

بررسی تاثیر نسبت کشش بر نمودار حد پارگی در فرآیند هیدروفرمینگ

محمد امین بهاری^۱، روزبه علیپور^۲
M.A.Bahari@Gmail.Com

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۶/۱۰

دریافت مقاله: ۸۹/۰۳/۲۴

چکیده

فرآیند هیدرو فرمینگ یکی از مؤثرترین روش‌های تولید، جهت افزایش حد کشش در شکل دادن ورق‌های فلزی می‌باشد. چرا که در فرآیند هیدروفرمینگ، شکل‌دهی توسط سنبه‌ای انجام می‌شود که قطعه را در جهت متقابل، با فشار کنترل شده سیال به جلو می‌برد. در این مقاله فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ برای سنبه‌های سر کروی مورد بررسی قرار گرفته است. مسیرهای مختلف فشار در نرم‌افزار ABAQUS 6.7 تست شده، تا محدوده فشار کاری، به صورت شبیه‌سازی شده بدست آید. در نهایت اثر نسبت کشش، بر روی فشار محدوده کاری بررسی گردید. همچنین جهت بررسی دقت شبیه‌سازی، نتایج بدست آمده با تعدادی تست تجربی مقایسه شده‌اند. بررسی‌های انجام شده، بیانگر این است که با افزایش نسبت کشش، منحنی پارگی به شدت افت می‌کند و مساحت ناحیه مجاز کاهش می‌یابد، با افزایش زمان وسعت نواحی مجاز افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت کشش مسافت ناحیه مجاز کاهش می‌یابد.

کلیدواژه:

هیدروفرمینگ - کشش عمیق با سنبه‌های سر کروی - تحلیل اجزای محدود

۱- استاد مدعو و محقق ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر ALIPOUR1981@YAHOO.COM

۱- مقدمه

هیدروفرمینگ ورق، فرآیندی است؛ که در آن از سیال، برای بهینه سازی فرآیند کشش عمیق سنتی استفاده می‌شود. به گونه‌ای که می‌توان آن را یکی از روش‌های نوین کشش عمیق در نظر گرفت. توسعه این فرآیند به قبل از جنگ جهانی دوم توسعه برمی‌گردد. در دهه ۸۰ میلادی از این تکنولوژی برای تولید پنل‌های اتومبیل و قطعات بکار رفته در پوسته‌های هواپیما استفاده می‌شد [۱]. همانگونه که ذکر شد یکی از فرآیندهای شکل‌دهی که از نظر محصولات تولیدی، شبیه فرآیند هیدروفرمینگ می‌باشد کشش عمیق است. تفاوت فرآیند هیدروفرمینگ و کشش عمیق در این است که در هیدروفرمینگ قطعه درحالی‌که در پشت آن فشار هیدرواستاتیک و قابل کنترل سیال وجود دارد، تحت عمل کشش قرار می‌گیرد.

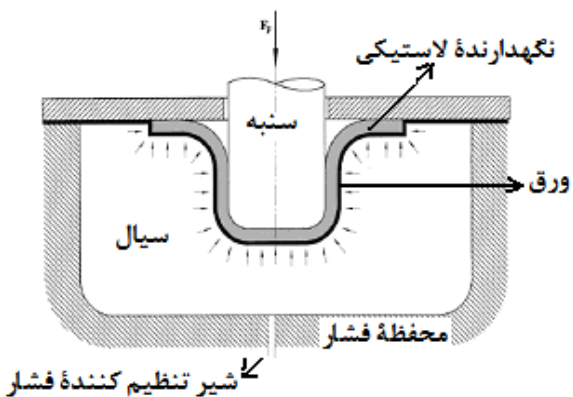
البته فرآیند هیدروفرمینگ در مقایسه با روش مرسوم کشش عمیق دارای مزایا و معایبی می‌باشد. عیب عمده این روش آن است که در هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی محصول مشابه، نیروی بیشتری نسبت به کشش عمیق نیاز است. از ساختار این عملیات به راحتی می‌توان متوجه شد که در این عملیات نیروی مقاوم فشار سیال که در جهت مخالف نیروی سنبه می‌باشد باعث افزایش نیروی مورد نیاز عملیات می‌شود. این نیرو را می‌توان معادل حاصل ضرب فشار سیال در سطح مقطع سنبه دانست. عیب دیگر این روش را می‌توان زمان زیاد عملیات دانست. در این فرآیند زمان بارگذاری و باربرداری عملیات زیاد می‌باشد و باید این امر را در تولیدات انبوه مد نظر داشت.

