکی [۱۳] ..... ۱۴
- شکل ۱۴-۱: فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی [۱۳] ..... ۱۵
- شکل ۱۵-۱: نیمه سمت راست: شماتیک فرایند HDD، نیمه سمت چپ: شماتیک فرایند CDD و [۱۴] ..... ۱۶
- شکل ۱۶-۱: ناحیه بالچ شده در فضای بین ورق گیر و سنبه [۱۲] ..... ۱۷
- شکل ۱۷-۱: تغییر شکل ورق در مرحله پیش‌بالچ [۱۸] ..... ۱۸
- شکل ۱-۲: نمونه جهت آزمایش کشش (ابعاد به mm) ..... ۲۴
- شکل ۲-۲: نمودار تنش-کرنش ورق آلومینیوم AA1050-O ..... ۲۵
- شکل ۳-۲: شکل شماتیک لایه چینی هسته کامپوزیتی ..... ۲۷

- شکل ۲-۴: ورق آلومینیومی با سطح پولیش شده ..... ۲۸
- شکل ۲-۵: قرار دادن گرانول بر روی پارچه نسوز ..... ۲۸
- شکل ۲-۶: پرس گرم استفاده شده برای ساخت ورق FML ..... ۲۹
- شکل ۲-۷: ورق FML ساخته شده ..... ۲۹
- شکل ۲-۸: طرحواره فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی ..... ۳۱
- شکل ۲-۹: مشخصات ابعادی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی ..... ۳۲
- شکل ۲-۱۰: مدار هیدرولیکی کنترل فشار محفظه‌ی سیال، ۱: پمپ هیدرولیک، ۲: شیر کنترل فشار پیش‌بالج، ۳: فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار پیش‌بالج، ۴: شیر یک‌طرفه، ۵: فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار نهایی، ۶: شیر کنترل فشار نهایی محفظه ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۱: قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۲: مجموعه سنبه و قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۳: پمپ هیدرولیک دستی ۷۰۰ بار ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۴: شیر کنترل فشار ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۵: اجزای مدار کنترل برگشت فشار روغن ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۶: واشر لاستیکی برای انجام آزمایش عملی ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۷: لوح اولیه برای انجام آزمایش عملی ..... ۳۵
- شکل ۳-۱: روند کلی یک تحلیل المان محدود در محیط آباکوس ..... ۳۹
- شکل ۳-۲: مشخصات لوح شبیه‌سازی شده ..... ۴۰
- شکل ۳-۳: نمایی از مدل برش خورده فرایند (قبل از تحلیل) ..... ۴۱
- شکل ۳-۴: مدل المان محدود شبکه‌بندی شده ورق از نمای بالا با توجه به تعداد المان ..... ۴۵
- شکل ۳-۵: استقلال نتایج از شبکه‌بندی ..... ۴۶
- شکل ۳-۶: تغییرات فشار محفظه‌ای در طول زمان فرایند ..... ۴۷
- شکل ۳-۷: نمودار حد شکل‌دادن ورق AA-1050-0 استخراج شده از نرم‌افزار اتوفرم ..... ۴۸

- شکل ۴-۱: توزیع کرنش مؤثر پلاستیک با افزایش فشار در مدل اولیه..... ۵۰
- شکل ۴-۲: موقعیت پارگی در نسبت کشش ۲ و فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و پیش‌بالج ۳۵ بار..... ۵۱
- شکل ۴-۳: چروکیدگی در نمونه تجربی و شبیه‌سازی..... ۵۲
- شکل ۴-۴: تأثیر فشار محفظه‌ای بر ضخامت ورق زیرین در فشار پیش‌بالج ۳۵ بار در روش عددی... ۵۳
- شکل ۴-۵: نازک‌شدگی در فشارهای متفاوت در سه منطقه لوح برای نسبت کشش ۲ در روش عددی..... ۵۳
- شکل ۴-۶: تأثیر فشار پیش‌بالج بر ضخامت ورق در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار در روش عددی..... ۵۴
- شکل ۴-۷: تأثیر فشار محفظه‌ای بر درصد تفاوت ضخامت دو پوسته در روش عددی..... ۵۵
- شکل ۴-۸: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تفاوت ضخامت دو پوسته به ازای مقادیر مختلف فشار محفظه‌ای در روش عددی..... ۵۶
- شکل ۴-۹: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته بالا و پایین فلزی در روش عددی..... ۵۶
- شکل ۴-۱۰: تغییرات فشار سیال نسبت به کورس پرس، حرکت سنبه در روش عددی..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱: تأثیر فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش در فشار پیش‌بالج ۳۵ بار در روش عددی..... ۵۸
- شکل ۴-۱۲: تأثیر فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش در فشار پیش‌بالج ۳۰ بار در روش عددی..... ۵۸
- شکل ۴-۱۳: تأثیر فشار پیش‌بالج بر ارتفاع کشش در روش عددی..... ۵۹
- شکل ۴-۱۴: تأثیر فشار محفظه‌ای بر انحراف معیار در نسبت کشش ۱/۸ در روش عددی..... ۶۰
- شکل ۴-۱۵: تأثیر فشار محفظه‌ای بر انحراف معیار در نسبت کشش ۲/۲ در روش عددی..... ۶۱
- شکل ۴-۱۶: تأثیر فشار پیش‌بالج بر انحراف معیار در فشار محفظه‌ای ۶۰ بار در روش عددی..... ۶۲
- شکل ۴-۱۷: تأثیر فشار پیش‌بالج بر انحراف معیار در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار در روش عددی..... ۶۲
- شکل ۴-۱۸: نمونه‌های تولیدشده به روش کشش هیدرومکانیک با نسبت کشش‌های متفاوت،..... ۶۳
- شکل ۴-۱۹: نمونه‌های سالم و معیوب تولیدشده به روش هیدرومکانیک با نسبت‌های کشش متفاوت ،  
 الف)  $DR=1.8$ ، ب)  $DR=2$ ، ج)  $DR=2.2$ ، د)  $DR=2.25$ ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۰: نمونه‌های سالم و معیوب در نسبت کشش ۱/۸..... ۶۵

- شکل ۴-۲۱: اثر فشار پیش‌بالج ارتفاع کشش..... ۶۵
- شکل ۴-۲۲: منحنی مشخصه کشش هیدرومکانیکی FML برای فشار پیش‌بالج ۳۵ بار..... ۶۶
- شکل ۴-۲۳: اثر فشار پیش‌بالج بر منحنی مشخصه فرایند..... ۶۷
- شکل ۴-۲۴: میکرومتر ضخامت‌سنج جهت اندازه‌گیری ضخامت ورق برش شده..... ۶۸
- شکل ۴-۲۵: تغییرات ضخامت ورق پایین در نسبت کشش ۱/۸ از نتایج تجربی..... ۶۸
- شکل ۴-۲۶: تغییرات ضخامت ورق بالا در نسبت کشش ۱/۸ از نتایج تجربی..... ۶۹
- شکل ۴-۲۷: تغییرات ضخامت ورق پایین در نسبت کشش ۲ از نتایج تجربی..... ۷۰
- شکل ۴-۲۸: تغییرات ضخامت ورق بالا در نسبت کشش ۲ از نتایج تجربی..... ۷۰
- شکل ۴-۲۹: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نسبت ۱/۸..... ۷۱
- شکل ۴-۳۰: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نسبت ۲..... ۷۱
- شکل ۴-۳۱: مقایسه تأثیر فشار محفظه‌ای بر روی ضخامت ورق در روش تجربی و عددی..... ۷۳
- شکل ۴-۳۲: مقایسه اثر فشار پیش‌بالج بر حد کشش در آزمون‌های تجربی و عددی..... ۷۴
- شکل ۴-۳۳: مقایسه درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در آزمون‌های تجربی و عددی..... ۷۴
- شکل ۴-۳۴: مقایسه ناحیه کاری تجربی و شبیه‌سازی..... ۷۵

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: انواع FML آرال و گلاره تجاری موجود [۴][۲][۳]..... ۴
- جدول ۱-۲: ترکیب شیمیایی AA1050-O..... ۲۴
- جدول ۲-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی AA1050-O..... ۲۴
- جدول ۳-۲: خواص مکانیکی هسته مواد مرکب..... ۲۶
- جدول ۴-۲: خواص فیزیکی پلی‌یورتان..... ۲۷
- جدول ۱-۳: اندازه لوح برای نسبت‌های کشش متفاوت..... ۴۲
- جدول ۲-۳: ضرایب اصطکاک بین لوح و ابزار..... ۴۳
- جدول ۳-۳: خواص فیزیکی و مکانیکی استفاده شده در نرم‌افزار اتوفرم برای استخراج FLD..... ۴۷
- جدول ۱-۴: نتیجه کشش هیدرومکانیکی ورق FML با نسبت کشش متفاوت..... ۶۳

## فهرست نشانه‌ها

$r^*$	فاصله شعاعی از قطب	$D$	قطر گرده
$t$	ضخامت ورق	$D_0$	قطر اولیه گرده
$t_L$	ضخامت ورق زیرین	$D_p$	قطر نیم کره سنبه
$t_U$	ضخامت ورق رویی	$DR$	نسبت کشش
$t_{min}^L$	کمترین ضخامت ورق زیرین	$E$	مدول یانگ
$t_{min}^U$	کمترین ضخامت ورق رویی	$e_1$	کرنش مهندسی اصلی
$W_{FLD}$	منحنی حد پارگی	$e_2$	کرنش مهندسی فرعی
$v$	ضریب پوانسون	$F$	نیرو
$\varepsilon$	تانسور کرنش	$h$	ارتفاع کشش
$\varepsilon_1$	کرنش حقیقی اصلی	$NE$	تعداد المان
$\varepsilon_2$	کرنش حقیقی فرعی	$P$	فشار سیال
$\varepsilon_f$	کرنش شکست	$P_b$	فشار پیش‌بالج
$\sigma$	تانسور تنش	$P_c$	فشار محفظه‌ای سیال
		$PEEQ$	کرنش مومسان معادل



## فصل ۱ مقدمه

در طول دهه‌های گذشته کاربرد مواد مرکب در سازه‌های مختلف به صورت رو به رشدی محبوبیت پیدا کرده است. به ویژه در سازه‌های هوافضایی مواد مرکب به علت برتری‌های مقاومت، سفتی ویژه بالا و دوام خوب به خستگی نسبت به مواد معمولی (سنتی) ترجیح داده می‌شود. به علت نیاز به بهبود خواص، مواد هیبرید (مرکب) ساخته شده از صفحه‌های فلزی نازک و چسب‌های تقویت شده با الیاف مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، مشکلاتی همچون آلودگی محیط زیست، بهینه‌سازی مصرف سوخت و جایگزینی انرژی مصرفی بیش از گذشته اهمیت یافته است. معرفی و استفاده از مواد با نسبت استحکام به دانسیته بالا، یکی از راه‌های مؤثر در حل مشکلات مذکور است. همگام با بکارگیری فلزات با وزن مخصوص پایین، استفاده از مواد مرکب با ترکیب خواص برتر فیزیکی و مکانیکی یکی از راهکارهای مناسب برای این امر می‌باشد. چندلایه‌های الیاف - فلز<sup>۱</sup> که دارای لایه‌های مواد مرکب تقویت شده با الیاف و فلز که به صورت متناوب مرتب شده، دارای مشخصات ممتاز خستگی و شکست می‌باشد. FML یک خانواده از سازه‌های مواد مرکب هیبرید (ترکیبی) است که ترکیبی از لایه‌های فلز، لایه‌ی پلاستیک تقویت شده با الیاف را ساندویچ می‌کند [۱].

---

<sup>۱</sup>Fibre Metal Laminate (FML)

۱-۱ معرفی مواد مرکب<sup>۱</sup>

ساختار مواد جامد را می‌توان به چهار دسته تقسیم بندی کرد: فلزات، پلیمرها<sup>۲</sup>، سرامیک‌ها<sup>۳</sup> و مواد مرکب [۱]. یک ماده مواد مرکب را به صورت یک مخلوط فیزیکی در مقیاس میکروسکوپی از دو یا چند ماده مختلف تعریف می‌کنند که این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. مواد مرکب را می‌توان در پنج گروه کلی مواد مرکب زمینه سرامیکی<sup>۴</sup>، مواد مرکب زمینه فلزی<sup>۵</sup>، مواد مرکب کربن/کربن، مواد مرکب هیبریدی مواد مرکب زمینه پلیمری<sup>۶</sup> طبقه‌بندی نمود. مواد مرکب زمینه پلیمری<sup>۷</sup> تحت عنوان FRP شناخته می‌شوند. مواد مرکب پایه پلیمری بیش از ۵۰٪ کاربرد مواد مرکب را به خود اختصاص داده‌اند و از بقیه انواع مواد مرکب از اهمیت صنعتی بیشتری برخوردارند. از دیدگاه الیاف مورد استفاده می‌توان مواد مرکب را به دودسته مواد مرکب با الیاف تصادفی و مواد مرکب لایه‌ای تقسیم‌بندی کرد که این مواد شامل حداقل دو ماده مختلف بوده که به یکدیگر می‌چسبند. لایه‌ها بطوری روی یکدیگر قرار می‌گیرند که مقاومت لازم در جهت موردنظر حاصل شود، این نوع از مواد مرکب به چهار دسته مواد ساخته شده از دولایه فلز، فلزات روکش‌دار، مواد مرکب ذره‌ای<sup>۸</sup> و مواد مرکب الیافی<sup>۹</sup> است که مواد مرکب الیافی شامل ماده تقویت شونده به نام ماتریس و ماده تقویت‌کننده به نام الیاف است تقسیم می‌شوند. مطابق با شکل ۱-۱ در مواد مرکب چندلایه الیافی، جهت الیاف را در لایه‌های مختلف می‌توان تغییر داد بطوری که با کمترین وزن بیشترین مقاومت را به دست آورد [۱].

---

<sup>۱</sup> Composite material

<sup>۲</sup> Polymer

<sup>۳</sup> Ceramics

<sup>۴</sup> Ceramic Matrix Composites (CMC's)

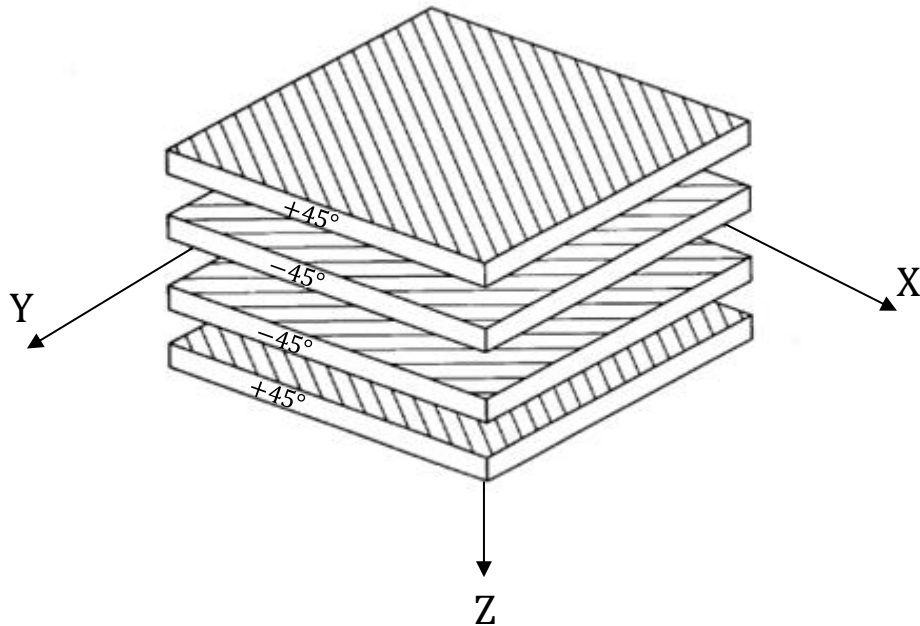
<sup>۵</sup> Metal Matrix Composites (MMC's)

<sup>۶</sup> Polymer Matrix Composites (PMC's)

<sup>۷</sup> Fiber Reinforced Polymers (or Plastics)

<sup>۸</sup> Composites particle materials

<sup>۹</sup> Fiber composite materials



شکل ۱-۱: تصویر انفجاری از صفحه‌های ورقه‌ای متقارن (+۴۵/-۴۵/-۴۵/+۴۵)

## ۲-۱ معرفی مواد مرکب الیاف-فلز (FML)

ورق‌های مرکب یک‌لایه را لمینا<sup>۱</sup> (لایه‌نازک) و چندلایه را لمینیت<sup>۲</sup> (ورقه ورقه‌ای) گویند. لمینیت‌های ساخته‌شده از صفحه‌های مختلف آلومینیوم و لایه‌های پلاستیک تقویت‌شده<sup>۳</sup> را اغلب به نام FML می‌شناسند که ساخت اولیه و گسترش آن‌ها در دانشگاه دلف<sup>۴</sup> صورت پذیرفته است. FML مواد مرکب پیشرفته‌ای هستند که از ترکیب لایه‌های فلز به همراه لایه‌های الیاف پیش-آغشته<sup>۵</sup> تشکیل گردیده‌اند. این مواد خواص مطلوب مواد فلزی نظیر چکش‌خواری، مقاومت ضربه و کرنش خرابی بالا را با مزیت‌های مواد مرکب الیاف نظیر مقاومت ویژه بالا، سفتی ویژه بالا، خوردگی مناسب و تحمل خستگی را با هم ترکیب می‌سازد. دو دسته‌بندی از FML به صورت تجاری موجود است. بیشترین سرمایه‌گذاری و کاربرد تجاری FML در مورد آرال (چندلایه آلومینیوم تقویت‌شده با آرامید<sup>۶</sup>) و گلاره

<sup>۱</sup> Lamina

<sup>۲</sup> Laminate

<sup>۳</sup> Fibre Reinforced Plastic (FRP)

<sup>۴</sup> Delft

<sup>۵</sup> Pre-impregnated (pre-preg)

<sup>۶</sup> Aramid Reinforced Aluminum Laminate (ARALL)

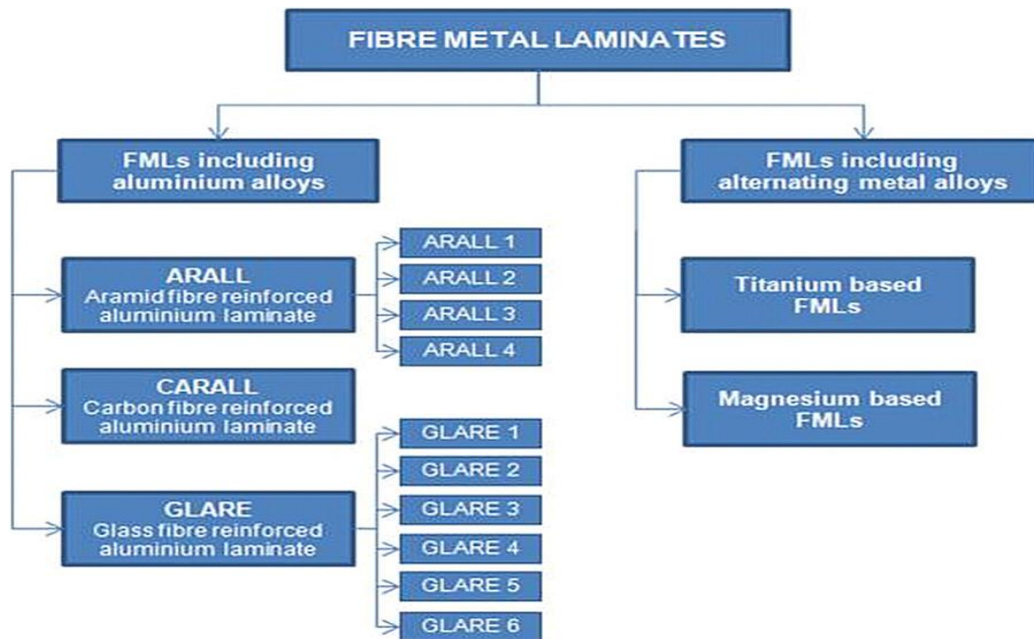
(چندلایه آلومینیوم تقویت شده با شیشه<sup>۱</sup>) است. جدول ۱-۱ تقسیم بندی تجاری آرال و گلاره را نشان می دهد [۲].

جدول ۱-۱: انواع FML آرال و گلاره تجاری موجود [۴][۲][۳]

FML Grade	Metal layers		Prepreg layers <sup>a</sup>		Outperforming characteristics
	Grade	Thickness [mm]	Orientation <sup>b</sup> [°]	Thickness [mm]	
GLARE1	7475-T761	0.3-0.4	0/0	0.25	Fatigue, strength, yield stress
GLARE2A	2024-T3	0.2-0.5	0/0	0.25	Fatigue, strength
GLARE2B	2024-T3	0.2-0.5	90/90	0.25	Fatigue, strength
GLARE3	2024-T3	0.2-0.5	0/90	0.25	Fatigue, impact
GLARE4A	2024-T3	0.2-0.5	0/90/0	0.375	Fatigue, strength in 0° direction
GLARE4B	2024-T3	0.2-0.5	90/0/90	0.375	Fatigue, strength in 90° direction
GLARE5	2024-T3	0.2-0.5	0/90/90/0	0.5	Impact, shear, off-axis properties
GLARE6A	2024-T3	0.2-0.5	+45/-45		Shear, off-axis properties
GLARE6B	2024-T3	0.2-0.5	-45/+45	0.5	Shear, off-axis properties
GLARE HSc	7475-T761	0.3-0.4	GLARE2-5	GLARE 2-5	
ARALL 1	7075-T6	0.3	0/0	0.22	Fatigue, strength
ARALL 2	2024-T3	0.3	0/0	0.22	Fatigue, damage tolerant
ARALL 3	7475-T761	0.3	0/0	0.22	Fatigue, toughness
ARALL 4	2024-T8	0.3	0/0	0.22	Fatigue, elevated temperature prop.

قابلیت جایگزینی اجزای FML (برای مثال جایگزینی آلومینیوم با تیتانیوم) این امکان را به وجود می آورد که بتوان طیف وسیعی از FML را ایجاد نمود. امروزه گلاره در شش دسته ی مختلف استاندارد تولید می گردد. شکل ۱-۲ طبقه بندی ورق های FML را با توجه به جایگزینی آلیاژ فلز نمایش می دهد.

<sup>۱</sup> Glare Reinforced Aluminum Laminate (GLARE)

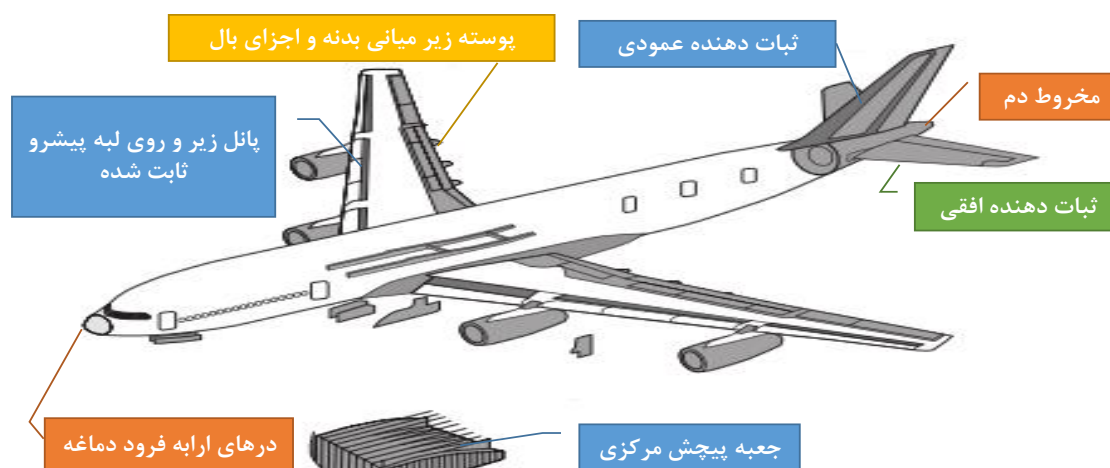


شکل ۱-۲: طبقه‌بندی ورق‌های FML [۵]

در مقایسه FML با آلیاژهای آلومینیوم، FML خواص ضربه بهتری دارد. به این صورت که تنش‌های غشایی بخش اعظم بار را تحمل می‌کنند و بار را بر روی محدوده بزرگی توزیع می‌کنند به همین دلیل از آنها برای ساخت چمدان‌های مقاوم در برابر انفجار استفاده می‌گردد. استفاده از سازه‌های ترکیبی سبک‌تر، سخت‌تر و مقاوم‌تر در برابر خرابی جهت کاربرد در اغلب موتورهای مفید بوده و می‌توان جهت ساخت نسل جدید موتورهای توربوفن<sup>۱</sup> بزرگ استفاده نمود. در طول دهه‌ی گذشته توجه بسیاری به ارزیابی تیرانس آسیب<sup>۲</sup> سازه بدنه‌ی هواپیما، بخصوص برای سازه‌های پوسته بدنه‌ی تحت فشار، گردیده است. در شکل ۱-۳ کاربرد FML در هواپیمای ایرباس A-۳۸۰ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Turbofan

<sup>۲</sup> Damage tolerance



شکل ۱-۳: کاربرد FML در هواپیمای ایرباس A-۳۸۰ [۵]

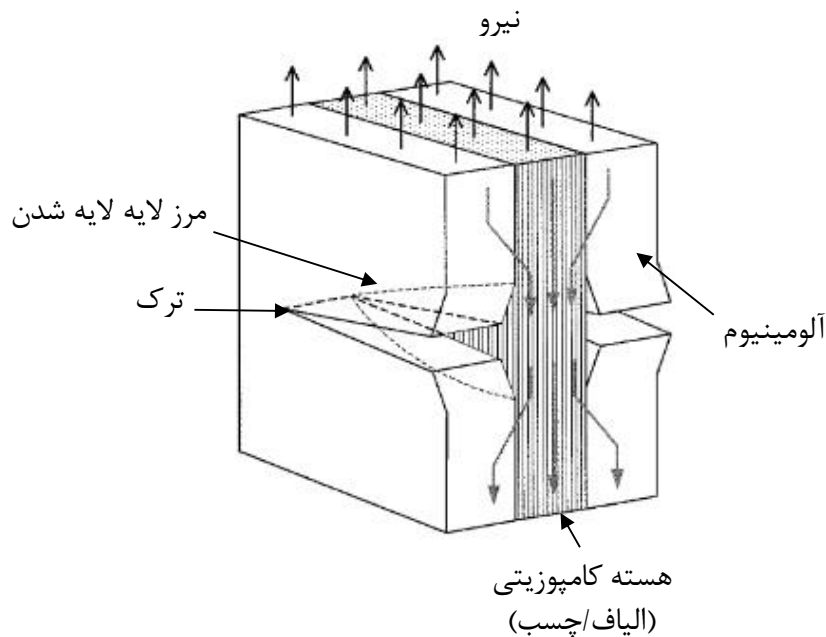
### ۱-۲-۱ تاریخچه

توسعه‌ی خانواده FML با مقاومت خستگی بالا، آرال و گلاره در دهه‌ی ۸۰ میلادی در دانشگاه فناوری دلف شروع گردید [۶]. در سال ۱۹۵۰ تحقیقات هوافضایی فوکر<sup>۱</sup> هلند به صورت موفقیت‌آمیز نشان داد که این سازه‌های چندلایه برخلاف مواد یکپارچه از رشد سریع ترک جلوگیری می‌کند. در جنگ جهانی دوم، تحقیقات برای مدت‌زمان مشخصی متوقف شد، در دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی اولین آزمون فیزیکی چندلایه‌های فلز پیوند خورده با مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف انجام گردید. پس از آن، FML بهینه‌شده توسط دانشگاه دلف به نام آرال در دهه‌ی ۱۹۸۰ توسعه یافت [۷]. اولین کاربرد آرال در درب‌های بار هواپیمای C-۱۷ اجرا شد. مقاومت خستگی ممتاز به علت پل‌زنی الیاف ناشی از ترک‌های خستگی<sup>۲</sup> در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است. پل‌سازی ترک بوسیله‌ی الیاف مقاوم، گشایش ترک را مهار می‌کند و از این طریق نیروی پیش‌رونده‌ی رشد ترک در لایه‌ی فلزی کاهش می‌یابد. به علت خواص فشاری نامناسب الیاف آرامید، در سال ۱۹۸۷ نسل دوم FML تحت نام گلاره برای کاربردهای بدنه‌ی هواپیما گسترش یافت [۷]. گلاره در سال ۱۹۸۹ در بشکه‌ی بدنه‌ی A-۳۴۰/۳۳۰ آزمایش گردید و کاربرد غیرنظامی خودش را در سال ۱۹۹۵ بواسطه‌ی استفاده در کف اتاق باربری هواپیمای B-۷۷۷ و دیوار (تیغه‌ی) بمب‌افکن ۱۲۵ ثبت کرد. عملکرد بسیار بهتر طبیعت خستگی FML نیازهای سازه‌های هواپیمایی را برآورده می‌کند و در سال‌های اخیر گلاره کاربردش را در پوسته بالای سازه‌ی هواپیمایی

<sup>۱</sup> Fokker

<sup>۲</sup> Fibre bridging of fatigue cracks

ایرباس A-۳۸۰ پیدا کرده است و موجب صرفه‌جویی نزدیک به ۷۹۴ کیلوگرم وزن ناخالص شده است [۹].

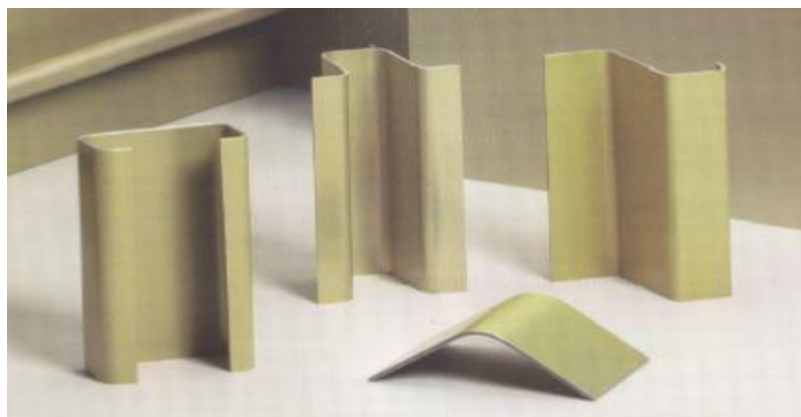


شکل ۱-۴: تصویر پل زنی ترک توسط الیاف [۵]

### ۲-۲-۱ شکل پذیری

مواد هیبریدی می‌توانند به صورت مومسان به شکل محصولات که دارای یک یا دو انحنا است تغییر شکل پیدا کنند. ورق‌های FML، کاملاً مشابه فلزات آلیاژی، رفتار مومسان از خود نشان می‌دهند البته مقدار مومسانی کاملاً بستگی به نوع آلیاژ دارد. چندلایه ساخته شده از ورق AA 2024 که دارای نرمی بیشتری است راحت‌تر از چند لایه ساخته شده از AA 7475 که نرمی کمتری دارد، تغییر شکل پیدا می‌کند. در تغییر شکل FML رفتار مومسان به قسمت فلز محدود شده، الیاف به صورت مومسان تغییر شکل پیدا نمی‌کنند. بنابراین، تحمل تغییر شکل مومسان در جهت الیاف توسط واماندگی کرنش الیاف، برای الیاف شیشه حدود ۴-۵٪، محدود می‌شود. با اعمال کرنش در جهت الیاف، تنش‌های کشسان در چندلایه‌ها قابل توجه است و موجب برگشت فنری و تنش داخلی قابل توجه می‌شود. این در حال است که در جهت عمود بر الیاف تغییر شکل مومسان توسط واماندگی کرنش فلز یا چسب محدود می‌شود. در جهت عرضی، کرنش واماندگی صفحه‌ای ۶-۸٪ است که توسط چسب تحمل می‌شود،

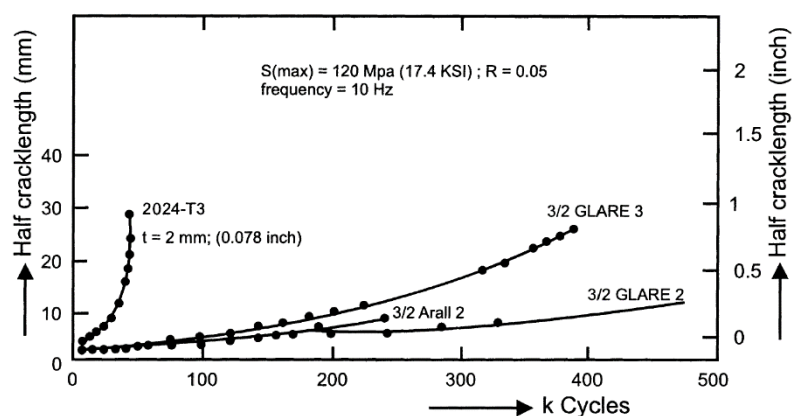
محدوده کننده شکل پذیری FML است. قابلیت شکل پذیری محدود FML از روش های شکل دهی برای المان های سازه ای نسبتاً ساده مطابق شکل ۱-۵ استفاده می شود.



