

(مقاله پژوهشی)

بررسی تاثیر فشار سیال بر شکل پذیری ورق های فلزی با استفاده از روش هیدروفورمینگ ثابت و نوسانی

یحیی قلیان^۱، مجید الیاسی^۲، محمدجواد میرنیا^۳

elyasi@nit.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

امروزه به صورت کلی دو نوع روش شکل دهی در تولید بدنه و اجزای فلزی کشتی ها و شناورها استفاده می شود که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. در این مقاله با بهره گیری از روش هیدروفورمینگ با فشار نوسانی قابلیت شکل پذیری ورق های فلزی افزایش داده شده و نشان داده شده است که نسبت به روش های مرسوم، می توان ورق فولادی را با ارتفاع بیشتری شکل داد. بدین منظور، یک قالب هیدروفورمینگ ورق به گونه ای ساخته شد که در آن قطعات استوانه ای با ارتفاع مختلف شکل داده شوند. قطعه استوانه ای به عنوان یک شکل استاندارد برای شکل دهی انتخاب گردید. برای اعمال فشار روغن با حالت های مختلف، یک دستگاه ساخته شد که توانایی ایجاد مسیرهای فشار نوسانی مانند حالت های سینوسی، مثلثی، پله ای و دوزنقه ای را داشت. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از روغن با فشار ثابت ۱۸۰ bar، عمق شکل دهی نسبت به حالت بدون روغن به میزان ۵۶/۲۵ درصد افزایش می یابد. همچنین افزایش فشار روغن در زیر ورق، باعث افزایش ارتفاع پارگی می شود. در صورت استفاده از فشار نوسانی در محدوده ۱۸۰ bar الی ۲۲۰ bar با فرکانس ۲۰ Hz، ارتفاع پارگی نسبت به حالت بدون روغن و روغن با فشار ثابت ۲۲۰ بار به ترتیب بیش از ۴ برابر و ۴۷/۸۲ درصد افزایش یافته است. مشاهده شد که با افزایش فشار، انحراف از معیار ضخامت قطعات بیشتر می شود. ولی در صورت استفاده از فشار نوسانی انحراف از معیار ضخامت قطعه نسبت به فشار ثابت ۲۲۰ bar، کمتر می باشد. این در حالی است که عمق شکل دهی قطعه با فشار نوسانی تقریباً ۵۰ درصد بیشتر حالت فشار ثابت ۲۲۰ bar است.

واژگان کلیدی: هیدروفورمینگ ورق، افزایش شکل پذیری، فشار ثابت و نوسانی، واحد کنترل کننده فشار.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۴/۰۴

۱ - مقدمه

در گذشته برای شکل‌دهی بدنه کشتی‌ها از فرایند چکش کاری استفاده می‌شد. امروزه نیز کشتی‌سازان شرقی و غربی هر کدام علاقمند به استفاده از روش‌های شکل‌دهی حرارتی و شکل‌دهی با قالب پینی (شکل‌دهی مکانیکی) هستند. یکی از معیارهای ساخت کشتی‌ها، کاهش وزن آن می‌باشد. این امر زمانی تحقق می‌یابد که فرایند جوشکاری مورد استفاده در تولید کشتی‌ها و اجزای آن‌ها کاهش یابد. به‌عنوان مثال، اتصالات به کار رفته حتی‌الامکان به صورت جوشکاری تولید نشوند [۱].

