



بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود تأثیر نیروی پرس بر روی شکل‌دهی کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی در فرآیند استمپینگ

فرزاد احمدی خطیر^۱، ابراهیم علیزاده^{۲*}، محمدمهدی بزرگری^۲، محمد مؤمنی‌فر^۲، سید حسین مسروری سعادت^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۲آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدون‌کنار، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۲ تیر ۱۳۹۶
بازنگری: ۲۷ مهر ۱۳۹۶
پذیرش: ۷ آذر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ آذر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری
صفحات دوقطبی فلزی
شکل‌دهی استمپینگ
تختی
نیروی شکل‌دهی

چکیده: صفحات دوقطبی یکی از مهم‌ترین بخش‌های پیل سوختی هستند که هزینه تولید زیادی را به همراه دارند. در این پژوهش، شکل‌پذیری صفحات دوقطبی فلزی با سطح فعال ۱۰۰ سانتی‌متر مربع از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L با فرآیند شکل‌دهی استمپینگ مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیند شکل‌دهی استمپینگ نسبت به روش‌های دیگر شکل‌دهی دارای مزایایی همچون سادگی فرآیند، سرعت تولید بالاتر و هزینه تولید پایین‌تر می‌باشد. مسأله مهمی که در صفحات دوقطبی حائز اهمیت است، دقت ابعادی کانال‌های شکل داده شده می‌باشد. در این مقاله، پهنا و عدم تختی کانال و ریب صفحات تولیدشده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش نیروی استمپینگ باعث افزایش جریان یافتن ورق شده که خود سبب افزایش در پهنای کانال و ریب می‌گردد. همچنین، میزان عدم تختی حاصل از برگشت فزنی ورق نیز در این فرآیند در بازه تلورانس کمتر از ۰/۰۲ میلی‌متر قرار داشته و این صفحات می‌توانند به عنوان صفحات دوقطبی فلزی در سری پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرند.

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی نوعی از مبدل‌های انرژی الکتروشیمیایی می‌باشند که انرژی شیمیایی حاصل از واکنش را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. پیل‌های سوختی را می‌توان در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار داد. ویلبرفورس و همکاران [۱] مروری بر تکنولوژی پیل سوختی و مزایا و معایب آن در مقایسه با تکنولوژی‌های رقیب ارائه نمودند. باروتاجی و همکاران [۲] نیز مرور کاملی بر قطعات اصلی پیل سوختی، نوع مواد و روش ساخت آن‌ها ارائه نمودند.

پیل‌های سوختی پلیمری یکی از انواع پیل سوختی می‌باشد که می‌تواند در کاربردهای ایستگاهی و حمل‌ونقل به کار رود. واکنش‌دهنده‌های معمول برای پیل‌های سوختی، هوا و هیدروژن می‌باشند. البته، استفاده از این گازها با کمی ناخالصی نیز امکان‌پذیر می‌باشد [۳-۶].

پیل سوختی پلیمری یکی از انواع پیل‌های سوختی می‌باشد که ویژگی‌های منحصر به فردی از قبیل بازدهی بالا، تولید گازهای گلخانه‌ای کم یا در حد صفر، سادگی و هزینه‌های پایین، نداشتن قطعات متحرک و عمر طولانی، ماژولار بودن، بی سروصدا بودن و اندازه و وزن پایین را دارا می‌باشند که باعث جذابیت آن‌ها می‌شود [۷-۹].

یک مجموعه پیل سوختی از اجزای مختلفی تشکیل شده است که از میان این اجزا، صفحات دوقطبی از لحاظ حجم و وزن (در حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد) و همچنین هزینه (در حدود ۳۰ تا ۴۵ درصد) از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۱۰]. صفحات دوقطبی در هر دو سمت خود دارای گذرگاه‌هایی (اصطلاحاً میدان‌های شارش گاز) برای شارش گازهای واکنش‌دهنده و پخش آن‌ها بر روی سطح کاتالیست و همچنین مدیریت حرارت و آب می‌باشد [۶]. نفوذ سریع گازهای واکنش‌دهنده و هدایت الکتریکی بالا، دو پارامتر مهم جهت دستیابی به عملکرد مناسب پیل سوختی می‌باشد. افزایش سطح مقطع کانال صفحات دوقطبی باعث افزایش سرعت نفوذ گازهای واکنش‌دهنده و همچنین تخلیه مناسب‌تر محصولات واکنش می‌گردد. از این‌رو، افزایش پهنای کانال و همچنین تختی کف کانال تأثیر به‌سزایی در عملکرد پیل سوختی خواهد داشت [۱۱]. علاوه بر این، افزایش سطح ریب منتج به بهبود هدایت الکتریکی از لایه نفوذ گازی به صفحات دوقطبی می‌شود. لذا، پهنای ریب و تختی آن نیز روی عملکرد پیل سوختی مؤثر است [۱۲]. به همین دلیل، پهنای ریب و کانال باید در مرحله طراحی بهینه‌سازی گردد. همچنین، عدم تختی مناسب کانال، منتج به جوشکاری نامناسب صفحات دوقطبی به یکدیگر شده که در نتیجه آن آب‌بندی پیل سوختی نیز دچار اختلال می‌شود.

با توجه به اهمیت صفحات دوقطبی در پیل‌های سوختی، انتظار می‌رود

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fccenter@mut.ac.ir

که این صفحات با کمترین ضخامت ساخته شوند [۱۳، ۱۴]. نیاز به حداکثر چگالی توان پیل سوختی و حداقل هزینه موجب گردیده است تا انتخاب جنس و روش تولید صفحات دوقطبی به موضوع بسیار مهمی تبدیل شود [۱۵]. انتخاب جنس، هندسه میدان شارش و توسعه روش‌های ساخت صفحات دوقطبی، نمونه‌هایی از حوزه‌های علمی در شرکت‌ها و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی مرتبط با پیل سوختی مختلف می‌باشد. معمول‌ترین روش‌های تولید صفحات دوقطبی، ماشین‌کاری صفحات کامپوزیت گرافیتی، استمپینگ و هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی، قالب‌گیری صفحات کامپوزیت کربن-پلیمر و کربن-کربن می‌باشد [۱۰].

در سال‌های اخیر، صفحات دوقطبی فلزی به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی عالی، هزینه پایین و قابلیت ساخت خوب توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۱۶]. روش‌های ساخت صفحات دوقطبی فلزی به طور کلی به دو دسته ماشین‌کاری و شکل‌دهی تقسیم می‌شوند. روش ماشین‌کاری با توجه به زمان‌بر بودن فرآیند و همچنین ضخامت، وزن و هزینه بالا مورد استقبال قرار نگرفته است. در مقابل، صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده به دلیل ضخامت و وزن کم صفحات و همچنین زمان تولید بسیار کوتاه و هزینه تولید پایین در سال‌های اخیر با استقبال زیادی مواجه شده است. فلزات به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی عالی می‌توانند جایگزین مناسبی برای صفحات گرافیتی باشند. اگرچه مقاومت این صفحات در مقابل خوردگی ناشی از محیط اسیدی پیل سوختی و هزینه‌های شکل‌دهی نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. جهت محافظت صفحات دوقطبی فلزی در مقابل خوردگی، جنس این صفحات باید طوری انتخاب شود که مقاومت به خوردگی بالایی داشته باشد. فولادهای زنگ نزن، تیتانیوم و آلومینیوم گزینه‌های مناسبی برای صفحات دوقطبی فلزی می‌باشند [۱۷، ۱۸].

