

## بررسی تجربی و عددی پارامترهای مؤثر در شکل‌پذیری ورق‌های فلزی دولایه آلومینیوم- فولاد

سید عماد سیدی سمنائی، حمید گرجی\*، محمد بخشی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ فروردین ۱۳۹۵  
بازنگری: ۸ تیر ۱۳۹۵  
پذیرش: ۱۵ مهر ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

ورق دولایه فلزی  
کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی  
کشش عمیق هیدرومکانیکی  
توزیع ضخامت  
نسبت کشش

**چکیده:** اخیراً استفاده از ورق‌های چندلایه فلزی در صنایع مختلف مانند هوافضا و خودروسازی، به علت بهبود شکل‌پذیری ورق‌های سبک‌وزن با شکل‌پذیری کم و ایجاد خواص ترکیبی مانند مقاومت به خوردگی، گسترش‌یافته است. شکل‌دادن این ورق‌ها با محدودیت‌هایی مثل چروکیدگی و جدا شدن لایه‌ها در حین فرآیند همراه است. یکی از روش‌های شکل‌دهی این نوع ورق‌ها به‌منظور برطرف کردن محدودیت‌های فوق، فرآیند هیدروفرمینگ می‌باشد که سبب بهبود شکل‌پذیری می‌شود. در این مقاله فرآیندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق‌های فلزی دولایه آلومینیوم- فولاد به صورت تجربی بررسی شد. برای بررسی بیشتر نتایج تجربی، شبیه‌سازی اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس نیز انجام شد. نشان داده شد که شکل‌پذیری ورق آلومینیومی می‌تواند با دولایه کردن آن با ورق فولادی، بهبود یابد. همچنین نتایج نشان داد که در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با کاهش فاصله بین ورق‌گیر و قالب، چروکیدگی کاهش و نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. هنگامی که مقدار فاصله صفر شود، فرآیند به کشش عمیق هیدرومکانیکی بدون فشار شعاعی تبدیل خواهد شد، چروکیدگی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و نسبت کشش نیز کم‌تر می‌شود. به‌علاوه، مشخص شد که نحوه قرارگیری لایه‌ها نسبت به سنبه و یا نسبت به هم، تأثیر زیادی در شکل‌پذیری ورق دولایه دارد.

### ۱- مقدمه

ورق‌های چندلایه، از ورق‌های فلزی مشابه یا غیرمشابه همراه با یک هسته پلیمری یا چسب تشکیل می‌شوند. مهم‌ترین ویژگی این ورق‌ها، نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشد که موجب کاربرد مناسب آن‌ها در صنایع خودروسازی و هوافضا گردیده است. این ورق‌ها را می‌توان به‌طور کلی به سه دسته چندلایه کامپوزیتی، چندلایه فلزی و چندلایه فلزی- کامپوزیتی تقسیم کرد. در میان ورق‌های چندلایه، ورق‌های چندلایه فلزی که ترکیبی از دو یا چند ورق فلزی غیر هم‌جنس و معمولاً با ضخامت لایه‌های مختلف می‌باشد، در صنایع مختلف کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. این ورق‌ها در صنایع خودروسازی، هوایی، الکتریکی، شیمیایی و غذایی استفاده می‌شوند. از جمله دلایل استفاده از این ورق‌ها می‌توان به ترکیب خواص مکانیکی و فیزیکی لایه‌های مختلف اشاره کرد. این ورق‌ها را می‌توان به روش‌های مختلف مانند اتصال انفجاری، اتصال نورد گرم، اتصال نورد سرد و اتصال چسبی تولید کرد. شکل‌پذیری و خواص تغییر شکل، نگرانی اصلی برای ورق‌های چندلایه فلزی است که به ضخامت لایه‌ها، وضعیت قرارگیری لایه‌ها نسبت به سطح ابزار، شکل ابزار و غیره بستگی دارد [۱ و ۲].

در بین روش‌های شکل‌دهی فلزات، استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ به دلیل دستیابی به نسبت کشش بالاتر، تولید قطعات پیچیده و کیفیت بالای قطعات تولیدشده، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۳ و ۴]. فرآیند

هیدروفرمینگ ورق انواع مختلفی دارد که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان فرآیندهای کشش عمیق هیدرومکانیکی<sup>۱</sup> و هیدرودینامیکی با فشار شعاعی<sup>۲</sup> را نام برد. فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی مانند فرآیند کشش عمیق ساده است، با این تفاوت که محفظه سیال جایگزین ماتریس شده و فشار سیال به زیر ورق اعمال می‌شود. این فشار سیال، سبب بهبود کیفیت و کاهش نازک‌شدگی قطعه تولیدشده نسبت به کشش عمیق معمولی می‌گردد. در شکل ۱ شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی نشان داده شده است [۴]. در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، بین قالب و ورق‌گیر فاصله‌ای وجود دارد که سبب نشت مقداری سیال و همچنین ایجاد فشار شعاعی بر لبه‌ی ورق‌ها می‌شود. این فشار شعاعی باعث افزایش نسبت کشش نسبت به کشش عمیق هیدرودینامیکی می‌شود. شکل ۲ شماتیک این فرآیند را نشان می‌دهد [۵].

مطالعات اولیه در زمینه‌ی شکل‌دهی ورق‌های دولایه توسط تاکودا و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۶ انجام شد. آن‌ها مطالعه‌ای بر روی حد شکل‌دهی فرآیند کشش عمیق ورق‌های دولایه آلومینیوم- فولاد انجام دادند. آنان دریافتند که شکل‌پذیری ورق آلومینیومی با چندلایه کردن آن با ورق فولادی افزایش می‌یابد. مروتی و همکاران [۷] مطالعه تئوری، عددی و تجربی بر روی چروکیدگی ورق‌های دولایه آلومینیوم- فولاد زنگ‌نزن

1 Hydro-Mechanical Deep Drawing (HMDD)  
2 Hydro-Dynamic Deep Drawing by radial pressure (HDDD)

آن‌ها هم‌چنین به صورت عددی و تجربی فرآیند را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. نشان داده شد هنگامی که آلومینیوم طرف سنبه است، در مقایسه با حالتی که فولاد سمت سنبه باشد، منطقه کاری برای فشار سیال افزایش می‌یابد و می‌توان از فشارهای بالاتر استفاده کرد. در هر دو حالت، بیشترین نازک‌شدگی در لایه خارجی اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش ابتدا ورق‌های دولایه آلومینیوم- فولاد با فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی شکل داده شد و اثر پارامترهای مختلف مانند فاصله<sup>۱</sup> بین ورق‌گیر و قالب و فشار مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که در این فرآیند چروکیدگی ورق‌ها زیاد است. برای برطرف کردن چروکیدگی از فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی استفاده شده و پارامترهایی چون ترتیب قرارگیری لایه‌ها و فشار فرآیند بررسی شد. در نهایت مقایسه‌ای بین این دو فرآیند و هم‌چنین مقایسه‌ای بین شکل‌پذیری ورق دولایه با ورق‌های تک‌لایه انجام شد. در این پژوهش با به‌کارگیری دو فرآیند متفاوت هیدروفورمینگ ورق سعی شد ورق‌های دولایه بدون عیبی نظیر چروکیدگی و نازک‌شدگی شکل داده شده و با اندازه‌گیری توزیع ضخامت ورق‌های شکل‌داده‌شده، مقادیر این عیوب مشخص شده و راه‌حلی برای کم کردن و از بین بردن آن‌ها ارائه شود.

## ۲- مراحل آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، از یک دستگاه آزمایش اونیورسال با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. این دستگاه شامل یک واحد کامپیوتری است که می‌تواند حرکات و سرعت دستگاه را کنترل کرده و نمودار نیرو- جابه‌جایی دستگاه در هر لحظه را ثبت و ترسیم کند. این دستگاه قابلیت ایجاد سرعت‌های مختلف با حداکثر سرعت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را دارا می‌باشد. در شکل ۳ تصویر دستگاه آزمایش به همراه واحد کامپیوتری متصل به آن نشان داده شده است.

