



تحلیل عددی و تجربی عیب شمشیری شدن در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ورق‌های دو لایه مس-آلومینیوم

هادی گلمکانی^۱، یعقوب دادگر اصل^{۲*}، سید محمدحسین سیدکاشی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

روش‌های شکل‌دهی ورق‌های دولایه به دلیل داشتن خواص دوگانه و کاربرد زیاد آن‌ها در صنایع مختلف توسعه یافته‌اند. در این مقاله به بررسی عددی و تجربی عیب شمشیری شدن در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ورق‌های دولایه مس-آلومینیوم پرداخته شده است. بررسی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر تک‌ایستگاهی انجام شده است. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از آزمایش‌های تجربی، اثر برخی عوامل تأثیرگذار بر عیب شمشیری شدن در این فرایند شامل زاویه شکل‌دهی، ضخامت ورق، اندازه طول بال ورق و جانمایی لایه‌های ورق با استفاده از طراحی آزمایش به روش عاملی کامل و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج با استفاده از روش تحلیل واریانس مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش زاویه شکل‌دهی و اندازه طول بال ورق، میزان عیب شمشیری شدن افزایش و با افزایش ضخامت ورق کاهش می‌یابد؛ همچنین جانمایی لایه‌ها نیز در میزان وقوع عیب شمشیری شدن مؤثر است. نتایج نشان داد، عیب شمشیری شدن در جنس لایه Al-Cu با افزایش اندازه طول بال از ۱۸ به ۲۵ میلی‌متر به ترتیب از ۲/۱۵۲ به ۲/۶۴۶ میلی‌متر افزایش پیدا نمود.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر؛ عیب شمشیری شدن؛ ورق دولایه؛ شبیه‌سازی عددی.

Numerical and Experimental Analysis of Bowing Defect in the Flexible Roll Forming of Copper-Aluminum Double Layer Sheets

Hadi Golmakani¹, Yaghoob Dadgar Asl^{2*}, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi³

¹ MSc. Student, Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

² Assist.. Prof, Mechanical Engineering Department, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

³ Prof, Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

Double-layer sheet forming methods are developed in various industries due to their dual properties and wide application. In this paper, the numerical and experimental investigation of the bowing defect in the flexible roll forming process of double-layer sheets have been discussed. Numerical analysis has been conducted using Abaqus finite element software and experimental tests using a single-station flexible roll forming machine. After validation of the numerical model, the effects of significant parameters on the bowing defect in the flexible roll forming process, including the forming angle, sheet thickness, sheet wing length, and the displacement of sheet layers have been investigated using full factorial design of experiments method and finite element simulations. The results were analyzed using the Analysis of Variance statistical method. The results showed that with increase of the forming angle and wing length, the amount of bowing defect increases while it decreases with the increase of the thickness of the sheet. Also, the arrangement of layers is also effective in the occurrence of the bowing defect. The results showed that the bowing defect in the Al-Cu layer material increased from 2.152 to 2.646 mm with the increase of the wing length from 18 to 25 mm.

Keywords: Flexible Roll Forming; Bowing Defect; Double Layer Sheet; Numerical Simulation.

۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در ساخت قطعات فلزی کاربرد بسیاری دارد [۱، ۲]. به منظور مطالعه و بررسی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، شناخت و اطلاع راجع به فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ضروری است.

دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد از تعدادی ایستگاه تشکیل شده و هر ایستگاه شامل چند غلتک است. غلتک‌ها معمولاً به دو دسته بالایی و پایینی تقسیم می‌شوند، البته در صورت نیاز از غلتک‌های جانبی نیز استفاده می‌شود. در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، با اعمال مقدار شکل‌دهی کم توسط یک‌سری غلتک در هر ایستگاه، خم‌های پیوسته و متوالی در یک نوار فلزی ایجاد می‌شود و سطح مقطع موردنظر شکل می‌گیرد [۳].

در این روش ضخامت و سطح مقطع ورق ثابت است. در سال‌های اخیر استفاده از ورق با ساختارهای مرکب و چندلایه توسعه یافته است [۴]. ورق‌های دولایه فلزی راه حلی مناسب برای تولید محصولات چند کاربردی محسوب می‌شوند که دارای ویژگی‌هایی از قبیل بهبود شکل‌پذیری ورق، افزایش مقاومت در برابر خوردگی و سایش، ایجاد خواص الکتریکی یا مغناطیسی، کاهش وزن و کاهش هزینه می‌باشند. امروزه با پیشرفت فناوری، بسیاری از قطعات به کار رفته در صنایع خودروسازی، نظامی و هوا-فضا از نوع پروفیل‌هایی با سطح مقطع عرضی متغیر است. برای تولید این نوع قطعات از روش شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود [۵، ۶]. در این فرایند، غلتک‌ها علاوه بر حرکت دورانی حول محور خود، حرکت‌های خطی و زاویه‌ای نیز دارند. می‌توان با تغییر در برنامه کنترلی دستگاه موقعیت غلتک‌ها را تغییر داده و با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن محصول جدیدی را تولید کرد. عیوب خاصی در محصولات تولیدی به این روش به دلیل وجود دو منطقه کششی و فشاری در ناحیه انتقال (ناحیه‌ای که در آن عرض پروفیل تغییر می‌کند) مشاهده می‌شود. پس از شکل‌دهی به‌اندازه مشخص، لبه ورق در ناحیه فشاری دچار کاهش طول و در ناحیه کششی دچار افزایش طول می‌شود [۷]. عیوب مهم محصول در این فرایند شامل تابیدگی کف [۸]، پارگی [۹]، اعوجاج لبه [۱۰]، برگشت فنری [۱۱] و شمشیری شدن