به منظور کاهش در هزینه‌های تولید این صفحات باید از یک روش کارآمد و کم‌هزینه برای شکل‌دهی این صفحات استفاده کرد. برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت از شکل‌دهی با لایه لاستیکی، شکل‌دهی به روش هیدروفرمینگ و شکل‌دهی به روش استمپینگ می‌باشد. روش هیدروفرمینگ دارای مزایایی همچون عدم نیاز به سنبه صلب، توانایی کنترل مسیر تغییر شکل در طی فرآیند، توزیع یکنواخت تغییر شکل به واسطه اعمال نیروی همگن، کاهش میزان برگشت فنری و کیفیت سطح خوب قطعات می‌باشد. از جمله معایب این روش نیز می‌توان به مشکلات مربوط به آب‌بندی، نیاز به پرس با تناژ بالاتر و نیاز به تجهیزات کنترل فشار اشاره نمود. روش شکل‌دهی با لایه لاستیکی نیز دارای مزایایی همچون استفاده از تجهیزات ساده، کیفیت بالای قطعات تولیدی و عدم نیاز به مونتاژ دقیق قالب می‌باشد. تعویض لاستیک پس از شکل‌دهی چند قطعه نیز عیب عمده این روش می‌باشد. با توجه به نکات ذکرشده، روش استمپینگ از لحاظ قابلیت تولید انبوه قطعات روش مناسب‌تری نسبت به روش‌های دیگر شکل‌دهی می‌باشد.

چوی و همکاران [۱۹] به دلیل پیچیدگی هندسی و عدم امکان ساخت صفحات دوقطبی فلزی در یک مرحله، فرآیند استمپینگ چندمرحله‌ای (شامل عملیات حرارتی با هدف بهبود شکل‌پذیری) را بررسی نمودند. نتایج کار این محققان نشان داد که عمق پرشدگی صفحات تولیدشده از شکل‌دهی دو مرحله‌ای، ۴۲٪ افزایش یافته است. هو و همکاران [۲۰] شکل‌دهی صفحات دوقطبی با روش استمپینگ را مطالعه نمودند. این محققان به کمک شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی به بررسی توزیع ضخامت نمونه پرداختند. همچنین، آن‌ها ابعاد کانال‌های جریان، سرعت پانچ، شعاع گوشه و زاویه دیواره را مورد بررسی قرار دادند و با نتایج تجربی مقایسه نمودند.

الیاسی و همکاران [۲۱] به بررسی شکل‌دهی صفحات دوقطبی در فرآیند شکل‌دهی با لایه لاستیکی پرداختند. این محققان تأثیر دو الگوی محدب و مقعر را در نحوه شکل‌گیری صفحات دوقطبی بررسی کردند. نتایج کار این محققان نشان داد که میزان عمق پرشدگی در صفحات شکل‌داده شده در قالب محدب بیشتر است. درحالی‌که در یک عمق پرشدگی یکسان، دقت ابعادی صفحات تولیدی از الگوی مقعر بهتر است. آن‌ها همچنین اثر لقی قالب در فرآیند شکل‌دهی لاستیکی صفحات دوقطبی فلزی را مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. نتایج نشان می‌دهد که زمانی که بین سنبه و ماتریس لقی اعمال می‌شود، میزان یکنواختی عمق کانال‌های پرشده بیشتر می‌شود. البته لایه لاستیکی بعد از چندین عمل شکل‌دهی تخریب شده و تغییر شکل پلاستیک در آن رخ می‌دهد. همچنین، در مجموعه قالب با لقی کم، میزان عمر پد لاستیکی بسیار افزایش پیدا کرده و میزان عمق کانال‌ها نیز بیشتر گردید. با بررسی نتایج مشخص شد، زمانی که عمق کانال‌های صفحات کم باشد و از لایه لاستیکی با سختی بالاتر استفاده شود، مجموعه قالب با لقی به دلیل یکنواختی در عمق کانال‌ها نتایج مطلوب‌تری دارد. الیاسی و همکاران [۲۳] روشی نوین به منظور افزایش عمق کانال در فرآیند شکل‌دهی لاستیکی ارائه دادند. در این فرآیند برخلاف فرآیندهای رایج شکل‌دهی لاستیکی، از یک لایه لاستیکی ماشین‌کاری شده استفاده شده است که با توجه به نتایج به‌دست آمده، استفاده از این روش موجب بهبود درصد پرشدگی، درصد نازک‌شدگی و دقت ابعادی می‌گردد.

اوصیا و همکاران [۲۴] دو روش هیدروفرمینگ محدب و مقعر را به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آنان نشان داد که در صفحات دوقطبی شکل‌داده شده به روش هیدروفرمینگ محدب، پروفیل الگو دارای پرشدگی بهتر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌باشد. آن‌ها همچنین اظهار داشتند که به دلیل عدم پرشدگی کامل پروفیل به کمک روش هیدروفرمینگ، انجام یک مرحله استمپینگ نهایی به منظور شکل‌دهی کامل پروفیل موردنظر ضروری است. محمدتبار و همکاران [۲۵] شکل‌دهی بخشی از کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی با الگوی جریان ماریچ را با روش هیدروفرمینگ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت محدب، مقدار درصد پرشدگی برای فرآیند دومرحله‌ای (مرحله اول روی قالب مقعر و مرحله دوم روی قالب محدب)،

برابر خوردگی بالاتر و شکل‌پذیری بهتر در مقایسه با دیگر صفحات آستنیتی می‌باشد. خواص مکانیکی این ورق به کمک آزمون کشش تعیین گردیده است که نمودار تنش- کرنش مربوط به ورق موردنظر در شکل ۱ نشان داده شده است. رفتار پلاستیک ماده طبق معادله هولمن تخمین زده شده است. جدول ۱ مشخصات مکانیکی ورق L316 را نمایش می‌دهد.

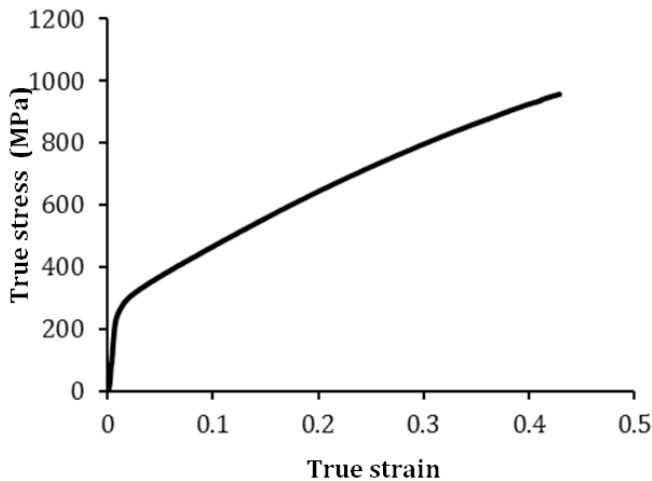


Fig. 1. True stress-strain curve of 316L stainless steel sample

شکل ۱: منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه فولادی زنگ نزن L316

جدول ۱: خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ‌نزن L316.

Table 1. Mechanical properties of 316L stainless steel sheet

مقدار	خواص مکانیکی
۲۰۰	ضریب الاستیسیته (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۲۹۶	تنش تسلیم (MPa)
۱۵۱۲	ضریب استحکام (MPa)
۰/۵۳	نمای کرنش سختی
۰/۰۴	کرنش اولیه

در این پژوهش، الگوی شیاری ماریچ موزی به عنوان الگوی میدان شارش گازهای واکنش‌دهنده مورد استفاده قرار گرفت. مزیت اصلی این تحقیق شکل‌دهی یک صفحه دوقطبی فلزی می‌باشد که تأثیر متقابل کانال‌ها در مجاورت یکدیگر را به عنوان مسأله بسیار مهم مورد بررسی قرار می‌دهد. این مهم به ندرت در تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۲ طرح اولیه الگوی میدان شارش و نمایی از سطح مقطع آن را به همراه پارامترهای عرض کانال (W)، عرض ریب (S)، عمق پرشدگی (ارتفاع) کانال (h)، شعاع فیلت داخلی (R)، شعاع فیلت خارجی (r) و زاویه دیواره (α) نشان می‌دهد. مقدار زاویه دیواره و شعاع گوشه مطابق بهترین مقادیر به دست آمده از پژوهش‌های پیشین انتخاب شده است؛ اما عمق کانال به گونه‌ای انتخاب شده که با توجه به ضخامت اولیه ورق، فرآیند استمپینگ

۸۱/۴۵٪ و برای فرآیند سه مرحله‌ای (مرحله اول روی قالب مقعر، آنیل، مجدداً روی قالب مقعر و سپس در قالب محدب)، مقدار ۹۵/۹۱٪ به دست آمده است.