برای تأمین فشار لازم برای شکل‌دهی و کنترل آن از یک سیستم



Fig. 3. Universal machine with computer unit

شکل ۳: دستگاه آزمایش اونیورسال به همراه واحد کامپیوتری

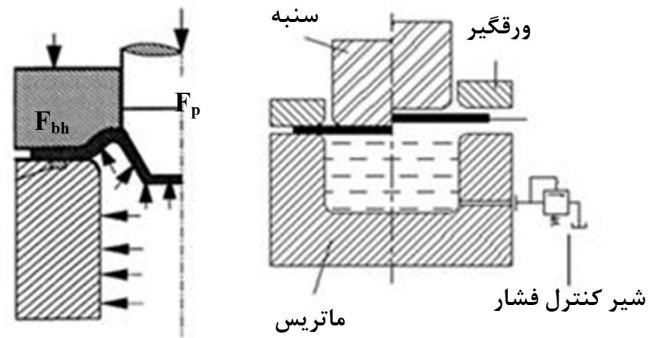


Fig. 1. Schematic of hydro-mechanic deep drawing process

شکل ۱: شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی [۴]

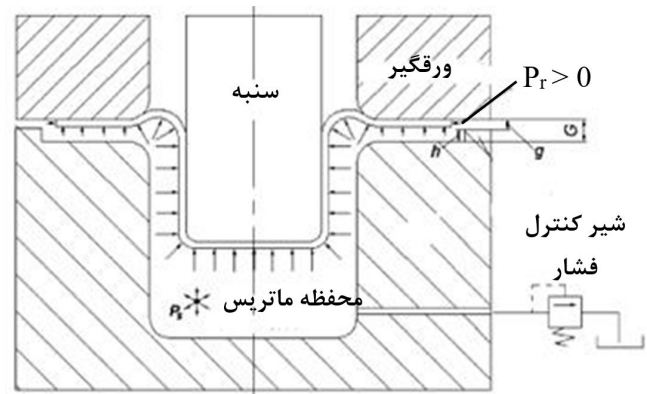


Fig. 2. Schematic of hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure

شکل ۲: شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۵]

در فرآیند کشش عمیق انجام دادند. آنان دریافتند که کاهش در قطر سنبه، نیروی ورق‌گیر مورد نیاز برای جلوگیری از چروکیدگی را افزایش می‌دهد. هم‌چنین، با قرار دادن آلومینیوم در طرف سنبه، نیروی ورق‌گیر مورد نیاز برای جلوگیری از چروکیدگی و نیروی سنبه بیشتر از حالتی است که ورق فولادی در تماس با سنبه است. لانگ و همکاران [۸] در زمینه هیدروفورمینگ ورق‌های سه‌لایه تحقیقی انجام دادند. آن‌ها توانستند ورق سه‌لایه با لایه میانی بسیار نازک را با موفقیت شکل دهند. آنان دریافتند که با افزایش اصطکاک میان لایه‌ها شکل‌پذیری افزایش می‌یابد و برای جلوگیری از چروکیدگی و شکست در ورق‌ها باید یک پیش‌فشار بهینه اعمال کرد. تسنگ و همکاران [۹] شکل‌پذیری ورق دولایه آلومینیوم- تیتانیوم را با فرآیند هیدروفورمینگ بررسی کردند و با شکل‌پذیری ورق تک‌لایه فولاد زنگ‌نزن مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که با انتخاب فشار و پارامترهای مناسب می‌توان ورق دولایه با شکل‌پذیری کمتر را مشابه کیفیت ورق تک‌لایه فولاد زنگ‌نزن به‌دست آورد. باقرزاده و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای تئوری بر روی فرآیند هیدروفورمینگ ورق دولایه فولاد-آلومینیوم انجام دادند و فشار بحرانی در فرآیند را به‌دست آوردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش نسبت کشش، سطح فشار بحرانی سیال کاهش می‌یابد و هم‌چنین با افزایش ضخامت ورق با استحکام بالاتر، محدوده فشار کاری سیال بزرگ‌تر می‌شود.

همچنین به منظور بررسی شکل‌پذیری هر یک از لایه‌ها به طور جداگانه، ورق‌ها بدون چسب و اتصال روی هم قرار داده شده و شکل داده شدند. برای تعیین خواص مکانیکی ورق‌ها از تست کشش استاندارد استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌هایی طبق استاندارد ASTM E8M در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد تهیه شدند. خواص ورق‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: خواص ورق‌های استفاده شده

Table 1. Properties of used sheets

خواص مکانیکی	آلومینیوم ۱۰۵۰	فولاد کم کربن (St13)
ضخامت (mm)	۱/۰۲	۱
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	[۱۲] ۲۳۰۰	[۱۲] ۷۸۰۰
استحکام تسلیم (MPa)	۱۳۱	۱۵۸
مدول الاستیک (GPa)	۷۰	۲۱۰
ضریب پواسون	[۱۲] ۰/۳۳	[۱۲] ۰/۳
نمای کرنش سختی	۰/۱۳	۰/۳۳
ثابت مقاومت ماده (MPa)	۲۱۴	۶۰۰

برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات شکل داده شده از یک دستگاه ضخامت‌سنج مکانیکی ساعت‌دار استفاده شده است. این وسیله دارای دقت ۰/۰۱ میلی‌متر بوده و فک‌های اندازه‌گیر این ضخامت‌سنج دارای نوک کرومی است که برای اندازه‌گیری در ناحیه قوس‌دار مناسب می‌باشد. شکل ۶ این دستگاه را نشان می‌دهد.



Fig. 6. Mechanical thickness gauge

شکل ۶: ضخامت‌سنج مکانیکی

شکل ۷ شماتیک مجموعه قالب به کار گرفته شده در این پژوهش را که شامل ماتریس، سنبه و ورق‌گیر می‌باشد، نشان می‌دهد. از آنجاکه در این پژوهش، فرآیندهای کشش عمیق هیدرومکانیکی بدون فشار شعاعی و کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی بررسی شده‌اند، برای هر یک از این فرآیندها، ورق‌گیر جداگانه استفاده شده است. شماتیک مجموعه قالب در شکل ۸ و ابعاد آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

هیدرولیکی استفاده شده که در شکل ۴ نشان داده شده است. این سیستم قابلیت اعمال فشار تا ۴۰۰ مگاپاسکال را دارد. برای کنترل فشار بیشینه در آن، از یک شیر کنترل فشار استفاده شد که با تنظیم آن بر روی فشار معین، حداکثر فشار سیستم تعیین می‌گردد، به‌گونه‌ای که پس از رسیدن فشار مخزن به فشار تنظیم شده، شیر کنترل فشار باز شده و با خروج سیال از طریق آن، فشار ثابت باقی می‌ماند. شکل ۵ شیر کنترل فشار به کار گرفته شده را نشان می‌دهد.



Fig. 4. Hydraulic system

شکل ۴: سیستم هیدرولیکی



Fig. 5. Pressure control system

شکل ۵: سیستم کنترل فشار

با توجه به کاربرد وسیع ورق دولایه آلومینیوم- فولاد در صنعت که به دلیل مقاومت به خوردگی بالای آلومینیوم و شکل‌پذیری خوب فولاد در صنایع دریایی کاربرد دارد، در این پژوهش از ورق فولادی کم کربن St13 و ورق آلومینیومی Al1050 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. برای ایجاد ورق دولایه، ورق‌ها با لایه نازکی از چسب به هم متصل شدند.