[۱۲] است. فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی را می‌توان با بکارگیری روش‌هایی از جمله روش اجزای محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، به طوری که پیش‌بینی و اثر عوامل تأثیرگذار فرایند و طراحی ابزار امکان‌پذیر است. کیم و همکاران [۱۳] توسط برنامه اجزای محدود سه بعدی به نام "Shape-RF" فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد را مدل کرده و عوامل مؤثر را بررسی نمودند. ایشان برای نسبت ضخامت به قطرهای مختلف، شکل ورق اولیه متفاوتی ارائه کردند. لارانگا و همکاران [۱۴] با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد برای پروفیلی از جنس فولاد با استحکام بالا نشان دادند با افزایش اندازه‌ی بال، عیوب هندسی نیز افزایش می‌یابد. آنها همچنین تأثیر گرمایش موضعی با استفاده از تابش لیزر را روی این عیوب بررسی کرده و نتیجه گرفتند در قسمت بال پروفیل، عیوب هندسی ورق را به طور چشم‌گیر کاهش می‌دهد. باتاچاریا و اسمیت [۱۵] تحقیقاتی را روی کرنش طولی در لبه به عنوان یک معیار مهم و تأثیرگذار برای تولید مقاطع کانالی شکل به صورت کاملاً مستقیم و بدون اعوجاج انجام دادند. ایشان پس از انجام یک‌سری آزمایش‌های تجربی، تأثیر ایستگاه‌های اول و آخر شکل‌دهی را بیشتر اعلام کردند و روندنمایی برای انتخاب مناسب غلتک‌ها ارائه دادند. گروچ و همکاران [۱۶] فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را به عنوان روشی مناسب برای تولید قطعات مورد استفاده در بدنه خودرو از فولادهای با استحکام بالا معرفی کردند. آنها همچنین به مقایسه‌ی اقتصادی این روش و روش معمول پرداختند. جیانو و همکاران [۱۷] نیز پدیده پیچ‌خوردگی را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. یک مشکل عمده در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، عیب تابیدگی کف ورق است که اختلاف ارتفاع ایجاد شده در اثر پیچ‌خوردگی ناحیه کف ورق نسبت به طول ورق است. آنها یک مدل تحلیلی را برای عیب تابیدگی در قسمتی از ناحیه کف ورق که با عرض متغیر ایجاد می‌شود، ارائه دادند. ژائو و همکاران [۱۸] با تمرکز بر عیب شکستگی ورق در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، این عیب را مورد بررسی و مطالعه قرار داده و به تجزیه و تحلیل آن با استفاده از معیار شکست، تنش و چگالی پرداختند. در ابتدا که ورق شروع به شکل‌دهی می‌کند، مؤلفه تنش به تدریج افزایش می‌یابد و

موج‌دار شدن لبه جلو و عقب پروفیل را نشان داد که در شکل-دهی غلتکی مواد از پیش‌بریده شده معمول است. اونا و همکاران [۲۴] فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را با کنترل تجربی توسط PLC انجام دادند و نتیجه گرفتند که دلیل مهم ایجاد تابیدگی کف در بخش کششی منطقه انتقال، بوجود نیامدن کرنش‌های کششی به میزان لازم است. آنها برای بهبود این مسئله از نورد موضعی بال پروفیل در این قسمت استفاده کردند. آنها همچنین یک حد تجربی نسبت اندازه‌ی بال به ضخامت ورق را برای جلوگیری از بروز چین‌خوردگی لبه ارائه دادند. وو و همکاران [۲۵] نشان دادند که عیب تابیدگی کف به شدت به کرنش طولی تشکیل شده در لبه قطعه وابسته است. این تحقیقات در طی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف-پذیر از ورق‌های دو لایه فولاد/آلومینیوم در سه ایستگاه انجام شد. آنها عیوبی مانند تابیدگی کف، چروکیدگی، و لایه‌لایه شدن ورق را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که کرنش‌های طولی ناشی از این فرایند به طور قابل‌توجهی بر بروز عیوب شکل‌دهی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، کرنش‌های طولی به شدت به خصوصیات مکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده بستگی دارد. اونا و همکاران [۲۶] با اندازه‌گیری کرنش‌های کف و لبه‌ی پروفیل در نقاط متفاوت در امتداد طول ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، به تجزیه و تحلیل این نتایج و توضیح علت عیب تابیدگی کف پروفیل پرداختند. آنها بروز تابیدگی کف را در نزدیکی بخش فشاری منطقه انتقال با استفاده از انقباض ناشی از شکل‌دهی این ناحیه توضیح دادند. سجاد و همکاران [۲۷] تأثیر پایه نگه‌دارنده پروفیل در خروجی ایستگاه شکل‌دهی را بر روی پدیده شمشیری شدن مورد بررسی قرار دادند. آنها با انجام آزمایش‌های تجربی با پایه نگه‌دارنده و بدون پایه نگه‌دارنده به این نتیجه دست یافتند که وجود پایه نگه‌دارنده پروفیل در خروجی ایستگاه شکل‌دهی باعث کاهش عیب شمشیری شدن در پروفیل خواهد شد. در این روش ضخامت و سطح مقطع ورق ثابت است. کیم و همکاران [۲۸] الگوی بارگذاری را در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مورد

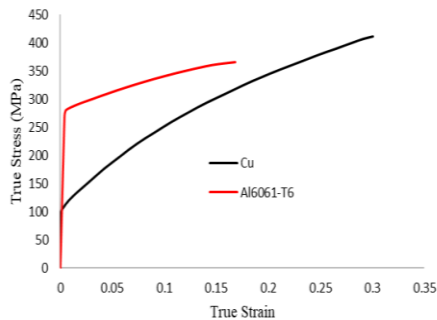
چگالی تا زمان شروع شکست نیز به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. زمانی که در ورق شکست اتفاق می‌افتد، تنش و چگالی به سرعت کاهش یافته و به یک مقدار معین می‌رسند. این یک روش مؤثر برای شبیه‌سازی ترک‌های ظاهر شده در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در ورق U شکل است. دادگر اصل و همکاران [۱۹] پدیده پارگی در ناحیه انتقال لبه‌های خم را که ضخامت ورق نسبت به شعاع خم زیاد است، مورد مطالعه قرار دادند. آنها به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل-دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با سطح مقطع کانالی شکل با استفاده از شش معیار شکست نرم^۱ پرداختند. با مقایسه نتایج به دست آمده از معیارهای شکست نرم و نتایج تجربی مشاهده شد که معیار شکست نرم آرگون^۲، مناسب‌ترین معیار برای بررسی پدیده پارگی است. کسائی و همکاران [۲۰] پدیده چین‌خوردگی را در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ورق‌های فلزی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. چین‌خوردگی فلنج^۳ (موج‌دار شدن لبه) در منطقه عبور بین دو غلتک که در آن سطح مقطع ورق تغییر می‌کند، عیب عمده‌ای در فرایند شکل-دهی غلتکی انعطاف‌پذیر است. شو و همکاران [۲۱] از ۲۰٪ تا ۸۰٪ طول محصول را برای بررسی زاویه برگشت فنر و اختلاف ارتفاع فلنج (لبه) در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقاطع کانالی اندازه‌گیری کردند. میانگین زاویه برگشت فنری و اختلاف ارتفاع به ترتیب ۴٫۲ درجه و ۱٫۲۷ میلی‌متر بدست آمد. نتیجه به‌دست آمده این بود که اگر مولفه‌های تنش فشاری مؤثر به اندازه کافی بزرگ باشند و بتوانند کرنش مؤثر را ایجاد کنند، لبه موج‌دار می‌شود. لیندگرن و اینگمارسون [۲۲] با انجام آزمایش‌های تجربی قابلیت این روش را برای تولید پروفیل‌های کلاهی شکل با عرض یا عمق متغیر نشان دادند. این آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه شش ایستگاهی بر روی ورق‌های فولادی با استحکام بالا انجام گرفت. گولچکن و همکاران [۲۳] نرم‌افزار کاپرا آر-اف را به صورت کوپل شده با نرم‌افزار اجزای محدود مارک‌منتات برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سه بعدی به کار گرفتند. نتایج شبیه‌سازی‌ها

³ Flanging

¹ Soft failure criterion

² Argon soft failure criterion

صلب تعریف می‌شود. رفتار پلاستیک ماده با معرفی نقاط تنش- کرنش مطابق شکل ۱ مدل‌سازی شد.