در مقابل معایب یاد شده نباید از مزایای بی نظیر این روش غافل شد. عمده این مزایا به شرح زیر می‌باشند:

در این فرآیند به علت فشار سیال پشت قطعه نیازی، به ورق‌گیر و ماتریس نمی‌باشد که این امر خود تاحدودی منجر به کاهش هزینه‌های ساخت می‌گردد. همچنین فشار سیال باعث می‌شود که قطعه به سنبه بچسبند. لذا از میزان منطقه تحت اثر اصطکاک و در نتیجه عوارض آن تا حد زیادی کاسته می‌شود. در این روش با کنترل صحیح فشار سیال در حین حرکت سنبه می‌توان به نسبت‌های بالای کشش دست پیدا کرد [۲]، که مطلب یاد شده اخیر اساس کار پژوهش حاضر می‌باشد.

در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی وابسته به کشش عمیق هیدروفرمینگ ورق پیشنهاد شده است، که از آن جمله می‌توان به کشش عمیق توسط محلول آب، کشش عمیق هیدرودینامیک، هیدروفرم، کشش عمیق به وسیله فشار هیدرولیک معکوس کمک

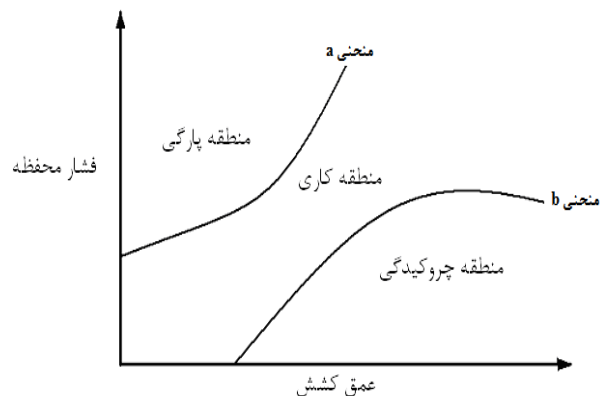
کننده، هیدروفرمینگ با قالب متحرک و ... اشاره کرد. شکل (۱)، شماتیک یک سیستم کشش عمیق هیدروفرمینگ را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شماتیک سیستم کشش عمیق هیدروفرمینگ

همانطور که از شکل (۱) پیداست؛ محفظه فشار در این حالت جایگزین ماتریس شده است. نگه دارنده، جایگزین ورق‌گیر در فرآیند سنتی کشش عمیق شده و برای نگه داشتن ورق در برابر فشار سیال در محفظه فشار می‌باشد. سنبه مانند روش سنتی عمل می‌کند و هم محور با نگه دارنده به محفظه وارد می‌شود. یک دیافراگم لاستیکی بین سیال و ورق در ورودی محفظه فشار، کار آب بندی را انجام می‌دهد. برای آغاز فرآیند محفظه تحت فشار باید پر از روغن گردد. سپس دیافراگم لاستیکی در ورودی محفظه، روی سطح روغن قرار داده می‌شود. در حالی که سطح دیافراگم به روغن آغشته شده، ورق فلزی روی آن گذاشته می‌شود. نگه دارنده روی مجموعه قرار می‌گیرد. سنبه نیز از درون سوراخ نگه دارنده و هم محور با آن عبور می‌کند. سر سنبه مطابق با فرم دلخواه محصول قابل تعویض است. درحالی‌که سنبه توسط رم پرس و مماس با ورق نگه داشته شده، یک فشار اولیه توسط شیر تنظیم‌کننده فشار اولیه به روغن در محفظه فشار وارد می‌گردد. در این مرحله سنبه با نیروی پرس، ورق را به محفظه فشار می‌راند که این کار باعث شکل‌دهی آن توسط فشار روغن می‌شود. همچنین با پایین آمدن سنبه، روغن اضافی به شیر تنظیم‌کننده فشار رانده می‌شود که این کار باعث افزایش تدریجی فشار محفظه می‌شود. هنگامی که فشار به اندازه تنظیم شده رسید، روغن اضافی از شیر تخلیه شده و فشار به صفر می‌رسد. در طول فرآیند، فشار روغن و نیروی پرس اندازه گیری می‌شوند. در این مکانیزم، تنش کششی شعاعی، بلنک را به درون محفظه فشار جریان می‌دهد و تنش فشاری نرمال توسط نگه دارنده اعمال می‌گردد [۳].