شکل ۱-۵: چند نوع از استرینگر ساخته شده از گلاره در چیدمان ۳/۲ [۱۰]

### ۱-۲-۳ رفتار خستگی

برنامه های آزمایشی بسیاری درباره خواص خستگی FML در دانشگاه دلف مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱-۶ عملکرد خستگی گلاره با دو متغیر (گلاره ۳ متعامد و گلاره ۲ تقویت شده ی تک جهت)، آرال ۲ و آلومینیوم یکپارچه ی 2024-T3 تحت بارگذاری بدنه شبیه سازی شده با یک برش اره مرکزی مقایسه می کند. نرخ رشد ترک مواد یکپارچه به سرعت با افزایش طول ترک افزایش می یابد. تحت شرایط بارگذاری واقعی، نرخ رشد ترک چندلایه ها ۱۰ الی ۱۰۰ برابر آرام تر از ترکیبات آلومینیوم یکپارچه است. به همین دلیل در بدنه هواپیما گلاره در تمامی انواع شرایط بارگذاری خستگی برتری دارد [۲].

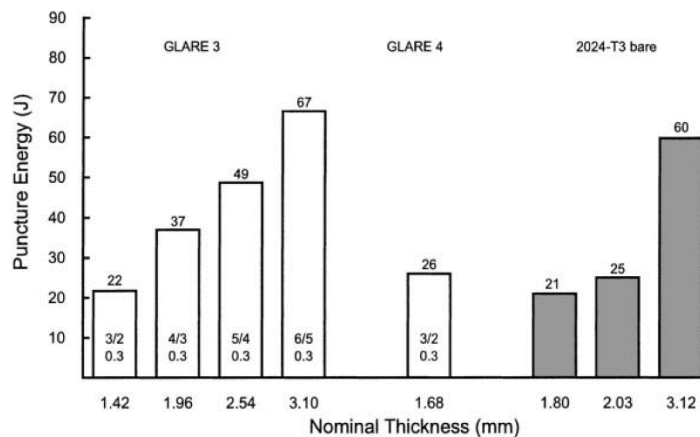


شکل ۱-۶: رفتار رشد ترک گلاره ۲ تک جهت، گلاره ۳ متعامد، آرال ۲ و 2024-T3 برای یک بارگذاری بدنه [۲]



### ۴-۲-۱ مقاومت ضربه<sup>۱</sup>

یک نوع معمول از آسیب برای سازه‌های هواپیما آسیب ضربه است. آسیب ضربه به علت موارد زیر حاصل می‌گردد: آشغال‌های باند، تگرگ، آسیب نگهداری (مانند سقوط ابزار، ...). شکل ۱-۷ انرژی‌های ضربه برای ضخامت‌های مختلف نمونه در ورق FML در ورق یکپارچه ارائه شده است. این دافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر شکل ضربه‌ای FML یک برتری ویژه‌ی است، به‌ویژه هنگامی که این آسیب قابل‌مشاهده، بازرسی و کشف است [۲].



شکل ۱-۷: مقایسه‌ی عملکرد ضربه سرعت‌پایین ورق مواد 2024-T3، گلاره ۳ و گلاره ۴ [۲]

### ۵-۲-۱ خوردگی

تمامی ورق‌های آلومینیوم استفاده‌شده در تولید FML انودیزه و با مهارکننده‌ی خوردگی بتونه مقدم بر فرایند اتصال، پوشش داده‌شده است. علاوه بر آن، سطوح خارجی آلومینیوم توسط یک لایه پوشش نازک جهت بهبود مقاومت خوردگی سطح تأمین می‌گردد. خوردگی در جهت ضخامت به علت نقش حائلی که لایه‌های الیاف اپوکسی بازی می‌کند قابل توجه است. در شکل ۱-۸ آسیب خوردگی در آرال ۳ و 2024-T3 حمام اسید را نمایش می‌دهد. درحالی‌که خوردگی در فلز یکپارچه بطور کامل نفوذ می‌کند، در FML صرفاً به سطح تماسی اولین الیاف-رزین خواهد رسید [۲].

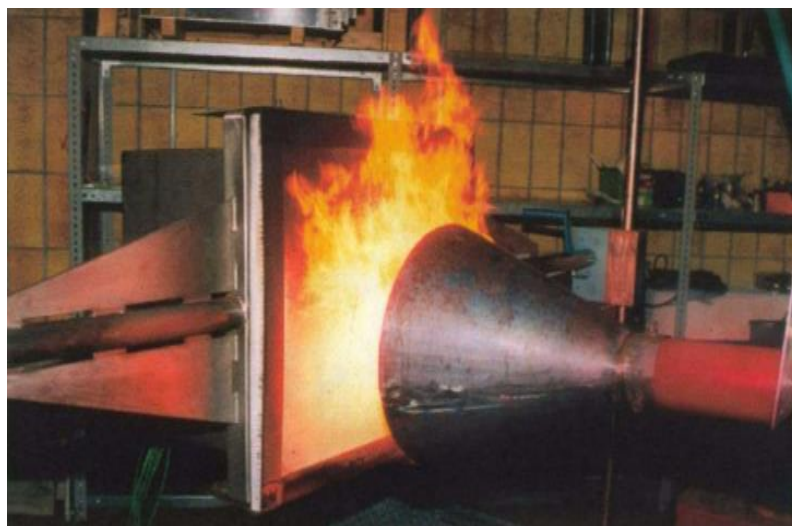
<sup>۱</sup> Impact resistance



شکل ۱-۸: مقایسه‌ی آسیب خوردگی در FML و ورق تک لایه‌ی [۲]

### ۱-۲-۶ مقاومت به شعله

مقاومت به شعله آتش در گلاره خیلی بهتر از آلیاژهای آلومینیوم یکپارچه است. بدنه‌های هواپیمای پوست‌های آلیاژ آلومینیوم در ۲۰ الی ۳۰ ثانیه به شرط وجود یک آتش نفت سفید خارجی ذوب می‌شود. الیاف شیشه با نقطه ذوب بالاتر، از ذوب شدن لایه آلومینیوم دوم برای مدت زمان قابل توجهی محافظت می‌کند و بنابراین از مسافران در برابر خطر محافظت می‌کند. شکل ۱-۹ آزمون ایمنی مقاومت در برابر آتش را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۱-۹: آزمون سوزاندن در هواپیما برای بررسی بعد از سقوط [۲]

## ۳-۱ فرایندهای شکل دادن ورق بر پایه فشار سیال

### ۱-۳-۱ هیدروفرمینگ ورق<sup>۱</sup>

فناوری شکل دهی با ابزار نرم آبعلت دارا بودن اجزا ساده و معمولی و مصرف کم انرژی بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. شکل دهی با ابزار نرم شامل دو نوع شکل دهی با لاستیک و شکل دهی هیدرولیکی است. شکل دهی هیدرولیکی بیشتر در شکل دهی ورق‌های فلزی و یا لوله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که یا شامل سنبه نرم (آب و یا سیال دیگری مثل روغن تحت فشار به‌عنوان سنبه در مقابل ماتریس صلب) و یا شکل دهی با ماتریس نرم (آب یا سیال دیگر تحت فشار به‌عنوان ماتریس و در مقابل سنبه صلب) است [۱۱]. بسیاری از محققین روش اول را هیدروبالج<sup>۲</sup> نامیده و روش دوم را کشش هیدرومکانیکی می‌نامند. روش هیدروبالج امروزه در صنایع خودرو سازی و شکل دهی لوله‌ها و قطعات پنل استفاده زیادی پیدا کرده‌اند. در هیدروفرمینگ ورق فرایند شکل دهی ورق تخت اولیه به شکل مورد نظر، با کمک فشار محیط مایع انجام می‌گیرد. در این فناوری، محیط مایع به روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته، از این روش‌های متفاوتی تحت عنوان روش‌های هیدروفرمینگ ورق مطرح گردیده است.

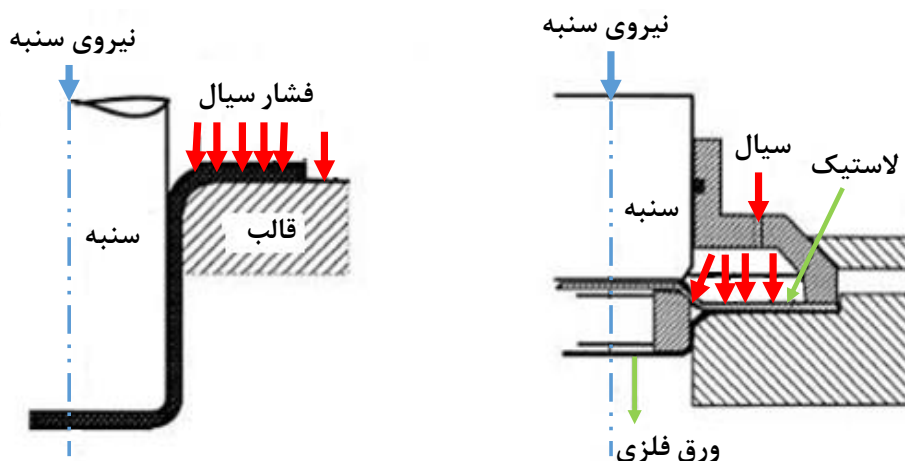
### الف - فرایند کشش عمیق با نیروی ورق‌گیری سیال

در این فرایند همانطور که در شکل ۱-۱۰ دیده می‌شود ورق گیر توسط فشار سیال جایگزین شده، جهت آب‌بندی از دیافراگم لاستیکی استفاده می‌شود. وجود فشار سیال سبب می‌گردد که اصطکاک در منطقه ورق گیر بطور قابل توجهی کاهش یابد و نسبت کشش به ۲/۳ برسد [۱۲].

<sup>۱</sup> Sheet hydroforming

<sup>۲</sup> Soft tool forming

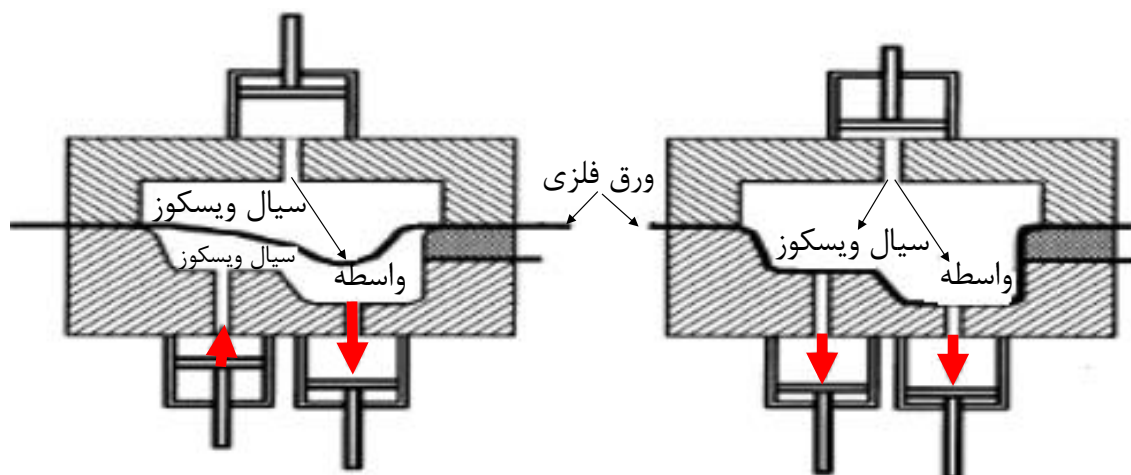
<sup>۳</sup> Hydro bulge



شکل ۱-۱۰: کشش عمیق با فشار نگهدارنده سیال [۱۲]

### ب - فرایند شکل‌دهی با سیال ویسکوز

در شکل ۱-۱۱ این روش بجای سیال از محیطی ویسکوز استفاده می‌شود که فرایند به نرخ کرنش حساس است. شکل ۱-۱۱ با این وسیله تغییر فشار در طول فرایند امکان‌پذیر است. با این روش می‌توان ورق‌های که شکل دادن آن‌ها مشکل است در حجم کم پرس‌کاری کرد. لیو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۰ این فرایند را با فرایند کشش عمیق مقایسه نمود. شوکلین<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۰ توزیع نیروی ورق‌گیر را در این روش مورد بررسی قرارداد.



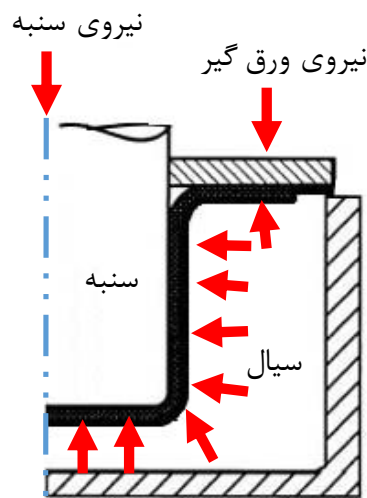
شکل ۱-۱۱: شکل دادن ورق با فشار سیال ویسکوز [۱۲]

<sup>۱</sup> Liu

<sup>۲</sup> Shuklin

### ج - فرایند هیدروفرم

همانطور که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده، در این روش ماتریس کاملاً با سیال جایگزین می‌شود و فشار سیال بوسیله یک دیافراگم لاستیکی بین ورق و سیال، منتقل می‌شود. شکل نهایی قطعه را سنبه تعیین می‌کند. فشار سیال می‌تواند با یک شیر یا پمپ کنترل شود. فشار سیال بسیار مهم می‌باشد چون اگر این فشار به اندازه کافی زیاد نباشد احتمال چروک خوردن خواهد بود البته در فشارهای بالا قطعه ممکن است دچار پارگی و گسیختگی شود.



شکل ۱-۱۲: فرایند هیدرو فرم [۱۳]

### د - فرایند کشش عمیق هیدرو دینامیکی<sup>۱</sup>

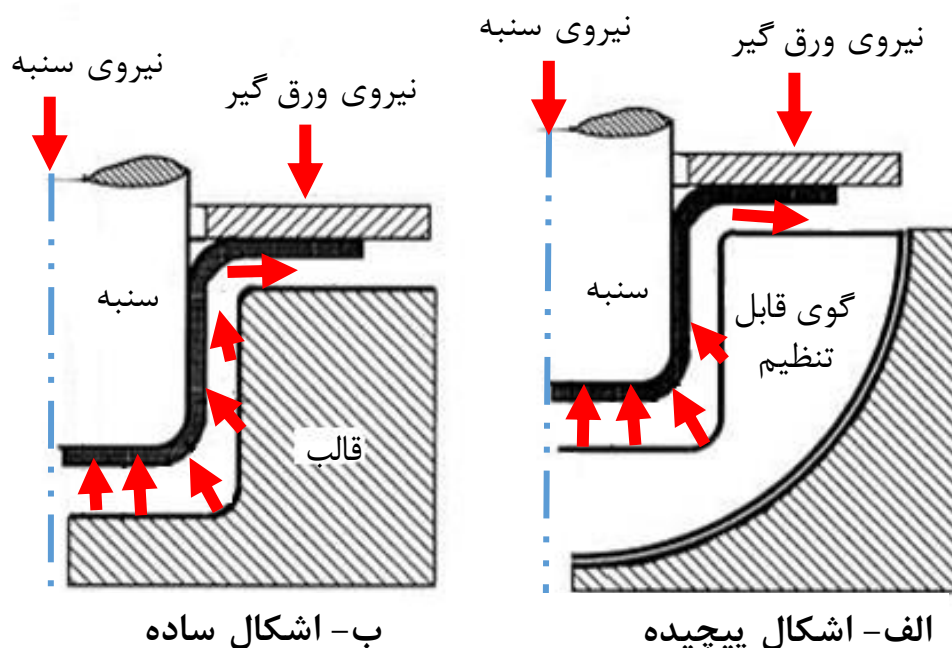
در این فرایند هیچ سیستم آب‌بندی جهت جلوگیری از جریان مایع به بیرون از محفظه استفاده نمی‌شود. فشار مایع درون محفظه با نشت آن به بیرون کنترل می‌گردد. این فرایند به‌طور شماتیک در شکل ۱-۱۳ (الف) نشان داده شده است. فرایند کشش عمیق هیدرو دینامیکی اساساً فرایند پیچیده‌ای است و توانایی شکل‌دهی قطعات مختلفی را دارد. این فرایند نخستین بار بوسیله پژوهشگران ژاپنی با عنوان کشش عمیق روانکاری شده‌ی تحت فشار<sup>۲</sup>، پیشنهاد شد و با عناوین کشش عمیق اکوادراو<sup>۳</sup> و روش دالدراپ<sup>۴</sup> هم خوانده شده است.

<sup>۱</sup> Hydromechanical Deep Drawing (HDD)

<sup>۲</sup> Pressure – lubricated deep drawing

<sup>۳</sup> Aquadraw deep drawing

<sup>۴</sup> Daalderop method



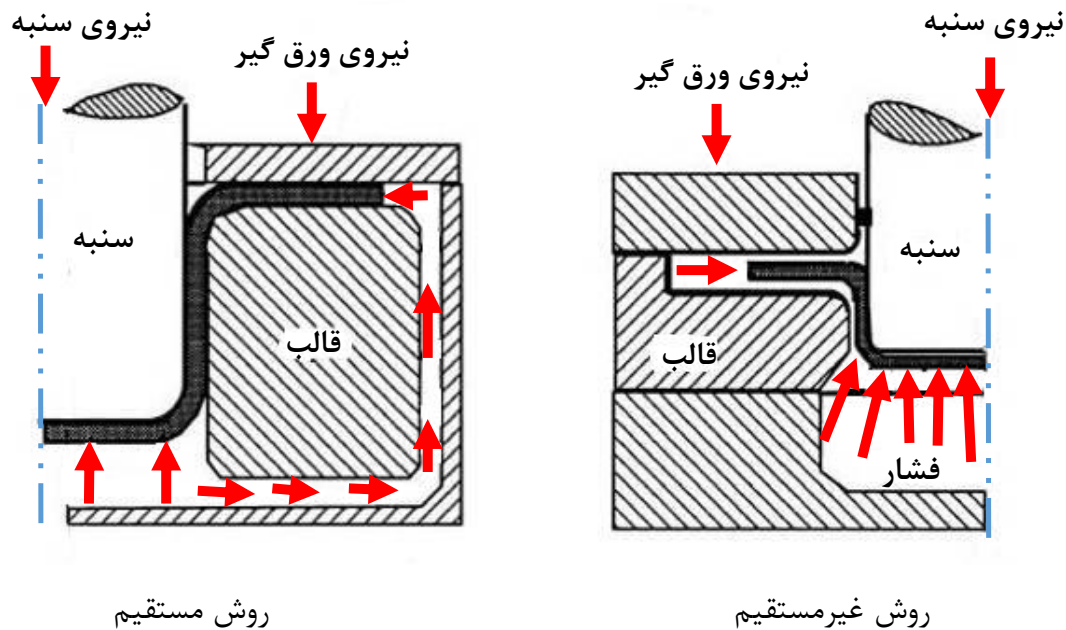
شکل ۱-۱۳: فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی [۱۳]

#### ه- فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی<sup>۱</sup>

فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی بوسیله ناکامورا و ناکاگاوا ارائه شد. در شکل ۱-۱۴ فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی نشان داده شده است. فشار اعمالی در جهت شعاعی منجر به کاهش تنش کششی می شود. این فشار در واقع سبب وارد شدن مقدار بیشتری از ماده به داخل محفظه روغن می شود و از مراحل اولیه شکست و پارگی جلوگیری می کند. تیروواردچلوان<sup>۲</sup> این فرایند را برای باز کشش قطعات فنجان استفاده کرد و به این وسیله به حد کشش بالاتر دست یافت. همچنین او در سال ۱۹۹۸ روشی جدید را بر اساس فشار هیدرولیکی معرفی کرد که در آن فشار نه تنها در راستای شعاع اعمال می شد، بلکه به عنوان نیروی عملگر بین دو قسمت سنبه و ورق گیر نقش داشت. نسبت کشش در این روش می تواند به مقدار  $3/3 - 3/2$  در یک مرحله برسد. در یک فنجان کشیده شده با ضخامت  $0/8$  میلی متر و قطر  $30$  میلی متر که در آن نسبت کشش  $3/3$  بوده، فشار سیال  $25$  مگاپاسکال مورد نیاز است. این فرایند که کشش عمیق تقویت شده با فشار هیدرولیک نام گرفت در سال های بعد توسعه بیشتری پیدا کرد.

<sup>۱</sup> Radial pressure deep drawing

<sup>۲</sup> Thirumarudchelvan



شکل ۱-۱۴: فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی [۱۳]

### ۱-۳-۲ فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی

کشش عمیق هیدرومکانیکی دارای نام‌های متفاوتی از قبیل هیدرومک<sup>۱</sup>، شکل‌دهی به کمک سیال<sup>۲</sup>، کشش با فشار هیدرولیک<sup>۳</sup> و هیدرو فرم<sup>۴</sup> می‌باشد که هر کدام به طرح‌های مختلفی اشاره می‌کند. در حقیقت کشش عمیق به روش هیدرومک یک نوع از شکل‌دهی قابل انعطاف است که از فناوری هیدروفرم نشأت گرفته است. کشش عمیق هیدرومکانیک شباهت‌های زیادی به روش کشش سنتی<sup>۵</sup> دارد. تنها در این روش سنبه وجود داشته و بجای ماتریس مخزنی وجود دارد که داخل آن از سیال با فشار قابل کنترل پر شده است (شکل ۱-۱۵).

فناوری هیدرومکانیک اولین بار در سال ۱۸۹۰ توسعه یافت هر چند که تحقیقات آن سال‌ها پیش آغاز شده بود اما پیشرفت واقعی بعد از جنگ جهانی دوم آغاز شد. کاسوگا<sup>۶</sup> ابتدا کشش عمیق روغن کاری شده را طراحی کرد و تحقیقات زیادی در این زمینه از سال ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۴ انجام داد. بعد از اواسط

<sup>۱</sup> Hydromec

<sup>۲</sup> Fluid former

<sup>۳</sup> Drawing with counter pressure

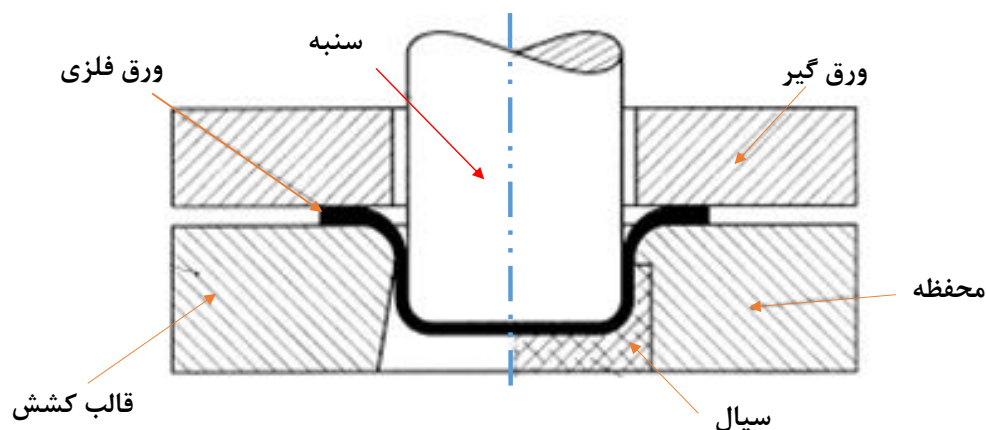
<sup>۴</sup> Hydro Form

<sup>۵</sup> Conventional Deep Drawing (CDD)

<sup>۶</sup> Kasuga



۱۹۷۰، ناکامورا<sup>۱</sup> و ناکاگوا<sup>۲</sup> تحقیقات خود را در مورد فرایند شکل‌دهی بوسیله سیال تحت فشار شروع کردند. سپس آلمانی‌ها با استفاده از یک رینگ آب‌بندی بر روی ماتریس جهت جلوگیری از فرار سیال از بین ماتریس و ورق، فرایند را کامل کردند.



شکل ۱-۱۵: نیمه سمت راست: شماتیک فرایند HDD، نیمه سمت چپ: شماتیک فرایند CDD و [۱۴]

محققین چینی نیز کارهای زیادی را اخیراً شروع کردند. کنگ<sup>۳</sup> از کشور چین همکاری خود را با ناکامورا از ژاپن از سال ۱۹۸۰ شروع کردند. آن‌ها تحقیقات زیادی راجع به شکل‌دهی قطعات چهارگوش، سهموی و اتوکاری<sup>۴</sup> قطعات به روش هیدرومکانیک انجام دادند. گو<sup>۵</sup> نیز با همکاری ناکامورا تحقیقاتی راجع به کیفیت و دقت شکل‌دهی سیلندرها و چهارگوش‌ها به روش هیدرومکانیک انجام داد [۱۲]. در کشش عمیق هیدرومکانیکی مقادیر نسبت کشش (LDR) محدود است و این مقادیر به بالاتر از ۲/۸ رسیده که با کشش عمیق سنتی که در آن نسبت کشش تنها به ۲/۲ می‌رسد مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

### ویژگی‌های فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی

در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی سیال با فشار آوردن به ورق سبب جدایش ورق از ماتریس و چسبیدن ورق به سنبه می‌شود به علت اصطکاک زیاد ورق و سنبه تمام دیواره قطعه در تحمل نیروی

<sup>۱</sup> Nakamura

<sup>۲</sup> Nakagawa

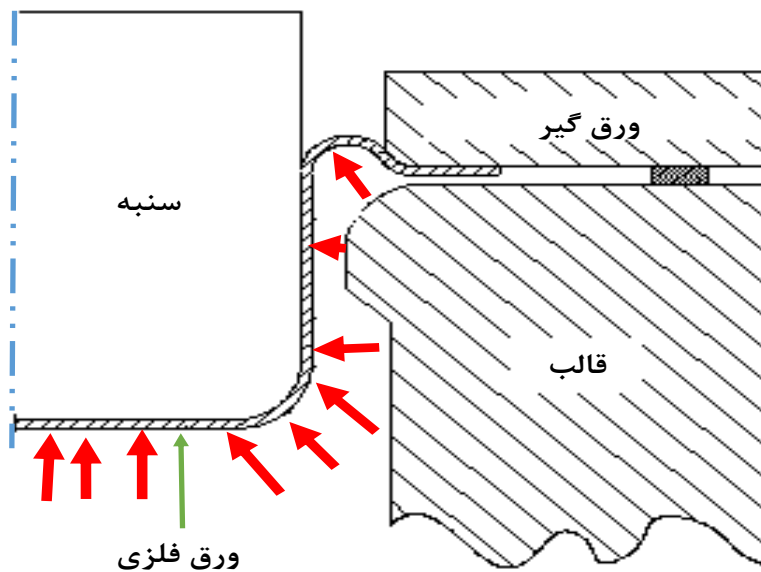
<sup>۳</sup> Kang

<sup>۴</sup> Ironing

<sup>۵</sup> Guo



شکل دهی نقش پیدا می‌کند. این ویژگی که گیرش اصطکاکی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، سبب افزایش ارتفاع کشش حدی در فرایند می‌شود. به سبب وجود لایه‌ی سیال در ناحیه‌ی فلانج، اصطکاک در این ناحیه بطور چشمگیری کاهش می‌یابد و جریان فلز از فلانج به دیواره قطعه با آزادی بیشتری انجام می‌شود. در ناحیه‌ی اتصال فلانج به دیواره، شعاع انحنای قطعه، تابع مقدار فشار سیال داخل محفظه است. ورق در این ناحیه هیچ تماسی با اجزای قالب ندارد و در نتیجه مقاومت در برابر جریان مواد از فلانج به دیواره کاهش می‌یابد و علاوه بر این بهبود صافی سطح قطعه را نیز در پی خواهد داشت. مطابق شکل ۱-۱۶ وجود ناحیه‌ی بالج شده در فضای بین ورق گیر و سنبه که ناشی از فشار بالای سیال است، نقشی همانند ترمز کشش<sup>۲</sup> در کشش عمیق سنتی را ایفا می‌کند. وجود این ناحیه‌ی بالج شده گرداگرد قطعه در حال کشش، بطور مؤثری احتمال بروز چین خوردگی در راستای شعاعی را کاهش می‌دهد [۱۵]؛ اما فشار بیش از حد بالای سیال می‌تواند احتمال بروز پارگی در این ناحیه را نیز افزایش دهد.