شکل ۱- منحنی تنش کرنش حقیقی Cu و Al 6061-T6

کرنش طولی بیشینه یک معیار کمی مناسب برای بیان تغییر شکل انجام شده بین دو ایستگاه شکل‌دهی است. تغییر شکل در هر مرحله نباید از حد معینی بیشتر شود تا فرایند به‌طور موفق انجام شود. می‌توان نتیجه گرفت برای هر مرحله یک حد کرنش وجود دارد که بیانگر کرنش طولی مجاز آن مرحله است. استحکام ورق و توان دستگاه شکل‌دهی دو عامل اصلی و مهم برای تعیین حد کرنش می‌باشند.

در مدل طراحی شده، تنها ایستگاه اول شکل‌دهی مقطع کانال شبیه‌سازی شده است. این مدل متشکل از دو ایستگاه است. در ایستگاه صفر عمل شکل‌دهی انجام نمی‌شود. غلتک‌های این ایستگاه استوانه‌ای هستند و فقط برای جلوگیری از ارتعاش ورق استفاده شده‌اند. طول ورق مقداری بیشتر از دو برابر فاصله بین ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده تا همیشه ابتدا و انتهای آن بین دو ایستگاه باشد. همان‌طور که در شکل ۲ پیداست، نحوه قرارگیری ورق به گونه‌ای است که در ابتدا بین غلتک‌های ایستگاه صفر قرار می‌گیرد. سپس وارد ایستگاه شکل‌دهی می‌گردد. تغییرات ناخواسته به‌طور قابل‌ملاحظه از ابتدای ناحیه انتقال شروع و در انتهای ناحیه انتقال پایان می‌پذیرد. این تغییرشکل‌های ناخواسته روی تنش و کرنش ورق پس از شکل‌دهی و توزیع تنش‌های پسماند تأثیر می‌گذارند و باعث عیوبی در محصول مانند تابیدگی کف، اعوجاج لبه، کمانش گوشه‌ها، پیچش، شکست، جدایش، اعوجاج مرکز ورق، پوسته شدن، شمشیری شدن و عدم دقت ابعادی و هندسی می‌شود.

مطالعه قرار دادند. آنها برای اثرات الگوی بارگذاری بر عیب شمشیری شدن دو آزمایش انجام دادند. در آزمایش اول زاویه شکل‌دهی اولیه و نهایی و در آزمایش دوم فقط زاویه شکل‌دهی نهایی را انجام دادند. آنها به این نتیجه دست یافتند که برای کاهش پدیده شمشیری شدن حداکثر افزایش زاویه خم باید پایین انتخاب شود.

در پژوهش‌های پیشین فقط با روش تجربی که بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد به بررسی عیوب محصول در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ورق‌های دولایه پرداخته شده است. در این مقاله شبیه‌سازی عددی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ورق دو لایه مس-آلومینیوم اجرا شده که در تحقیقات پیشین مورد مطالعه نبوده است. سپس به کمک مدل اجزاء محدود، عیب شمشیری شدن ارزیابی شده است. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از نتایج تجربی، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به بررسی زاویه شکل‌دهی، ضخامت ورق، اثر اندازه بال و جابجایی لایه‌ها روی عیب شمشیری شدن در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ورق‌های دولایه پرداخته شده است.

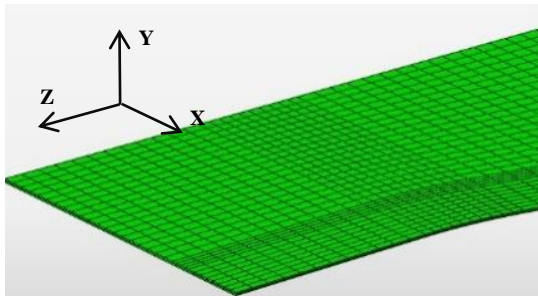
۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

ورق‌های استفاده شده از جنس مس و آلومینیوم Al6061-T6 می‌باشد. چگالی و نسبت پواسون برای Al6061-T6 به ترتیب ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۳۳، و برای Cu ۸۹۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۳۵ است.

برای شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از حل‌گر استاتیک عمومی نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۲۱ استفاده شده است. ورق به صورت یک قطعه تغییر شکل‌پذیر^۱ و به صورت پوسته‌ای تعریف شده است. المان S4R برای شبکه‌بندی انتخاب شد. اندازه المان‌ها بر مبنای تحلیل حساسیت به اندازه مش انتخاب شد. به دلیل تقارن، فقط نصف مقطع مدل شده است. ابتدا مدل در نرم‌افزار سالدورکس مدل‌سازی شده و سپس به آباکوس انتقال داده شده است. از آنجائیکه تغییر شکل غلتک‌ها ناچیز است، غلتک‌ها به صورت

^۱Analytical rigid

مطابق شکل ۴، در شبکه‌بندی ورق برای کف ورق از المان‌های 3×2 میلی‌متر، در ناحیه خم ورق از المان‌های ریزتر 1×3 میلی‌متر به دلیل تمرکز تغییرشکل بیشتر در این ناحیه و در ناحیه بال ورق از المان‌های 4×3 میلی‌متر استفاده شده است. غلتک‌ها به عنوان قطعات صلب با قطر 57 میلی‌متر و زاویه 30 درجه مدل‌سازی شدند. کف ورق در راستای x ثابت در نظر گرفته شد تا از تغییرات احتمالی در جهت x جلوگیری گردد. تماس سطح به سطح با ضریب اصطکاک 0.1 در نظر گرفته شد.



شکل ۴- شمایی از مش‌بندی استفاده شده در ورق

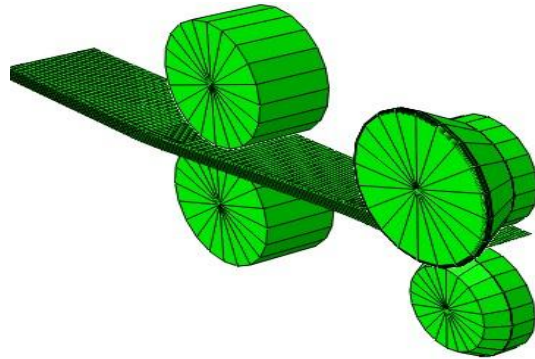
۳- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در دانشگاه شهیدرجایی و ساخت ورق‌ها نیز در محل این دانشگاه انجام پذیرفت [۹]. ورق‌های دولایه از مس (مس خالص تجاری شرکت مس باهنر کرمان) Cu و آلومینیوم Al6061-T6 ساخته شده است و خواص مکانیکی آنها استخراج شده از آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8 در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق‌های Al6061-T6 و Cu