کلاهدوز و همکاران [۲۶] مدل المان محدود سه‌بعدی فرآیند شکل‌دهی لاستیکی صفحات دوقطبی فلزی را توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش توانستند پارامترهای مؤثر هندسی در فرآیند شکل‌دهی را تعیین نمایند. ماهابانفاجای و همکاران [۲۷] اثر فرآیندهای شکل‌دهی استمپینگ و هیدروفورمینگ را بر شکل‌پذیری و زبری سطح صفحات دوقطبی فلزی بررسی کردند. نتایج کار این محققان نشان داد که قابلیت تکرارپذیری فرآیند استمپینگ در مقایسه با فرآیند هیدروفورمینگ بیشتر است. در حالی که دقت ابعادی در یک صفحه شکل داده شده به روش هیدروفورمینگ بهتر از نمونه شکل داده شده با روش استمپینگ می‌باشد.

پارامترهایی از قبیل عمق پرشدگی کانال‌های جریان، نحوه توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی ورق و یکنواختی ارتفاع کانال‌های جریان با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات نشان می‌دهد که فرآیند شکل‌دهی استمپینگ نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی دارای مزایایی همچون سرعت تولید بالا، هزینه تولید پایین و سادگی در نصب و راه‌اندازی می‌باشد [۲۸]؛ اما از آنجایی که در فرآیند استمپینگ هر دو کفه قالب صلب است، لذا شکل‌گیری ورق در این فرآیند نسبت به فرآیندهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر دشوارتر بوده و احتمال پارگی ورق قبل از شکل‌گیری کامل بیشتر است.

هدف اصلی این مقاله، بررسی تجربی و شبیه‌سازی تأثیر نیروی شکل‌دهی بر دقت ابعادی کانال‌های صفحات تولیدی از فرآیند شکل‌دهی استمپ اصلاح شده می‌باشد که تاکنون در هیچ پژوهشی مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است. برخلاف مطالعه سایر محققان که به بررسی چند کانال از یک صفحه دوقطبی پرداخته‌اند، این پژوهش شکل‌دهی یک صفحه دوقطبی که برگرفته از یک نمونه صنعتی می‌باشد را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به ضخامت کم ورق، افزایش تعداد کانال‌های جریان باعث پیچیدگی فرآیند شکل‌دهی صفحه دوقطبی و افزایش احتمال پارگی ورق پیش از پرشدگی می‌شود؛ بنابراین، بررسی شکل‌دهی چند کانال به تنهایی کافی نبوده و بررسی شکل‌پذیری صفحه دوقطبی کامل (شامل چندین کانال پیوسته و پیچیده در کنار هم) ضرورت می‌یابد. در این پژوهش، فرآیند استمپ اصلاح شده جهت شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با سطح فعال ۱۰۰ سانتیمتر مربع مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهایی از قبیل پهنای کانال و ریب و همچنین تختی مربوط به کانال و ریب با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مراحل تجربی

در این پژوهش، ورق فولادی زنگ‌نزن آستنیتی L316 با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. علت انتخاب این جنس، مقاومت در

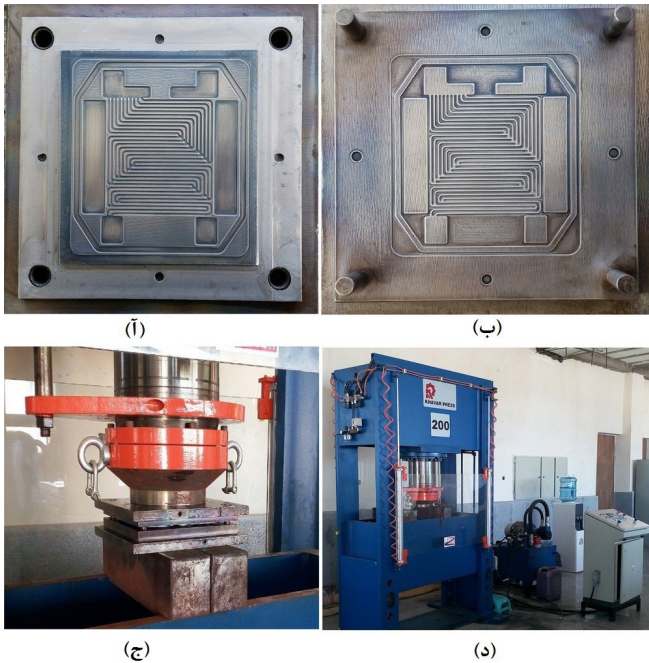


Fig. 3. Forming die and laboratory equipment, (a) cavity, (b) core, (c) assembly die set, (d) view of 200 ton press.

شکل ۳: قالب شکل‌دهی و تجهیزات آزمایشگاهی، (آ) ماتریس، (ب) سنبه، (ج) مجموعه موتنازی قالب، (د) نمایی از پرس ۲۰۰ تن.

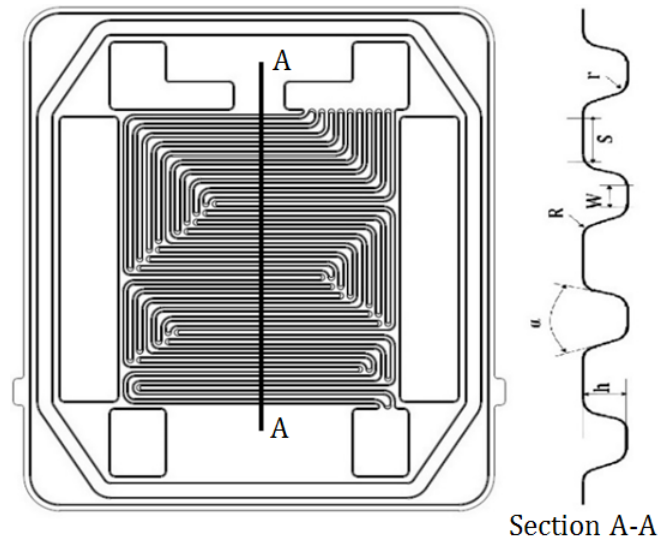


Fig. 2. Flow field pattern of reactant gases

شکل ۲: طرح الگوی میدان شارش گازهای واکنش‌دهنده.

جدول ۲: ابعاد هندسی مجموعه قالب و ورق.

Table 2. Geometrical dimensions of die set and sheet

ابعاد (mm)	پارامتر هندسی	تعریف پارامتر
۰/۸۵	h	عمق کانال
۲۰	α	زاویه دیواره کانال
۰/۲	R	شعاع سر ریب
۰/۲	r	شعاع سر کانال
۱	W	پهنای کانال
۱/۳	S	پهنای ریب

در پیچیده‌ترین حالت نسبت به پژوهش‌های پیشین بررسی شود. جدول ۲ ابعاد صفحه دوقطبی را نشان می‌دهد.

مشکل اصلی فرآیند استمپینگ این است که از دو کفه قالب صلب استفاده می‌کند و برخلاف فرآیندهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، احتمال پارگی ورق در این فرآیند محتمل‌تر است. در این پژوهش به منظور رفع این مشکل، فرآیند استمپ اصلاح‌شده به کار گرفته شد. به طوری که مجموعه قالب‌ها با روان کار نایلون پلی‌پروپیلن که یک روان کار فیلم جامد با ضخامت میکرونی می‌باشد، پوشیده می‌گردد. مزیت این روش این است که اولاً از تماس مستقیم ورق با قالب صلب جلوگیری می‌کند. ثانیاً به عنوان یک کاهنده اصطکاک عمل کرده که این امر سبب جریان یافتن راحت‌تر ورق و شکل‌گیری کامل ورق می‌شود.