شکل ۱-۱۶: ناحیه بالج شده در فضای بین ورق گیر و سنبه [۱۲]

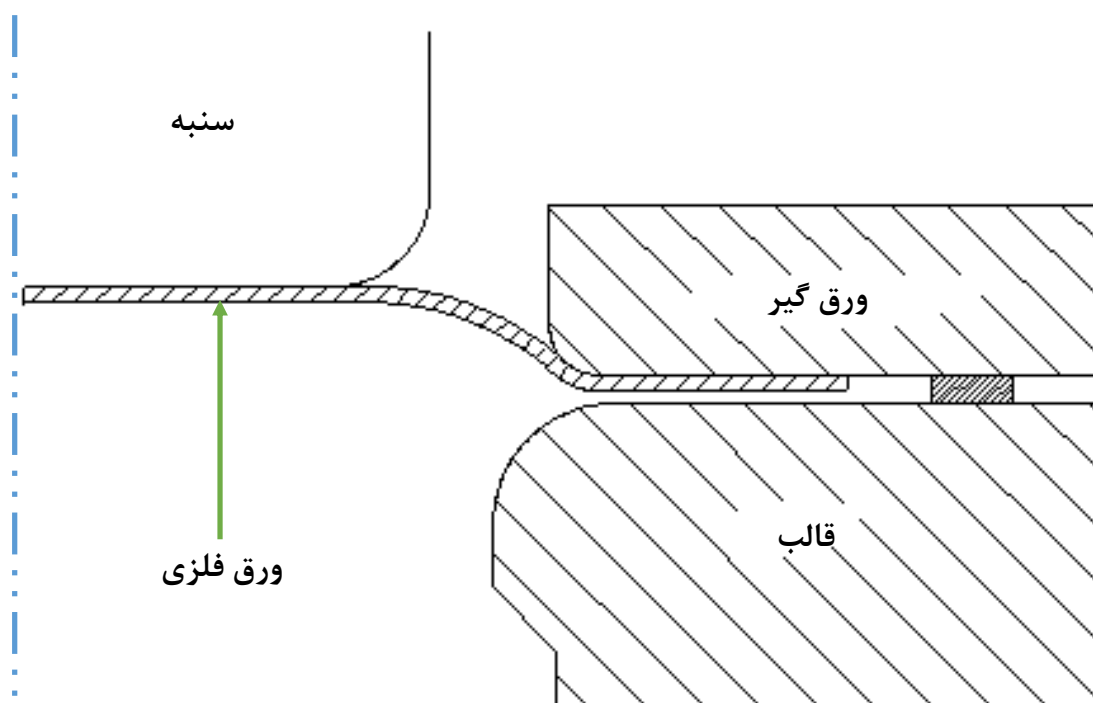
انجام پیش‌بالج<sup>۳</sup> قبل از فرایند کشش نیز تأثیر بسزایی در جلوگیری از چین خوردگی و بهبود توزیع ضخامت در قطعه دارد. با توجه به شکل ۱-۱۷ پیش‌بالج بدین معناست که در اولین مرحله‌ی شکل‌دهی ورق در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی فشار سیال داخل محفظه افزایش داده می‌شود در حالی که

<sup>۱</sup> Friction holding

<sup>۲</sup> Draw bead

<sup>۳</sup> Prebulging

سنجه در موقعیتی خاص بصورت ثابت قرار گرفته است [۱۶]. در اثر پیش‌بالج منطقه‌ی مه‌پاش شده‌ی ورق بین سنجه و ورق‌گیر به سمت بالا (در خلاف جهت حرکت سنجه در مرحله‌ی شکل‌دهی کامل قطعه) بالج می‌شود. در نتیجه تنش‌های کششی در راستای محیطی در این منطقه ایجاد می‌شود که باعث آزاد شدن بخشی از تنش‌های فشاری ناشی از عملیات کشش در مرحله شکل‌دهی کامل قطعه توسط سنجه می‌گردد [۱۷]. علاوه بر این پیش‌بالج باعث پیش‌فرم ورق در جهت برقراری تماس با شعاع نوک سنجه می‌شود که از بروز شکست در مراحل اولیه شکل‌دهی جلوگیری خواهد کرد. بسیاری از پارامترهای فرایند از قبیل شعاع ورودی ماتریس و ورق‌گیر، ضخامت ورق، لقی بین سنجه و ورق‌گیر و جنس ورق بر میزان اثر پیش‌بالج بر فرایند مؤثرند [۱۶].



شکل ۱-۱۷: تغییر شکل ورق در مرحله پیش‌بالج [۱۸]

### مزایا و محدودیت‌های فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی

بر اساس ویژگی‌های فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی، می‌توان مزیت‌های مانند افزایش نسبت کشش حادی و در نتیجه کاهش تعداد مراحل شکل‌دهی، امکان تولید قطعات با اشکال پیچیده در یک مرحله،

کاهش نازک شدگی موضعی<sup>۱</sup> و یکنواختی بیشتر در توزیع ضخامت قطعه، کاهش برگشت فنری و بهبود دقت ابعادی و ساده‌تر شدن مجموعه‌ی قالب و کاهش هزینه‌های ساخت آن برشمرده، در مقابل این فرایند محدودیت‌هایی نیز دارد که عبارت‌اند از نیروی شکل‌دهی بیشتر و نیاز به پرس‌های با تناژ بالا، نیاز به تجهیزات و مدار هیدرولیک در کنار قالب جهت انجام عملیات و طولانی‌تر بودن سیکل کاری نسبت به کشش عمیق سنتی، برشمرده [۱۹] [۱۵].

#### ۴-۱ پیشینه تحقیق

پدیده‌های متعدد، تولید یک قطعه سالم را در فرایند هیدروفرمینگ ورق محدود می‌کنند. مهم‌ترین عوامل محدودکننده، پارگی<sup>۲</sup>، چروکیدگی<sup>۳</sup>، کمانش<sup>۴</sup> و کیفیت سطح نامطلوب است. در سال‌های اخیر فعالیت‌های پژوهشی قابل توجهی در راستای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی با سیال با هدف دستیابی به یک قطعه بدون نقص صورت گرفته‌است. عمده‌ی تحقیقات انجام‌شده به‌ویژه در دهه‌ی اخیر مبتنی بر استفاده از روش المان محدود و شبیه‌سازی نرم‌افزاری فرایند صورت پذیرفته است. مرور این پژوهش‌ها نیز در جهت شناخت فرایند و استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، مفید بوده است. ژانگ و همکارانش در پژوهش‌های جداگانه‌ای ساخت قطعات استوانه‌ای، جعبه‌های مخروطی با مقطع چهارضلعی و قطعات سهمی‌گون را با روش کشش عمیق هیدرومکانیکی مورد بررسی قرار دادند. تحلیل عددی فرایند به روش المان محدود با کمک نرم‌افزار LS-DYNA 3D انجام گرفت و نازک‌شدگی موضعی، چین‌خوردگی بدنه و توزیع ضخامت قطعه مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی نیز قطعاتی از جنس آلومینیوم و فولاد شکل داده شدند [۲۱] [۲۰]. ژانگ و همکاران بررسی‌های عددی و تجربی جهت بررسی اثر ناهمسانگردی و پیش‌بالجینگ در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات فولادی انجام دادند. فرایند به کمک نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA 3D شبیه‌سازی گردید، تغییرات شکل و توزیع ضخامت قطعه مطالعه شد [۱۷]. فضلی و ملایی داریانی با شبیه‌سازی عددی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی به کمک روش المان محدود و انجام آزمایش‌های تجربی، اثر عواملی از قبیل شعاع پروفیل ماتریس، شرایط اصطکاکی، ضخامت ورق را بر محدوده‌ی کاری مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند

<sup>۱</sup> Local thinning

<sup>۲</sup> Tearing

<sup>۳</sup> Wrinkling

<sup>۴</sup> Buckling

برای رسیدن به حداکثر نسبت کشش در شرایط معین، مقدار بهینه‌ای برای فشار سیال داخل محفظه وجود دارد [۲۲]. دیلمی و همکارانش با شبیه‌سازی عددی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی با نرم‌افزار آباکوس و انجام آزمایش‌های تجربی، اثر عواملی چون نیروی ورق‌گیر، جنس ورق، فشار محفظه‌ای را بر روی نازک‌شدگی و چروکیدگی بصورت تجربی و عددی بررسی نمودند و نتیجه‌گیری کردند که با افزایش فشار محفظه‌ای باعث نازک‌شدگی بیشتر و کاهش چروکیدگی در فلانچ و با فشار پیش‌بالج کم باعث نازک‌شدگی می‌شود همچنین در هر فشار محفظه‌ای و پیش‌بالج یک ارتفاع بهینه وجود دارد و افزایش ضخامت ورق باعث افزایش نسبت کشش و فشار محفظه‌ای بیشتر می‌شود [۱۸]. رحمانی و همکارانش اثر عواملی چون پیش‌بالج و فشار محفظه‌ای را بر توزیع ضخامت ورق و حد شکل‌دهی در ورق‌های مربعی به کمک روش هیدرومکانیک و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی را بررسی کردند [۲۳]. لانگ و همکارانش اثر عواملی چون پیش‌بالج و فشار محفظه‌ای و حرکت پانچ را بر توزیع ضخامت ورق و حد شکل‌دهی در ورق‌های چندلایه بصورت عددی و تجربی به کمک روش هیدروفرمینگ بررسی کردند [۲۴]. وانگ و همکارانش اثر عواملی چون کشش چسب را بر حد شکل‌دهی در ورق‌های تک‌لایه و چندلایه بصورت تجربی و عددی به کمک روش هیدرومکانیک بررسی کردند [۲۵]. باقرزاده و همکارانش اثر پارامترهای چینش ورق‌ها و ضخامت را بر روی فشار بحرانی بهینه و نسبت کشش را در ورق‌های دولایه فلزی بصورت تجربی و عددی بررسی کردند و دریافتند که افزایش ضخامت جنس با ضخامت بیشتر فشار بحرانی افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت کشش فشار بحرانی کاهش می‌یابد و همچنین نسبت فشار بحرانی به استحکام کرنش سختی ورق مواد مرکب برای چینش‌های مختلف ضخامتی در ورق دولایه به هم نزدیک است [۲۶]. گریشام و همکارانش اثر پارامترهای جنس مواد هسته، نیروی ورق‌گیر و دما در فرایند کشش عمیق ورق‌های FML بر چروکیدگی لبه و نسبت کشش آن‌ها را بررسی کردند [۲۷]. کالیانسوندارام و همکارانش اثر عواملی چون دما، نیروی ورق‌گیر و رزین (چسب) را بر شکل‌دهی ورق‌های FML ارزیابی نمودند [۲۸]. رجبی و کدخدایان اثر عواملی مانند نیروی ورق‌گیر، دمای پیش‌گرم و جنس مواد را بر چروکیدگی ورق‌های FML در فرایند کشش عمیق سنتی بررسی کردند [۲۹]. کدخدایان و همکاران اثر پارامترهای ضخامت، سرعت بارگذاری، شعاع پانچ، شعاع خم را بر بازگشت فنری بصورت تجربی و تئوری بر روی چندلایه مواد مرکب-فلزی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش شعاع سنبه و با افزایش نیرو بازگشت فنری کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند بازگشت فنری در ورق‌های الیاف-فلزی بیشتر از فلزات یکپارچه است و افزایش ضخامت

لایه میانی باعث کاهش برگشت فنری می‌گردد [۳۰]. سهراب‌خانی و همکارانش اثر سرعت سنبه در چروکیدگی و ارتفاع کشش بصورت تجربی و عددی بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که در فشار محفظه‌ای ۲۵۰ بار و ورق به قطر ۸۰ mm و فاصله ۱ mm بین ماتریس و ورق گیر می‌توان قطعات با سرعت بالایی پانچ و سالم تولید کرد [۳۱]. سوکولوا و همکارانش اثر عواملی مانند ضخامت هسته، شعاع سنبه بر روی پارگی و چروکیدگی بصورت تجربی و فنوگرامتری بر روی ورق‌های ساندویچ مواد مرکب بررسی و نتایج آن‌ها نشان داد که برای سنبه گرد در ورق‌های با ضخامت تا ۱ mm پارگی در لبه‌ها دیده شده، ولی در ضخامت ۲ mm و اماندگی دیده نشد همچنین مقداری چروکیدگی در همه ورق‌ها دیده شد و هرچه هسته بزرگ‌تر شود ورق خارجی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد [۳۲].

### ۱-۵ اهداف و ویژگی‌های پایان‌نامه

در بخش تجربی از این تحقیق ورق‌های FML با استفاده از ورق‌های آلومینیومی و الیاف شیشه با استفاده از رزین پلیمری تولید می‌گردد. خواص مکانیکی ورق تولیدشده با استفاده از آزمون کشش تک‌محوری به دست می‌آید. سپس فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی بر روی نمونه‌های آماده‌شده از این ورق اجرا می‌شود. ارتفاع کشش بحرانی بر اساس میزان فشار محفظه قالب، با ایجاد عیوبی مانند چین‌خوردگی و پارگی محدود خواهد شد. با توجه به نقش کلیدی فشار سیال در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی و عملکرد آن در تأمین نیروی ورق‌گیر، فشار کم سیال موجب بروز چین‌خوردگی و افزایش بیش از حد آن موجب افزایش نیروی اصطکاک در سطح تماس و بروز پارگی زودرس در قطعه می‌گردد؛ بنابراین در این بخش حدود بحرانی فشار سیال داخل محفظه بر حسب تغییرات نسبت ارتفاع کشش ورق FML با استفاده از آزمون‌های تجربی به دست می‌آید. در بخش عددی به مدل‌سازی فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق گرد FML با استفاده از نرم‌افزار تجاری آباکوس ۶،۱۳،۴ پرداخته می‌شود. اثر تابع جابجایی سنبه و فشار محفظه قالب بر ارتفاع کشش بحرانی فنجان تولیدشده از این ورق چندلایه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اثر فشار محفظه‌ای بر ضخامت در پوسته فلزی به دست خواهد آمد. در پایان نتایج عددی به دست آمده از تحلیل المان محدود شامل ارتفاع کشش، توزیع ضخامت، شکل چروکیدگی با نتایج آزمون تجربی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

## ۱-۶ معرفی فصول آتی پایان نامه

این پایان نامه در ۵ فصل تدوین شده است. در فصل نخست ضمن مرور مطالعات انجام شده توضیحاتی مختصر در مورد ورق‌های مواد مرکب، ورق‌های FML و روش شکل‌دهی هیدرومکانیک ارائه شد. در ادامه، در فصل دوم جزئیات فعالیت‌های تجربی و نحوه ساخت ورق‌های FML آمده است. مشخصات تجهیزات طراحی شده برای آزمایش‌ها و ویژگی‌های مواد در این فصل بیان شده است. در فصل سوم به نحوه مدل‌سازی، فرایند به کمک روش المان محدود، نحوه محاسبه نسبت کشش، سطوح اصطکاکی، تعیین شرایط و نیروهای اعمالی، تعیین مراحل شکل‌دهی قطعه پرداخته شده است. در فصل چهارم نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی و تجربی مختلف آورده شده، نتایج مورد بحث قرار خواهد گرفت. در این فصل تأثیر فشار محفظه‌ای، فشار پیش‌بالج و ارتفاع پیش‌بالج بر روی توزیع ضخامت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر فشار پیش‌بالج، بر روی ناحیه کاری و منحنی‌های فشار بحرانی برای نسبت کشش‌های متفاوت مورد بحث قرار گرفته است. جمع‌بندی مطالب، نتیجه‌گیری نهایی و ارائه پیشنهاد برای ادامه‌ی کار در فصل پایانی بیان می‌شود.

## فصل ۲ شرح فعالیت تجربی: ساخت مواد و اجرای فرایند شکل دهی

### ۱-۲ مقدمه

در این فصل طراحی و ساخت تجهیزات موردنیاز برای آزمایش‌ها شامل مجموعه قالب و سیستم کنترل هیدرولیکی فشار محفظه حین فرایند، کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعه گرد LMF بصورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌های تجربی عمدتاً برای پیگیری اهدافی نظیر ارزیابی درستی نتایج حاصل از منحنی‌های ناحیه کاری در شرایط متفاوت با مقایسه نتایج تجربی با نتایج حاصل از تحلیل‌ها عددی و نیز تعیین فشار محفظه‌ای مناسب برای نسبت کشش‌های متفاوت انجام خواهد شد. بر این اساس آزمایش‌های کشش هیدرومکانیکی قطعه با مقطع گرد به روش شکاف ثابت<sup>۱</sup> برای به دست آوردن تجربی فشار بحرانی پارگی و تعیین محدوده مجاز فشار داخل محفظه قالب جهت شکل دهی قطعه بدون بروز پارگی در آن انجام می‌گیرد. در این فصل نخست توضیحاتی در مورد شرح آزمایش‌ها و مشخصات قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی ساخته شده و مدار کنترل هیدرولیکی مورد استفاده آورده می‌شود و سپس در مورد جنس ورق‌های استفاده شده و مشخصات آن‌ها توضیح داده می‌شود. در پایان تجهیزات آزمایش و نتایج تجربی و عملکرد آن تشریح می‌گردد.

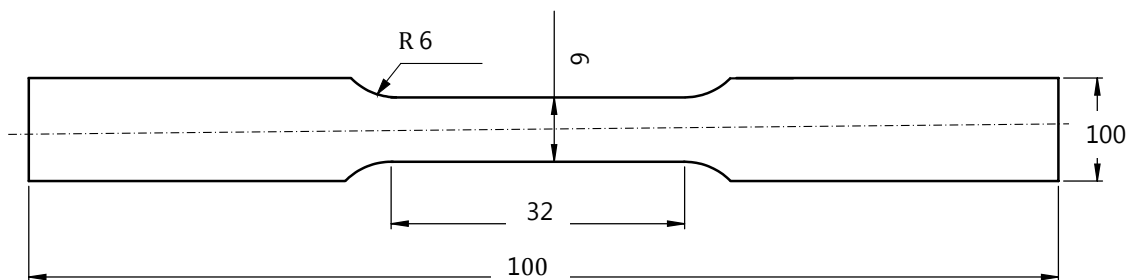
---

<sup>۱</sup> Fixed gap method

## ۲-۲ ساخت FML

## ۱-۲-۲ ورق فلزی مورد استفاده

با توجه به ساختار FML، در انتخاب اجزای آن از جمله پوسته، هسته و نوع چسب اتصال دهنده بین آن‌ها آزادی عمل زیادی وجود دارد و می‌توان با تغییر هر یک از اجزای خواص مکانیکی و فیزیکی متفاوتی به دست آورد. در این پژوهش، با توجه به کاربرد فراوان آلومینیوم در صنایع مختلف و ورق‌های مواد مرکب و نیز سهولت دسترسی و هزینه، همچنین نسبت استحکام به وزن مناسب از آن به عنوان پوسته در ورق FML استفاده شد. با بررسی‌های انجام شده بر روی کاربردهای آلیاژهای مختلف آلومینیوم موجود در بازار با ضخامت کم، برای انجام آزمایش‌های تجربی از ورق‌های FML با پوسته از جنس آلومینیوم AA1050-O با ضخامت ۰/۵ mm و قطرهای ۱۰۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۱۲ mm استفاده گردید. برای تعیین خواص مکانیکی و رفتار مواد پوسته، آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M با دستگاه Zwick- Z 250 انجام شد. ابعاد نمونه آزمون کشش در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی و مکانیکی آن نیز در جداول ۱-۲ و ۲-۲ آمده است.



شکل ۱-۲: نمونه جهت آزمایش کشش (ابعاد به mm)

## جدول ۱-۲: ترکیب شیمیایی AA1050-O

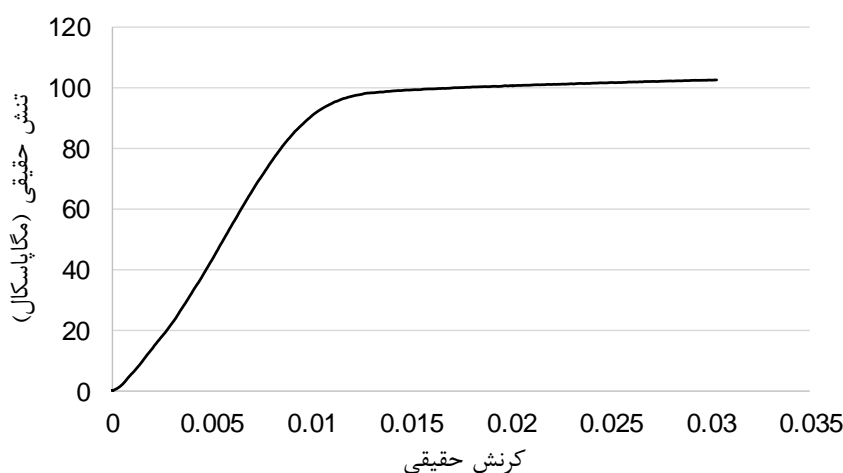
عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	V	Ti	Al, min
درصد وزنی	۰/۲۵	۰/۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	-	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۰	۹۹/۵



جدول ۲-۲: خواص فیزیکی و مکانیکی AA1050-O

چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول کشسان (Gpa)	تنش تسلیم (Mpa)	درصد افزایش طول تا شکست	تنش تسلیم نهایی (Mpa)	ضریب پواسون
۲/۷	۷۰	۳۵	۳۷	۹۵	۰/۳۳

شکل ۲-۲ نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم AA1050-O را نشان می‌دهد. در آلومینیوم AA1050-O پس از انجام عملیات حرارتی آنیل کردن، درصد ازدیاد طول به طور میانگین افزایش می‌یابد. از دلایل تغییر در خواص مکانیکی آلومینیوم AA1050-O پس از عملیات حرارتی آنیل کردن، می‌توان به یکنواخت تر شدن اندازه دانه‌ها و کاهش اثرات کار سختی اشاره نمود.



شکل ۲-۲: نمودار تنش-کرنش حقیقی ورق آلومینیوم AA1050-O

### عملیات حرارتی

با توجه به ترد بودن ورق‌های آلومینیومی خریداری شده از بازار و پایین بودن شکل‌پذیری آن‌ها، عملیات آنیل کامل بر روی آن‌ها انجام شد. عملیات آنیل کردن برای از بین بردن اثرات کار سرد بر روی آلومینیوم با توجه به ساختار و آلیاژهای آن در دما و زمان مشخص قابل دسترسی است. با کاهش اثرات کار سرد در آنیل کامل فلز از حالت تردی به نرم شدن تغییر وضعیت پیدا می‌کند که مقدار این نرم شدن به دما وابسته است. برای کاهش اثرات کار سرد دمای  $345^{\circ}\text{C}$  مناسب به نظر می‌رسد. پیش از انجام آزمایش کشش استاندارد برای تعیین خواص مکانیکی مواد، با توجه به پایین بودن درصد ازدیاد طول نمونه‌های اولیه آلومینیوم، جهت افزایش درصد ازدیاد طول نمونه‌ها و نرم تر شدن آلومینیوم برای اعمال کرنش‌های

- بیشتر در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیک و همچنین کاهش نیروی لازم برای شکل‌دهی، مطابق با استاندارد ASM، عملیات حرارتی آنیل کامل روی آلومینیوم‌ها به شرح زیر انجام شد:
- ۱- قرار دادن نمونه‌های آلومینیومی در کوره خشک با دمای  $345^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ min،
  - ۲- سرد شدن نمونه‌ها در کوره تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$  در زمان ۲ hr،
  - ۳- سرد شدن نمونه‌ها از دمای  $100^{\circ}\text{C}$  تا دمای محیط، بیرون از کوره در زمان تقریبی ۱ hr.

### ۲-۲-۲ هسته مواد مرکب (پیش‌آغشته)

در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در ورق‌های FML از اپوکسی به‌عنوان هسته استفاده شده است، اپوکسی دارای خواص مناسب مکانیکی دارای استحکام مناسب با چگالی پایین است؛ اما استفاده از این ماده به‌عنوان هسته در فرایندهای شکل‌دهی که با تغییر شکل‌های زیاد همراه است با توجه به کرنش شکست پایین این ماده و نیاز به لایه متصل‌کننده (چسب) آن به فلز و زمان بر بودن ساخت هر نمونه با توجه به فرایند ساخت رزین‌های ترموست و نیز نوع فرایند شکل‌دهی هیدرومکانیکی مناسب نیست. برای رفع این محدودیت‌ها، از پلی‌یورتان PU<sup>۱</sup> با درجه سختی ۶۵ شور-آ ساخت کشور ایتالیا استفاده گردید. از جمله مزایای پلیمر ترموپلاست مورد استفاده به‌عنوان هسته نسبت به اپوکسی می‌توان به ازدیاد طول بالا و عدم شکست هسته ورق FML در حین فرایند شکل‌دهی، چگالی پایین و عدم نیاز به اتصال چسبی اشاره نمود. لازم به ذکر است که پلی‌یورتان به‌عنوان هسته به همراه الیاف شیشه بافته شده می‌تواند به‌عنوان چسب نیز بکار گرفته شود. جهت تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی هسته مواد مرکب از آزمون کششی تک‌محوره بر طبق استاندارد ASTM D3039 M بهره گرفته شد. نمونه آزمون هسته کامپوزیتی شامل پلی‌یورتان تقویت شده با الیاف شیشه با ابعاد  $12 \times 120 \times 2/5$  mm با سرعت ۵ mm بر دقیقه با استفاده از دستگاه کشش هانسفیلد کشیده شد که نتایج آن در جدول ۲-۳ آورده شده است. در شکل ۲-۳ شکل شماتیک هسته کامپوزیتی نمایش داده شده است.

جدول ۲-۳: خواص مکانیکی هسته مواد مرکب

$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\epsilon_f$	$\nu$
۱/۷	۱/۷	٪۴۰	۰/۲۷

<sup>۱</sup> Polyurethane (PU)



شکل ۳-۲: شکل شماتیک لایه چینی هسته کامپوزیتی

با توجه به درصد ازدیاد طول بالای پلی یورتان و خواص ویژه پلی یورتان از جمله عدم نیاز به لایه اتصال دهنده (چسب) بین هسته و پوسته از این ماده به عنوان هسته تقویت شده با الیاف شیشه بافته شده و کلاس E-Glass استفاده شد. در فرایند کشش هیدرومکانیکی، پلی یورتان هیچ گاه وارد منطقه تغییر شکل پلاستیک نمی شود و تغییر شکل پلاستیک ورق بر عهده پوسته آلومینیومی است. جدول ۴-۲ خواص پلی یورتان ۶۵ شور-آ بر اساس آزمون استاندارد نمایش می دهد.

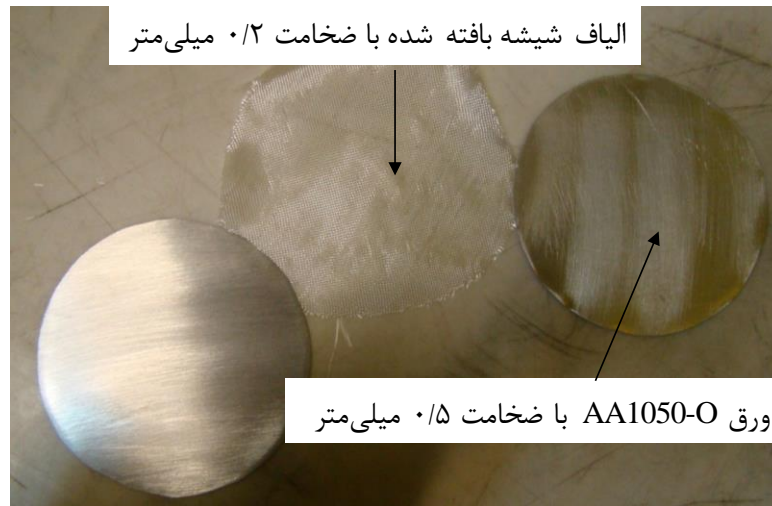
جدول ۴-۲: خواص فیزیکی پلی یورتان

چگالی (gr/cc)	کرنش تا شکست (%)	سختی شور-آ
۱/۱	۱۰۰۱	۶۵

### ۳-۲-۲ روش ساخت FML

با توجه به استانداردهای موجود جهت ساخت ورق مواد مرکب و نیز اتصال بهتر لایه ها و کاهش احتمال جدایش آن ها از استاندارد ISO 4588 جهت آماده سازی ورق آلومینیومی استفاده گردید که به شرح زیر است:

- ۱- پلیسه گیری نمونه ها،
- ۲- تمیز کردن سطح با محلول استون،
- ۳- روغن زدایی (فروردن نمونه ها در محلول ۲٪ سود سوزآور به همراه آب) ،
- ۴- سایش سطح نمونه با سنباده با سطح ریز و شماره زبری P-180 (شکل ۲-۴) ،
- ۵- شست و شو با آب و خشک کردن نمونه ها.



شکل ۲-۴: ورق آلومینیومی با سطح پولیش شده

بعد از آماده سازی ورق آلومینیومی، نوبت به ساخت هسته پلی یورتان با الیاف شیشه می رسد. مراحل ساخت هسته به شرح زیر است:

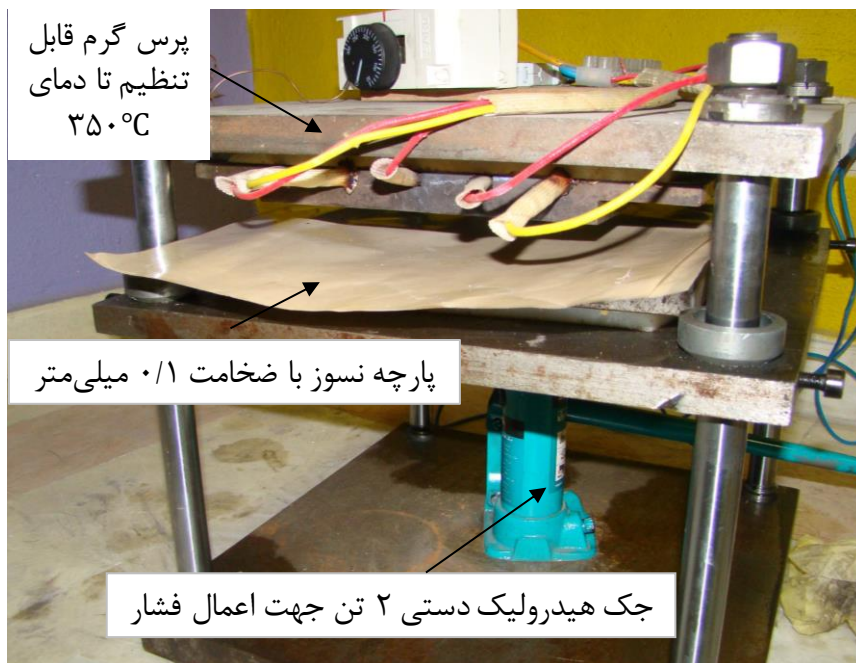
الف- مطابق با شکل ۲-۵ مقدار مشخصی از گرانول پلی یورتان در داخل پرس گرم جهت ساخت لایه نازک از پلی یورتان با ضخامت مشخص و مورد نظر (با استفاده از فاصله اندازه ای که در اطراف گرانول ها و بین فک های پرس گرم قرار می گیرد می توان به ضخامت مشخص رسید) قرار داده شد. برای جلوگیری از چسبیدن گرانول ها به سطوح پرس گرم از نوعی تفلون با نام تجاری پارچه نسوز با ضخامت  $0.1 \text{ mm}$  موجود در بازار استفاده شده است.