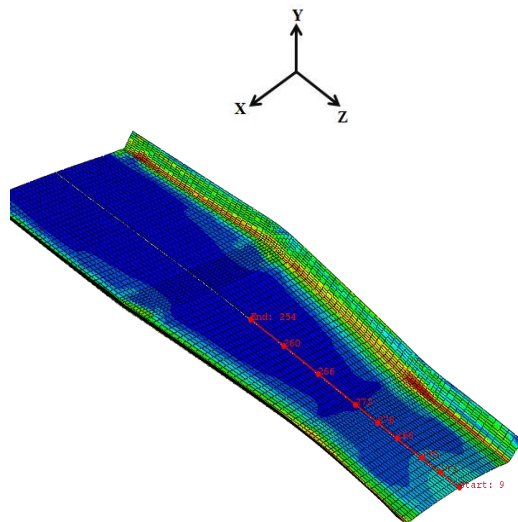
جنس لایه	Cu	Al 6061-T6
استحکام شکست (MPa)	۱۶۵/۷۹	۲۰۷/۶۹
استحکام کششی نهایی (MPa)	۲۲۵/۵۳	۳۱۰/۵۷
استحکام تسلیم (MPa)	۱۹۰/۵۶	۲۷۶/۵۴
مدول یانگ (GPa)	۱۲۴	۶۸/۹

می‌توان از کرنش طولی برای پیش‌بینی عیوب استفاده کرد؛ زیرا کرنش طولی بیش از حد در لبه بال ورق باعث ایجاد عیب‌هایی می‌شود.



شکل ۲- مدل طراحی شده نصف ورق و غلتک‌ها

یکی از راه‌های صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌های تجربی، مقایسه ابعادی نمونه‌هاست. برای مقایسه نمونه‌ها از نظر ابعادی نیاز به انتخاب یک روش اندازه‌گیری با دقت بالا است. در شکل ۳ برای اندازه‌گیری عیب شمشیری شدن در نرم‌افزار و آزمایش تجربی مسیری در وسط مقطع ورق که همان خط قرینه، در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- مسیر اندازه‌گیری شمشیری شدن در وسط مقطع ورق

تحت زاویه ۲۵- تا ۲۵ درجه قابل چرخش جهت حرکت در ناحیه انتقال می‌باشند. در این آزمایش زاویه شکل‌دهی ۳۰ درجه و شعاع خم ۲ میلی‌متر استفاده شده است. سرعت تغذیه ورق نیز معادل ۴/۳ میلی‌متر بر ثانیه است. پس از تنظیم دستگاه، ورق در موقعیت مناسب برای تغذیه قبل از ایستگاه شکل‌دهی مستقر گردید که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمایی از شکل‌دهی ورق دولایه توسط دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

در شکل ۷ نمونه محصول نهایی تولید شده پروفیل توسط دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر نشان داده شده است.



شکل ۷- محصول نهایی با ترتیب لایه الف) مس-آلومینیوم (Al-Cu)، ب) آلومینیوم-مس (Cu-Al)

هرکدام از ورق‌ها با ضخامت ۱ میلی‌متر توسط چسب تجاری ام‌اس پلی‌باند سفید به هم چسبانده شده‌اند. نمونه با لایه بالایی آلومینیوم و لایه زیری مس به‌عنوان نمونه نوع الف و با تعویض جانمایی به عنوان نمونه نوع ب تعریف شده است. هندسه پروفیل با عرض متغیر، عرض اولیه ورق ۲۴۳mm، عرض کوچک‌تر آن ۱۷۶mm، شعاع انحنا ۴۰۰mm و اندازه بال ۱۸mm انتخاب گردید. تغییر مقطع پروفیل در ناحیه انتقال و به شکل کماتی از دایره انجام می‌پذیرد. برای ورق از پیش بریده شده، خط خمی موازی با لبه در امتداد طول ورق به فاصله‌ای برابر اندازه بال پروفیل ترسیم می‌شود. شکل ۵ نمایی از ورق پیش بریده شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- نمایی از ورق‌های پیش بریده شده

ابتدا سطوح ورق‌های بریده شده کاملاً توسط چسب پلی‌باند سفید آغشته شد که به‌صورت خمیری و دارای مقاومت مکانیکی بالا و بر پایه فناوری پلیمرهای هیبریدی است. هر دو ورق بطور دقیق روی هم گذاشته شده است، بگونه‌ای که لبه‌های هر دو ورق در یک راستا قرار بگیرند. ورق دولایه حاصل به مدت ۱۶ ساعت در زیر پرس هیدرولیکی ۵ تن تحت فشار قرار گرفت تا سطوح هر دو ورق کاملاً به هم بچسبند.

توان دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها ۱/۵ کیلووات است. پس از بستن پایه دستگاه، فاصله عمودی غلتک‌های ایستگاه از طریق جابجایی شفت بالایی به اندازه ضخامت ورق مورد آزمایش (ضخامت هر ورق ۱ میلی‌متر و مجموع ورق دولایه که ۲ میلی‌متر) تنظیم گردید. با قرار دادن فیله‌هایی به اندازه ضخامت ورق بین غلتک‌ها، این فاصله بصورت دقیق‌تر قابل تنظیم است. حرکت محورهای متصل به پایه‌ها توسط موتورهای DC انجام می‌گیرد. غلتک‌ها

(۳) $t = \frac{\theta}{\omega}$
 شرط پیوستگی شیب بال در ابتدای ناحیه تغییر شکل، از رابطه زیر برای طول تغییر شکل به دست می‌آید [۱۸]:

$$L = a \sqrt{\frac{8}{3} \left(\frac{a}{t}\right) \theta_p} \quad (۴)$$

که θ_p اندازه افزایش زاویه خم بین دو ایستگاه متوالی بر حسب رادیان است. رابطه ۴ پیشنهاد می‌کند که طول تغییر شکل L ، مستقل از خواص ماده است. دلیل این موضوع، فرض رفتار مادی صلب-کاملاً پلاستیک است.

۵- طراحی آزمایش و تحلیل واریانس

تحلیل‌های آماری با استفاده از روش تحلیل واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار مینی‌تب انجام شده است. عوامل و سطوح تعیین شده در جدول ۲ جهت اندازه‌گیری عیب شمشیری شدن آورده شده است. با این روش اثرات اصلی و متقابل عوامل روی هم در نظر گرفته می‌شود. در ترتیب لایه، زمانی که بیان می‌شود Al-Cu یعنی لایه بالا Al و لایه پایین Cu است و برعکس.