شکل ۳ مجموعه قالب سنبه و ماتریس را نشان می‌دهد که از جنس فولاد سخت‌کاری شده SPK می‌باشد. لازم به ذکر است که این قالب‌ها با دقت بسیار بالایی با ماشین فرز CNC ساخته شده‌اند. به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی و همچنین بررسی تأثیر نیروی پرس بر پهنای کانال و

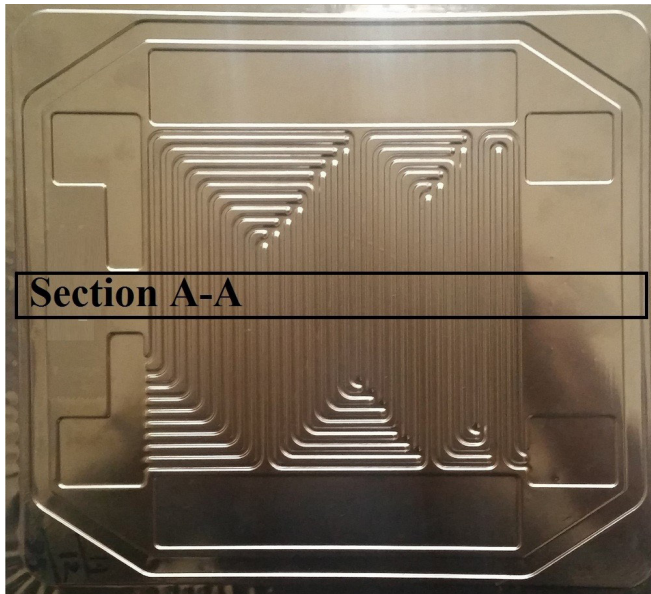
ریب ورق‌ها، پرس هیدرولیکی ۲۰۰ تن مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این مقاله، تختی کانال و ریب شکل‌گرفته در فرآیند استمپ و همچنین تأثیر نیروی شکل‌دهی بر پهنای کانال و ریب در فرآیند شکل‌دهی استمپینگ بررسی شده است. صفحات تولیدشده بعد از فرآیند شکل‌دهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همان‌طور که ذکر گردید، در صورتی که که کانال‌های شکل‌گرفته از صفحات دوقطبی فلزی دارای میزان تختی مناسب نباشند و یا در بازه تلووانسی مطلوب قرار نداشته باشند، عملکرد پیل سوختی از لحاظ بازده و همچنین آب‌بندی دچار اختلال می‌شود.

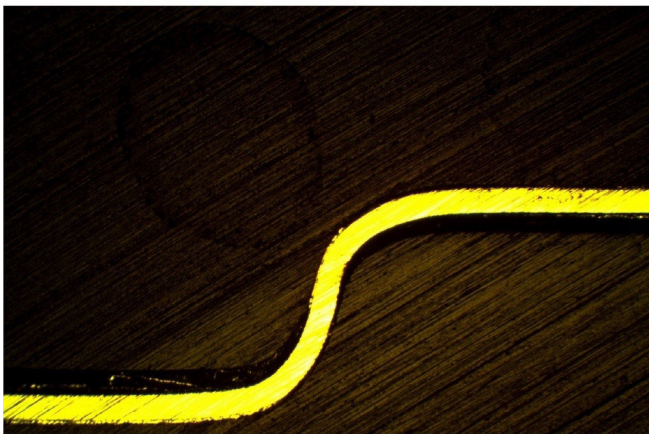
۳- شبیه‌سازی اجزا محدود

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی استمپ از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ۶،۱۴،۱ استفاده شده است. از آنجایی که میدان شارش صفحه دوقطبی فلزی مورد نظر متقارن نمی‌باشد، لذا برای شبیه‌سازی اجزای محدود از مدل سه‌بعدی کامل استفاده شده است. هدف از شبیه‌سازی بررسی توزیع تنش و کرنش در نواحی مختلف از ورق بوده که مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی، ورق به صورت تغییرشکل‌پذیر^۱ و قالب به صورت صلب-تحلیلی^۲ در نظر گرفته شده است. برای تحلیل ورق از المان S4R استفاده گردید. مقدار اصطکاک بین ورق و قالب برابر ۰/۱ در نظر گرفته شد. درجات آزادی قالب ماتریس به طور کامل گرفته شده و قالب سنبه در راستای

1 Deformable
2 Analytical rigid



(آ)



(ب)

Fig. 5. (a) critical cutting alignment of produced bipolar, (b) microscopic image of cutting section

شکل ۵: (آ) راستای برش بحرانی صفحه دوقطبی تولیدشده، (ب) تصویر میکروسکوپی از مقطع برش

نمونه‌ها و تصویر مقطع چند نمونه از صفحات شکل داده شده را نشان می‌دهد.

به منظور تعیین دقت شبیه‌سازی و صحت‌سنجی نتایج، شکل‌دهی صفحه دوقطبی فلزی در نیروی بیشینه پرس (۱۶۰ تن) انجام گردید. جهت بررسی وقوع نقطه پارگی و بررسی توزیع ضخامت صفحه دوقطبی تولیدشده لازم است که ضخامت ورق در نواحی مختلف کانال اندازه‌گیری گردد. به همین دلیل، کنترل کیفیت سه کانال مختلف پس از برش ناحیه طولی صفحه دوقطبی شکل داده شده انجام می‌گیرد که شامل ناحیه مربوط به آب‌بند، اولین کانال و کانال میانی صفحه شکل داده شده می‌باشد. هرکدام از

محور Y جابجایی دارد. ورق نیز به‌صورت آزادانه بر روی قالب ماتریس قرار می‌گیرد.

از آنجایی که پهنای کانال قالب ۱ میلی‌متر است، لذا ابعاد المان ورق برای دستیابی به یک تحلیل صحیح باید کوچک‌تر از ابعاد کانال قالب در نظر گرفته شود. از این‌رو، در این پژوهش پس از همگرایی اندازه المان‌های ورق، اندازه المان $0.1/0$ میلی‌متر انتخاب شد. از آنجایی که ابعاد صفحه دوقطبی مورد استفاده در این پژوهش در مقیاس صنعتی است، لذا تعداد المان‌ها بسیار زیاد بوده و برای تحلیل آن نیاز به یک سیستم پردازش سریع می‌باشد. بدین منظور، یک کامپیوتر پردازش سریع ۶۴ هسته‌ای با ۱۲۸ گیگابایت رم و قدرت پردازشی ۴۳۶ گیگافلاپس مورد استفاده قرار گرفت.

خواص مکانیکی ورق مطابق با جدول ۱ به نرم‌افزار معرفی گردید. از آنجایی که قالب به‌صورت صلب مدل شده است، لذا خواص مکانیکی برای آن تعریف نشده است. در این مدل، شرایط تماسی بین ورق و دو کفه قالب از نوع تماس مکانیکی سطح به سطح با رفتار مماسی و با بیان ریاضی پنالته است. درجات آزادی ماتریس گرفته شده و جابجایی به سبب اعمال گردیده است. شکل ۴ مدل المان‌بندی مجموعه را نشان می‌دهد.