قطر سنبه ۳۵ و ۲۵ میلیمتر مورد آزمایش قرار داد و در نهایت محدوده مجاز برای فشار اولیه محفظه، رابطه بین نسبت کشش و فشار ماکزیمم و توزیع تغییرات ضخامت در محصول نهایی را بدست آورد [۴].



شکل (۲): محدوده فشار کاری در فرآیند هیدروفرمینگ

آقای سی - وی^۳ و همکارانش تاثیر پارامترهایی چون ضریب اصطکاک، توان کار سختی و ضریب ناهمسانگردی را بر نمودارهای حد بالایی و پایینی فشار برای فنجان‌های سر کروی در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ به صورت تحلیلی بررسی کردند. آنها با استفاده از روش انرژی فرمول‌هایی را برای بدست آوردن محدوده کاری ارائه کردند [۵].

در تحقیق حاضر، اثر نسبت کشش، بر روی فشار محدوده کاری به کمک روش اجزاء محدود بررسی شده و نتایج این بررسی با نتایج مستخرج از آزمایشات تجربی [۴] مورد مقایسه قرار گرفته است.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

جهت مدل‌سازی فرآیند از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS 6.7 استفاده شده که با در اختیار داشتن متدولوژی حلی چون DynamicExplicit، توانایی خوبی در مدل‌سازی مسائل مربوط به فرآیندهای شکل دادن فلزات دارد. با توجه به شکل (۱)، مسئله دارای تقارن هندسی کامل بوده و لذا تنها یک چهارم سیستم قالب و ورق به صورت پوسته‌ای مدل شده است. به علت کاهش حجم مسئله در مدل‌سازی متقارن، علاوه بر کوتاه شدن زمان حل، از انتشار خطای عددی نیز کاسته می‌شود. مدل انتخاب شده برای ورق، از نوع تغییر فرم‌پذیر، و برای قطعات قالب از نوع صلب گسسته است. برای ترسیم قطعات در واحد قطعه، تنها یک مقطع از قطعه رسم

در فرآیند هیدروفرمینگ، که در این مقاله به بررسی آن پرداخته شده است، شکل‌دهی توسط سنبه‌ای انجام می‌شود که قطعه را در جهت متقابل با فشار کنترل شده سیال به جلو می‌برد. با حرکت سنبه به جلو، کم‌کم قطعه در اثر فشار سیال تغییر شکل یافته و شکل سنبه را به خود می‌گیرد. در سنبه‌های نیم کروی ابتدا قطعه به شکل نیم کره در می‌آید و سرانجام در انتهای عملیات محصول تولیدی به شکل یک ظرف استوانه‌ای با ته نیم کروی در می‌آید.

در کشش عمیق هیدروفرمینگ از یک غشاء لاستیکی بین ورق و سیال برای آب‌بندی استفاده می‌شود. مزیت این روش این است، که غشاء لاستیکی نقش ورق‌گیر را ایفا می‌کند. لذا از تماس مستقیم فلز با فلز و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک جلوگیری می‌کند. مزیت دیگر آن اعمال فشار جانبی بر لبه ورق از طرف سیال است، که نسبت کشش را افزایش می‌دهد. استفاده از غشاء لاستیکی نیز مشکلاتی به همراه دارد، به عنوان نمونه چون در طول فرآیند شکل‌دهی تغییر شکل زیادی در غشاء رخ می‌دهد، عمر کاری آن نسبتاً کوتاه است، و پس از مدتی باید آن را تعویض کرد [۴].