جدول ۲- عوامل و سطوح تعیین شده جهت طراحی آزمایش

عامل	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
زاویه شکل-دهی	۳۰ درجه	۴۰ درجه	۵۰ درجه
ضخامت ورق	۰/۵ میلی‌متر	۰/۷۵ میلی‌متر	۱ میلی‌متر
اندازه طول بال	۱۸ میلی‌متر	۲۵ میلی‌متر	
ترتیب لایه	Al-Cu	Cu-Al	

طراحی آزمایش^۱ یک روش علمی برای بررسی اثرات چند متغیر روی یک متغیر خارجی (پاسخ) است. در ارزیابی نتایج، اثر عوامل و سطوح تعیین شده جهت طراحی آزمایش و تأثیر هر کدام بر عیب شمشیری شدن بصورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر از روش طراحی عاملی کامل^۲ استفاده شد. با این روش عوامل به صورت مجزا

برای اندازه‌گیری از ساعت اندازه‌گیری مطابق شکل ۸ استفاده شده است. نمونه بدون هیچ قید و بندی که تحت فشار قرار گیرد و باعث تغییر شکل موضعی گردد، به‌طور آزاد روی میز دستگاه فرز قرار داده شد و پایه ساعت اندازه‌گیری به بدنه دستگاه فرز متصل گردید. ساعت در ابتدای ورق قرار داده شد و خار بزرگ ساعت بر روی صفر تنظیم گردید. با حرکت دادن میز، ورق تا رسیدن به انتهای ورق از زیر ساعت حرکت داده شد. بیشترین عدد نشان داده شده توسط ساعت بیشینه جابجایی کف ورق است.



شکل ۸- روش اندازه‌گیری تجربی میزان عیب

۴- معادله‌های سرعت، زمان و طول تغییر شکل

زاویه دوران غلتک‌ها (θ) به اندازه‌ای است که طولی از ورق که بین ایستگاه صفر و ایستگاه اول (L) است، از بین آن‌ها عبور کند. میزان دوران از رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$\theta = \frac{L}{R} \quad (۱)$$

در این رابطه R شعاع غلتک‌ها است. زمان این مرحله بر اساس سرعتی که برای خط در نظر گرفته می‌شود، تعیین می‌شود. سرعت خطی باید به اندازه‌ای باشد که شرط شبه‌استاتیک بودن فرایند را فراهم کند. سرعت دورانی غلتک‌ها (ω) از رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (۲)$$

که V سرعت خطی است. زمان این مرحله (t) از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

^۲ Full factorial

^۱ Design of Experiments

از یکدیگر و تأثیر متقابل عوامل روی هم در نظر گرفته می-شوند. این طراحی منجر به ۳۶ مورد شبیه سازی گردید که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

است، اثر عوامل تعیین شده روی عیب شمشیری شدن معنادار است.

جدول ۴- تحلیل واریانس

Source	Seq SS	Contribution	F-Value	P-Value
Model	49/6088	98/86%	216/54	0/000
Linear	48/8973	97/44%	355/72	0/000
Roller angle	26/5252	52/86%	578/90	0/000
Thickness	17/0902	34/06%	372/98	0/000
Layer	0/8550	1/70%	37/32	0/000
Wing length	4/4268	8/82%	193/22	0/000
2-Way Interactions	0/7115	1/42%	7/76	0/000
Angle*Thickness	0/7115	1/42%	7/76	0/000
Error	0/5728	1/14%		
Total	50/1816	100/00%		

جدول ۳- طراحی آزمایش شبیه سازی

Roller angle (degree)	Thickne ss (mm)	Layer	Wing length (mm)	Bow defect (mm)
۳۰	۰/۵	Al-Cu	۱۸	۳/۲۴
۴۰	۰/۵	Al-Cu	۱۸	۴/۱۲
۵۰	۰/۵	Al-Cu	۱۸	۵/۷۳
۳۰	۰/۵	Al-Cu	۲۵	۳/۹۸
۴۰	۰/۵	Al-Cu	۲۵	۴/۸۹
۵۰	۰/۵	Al-Cu	۲۵	۶/۵۸
۳۰	۰/۵	Cu-Al	۱۸	۲/۹۶
۴۰	۰/۵	Cu-Al	۱۸	۳/۸۷
۵۰	۰/۵	Cu-Al	۱۸	۴/۹۸
۳۰	۰/۵	Cu-Al	۲۵	۳/۶۷
۴۰	۰/۵	Cu-Al	۲۵	۴/۵۵
۵۰	۰/۵	Cu-Al	۲۵	۶/۳۴
۳۰	۰/۷۵	Al-Cu	۱۸	۲/۷۴
۴۰	۰/۷۵	Al-Cu	۱۸	۳/۶۴
۵۰	۰/۷۵	Al-Cu	۱۸	۴/۶۳
۳۰	۰/۷۵	Al-Cu	۲۵	۳/۱۷
۴۰	۰/۷۵	Al-Cu	۲۵	۴/۳۸
۵۰	۰/۷۵	Al-Cu	۲۵	۵/۲۴
۳۰	۰/۷۵	Cu-Al	۱۸	۲/۴۶۷
۴۰	۰/۷۵	Cu-Al	۱۸	۳/۶۲
۵۰	۰/۷۵	Cu-Al	۱۸	۴/۳۵
۳۰	۰/۷۵	Cu-Al	۲۵	۲/۷۶
۴۰	۰/۷۵	Cu-Al	۲۵	۴/۲۸
۵۰	۰/۷۵	Cu-Al	۲۵	۵/۰۱
۳۰	۱	Al-Cu	۱۸	۱/۹۵۴
۴۰	۱	Al-Cu	۱۸	۲/۵۳
۵۰	۱	Al-Cu	۱۸	۳/۶۵
۳۰	۱	Al-Cu	۲۵	۲/۴۵۹
۴۰	۱	Al-Cu	۲۵	۳/۳۲
۵۰	۱	Al-Cu	۲۵	۴/۳۶
۳۰	۱	Cu-Al	۱۸	۱/۶۵۷
۴۰	۱	Cu-Al	۱۸	۲/۱۴
۵۰	۱	Cu-Al	۱۸	۳/۲۸
۳۰	۱	Cu-Al	۲۵	۲/۰۸۲
۴۰	۱	Cu-Al	۲۵	۲/۸۹
۵۰	۱	Cu-Al	۲۵	۴/۲۹

۶- نتایج و بحث

۶-۱- صحت نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی

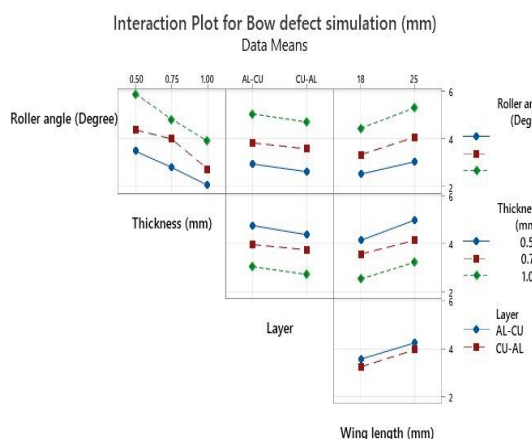
برای صحت سنجی شبیه سازی های انجام شده، آزمایش های تجربی روی ورق های از پیش بریده شده دقیقاً مطابق با ابعاد و جنس مشخص شده در شبیه سازی انجام گرفت و تأثیر زاویه شکل دهی، ضخامت ورق، اندازه طول بال ورق و ترتیب لایه های ورق بر عیب شمشیری شدن و همچنین میزان درصد خطا بررسی گردید. در جدول ۵، نتایج شبیه سازی و تجربی عیب شمشیری شدن در زاویه شکل دهی ۳۰ درجه با ترتیب جنس لایه ها و طول بال های متفاوت مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می شود، میزان درصد خطا بین نتایج شبیه سازی و تجربی کمتر از ۱۰٪ است که می توان به نتایج شبیه سازی اعتماد کرد.