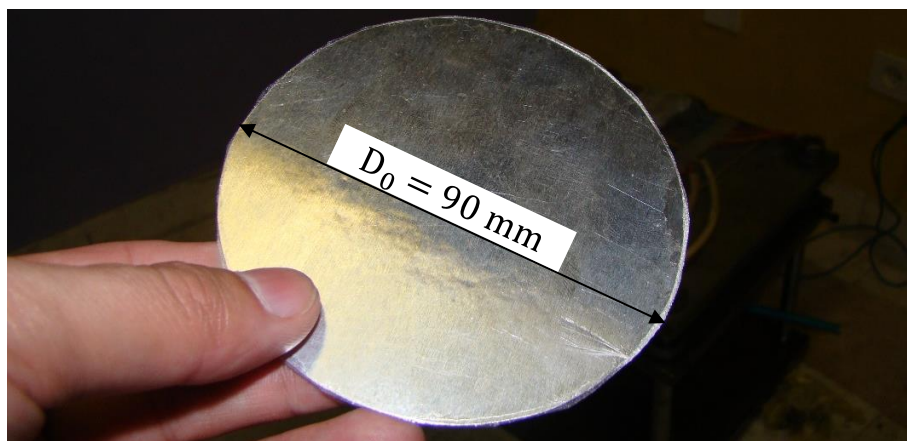
شکل ۲-۵: قرار دادن گرانول بر روی پارچه نسوز

ب- بعد از تهیه فیلم نازک پلی یورتان، با قرار دادن الیاف شیشه با ضخامت  $0.1 \text{ mm}$  در بین دو لایه فیلم نازک پلی یورتان و هسته مذکور در بین پوسته های آلومینیوم و نیز قرار دادن مجموعه در داخل پرس

گرم قابل تنظیم به مدت ۵ min در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  مبادرت به ساخت ورق FML نموده شد. شکل‌های ۶-۲ و ۷-۲ به ترتیب نمایی از پرس گرم استفاده شده و ورق FML ساخته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲: پرس گرم استفاده شده برای ساخت ورق FML



FML با پوسته AA1050-0 و هسته پلی یورتان/الیاف شیشه/پلی یورتان

شکل ۷-۲: ورق FML ساخته شده

## ۲-۳-۲ آزمون کشش هیدرومکانیکی

### ۱-۳-۲ انتخاب پارامترها و طراحی آزمایش

در بخش تجربی اثر پارامترهای فشار محفظه‌ای و فشار پیش‌بالج در چند نسبت کشش مختلف در فرایند کشش هیدرومکانیکی و اثر آن بر قابلیت شکل‌پذیری FML بررسی شد. نحوه چیدمان لایه‌ها بصورت AA1050/PU/GLASS/PU/AA1050 است که در آن فیلم نازک پلی‌یورتان به‌عنوان رزین استفاده شده است. شایان‌ذکر است پارامترهای فشار پیش‌بالج در نسبت کشش ۱/۸ از فشار ۰ تا ۵۵ بار آزمایش گردید و تغییرات فشار محفظه‌ای نیز در نسبت کشش ۱/۸، ۲، ۲/۲، ۲/۳ مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲-۳-۲ تجهیزات آزمایش

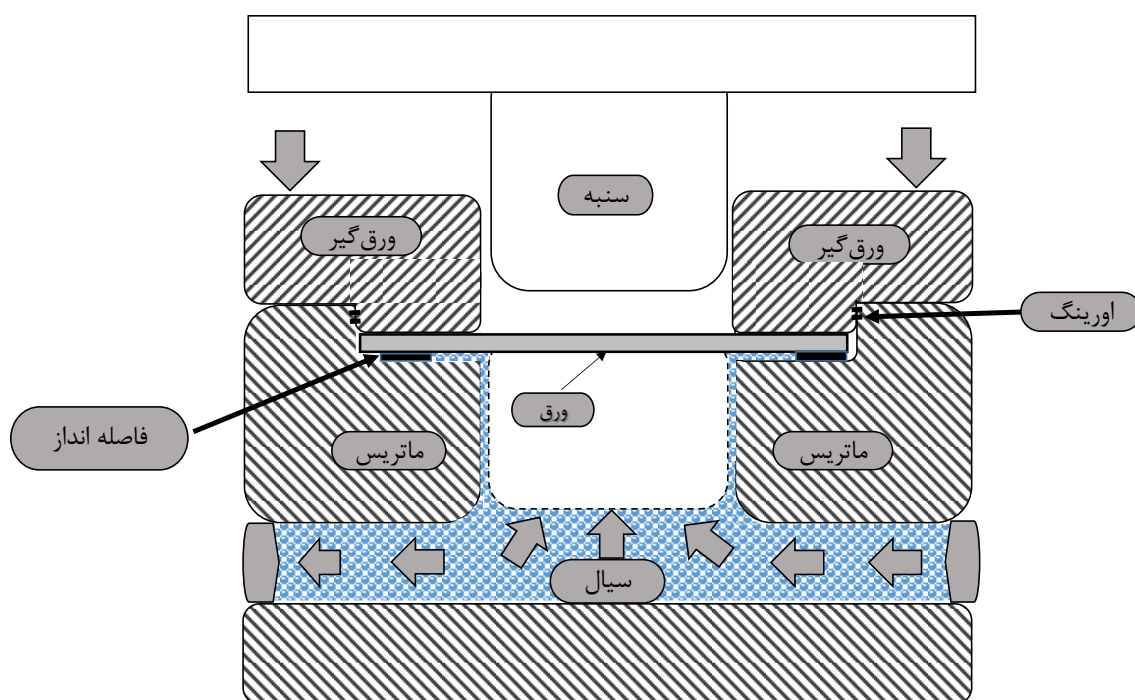
جهت انجام آزمایش‌های کشش هیدرومکانیکی قطعات گرد، مجموعه قالب کشش طراحی و ساخته شد. سیال مورد استفاده روغن بوده، مدار کنترل هیدرولیکی موردنیاز برای کنترل فشار سیال در حین فرایند طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها با کمک یک دستگاه پرس هیدرولیکی ۸۰ تن انجام گردید.

### الف- قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی

اجزای اصلی قالب کشش هیدرومکانیکی شامل سنبه، ماتریس کشش، محفظه مایع و ورق‌گیر است. شکل شماتیک این قالب که جهت کشش قطعات گرد طراحی شده است در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. محفظه سیال از جنس فولاد ساختمانی st-37 ساخته شده است. مایع تحت فشار داخل این محفظه، نقش ماتریس را در عملیات انجام خواهد داد و با فشردن ورق به اطراف سنبه، باعث شکل‌گیری ورق مطابق شکل سنبه می‌شود. از آنجاکه در حین شکل‌گیری ورق به کمک سنبه، فشار به‌صورت منفعل<sup>۱</sup> با حرکت سنبه به داخل محفظه ایجاد می‌گردد، حجم محفظه تأثیر بسزایی در افزایش فشار خواهد داشت. ماتریس کشش، سنبه و ورق‌گیر از جنس فولاد بهسازی CK-45 با عملیات حرارتی جهت افزایش سختی تا 40 HRC شد. ماتریس کشش بصورت بدون لقی در دهانه محفظه سیال قرار داده می‌شود و ورق‌گیر به کمک ۶ عدد پیچ M10 ثابت می‌گردد. از آنجاکه فرایند کشش هیدرومکانیکی بصورت شکاف ثابت انجام گرفته است، ارتفاع شکاف یا فضای بین ماتریس کشش و ورق‌گیر که محل قرارگیری لوح اولیه

<sup>۱</sup> Passive

است با استفاده از تعدادی فاصله‌انداز تنظیم و در حین فرایند ثابت نگه‌داشته می‌شود. این فضا اندکی بیش از ضخامت ورق است و در نتیجه ورق در ناحیه فلانچ از یک سو با ورق گیر در تماس است و از سوی دیگر تحت فشار سیال است. بنابراین فشار ورق گیر بوسیله فشار سیال تعیین می‌گردد. علاوه بر این گرداگرد لبه ورق نیز تحت فشار سیال است که این مسئله هم به جریان فلزی در فرایند کمک خواهد کرد. با توجه به انطباق دقیق دیواره ورق گیر و محفظه روغن و ایجاد سیستم آب‌بندی فلز با فلز، جهت اطمینان از عدم خروج روغن از محفظه و افت فشار حین فرایند، از تعدادی اوریینگ<sup>۱</sup> بین دیواره ورق گیر و محفظه روغن استفاده شده است. همچنین لقی کم سوراخ میانی ورق گیر با سنبه با توجه به ارتفاع نسبتاً زیاد ورق گیر باعث می‌شود ورق گیر در بخش درگیر با سنبه به‌عنوان راهنمای سنبه عمل نماید.



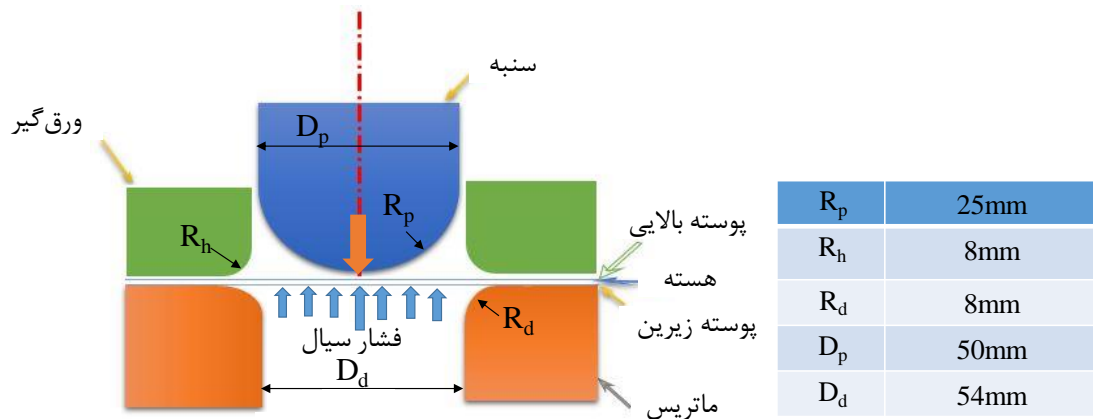
شکل ۲-۸: طرحواره فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی

دو پله بودن سوراخ میانی ورق گیر و ایجاد ناحیه با قطر بیشتر جهت فراهم شدن فضای لازم برای تغییر شکل ورق در مرحله پیش‌بالج است. در تغییر شکل پیش‌بالج که اولین مرحله از شکل‌دهی ورق در فرایند کشش هیدرومکانیکی است، سنبه در موقعیتی ثابت در ارتفاعی کمی بالاتر از سطح ورق به صورت ثابت قرار می‌گیرد و افزایش فشار مایع درون محفظه باعث بالج ورق به سمت بالا و تماس آن با سنبه

<sup>۱</sup> O-ring



می‌شود. مسیر تعبیه شده در دیواره محفظه در محل بین ماتریس کشش و ورق گیر نیز جهت خروج هوای داخل محفظه با پر شدن آن توسط روغن پیش از آغاز عملیات است. مشخصات ابعادی قالب در شکل ۲-۹ آورده شده است. نقشه های مونتاژی قالب و اجزای آن به همراه مشخصات کامل آن ها در پیوست آورده شده است.

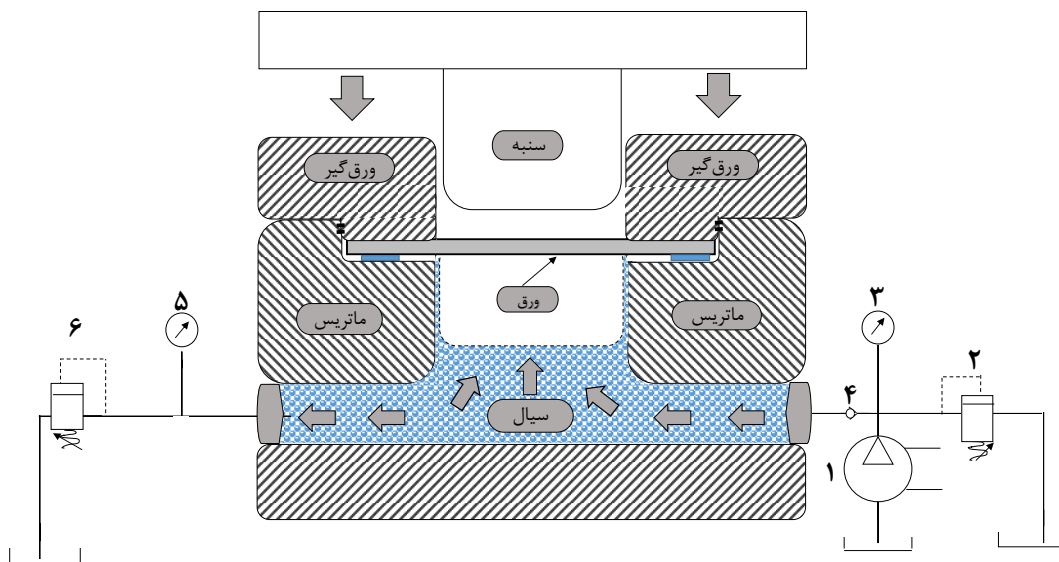


شکل ۲-۹: مشخصات ابعادی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی

### ب-مدار کنترل هیدرولیکی

برای کنترل فشار روغن در مراحل مختلف فرایند، از یک مدار کنترل هیدرولیکی مطابق شکل ۲-۱۰ استفاده شده است. در مرحله پیش‌بالج روغن به کمک پمپ ۱ به محفظه وارد شده، فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد و ورق به سمت سنبله که در موقعیتی بالاتر از سطح اولیه ورق ثابت است، بالج می‌شود. فشار در این مرحله با شیر کنترل فشار ۲ تنظیم می‌گردد. در مرحله شکل‌گیری ورق به کمک سنبله، با حرکت سنبله به داخل محفظه فشار روغن به شدت افزایش می‌یابد. شیر یک‌طرفه ۴ مانع از برگشت روغن و تخلیه آن از طریق واحد پیش‌بالج می‌شود. حداکثر فشار سیال داخل محفظه در حین فرایند با استفاده از شیر کنترل فشار نهایی ۶ تنظیم می‌گردد. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می‌یابد. مسیر شوماتیک فشار مورد استفاده در فرایند به صورتی است که فشار اولیه یا فشار محفظه در ارتفاع کشش صفر، فشار ایجاد شده در مرحله پیش‌بالج است. ناحیه افزایش فشار محفظه ناشی از حرکت سنبله به داخل محفظه بوده و بخش فشار ثابت مربوط به زمانی است که مسیر تخلیه سیال به وسیله شیر تنظیم فشار نهایی باز شده و فشار در مقدار تعیین شده ثابت می‌ماند.





شکل ۲-۱۰: مدار هیدرولیکی کنترل فشار محفظه‌ی سیال، ۱: پمپ هیدرولیک، ۲: شیر کنترل فشار پیش‌بالم، ۳: فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار پیش‌بالم، ۴: شیر یک‌طرفه، ۵: فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار نهایی، ۶: شیر کنترل فشار نهایی محفظه

#### ۴-۲ آزمون‌های تجربی کشش هیدرومکانیکی

برای انجام آزمایش‌ها، ورق‌های چندلایه گرد با قطر ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۱۲ mm به ضخامت کل ۱/۵ mm ساخته شد. شکل ۲-۱۱ تا ۲-۱۷ نمایی از تجهیزات آزمایش و قالب کشش هیدرومکانیکی و نمونه تولیدشده جهت آزمون کشش هیدرومکانیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱: قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی



شکل ۲-۱۲: مجموعه سنبه و قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی



شکل ۲-۱۳: پمپ هیدرولیک دستی ۷۰۰ بار



شکل ۲-۱۴: شیر کنترل فشار



شکل ۲-۱۵: اجزای مدار کنترل برگشت فشار روغن



شکل ۲-۱۶: واشر لاستیکی برای انجام آزمایش عملی



$$D_0 = 90, 100, 110, 112 \text{ (mm)}$$

شکل ۲-۱۷: لوح اولیه برای انجام آزمایش عملی



## فصل ۳ شبیه‌سازی عددی فرایند کشش هیدرومکانیکی FML

### ۳-۱ مقدمه

در یک دسته‌بندی کلی برای حل مسائل شکل‌دهی فلزات سه روش وجود دارد:

۱- روش تحلیلی

۲- روش عددی

۳- روش تجربی

روش تجربی روشی پرهزینه بوده، مدت‌زمان زیادی را جهت بررسی می‌طلبد. روش تحلیلی در حل مسائلی نظیر هیدروفرمینگ ورق که هندسه‌ی پیچیده دارند و یا شرایط مرزی کمی پیچیده می‌شود، در حالات ساده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که کاربرد روش عددی در شاخه‌های مختلف علوم و از جمله شکل‌دهی فلزات به مدد پیشرفت دانش رایانه از گسترش بی‌نظیری برخوردار بوده است. استفاده از یک نظریه‌ی پایه بصورت یک قالب ریاضی مطلوب و تبدیل آن روابط پیچیده به روابطی ساده و اجرای نهایی محاسبات توسط کامپیوتر، نقش اساسی در تحلیل به کمک روش‌های عددی دارد. در این میان، روش اجزای محدود به‌منزله‌ی روش عددی، نقش ویژه‌ای ایفا می‌کند.

روش اجزای محدود<sup>۱</sup> برای اولین بار در دهه‌ی ۱۹۵۰ معرفی شد و از آن زمان تاکنون بصورت پیوسته گسترش و بهبود یافته است. این روش، به‌عنوان یک ابزار مفید و مطمئن برای به دست آوردن اطلاعات دقیق درباره‌ی فرایند شکل‌دهی شناخته شده است.

از مهم‌ترین مزایای بررسی شکل‌پذیری به روش المان محدود، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- کاهش زمان تحلیل فرایند،

۲- کاهش هزینه تحلیل فرایند،

۳- سهولت در بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در شکل‌پذیری،

۴- تعیین زمان گلویی شدن موضعی و کرنش‌های حدی پس از تأیید نهایی مدل.

در این فصل، روش تحلیل اجزای محدود فرایند کشش هیدرومکانیکی قطعات گرد در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و توسط کد صریح دینامیکی تحلیل می‌شوند. در ادامه نخست بطور مختصر روش اجزای محدود و برخی از نکات آن بصورت مختصر شرح داده می‌شود. سپس مراحل شبیه‌سازی فرایند، شامل ترسیم مدل ورق و قالب و همچنین مونتاژ و شبکه‌بندی آن‌ها و درنهایت، نحوه‌ی بارگذاری و اعمال شرایط مرزی توضیح داده می‌شود.

### ۳-۲ تعریف مدل المان محدود

در ادامه، مراحل شبیه‌سازی فرایند کشش هیدرومکانیکی برای قطعات گرد FML توضیح داده شده است.

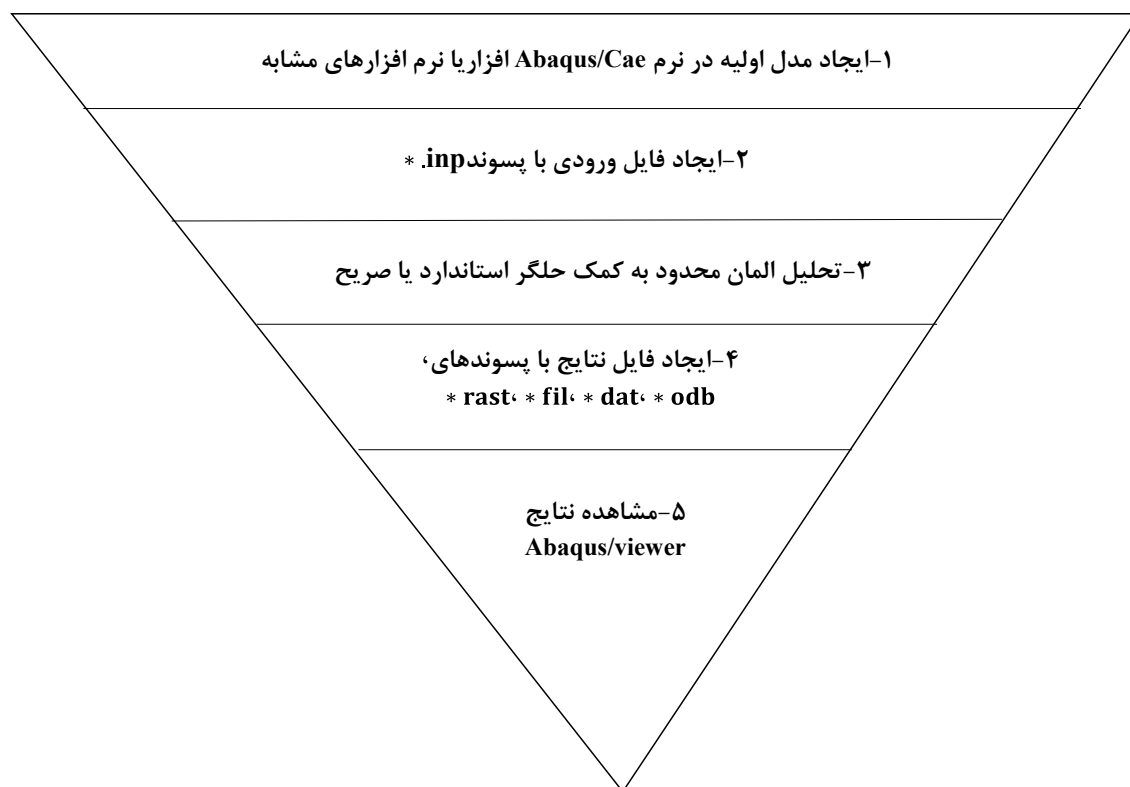
#### ۳-۲-۱ هندسه فرایند

برای انجام شبیه‌سازی یک سنبه  $100\text{ mm}$  طراحی شد که شعاع نیم‌کره  $25\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. ضخامت لوح  $1/5\text{ mm}$  و لقی بین سنبه و ورق‌گیر برابر  $4\text{ mm}$  است. بارگذاری بصورت توزیع فشار مستقیم بر سطح ورق بوده و تغییرات فشار بصورت خطی که در طول فرایند افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Finite element method (FEM)

## ۳-۲-۲ مراحل انجام تحلیل

شبیه‌سازی این فرایند در نرم‌افزار آباکوس ۶,۱۳,۴ انجام شده است. نرم‌افزار مورد استفاده بر پایه روش اجزای محدود به تحلیل فرایندهای متفاوت می‌پردازد تحلیل این فرایند در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول با توجه به قطعه مورد نظر و همچنین ابعاد به دست آمده از قبیل ابعاد سنبه، ماتریس، ورق‌گیر و صفحه کشش، شبیه‌سازی در محیط آباکوس ۶,۱۳,۴ انجام شده است. سپس در مرحله دوم شرایط مرزی، المان مناسب و همچنین شرایط اولیه ورق و اجزای دیگر قالب اعمال گردیده است. شکل ۱-۰۳ بصورت کلی روند یک تحلیل در این نرم‌افزار را نشان می‌دهد. با توجه به ترتیب نشان داده شده که اولین مرحله در انجام تحلیل، تعریف مسئله است. بعد از ایجاد مدل مورد نظر و اعمال جنس، شرایط اولیه و شرایط مرزی، فایل حاوی اطلاعات مربوطه به منظور انجام محاسبات به قسمت حل‌گر فرستاده می‌شود. قسمت حل‌گر در این نرم‌افزار به دو نوع استاندارد<sup>۱</sup> و صریح<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. بعد از اتمام تحلیل، فایل‌های خروجی استخراج می‌شوند که حاوی اطلاعات مورد نظر می‌باشند.



شکل ۱-۳: روند کلی یک تحلیل المان محدود در محیط آباکوس

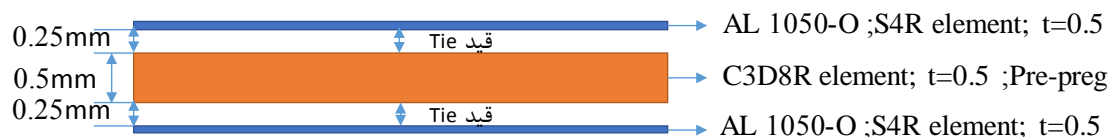
<sup>۱</sup> Standard

<sup>۲</sup> Explicit



### ۳-۲-۳ نحوه مدل‌سازی فرایند

گرده‌ی اولیه بصورت جسم شکل‌پذیر<sup>۱</sup> و سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. ابتدا یک لوح گرد بصورت ۱/۴ که هسته مواد مرکب بصورت جامد<sup>۲</sup> شکل‌پذیر و ورق آلومینیومی بصورت المان پوسته<sup>۳</sup> مدل شده است. اجزای دیگر نیز بصورت جسم صلب تعریف شد. شکل ۲-۳ مقطع مدل‌سازی شده را نمایش می‌دهد که با استفاده از دستور Tie سه لایه مجزا به یکدیگر چسبانده شد (پوسته از جنس آلومینیوم AA1050-O با ضخامت ۰/۵ mm و هسته از جنس مواد مرکب پلی‌یورتان و شیشه با ضخامت ۰/۵ mm) و خصوصیات مکانیکی مواد هر لایه به آن تعریف می‌گردد. در نرم‌افزار آباکوس، دو بخش کشسان و پلاستیک ماده بصورت جداگانه تعریف می‌شوند. برای تعیین خواص هسته از جنس پلی‌یورتان، مطابق نتایج آزمایش کشش استاندارد، یک ماده هایپر الاستیک همسانگرد تعریف شد.



شکل ۲-۳: مشخصات لوح شبیه‌سازی شده

بعد از ایجاد لوح موردنظر، در بخش تعیین خواص مواد، سه ماده تعریف شد. پوسته‌های آلومینیومی AL1050-O به‌عنوان ماده همسانگرد و هسته مواد مرکب بصورت پوسته پیوسته<sup>۴</sup> در نظر گرفته شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی این مواد مطابق جدول ۲-۳ و ۲-۴ فصل قبل و مطابق نتایج آزمایش کشش استاندارد به هر یک از مواد موردنیاز با ضخامت مشخص داده شد. فاصله بین لوح و ماتریس، لوح و ورق گیر ۰/۵۵ mm و همچنین فاصله بین لوح و سنبه ۲mm در نظر گرفته شده است. شکل ۳-۳ نمای از مدل مونتاژی را نشان می‌دهد.

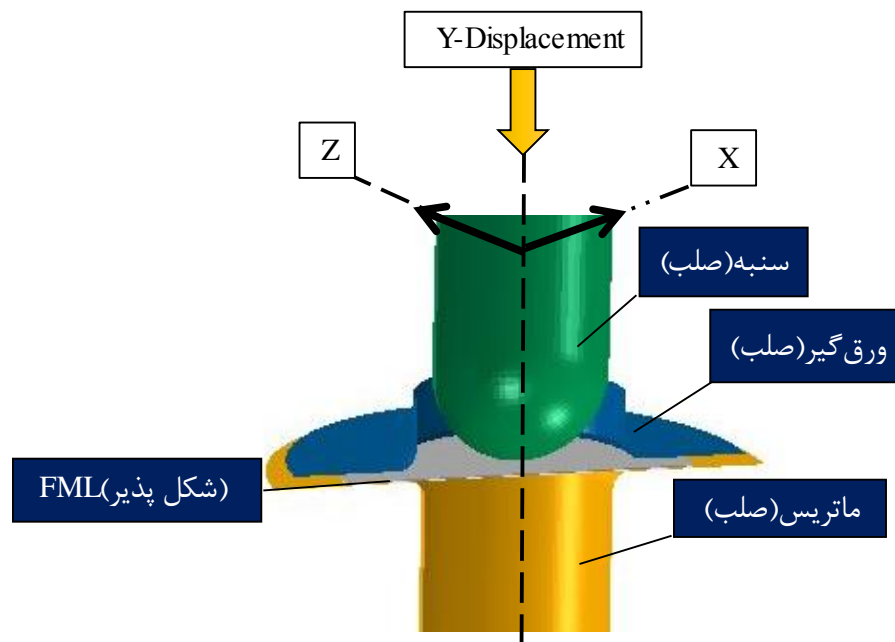
<sup>۱</sup> Deformable part

<sup>۲</sup> Solid

<sup>۳</sup> Shell

<sup>۴</sup> Continuum shell





شکل ۳-۳: نمایی از مدل برش خورده فرایند (قبل از تحلیل)

بعد از اتمام مدل‌سازی فرایند، شرایط اولیه و مرزی به مدل ایجاد شده اعمال گردید.

### ۳-۲-۴ نسبت کشش<sup>۱</sup>

نسبت کشش در قطعات استوانه‌ای از رابطه ۳-۱ بدست می‌آید.

$$DR = \frac{D_0}{D_p} \quad ۳-۱$$

که در این رابطه  $D_0$  قطر لوح اولیه و  $D_p$  قطر نیم‌کره سر سنبه است.

از آنجایی که هر فرایندی تنظیمات فرایند و پارامترهای فرایند خاص خودش را دارد لذا سعی بر این است که مناسب‌ترین متغیرهای ورودی شامل ابعاد ورق تغییرشکل نیافته، نیروی ورق‌گیر، جابجایی سنبه و فشار سیال برای هر فرایند در هر هندسه ابزار تعیین گردند. این متغیرها ممکن است برای یک گروه از شبیه‌سازی متفاوت باشند و فقط هندسه ابزار و شرایط روان کار حین انجام فرایند ثابت هستند. برای سطح مقطع نیم‌کره، ورق‌های گرد برای به دست آوردن نتایج صحیح و واقع‌بینانه و مقایسه درست فرایندها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که نیم‌کره سنبه با قطر ۵۰ mm ثابت بوده و ابعاد ورق از قطر ۹۰ mm با افزایش قطر تا ۱۱۲ mm با توجه به نسبت‌های کشش متفاوت متغیر است. جدول ۳-۱ بیانگر اندازه لوح در نسبت‌های کشش متفاوت است.

<sup>۱</sup> Drawing Ratio (DR)

جدول ۳-۱: اندازه لوح برای نسبت‌های کشش متفاوت

نسبت کشش	اندازه لوح (mm)
۱/۸	۹۰
۲	۱۰۰
۲/۲	۱۱۰
۲/۲۵	۱۱۲

### ۳-۲-۵ سطوح اصطکاکی

تعریف سطوح اصطکاکی در فرایند کشش عمیق یکی از اصلی‌ترین مراحل در شبیه‌سازی این فرایند است. لذا تغییر ضخامت در این قطعات باید به‌خوبی مدل گردد چرا که تاثیر بسزایی به تغییر ضخامت ورق خواهد داشت. با افزایش ضخامت ورق در منطقه فلنج، در صورتی که افزایش ضخامت بیش از فاصله‌انداز موجود بین ورق و ورق‌گیر باشد، ورق از یک سمت با ماتریس و از سمت دیگر با ورق‌گیر تماس پیدا خواهد کرد. بصورت پیش‌فرض در صورت افزایش بیشتر ضخامت، نیروی فشاری عمودی بر ورق بسیار زیاد خواهد شد. نرم‌افزار آباکوس جهت مدل کردن تغییرات فشار اعمالی بین سطوح تماسی در اثر نفوذ دو سطح در یکدیگر که بر اساس افزایش ضخامت ورق بیش از فاصله‌انداز موجود می‌آید، حالات مختلفی را پیش‌بینی نموده است:

حالت اول: پیش‌فرض تماس سخت بین دو سطح است که نیروی عمودی وارد بر سطح تا قبل از تماس صفر است ولی با برقراری تماس، نیروی عمودی هر مقداری می‌تواند باشد و قابل کنترل نخواهد بود. در صورت استفاده از رابطه تماس سخت بین ورق و ورق‌گیر بعد از تماس، بعد از افزایش ضخامت ورق به میزان فاصله‌انداز موجود بین ورق و ورق‌گیر، نیروی عمودی وارد بر ورق به‌سرعت افزایش پیدا کرده و پارگی اتفاق می‌افتد. لذا برای کشش عمیق از این نوع رابطه نفوذ بین سطوح استفاده نمی‌شود.

حالت دوم: بعد از تماس سطوح با یکدیگر با افزایش مقدار نفوذ دو سطح در یکدیگر، نیروی عمودی وارد بر سطح بصورت خطی متناسب با میزان نفوذ در سطح در یکدیگر افزایش می‌یابد.

حالت سوم: فشار تماسی بین سطوح بصورت تابعی‌نمایی از فاصله‌انداز<sup>۱</sup> موجود بین سطوح است.

<sup>۱</sup>Gap

حالت چهارم: فشار تماسی بین دو سطح بصورت یک جدول به ازای مقادیر مختلف فاصله‌انداز بین دو سطح تعریف می‌گردد.

در اغلب موارد، قانون اصطکاک مورد استفاده، قانون کولمب یا آمونتون<sup>۱</sup> است. که بیان می‌کند مقدار نیروی اصطکاک با مقدار نیروی عمودی سطح متناسب است یا به عبارت دیگر تنش اصطکاک با تنش نرمال (فشار) متناسب است. قانون کولمب معمولاً در فشارهای کم و قبل از اینکه تغییر شکل زیادی رخ دهد، صحت دارد. در فشارهای بالا خواص مواد نیز باید مدنظر قرار گیرد. در این شبیه‌سازی از مدل اصطکاک کولمبی استفاده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۲-۳ ضرایب اصطکاک بین اجزاء ارائه شده است. انتخاب ضریب اصطکاک مناسب با استفاده از روش سعی و خطا و با مقایسه نتایج هندسه نمونه شبیه‌سازی و تجربی در خصوص قطر نهایی نمونه کشیده شده و پیش بینی نوار پارگی صورت پذیرفت.

#### جدول ۲-۳: ضرایب اصطکاک بین لوح و ابزار

۰/۰۵	ضریب اصطکاک بین لوح و ورق گیر
۰/۱	ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه
۰/۰۵	ضریب اصطکاک بین لوح و قالب

#### ۲-۲-۶ تعیین شرایط مرزی و نیروهای اعمالی جهت شکل‌دهی

در مرحله اول که شامل بالجینگ ورق است، تمامی درجات آزادی سنبه، ماتریس و ورق گیر گرفته می‌شود. در مرحله اول، فشار سیال بصورت تدریجی و به کمک دامنه گام هموار<sup>۲</sup> به ورق اعمال می‌گردد تا از اثرات دینامیکی جلوگیری شود. فشار سیال در مرحله بالجینگ بصورت خطی افزایش می‌یابد تا در انتها این مرحله فشار اولیه محفظه‌ای اعمال شده باشد. با اعمال این فشار در انتهای این مرحله بالاترین نقطه ورق به سنبه مماس خواهد شد.