۲- اثر فشار بر فرآیند هیدروفرمینگ

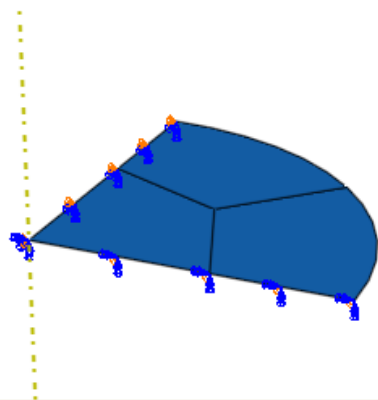
مهمترین پارامتر این فرآیند، فشار درون محفظه است، که باید به درستی محاسبه و اعمال شود. فشار بیش از حد ورق را پاره می‌کند، و فشار کم باعث چروکیدگی ورق می‌شود. این فشار باعث می‌شود، که اصطکاک بین سنبه و ورق زیاد شود. در نتیجه حدکشش بهتری نسبت به کشش عمیق معمولی بدست می‌آید. در شکل (۲)، منحنی a، مرزی را نشان می‌دهد که در زیر آن پارگی ورق رخ نمی‌دهد، و منحنی b نشان دهنده مرزی است که پدیده چروکیدگی در بالای آن اتفاق نمی‌افتد. در منطقه بین این دو منحنی که به منطقه کاری معروف است، فرآیند شکل‌دهی ورق با موفقیت انجام می‌شود. در واقع برای کنترل صحیح فشار سیال برای جلوگیری از پارگی و چین خوردگی ورق باید فشار سیال در ناحیه بین دو منحنی پارگی و چین‌خوردگی که همان ناحیه کاری است، انتخاب شود. [۵].

آقای تیرواربود چلووان^۱ و همکارانش پارامترهای موثر در این فرآیند را برای شکل‌دهی ورق‌هایی از جنس مس در قطرهای و ضخامت‌های مختلف به کمک فشار محفظه ثابت به صورت تحلیلی و تجربی بررسی کردند [۲].

پس از آن آقای انور کندیل^۲ گرده‌هایی از جنس مس و آلومینیم در قطرهای مختلف بین ۵۰ تا ۸۰ میلیمتر با ضخامت‌های ۱/۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر را توسط کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار متغیر و

مقاله شامل تماس مستقیم ورق با ورق گیراست. طبق مراجع [۹]، مدل اصطکاکی کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. برای تعریف تماس ها از تماس سطح به سطح بین قسمت‌های مماس، استفاده شده است.

همانند هر مسئله دیگری که به روش اجزاء محدود تحلیل می‌شود، شروط مرزی در این مسئله نیز از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. شرایط مرزی و بارهای بکار رفته در مسئله، در واحد بارگذاری تعریف می‌شوند. شرایط مرزی استفاده شده در این مسئله، به دو دسته تقسیم می‌شوند. نوع اول قیود مربوط به تقارن هستند که به لبه‌های ورق اعمال می‌شود. نوع دوم قیود جابجایی است که برای محدود کردن حرکت قطعات اعمال می‌شود. برای ثابت کردن ورق گیر و حرکت سنبه تا عمق مورد نظر از این نوع قیود استفاده شده است. بارگذاری شامل فشار سیال است، که به صورت یک بار گسترده در زیر ورق اعمال می‌شود. شکل (۴) شرایط مرزی اعمال شده بر ورق را نشان می‌دهد.