از بین فرایندهای شکل‌دهی ورق، فرایند هیدروفرمینگ یکی از روش‌های غیر سنتی می‌باشد. تاریخچه فرایند هیدروفرمینگ به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد اما از سال ۱۹۸۰ استفاده از این فرایند برای تولید قطعات در صنعت آغاز شد. فرایند هیدروفرمینگ یک روش شکل‌دهی است که در آن از یک سیال تحت فشار که درون محفظه تغییر شکل قرار دارد، به عنوان محیط تغییر شکل استفاده می‌شود. فرایند هیدروفرمینگ نسبت به فرایند کشش عمیق دارای مزایایی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به کیفیت سطح بهتر، نسبت کشش بالاتر، کاهش برگشت فزنی، کاهش هزینه‌های ساخت قالب، دقت ابعادی بیشتر، انعطاف‌پذیری و سهولت انجام عملیات، سایش کمتر ابزار و قابلیت شکل‌دهی قطعات پیچیده اشاره کرد. از طرف دیگر هیدروفرمینگ دارای معایبی نیز می‌باشد که می‌توان سرعت نسبتاً پایین تولید، نیاز به پرس با ظرفیت تناژ بالاتر جهت غلبه بر فشار سیال، نیاز به قالب‌هایی با سطح پرداخت عالی و مشکلات آب‌بندی را نام برد [۲]. در حالت کلی، فرایندهای هیدروفرمینگ بر اساس هندسه نهایی قطعه و شکل اولیه ماده خام به دو دسته هیدروفرمینگ ورق و هیدروفرمینگ لوله تقسیم می‌گردد [۳]. در فرایند هیدروفرمینگ ورق، فشار سیال زیر ورق با حرکت سنبه به درون ماتریس افزایش می‌یابد. تغییرات فشار سیال بر حسب جابجایی سنبه مسیر فشار تعریف می‌گردد. مسیر فشار سیال در فرایند هیدروفرمینگ ورق، نقش به‌سزایی دارد به‌گونه‌ای که یک مسیر فشار مناسب می‌تواند از بروز عیوبی مانند پارگی و چروکیدگی در قطعه جلوگیری کند.

تحقیقات بسیاری در مورد تاثیر مسیرهای بارگذاری مختلف در فرایند هیدروفرمینگ انجام شده است. در ادامه به برخی از این مطالعات مرتبط اشاره می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات در زمینه مسیر فشار نوسانی هیدروفرمینگ ورق بسیار کم بوده است. از آنجایی که استراتژی مسیر فشار در دو فرایند هیدروفرمینگ لوله و ورق شباهت زیادی با هم دارند، لذا تحقیقات انجام شده در زمینه مسیر فشارهای نوسانی در هیدروفرمینگ لوله بررسی شده است.

موری^۱ و همکاران [۴] بهبود شکل‌پذیری با نوسان فشار داخلی در فرایند هیدروفرمینگ لوله را با استفاده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از فشار داخلی نوسانی در جلوگیری از عیوب موثر بوده و شکل‌پذیری لوله بهبود می‌یابد. ژانگ^۲ و همکاران [۵] بر روی هیدروفرمینگ لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با استفاده از بارگذاری نوسانی مطالعه کردند و تاثیر این نوع بارگذاری را روی شکل‌پذیری لوله و ازدیاد طول آن بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با این روش می‌توان شکل‌پذیری لوله‌ها را به طور قابل توجهی افزایش داد درحالی‌که توزیع ضخامت یکنواخت‌تری نیز به دست می‌آید.

لوح موسوی و همکاران [۶] مکانیزم بهبود شکل‌دهی در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های T شکل را به کمک شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با کاهش فرکانس نوسان، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد و نرخ پرشدگی کاهش می‌یابد. یانگ^۳ و همکارانش [۷] رفتار تغییر شکل لوله با دیواره نازک تحت فشار داخلی شعاعی را با بررسی ریزساختار نمونه‌های شکل داده شده، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تاثیر دامنه و فرکانس فشار هیدرولیکی نوسانی را روی دقت شکل، ضخامت دیواره و ریزساختار قطعات تولید شده بررسی کردند. اشرفی و همکاران [۸]، مدل‌های سخت‌شوندگی را در فرایند هیدروفرمینگ پالسی قطعات T شکل مسی، به کمک آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد که هیدروفرمینگ پالسی در مقایسه با هیدروفرمینگ فشار ثابت ارتفاع برآمدگی

³ Yang¹ Mori² Zhang

حالت مثلثی، سینوسی، پله‌ای و دوزنقه‌ای را داشت و از واحدهای هیدرولیکی، الکترونیکی و کامپیوتری تشکیل شده است. حداکثر فشار کاری دستگاه ۲۵۰ bar می‌باشد. تنظیم فشار کاری و کنترل آن از طریق نرم‌افزار دستگاه صورت می‌گیرد. نمودار فشار بر حسب زمان توسط نمایشگری که بر روی قاب دستگاه تعبیه شده است پردازش می‌گردد. همچنین امکان ذخیره‌سازی داده‌ها با فرمت فایل اکسل در نرم‌افزار دستگاه وجود دارد.