<sup>۱</sup> Amonton's law

<sup>۲</sup> Smooth step

در مرحله دوم درجه آزادی سنبه با اجازه حرکت آن به سمت حفره ماتریس تغییر داده می‌شود. سنبه با سرعت ۵ mm بر دقیقه به سمت ماتریس حرکت می‌کند. در این مرحله با حرکت سنبه به داخل محفظه فشار به تدریج افزایش می‌یابد تا به میزان فشار تنظیم شیر اطمینان برسد. برای دامنه تغییرات فشار سیال حالات مختلفی در نظر گرفته شده که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

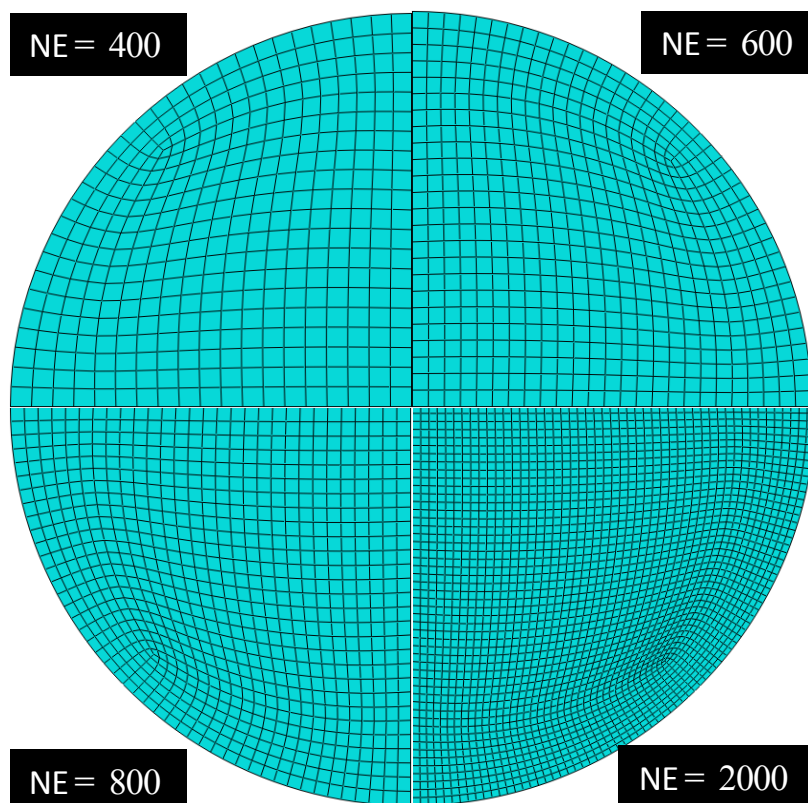
### ۷-۲-۳ تعیین مراحل شکل‌دهی

برای اعمال نیروها، دو مرحله<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. در مرحله اول با اعمال فشار اولیه، ورق بصورت برآمده در خواهد آمد. در مرحله دوم با حرکت سنبه به سمت محفظه ماتریس فرایند شکل‌دهی انجام خواهد شد. از دامنه نوع گام هموار هم برای اعمال بارگذاری استفاده شد. دامنه به صورتی تعریف شد که میزان بارگذاری در زمان ابتدای گام برابر صفر باشد و این میزان در زمان پایان گام به بیشینه خود برسد. لازم به ذکر است که برای ورق‌گیر، تمام درجات آزادی در گام دوم محدود شد تا پس از اعمال بارگذاری در گام اول، ورق‌گیر تا پایان آزمایش باقی بماند.

### ۸-۲-۳ شبکه‌بندی

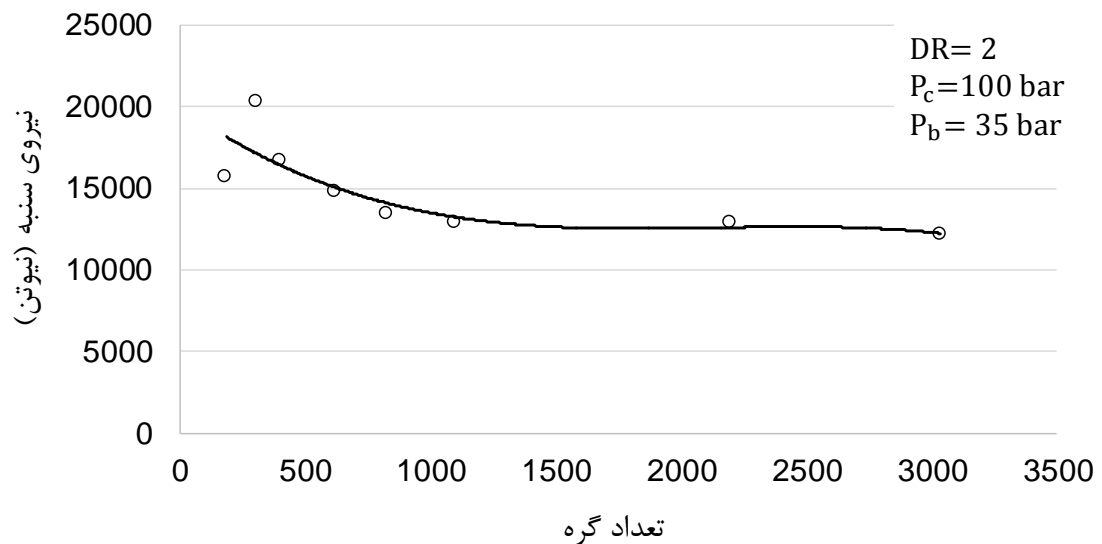
مهم‌ترین قسمت یک شبیه‌سازی المان محدود، تعیین نوع و اندازه مش است. برای قطعات صلب مدل شده بصورت جسم صلب، از المان نوع R3D4 استفاده شد. اندازه مش در نظر گرفته شده برای اجسام صلب در تماس با اجسام شکل‌پذیر، همواره باید کوچک‌تر از اندازه مش جسم شکل‌پذیر باشد. در این شبیه‌سازی اندازه مش اجسام صلب برابر ۰/۱ بزرگ‌ترین اندازه مش‌بندی جسم شکل‌پذیر (ورق ساندویچی) در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی، لوح از المان C3D8R برای هسته و S4R جهت شبکه‌بندی پوسته استفاده شد. در شکل ۳-۴ نوع و تعداد المان‌های در نظر گرفته شده جهت شبکه‌بندی نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup> Step



شکل ۳-۴: مدل المان محدود شبکه‌بندی شده ورق از نمای بالا با توجه به تعداد المان

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان‌ها است. برای انتخاب تعداد المان موردنیاز برای هر لوح با ابعاد معین، ابتدا المان درشت در نظر گرفته شد سپس اندازه المان را کوچک کرده، این کوچک کردن را تا حدی انجام شد که اولاً تحلیل مذکور بصورت کامل انجام شود دوماً تغییرات توزیع کرنش نسبت به حالتی که اندازه المان یک مرتبه بزرگ‌تر است از ۰.۵٪ تغییر تجاوز نکند؛ البته پارامتر زمان هم در نظر گرفته شد در صورتی که کوچک کردن المان‌ها سبب افزایش بسیار زیاد زمان تحلیل می‌شد فرایند کوچک کردن متوقف می‌شد که در این تحلیل‌ها این امر اتفاق نیفتاد. همچنین برای به دست آوردن اندازه‌ی مناسب شبکه‌بندی ورق، متناسب با ابعاد مدل هندسی تحلیل و حصول به نتایج دقیق، تحلیل استقلال نتایج از شبکه‌بندی انجام شد. برای این منظور، چند اندازه‌ی شبکه‌بندی مختلف در نظر گرفته شد و از هر تحلیل، مقدار بیشترین نیروی سنبه به تعداد گره‌ها محاسبه شد. این مقادیر در نمودار شکل ۳-۵ آورده شده است.

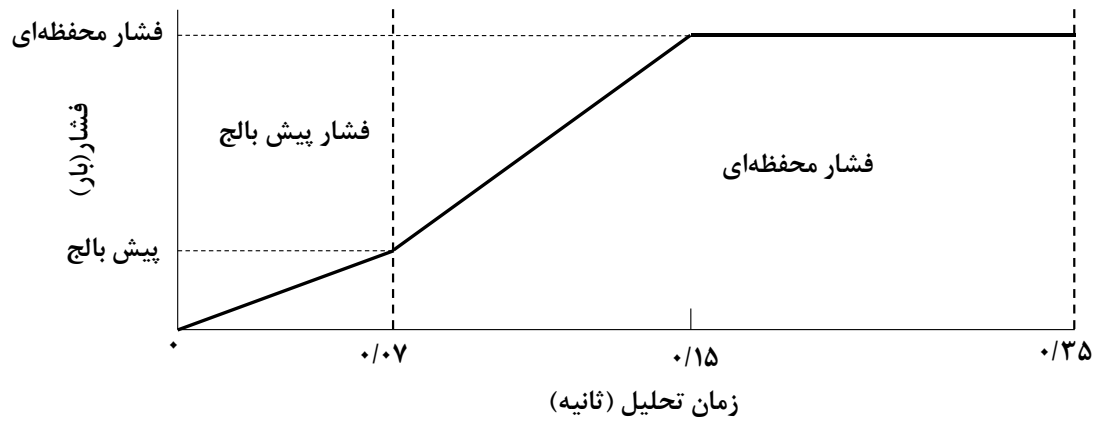


شکل ۳-۵: استقلال نتایج از شبکه‌بندی

در نمودار شکل ۳-۵، نیروی سنبه، نسبت به تعداد گره در فاصله ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ تغییراتی تقریباً ثابت دارد و نیز نیروی سنبه با افزایش تعداد المان‌ها، افزایش پیدا نمی‌کند. در نتیجه، افزایش تعداد المان‌ها اثر چندانی بر دقت نتایج نخواهد گذاشت. بنابراین، برای کسب نتیجه عددی مطلوب به لحاظ شکل نهایی و زمان تحلیل، تعداد ۲۲۰۰ المان در یک چهارم گرده اولیه، برای انجام تحلیل نهایی در نظر گرفته شد.

### ۹-۲-۳ تعریف منحنی تغییرات فشار

در شبیه‌سازی بجای تأثیر فشار سیال شکل‌دهی از فشار با توزیع یکنواخت سطحی استفاده شده است. به منظور صرفه‌جویی در زمان محاسبه، کل زمان شکل‌دهی ۰/۳۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. تغییرات فشار در مراحل پیش‌بالج و شکل‌دهی بصورت خطی است (شکل ۳-۶). در عمل فشار بالجینگ توسط پمپ، در حالی که فشار محفظه‌ای با حرکت سنبه به سمت پایین ایجاد می‌شود.



شکل ۳-۶: تغییرات فشار محفظه‌ای در طول زمان فرایند

### نمودار حد شکل دهی<sup>۱</sup>

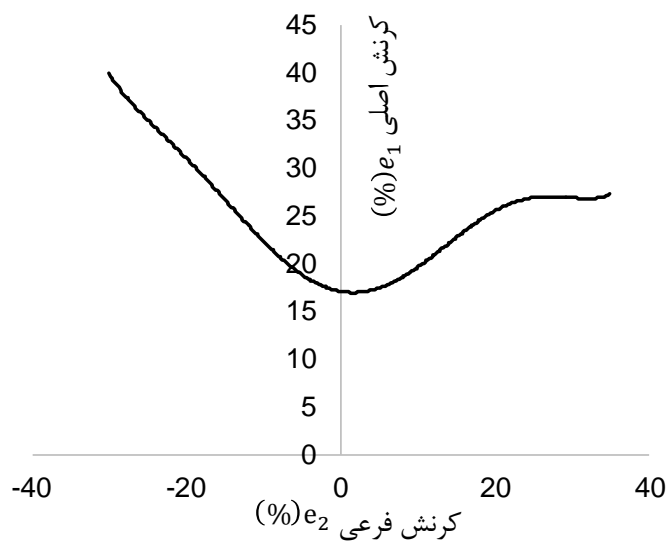
برای به دست آوردن نمودار حد شکل دادن می‌توان از کتابخانه مواد، موجود در نرم‌افزار اتوفرم<sup>۲</sup> استفاده نمود. روش کار به این صورت است که در ابتدا می‌بایست با استفاده از آزمون‌های تجربی و روش‌های عددی ثوابتی مانند ضریب استحکام ماده، توان کرنش سختی و... را به دست آورد، سپس با قرار دادن اطلاعات موردنیاز در بخش ساخت مواد در نرم‌افزار اتوفرم از آن خروجی نمودار FLD گرفت. برخی اطلاعات وارد شده در نرم‌افزار اتوفرم در جدول ۳-۳ آورده شده است. شکل ۳-۷ نمودار حد پارگی استفاده شده در مدل المان محدود را نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۳: خواص فیزیکی و مکانیکی استفاده شده در نرم‌افزار اتوفرم برای استخراج FLD

K(Mpa)	n	$\sigma_Y$ (Mpa)	$\sigma_u$ (Mpa)
۰/۸۳	۰/۰۷۱	۳۵	۹۵

<sup>۱</sup> Forming limit diagram (FLD)

<sup>۲</sup> Autoform



شکل ۳-۷: نمودار حد شکل‌دادن ورق AA-1050-0 استخراج شده از نرم‌افزار اتوفریم



## فصل ۴ نتایج و بحث

## ۴-۱ مقدمه

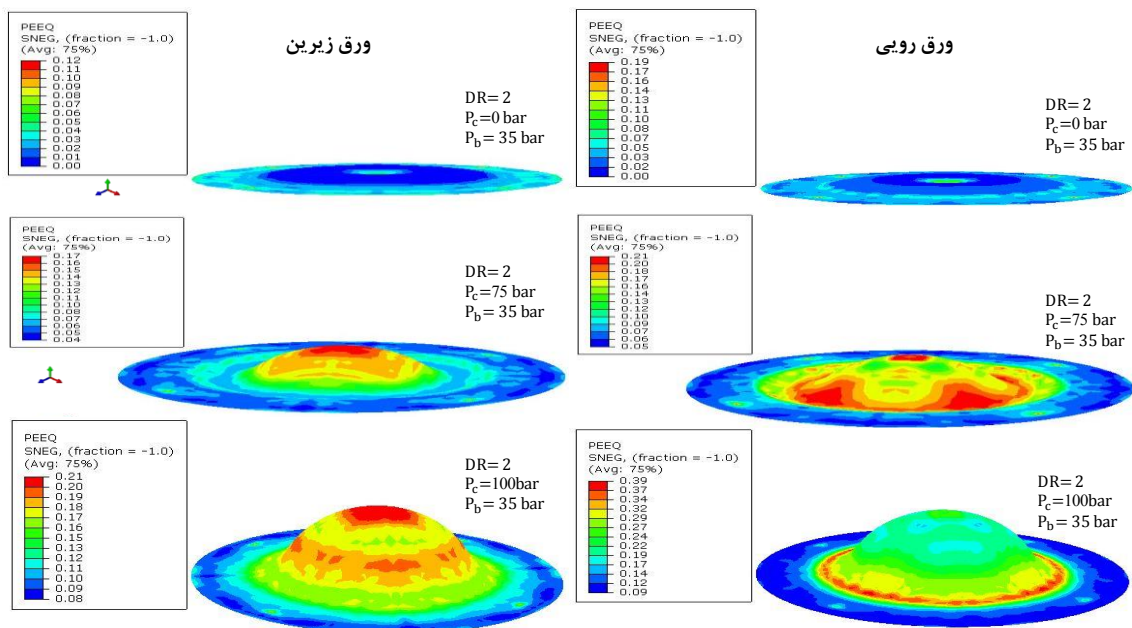
در این فصل نتایج بدست آمده از مدل‌های عددی فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق FML ارائه شده، مورد بحث قرار می‌گیرد. فشار بحرانی سیال داخل محفظه برحسب تغییرات ارتفاع کشش و یا به عبارت دیگر حد بالای محدوده‌ی کاری در فرایند، به‌عنوان هدف اصلی نتایج ارائه شده، در شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج عددی از لحاظ مطابقت با نتایج تجربی ارزیابی شده، درستی آن‌ها مطالعه می‌شود. اثر فشار محفظه‌ای بر برخی عوامل مؤثر بر شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

## ۲-۴ نتایج عددی

## ۱-۲-۴ بررسی صحت نتایج عددی با مقایسه نتایج تجربی در نسبت کشش ۲

الف- کرنش مومسان معادل<sup>۱</sup>

در این بخش، نتیجه حاصل از شبیه‌سازی عددی که با هدف بدست آوردن میزان کرنش ایجاد شده در ورق فلزی انجام شده است بیان می‌گردد. در شکل ۱-۴ توزیع کرنش مؤثر با توجه به افزایش فشار سیال در ناحیه تغییرشکل ورق قابل مشاهده است. بر طبق این تحلیل مقدار کرنش بیشینه، در ناحیه قطب ورق زیرین و فلنج ورق رویی ایجاد شده است.

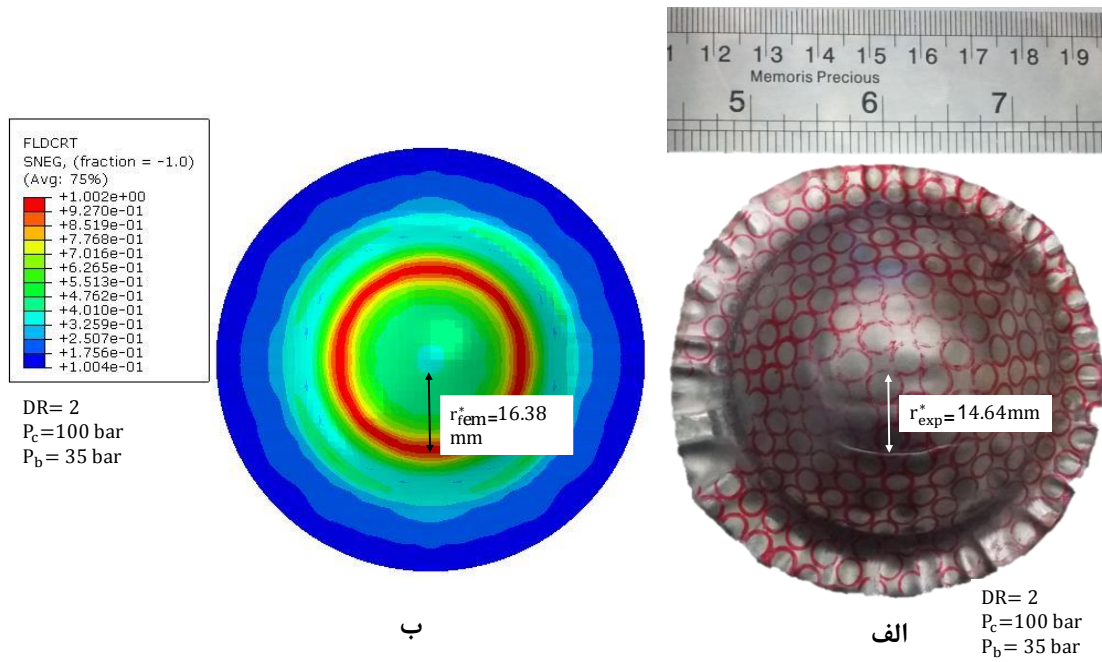


شکل ۱-۴: توزیع کرنش مؤثر پلاستیک با افزایش فشار در مدل اولیه

## ب- پیش بینی کانتور پارگی (FLD)

شکل ۲-۴ نمایی از موقعیت پارگی ورق FML در نمونه حاصل از آزمون تجربی و مدل المان محدود در فشار پیش بالج ۳۵ بار و محفظه‌ای ۱۰۰ بار در نسبت کشش ۲ به ازای  $W_{FLD} = 1$  آورده شده است. فاصله بین مرکز تا موقعیت پارگی با  $r^*$  نمایش داده می‌شود.

<sup>۱</sup> Equivalent plastic strain (PEEQ)



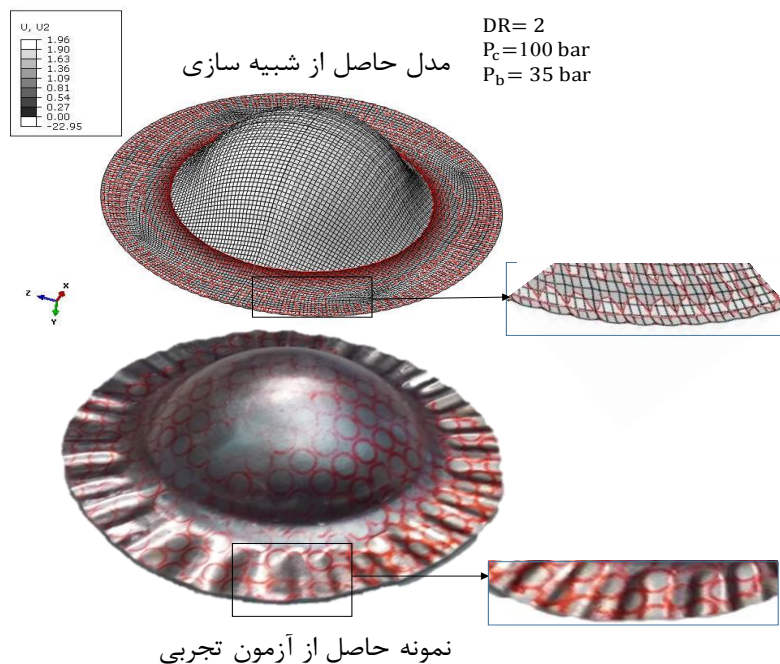
شکل ۴-۲: موقعیت پارگی در نسبت کشش ۲ و فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و پیش‌بالج ۳۵ بار

#### الف-قطعه تولیدشده به روش تجربی ب-مدل المان محدود

همانطور که از شکل مشخص است پارگی در فاصله ۱۶/۳۸ mm در مدل المان محدود و ۱۴/۶۴ mm از مرکز در نمونه تجربی اتفاق می‌افتد. با مقایسه موقعیت پارگی در نمونه تجربی و مدل المان محدود ملاحظه می‌شود همخوانی مناسبی بین مدل شبیه‌سازی شده و نمونه حاصل از آزمون تجربی در موضع پارگی برقرار است.

#### ج- چروکیدگی

شکل ۴-۳ نمایانگر وضعیت چروکیدگی لبه در دو مدل المان محدود و نمونه تجربی در شرایط یکسان فشار پیش‌بالج ۳۵ بار و محفظه‌ای ۱۰۰ بار در نسبت کشش ۲ است.



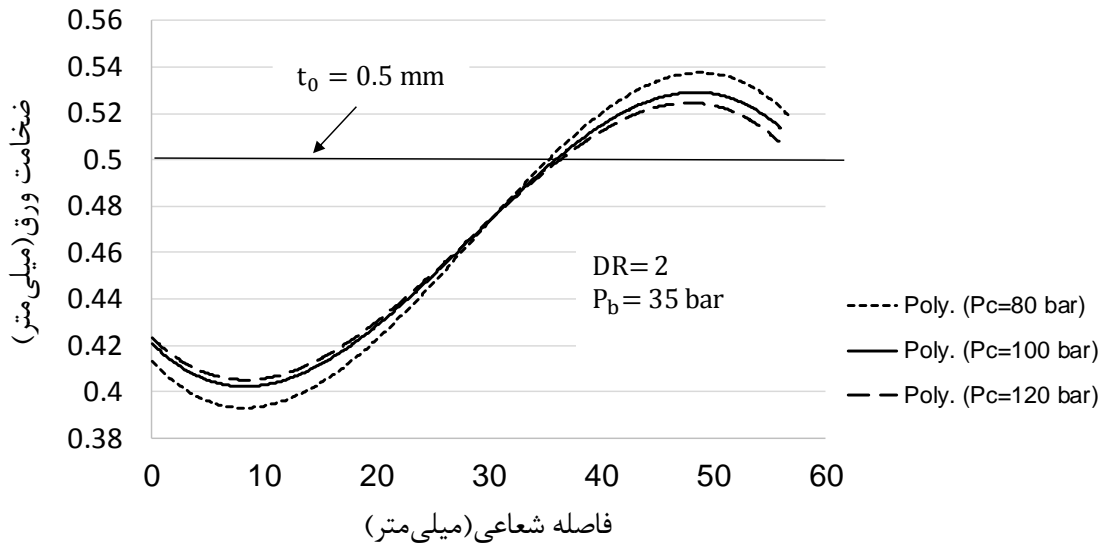
شکل ۴-۳: چروکیدگی در نمونه تجربی و شبیه سازی

#### ۲-۲-۴ توزیع ضخامت در روش عددی

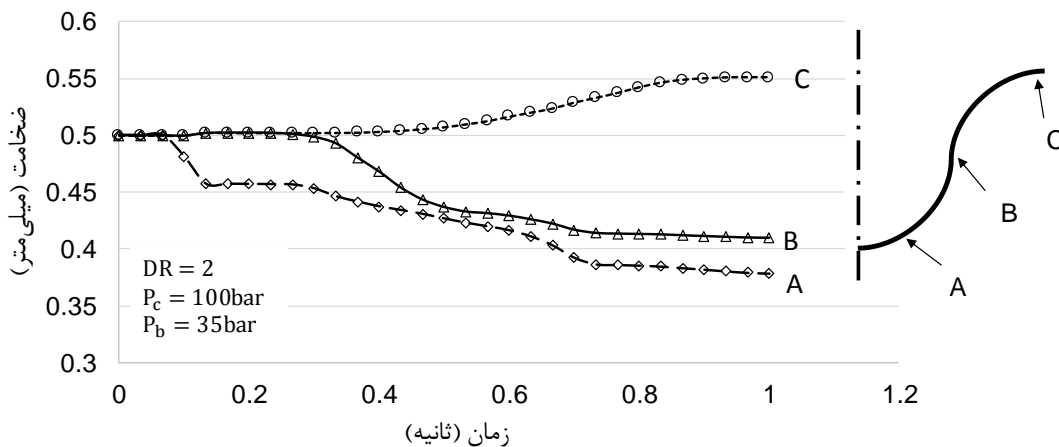
اعمال فشار سیال، توزیع ضخامت را در قطعه تحت تأثیر قرار می دهد. در این بخش به عواملی همچون فشار محفظه ای، فشار پیش بالچ که تأثیری بسزایی بر روی توزیع ضخامت در فرایند هیدرومکانیکی دارد، پرداخته شده است.

#### الف- تأثیر فشار محفظه ای بر روی ضخامت ورق در روش عددی

به منظور تعیین تأثیر فشار محفظه ای بر روی ضخامت، شبیه سازی های متفاوتی برای فشارهای محفظه ای نهایی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بار انجام شد. فشار پیش بالچ در همه حالاتها مقدار ثابت ۳۵ بار نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۴ توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز در سه فشار محفظه ای متفاوت برای ورق زیرین از شبیه سازی المان محدود ارائه شده است.



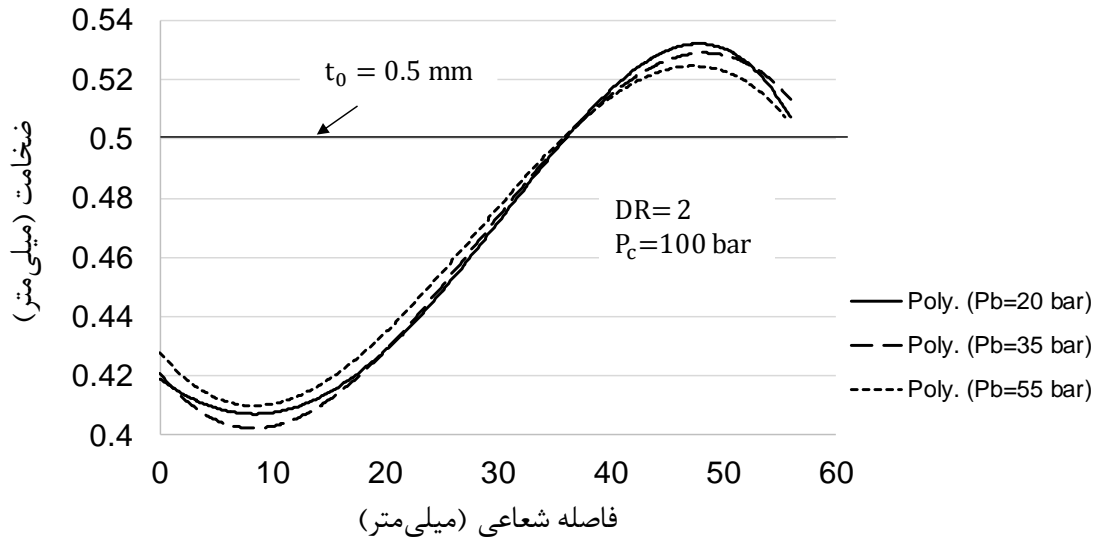
شکل ۴-۴: تأثیر فشار محفظه‌ای بر ضخامت ورق زیرین در فشار پیش‌بالج ۳۵ بار در روش عددی همان‌طور که از شکل ۴-۴ مشخص است، با مقایسه بین فشارهای محفظه‌ای مختلف برای نسبت کشش ۲، در فشار محفظه‌ای کمتر، ضخامت در ناحیه نزدیک به مرکز کاهش بیشتری می‌یابد، به‌طوری‌که مطابق با نمودار داده‌شده بیشترین نازک‌شدگی مربوط به فشار محفظه‌ای ۸۰ بار است. به عبارتی شکل‌پذیری در این حالت افزایش می‌یابد. تقریباً تغییرات شیب نمودار ضخامت ورق شکل داده‌شده در جهت افزایش ضخامت در ناحیه دیواره ظرف بطور یکسان است. البته باید اثر ضخامت هسته در شکل‌دهی ورق FML به ضخامت پوسته در نظر گرفته شود. در شکل ۴-۵ نیز نازک‌شدگی در سه منطقه پوسته فلزی زیرین نمایش داده‌شده است. به‌طوری‌که کاهش ضخامت در ناحیه نزدیک به کف ظرف نسبت به سایر نقاط بیشتر است.



شکل ۴-۵: نازک‌شدگی در فشارهای متفاوت در سه منطقه لوح برای نسبت کشش ۲ در روش عددی

### ب - تأثیر فشار پیش‌بالج بر روی ضخامت ورق در روش عددی

با ثابت در نظر گرفتن فاصله اولیه بین سنبه و لوح، شبیه‌سازی برای فشارهای پیش‌بالج ۲۰، ۳۵ و ۵۵ بار انجام شد. محور افقی فاصله واقعی بین نقاط و مرکز لوح اولیه و محور عمودی ضخامت ورق را نشان می‌دهد.