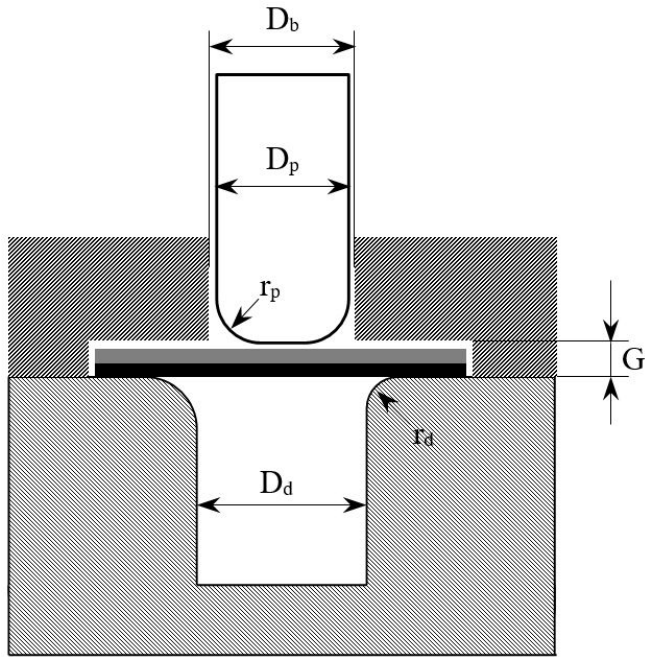


Fig. 8. Schematic of die set and its dimensions  
شکل ۸: شماتیک مجموعه قالب و ابعاد آن

جدول ۲: ابعاد مجموعه قالب

Table 2. Die set dimensions

اندازه (mm)	مشخصه
۳۹	قطر سنبه ( $D_p$ )
۴۴	قطر حفره ماتریس ( $D_d$ )
۵	شعاع گوشه سنبه ( $r_p$ )
۵	شعاع گوشه ماتریس ( $r_d$ )
۴۲	قطر حفره ورق گیر ( $D_b$ )
۲/۲	فاصله ورق گیر فرآیند هیدرودینامیکی با ماتریس ( $G$ )

شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. با توجه به متقارن بودن فرآیند، یک چهارم مجموعه قالب و ورق‌ها مدل شدند. جهت بررسی چروکیدگی و اعمال فشار شعاعی به لبه‌های ورق در شبیه‌سازی، از مدل سه‌بعدی استفاده شده است. مجموعه قالب به صورت صلب گسسته<sup>۱</sup> با المان چهار گره‌ای<sup>۲</sup> و ورق‌ها به صورت شکل‌پذیر<sup>۳</sup> و با المان هشت گره‌ای<sup>۴</sup> مدل شدند. اندازه المان ورق‌ها ۱ میلی‌متر و تعداد ۳ المان در راستای ضخامت اعمال شد. تعداد کل المان‌ها برای هر ورق ۴۴۴۸ بود. شکل ۹ مدل مونتاژ شده فرآیند را نشان می‌دهد.

خواص پلاستیکی ورق‌هایی که با فرآیند نورد تولید می‌شوند در جهت ضخامت و با جهت‌گیری در سطح ورق متفاوت می‌باشد که به ترتیب،

- 1 Discrete rigid
- 2 R3D4
- 3 Deformable
- 4 C3D8R



(الف)



(ب)

Fig. 7. a) Die set components, b) assembled die set mounted on the test machine

شکل ۷: (الف) اجزای مجموعه قالب، (ب) مجموعه قالب مونتاژ شده بر روی دستگاه آزمایش

### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۶,۱۰ برای

جهت اعمال ناهمسانگردی ورق در شبیه‌سازی با کد المان محدود، به نسبت‌های تنش‌های تسلیم ( $R$ ) نیاز می‌باشد که مقادیر آن‌ها از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\sigma}, R_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma}, R_{33} = \frac{\sigma_{33}}{\sigma}, R_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\sigma} \quad (۶)$$

در روابط بالا  $R_{ij}$  نسبت تنش‌های تسلیم ناهمسانگردی،  $\sigma_{11}$  تنش تسلیم در راستای صفر درجه،  $\sigma_{12}$  تنش تسلیم در راستای ۴۵ درجه،  $\sigma_{22}$  تنش تسلیم در راستای ۹۰ درجه،  $\sigma_{33}$  تنش تسلیم در راستای ضخامت و  $\bar{\sigma}$  برابر تنش تسلیم میانگین در راستای صفر درجه است.

از طریق روابط (۷) تا (۱۰) می‌توان نسبت‌های کرنش پلاستیک را به نسبت‌های تنش تسلیم تبدیل نمود [۱۴].

$$R_{11} = 1 \quad (۷)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \quad (۸)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}} \quad (۹)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad (۱۰)$$

که در آن روابط  $r_0$  ضریب ناهمسانگردی در راستای صفر درجه،  $r_{45}$  ضریب ناهمسانگردی در راستای ۴۵ درجه و  $r_{90}$  ضریب ناهمسانگردی در راستای ۹۰ درجه است.

در نهایت با مقادیر نسبت‌های کرنش پلاستیک به دست آمده از نمونه‌های کشش و با کمک روابط بالا، مقادیر نسبت‌های تنش تسلیم را می‌توان محاسبه کرد. در جدول ۳ مقادیر ضرایب ناهمسانگردی و نسبت‌های تنش تسلیم برای ورق‌های آلومینیومی و فولادی نشان داده شده است.

برای تعریف تماس اجزا، از تماس سطح به سطح<sup>۱</sup> و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی<sup>۲</sup> تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب<sup>۳</sup> استفاده گردید. ضرایب اصطکاک بین سطوح قالب و ورق‌ها بر اساس مراجع [۱۷-۱۵] در جدول ۴ نشان داده شده است. ضریب اصطکاک سطوح تماس ورق‌ها ۰/۱ در نظر گرفته شد.

به منظور پیش‌بینی پارگی ورق، از معیار حداکثر مقدار نازک‌شدگی استفاده شده است [۱۸]. حداکثر نازک‌شدگی با استفاده از رابطه (۱۱) مشخص می‌شود.

$$\%thinning = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (۱۱)$$

- 1 Surface to surface
- 2 Kinematic contact method
- 3 Coulomb

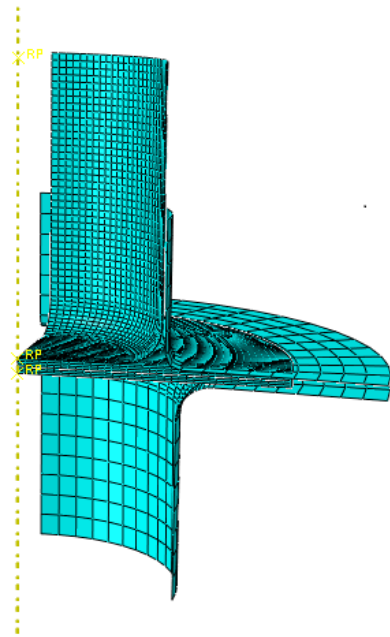


Fig. 9. Process model in finite element simulation  
شکل ۹: مدل فرآیند در شبیه‌سازی اجزای محدود

ناهمسانگردی عمودی و صفحه‌ای نامیده می‌شوند. در یک زاویه مشخص نسبت به جهت نورد ( $\theta$ )، ناهمسانگردی ورق ( $r$ ) با نسبت کرنش‌های پلاستیک مطابق با رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۳]:

$$r_\theta = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (۱)$$

که در آن  $\varepsilon_w$  و  $\varepsilon_t$  به ترتیب کرنش‌های عرضی و ضخامتی از نمونه کشش بریده‌شده در راستای  $\theta$  نسبت به راستای نورد می‌باشند. در ورق‌های نازک با توجه به دشواری اندازه‌گیری کرنش ضخامتی می‌توان با فرض ثابت بودن حجم ماده ( $\varepsilon_w + \varepsilon_t + \varepsilon_t = 0$ ) رابطه (۱) را به رابطه زیر تبدیل نمود:

$$r_\theta = \frac{-\varepsilon_w}{\varepsilon_t + \varepsilon_w} \quad (۲)$$

که در آن  $\varepsilon_w$  و  $\varepsilon_t$  (کرنش طولی) از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند.

$$\varepsilon_t = \ln \frac{l}{l_0} \quad (۳)$$

$$\varepsilon_w = \ln \frac{w}{w_0} \quad (۴)$$

که در آنها  $l$  و  $l_0$  به ترتیب طول نهایی و طول اولیه ورق و  $w$  و  $w_0$  به ترتیب عرض نهایی و عرض اولیه ورق می‌باشند، لذا رابطه زیر برقرار است:

$$r_\theta = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 l_0}{w l}\right)} \quad (۵)$$

#### ۴- نتایج و بحث

برای تحلیل تغییرات ضخامت ورق، قطعه موردنظر مطابق شکل ۱۰ به چهار ناحیه کف قطعه کار (A)، شعاع گوشه سنبه (B)، ابتدای دیواره (C) و ناحیه بالایی دیواره (D) تقسیم‌بندی گردید.