شکل (۳) دستگاه نوسان‌ساز فشار و واحدهای مختلف آن و شکل (۴) نیز نمودار فشارهای مختلف که دستگاه قادر به اعمال آن می‌باشد را نشان می‌دهد. به منظور انجام آزمایش، ابتدا قالب ساخته شده بر روی بستر دستگاه پرس با ظرفیت ۲۰۰ Ton نصب گردید. سپس ورق بر روی ماتریس قالب قرار داده شده و توسط ورق‌گیر بسته شد. به دلیل اینکه نیروی وارده از طرف ورق‌گیر به ورق در تمام نقاط یکسان باشد تا ورق از تمام نقاط به یک اندازه جریان یابد، از گشتاورسنج استفاده شد. مقادیر گشتاور مورد نیاز برای بستن پیچ‌های ورق‌گیر به صورت تجربی با در نظر گرفتن اینکه عیب گوشواره‌ای شدن رخ ندهد و ورق به خوبی داخل حفره ماتریس جریان پیدا کند، با انجام چند آزمایش ۳۰ N.m به دست آمد. پس از انجام موارد فوق، همزمان حفره ماتریس از روغن پر شد و سنبه به ورق مماس گردید. با شروع حرکت سنبه به سمت پایین، از مسیرهای فشار مختلف شامل مسیر فشار خطی و غیر خطی که در شکل (۴) نشان داده شده، مسیر فشار ثابت، متغیر مثلثی با سطوح فشار متفاوت به قالب اعمال گردید.

۳- نتایج و بحث

الف) تاثیر فشار روغن بر شکل‌پذیری ورق

برای بررسی تاثیر وجود فشار روغن بر روی شکل‌پذیری ورق، ابتدا آزمایش بدون استفاده از روغن و با حالت کشش عمیق ساده انجام شد. قطعه در ارتفاع ۸ mm دچار پارگی شد. تصویر مربوط به این قطعه در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که در تصویر نیز مشخص است، لبه بلانک این فرصت را پیدا نکرد تا بتواند به درون حفره ماتریس جریان یابد و عمق شکل‌دهی افزایش یابد. دلیل اصلی این موضوع نیروی اصطکاک ناشی از سطوح تماس قالب و ورق می‌باشد که اجازه جریان ماده را به ورق نمی‌دهد.

بیشتر، میانگین ضخامت کمتر و پراکندگی ضخامت بیشتری را دارد.

یانگ و همکاران [۹] بر روی اصطکاک و تاثیر آن در فرایند هیدروفرمینگ لوله نوسانی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بارگذاری نوسانی نسبت به بارگذاری غیر نوسانی، اصطکاک کاهش می‌یابد در نتیجه باعث می‌شود که ماده لوله به آسانی جریان یابد. همچنین مسیر بارگذاری نوسانی می‌تواند، شکل‌پذیری لوله‌ها را در فرایند هیدروفرمینگ بهبود بخشد. انارکی و همکاران [۱۰] بر روی تاثیر فشار نوسانی در فرایند شکل‌دهی لوله با گاز با استفاده از حرارت نوسانی به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که مسیر فشار نوسانی، شکل‌پذیری و توزیع ضخامت لوله را در فرایند شکل‌دهی با گاز گرم بهبود می‌بخشد.