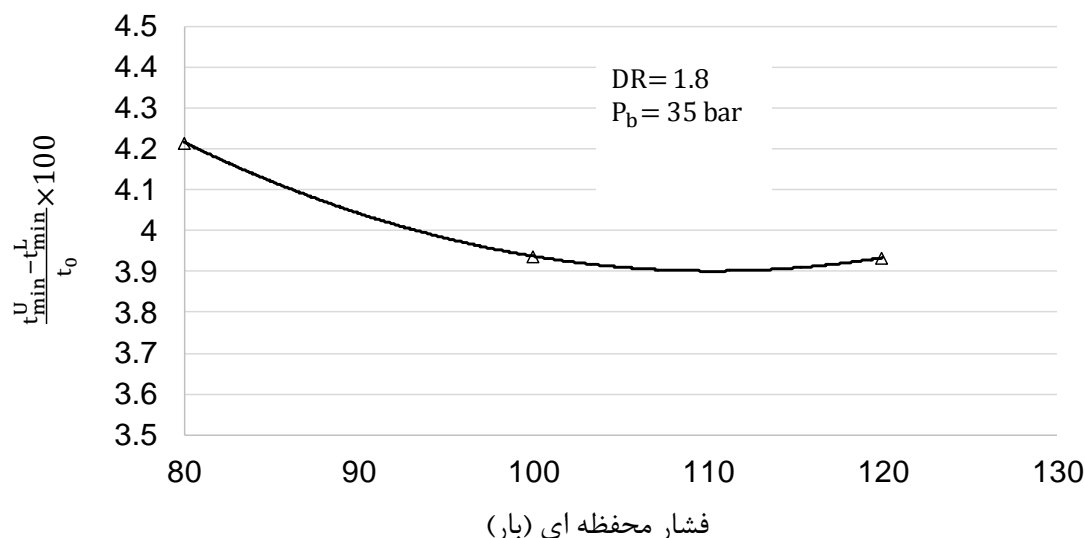


### شکل ۴-۶: تأثیر فشار پیش‌بالج بر ضخامت ورق در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار در روش عددی

با توجه به شکل ۴-۶ فشار ۳۵ بار بهترین محدوده فشار پیش‌بالج است که در آن یکنواختی و شکل‌پذیری مناسب‌تری نسبت به فشارهای پیش‌بالج دیگر داراست. در فشارهای خیلی بالا به دلیل بالج بیش از حد لوح، افزایش ضخامت در ناحیه فلانج و چروکیدگی بیشتری اتفاق می‌افتد.

### ج - تأثیر فشار محفظه‌ای بر تفاوت ضخامت دو پوسته در نازک‌ترین نقطه

اثر فشار محفظه‌ای بر روی درصد اختلاف تغییرات ضخامت در پوسته در فرایند کشش هیدرومکانیکی در فشار پیش‌بالج ثابت ۳۵ بار و نسبت کشش ۱/۸ در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. محور عمودی نمایانگر درصد اختلاف تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نازک‌ترین نقطه به ضخامت ورق اولیه است. لازم به ذکر است در محور عمودی  $t_{\min}^L$  معرف ضخامت زیرین در نازک‌ترین نقطه و  $t_{\min}^U$  معرف ضخامت پوسته بالایی فلزی در نازک‌ترین نقطه است. همچنین  $t_0$  نمایانگر ضخامت اولیه ورق فلزی می‌باشد.

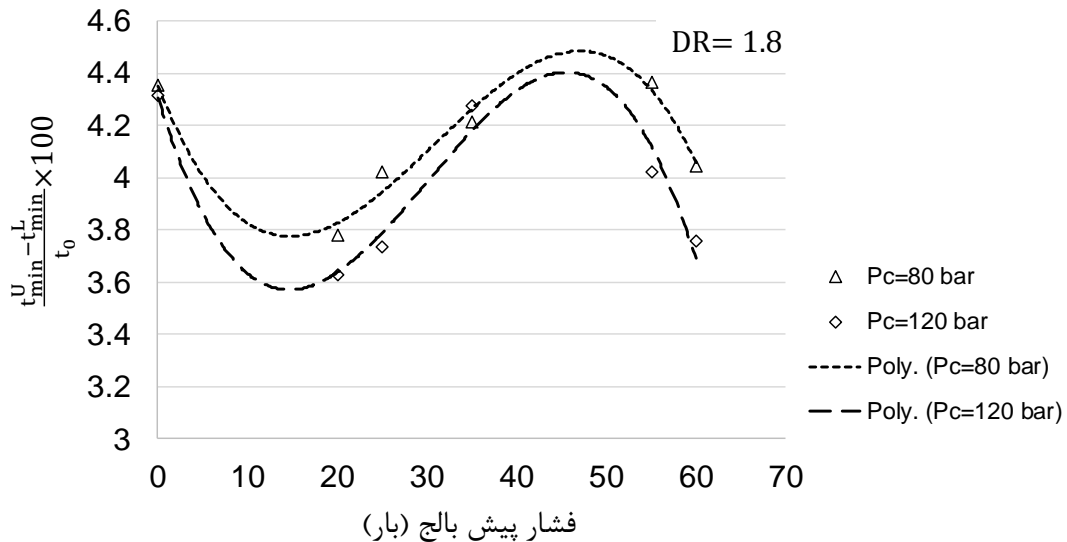


شکل ۴-۷: تأثیر فشار محفظه‌ای بر درصد تفاوت ضخامت دو پوسته در روش عددی

چنانکه در شکل دیده می‌شود، در فشار محفظه‌ای ۸۰ بار ضخامت پوسته بالایی فلزی از ضخامت پوسته زیری بیشتر است و با افزایش فشار محفظه‌ای، درصد اختلاف ضخامت پوسته‌ها به ضخامت ورق اولیه کاهش می‌یابد، اندازه ضخامت پوسته‌ها در نازک‌ترین نقطه به یکدیگر نزدیک می‌شود، این کاهش اختلاف ضخامتی به‌ویژه در فشار ۱۲۰ بار مشهودتر است. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت هر مقدار فشار محفظه‌ای افزایش یابد اختلاف ضخامت پوسته‌ها در نازک‌ترین نقطه کاهش می‌یابد.

#### د- تأثیر فشار پیش‌بالمج بر درصد اختلاف ضخامت دو پوسته در نازک‌ترین ناحیه

اثر فشار پیش‌بالمج بر روی درصد اختلاف تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نازک‌ترین نقطه در فرایند کشش هیدرومکانیکی در فشار پیش‌بالمج ثابت مختلف و نسبت کشش ۱/۸ با توجه به فشارهای محفظه‌ای ۸۰ و ۱۲۰ بار در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. محور عمودی نمایانگر درصد اختلاف تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نازک‌ترین نقطه به ضخامت ورق اولیه است.

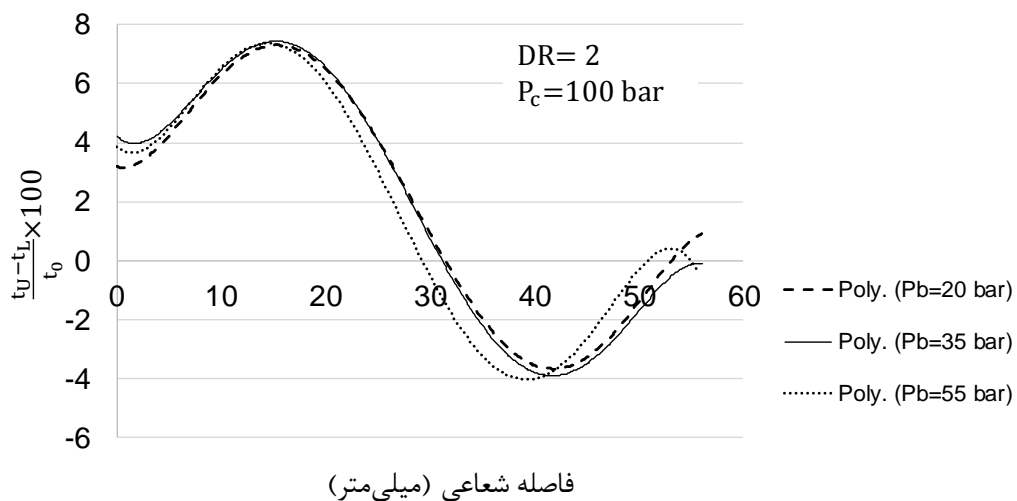


شکل ۴-۸: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تفاوت ضخامت دو پوسته به ازای مقادیر مختلف فشار محفظه‌ای در روش عددی

با توجه به شکل فوق در نسبت کشش ۱/۸، با افزایش فشار پیش‌بالج درصد تفاوت ضخامت در نازک‌ترین نقطه پوسته‌های فلزی بالا و پایین در فشار ۸۰ و ۱۲۰ بار تقریباً به یک شکل است. بطوریکه با افزایش فشار پیش‌بالج از ۲۵ تا ۳۵ بار اختلاف نازک شدگی در پوسته‌ها نیز افزایش می‌یابد.

#### ذ - تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تفاوت ضخامت دو پوسته

در شکل ۴-۹ نتایج تحلیل عددی برای بررسی تأثیر فشار پیش‌بالج مختلف بر درصد نسبت تغییرات ضخامت پوسته بالا و پایین فلزی به ضخامت اولیه ورق با توجه به فاصله واقعی بین نقاط و مرکز لوح آورده شده است.



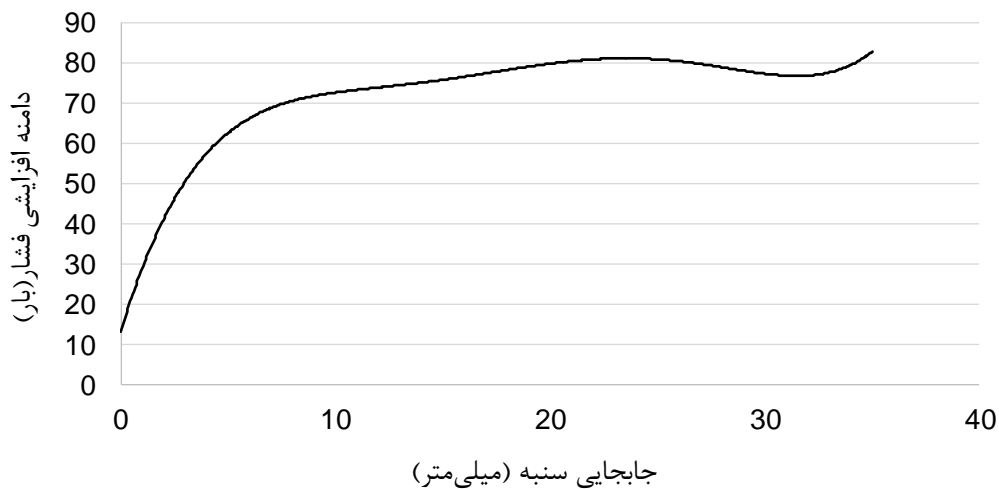
شکل ۴-۹: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته بالا و پایین فلزی در روش عددی



همان‌گونه که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود، فشار پیش‌بالج ۲۰ بار در ناحیه مرکزی دارای درصد اختلاف ضخامتی کمتری در پوسته بالا و پایین نسبت به فشارهای پیش‌بالج دیگر است. در این ناحیه فشار پیش‌بالج ۳۵ بار بیشترین تفاوت درصد ضخامت را تجربه می‌کند، سه فشار پیش‌بالج دارای یک ماکزیمم مشترک در فاصله ۱۵mm از کف ظرف دارند به طوری که در این فاصله ضخامت پوسته رویی در هر ۳ فشار پیش‌بالج دارای عدد بزرگ‌تری نسبت به پوسته زیری دارد. سپس تغییرات درصد ضخامت دارای یک شیب منفی به سمت افزایش ضخامت پوسته‌های زیری در فاصله ۴۰mm از مرکز هستند البته با این تفاوت که فشار پیش‌بالج ۵۵ بار دارای شیب بیشتر است. در ناحیه فلانچ ورق فشار پیش‌بالج ۲۰ بار برعکس ناحیه مرکزی دارای بیشترین تغییرات درصد ضخامتی در پوسته‌ها است. مطابق با شکل ۴-۹ در مجموع نواحی مختلف شکل دهی فشار پیش‌بالج ۳۵ بار یکنواختی مناسب‌تری را نسبت به تفاوت تغییرات درصد ضخامتی در پوسته‌ها دارد.

#### ۴-۲-۳ تغییرات فشار سیال نسبت به کورس پرس

همزمان با حرکت سنبه به سمت محفظه سیال، فشار سیال مطابق شکل ۴-۱۰ افزایش می‌یابد.

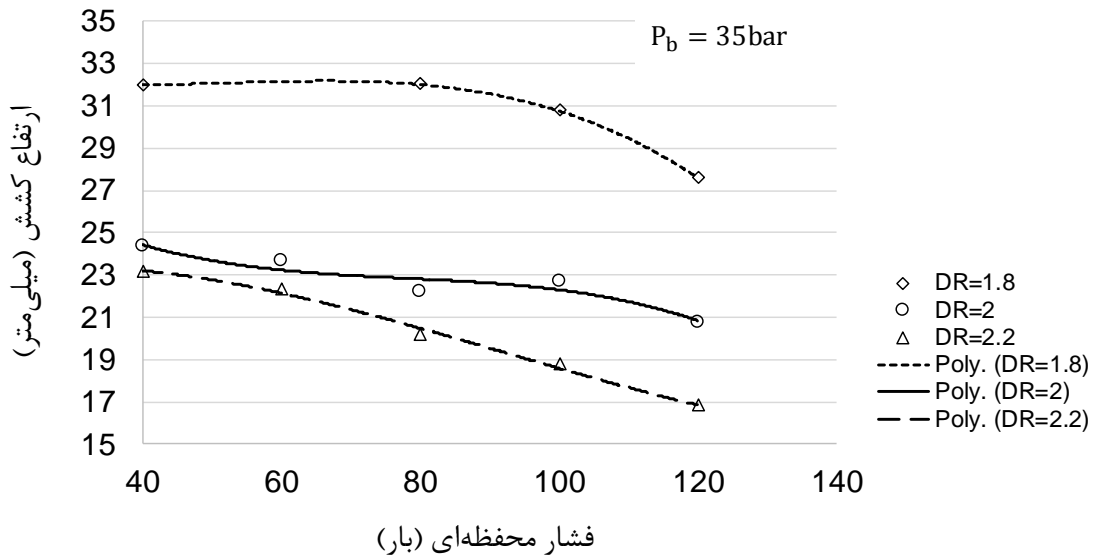


شکل ۴-۱۰: تغییرات فشار سیال نسبت به کورس پرس، حرکت سنبه در روش عددی

## ۴-۲-۴ ارتفاع کشش

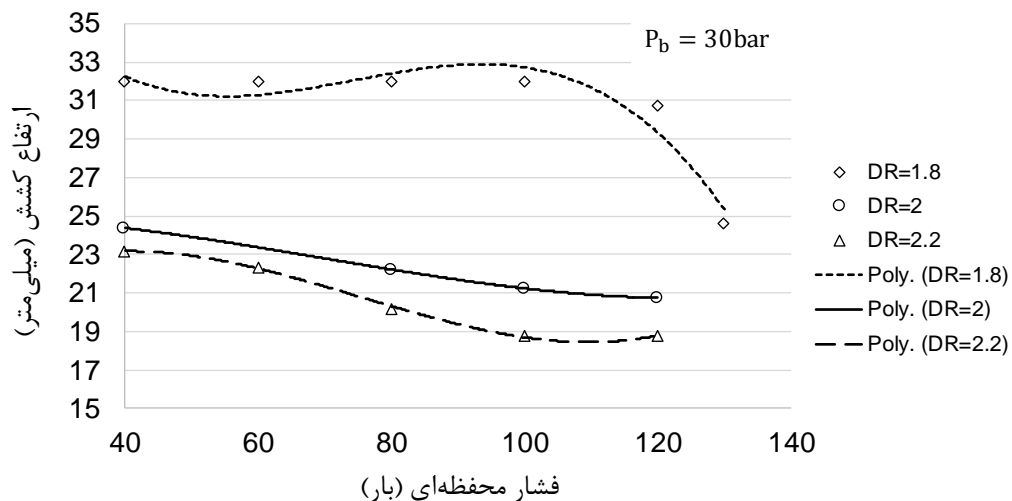
## الف- تأثیر فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش در روش عددی

اثر تغییرات فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی در شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲ نشان داده شده است. چنانکه در شکل دیده می‌شود، با افزایش فشار محفظه‌ای، ارتفاع کشش کاهش می‌یابد. این کاهش به‌ویژه در نسبت‌های کشش بالاتر شکل‌دهی مشهودتر است.



## شکل ۴-۱۱: تأثیر فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش در فشار پیش‌بالج ۳۵ بار در روش عددی

همان‌طور که از شکل ۴-۱۱ دریافت می‌شود، در نسبت کشش ۲/۲ روند کاهش ارتفاع با افزایش فشار محفظه‌ای بصورت تقریباً خطی است. در مورد نسبت کشش ۱/۸ تا فشار ۱۰۰ بار، فشار و ارتفاع دارای رفتار خطی است اما در فشارهای بیشتر از ۱۰۰ بار روند نزولی ارتفاع شدت می‌گیرد.

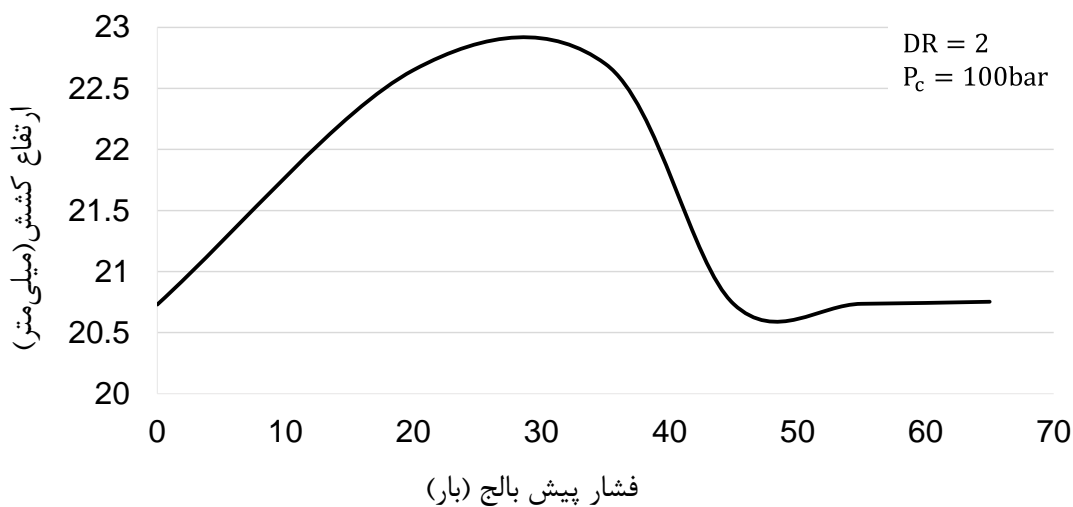


## شکل ۴-۱۲: تأثیر فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش در فشار پیش‌بالج ۳۰ بار در روش عددی

در شکل ۴-۱۲ در فشار پیش‌بالج ۳۰ بار، اثر فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش بررسی گردید و نتیجه‌ای مشابه با شکل ۴-۱۱ بدست آمد با این تفاوت که در نسبت کشش ۲/۲ روند نزولی ارتفاع کشش کندتر گردید و در فشارهای بالاتر از ۱۰۰ بار نیز این روند متوقف شده است. با این وجود، می‌توان نتیجه گرفت فشار محفظه‌ای بر ارتفاع کشش بصورت مستقیم تأثیرگذار است.

### ب- تأثیر فشار پیش‌بالج بر ارتفاع کشش در روش عددی

مطابق با شکل ۴-۱۳ اثر فشار پیش‌بالج بر ارتفاع کشش در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار به نمایش گذاشته شده است.



### شکل ۴-۱۳: تأثیر فشار پیش‌بالج بر ارتفاع کشش در روش عددی

با ثابت در نظر گرفتن نسبت کشش ۲، شبیه‌سازی برای فشارهای پیش‌بالج متفاوت انجام شد. در فشارهای پیش‌بالج کمتر از ۲۰ بار، ورق نمی‌تواند به سنبه بچسبد و شکل اولیه سنبه را به خود بگیرد در نتیجه میزان ارتفاع کشش کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۴-۱۳ فشارهای بین ۲۵ تا ۳۵ بار بهترین محدوده فشار پیش‌بالج است که بیشترین ارتفاع کشش را دارا است. در فشار پیش‌بالج بالاتر از ۴۵ بار به دلیل پیش‌بالج بیش‌ازحد ورق و خصوصاً افزایش نیروهای اصطکاکی بین سنبه و ورق شاهد کاهش ارتفاع کشش خواهیم بود.

### ۴-۲-۵ انحراف معیار کرنش

انحراف معیار<sup>۱</sup> یکی از شاخص‌های پراکندگی در آمار است، اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که پراکندگی داده‌ها از مقدار میانگین ناچیز است در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها نسبت به مقدار میانگین خواهد بود. بنابراین برای بررسی اثر عوامل فرایند بر میزان یکنواختی توزیع کرنش انحراف معیار به کرنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

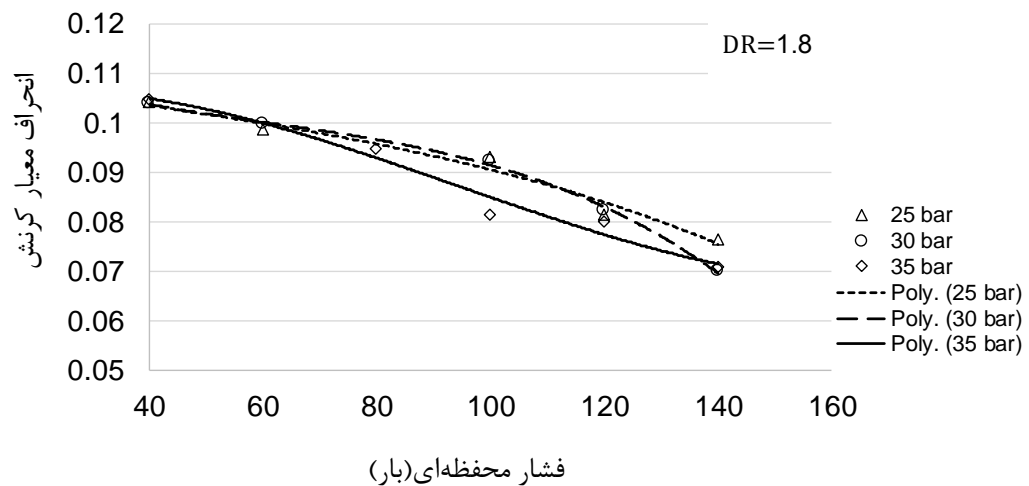
$$\text{std}(\bar{\varepsilon}^p) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{\varepsilon}_i^p - \psi)^2} \quad ۱-۴$$

در این رابطه N تعداد انتگرال‌گیری ورق فلزی پایین،  $\bar{\varepsilon}^p$  کرنش مومسان معادل گره  $i$ ،  $\psi$  کرنش مومسان متوسط می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\varepsilon}_i^p \quad ۲-۴$$

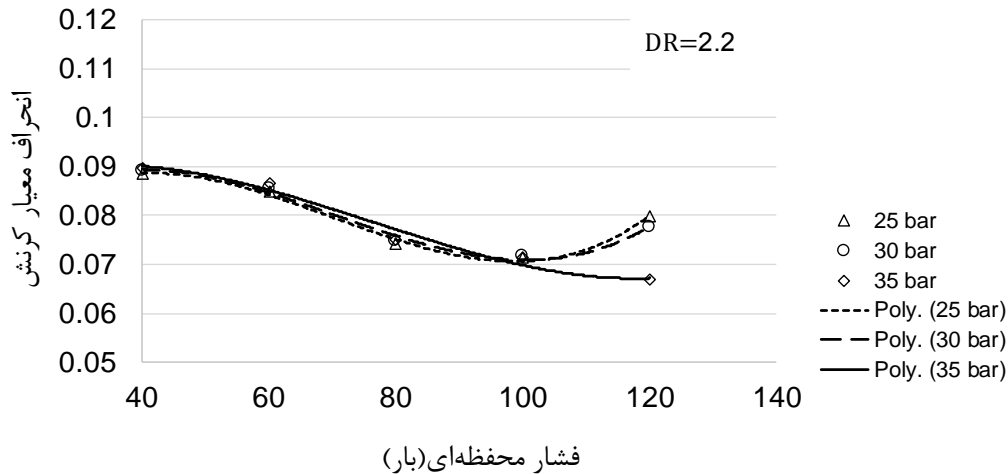
### الف - تأثیر فشار محفظه‌ای بر انحراف معیار در روش عددی

در شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ به ترتیب در ۲ نسبت کشش ۱/۸ و ۲/۲ اثر فشار محفظه‌ای بر انحراف معیار با توجه به فشارهای پیش‌بالج مختلف آورده شده است.



شکل ۴-۱۴: تأثیر فشار محفظه‌ای بر انحراف معیار در نسبت کشش ۱/۸ در روش عددی

<sup>۱</sup> Standard deviation

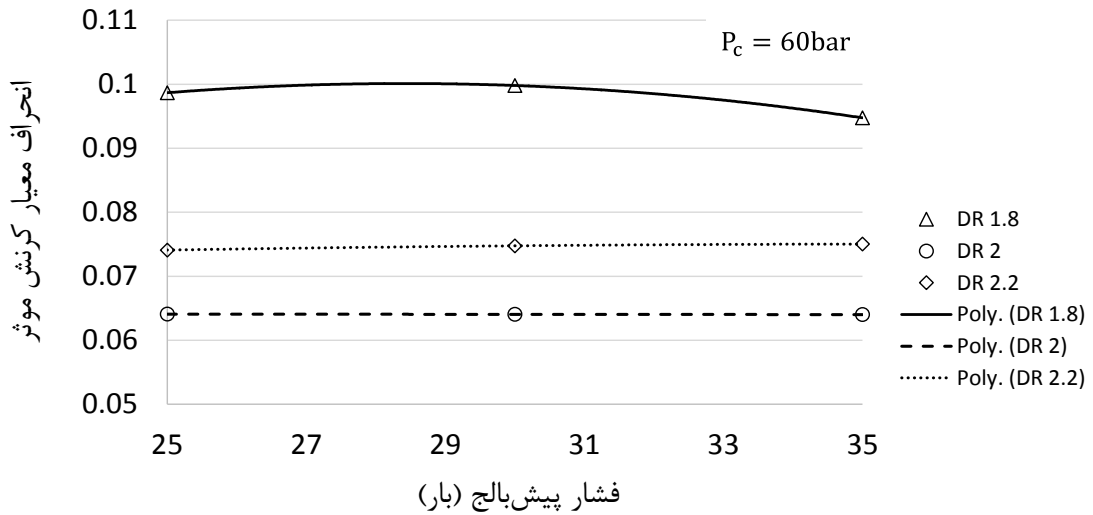


شکل ۴-۱۵: تأثیر فشار محفظه‌ای بر انحراف معیار در نسبت کشش ۲/۲ در روش عددی

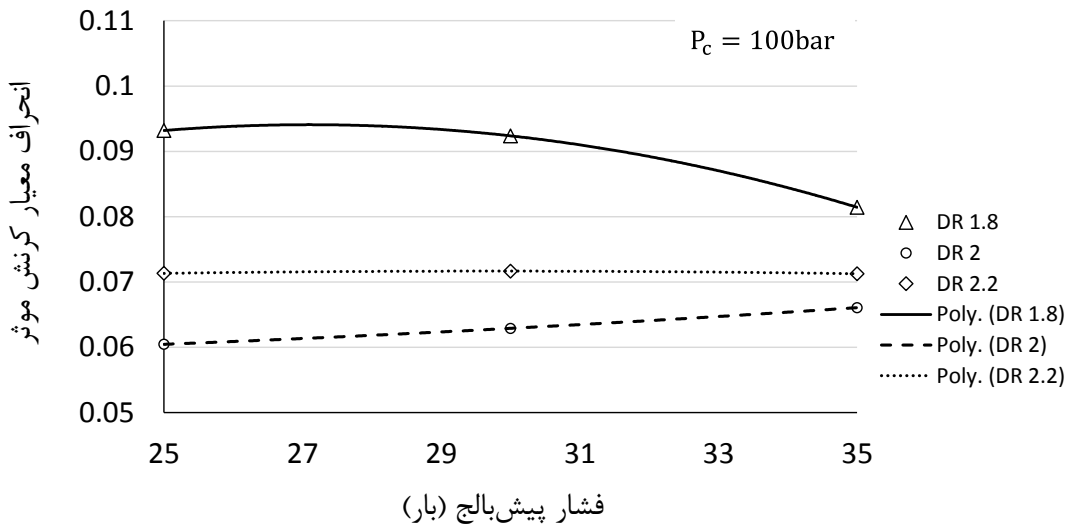
مطابق شکل ۴-۱۴ در نسبت کشش ۱/۸ در هر سه فشار پیش‌بالج ۲۵، ۳۰ و ۳۵ بار با افزایش فشار محفظه‌ای انحراف معیار کرنش روند نزولی و در نتیجه توزیع کرنش یکنواخت‌تر شده است. با توجه به شکل ۴-۱۵ در نسبت کشش ۲/۲ با افزایش فشار محفظه‌ای تا ۱۰۰ بار در تمام فشارهای پیش‌بالج ارائه‌شده توزیع کرنش یکنواخت‌تر شده است، این روند یکنواختی کرنش در فشار پیش‌بالج ۳۵ بار روند رو به رشد خود را در جهت یکنواختی داده‌ها ادامه خواهد داد، در فشارهای پیش‌بالج ۲۵ و ۳۰ بار این روند در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار متوقف خواهد شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده هر چه نسبت کشش در فرایند بالاتر باشد، انحراف معیار سطح پایین‌تری خواهد داشت و به دنبال آن توزیع کرنش یکنواخت‌تر می‌گردد. علت این امر را می‌توان به میزان کرنش حدی بالاتر در نسبت کشش ۱/۸ اشاره نمود که منجر به تولید قطعات عمیق‌تر خواهد شد.

#### ب - تأثیر فشار پیش‌بالج بر انحراف معیار کرنش در روش عددی

در شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ تأثیر فشار پیش‌بالج بر انحراف معیار کرنش در فشار محفظه‌ای ۶۰ و ۱۰۰ بار و نسبت‌های کشش مختلف داده شده است.



شکل ۴-۱۶: تأثیر فشار پیش‌بالج بر انحراف معیار در فشار محفظه‌ای ۶۰ بار در روش عددی



شکل ۴-۱۷: تأثیر فشار پیش‌بالج بر انحراف معیار در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار در روش عددی

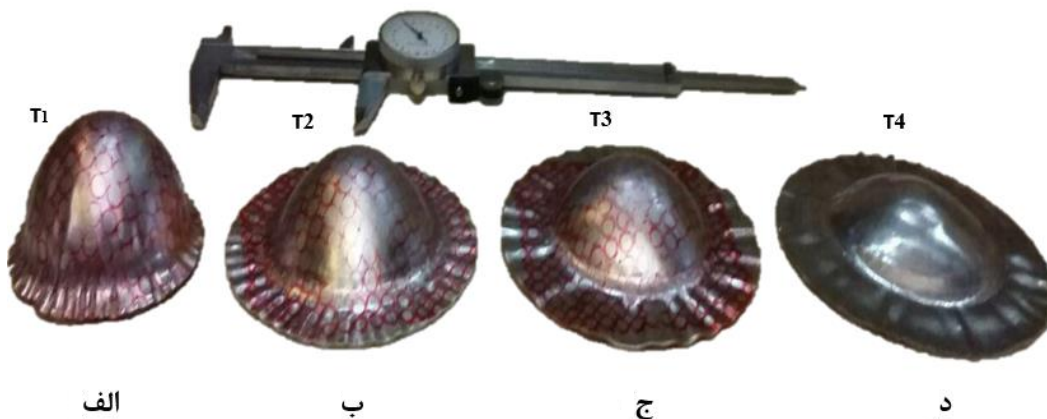
مطابق شکل ۴-۱۶ و ۴-۱۷ اولاً فشار پیش‌بالج تأثیر چندانی بر یکنواختی توزیع کرنش ندارد ثانیاً با افزایش نسبت کشش توزیع کرنش یکنواخت‌تر شده است. البته در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و نسبت کشش ۱/۸ با افزایش  $p_b$  افزایش یکنواختی کرنش به چشم می‌خورد.