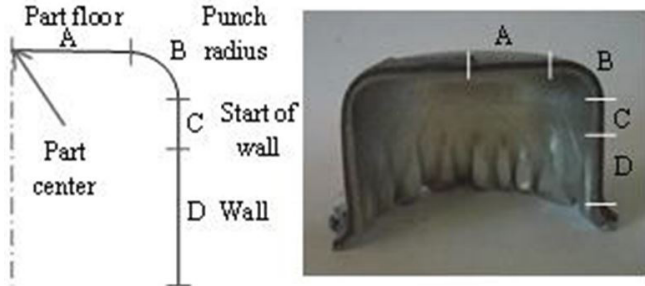


Fig. 10. a) Different regions on the formed part, b) part cut

شکل ۱۰: الف) مناطق مختلف در قطعه شکل داده شده (ب) قطعه برش خورده

شکل ۱۱ قطعه دولایه آلومینیوم - فولاد شکل داده شده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی را در فشار ۱۸/۲ مگاپاسکال به صورت تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ منحنی توزیع ضخامت بر حسب فاصله از مرکز قطعه کار و در شکل ۱۳ منحنی نیروی سنبه بر حسب جابه‌جایی، حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برای این قطعه نشان داده شده است.

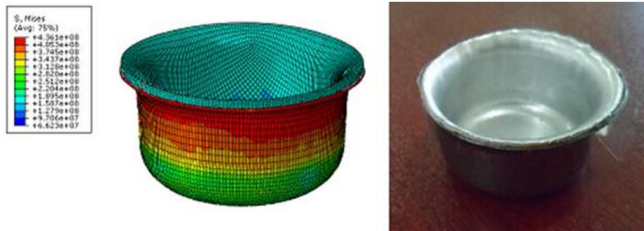


Fig. 11. Produced part by experiment and simulation

شکل ۱۱: قطعه تولیدشده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

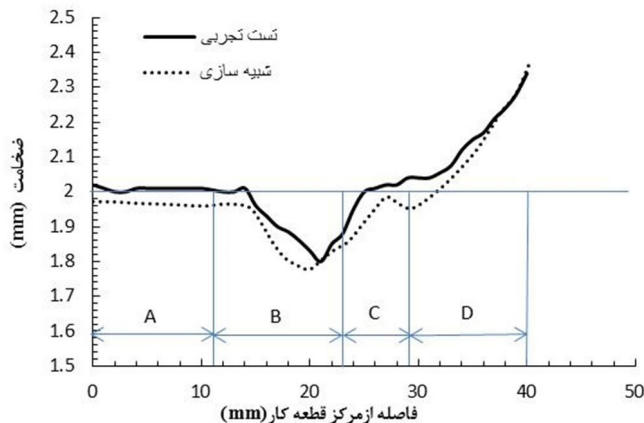


Fig. 12. Thickness distribution curve

شکل ۱۲: نمودار توزیع ضخامت قطعه شکل داده شده

#### جدول ۳: نسبت کرنش‌های پلاستیک و نسبت تنش‌های تسلیم

Table 3. Plastic strain ratios and yield stress ratios

مشخصه	آلومینیوم ۱۰۵۰	فولاد کم کربن (St13)
$r_0$	۰/۵۰۸	۱/۳۶۱
$r_{45}$	۰/۴۳۰	۰/۹۷۲
$r_{90}$	۰/۴۷۸	۱/۱۷۶
$R_{22}$	۰/۹۸۰	۰/۹۶۸
$R_{33}$	۰/۸۵۵	۱/۰۴۶۳
$R_{12}$	۱/۰۸۶	۰/۸۹۱

#### جدول ۴: ضرایب اصطکاک سطوح قالب و ورق‌ها

Table 4. Friction coefficients of die and sheets surfaces

مشخصه	آلومینیوم ۱۰۵۰	فولاد کم کربن (St13)
ضریب اصطکاک ماتریس با ورق	۰/۰۵	۰/۰۶
ضریب اصطکاک ورق گیر با ورق	۰/۰۶	۰/۰۸
ضریب اصطکاک سنبه با ورق	۰/۱۲	۰/۱۵

که در آن  $t_0$  ضخامت اولیه ورق و  $t_f$  مقدار ضخامت نهایی است که از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$t_f = t_0 \exp(\varepsilon_i) \quad (12)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی ( $e_\theta$ ) در شرایط کرنش صفحه‌ای که توسط گروه تحقیقاتی کشش عمیق آمریکای شمالی<sup>۱</sup> تقریب زده شد [۱۹]، از طریق رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$e_\theta = [(23.3 + \frac{360}{25.4} t_o) (\frac{n}{0.21})] / 100 \quad (13)$$

که در آن،  $n$  نمای کرنش سختی است.

با توجه به برقراری روابط (۱۴) و (۱۵) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی و کرنش ضخامتی  $\varepsilon_i$  تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_\theta = \ln(1 + e_\theta) \quad (14)$$

$$\varepsilon_i = -\varepsilon_\theta \quad (15)$$

با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) و محاسبه کرنش ضخامتی و جاگذاری در رابطه (۱۲)، مقدار ضخامت نهایی به دست می‌آید و سپس طبق رابطه (۱۱) حداکثر نازک‌شدگی محاسبه می‌شود. براساس روابط فوق، مقدار حداکثر نازک‌شدگی برای ورق‌های آلومینیومی و فولادی به ترتیب ۲۰ و ۳۸ درصد به دست آمد.

#### ۴-۱- اثر فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس در فرآیند کشش عمیق

##### هیدرودینامیکی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی به‌منظور اعمال فشار شعاعی به لبه ورق‌ها، فاصله‌ای بین ورق‌گیر و ماتریس ایجاد می‌شود که اندازه آن کمی از ضخامت ورق بیشتر است. بدین منظور در این پژوهش بر روی ورق‌گیر پله‌ای تعبیه شده که ارتفاع آن از ضخامت ورق دولایه بیشتر و قطر آن تقریباً هم‌اندازه با قطر ورق اولیه است که به این پله، فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر گفته می‌شود. در ابتدای فرآیند شکل‌دهی، با اعمال فشار، ورق به سمت بالا حرکت کرده و درون حفره ورق‌گیر (پله) قرار می‌گیرد و با توجه به ارتفاع پله که از ضخامت ورق بیشتر است، سیال به سمت بیرون حرکت کرده و به دیواره پله برخورد می‌کند. در نتیجه با توجه به کاهش قطر ورق در حین فرآیند، سیال به لبه‌ی ورق‌ها فشار اعمال می‌کند و آن را به سمت داخل هل می‌دهد که سبب جریان راحت‌تر ورق به سمت داخل حفره ماتریس می‌شود. از طرفی، چون ناحیه زیرین ورق با ماتریس فاصله دارد و فقط با سیال در تماس است و نیز به دلیل خواص ناهمسانگردی ورق‌ها، بر روی قطعات تولیدشده، چروکیدگی‌هایی ملاحظه گردید. برای از بین بردن چروکیدگی، در چند مرحله مقدار فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر کم شد. شکل ۱۴ قطعات تولیدشده در فاصله‌های مختلف و توزیع ضخامت آن‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با کاهش فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس، حداکثر نازک‌شدگی در قسمت B (شعاع سر سنبه) افزایش پیدا کرد (به دلیل سخت‌تر شدن جریان ماده) ولی میزان افزایش ضخامت ورق در قسمت بالایی دیواره خیلی کم نشد. در نتیجه چروکیدگی تا حدودی کمتر شد ولی کاملاً از بین نرفت.