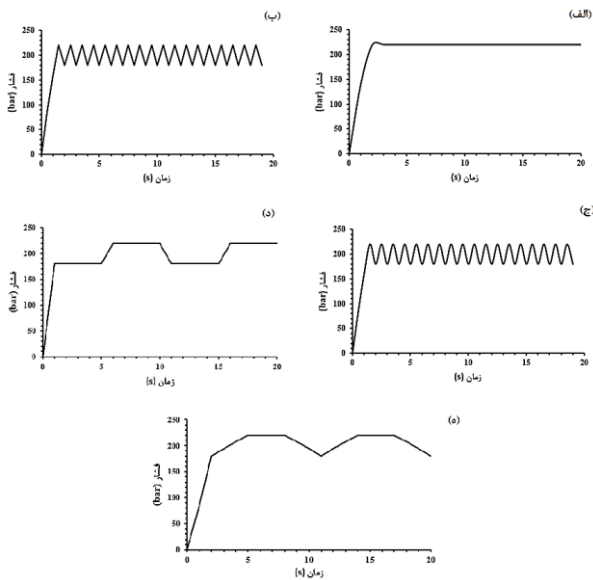
با توجه به مطالعات انجام شده و بررسی تحقیقات قبلی در زمینه فرایند هیدروفرمینگ، یکی از روش‌های موثر برای بهبود کیفیت و شکل‌پذیری قطعات تولید شده، استفاده از مسیر فشار نوسانی می‌باشد. جمع‌بندی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اکثر مسیرهای بارگذاری غیرخطی بر روی هیدروفرمینگ لوله اعمال شده است و تاثیر آن بر هیدروفرمینگ ورق بررسی نشده است. بنابراین در این مقاله، تاثیر مسیر فشارهای مختلف خطی و نوسانی بر روی شکل‌پذیری و توزیع ضخامت در فرایند هیدروفرمینگ ورق بررسی شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی و انجام آزمون‌های تجربی

قسمت‌های مختلف قالب به کار رفته در این پژوهش و همچنین محل قرارگیری قالب در سیستم شکل‌دهی ورق، در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. این قالب به گونه‌ای طراحی و ساخته شده تا امکان انجام آزمایش‌های مختلف به منظور دستیابی به عمق بیشتر را فراهم کند. جنس قالب از فولاد St37 انتخاب شد و برای آب‌بندی آن از ارینگ ۵ mm استفاده گردید. ورق استفاده شده در این تحقیق St14 به ضخامت ۰/۵ mm بود و قطر بلانک اولیه ۷۸ mm انتخاب شد. هندسه قطعه مورد بررسی یک استوانه به قطر داخلی ۳۰ mm در نظر گرفته شد و هدف شکل‌دهی، افزایش عمق کشش این استوانه در مسیرهای فشار متفاوت بود. دستگاه نوسان‌ساز هیدرولیکی ساخته شده در این پژوهش، توانایی اعمال فشارهای خطی و غیرخطی مانند



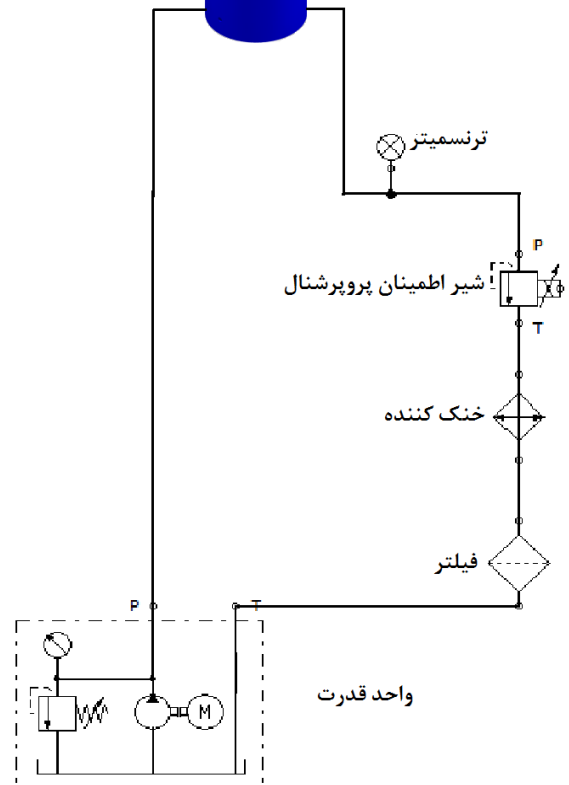
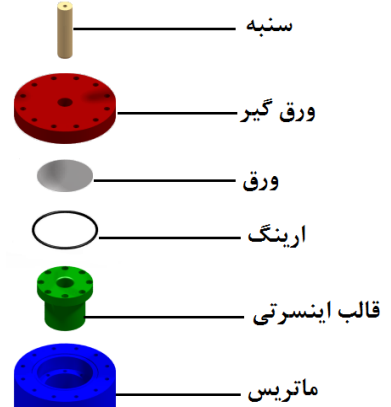
شکل (۳) (الف) دستگاه نوسان ساز، (ب) واحد هیدرولیکی، (ج) واحد الکترونیکی و کامپیوتری.