### ۴-۳-۱ ارائه‌ی نمونه‌های FML شکل‌دهی شده در روش تجربی

برای دستیابی به یک محصول سالم در مقادیر مختلف نسبت کشش، فشار پیش‌بالج بین ۰ تا ۵۵ بار تغییر داده شد که سالم‌ترین قطعات با ارتفاع کشش بیشینه، به ازای فشار پیش‌بالج ۳۵ بار به دست آمد. مقادیر فشار پیش‌بالج، فشار محفظه‌ای متناظر با آزمون‌های طراحی شده و ارتفاع کشش متناظر در جدول ۴-۱ و نیز شکل ۴-۱۸ مشخص شده است. بیشترین ارتفاع کشش، مربوط به آزمون T1 برای نمونه با نسبت کشش ۱/۸ می باشد که لوح اولیه به صورت کامل به داخل محفظه ماتریس کشیده و عمق قطعه در نهایت به ۳۱ میلی‌متر رسیده است. با افزایش نسبت کشش در آزمون‌های T2 و T3 به مقادیر ۲ و ۲/۲ چروکیدگی در فلانج ظرف شکل‌پذیری محصول را محدود خواهد نمود به گونه‌ای که حتی با اعمال فشار بالای محفظه نیز قابل کنترل نخواهد بود. در نسبت کشش ۲/۲۵ به علت بالا رفتن تنش‌های شعاعی موردنیاز برای کشش ورق، در ارتفاع کشش ۱۷ میلی‌متر، پارگی در نزدیکی مرکز ظرف رخ می‌دهد.

جدول ۴-۱: نتیجه کشش هیدرومکانیکی ورق FML با نسبت کشش متفاوت

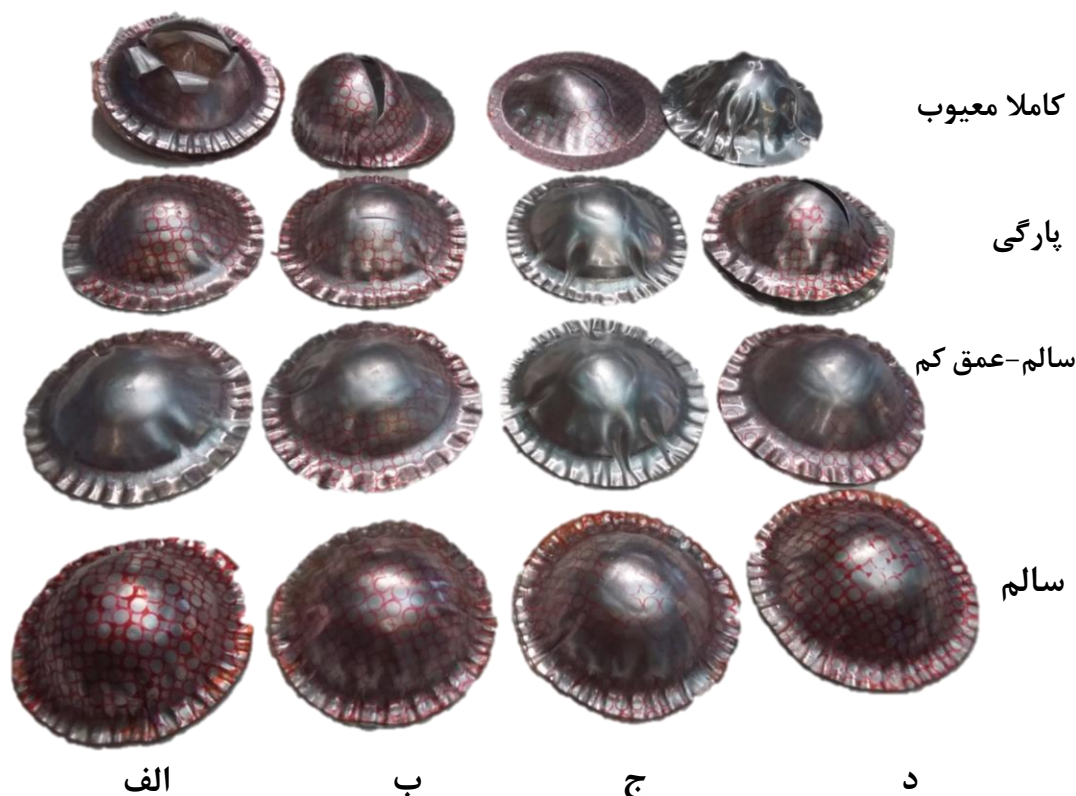
شماره آزمون	نسبت کشش	فشار پیش‌بالج (بار)	فشار محفظه‌ای (بار)	ارتفاع کشش (mm)	پارامتر محدودکننده
T1	۱/۸	۳۵	۱۳۰	۳۱	کشش کامل لوح بدون پارگی
T2	۲	۳۵	۱۱۰	۲۳/۵	چروکیدگی در فلانج
T3	۲/۲	۳۵	۹۰	۲۰	چروکیدگی در فلانج
T4	۲/۲۵	۳۵	۸۰	۱۷	پارگی در نزدیکی مرکز



شکل ۴-۱۸: نمونه‌های تولیدشده به روش کشش هیدرومکانیک با نسبت کشش‌های متفاوت،

(الف)  $DR = 1.8$ ، (ب)  $DR = 2$ ، (ج)  $DR = 2.2$ ، (د)  $DR = 2.25$

در شکل ۴-۱۹ نمونه‌های حاصل از آزمون تجربی با استفاده از فرایند شکل‌دهی هیدرومکانیک نمایش داده شده است. در هر نسبت کشش در ابتدا با فشار محفظه‌ای پایین‌تر قطعات شکل داده شده که معمولاً منجر به چروکیدگی قابل توجه می‌شود با افزایش فشار محفظه‌ای تا حد مطلوب چروکیدگی در ورق کنترل خواهد شد. در صورت افزایش بیش از حد این فشار ورق FML از ورق فلزی پایین دچار پارگی خواهد شد.



شکل ۴-۱۹: نمونه‌های سالم و معیوب تولیدشده به روش هیدرومکانیک با نسبت‌های کشش متفاوت ،  
الف ( $DR=1.8$ ، ب ( $DR=2$ ، ج ( $DR=2.2$ ، د ( $DR=2.25$ )

کنترل جدایش<sup>۱</sup> ورق‌های از پارامترهای مهم این فرایند می‌باشد که به شرایط ساخت ورق اولیه بستگی دارد. در ورق‌های که ارتفاع کشش کمتر دارند نیروی پیش‌بالج کم، اصلی‌ترین مؤلفه می‌باشد. در شکل ۴-۲۰ نمونه کشیده شده سالم و معیوب در نسبت کشش ۱/۸ نمایش داده شده است نمونه سالم با فشار محفظه‌ای ۱۳۰ بار و فشار پیش‌بالج برابر ۳۵ بار تولید شده است .

<sup>۱</sup> Delamination

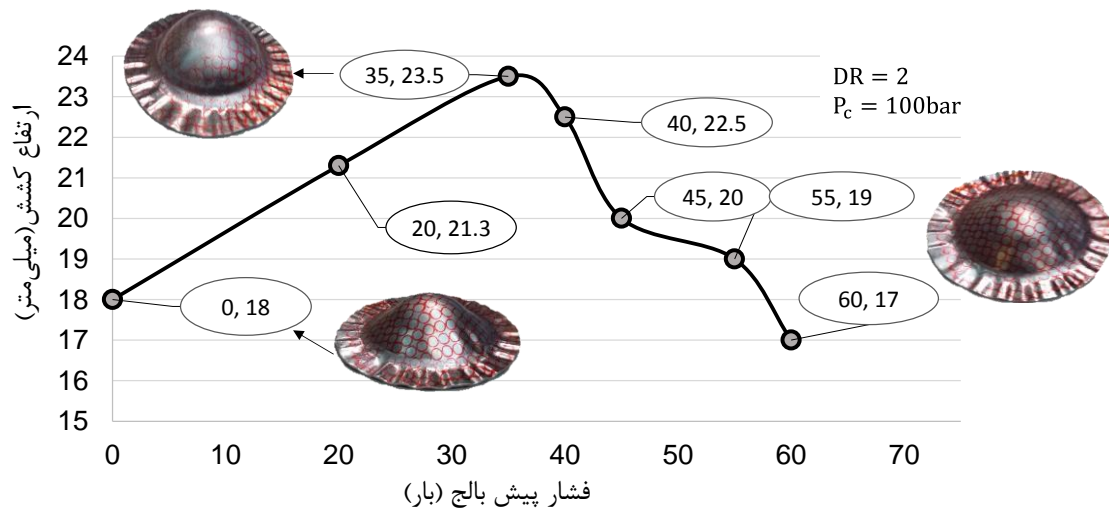




شکل ۴-۲۰: نمونه‌های سالم و معیوب در نسبت کشش ۱/۸

#### ۴-۳-۲ اثر فشار پیش‌بالج بر ارتفاع کشش در آزمون‌های تجربی

شکل ۴-۲۱ تأثیر فشارهای پیش‌بالج را بر روی ارتفاع کشش با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و نسبت کشش ۲ در حالت تجربی نشان می‌دهد. با افزایش فشار پیش‌بالج از ۰ تا ۲۰ بار نسبت کشش قابل‌دستیابی بدون پارگی در ورق روند روبه افزایش دارد. دلیل این پدیده، بالج ورق در ابتدای فرایند و جلوگیری از تماس آن با پروفیل شعاع قالب است. در فشار ۳۵ بار بیشترین ارتفاع در آزمون‌های تجربی حاصل شد. با اعمال فشار پیش‌بالج ۵۵ بار کرنش اولیه ورق در ناحیه تماس آن با ورق گیر افزایش یافته، ضخامت ورق در ابتدا فرایند کاهش می‌یابد که باعث ایجاد عیب در محصول نهایی می‌شود.



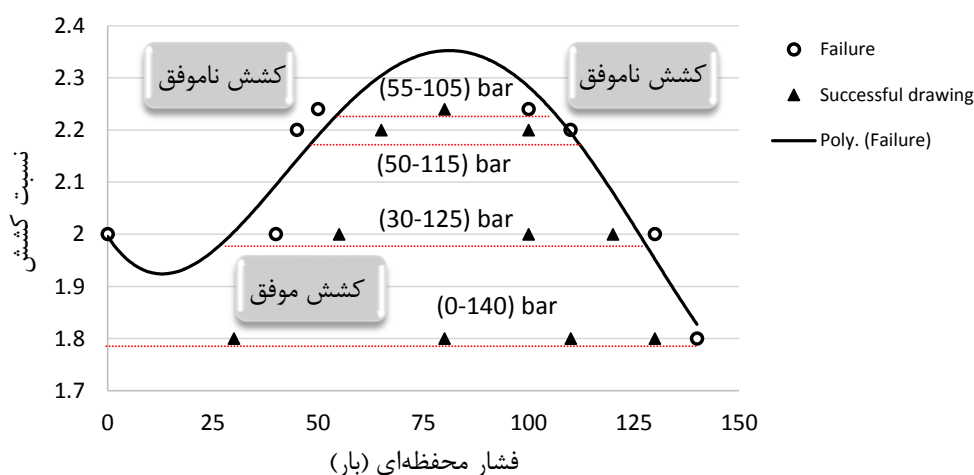
شکل ۴-۲۱: اثر فشار پیش‌بالج ارتفاع کشش

#### ۴-۳-۳ منحنی مشخصه فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق FML در آزمون‌های

##### تجربی

در فرایند کشش هیدرومکانیکی با افزایش نسبت کشش، دامنه‌ی فشار محفظه‌ای که می‌توان به یک محصول سالم رسید، محدودتر می‌شود. بر این اساس منحنی مشخصه فرایند که جداکننده ناحیه

شکل دهی موفق از ناموفق است بر روی دیاگرامی که محورهای آن فشار محفظه و نسبت کشش است؛ ترسیم می‌شود. با اجرای آزمون‌های تجربی متعدد بر روی ورق‌های FML ساخته‌شده با نسبت‌های کشش ۱/۸، ۲، ۲/۲ و ۲/۲۵ و فشار محفظه‌ای بین ۰ تا ۱۴۰ بار، نمونه‌های موفق و ناموفق (دارای پارگی و یا چروکیدگی) تفکیک شد. با جمع‌بندی نتایج این آزمون‌ها منحنی مشخصه فرایند کشش در فشار پیش‌بالج ۳۵ بار مطابق شکل ۴-۲۲ به دست آمده آمد. نتایج نشان می‌دهد که در فشار محفظه‌ای ۸۰ بار حداکثر نسبت کشش ۲/۲۵ قابل‌دستیابی است.



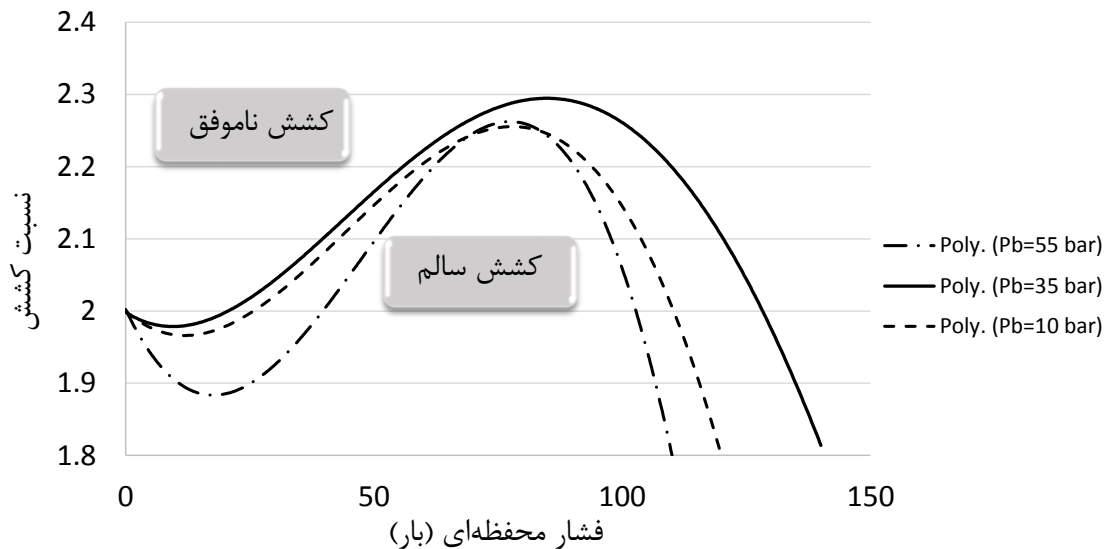
شکل ۴-۲۲: منحنی مشخصه کشش هیدرومکانیکی FML برای فشار پیش‌بالج ۳۵ بار

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار سیال تا ۸۰ بار، نسبت کشش حدی از ۲ تا ۲/۲۵ افزایش می‌یابد. در فشار ۸۰ بار حداکثر نسبت کشش برابر با ۲/۲۵ قابل‌دستیابی است. با افزایش بیشتر فشار تا ۱۴۰ بار، نسبت کشش حدی روند نزولی خواهد داشت.

#### ۴-۳-۴ اثر فشار پیش‌بالج بر منحنی مشخصه فرایند در آزمون‌های تجربی

مطابق روش بیان‌شده در بخش قبل، آزمون‌های تجربی برای سه فشار پیش‌بالج ۱۰، ۳۵ و ۵۵ بار انجام و منحنی مشخصه فرایند برای هر حالت به دست آمد که نتایج در شکل ۴-۲۳ نمایش داده شده است. با افزایش فشار پیش‌بالج از ۱۰ بار تا ۳۵ بار، ضمن افزایش محدوده ناحیه کشش موفق، نسبت کشش حدی بیشینه نیز به مقدار ۲/۲۵ افزایش می‌یابد. این افزایش قابلیت کشش به علت روان‌کاری کاملی است که در سطح پایین و بالای ورق ایجاد می‌شود که خود موجب کاهش نیروی اصطکاک در سطح تماس ورق با ماتریس و ورق‌گیر خواهد شد. البته با افزایش

فشار پیش‌بالج به مقدار ۵۵ بار در مقایسه با ۳۵ بار، مستقل از تغییرات فشار محفظه‌ای نسبت کشش حدی کاهش می‌یابد. علت این کاهش را می‌توان به تغییر شکل بیش‌ازحد ورق در مرحله پیش‌فرم اولیه دانست که ورق قبل از حرکت سنبه به دیواره‌های سنبه برخورد می‌کند و کاهش ضخامت قابل توجهی در آن رخ می‌دهد.



شکل ۴-۲۳: اثر فشار پیش‌بالج بر منحنی مشخصه فرایند

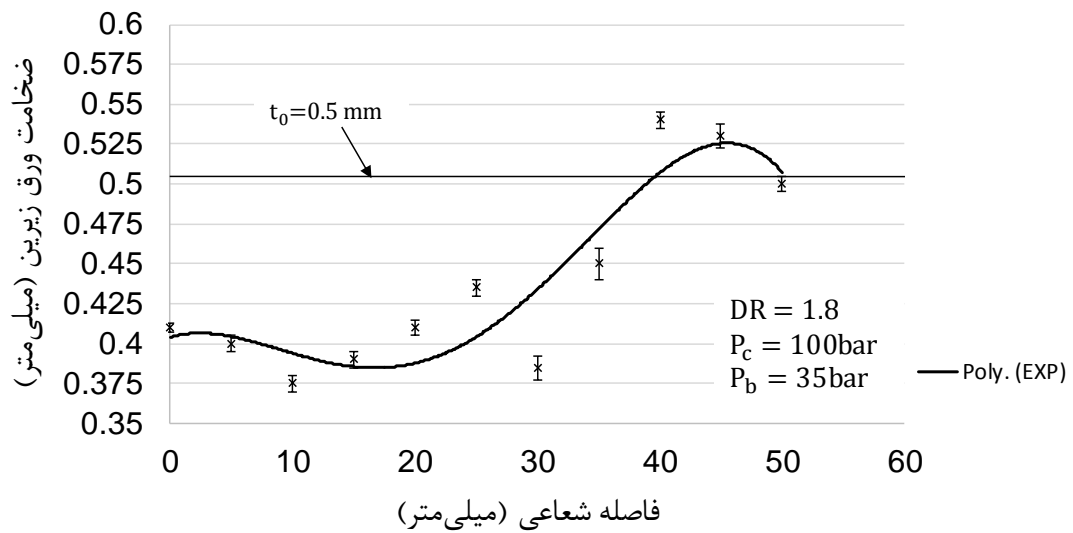
#### ۴-۳-۵ تغییرات ضخامت ورق در نمونه‌های تجربی

##### الف- تغییرات ضخامت ورق بالا و پایین در آزمون‌های تجربی در نسبت کشش ۱/۸

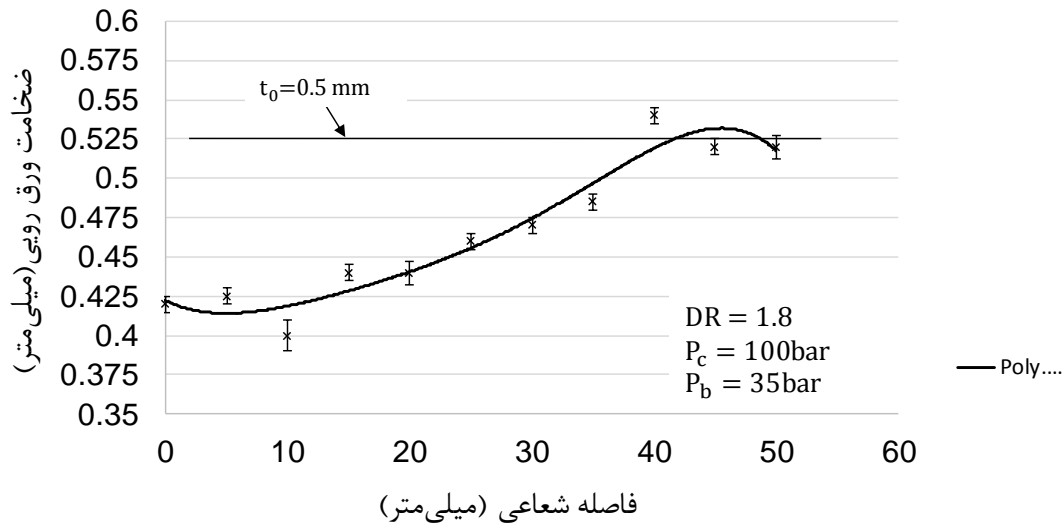
در شکل ۴-۲۴ تصویر ورق زیرین برش خورده لایه جهت اندازه‌گیری ضخامت در نقاط مختلف نمایش داده شده است. جهت اندازه‌گیری ضخامت لایه برش خورده از میکرومتر ضخامت‌سنج INSIZE با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱mm استفاده شد. لازم به ذکر است میکرومتر ضخامت‌سنج استفاده شده دارای سرکروی جهت اندازه‌گیری قطعات انحنادار می‌باشد. در شکل ۴-۲۵ و ۴-۲۶ توزیع ضخامت در ورق پایین و بالای فلزی در نسبت کشش ۱/۸ ارائه شده است. فشار محفظه‌ای برابر ۱۰۰ بار و فشار پیش‌بالج برابر ۳۵ بار است. محور افقی فاصله شعاعی بین نقاط و مرکز لوح است.



شکل ۴-۲۴: میکرومتر ضخامت سنج جهت اندازه‌گیری ضخامت ورق برش شده



شکل ۴-۲۵: تغییرات ضخامت ورق پایین در نسبت کشش ۱/۸ از نتایج تجربی

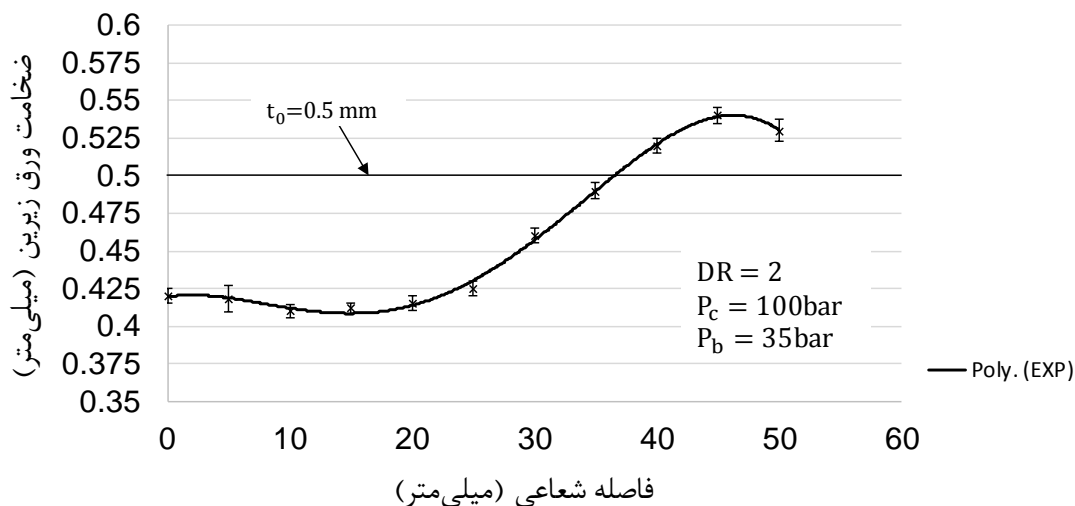


شکل ۴-۲۶: تغییرات ضخامت ورق بالا در نسبت کشش ۱/۸ از نتایج تجربی

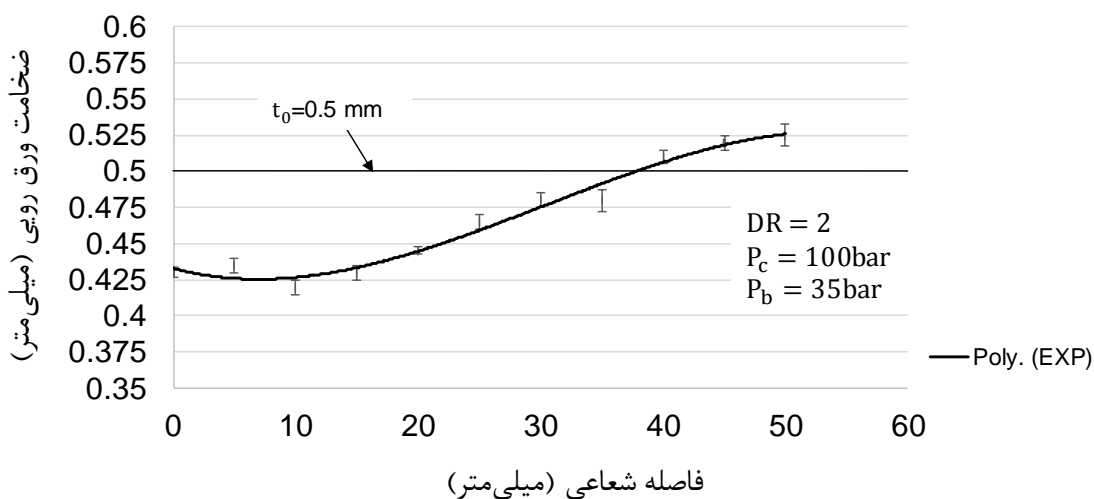
مطابق با شکل ۴-۲۵ و ۴-۲۶ تقریباً در فاصله نزدیک به قطب با کاهش ضخامت روبرو هستیم. در دیواره ظرف روند افزایش ضخامت در هر دو پوسته آغاز می‌گردد و بیشترین ضخامت مربوط به ناحیه فلانچ است که ضخامت به بالاتر از ضخامت اولیه ورق نیز می‌رسد. لازم به ذکر است نقاط حاصل از خطای اندازه‌گیری در نمودارها نمایش داده شده است که بیشترین خطا مربوط به فاصله شعاعی mm ۳۰ در ورق زیرین و mm ۱۰ در ورق رویی است.

#### ب- تغییرات ضخامت ورق بالا و پایین در آزمون‌های تجربی در نسبت کشش ۲

در شکل ۴-۲۷ و ۴-۲۸ تغییرات ضخامت در ورق پایین و بالای در نسبت کشش ۲ بر اساس آزمون تجربی داده شده است. فشار محفظه‌ای و پیش‌بالج به ترتیب ۱۰۰ و ۳۵ بار است. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به مرکز ورق توزیع ضخامت، در هر دو ورق بالایی و پایینی ضخامت کاهش می‌یابد. در دیواره ظرف روند افزایش ضخامت در هر دو پوسته آغاز می‌گردد و بیشترین ضخامت مربوط به ناحیه فلانچ است که ضخامت به بالاتر از ضخامت اولیه ورق افزایش می‌یابد.



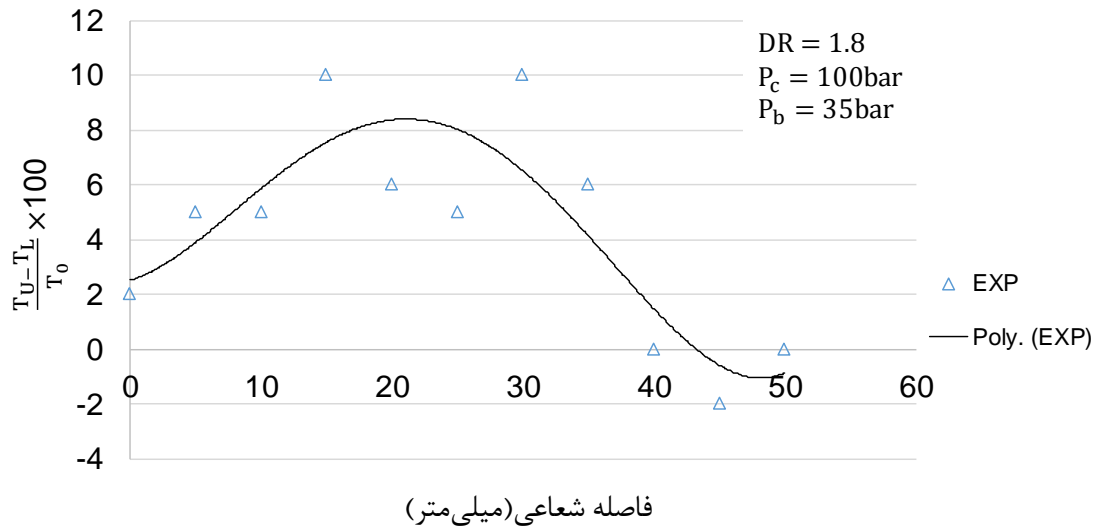
شکل ۴-۲۷: تغییرات ضخامت ورق پایین در نسبت کشش ۲ از نتایج تجربی



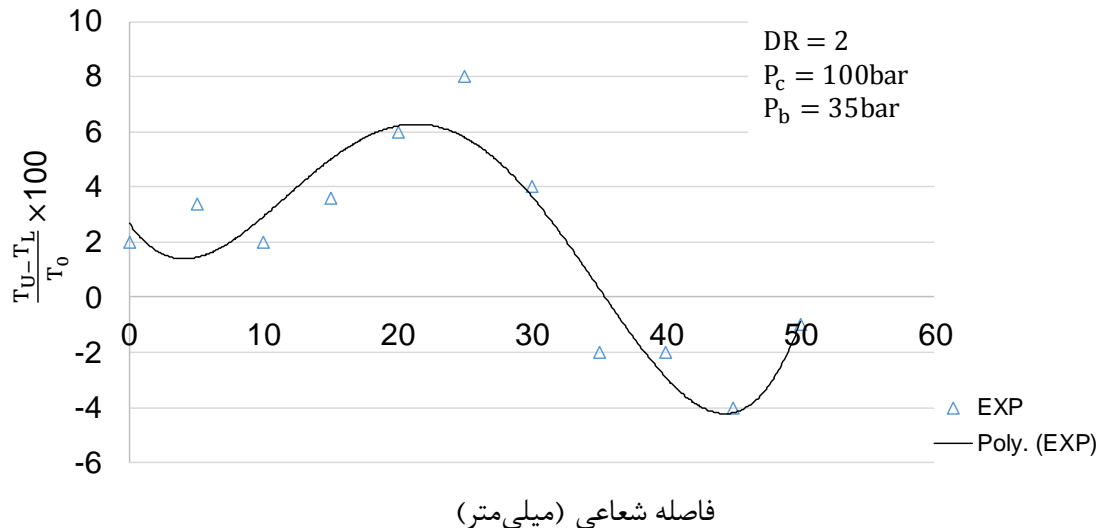
شکل ۴-۲۸: تغییرات ضخامت ورق بالا در نسبت کشش ۲ از نتایج تجربی

### ج- تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در آزمون‌های تجربی

تفاوت ضخامت پوسته‌ی بالا و پایین بی‌بعد شده با ضخامت اولیه ورق، در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و پیش‌بالج ۳۵ بار در نسبت‌های کشش ۱/۸ و ۲ با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی به صورت درصد به ترتیب در شکل ۴-۲۹ و ۴-۳۰ آورده شده است.



شکل ۴-۲۹: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نسبت ۱/۸



شکل ۴-۳۰: تأثیر فشار پیش‌بالج بر درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در نسبت ۲

همان‌گونه که در شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود، بیشترین تفاوت ضخامت دو پوسته در ناحیه مرکزی مشاهده می‌شود. همچنین ضخامت پوسته بالا از پایین بیشتر می‌باشد. اختلاف ضخامت یک قله را در فاصله ۲۰ تا ۲۵ mm از کف ظرف را تجربه می‌کند، به طوری که در این فاصله همچنان ضخامت پوسته رویی دارای عدد بزرگ‌تری نسبت به پوسته زیری است و علت عمده‌ی تفاوت ضخامت در ورق وجود اصطکاک بین سنبه و ورق بالا و همچنین پدیده گلوبی شدن موضعی در ورق پایین در فاصله ۲۵ mm از مرکز می‌باشد. سپس تغییرات ضخامت دارای یک شیب منفی به سمت افزایش ضخامت پوسته‌ی زیری است تا در فاصله ۴۰ mm از مرکز ضخامت پوسته‌ها برابر می‌شود. در شکل ۴-۳۰ در فاصله ۲۵ تا

۳۰ mm بیشترین درصد تغییرات ضخامتی مشاهده می‌شود. سپس روند کاهش تفاوت ضخامتی روند نزولی به خود می‌گیرد تا در فاصله ۴۵ mm از مرکز و در ناحیه فلانج ضخامت پوسته‌ها با یکدیگر برابر می‌گردد.