#### ۴-۲- اثر فشار سیال

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند هیدروفورمینگ فشار سیال است که با به‌کارگیری مقدار و مسیر مناسب فشار می‌توان شکل‌دهی ورق‌ها را بهبود بخشید. از این‌رو، اثر فشارهای مختلف بر شکل‌پذیری ورق‌های دولایه بررسی شد. شکل ۱۵ مسیر فشارهای استفاده‌شده و شکل‌های ۱۶ و ۱۷ توزیع ضخامت نمونه‌ها را در فشارهای مختلف، به ترتیب در فرآیندهای کشش عمیق هیدرودینامیکی و هیدرومکانیکی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود، در هر دو فرآیند با افزایش فشار، مقدار بیشینه نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. در اثر افزایش فشار، اصطکاک بین سنبه و ورق بالایی افزایش یافته و سرخوردگی ورق بر روی سنبه کاهش می‌یابد، بنابراین بیشینه نازک‌شدگی کم می‌شود. از طرفی، کاهش نازک‌شدگی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی نسبت به فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، بیشتر است. در فرآیند هیدرودینامیکی، فشار شعاعی بر لبه‌های ورق وجود دارد که سبب جریان یافتن راحت‌تر ورق می‌شود. با افزایش فشار سیال، فشار شعاعی نیز زیادتر شده و جریان ورق به سمت داخل بهتر می‌شود. از طرفی، افزایش فشار باعث افزایش سطح تماس

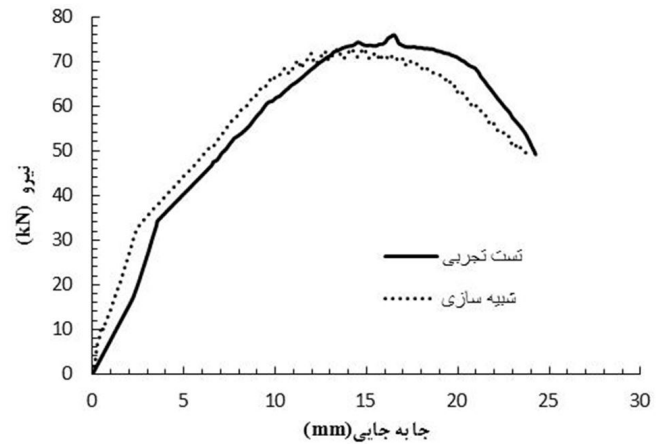


Fig. 13. Force-displacement curve

#### شکل ۱۳: نمودار نیرو-جاب‌جایی قطعه شکل‌داده‌شده

همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود انطباق قابل قبولی بین منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. حداکثر اختلاف در منحنی‌های توزیع ضخامت ۴/۹ درصد می‌باشد که این اختلاف می‌تواند ناشی از شرایط فرآیندی و اندازه‌گیری ضخامت باشد. بیشینه نیرو در دو حالت نیز حدود ۴ درصد اختلاف دارند.

در منحنی توزیع ضخامت شکل ۱۲، ناحیه A مربوط به کف قطعه می‌باشد که به دلیل تماس کامل با کف سنبه، تغییر ضخامت زیادی در آن رخ نداده است. ناحیه B مربوط به شعاع گوشه سنبه می‌باشد که در اثر خم شدن ورق در این ناحیه و تنش‌های فشاری و کششی در داخل و بیرون ورق، بیشترین نازک‌شدگی در این قسمت اتفاق می‌افتد. در ناحیه C که از انتهای گوشه پایینی نمونه آغاز شده و تا بخشی از دیواره ادامه دارد، قطعه شروع به افزایش ضخامت می‌کند. ناحیه E (دیواره و فلنج قطعه) به دلیل تنش فشاری در جهت شعاعی به طرف داخل کشیده می‌شود که تأثیر این کاهش در شعاع و محیط ورق موجب افزایش ضخامت ورق می‌شود.

با توجه به منحنی نیرو-جاب‌جایی شکل ۱۳، نیروی سنبه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نیروی سنبه تشکیل‌شده‌اند از نیروی فشار سیال، نیروهای کارسختی ورق‌ها و نیروهای اصطکاکی. در اثر تغییر شکل ورق‌ها، در آن‌ها کار سختی اتفاق افتاده و مقاومت به تغییر شکل زیاد می‌شود. در نتیجه نیروی کارسختی در طول فرآیند افزایش می‌یابد. با توجه به جریان یافتن مواد و کاهش سطوح تماس ورق‌ها با ورق‌گیر و ماتریس، نیروهای اصطکاکی در طول فرآیند روند کاهشی دارد. در ابتدای فرآیند، آهنگ افزایش نیروی کارسختی بیشتر از آهنگ کاهش نیروی اصطکاکی می‌باشد، در نتیجه نیروی سنبه افزایش می‌یابد. در ادامه، این روند برعکس شده و نیروی سنبه کم می‌شود. فشار سیال بر روی روند نیرو تأثیر ندارد و فقط باعث افزایش نیرو در هر نقطه می‌شود. در ابتدا، فشار با افزایش کورس، افزایش می‌یابد و نیرو نیز متناسب با فشار زیاد می‌شود.



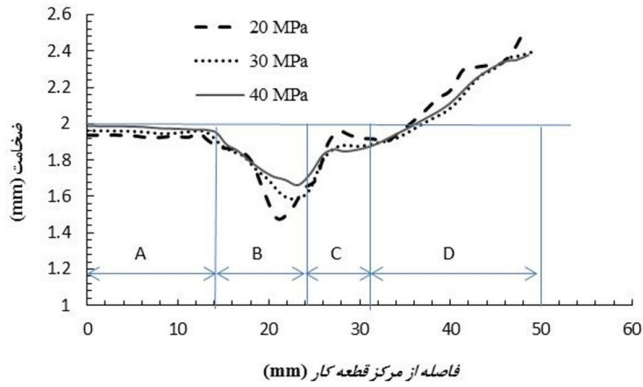


Fig. 16. Thickness distribution curves in different pressures in hydrodynamic deep drawing process

شکل ۱۶: نمودار توزیع ضخامت در فشارهای مختلف در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی

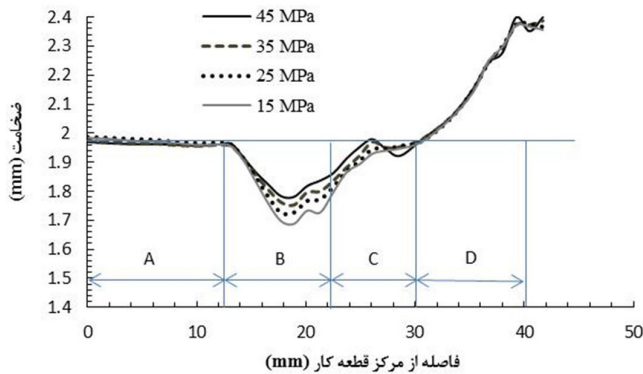


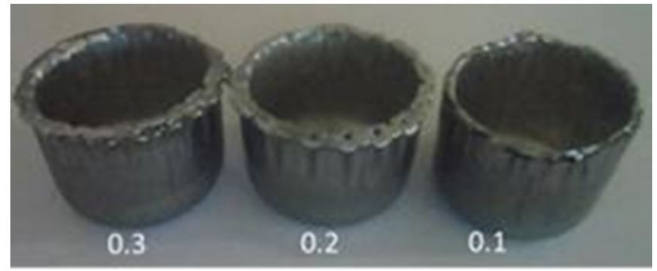
Fig. 17. Thickness distribution curve in different pressures in hydro-mechanic deep drawing process

شکل ۱۷: نمودار توزیع ضخامت در فشارهای مختلف در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی

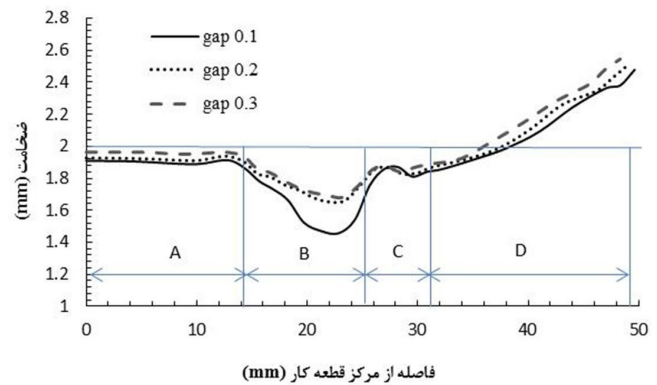
ورق گیر و ماتریس فاصله‌ای وجود دارد که در اثر این فاصله، احتمال افزایش ضخامت و چروکیدگی بیشتر است. از طرفی مشاهده شد که با کاهش فشار، افزایش ضخامت بیشتر می‌شود. بنابراین، در فشار ۱۵ مگاپاسکال، قطعه در ناحیه فلنج دچار چروک و افزایش ضخامت شده و مانع جریان یافتن ماده می‌شود و ورق‌ها فقط از ناحیه شعاع سنبه کشیده شده و از همین ناحیه پاره می‌شوند.