جدول ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی و درصد خطا

زاویه	ضخام	لایه	طول بال	عیب	عیب	درصد
				عددی	تجربی	خطا
۳۰	۱	Al-Cu	۱۸	۱/۹۵۴	۲/۱۵۲	۹/۲۰
۳۰	۱	Al-Cu	۲۵	۲/۴۵۹	۲/۶۴۶	۷/۰۶
۳۰	۱	Cu-Al	۱۸	۱/۶۵۷	۱/۸۱۸	۸/۸۵
۳۰	۱	Cu-Al	۲۵	۲/۰۸۲	۲/۲۶۵	۸/۰۷

در جدول ۴ نتیجه اثر عوامل تاثیر گذار بر عیب شمشیری شدن آورده شده است. مقدار ۰/۹۵٪ برای سطح اطمینان در نظر گرفته شده است (α=0/05)، از آنجا که مقدار P-Value کمتر از 0.05

ضخامت و جنس لایه ورق ثابت، چنانچه اندازه طول بال افزایش یابد، پدیده شمشیری شدن نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در جدول ۴ مشخص شد، غیر از دو عامل زاویه غلتک و ضخامت، سایر عوامل دارای اثر متقابل معنادار نیستند.



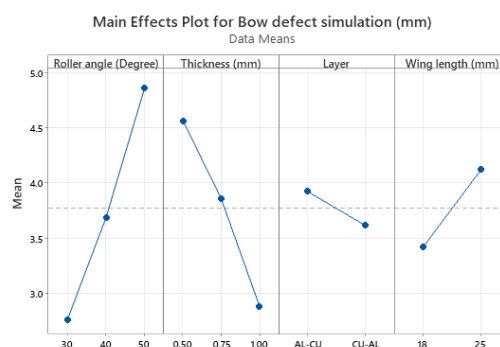
شکل ۱۰- نمودار اثر متقابل عوامل تأثیرگذار روی عیب شمشیری شدن ورق دولایه

۳-۶- اثر زاویه شکل‌دهی و ترتیب لایه‌ها

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که اندازه زاویه شکل‌دهی روی کرنش‌های طولی در لبه ورق بسیار تأثیرگذار است. حد کرنش طولی ورق برابر ۰/۰۵ است. انتخاب بیش از حد زاویه شکل‌دهی باعث ایجاد کرنش‌های طولی زیاد در تمامی مراحل، ناپیکنواختی شکل‌دهی در ایستگاه، اعوجاج در لبه ورق و تشدید عیب شمشیری شدن می‌شود؛ بنابراین وقتی شکل‌دهی در زاویه کمتر صورت گیرد، تغییر شکل کمتری در ورق ایجاد می‌شود و در نتیجه کرنش‌های طولی کمتری در لبه ورق به‌وجود می‌آید که باعث کاهش عیب شمشیری شدن می‌گردد. پدیده شمشیری شدن در نتیجه تغییر شکل‌های مختلف ایجاد شده در لبه بال در اثر فشار و کشش در دو ناحیه فشاری (محدب) و کششی (مقعر) ورق است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج شبیه‌سازی در زاویه‌های متفاوت برای پدیده شمشیری شدن نشان داده شده است.

۲-۶- نتایج طراحی آزمایش

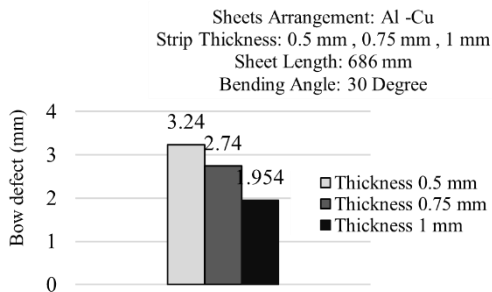
شکل ۹ نمودار اثرات اصلی تأثیرگذار بر عیب شمشیری شدن در نتایج شبیه‌سازی را با استفاده از تحلیل نرم‌افزار Minitab نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، زاویه شکل‌دهی بیشترین عامل تأثیرگذار است؛ همچنین در سه زاویه شکل‌دهی متفاوت، با افزایش زاویه شکل‌دهی مقدار عیب شمشیری شدن افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت ورق، پدیده شمشیری شدن کاهش می‌یابد. در ضخامت و زاویه شکل‌دهی ثابت، با افزایش اندازه طول بال ورق سطح بیشتری از ورق با غلتک‌ها در تماس است و طول تغییر شکل نیز افزایش می‌یابد. با افزایش طول تغییر شکل کرنش‌های طولی لبه نیز افزایش یافته و به دنبال آن شمشیری شدن محصول خروجی نیز بیشتر می‌شود. ترتیب قرارگیری جنس لایه ورق دیگر عامل تأثیرگذار است، بطوریکه هنگامی که آلومینیوم در بالا قرار دارد، مقدار عیب شمشیری شدن بیشتر است. درصد تأثیر هر یک از عوامل عبارتند از: زاویه شکل‌دهی ۵۲/۸۶٪، ضخامت ۳۴/۰۶٪، اندازه طول بال ۸/۸۲٪ و جنس لایه ۱/۷۰٪ می‌باشند.



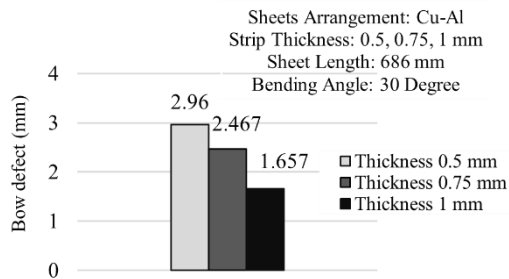
شکل ۹- نمودار اثرات اصلی عوامل تأثیرگذار بر عیب شمشیری شدن ورق دولایه

در شکل ۱۰ اثر متقابل زاویه شکل‌دهی، ضخامت ورق، اندازه طول بال و جانمایی ورق روی یکدیگر نشان داده شده است. نمودار اثر متقابل نشان می‌دهد که در سه زاویه متفاوت ۴۰، ۳۰ و ۵۰ درجه، هرچه ضخامت ورق افزایش یابد و لایه بالایی مستحکم‌تر باشد، در هر سه زاویه پدیده شمشیری شدن کاهش می‌یابد. در زاویه شکل‌دهی ثابت و در سه ضخامت متفاوت در حالتی که لایه بالا دارای استحکام بیشتر باشد، عیب شمشیری شدن کاهش پیدا می‌کند. همچنین در زاویه شکل‌دهی،

شمشیری شدن محصول خروجی بیشتر شود؛ اما با توجه به افزایش ضخامت ورق، مقاومت ورق در برابر تغییر شکل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به رفتار الاستیک-پلاستیک مواد در شکل‌گیری تنش‌های داخلی و پسماند، هرچه ضخامت ورق بیشتر گردد، نیروی بیشتری جهت تغییر شکل لازم است؛ در نتیجه، در ورق مستحکم‌تر، کرنش طولی کمتری ایجاد می‌شود. از طرفی، با کاهش کرنش طولی در ورق، شمشیری شدن نیز کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی در زاویه شکل‌دهی ثابت و ضخامت‌های مختلف در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.