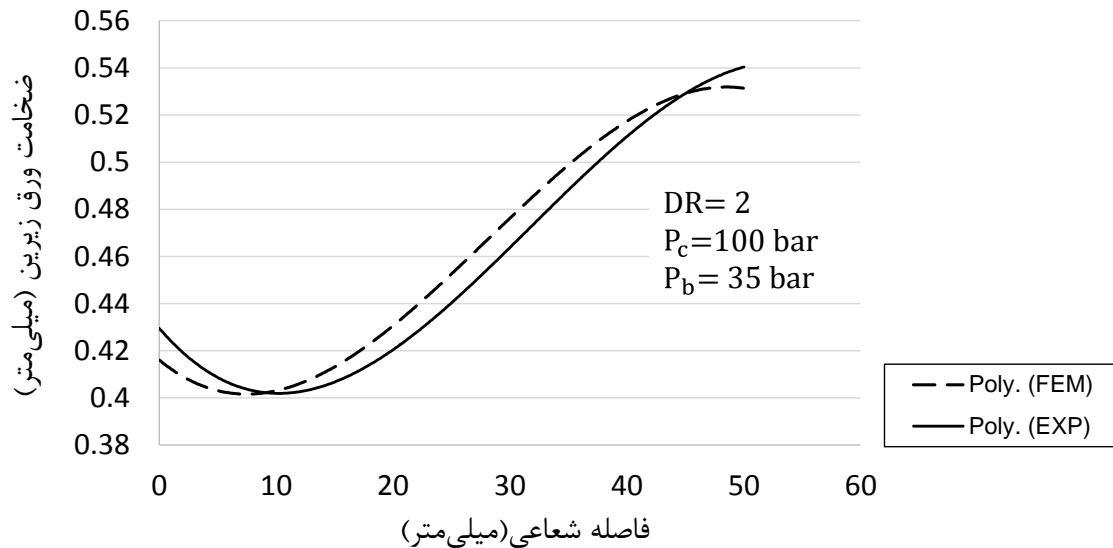
#### ۴-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی

برای صحت‌سنجی نتایج عددی آزمایش‌های عملی مطابق با آنچه در فصل ۲ شرح داده شده انجام شد. جهت ارزیابی مدل‌های عددی ارائه شده، فشارهای بحرانی پارگی در فرایند کشش هیدرومکانیکی با استفاده از آزمایش‌های تجربی به دست آمده، با نتایج عددی مقایسه گردیده است. تعیین تجربی منحنی فشار بحرانی سیال در حین عملیات، با انجام کشش هیدرومکانیکی بر روی قطعات با نسبت‌های کشش معین تحت فشارهای مختلف محفظه صورت گرفت. با انجام آزمایش با شرایط معین فرایند، در صورت بروز پارگی در قطعه در حین کشش، فشار سیال و ارتفاع کشش در لحظه پارگی مشخص‌کننده‌ی یک نقطه از منحنی فشار بحرانی پارگی برای شرایط فرایند آزمایش می‌باشد. انجام آزمایش در مسیرهای فشار مختلف و تعیین نقاط حدی، مرز ناحیه‌ی کاری بروز پارگی و در نتیجه محدوده‌ی کاری مجاز برای فشار سیال جهت جلوگیری از بروز پارگی در قطعه را به صورت تجربی بدست می‌دهد. این محدوده، در واقع، ناحیه‌ی مجاز تغییرات فشار سیال داخل محفظه در حین تولید قطعه به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی را مشخص می‌نماید. بر این اساس جهت تولید قطعه‌ی سالم، فشار سیال با پیشرفت عملیات شکل‌دهی و افزایش لحظه‌ای عمق قطعه نباید از این محدوده‌ی مجاز تجاوز نماید.

#### ۴-۴-۱ مقایسه ضخامت ورق در روش تجربی و عددی در نسبت کشش ۲

در شکل ۴-۳۱ توزیع ضخامت نسبت به موقعیت شعاعی در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و فشار پیش‌بالج برای ورق زیریناز روش تجربی و عددی ارائه شده است.



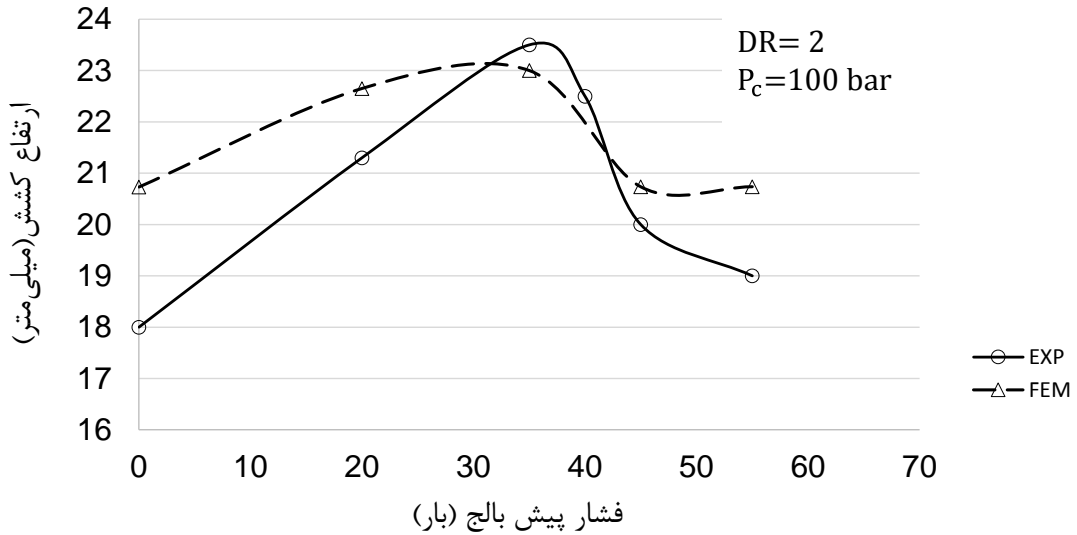


شکل ۴-۳۱: مقایسه تأثیر فشار محفظه‌ای بر روی ضخامت ورق در روش تجربی و عددی

در شکل ۴-۳۱ رفتار تغییرات ضخامتی در مدل المان محدود و آزمون تجربی بیانگر نزدیکی نتایج در هر دو حالت می‌باشد

#### ۴-۴-۲ مقایسه اثر فشار پیش‌بالج بر حد کشش در روش تجربی و عددی

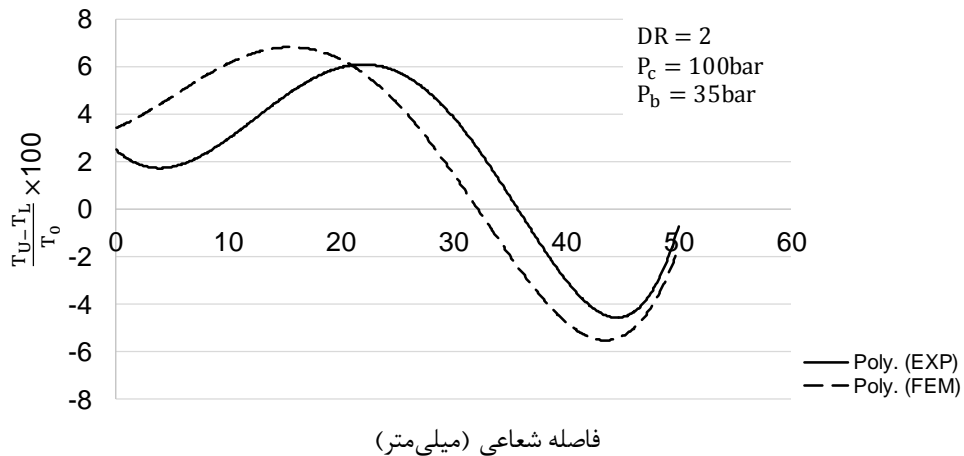
شکل ۴-۳۲ تأثیر فشار پیش‌بالج را بر روی ارتفاع کشش با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و نسبت کشش ۲ در حالت تجربی و المان محدود نشان می‌دهد. با افزایش فشار پیش‌بالج از ۰ تا ۲۰ بار حداکثر نسبت کشش قابل‌دستیابی بدون پارگی در هر دو حالت روند افزایشی دارد. در فشار پیش‌بالج ۲۵ تا ۳۵ بار شرایط بهینه جهت رسیدن به بیشترین ارتفاع فراهم می‌آید بطوریکه در فشار ۳۵ بار بیشترین ارتفاع در آزمون‌های تجربی و عددی حاصل شد. البته در روش تجربی بیشترین ارتفاع از حالت المان محدود به مقدار ناچیزی بیشتر است. در هر دو حالت با افزایش فشار پیش‌بالج از ۴۵ بار، ارتفاع کشش کاهش می‌یابد. با اعمال فشار پیش‌بالج ۵۵ بار کرنش اولیه ورق در ناحیه تماس آن با ورق‌گیر افزایش یافته، ضخامت ورق در ابتدا فرایند کاهش می‌یابد که باعث ایجاد عیب در محصول نهایی می‌شود. تفاوت نمودارهای حاصل از داده‌های آزمون تجربی و مدل المان محدود می‌تواند شامل خطای اندازه‌گیری در آزمون تجربی و یا خطا در منحنی حد شکل‌دهی در مدل اعمال شده در مدل المان محدود باشد.



شکل ۴-۳۲: مقایسه اثر فشار پیش‌بالج بر حد کشش در آزمون‌های تجربی و عددی

#### ۴-۳-۳ مقایسه تفاوت ضخامت پوسته‌ها در نسبت کشش ۲ از روش تجربی و عددی

درصد تغییرات ضخامتی پوسته پایین فلزی به ضخامت اولیه ورق، در فشار محفظه‌ای ۱۰۰ بار و پیش‌بالج ۳۵ بار در نسبت‌های کشش ۲ با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی و المان محدود در شکل ۴-۳۳ آورده شده است.



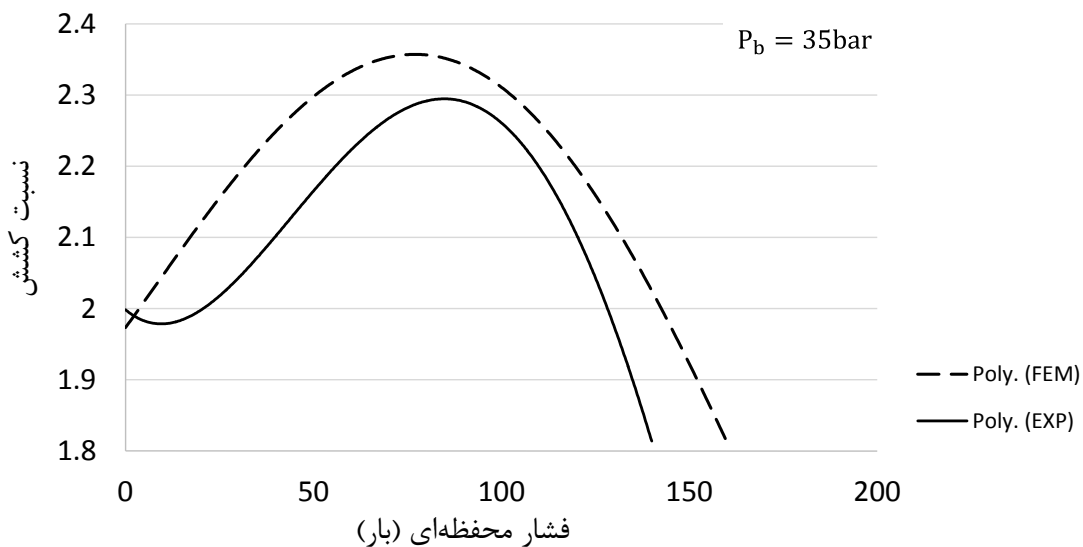
شکل ۴-۳۳: مقایسه درصد تغییرات ضخامت پوسته‌ها در آزمون‌های تجربی و عددی

مطابق با شکل ۴-۳۳ سطح نمودار درصد تغییرات ضخامت در ابتدای مسیر حالت تجربی پایین‌تر از حالت المان محدود است. در فاصله تقریباً ۱۵ mm از مرکز در حالت المان محدود دارای یک قلّه تغییرات ضخامتی در جهت افزایش ضخامت پوسته بالایی می‌باشد. هر دو نمودار در فاصله ۲۰ mm از مرکز به

سمت کاهش ضخامت لایه بالایی و افزایش لایه زیرین پیش می‌روند تا در فاصله ۴۵ mm شعاعی در هر دو نمودار ضخامت لایه زیرین از رویی بیشتر می‌شود. بطور کلی رفتار هر دو نمودار در کل مسیر مشابه یکدیگر است.

#### ۴-۴-۴ مقایسه منحنی مشخصه فرایند کشش هیدرومکانیکی ورق FML بین دو روش تجربی و عددی

شکل ۴-۳۴ مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی را برای منحنی مشخصه فرایند نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده انطباق نسبتاً خوب این دو منحنی است. تفاوت موجود می‌تواند به علت خطای منحنی FLD مورد استفاده و یا خطا در مدل‌سازی شرایط اصطکاکی نشأت گرفته باشد. نتایج مدل‌سازی فشار بهینه را کمتر از تجربی نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی فرض شده است که به علت سرعت پایین فرایند کشش توزیع فشار در منطقه به صورت یکنواخت باشد که این فرض ممکن است به صورت کامل در واقع برقرار نباشد.



شکل ۴-۳۴: مقایسه ناحیه کاری تجربی و شبیه‌سازی



## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، چندلایه فیبر فلزی با ترکیب ورق آلومینیومی AA1050-O و هسته کامپوزیتی از فیبر شیشه در رزین پلی‌یورتان با استفاده از پرسکاری گرم ساخته و فرایند کشش هیدرومکانیکی گردهای FML انجام شد. اثر پارامترهای مختلف بر نسبت حدی کشش در این فرایند با استفاده شبیه‌سازی فرایند به کمک نرم‌افزار آباکوس ۶,۱۳,۴ مورد بررسی قرار گرفت. با طراحی و ساخت یک قالب آزمایشی نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است که نشان‌دهنده انطباق قابل قبول نتایج عددی و تجربی می‌باشد. به‌گونه‌ای که می‌توان از شبیه‌سازی برای تعیین حد بالا و پایین محدوده شکل‌دهی به‌منظور جلوگیری از پارگی استفاده نمود. بخش اصلی نوآوری این پژوهش استفاده از ورق FML جهت بررسی شرایط بروز پارگی و ارتفاع کشش در فرایند کشش هیدرومکانیکی بوده است. نتایج کلی به‌دست آمده از پایان‌نامه به شرح زیر است:

- ۱- با طراحی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی و تجهیزات مورد نیاز، فشار بحرانی پارگی برای قطعات از جنس FML تعیین گردید، درستی مدل المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت.

بررسی‌ها بیانگر تطابق خوب منحنیهای فشار بحرانی بر اساس مدل المان محدود و نتایج تجربی بوده است.

۲- با اجرای کشش ورق‌هایی با قطرهای مختلف، به ازای مقادیر متفاوت فشار پیش‌بالج و فشار محفظه منحنی مشخصی فرایند بدست آمد. مشخص شد که دامنه فشار محفظه‌ای مطلوب برای تولید یک قطعه سالم، با افزایش نسبت کشش محدودتر می‌شود. نتایج نشان داد که با تنظیم فشار پیش‌بالج برابر ۳۵ بار و فشار محفظه برابر ۸۰ بار می‌توان به بیشترین نسبت حد کشش برابر ۲/۲۵ دست پیدا کرد.

۳- افزایش و یا کاهش فشار پیش‌بالج از مقدار بهینه ۳۵ بار موجب کاهش حد کشش خواهد شد. همچنین مشخص گردید ضخامت در نواحی نزدیک به قطب کاهش می‌یابد و پارگی ابتدا در ورق زیرین رخ می‌دهد. بعلاوه همخوانی مناسبی بین نتایج تجربی و المان محدود برقرار شد.

۴- نتایج عددی نشان می‌دهد که با افزایش فشار محفظه‌ای توزیع کرنش موثر در پوسته‌ها یکنواخت تر شده است البته افزایش فشار محفظه‌ای تا حدی مجاز است که سبب پارگی محصول نهایی نشود.

۵- نتایج تجربی در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی نشان‌دهنده توزیع یکنواخت تر ضخامت در منطقه دیواره نسبت به نواحی دیگر است و این یافته انطباق خوبی با نتایج عددی دارد.

۶- تاثیر فشار بحرانی پارگی بر ارتفاع کشش ورق FML ارزیابی شد. مشخص گردید بیشترین ارتفاع کشش مربوط به ورق با قطر اولیه ۹۰ mm با ثبت عدد ۳۱ mm در مقابل کمترین ارتفاع مربوط به نسبت کشش ۲/۲۵ با ارتفاع کشش ۱۷ mm بود.

۷- با توجه به نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی و نمونه آزمون‌های تجربی، پارگی در ورق‌های FML ابتدا در ورق زیرین فلزی اتفاق می‌افتد. بر طبق نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی در زمان وقوع پارگی در ورق زیرین، هسته در وضعیت سالم قرار دارد و جدایش بین لایه‌ها رخ نمی‌دهد.

## ۲-۵ پیشنهادها

همان‌گونه که بیان شد کشش عمیق به کمک سیال، شامل روش‌های مختلفی می‌باشد که می‌توان مشابه کار حاضر را بر روی هر کدام از روش‌های بیان شده انجام داد. همچنین با تغییرات جزئی بر روی قالب طراحی شده برای این عملیات، یا ساخت ورق با توجه به لایه چینی‌های متفاوت کارهای تجربی مربوط به فرایندهای مختلف قابل انجام است. در ادامه چند پیشنهاد برای ادامه کار ارائه شده است.

۱- با بررسی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی برای مواد دیگر و مقایسه نتایج کار حاضر با آن، تأثیر خواص مواد را بر روی ناحیه کاری و تأثیر عواملی چون فشار محفظه‌ای، فشار پیش‌بالج و ارتفاع پیش‌بالج بر روی توزیع ضخامت در فرایند قابل مطالعه است.

۲- با انجام تغییرات خیلی کم بر روی اجزای قالب می‌توان این فرایند را برای هندسه‌های متفاوت همچون مخروطی و سهموی انجام داد و مقایسه خوبی با کار حاضر انجام داد.

۳- با تغییر سنبه و ورق‌گیر می‌توان مطالعات مشابه را بر روی فرایند هیدروبالج انجام داد.

استفاده از فیبرهای مختلف با جهت‌های مختلف و نیز با بکارگیری رزین‌های گوناگون می‌توان جنس هسته را تغییر داد، همچنین با تغییر جنس پوسته فلزی طیف وسیعی از کارهای تجربی ارزشمند قابل دسترسی و مطالعه می‌باشد.

## منبع‌ها

- [1] K. U. Kainer, *Basics of Metal Matrix Composites*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [2] L. B. Vogelesang and A. Vlot, "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 103, no. 1, pp. 1–5, 2000.
- [3] R. Marissen, "Mechanical aspects related to fibre fracture in ARALL® 2 laminates," in *Advances in Fatigue Science and Technology*, Springer, pp. 697–707, 1989.
- [4] A. Vlot, "Low-velocity impact loading: on fibre reinforced aluminium laminates (ARALL and GLARE) and other aircraft sheet materials," Delft University of Technology, 1993.
- [5] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 7, pp. 3671–3685, Aug. 2011.
- [6] E. C. Botelho, R. A. Silva, L. C. Pardini, and M. C. Rezende, "review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures," *Materials Research*, vol. 9, no. 3. scielo, pp. 247–256, 2006.
- [7] A. Vlot, L. B. Vogelesang, and T. J. De Vries, "Towards application of fibre metal laminates in large aircraft," *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 71, no. 6, pp. 558–570, Dec. 1999.
- [8] J. F. Laliberte, C. Poon, P. V. Straznicky, and A. Fahr, "Applications of fiber-metal laminates," *Polym. Compos.*, vol. 21, no. 4, pp. 558–567. 2000.
- [9] G. Wu and J.-M. Yang, "The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures," vol. 57, no. 1. Springer, pp. 72–79, 2005.
- [10] J. Sinke, "Manufacturing Principles for Fiber Metal Laminates," International Conference on Composite Materials (Proceedings). Edinburgh, UK. 2009.
- [11] S. H. Zhang, "Developments in hydroforming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 91, no. 1, pp. 236–244, Jun. 1999.
- [12] S. H. Zhang and J. Danckert, "Development of hydro-mechanical deep drawing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 83, no. 1–3. pp. 14–25, Nov-1998.
- [13] K. Siegert, M. Häussermann, B. Löscher, and R. Rieger, "Recent developments in hydroforming technology," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, no. 2. pp. 251–258, Jan-2000.
- [14] M. R. Jensen, L. Olovsson, and J. Danckert, "Numerical model for the oil pressure distribution in the hydromechanical deep drawing process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, no. 1. pp. 74–79, Jun-2000.
- [15] J. An, "Computer-aided analysis and design of a sheet metal hydroforming process," PhD Thesis, University of Cincinnati, 1996.
- [16] L. Lang, J. Danckert, and K. B. Nielsen, "Investigation into the effect of pre-

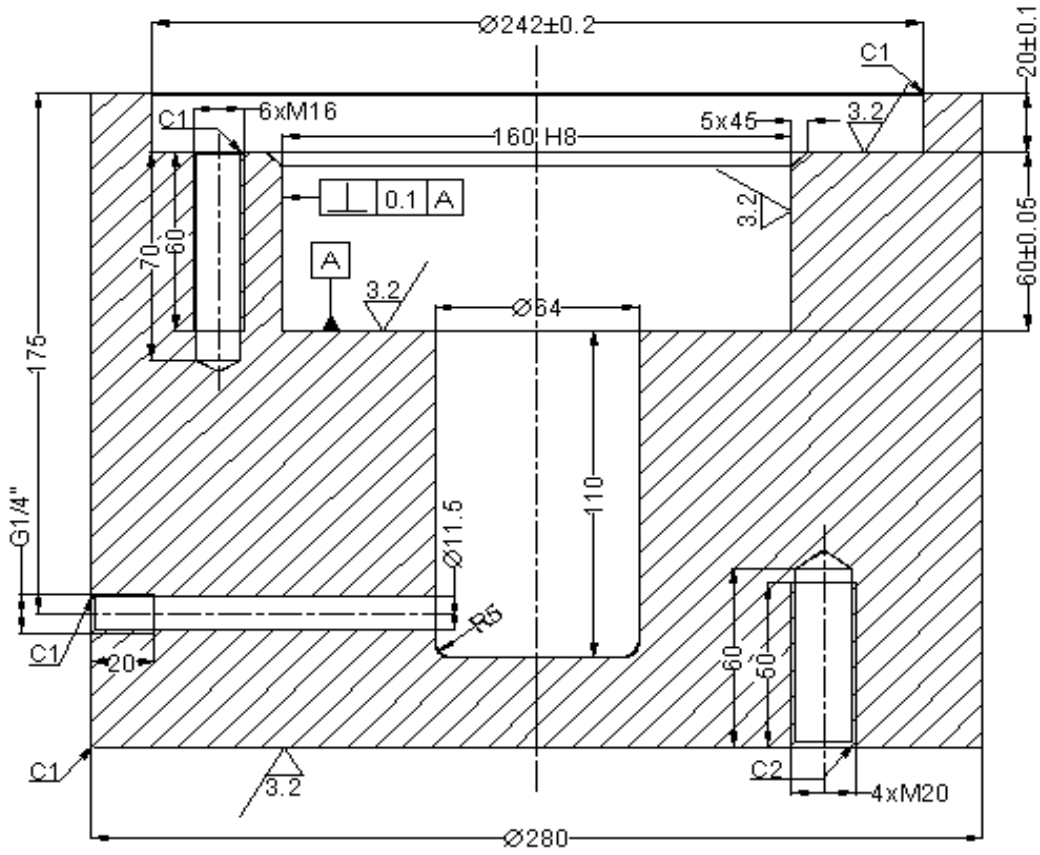


- bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 6, pp. 649–657, May 2004.
- [17] S. H. Zhang, M. R. Jensen, K. B. Nielsen, J. Danckert, L. H. Lang, and D. C. Kang, “Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 142, no. 2, pp. 544–550, Nov. 2003.
- [18] H. D. Azodi, H. Moslemi Naeini, M. H. Parsa, and G. H. Liaghat, “Study on Wall Thickness Distribution in Hydro mechanical Deep Drawing of Cylindrical Cups,” in *Proceedings of Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME2007)*, 2007.
- [19] L. Héту, *Hydromechanical Deep-drawing of Aluminium Tailor Welded Blanks*. 2004.
- [20] S. H. Zhang, K. B. Nielsen, J. Danckert, D. C. Kang, and L. H. Lang, “Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 1–8, May 2000.
- [21] S. H. Zhang, L. H. Lang, D. C. Kang, J. Danckert, and K. B. Nielsen, “Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces - experiments and numerical simulation,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 10, pp. 1479–1492, Aug. 2000.
- [22] A. Fazli and B. M. Dariani, “Investigation of friction effect in limit drawing ratio of hydromechanical deep drawing process,” in *Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME2005)*.
- [23] F. Rahmani, S. J. Hashemi, H. Moslemi Naeini, and H. Deylami Azodi, “Numerical and Experimental study of the efficient parameters on hydromechanical deep drawing of square parts,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, no. 2, pp. 338–344, 2012.
- [24] L. Lang, J. Danckert, and K. B. Nielsen, “Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 3, pp. 524–535, 2005.
- [25] J. Wang and C.-K. Yang, “Failure analysis of hydroforming of sandwich panels,” *J. Manuf. Process.*, vol. 15, no. 2, pp. 256–262, Apr. 2013.
- [26] S. Bagherzadeh, B. Dariani, and K. Malekzadeh, “Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 9, pp. 1840–1849, Sep. 2012.
- [27] J. Gresham, W. Cantwell, M. J. Cardew-Hall, P. Compston, and S. Kalyanasundaram, “Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures,” *Compos. Struct.*, vol. 75, no. 1–4, pp. 305–312, Sep. 2006.
- [28] S. Kalyanasundaram, S. DharMalingam, S. Venkatesan, and A. Sexton, “Effect of process parameters during forming of self reinforced – PP based Fiber Metal Laminate,” *Compos. Struct.*, vol. 97, pp. 332–337, Mar. 2013.
- [29] ع. رجبی، م. کدخدایان، “بررسی چروکیدگی ورق‌های فلز-کامپوزیتی در فرایند کشش عمیق”، دهمین همایش انجمن هوافضای ایران، ۱۳۸۹.

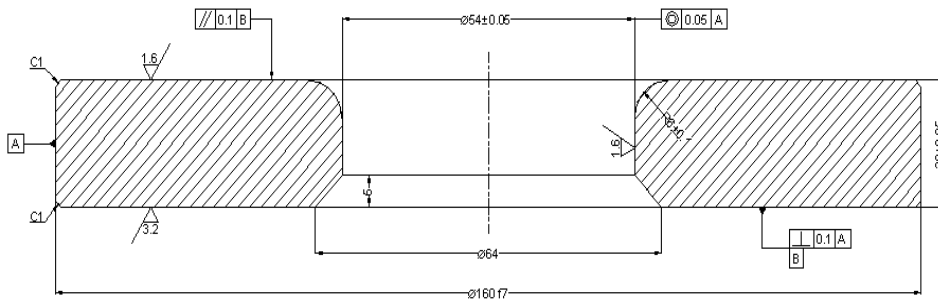
- [30] م. کدخدایان، س. امیرنژاد، ح. فضلی شهری، "بررسی تجربی و شبیه‌سازی برگشت فنری در فرایند خمکاری V شکل برای ورق چندلایه کامپوزیتی فلزی-الیافی FM"، یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳۸۹.
- [31] م. سهراب خانی، م. صدیقی، "بررسی حد کشش و تغییرات ضخامت در فرایند کشش عمیق متداول و هیدرومکانیکال در سرعت بالا به روش اجزاء محدود"، نهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، ۱۳۸۷.
- [32] O. A. Sokolova, A. Carradò, and H. Palkowski, "Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending." *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 1, pp. 1-7, Dec. 2011.

پیوست

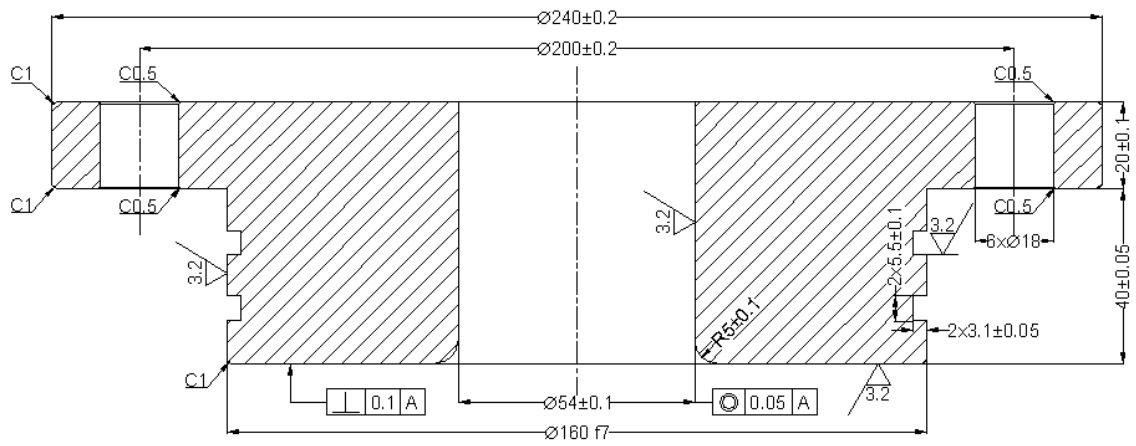
(۱) نقشه قالب هیدروفرمینگ ورق



Section A-A  
Scale: 1/2



(۲) نقشه قالب هیدروفرمینگ ورق



## Abstract

Fiber metal laminate are among the most widely used in aerospace industry .conventional forming method is not presented for this material because of low formability is demanding. In this thesis hydromechanical deep drawing technology is applied in order to recognize the drawing height of FML. FML has been made by AA1050-0 as metal layer and composite core that had made with fiber glass and Polyurethane matrix. Hot press machine with time and temperature control has been used to produce FML. The initial sheet is formed into the die cavity with a press that equipped by hydronic appliances. The influence of process parameters such as chamber pressure, pre-bulging pressure and drawing ratio investigated on drawing height. In numerical analyses Abaqus explicit solver is applied. Sheet metal is considered as an elastic-plastic material. Anisotropy behavior of sheet metal is forgotten and FLD damage criteria is take into account for rapture modeling of sheet metal. And also, Characteristic curve of chamber pressure according to drawing ratio for composite sheet that had been made is achievd. The results indicate that deepest safe products has been performed in pre-bulging pressure of 35 bar. Besides, the range of desirable chamber pressure will be narrower in higher drawing ratio. The comparison of numerical and experimental results determined that Finite element modeling has been used to simulation of FML forming has acceptable estimate of accuracy.

**Keywords:** Fiber metal laminate, FML, Hydromechanical drawing, Chamber pressure, Characteristic curve, Drawing ratio.



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

**Thesis for Master of Science in Mechanical Engineering**

**Numerical and Experimental analysis of hydro-mechanical  
drawing of fiber metal laminate (FML)**

**Alireza Saadatfard**

**Supervisors  
Dr. Mahdi Gerdooei  
Dr. Hosein Jalali Aghchai**

**February 2016**