شکل (۴) مسیرهای فشار (الف) ثابت، (ب) مثلثی، (ج) سینوسی، (د) پله‌ای، (ه) دوزنقه‌ای.



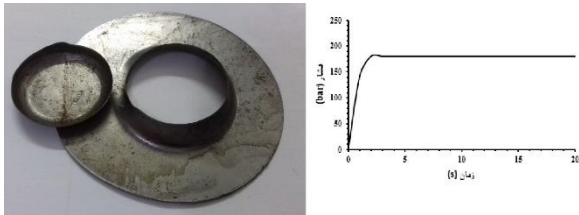
شکل (۵) تجهیزات مربوط به انجام آزمایش.



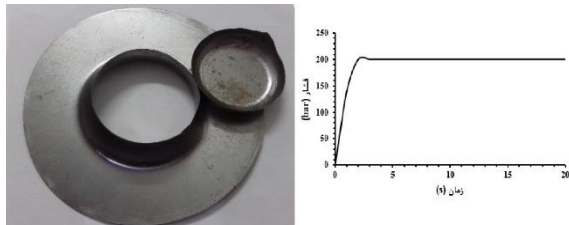
شکل (۱) شماتیک مدار هیدرولیکی واحد کنترل فشار متصل به قالب.



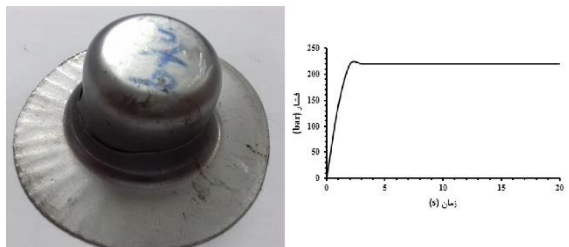
شکل (۲) اجزای قالب استفاده شده.



شکل (۷) قطعه شکل داده شده با فشار روغن ۱۸۰bar ثابت.



شکل (۸) قطعه شکل داده شده با فشار روغن ۲۰۰bar ثابت.



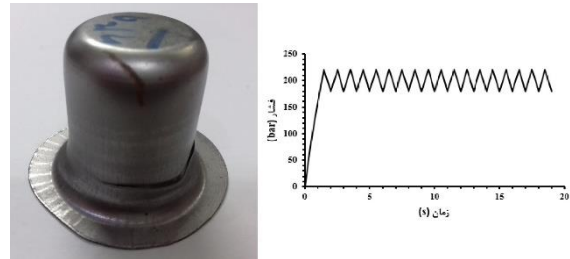
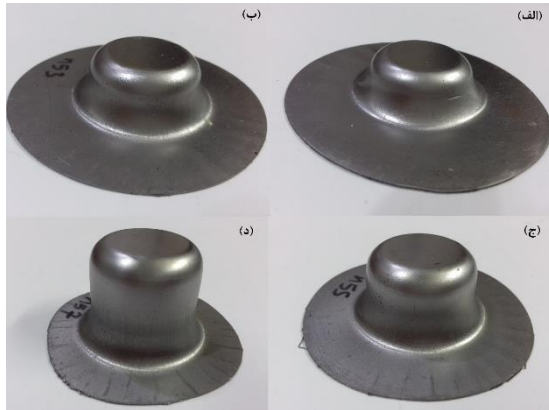
شکل (۹) قطعه شکل داده شده با فشار روغن ۲۲۰bar ثابت.