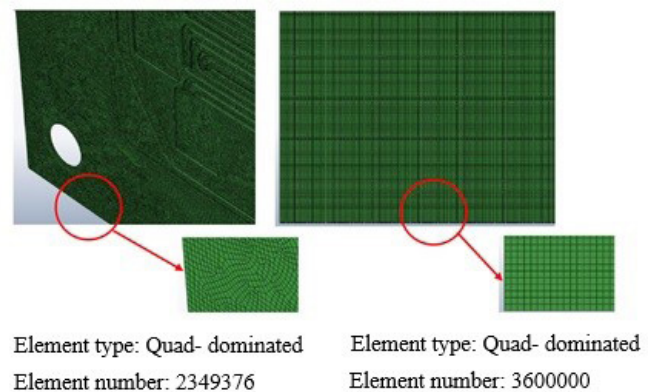


Fig. 4. Meshed model of sheet and two die surfaces

شکل ۴: مدل مش بندی شده ورق و دو کفه قالب

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبار سنجی مدل اجزای محدود

به منظور اعتبارسنجی مدل اجزای محدود شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی، صفحات شکل داده شده از ناحیه بحرانی (ناحیه‌ای از صفحه که در آن شکل‌گیری ورق به دلیل پیچیدگی کانال‌ها دشوارتر از قسمت‌های دیگر است) به کمک دستگاه برش سیمی برش خورده و پس از مانت و پولیش سطح، ابعاد کانال‌ها با میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود. ابعاد موردنظر با نرم‌افزار اندازه‌گیری^۱ تعیین می‌گردد. این نرم‌افزار قابلیت عکس‌برداری از مقطع کانال و همچنین اندازه‌گیری با دقت میکرون را دارد. در واقع، نحوه عملکرد این نرم‌افزار بدین‌صورت است که با المان‌بندی تصویر مقطع کانال، اندازه‌گیری با دقت یک میکرون انجام می‌شود. شکل ۵ فرآیند آماده‌سازی

1 Measurement

۴-۲- میزان تخت شدگی کانال و ریب

عدم تختی مناسب کانال منتج به جوشکاری نامناسب صفحات دوقطبی به یکدیگر شده که در نتیجه آن آببندی پیل سوختی دچار اختلال می‌گردد. همچنین، عدم تختی ریب نیز باعث افزایش مقاومت تماسی و در پی آن افت عملکرد پیل سوختی می‌شود. از این‌رو، یکی از بخش‌های مهمی که باید مورد بررسی قرار گیرد، میزان تخت شدگی کانال‌ها و ریب‌های شکل داده شده می‌باشد.

پس از اعمال نیروی پرس به مجموعه قالب، ورق بین دو کفه قالب پرس شده و فرم شیپ‌های قالب را به خود می‌گیرد. بدین صورت که ورق به کف کانال (با عمق ۰/۸۵ میلی‌متر) می‌رسد. اگرچه هنگامی که نیرو از روی مجموعه قالب برداشته می‌شود، ورق به دلیل خاصیت برگشت فنری بازگشت کرده و در عمق کمتر از عمق ماتریس شکل می‌گیرد. لازم به ذکر است که عمق کانال‌ها برای این صفحات دوقطبی ۰/۶۵ میلی‌متر است. مجموعه قالب طوری طراحی شده است که پس از برگشت فنری ورق عمق کانال‌ها به مقدار موردنظر می‌رسد، اما برگشت فنری ورق ممکن است موجب عدم تختی کانال‌های شکل داده شده شود.

پیش از انجام آزمایشات تجربی، میزان عدم تختی در نیروهای مختلف شکل‌دهی شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که در نیروی شکل‌دهی برابر با ۸۰ تن، ورق به عمق کانال رسیده و در واقع به طور کامل شکل می‌گیرد؛ اما میزان عدم تختی بیش از حد مجاز می‌باشد. با افزایش نیروی شکل‌دهی، میزان عدم تختی به تدریج کاهش می‌یابد.

این کانال‌ها نیز خود در سه ناحیه مجزا اندازه‌گیری شده که ناحیه A مربوط به کف کانال، ناحیه B نشان‌دهنده شعاع گوشه بالا، شعاع گوشه پایین و دیواره کانال و همچنین ناحیه C نیز کف ریب را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، ضخامت ورق در دو ناحیه بحرانی شعاع گوشه بالا و پایین (ناحیه B) دارای کمترین مقدار است. در این شکل، ضخامت ورق در سه ناحیه مختلف از برش طولی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مقایسه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، کانال وسط نسبت به دو حالت دیگر دارای وضعیت بحرانی‌تری بوده که دلیل آن عدم جریان ورق در این ناحیه از گوشه‌ها است؛ بنابراین، در نواحی میانی صفحات دوقطبی فلزی تنها میزان کشیدگی خود ورق باعث شکل‌گیری کانال می‌شود و به همین دلیل ضخامت ورق در این نقاط کمینه بوده و بیشترین احتمال پارگی در این نقاط وجود دارد. مطابق با رابطه ۱، میزان درصد نازک‌شدگی برای ناحیه بحرانی (کانال وسط) صفحه شکل داده شده با بیشترین میزان پرشدگی، در حالت تجربی برابر با ۲۲٪ و در حالت شبیه‌سازی برابر با ۱۹٪ به دست آمد [۲۹]. همان‌طور که نشان داده شده است، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود داشته و بیشینه خطا برابر با ۳٪ می‌باشد. از این‌رو، امکان به‌کارگیری مدل المان محدود برای بررسی پارامترهای مختلف فرآیند شکل‌دهی استمپینگ وجود دارد.

$$\text{درصد نازک‌شدگی} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

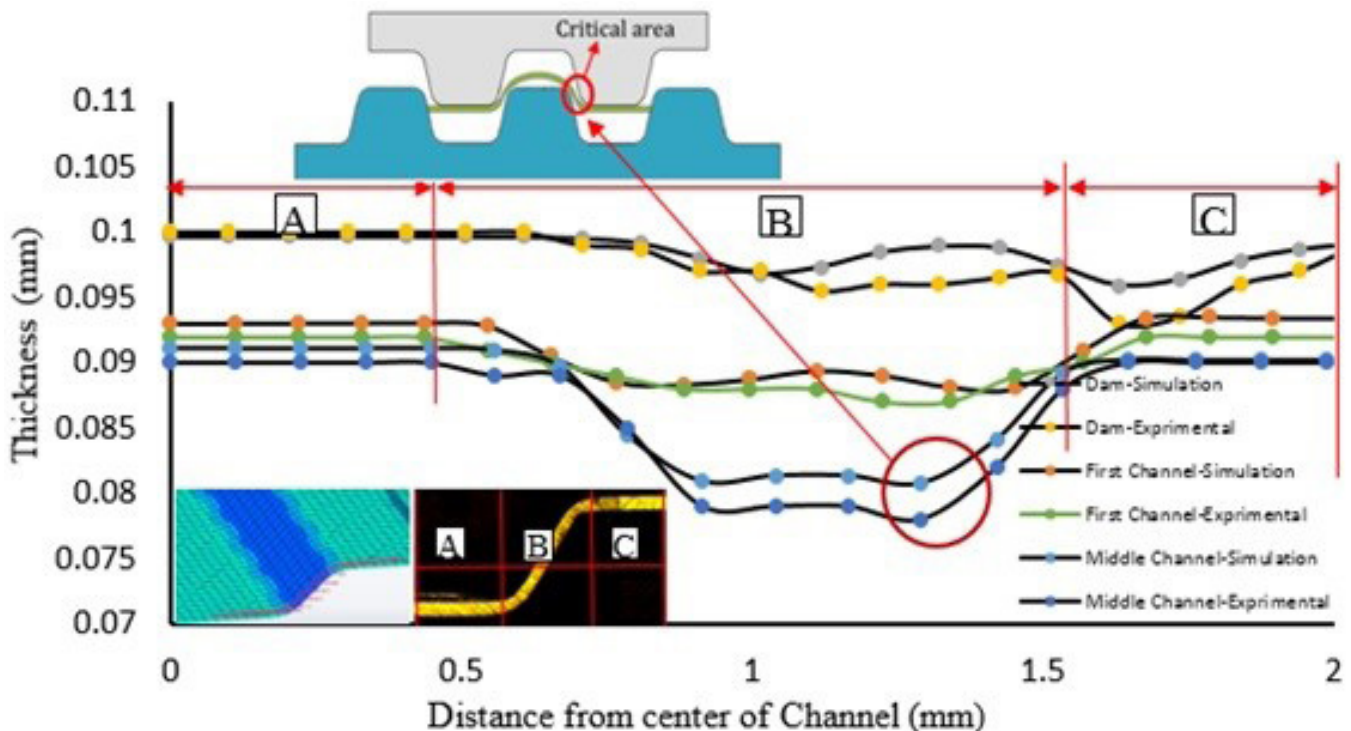
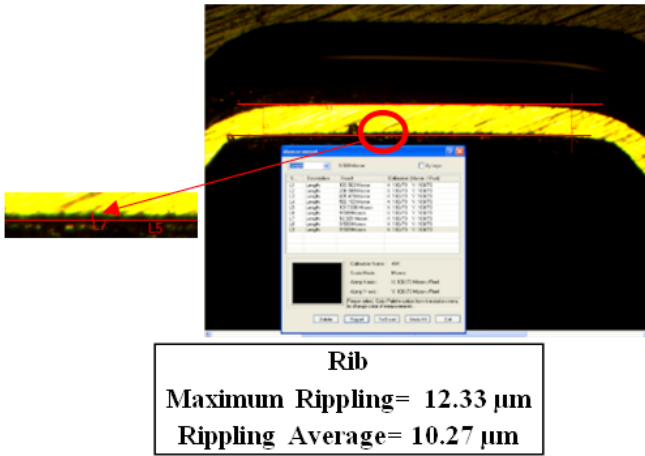