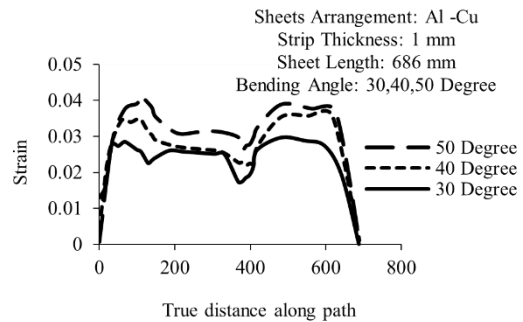
شکل ۱۴- مقایسه عیب شمشیری شدن در زاویه شکل‌دهی ۳۰ درجه در ضخامت‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ میلی‌متر



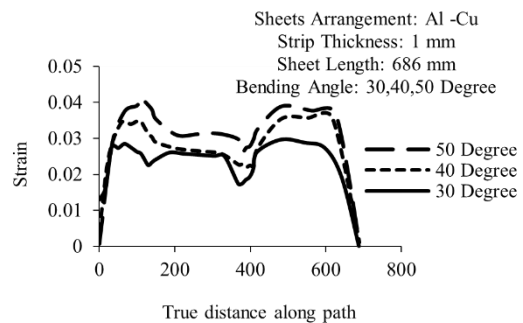
شکل ۱۵- مقایسه عیب شمشیری شدن در زاویه شکل‌دهی ۳۰ درجه در ضخامت‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ میلی‌متر

۶-۵- اثر تغییر اندازه طول بال ورق

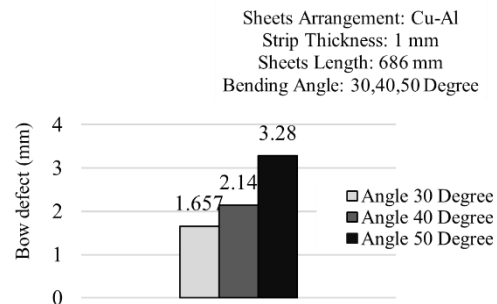
همان‌طور که در رابطه ۴ مشخص است در ضخامت و زاویه شکل‌دهی ثابت، با افزایش اندازه طول بال ورق سطح بیشتری از ورق با غلتک‌ها در تماس است و طول تغییر شکل نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود با افزایش طول تغییر شکل کرنش‌های طولی لبه نیز افزایش یافته، و به دنبال آن



شکل ۱۱- مقایسه کرنش طولی لبه در زوایای شکل‌دهی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه



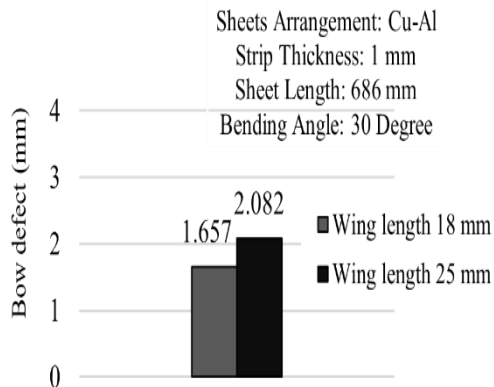
شکل ۱۲- عیب شمشیری شدن در زوایای شکل‌دهی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه



شکل ۱۳- مقایسه عیب شمشیری شدن در زوایای شکل‌دهی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه

۶-۴- اثر ضخامت ورق

افزایش ضخامت ورق باعث کاهش طول تغییر شکل می‌شود. همان‌طور که در رابطه ۴ مشخص است، در فاصله کوتاه‌تری از طول ورق شکل‌دهی انجام می‌گیرد و در نتیجه سرعت شکل‌دهی افزایش خواهد یافت. پیش‌بینی می‌شود که با افزایش سرعت شکل‌دهی کرنش طولی لبه نیز افزایش یابد و



شکل ۱۸- مقایسه عیب شمشیری شدن در زاویه شکل- دهی ۳۰ درجه و اندازه بال ۲۵ میلی‌متر

۷- نتیجه‌گیری

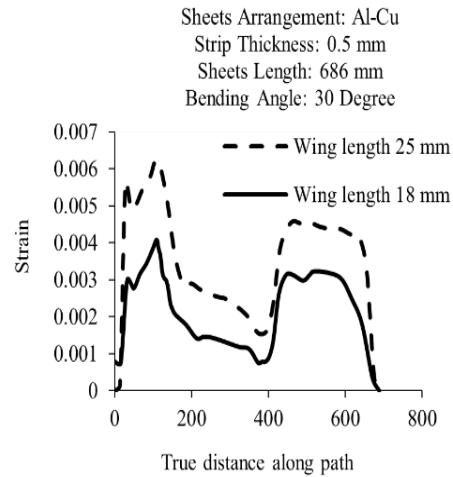
در این مقاله به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ورق‌های دولایه به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است. نتایج بدست آمده عبارتند از:

- وقتی شکل‌دهی در زاویه کمتر صورت گیرد، باعث کاهش عیب شمشیری شدن می‌گردد.
- انتخاب بیش از حد اندازه زاویه شکل‌دهی باعث ایجاد نایکنواختی شکل‌دهی، اعوجاج در لبه ورق و تشدید عیب شمشیری شدن می‌شود.
- با افزایش اندازه طول بال ورق، کرنش‌های طولی لبه نیز افزایش یافته، و به دنبال آن شمشیری شدن محصول خروجی نیز بیشتر می‌شود.
- به دلیل تفاوت خواص مکانیکی لایه بالایی و لایه پایینی و تغییر میزان برگشت فنری، با جابجا نمودن لایه‌ها میزان عیب شمشیری شدن نیز تغییر می‌کند.