در شکل ۱۸ تأثیر فشار بر توزیع ضخامت هر یک از لایه‌ها در ورق دولایه آلومینیوم- فولاد به‌طور جداگانه نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در هر دولایه با افزایش فشار، بیشینه نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. البته این میزان کاهش در لایه آلومینیومی که در تماس با سنبه است، به دلیل افزایش اصطکاک با سنبه، نسبت به لایه فولادی بیشتر است. در شکل ۱۹ منحنی درصد کاهش ضخامت برای ناحیه شعاع سر سنبه در فشارهای مختلف آورده شده است.

همان‌طور که بیان شد با افزایش فشار، نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش فشار، نیروی شکل‌دهی نیز زیاد می‌شود (شکل ۲۰).



(الف)



(ب)

Fig. 14. a) Produced parts, b) thickness distribution of formed parts in different gaps

شکل ۱۴: (الف) قطعات تولیدشده (ب) توزیع ضخامت قطعه‌های تولیدشده در فاصله‌های مختلف بین ماتریس و ورق گیر

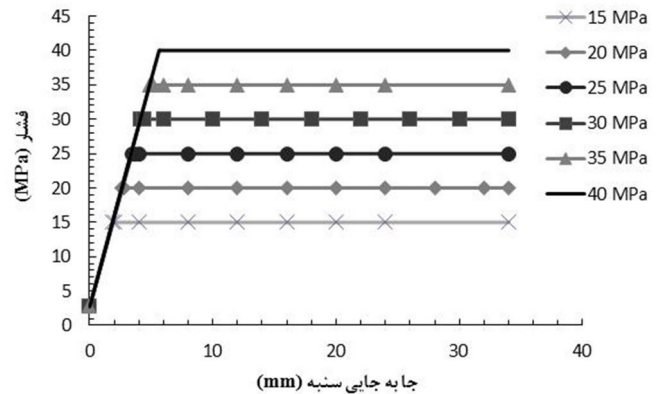
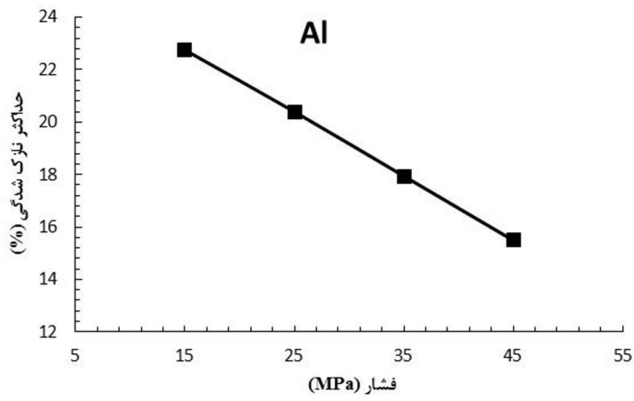


Fig. 15. Used pressure paths

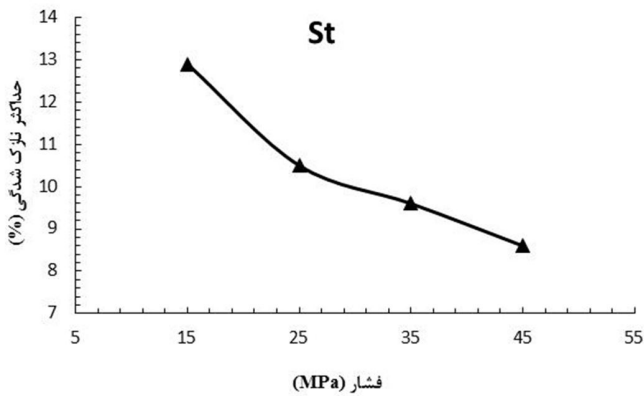
شکل ۱۵: مسیر فشارهای استفاده‌شده

ورق با سنبه و همچنین افزایش نیروی اصطکاک شده، در نتیجه از لغزش ورق جلوگیری می‌کند. نکته دیگری که از شکل‌ها می‌توان ملاحظه کرد، این است که با افزایش فشار، زیاد شدن ضخامت در ناحیه فلنج قطعه در فرآیند هیدرودینامیکی، کاهش یافته است ولی در فرآیند هیدرومکانیکی تغییر نکرده است. در فرآیند هیدرودینامیکی، ورق‌ها در فشار ۱۵ مگاپاسکال پاره شدند و نمونه شکل نگرفته است، در حالی که در فرآیند هیدرومکانیکی در همین فشار قطعه شکل گرفت. همان‌طور که گفته شد در فرآیند هیدرودینامیکی، بین





(الف)



(ب)

Fig. 19. Maximum thinning curve versus pressure for a) aluminum layer, b) steel layer

شکل ۱۹: منحنی حداکثر نازک شدگی در مقابل فشار برای (الف) لایه آلومینیومی (ب) لایه فولادی

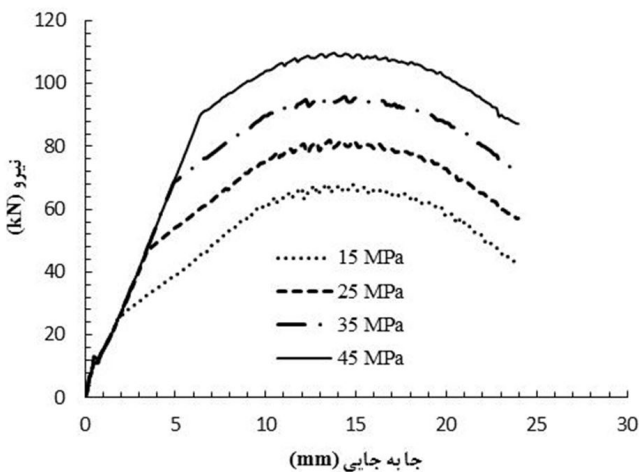
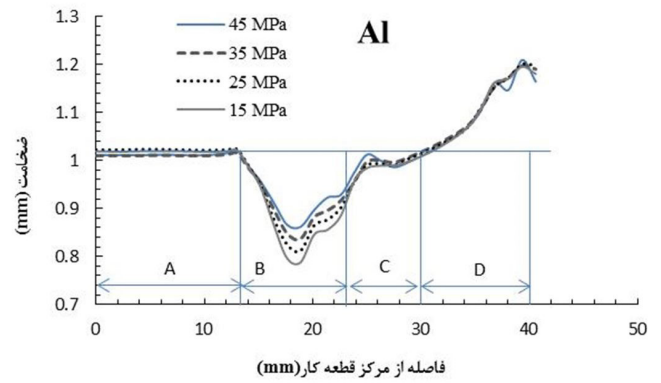


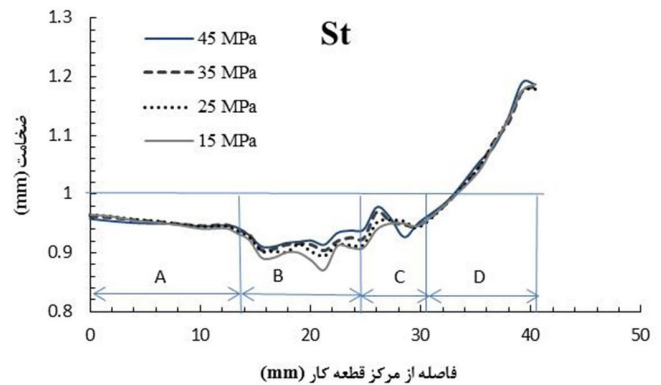
Fig. 20. Force-displacement curve in different pressures

شکل ۲۰: نمودار نیرو-جابجایی در فشارهای مختلف

سنجه (ناحیه B) در هر دو حالت تقریباً برابر است ولی در بقیه قسمت‌ها ضخامت لایه فولادی در ورق دولایه فولاد-آلومینیوم بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت که در ورق‌های دولایه هنگامی که لایه با شکل‌پذیری کمتر



(الف)



(ب)

Fig. 18. Thickness distribution curve in different pressures in hydro-mechanic deep drawing process of two-layer aluminum-steel sheet (a) aluminum layer, b) steel layer

شکل ۱۸: نمودار توزیع ضخامت در فشارهای مختلف در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق دولایه آلومینیوم-فولاد (الف) لایه آلومینیومی (ب) لایه فولادی

در نتیجه مقدار فشار باید به گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر کاهش نازک‌شدگی، مقدار نیرو خیلی زیاد نگردد. شکل ۲۰ اثر فشار بر منحنی نیرو-جابجایی سنجه را نشان می‌دهد.