Fig. 6. Investigation of formed sheet thickness distribution in three parts of plate in longitudinal direction and three different parts of channel

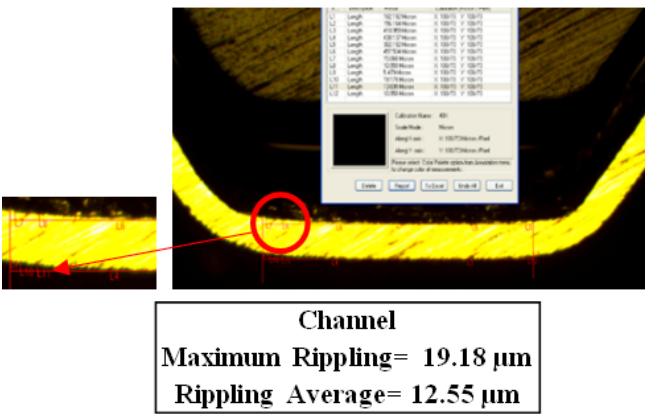
شکل ۶: بررسی توزیع ضخامت ورق شکل گرفته در سه قسمت از صفحه در راستای طولی و در سه ناحیه مختلف از کانال



S...	Description	Result	Calibration (Micron / Pixel)
L1	Length	183.562 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L2	Length	206.849 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L3	Length	605.479 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L4	Length	582.192 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L5	Length	1017.808 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L6	Length	9.589 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L7	Length	12.329 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L8	Length	9.589 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L9	Length	9.589 Micron	X: 100/73 Y: 100/73

Calibration Name : 40X
 Scale Mode : Micron
 Along X-axis : X: 100/73 Micron /Pixel
 Along Y-axis : Y: 100/73 Micron /Pixel

(الف)



S...	Description	Result	Calibration (Micron / Pixel)
L1	Length	182.192 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L2	Length	156.164 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L3	Length	410.959 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L4	Length	430.137 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L5	Length	382.192 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L6	Length	457.534 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L7	Length	15.068 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L8	Length	10.959 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L9	Length	5.479 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L10	Length	19.176 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L11	Length	13.699 Micron	X: 100/73 Y: 100/73
L12	Length	10.959 Micron	X: 100/73 Y: 100/73

Calibration Name : 40X
 Scale Mode : Micron
 Along X-axis : X: 100/73 Micron /Pixel
 Along Y-axis : Y: 100/73 Micron /Pixel

(ب)

Fig. 7. Rippling value measurement of longitudinal cut in maximum forming limit (a) rib, (b) channel

شکل ۷: اندازه‌گیری میزان عدم تختی در برش طولی در ماکزیمم حد شکل‌دهی (ا) ریب، (ب) کانال.

قرار می‌گیرد. زمانی که نیروی وارده بر مجموعه قالب افزایش می‌یابد، ورق به تدریج شکل گرفته تا به کف کانال برسد. افزایش بیشتر نیروی شکل‌دهی پس از رسیدن دو کفه قالب به یکدیگر، تأثیری روی حداکثر عمق کانال نداشته، چراکه ورق کاملاً به عمق قالب رسیده است. اگرچه افزایش نیروی شکل‌دهی سبب می‌شود که ورق جریان یافته و با کاهش ضخامت ورق گوشه‌های قالب بیشتر پر شده که در نتیجه آن پهنای کانال و ریب افزایش می‌یابد.

مشکلی که در فرآیندهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر همچون هیدروفورمینگ و شکل‌دهی با لایه لاستیکی وجود دارد، شکل نگرستن گوشه‌های قالب است. افزایش بیشتر فشار به مجموعه قالب در این فرآیندها موجب جریان یافتن ورق نمی‌شود، چراکه ورق کارسخت شده و فرآیندهای انعطاف‌پذیر قابلیت غلبه بر این کار سختی را ندارد؛ اما فرآیند استمپینگ به دلیل استفاده

با استناد به نتایج شبیه‌سازی، آزمایش تجربی در ماکزیمم نیروی شکل‌دهی ۱۶۰ تن انجام شد. شکل ۷ میزان عدم تختی را برای کانال و ریب نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، میانگین عدم تختی برای ریب حدوداً ۱۰ میکرون و برای کانال در حدود ۱۲ میکرون می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده این است که افزایش نیروی شکل‌دهی سبب جریان یافتن بیشتر ورق و در واقع کاهش میزان برگشت فتری می‌شود. همچنین، میزان عدم تختی ذکر شده نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از فرآیند استمپینگ، صفحات دوقطبی با تختی کانال و ریب بسیار مناسب تولید نمود.

۴-۳- اثر نیروی شکل‌دهی بر پهنای کانال و ریب

در این بخش، اثر نیروی شکل‌دهی بر پهنای کانال و ریب مورد بررسی

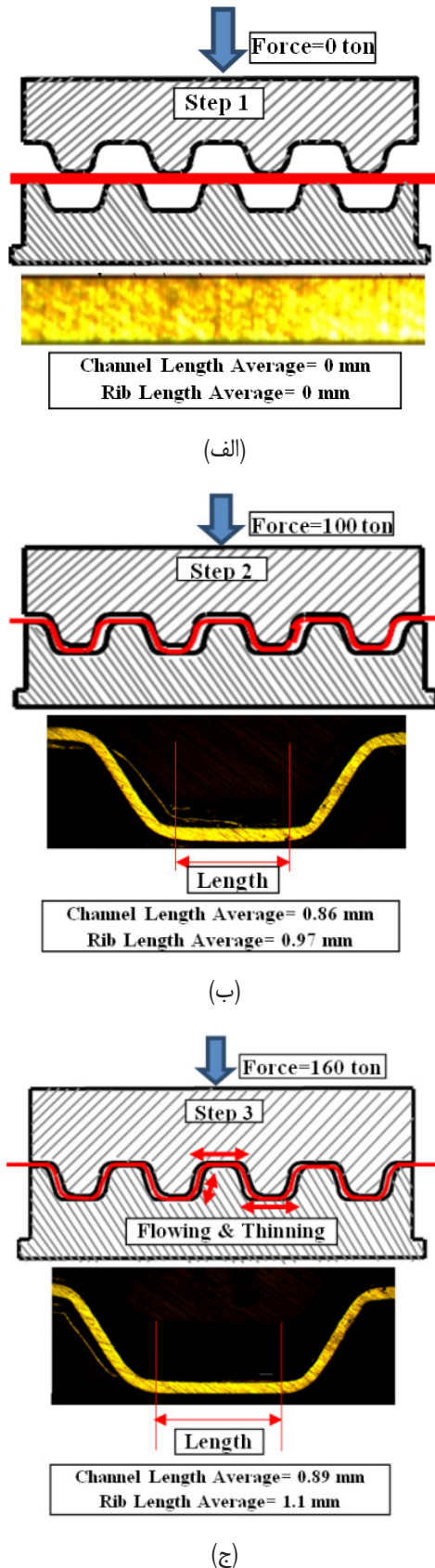


Fig. 8. Effect of forming load on width increment of channel and rib. (a) without load, (b) 100 ton, (c) 160 ton

شکل ۸: اثر نیروی شکل‌دهی روی افزایش پهناهای کانال و ریب. (الف) بدون اعمال نیرو، (ب) ۱۰۰ تن، (ج) ۱۶۰ تن

از دو کفه قالب صلب این امکان را دارد که در صورت کار سخت شدن ورق با افزایش نیروی بیشتر به مجموعه قالب بر این کار سختی غلبه کند و موجب گردد که ورق به گوشه‌های قالب جریان پیدا کرده و میزان پرشدگی افزایش یابد.