مقدار فشار در حین آزمایش به صورت تناوبی و بین بازه ۱۸۰bar تا ۲۲۰bar با ۲ Hz تغییر داده شد. در این آزمایش عمق پارگی قطعه به ۳۴mm افزایش یافت که نسبت به حالت بدون روغن بیش از ۴ برابر و نسبت به آزمایشی که از فشار روغن ثابت با مقدار ۲۲۰bar استفاده شد، ۴۷/۸۲ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر این است که چین خوردگی‌های بسیار ریزی در ماده اتفاق می‌افتد و رفع می‌شود. با تکرار این عمل قطعه تولید می‌شود و چین خوردگی‌های ریز حین شکل‌دهی نوسانی در قطعه نهایی دیده نمی‌شود. نازک‌شدگی موضعی رخ نداده و توزیع ضخامت یکنواخت شده و شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. زمانیکه فشار نوسانی باشد، تنش‌های فشاری و کششی در ورق دچار افزایش و کاهش می‌شوند و باعث ظهور و عدم ظهور چروکیدگی‌های ریز بر روی ورق شده و باعث بهبود جریان ماده و افزایش عمق شکل‌دهی می‌شود. در شکل (۱۱) ارتفاع قطعات تحت شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. در این نمودار N1 قطعه شکل داده شده بدون استفاده از روغن، N2 مربوط به قطعه با استفاده از فشار ثابت ۱۸۰bar، N3 با فشار ثابت ۲۰۰bar، N4 قطعه با فشار ۲۲۰bar و N5 قطعه با فشار متناوب بین ۱۸۰bar تا ۲۲۰bar را نشان می‌دهد.



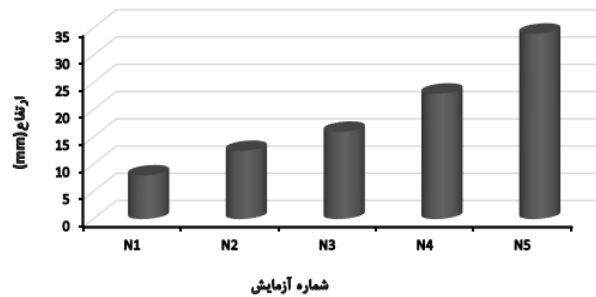
شکل (۶) قطعه شکل داده شده بدون استفاده از فشار روغن.

این آزمایش با حفظ شرایط قبل و با استفاده از فشار روغن در زیر ورق انجام شد. منحنی فشار به گونه‌ای انتخاب شد که با حرکت سنبه افزایش یابد تا به مقدار ثابتی که شیر پروپرشال تنظیم شده است، برسد. پس از آن تا انتهای کورس سنبه، مقدار فشار ثابت ماند. در این آزمون فشار نهایی برابر با ۱۸۰bar در نظر گرفته شد. ارتفاع پارگی قطعه، ۵۶/۲۵ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر کاهش اصطکاک بین ورق و ماتریس می‌باشد که باعث حرکت و جریان ماده به درون حفره ماتریس می‌شود. شکل (۷) تصویر این قطعه را نشان می‌دهد. با افزایش فشار و رساندن آن ابتدا به ۲۰۰bar و سپس به ۲۲۰bar، دو آزمایش جهت بررسی تاثیر مقدار فشار بر شکل‌پذیری ورق انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که عمق پارگی قطعه برای مقدار فشار ۲۰۰bar به ۱۶mm و برای مقدار فشار ۲۲۰bar به ۲۳mm رسید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار فشار در زیر ورق، عمق پارگی افزایش یافته و در نتیجه شکل‌پذیری ورق نیز افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که با افزایش فشار به ۲۲۰bar، مقدار عمق شکل‌دهی نزدیک به ۳ برابر نسبت به حالت بدون روغن افزایش یافته است. همچنین عمق شکل‌دهی با فشار روغن ۲۲۰bar نسبت به ۱۸۰bar، ۸۴ درصد بهبود یافته است. زمانیکه فشار روغن در زیر ورق افزایش می‌یابد، سطح تماس بین سنبه و ورق بیشتر شده و اصطکاک افزایش می‌یابد که در نتیجه، لغزش ورق بر روی سنبه کاهش یافته و نازک‌شدگی موضعی کم شده است و در نهایت ورق دیرتر دچار پارگی گردیده است. در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب قطعاتی که با فشار ۲۰۰bar و ۲۲۰bar آزمایش شده‌اند، نشان داده شده است. پس از شکل‌دهی ورق بدون روغن و با روغن با فشارهای ثابت مختلف، یک آزمایش با فشار روغن متغیر مطابق شکل (۱۰) انجام شد.