شکل (۴): شرایط مرزی اعمال شده بر ورق

شاید مهمترین قسمت حل یک مسئله اجزاء محدود، المان‌بندی آن باشد. در حل مسائلی چون مسئله حاضر، چنانچه المان‌بندی با هندسه مناسب و با سایز بهینه انجام نشود، انتشار خطای عددی قابل ملاحظه خواهد بود. المان بکار رفته در مدل ورق، از نوع S4R که یک المان پوسته‌ای چهار گره‌ای می‌باشد. قابلیت اندازه‌گیری تغییرات ضخامت از جمله خصوصیات این المان است، که آن را برای تحلیل شکل‌دهی ورق مناسب کرده است. در مدل قطعات صلب از المان R4D3 استفاده شده است. نوع آرایش المان‌های ورق به گونه‌ای انتخاب شده است، که نسبت ابعادی تقریبی یک برای المان‌ها حفظ شود، به همین دلیل ورق به دو منطقه با المان‌بندی مختلف تقسیم شده است. شکل (۵) مدل تحلیلی گرده و اجزای قالب را با مشخصه‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین بررسی

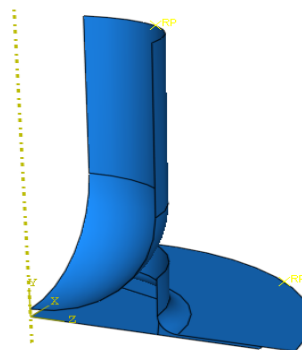
شده سپس توسط دستور دوران مقاطع، ۹۰ درجه دوران داده شده است.

جنس ورق استفاده شده در این تحلیل از نوع آلیاژ آلومینیم Al6016-T4 که خواص مکانیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است [۸].

جدول (۱): مشخصات مکانیکی ورق Al6016-T4

ν	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$E(GPa)$	$S_y(MPa)$	$k(MPa)$	n
۰/۳۳	۲۷۰۰	۷۰/۴۲	۱۲۵	۴۵۰	۰/۲۴

پس از انجام مدل‌سازی هندسی تک تک اجزاء و اعمال خواص مکانیکی به آنها، نوبت به مونتاژ آن‌ها می‌رسد. در واحد مونتاژ، قطعات مربوطه فراخوانی و در محل مناسب نسبت به سایر قطعات مستقر می‌شوند شکل (۳) مدل مونتاژ شده و آماده تحلیل را نشان می‌دهد.

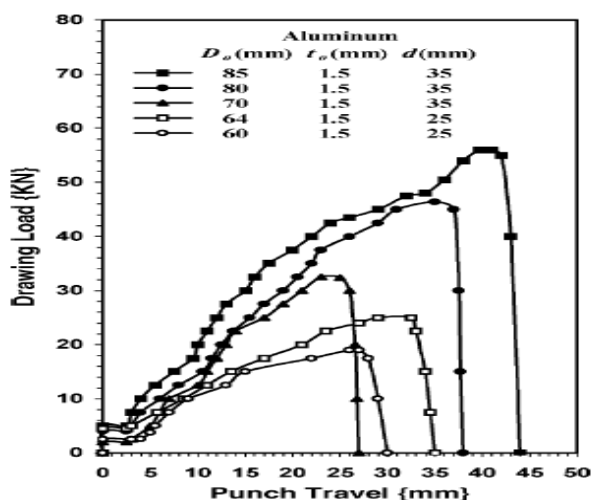


شکل (۳): استقرار قطعات در محل مناسب

پس از انجام مراحل یاد شده فوق، نوبت به تعریف مراحل شکل‌دهی می‌رسد. انجام فرآیند، در یک مرحله و با زمان ۰/۰۵ ثانیه تعریف شده است. در تحلیل فرآیندهایی که در آنها میزان تغییر شکل المان نسبت به اندازه المان زیاد است، دقت تحلیل DynamicExplicit بهتر است. به همین دلیل در این مقاله از این تکنیک استفاده شده است.