۴-۳- اثر طرز قرارگیری لایه‌ها نسبت به هم

از پارامترهای مهم در شکل‌دهی ورق‌های دولایه، طرز قرارگیری لایه‌ها می‌باشد. منظور از طرز قرارگیری لایه‌ها یعنی اینکه کدام لایه در سمت پایین و در تماس با ماتریس باشد و کدام لایه در قسمت بالای ورق دولایه و در تماس با سنجه قرار گیرد.

در شکل ۲۱ مقایسه‌ای بین توزیع ضخامت ورق دولایه فولاد-آلومینیوم که در آن ورق فولادی در تماس با سنجه است و ورق آلومینیومی در تماس با ماتریس قرار دارد با ورق دولایه آلومینیوم-فولاد که در آن لایه آلومینیوم در تماس با سنجه است انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طبق شکل ۲۱ (الف)، نازک‌شدگی در لایه آلومینیومی در ورق دولایه آلومینیوم کمتر است. در شکل ۲۱ (ب) نازک‌شدگی لایه فولادی در قسمت شعاع

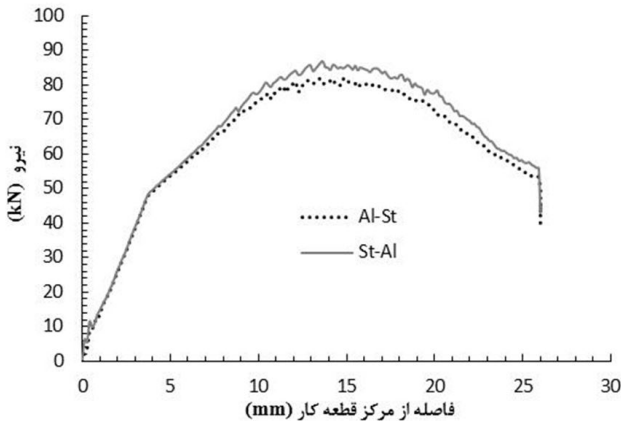


Fig. 22. Force-displacement curve for different alignments of layers  
 شکل ۲۲: نمودار نیرو-جابجایی برای حالت مختلف قرارگیری لایه‌ها

در نتیجه نیروی تغییر شکل در این حالت بیشتر می‌شود. در ورق‌های دولایه زمانی که لایه با شکل‌پذیری کمتر در تماس با سنبه باشد، هم شکل‌پذیری بهتر می‌شود و هم نیروی فرآیند کمتر خواهد بود.

#### ۴-۴- مقایسه فرآیند کشش عمیق هیدرونیامیکی و هیدرومکانیکی

در شکل ۲۳ قطعات تولیدشده با فرآیندهای کشش عمیق هیدرومکانیکی و هیدرونیامیکی و توزیع ضخامت آن‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، نازک‌شدگی بیشتر است و مقدار افزایش ضخامت در ناحیه فلنج و چروکیدگی ورق دولایه در این فرآیند کمتر است. در فرآیند کشش عمیق هیدرونیامیکی، بین ورق‌گیر و ماتریس فاصله اضافی وجود ندارد و ورق‌ها نمی‌توانند به راحتی افزایش ضخامت داشته باشند. همچنین جریان ماده سخت‌تر و کشیدگی در ورق‌ها بیشتر شده و در نتیجه نازک‌شدگی بیشتر می‌شود. در حالی که در فرآیند کشش عمیق هیدرونیامیکی، فاصله میان ورق‌گیر و ماتریس بیشتر از ضخامت ورق‌ها می‌باشد و به علاوه به دلیل وجود فشار شعاعی که به لبه ورق دولایه وارد می‌شود، ورق راحت‌تر به سمت داخل جریان پیدا می‌کند؛ بنابراین، در این فرآیند، توزیع ضخامت بهتر شده و نازک‌شدگی کمتری رخ می‌دهد.

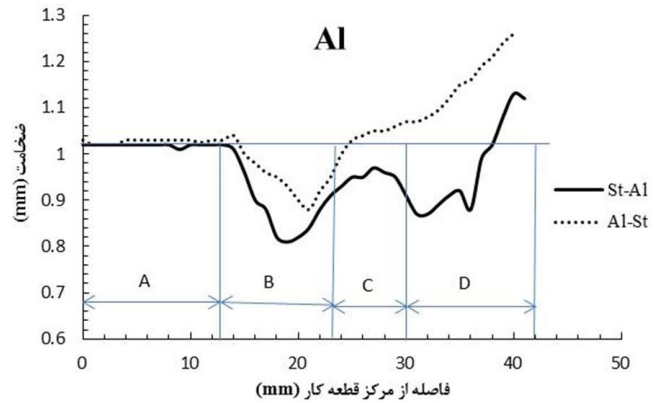
برای مقایسه بین دو فرآیند، حداکثر نسبت کشش در دو فرآیند به دست آمده است. در شکل ۲۴ حداکثر نسبت کشش به دست آمده در فرآیندهای کشش عمیق هیدرونیامیکی و هیدرومکانیکی برای ورق دولایه آلومینیوم- فولاد در دو حالت مختلف و ورق‌های تک لایه آلومینیوم و فولاد در فشار ۲۵۰ بار نشان داده شده است.

نسبت کشش از تقسیم قطر اولیه ورق به قطر نهایی آن طبق رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

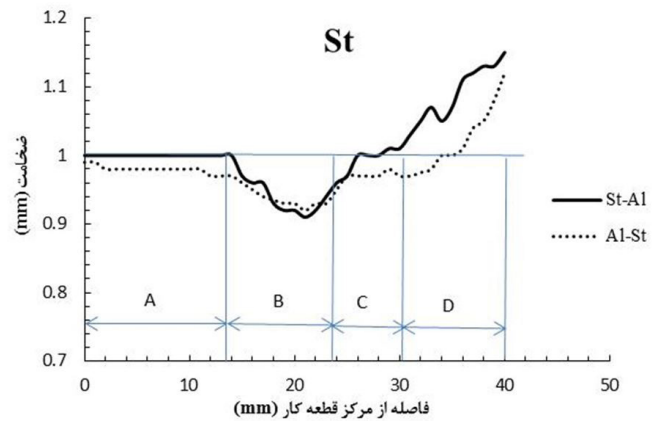
$$DR = \frac{d_0}{d_1} \quad (16)$$

که در آن،  $d_0$  قطر اولیه ورق و  $d_1$  قطر نهایی ورق است.

(لایه آلومینیوم در ورق دولایه آلومینیوم- فولاد) در تماس با سنبه باشد، شکل‌پذیری بهتر و نازک‌شدگی کمتر است و برای ورق با شکل‌پذیری بیشتر تفاوت چندانی در حالت‌های مختلف وجود ندارد. بیشترین نازک‌شدگی در ورق دولایه، در لایه با شکل‌پذیری کمتر رخ می‌دهد. از طرفی ورق‌هایی که در تماس با سنبه باشد، شکل‌پذیری اش بهتر می‌شود؛ بنابراین، هنگامی که لایه با شکل‌پذیری کمتر در تماس با سنبه باشد تأثیر بیشتری نسبت به حالتی دارد که لایه شکل‌پذیرتر در تماس با سنبه است.



(الف)



(ب)

Fig. 21. Thickness distribution curve of a) aluminum layer, b) steel layer, in two different alignments of layers

شکل ۲۱: منحنی توزیع ضخامت (الف) لایه آلومینیومی (ب) لایه فولادی، در دو حالت مختلف قرارگیری لایه‌ها

در شکل ۲۴ منحنی نیرو-جابجایی ورق برای دو حالت لایه‌بندی در شرایط یکسان نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که وقتی لایه کم‌شکل‌پذیرتر (لایه آلومینیومی) در تماس با سنبه باشد، نیروی شکل‌دهی در حد کمی کاهش می‌یابد. هنگامی که لایه سخت‌تر در تماس با سنبه و ورق‌گیر باشد نسبت به حالتی که در تماس با ماتریس است به دلیل سطح تماس و ضریب اصطکاک بالاتر با مجموعه قالب، بیشتر در معرض نیروهای مقاوم اصطکاکی قرار گرفته و کرنش سختی بیشتری در آن اتفاق می‌افتد.