شکل (۱۰) قطعه شکل داده شده با فشار نوسانی بین ۱۸۰bar الی ۲۲۰bar و فرکانس ۲Hz.

شکل (۱۲) قطعه شکل داده شده تحت فشارهای (الف) ثابت ۱۸۰bar، (ب) ثابت ۲۰۰bar، (ج) ثابت ۲۲۰bar، (د) مثلثی بین ۱۸۰bar تا ۲۲۰bar با فرکانس ۲Hz.

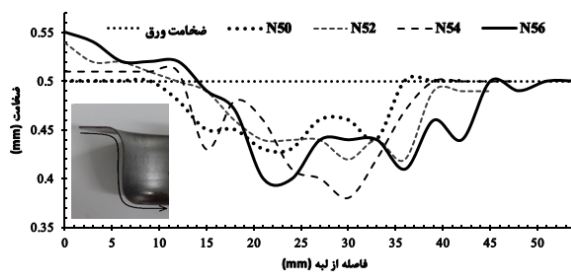


شکل (۱۱) ارتفاع شکل دهی قطعات با شرایط آزمایش مختلف.

همانطور که در شکل (۱۴) نیز مشخص است با افزایش فشار روغن در حالت فشار ثابت، انحراف از معیار ضخامت برای قطعات با فشار ثابت روغن افزایش می یابد. بنابراین مقدار پراکندگی و عدم یکنواختی بیشتر شده است. انحراف از معیار نمونه آزمایش شده تحت فشار روغن متغیر در محدوده ۱۸۰bar الی ۲۲۰bar با فرکانس ۲Hz، کمتر از قطعه شکل داده شده با فشار ثابت ۲۲۰bar است. این نتیجه در حالی به دست آمده است که عمق نمونه تولید شده با فشار نوسانی، ۱۰mm بیشتر است.

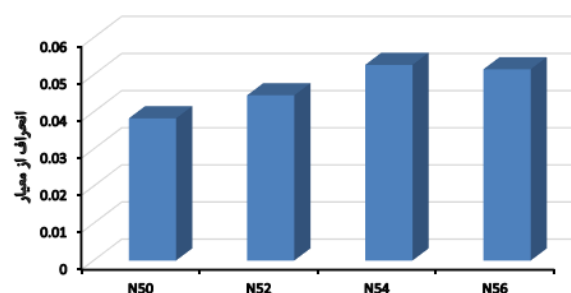
(ب) تاثیر فشارهای مختلف ثابت و نوسانی بر روی توزیع ضخامت قطعه

به منظور بررسی تاثیر مقدار فشارهای ثابت و متغیر بر روی نحوه توزیع ضخامت قطعات، آزمایش با شرایط بخش قبل به گونه ای تکرار شد که قطعات به عمق پارگی خود نرسند و نمونه های سالم به دست آید. ابتدا با فشار ثابت ۱۸۰bar آزمایش انجام شد و قطعه تا عمق ۱۱/۲mm شکل داده شد. تصویر مربوط به این آزمون ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. سپس با فشارهای ثابت ۲۰۰bar و ۲۲۰bar نیز ورق شکل داده شد که ارتفاع شکل دهی به ترتیب برابر ۱۴mm و ۲۰mm انتخاب شد. همچنین قطعه نهایی با فشار روغن نوسانی مطابق شکل (۱۲) در محدوده ۱۸۰bar الی ۲۲۰bar با فرکانس ۲Hz تا عمق ۲۹/۷mm شکل داده شد.



شکل (۱۳) توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در حالت های مختلف فشار.

شکل (۱۳) توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در این بخش را نمایش می دهد. انحراف از معیار هر کدام از قطعات محاسبه شد و در شکل (۱۴) ارایه شده است. در این نمودارها شماره قطعات N50، N52، N54، N56 به ترتیب قطعات شکل داده تحت فشارهای ثابت ۱۸۰bar، ۲۰۰bar، ۲۲۰bar و فشار نوسانی در محدوده ۱۸۰ الی ۲۲۰bar با فرکانس ۲ هرتز را نشان می دهند.



شکل (۱۴) انحراف از معیار توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده تحت حالت های مختلف فشار.