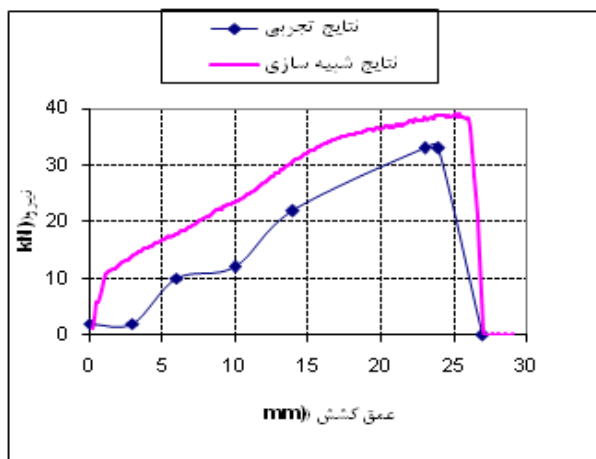
تعیین خصوصیات تماس بین سطوح، در فرآیندهایی که با تماس، تقابل جامد و سیال، اصطکاک، برخورد و فشار زیاد سر و کار دارند، تاثیر انکارناپذیری بر دقت حل مسئله دارد. بنابراین این قسمت از مدل‌سازی با دقت خاصی انجام شده است. جهت تعیین خصوصیات یاد شده، در واحد برخورد، ابتدا مشخصات فیزیکی تماس و سپس نوع تماس‌ها تعریف شده است. مشخصات تماس بکار رفته در این

شبیه‌سازی، ابتدا فشار سیال را مطابق شکل (۶) برای نسبت کشش ۲ در شبیه‌سازی اعمال شده، و در نهایت نمودار تغییرات نیروی حاصل از شبیه‌سازی با نمودار نیروی شکل (۷) مقایسه شده است.



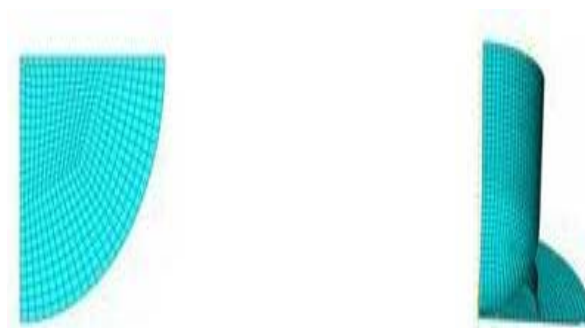
شکل (۷): نیروی شکل‌دهی

در شکل (۸) نمودار نیروی شکل‌دهی حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای نسبت کشش ۲ مقایسه شده است. همانگونه که از نمودار شکل (۸) مشخص است، شیب تغییرات نیرو نسبت به عمق کشش در هر دو روش عددی و تجربی از تغییرات نسبتاً یکسانی برخوردار است که این امر می‌تواند بیانگر صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی باشد، و از دلایل اختلاف بین دو منحنی می‌توان به اصطکاک اشاره کرد که در حالت شبیه‌سازی شده در نظر گرفته نشده است.



شکل (۸): مقایسه نیروی شکل‌دهی نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای نسبت کشش ۲

استقلال از شبکه، به‌منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد المان‌ها، در انتهای فرآیند مش‌بندی مورد بررسی قرار گرفته است.

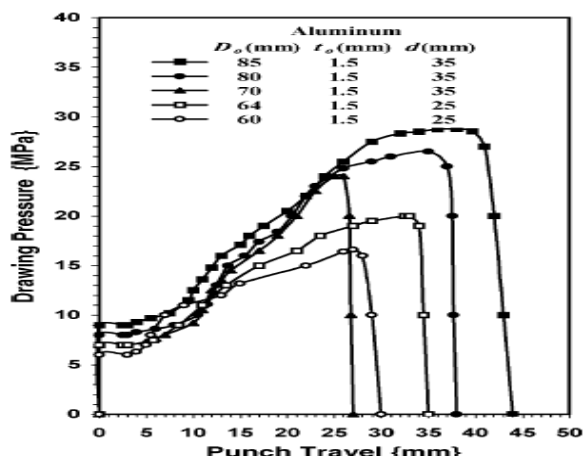


شکل (۵): مدل مش‌بندی شده

پس از پایان مدل‌سازی و در مرحله نهایی نوبت به تحلیل فرآیند می‌رسد. پس از تکمیل حل، نتایج مستخرج از شبیه‌سازی بررسی و با آزمایشات تجربی مقایسه شده‌اند.

۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی

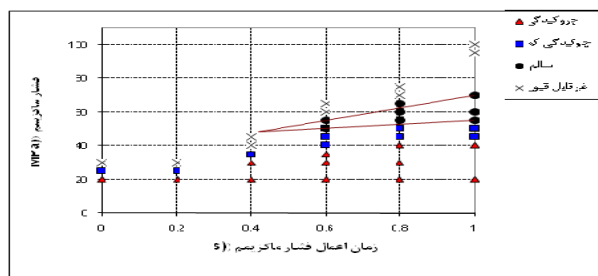
برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌های انجام شده توسط آقای کندیل شبیه‌سازی شده، سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. آقای کندیل فنجان‌هایی از جنس آلومینیم به کمک فرآیند کشش عمیق هیدرو فرمینگ شکل داد.



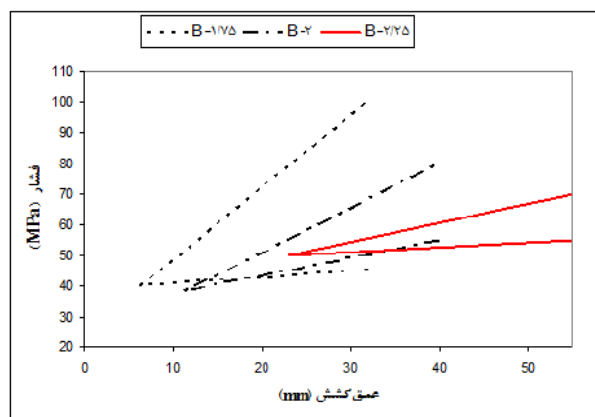
شکل (۶): نمودار فشار محفظه

در شکل (۶) نمودار میزان فشار محفظه و نیروی شکل‌دهی برای فنجان‌های از جنس آلومینیم با نسبت کشش‌های مختلف استفاده شده در این آزمایش‌ها نشان داده شده است. برای تست دقت

خارج نشود، قطعه تولید شده سالم است. همان طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش زمان وسعت این نواحی افزایش می‌یابد. برای بررسی اثر نسبت کشش، در شکل (۱۱) هر سه ناحیه نسبت به عمق کشش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت کشش مساحت ناحیه مجاز کاهش می‌یابد. یعنی هرچه نسبت کشش بیشتر باشد باید فشار دقیقتر محاسبه شود.



شکل (۱۱): محدوده مجاز برای نسبت کشش ۲/۲۵



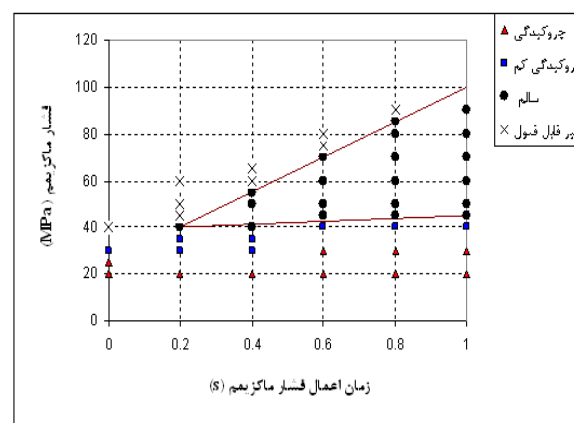
شکل (۱۲): مقایسه محدوده مجاز برای نسبت کشش‌های مختلف