شکل ۸ نشان‌دهنده اثر نیروی شکل‌دهی بر پهناهای کانال و ریب می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ نمایش داده شده است، زمانی که هیچ نیرویی به مجموعه اعمال نمی‌شود، ضخامت ورق $0/1$ میلی‌متر است؛ اما با افزایش نیرو از ۱۰۰ تن به ۱۶۰ تن، پهناهای کانال و ریب افزایش و ضخامت ورق کاهش می‌یابد. با افزایش نیروی شکل‌دهی از ۱۰۰ تن به ۱۶۰ تن، مقدار پهناهای ریب و کانال برای مقادیر اندازه‌گیری شده در برش طولی نیز به ترتیب از $0/97$ میلی‌متر به $1/1$ میلی‌متر و $0/86$ میلی‌متر به $0/89$ میلی‌متر افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که مقادیر اندازه‌گیری شده فقط برای قسمت تخت بوده و شعاع‌های گوشه در نظر گرفته نمی‌شود.

۴-۴ توزیع کرنش در صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده

نتایج حاصل از توزیع کرنش در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در کانتور توزیع کرنش مشخص است، با افزایش نیروی شکل‌دهی به مجموعه قالب، کرنش در ورق افزایش یافته و ضخامت ورق کاهش می‌یابد. در واقع، در هر دو نیروی ۱۰۰ تن و ۱۶۰ تن ورق به عمق کانال رسیده است. پس از برداشتن نیرو مشاهده می‌گردد که در نیروی ۱۶۰ تن کرنش بیشتری به ورق اعمال شده و پهناهای کانال و ریب نیز افزایش یافته است. این مهم در حالت تجربی نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. میانگین توزیع ضخامت کانال در سه حالت بدون اعمال نیرو، نیروی ۱۰۰ تن و نیروی ۱۶۰ تن، به ترتیب برابر با $0/1$ ، $0/092$ و $0/08$ میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است که افزایش بیشتر نیرو تأثیری روی افزایش پهناهای کانال‌ها نداشته است.

همان‌طور که در شکل ۹ (الف) نیز نشان داده شده است، در حالتی که نیروی ۱۰۰ تن اعمال می‌شود، این نیرو قادر به این است که ورق را به کف قالب برساند و در واقع عمل شکل‌دهی انجام شود. در شکل ۹ (ب) نیرو به مقدار ۱۶۰ تن افزایش یافته است. با توجه به اینکه نیروی ۱۰۰ تن نیز ورق را به کف قالب می‌رساند، افزایش نیرو تا ۱۶۰ تن تأثیری در افزایش عمق کانال ندارد؛ اما مزیت افزایش نیرو در روش استمپینگ این است که وقتی ورق بین دو کفه قالب تحت نیرو قرار می‌گیرد، ورق جریان یافته و در واقع پهناهای کانال و ریب را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، همان‌طور که از مقایسه حالت‌های (الف) و (ب) مشخص است، با افزایش نیرو، میزان کرنش افزایش یافته و از ضخامت ورق کاسته می‌شود.

۴-۵ توزیع تنش در صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده

یکی از مزیت‌هایی که فرآیند استمپینگ در تولید صفحات دوقطبی فلزی دارد، اعمال نیروی یکنواخت بر واحد سطح می‌باشد که موجب توزیع

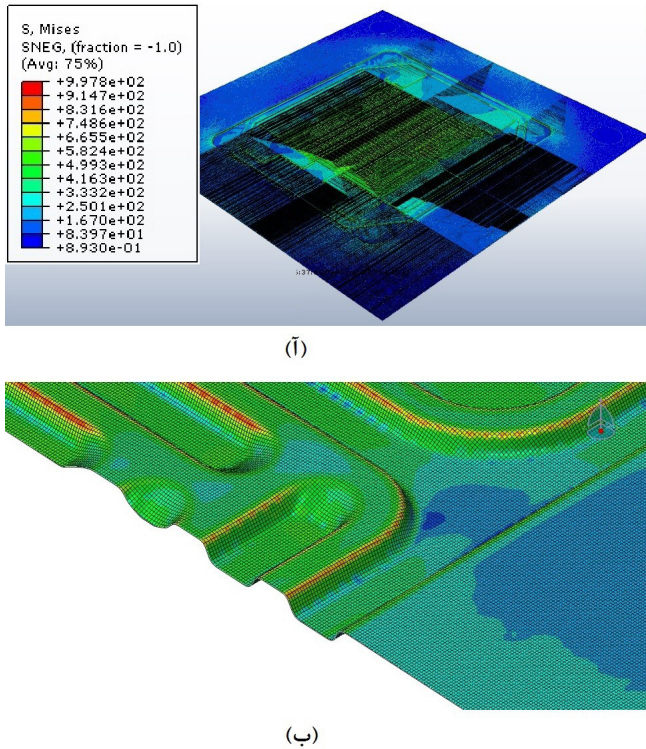


Fig. 10. (a) sheet stress distribution for maximum forming load of 160 ton, (b) view of stress distribution in cross section of formed plate
شکل ۱۰: (آ) توزیع تنش ورق در ماکزیمم نیروی شکل‌دهی ۱۶۰ تن، (ب) نمایی از توزیع تنش در سطح مقطع صفحه شکل داده شده

۵- جمع‌بندی

در این مقاله، اثر نیروی پرس روی شکل‌دهی کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی با الگوی ماریچ موازی که پیچیده‌ترین الگو از دیدگاه شکل‌پذیری می‌باشد، مورد بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود قرار گرفته است. برای تولید صفحات دوقطبی مورد نظر از فرآیند شکل‌دهی استمپ اصلاح‌شده استفاده شده است. در این پژوهش، با توجه به برگشت فنری ورق پس از شکل‌دهی، پهنا و عدم تختی کانال و ریب صفحات تولیدشده در نیروهای شکل‌دهی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در صورت عدم رعایت تلورانس‌های شکل‌دهی، عملکرد پیل سوختی دچار اختلال شده و بازدهی پیل سوختی کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش نیروی شکل‌دهی در فرآیند استمپینگ اصلاح‌شده، برخلاف فرآیندهای شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، موجب پرشدگی گوشه‌های قالب و در نتیجه آن افزایش پهنای کانال و ریب می‌گردد. همچنین، میزان عدم تختی حاصل از برگشت فنری ورق نیز در این فرآیند در بازه تلورانسی مطلوب قرارداده و این صفحات می‌توانند به عنوان صفحات دوقطبی فلزی در پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرند.