شکل‌پذیری کمتر با سنبه و بهبود شکل‌پذیری آن، بیشتر است. همچنین نسبت کشش ورق دولایه آلومینیوم- فولاد از ورق تک لایه آلومینیوم بیشتر و از ورق تک لایه فولاد کمتر است. جمع شدن ورق‌های تک لایه در ورق دولایه و ترکیب شدن خواص آن‌ها سبب می‌شود شکل‌پذیری ورق با شکل‌پذیری کم به طبیعت از ورق شکل‌پذیرتر افزایش یابد. بنابراین با ترکیب ورق با شکل‌پذیری کمتر با ورق شکل‌پذیرتر می‌توان شکل‌پذیری آن را بهبود بخشید و به تغییر شکل‌های بیشتر دست پیدا کرد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌پذیری ورق‌های دولایه فلزی آلومینیوم- فولاد در فرآیندهای کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. بعد از بررسی پارامترهایی چون فاصله بین قالب و ورق گیر، فشار سیال و نحوه لایه‌بندی ورق‌ها، مقایسه‌ای بین فرآیندهای کشش عمیق هیدرومکانیکی و هیدرومکانیکی صورت گرفت.

در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی با کاهش فاصله بین ورق گیر و ماتریس به دلیل افزایش ضخامت ورق در حین فرآیند و سخت‌تر شدن جریان ماده، مقدار بیشینه نازک‌شدگی در ناحیه شعاع سنبه افزایش می‌یابد و افزایش ضخامت در ناحیه فلنج و قسمت بالایی دیواره تا حدودی کاهش می‌یابد. در هر دو فرآیند با افزایش فشار سیال، نازک‌شدگی به دلیل تماس بیشتر لایه بالایی با سنبه و افزایش اصطکاک با آن کاهش می‌یابد که مقدار این کاهش در نازک‌شدگی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به دلیل وجود فشار شعاعی نسبت به فرآیند هیدرومکانیکی بیشتر است. به‌طور کلی، در ورق‌های دولایه می‌توان توصیه نمود که در صورت امکان لایه با شکل‌پذیری کمتر در تماس با سنبه باشد تا هم از پارگی آن به دلیل تماس بیشتر با سنبه جلوگیری شود و هم نیروی فرآیند کاهش یابد. با مقایسه بین فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی مشاهده شد که در فرآیند هیدرومکانیکی به دلیل فاصله بین ورق گیر و ماتریس و همچنین فشار شعاعی، نازک‌شدگی کمتر ولی افزایش ضخامت و چروکیدگی بیشتر است و در این فرآیند می‌توان به نسبت کشش بیشتر دست یافت.

### منابع

- [1] A. Jalali Aghchai, M. Shakeri, B. Mollaei-Dariani, Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12), *Engineering Manufacture*, 222 (2008) 1131-1138.
- [2] J.-K. Kim, T.-X. Yu, Forming and failure behaviour of coated, laminated and sandwiched sheet metals: a review, *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1-3) (1997) 33-42.
- [3] S.H. Zhang, Developments in hydroforming, *Journal of*

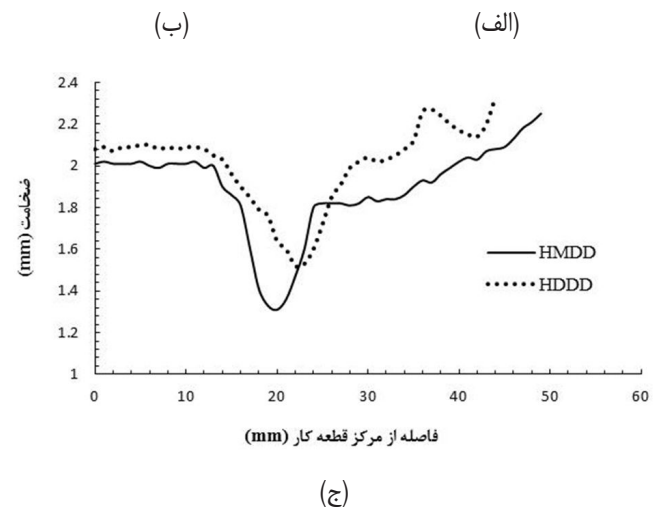


Fig. 23. Al-St two-layer sheet a) HDDD process, b) HMDD process, c) thickness distribution of two parts

شکل ۲۳: ورق دولایه آلومینیوم- فولاد (الف) فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی (ب) فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی (ج) نمودار توزیع ضخامت دو قطعه

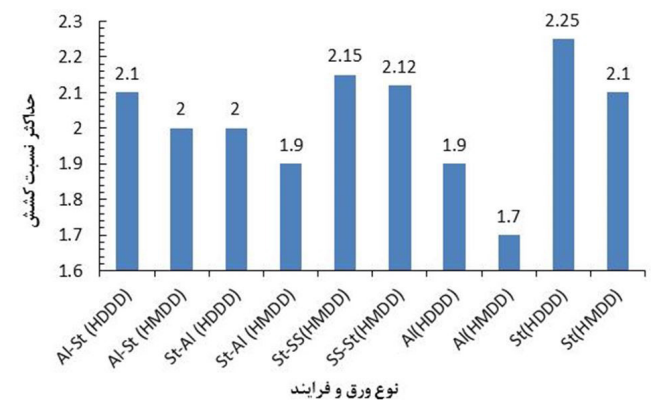


Fig. 24. Drawing ratio in different processes and sheets

شکل ۲۴: نسبت کشش در فرآیندها و ورق‌های متفاوت

طبق شکل ۲۴، نسبت کشش فرآیند هیدرومکانیکی نسبت به فرآیند هیدرومکانیکی به دلیل وجود فشار شعاعی و فاصله بین ورق گیر و ماتریس که سبب جریان راحت‌تر ماده شده، بیشتر است. به علاوه، هنگامی که لایه آلومینیوم در تماس با سنبه است، در هر دو فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی و هیدرومکانیکی، نسبت کشش به دلیل تماس لایه با

- Technology*, 212(9) (2012) 1840-1849.
- [11] S. Bagherzadeh, M.J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, 18(0) (2015) 131-140.
- [12] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, *Mechanics of sheet metal forming*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- [13] Abaqus analysis user's manual in, 2010.
- [14] A. Fazli, B. Dariani, Theoretical and experimental analysis of the axisymmetric hydromechanical deep drawing process, *Proc Inst Mech Eng B: J Eng Manuf*, 220 (2006) 1429-1437.
- [15] F. Rahmani, S.J. Hashemi, H. Moslemi Naeini, H. Deylami Azodi, Numerical and Experimental Study of the Efficient Parameters on Hydromechanical Deep Drawing of Square Parts, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(2) (2012) 338-334.
- [16] L. Xiaojing, X. Yongchao, Y. Shijian, Effects of Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation, *material science and technology*, 24 (2008) 5.
- [17] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1) (2004) 137-143.
- [18] S.B. Levy, *A comparison of empirical forming limit curves for low carbon steel with theoretical forming limit curves of Ramaekers and Bongaerts*, in: IDDRG WG3, Ungarn, 1996.
- Materials Processing Technology*, 91(1-3) (1999) 236-244.
- [4] S.H. Zhang, J. Danckert, Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3) (1998) 14-25.
- [5] L. Lang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(5) (2004) 495-502.
- [6] H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto, N. Hatta, Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheets using ductile fracture criterion, *Journal of Materials Processing Technology*, 60(1-4) (1996) 291-296.
- [7] M.R. Morovvati, B. Mollaei-Dariani, M.H. Asadian-Ardakani, A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(13) (2010) 1738-1747.
- [8] L. Lang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle, *Journal of Materials Processing Technology*, 170(3) (2005) 524-535.
- [9] H.-C. Tseng, J.-C. Hung, C. Hung, M.-F. Lee, Experimental and numerical analysis of titanium/aluminum clad metal sheets in sheet hydroforming, *Int J Adv Manuf Technol*, 54(1-4) (2011) 93-111.
- [10] S. Bagherzadeh, B. Mollaei-Dariani, K. Malekzadeh, Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations, *Journal of Materials Processing*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. E. Seyyedi, H. Gorji, M. Bakhshi, G. M. Alinejad, Numerical and Experimental Investigation of Effective Parameters on Formability of Al-St Two-Layer Sheet Metals, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 517-528.

DOI: 10.22060/mej.2016.775