۶- نتیجه‌گیری

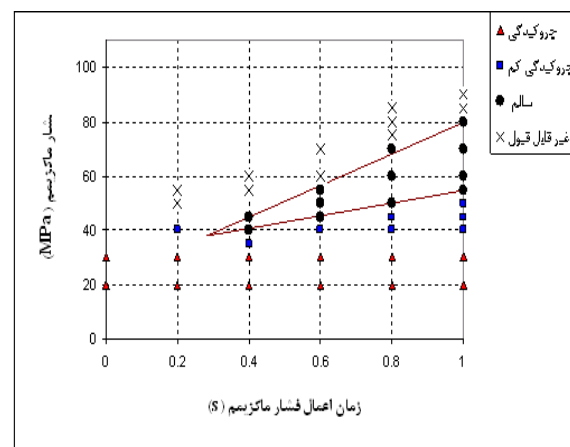
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت کشش، مساحت ناحیه مجاز کاهش می‌یابد و مرز بالایی نسبت به مرز پایینی تغییرات بیشتری دارد. به عبارت دیگر تاثیر نسبت کشش بر کاهش ضخامت و یا پارگی قطعه، بیشتر از چروکیدگی است. مرز پایینی که همان مرز چروکیدگی است تغییر چندانی نمی‌کند. از آنجایی که با افزایش زمان، وسعت ناحیه کاری افزایش پیدا می‌کند، لذا می‌توان استنباط کرد که با کاهش نرخ کرنش، می‌توان فرآیند را به صورت کنترل شده تری، انجام داد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، گویای قابل اعتماد بودن روش استفاده شده در این مقاله، جهت مدل‌سازی محدوده‌های کاری حاضر است. بررسی‌های نشان داده شده بیانگر این است که با افزایش نسبت کشش، منحنی

۵- نتایج و بحث

مسیرهای مختلف فشار در نرم‌افزار ABAQUS 6.7 تست شد تا محدوده فشار کاری به صورت شبیه‌سازی شده به دست آمد. نتایج به صورت نقاط با اشکال مختلف نشان داده شده است. نقاط دایره‌ای شکل، نقاطی هستند که قطعه سالم تولید شده است. نقاط غیرقابل قبول نشان دهنده محدوده تولید قطعاتی هستند که در آنها قطعه بیش از حد مجاز دچار کرنش شده و یا به عبارت بهتر بیش از حد نازک شده است. این محدوده، در واقع محلی است که احتمال پارگی قطعه در آن فوق العاده بالاست. شکل ۸، ۹ و ۱۰ محدوده مجاز را به ترتیب برای نسبت‌های کشش ۱/۷۵، ۲ و ۲/۲۵ را نشان می‌دهد.



شکل (۹): محدوده مجاز برای نسبت کشش ۱/۷۵



شکل (۱۰): محدوده مجاز برای نسبت کشش ۲

خطوط پیوسته مرز نواحی مجاز، که در آنها قطعه سالم تولید می‌شود، را نشان می‌دهد. ناحیه مجاز منطقه‌ای است، که اگر مسیر فشار از ضلع پایینی وارد این نواحی شود، و تا انتهای فرآیند از آن

- [2] Thiruvarduchelvan, S., Travis, F. W., "Hydraulic-Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes an Appraisal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, 2003, pp. 70-75.
- [3] Noh, T. S., Yang, D. Y., "A General Formulation for Hydroforming of Arbitrarily Shaped Boxes and Its Application to Hydroforming of an Elliptic-Circular Box", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, 1998, pp. 481-488.
- [4] Kandil, A., "An Experimental Study of Hydroforming Deep Draws", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 134, 2003, pp. 70-80.
- [5] Wei, L. S., Chi, H. T., Wilson, W. R. D., "An Analysis of the Hemispherical-Punch Hydroforming Processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, 1996, pp. 225-239.
- [6] Lang, L., Danckert, J., "Investigation into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure Experimental Observations of the Forming Process of Aluminum Alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 148, 2004, pp. 119-131.
- [7] Chi, H. T., Jiann, H. T., "Theoretical and Experimental Analysis of Failure the Hemispherical Punch Hydroforming Processes", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, 1996, pp. 434-438.

پارگی به شدت افت می کند و مساحت ناحیه مجاز کاهش می یابد، با افزایش زمان وسعت نواحی مجاز افزایش می یابد و با افزایش نسبت کشش مسافت ناحیه مجاز کاهش می یابد.

۷- ضمائ

k	ضریب کار سختی MPa
n	نمای کار سختی
E	مدول الاستیسیته، GPa
	علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
ν	نسبت پواسون
S_y	تنش سیلان MPa

۸- مراجع

- [1] Lang, H., Wang, Z. R., "Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, 2004, pp. 165-177.