منابع

[1] T. Wilberforce, A. Alaswad, A. Palumbo, M. Dassisti, A. Olabi, Advances in stationary and portable fuel cell

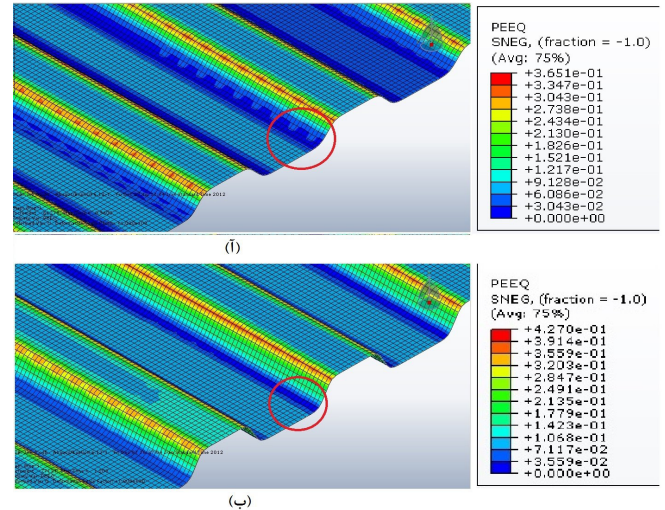


Fig. 9. Sheet strain distribution after springback for forming load of (a) 100 ton, (b) 160 ton.

شکل ۹: توزیع کرنش ورق پس از برگشت فنری در نیروی شکل‌دهی (آ) ۱۰۰ تن، (ب) ۱۶۰ تن.

تنش یکنواخت روی کل سطح این صفحات می‌گردد؛ بنابراین، زمانی که این صفحات شکل‌دهی می‌شوند، هیچ‌گونه تغییر شکل یا تاب‌برداستگی بر روی این صفحات نیست. شکل ۱۰ مقادیر توزیع تنش را در بیشترین نیروی شکل‌دهی نشان می‌دهد. تنش‌های اعمالی در فرآیند استمپ اصلاح‌شده به سطح این صفحات به حدی است که زمانی که دو کفه قالب به یکدیگر رسیده و ورق بین دو کفه قرار دارد، سبب پارگی ورق نمی‌گردد. یا به عبارتی دیگر بیشینه تنش‌های اعمالی از تنش شکست ورق کمتر است.

۴-۶ صفحات دوقطبی فلزی تولیدشده

هدف این پژوهش تولید صفحات دوقطبی سالم با فرآیند شکل‌دهی استمپینگ می‌باشد. جدول ۳ مشخصات این صفحات تولیدی را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که مشخصات ذکر شده در این جدول، نشان‌دهنده بهترین مقادیر به دست آمده می‌باشد که از فرآیند شکل‌دهی استمپینگ به دست آمده است. لذا این صفحات قابلیت استفاده در مجموعه پیل سوختی را دارد.

جدول ۳: مشخصات هندسی صفحه دوقطبی فلزی تولیدشده

Table 3. Geometrical characteristics of produced metallic bipolar plate

مقدار	پارامترهای هندسی
۰/۸۹ میلی‌متر	میانگین پهنای کانال
۱/۱ میلی‌متر	میانگین پهنای ریب
۱۲/۵۵ میکرون	میانگین عدم تختی کانال
۱۰/۲۷ میکرون	میانگین عدم تختی ریب

- [15] R. Taherian, A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection, *Journal of Power Sources*, 265 (2014) 370-390.
- [16] A.E. Fetohi, R.A. Hameed, K. El-Khatib, E.R. Souaya, Study of different aluminum alloy substrates coated with Ni-Co-P as metallic bipolar plates for PEM fuel cell applications, *international journal of hydrogen energy*, 37(14) (2012) 10807-10817.
- [17] D.J. Brett, N.P. Brandon, Review of materials and characterization methods for polymer electrolyte fuel cell flow-field plates, *Journal of fuel cell science and technology*, 4(1) (2007) 29-44.
- [18] R.A. Antunes, M.C.L. Oliveira, G. Ett, V. Ett, Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: a review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8) (2010) 3632-3647.
- [19] S.-W. Choi, S.H. Park, H.-S. Jeong, J. Cho, S. Park, M.Y. Ha, Improvement of formability for fabricating thin continuously corrugated structures in sheet metal forming process, *Journal of mechanical science and technology*, 26(8) (2012) 2397-2403.
- [20] Q. Hu, D. Zhang, H. Fu, K. Huang, Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell—Numerical simulation and experiments, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(25) (2014) 13770-13776.
- [21] M. Elyasi, F.A. Khatir, M. Hosseinzadeh, Manufacturing metallic bipolar plate fuel cells through rubber pad forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2016) 1-13.
- [22] M. Elyasi, F.A. Khatir, M. Hosseinzadeh, Investigation of Die Clearance in Rubber Pad Forming of Metallic Bipolar Plates, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2016).
- [23] M. Elyasi, H.T. Ghadikolaee, M. Hosseinzadeh, Fabrication of metallic bipolar plates in PEM fuel cell using semi-stamp rubber forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2017) 1-12.
- [24] O.M. Belali, S.J. Hosseinipour, J.M. Bakhshi, A. Gorgi, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10) (2014).
- [25] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A. Gorji, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, 14(8) (2014).
- [26] R. Kolahdooz, S. Asghari, S. Rashid-Nadimi, A. applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37) (2016) 16509-16522.
- [2] A. Baroutaji, J. Carton, M. Sajjia, A. Olabi, *Materials in PEM fuel cells*, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, (2016).
- [3] E. Alizadeh, M. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, S. Saadat, Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4) (2016) 3062-3071.
- [4] M.M. Barzegari, E. Alizadeh, A.H. Pahnabi, Grey-box modeling and model predictive control for cascade-type PEMFC, *Energy*, (2017).
- [5] M. Rahimi-Esbo, A. Ranjbar, A. Ramiar, E. Alizadeh, M. Aghaee, Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4) (2016) 3023-3037.
- [6] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*, Academic Press, 2012.
- [7] E. Alizadeh, S. Rahgoshay, M. Rahimi-Esbo, M. Khorshidian, S. Saadat, A novel cooling flow field design for polymer electrolyte membrane fuel cell stack, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(20) (2016) 8525-8532.
- [8] M.M. Barzegari, M. Dardel, E. Alizadeh, A. Ramiar, Dynamic modeling and validation studies of dead-end cascade H₂/O₂ PEM fuel cell stack with integrated humidifier and separator, *Applied Energy*, 177 (2016) 298-308.
- [9] S. Kang, Quasi-three dimensional dynamic modeling of a proton exchange membrane fuel cell with consideration of two-phase water transport through a gas diffusion layer, *Energy*, 90, Part 2 (2015) 1388-1400.
- [10] V. Mehta, J.S. Cooper, Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, *Journal of Power Sources*, 114(1) (2003) 32-53.
- [11] Y.-G. Yoon, W.-Y. Lee, G.-G. Park, T.-H. Yang, C.-S. Kim, Effects of channel configurations of flow field plates on the performance of a PEMFC, *Electrochimica Acta*, 50(2) (2004) 709-712.
- [12] P. Zhou, C. Wu, G. Ma, Contact resistance prediction and structure optimization of bipolar plates, *Journal of Power Sources*, 159(2) (2006) 1115-1122.
- [13] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, Bipolar plates for PEM fuel cells: a review, *International journal of hydrogen Energy*, 30(12) (2005) 1297-1302.
- [14] X. Li, I. Sabir, Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs, *International journal of hydrogen energy*, 30(4) (2005) 359-371.

- (2010) 5269-5277.
- [28] E. Dur, Ö.N. Cora, M. Koç, Effect of manufacturing conditions on the corrosion resistance behavior of metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 196(3) (2011) 1235-1241.
- [29] 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.
- Amirfazli, Integration of finite element analysis and design of experiment for the investigation of critical factors in rubber pad forming of metallic bipolar plates for PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1) (2017) 575-589.
- [27] S. Mahabunphachai, Ö.N. Cora, M. Koç, Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, 195(16)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Ahmadi Khatir, E. Alizadeh, M. Barzegari, M. Momenifar, H. Masroori Saadat, Experimental Investigation and Numerical Simulation of the Pressure Force on the Formation of Metallic Bipolar Plate in the Stamping Process, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 505-516.
DOI: 10.22060/mej.2017.13097.5537