- [4] Mori, K., Patwari, A., Maki, S. "Improvement of Formability by Oscillation of Internal Pressure in Pulsating Hydroforming of Tube" *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol.53, No.1, pp.215-218, 2004.
- [5] Zhang, S., Yuan, A., Wang, B., Zhang, H. Wang, Z. "Influence of Loading Path on Formability of 304 Stainless Steel Tubes" *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol.52, No.8, pp.2263-2268, 2009.
- [6] Loh-Mousavi, M. Bakhshi-Jooybari, M. Mori, K. "Mechanism of Improvement of Formability in Pulsating Hydroforming of T-shape Tubes" *AUT Journal of Modeling and Simulation*, Vol. 42, No.1, pp.29-35, 2010.
- [7] Yang, L., Rong, H., He, Y. "Deformation Behavior of a Thin-Walled Tube in Hydroforming with Radial Crushing under Pulsating Hydraulic Pressure" *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.23, No.2, pp.429-438, 2014.
- [۸] اشرفی و خلیلی، مطالعه سخت‌شوندگی در فرایند هیدروفرمینگ پالسی قطعات T شکل، مجله مهندسی مکانیک مدرس، جلد ۱۵، شماره ۴، صفحه ۴۰۱ الی ۴۱۲، ۱۳۹۴.
- [9] Yang, L., Wu, C., He, Y. "Dynamic Frictional Characteristics for the Pulsating Hydroforming of Tubes" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.86, No.1-4, pp.347-357, 2016.
- [10] Anaraki, A. T., Loh.Mousavi, M., Wang, L. "Experimental and Numerical Investigation of the Influence of Pulsating Pressure on Hot Tube Gas Forming using Oscillation Heating" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.97, No.9-12, pp.3839-3848, 2018.

بر خلاف انتظار با افزایش ارتفاع شکل‌دهی، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری نسبت به قطعه با فشار ثابت ۲۲۰ bar به دست آمد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش افزایش شکل‌پذیری ورق‌های فلزی با استفاده از روش هیدروفرمینگ نوسانی ورق بررسی شد. نتایج کلی به‌دست آمده از این پژوهش را می‌توان در موارد زیر برشمرد: ۱ - قطعه شکل داده شده بدون استفاده از روغن در ارتفاع ۸mm دچار پارگی شد ولی ارتفاع پارگی قطعه شکل داده شده با استفاده از فشار روغن ثابت و برابر ۱۸۰ bar، ۱۲/۵mm اندازه‌گیری شد که نسبت به حالت بدون روغن ۵۶/۲۵ درصد افزایش یافته است.

۲ - با افزایش فشار روغن در زیر ورق، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که ارتفاع پارگی با فشار روغن ۲۲۰ bar نسبت به فشار روغن ۱۸۰ bar، ۸۴ درصد افزایش یافته است. ۳ - با اعمال فشار نوسانی در محدوده ۱۸۰ bar تا ۲۲۰ bar و فرکانس ۲Hz، عمق پارگی نسبت به حالت بدون روغن بیش از ۴ برابر و نسبت به آزمایشی که از فشار روغن ثابت با مقدار ۲۲۰ bar استفاده شد، ۴۷/۸۲ درصد افزایش یافته است.

۴ - با افزایش فشار روغن در حالتی که فشار ثابت باشد، انحراف از معیار ضخامت قطعات افزایش می‌یابد. این بدین معنی می‌باشد که پراکندگی در توزیع ضخامت افزایش یافته و یکنواختی آن کاهش می‌یابد. اما نمونه شکل داده شده با فشار نوسانی انحراف از معیار کمتری نسبت به قطعه با فشار روغن ثابت ۲۲۰ bar دارد که نشان می‌دهد قطعه شکل داده شده با فشار روغن متغیر و نوسانی، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری علی‌رغم اینکه عمق بیشتری هم دارد، ارائه می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] Storch, R. L., Hammon, C. P., and Bunch, H. M. "Ship production", 1988.
- [2] Zhang, S.H. "Developments in Hydroforming" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.91, No.1, pp.236-244, 1999.
- [3] Lang, L.H., Wang, Z.R. Kang, D.C., Yuan, S.J., Zhang, S.H., Danckert, J., Nielsen, K.B. "Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.151, No.1, pp.165-177, 2004.