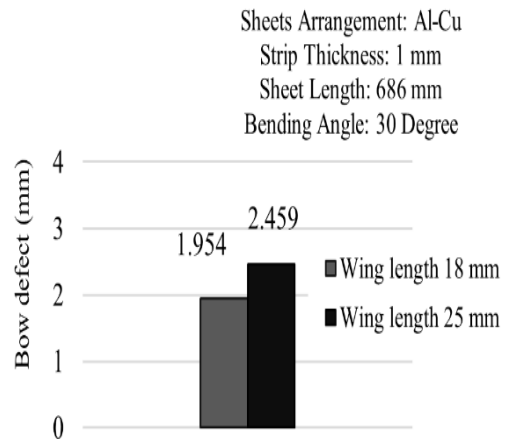
تقدیر و تشکر

بدینوسیله از آزمایشگاه شکل دادن فلزات دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی و آقای دکتر ولی‌اله پناهی‌زاده بابت همکاری‌های بی‌دریغشان در انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش قدردانی می‌گردد.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است، عیب شمشیری شدن محصول نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۱۶- مقایسه کرنش طولی لبه در شبیه‌سازی با زاویه شکل‌دهی ۳۰ درجه و اندازه بال ۲۵ و ۱۸ میلی‌متر



شکل ۱۷- مقایسه عیب شمشیری شدن در زاویه شکل- دهی ۳۰ درجه و اندازه بال ۲۵ میلی‌متر

- [11] Su C, Liu J, Zhao Z, Lou S, Wang R, Yang L, (2020) Research on roll forming process and springback based on five-boundary condition forming angle distribution function. *J. Mech. Sci. Tech.* 34: 5193-5204.
- [12] Safdarian R, M. Naeini H (2015) The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section. *Thin-Walled Structures* 92: 130-136.
- [13] Kim N, Kang B, Lee S (2003) Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method. *J. Materials Processing Technology* 142(2): 479-486.
- [14] Larranaga J, Galdos L, Garcia C, Ortubay R, Arrizabalaga G (2008) Flexible roll forming process reliability and optimisation methods. *Int J M* :688-689.
- [15] Bhattacharyya D, Smith P (1984) The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness. *Advanced Technology of Plasticity* 1:422-427.
- [16] Groche P, Beiter P, Henkelmann M (2008) Prediction and inline compensation of springback in roll forming of high and ultra-high strength steels. *Production Engineering* 2: 401-407.
- [17] Jiao J, Rolfe B, Mendiguren J, Weiss M (2015) An analytical approach to predict web-warping and longitudinal strain in flexible roll formed sections of variable width. *Int. J. Mech. Sci.* 90: 228-238.
- [18] Zhao W, Yan Y, Wang HB, Gao JF. Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming (2013) *Advanced Materials Research* 6(83): 604-607.
- [19] Dadgar Asl Y, Sheikhi M, Pourkamali Anaraki A, Panahzadeh R V, Hoseinpour Gollo M (2017) Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. *The Int. J. Adv. Manufac. Tech.* 91: 1481-1492.
- [20] Kasaei MM et al. (2014) Flange wrinkling in flexible roll forming process. *Procedia Engineering* 31: 245-250.
- [21] Sheu JJ, Liang CF, Yu CH, Hsu, WC, Lee PK (2018) Flexible roll forming of U-section product with curved bending profile using advanced high strength steel. *Procedia Manufacturing* 15: 782-787.
- [22] Lindgren M, Ingmarsson LO (2009) 3D Roll-forming of Hat-profile with Variable Depth and Width. in *Rollform09 1st International congress on roll forming*, Bilbao, Spain, 14-15 October.
- [23] Gulceken E, Abeé A, Sedlmaier A, Livatyali H (2007) Finite element simulation of flexible roll forming: A case study on variable width U channel. in *4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds* 21-23.

مراجع

- [۱] بادپروا حسن، مسلمی نائینی حسن، کسای محمد، دادگراصل یعقوب. (۱۴۰۱) "بررسی عددی و تجربی طول تغییرشکل در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر". مکانیک سازه ها و شاره؛ ۱۱(۶): ۱-۱۴.
- [۲] پناهی زاده ولی اله، دادگراصل یعقوب، افشین سولماز. (۱۴۰۰) "تحلیل عددی و تجربی عیب برگشت فنری در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر با استفاده از معیارهای تسلیم ناهمسانگرد". مکانیک سازه ها و شاره ها؛ ۱۱(۴): ۹۳-۱۰۵.
- [۳] حاجی احمدی سعید، مسلمی نائینی حسن، طالبی قادیکلایی حسین، صفدریان رسول، زین العابدین بیگی علی. (۱۴۰۲) "مطالعه برگشت فنری پروفیل های سوراخدار در فرایند شکل دهی غلتکی". کارآفن.
- [۴] دیلمی عضدی حامد، بادپروا حسن، زین العابدین بیگی علی. (۱۴۰۱) "بهینه سازی ورق دو لایه AA3105-St12 در فرایند شکل دهی تدریجی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک چند جهته". مهندسی مکانیک مدرس؛ ۲۲(۲): ۱۲۱-۱۳۲.
- [5] Dadgar Asl Y, Woo Y, Kim Y, Moon YH (2020) Non-sorting multi-objective optimization of flexible roll forming using artificial neural networks. *The Int. J. Adv. Manufac. Tech.* 107:2875-2888.
- [۶] شمشیری مهدی، پناهی زاده ولی اله، دادگراصل یعقوب. (۱۴۰۱) "بررسی عددی و تجربی اثر گرمای موضعی روی کاهش عیب برگشت فنری در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر". مهندسی ساخت و تولید ایران؛ ۹(۲): ۳۵-۴۴.
- [7] Park JC, Yang DY, Cha M, Kim D, Nam JB, (2014) Investigation of a new incremental counter forming in flexible roll forming to manufacture accurate profiles with variable cross-sections. *Int. J. Machine Tools and Manufacture* 86: 68-80.
- [8] Moneke M, Groche P (2021) The origin of end flare in roll formed profiles. *Int. J. Material Forming* 14(6): 1439-1461.
- [۹] دادگراصل یعقوب، شیخی محمد مراد، پورکمالی انارکی علی، پناهی زاده ولی اله، حسین پور محمد. (۱۳۹۵) "تحلیل تجربی و عددی پدیده پارگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر با استفاده از معیارهای شکست نرم". مهندسی مکانیک مدرس؛ ۱۶(۵): ۳۲۹-۳۳۸.
- [10] Liang C, Li S, Liang J, Li J (2021) Method for Controlling Edge Wave Defects of Parts during Roll Forming of High-Strength Steel. *Metals*, 12(1): 53-65.

- machine. *Advanced Materials Research* 576: 137-140.
- [27] Sajjad M, Murugesan M, Jung DW (2020) Longitudinal bow estimation of U-shape profile in cold roll formed for commercial aluminum alloys. *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res* 9:1097-1103.
- [28] Kim JH, Woo YY, Hwang TW, Han SW, Moon YH (2016) Effect of loading pattern on longitudinal bowing in flexible roll forming. *J. Mech. Sci. Tech.* 30: 5633-563
- [24] Ona H, Sho R, Nagamachi T, Hoshi K (2010) Development of flexible cold roll forming machine controlled by PLC. *Steel research international* 81(9): 182-185.
- [25] Woo YY, Oh IY, Hwang TW, Moon YH (2020) Analysis of shape defects during flexible roll forming of steel/aluminum double-layered blanks. *Int. J. Mat. Form.* 13: 861-872.
- [26] Ona H, Shou I, Hoshi K (2012) On strain distributions in the formation of flexible channel section development of flexible cold roll forming