



بررسی عددی و تجربی عیب چین خوردگی لبه در فرایند شکل دهی غلتکی سرد مقاطع عریض

حسین محمدی نجف آبادی¹، حسن مسلمی نایینی^{2*}، رسول صفدریان³، داود اکبری⁴، محمد مهدی کسای⁵، بهنام عباسزاده¹

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

5- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین

* تهران، صندوق پستی 111-14115، moslemi@modares.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

شکل دهی غلتکی سرد، یک فرایند شکل دهی پیچیده است که در آن کیفیت محصولات به شدت وابسته به پارامترهای فرایند است. عیب چین خوردگی لبه ورق یکی از عیوب رایج در فرایند شکل دهی غلتکی سرد مقاطع عریض می باشد. چین خوردگی لبه باعث بروز مشکلاتی از قبیل کاهش کیفیت ابعادی، سایش غلتک های شکل دهی به دلیل تماس با لبه چین خورده و توزیع غیریکنواخت نیروهای شکل دهی در طول خط تولید می شود. بدین منظور برای بررسی عیب چین خوردگی در این پژوهش از شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش های تجربی استفاده شد. ابتدا برای تأیید نتایج شبیه سازی، یک مدل دقیقاً مطابق با آزمایش های تجربی متشکل از یک ایستگاه نگه دارنده و یک ایستگاه شکل دهی برای تولید یک پروفیل دوزنقه ای ایجاد شد. سپس با شبیه سازی این فرایند در نرم افزار اجزای محدود آباکوس و مقایسه توزیع کرنش طولی در نزدیکی لبه ی بال با کرنش های تجربی، مدل عددی صحت سنجی شده است. پس از صحت سنجی مدل عددی، از آن برای شبیه سازی مقطعی مشابه و دارای سه کانال در راستای عرضی و در سه ایستگاه شکل دهی استفاده و تأثیر پارامترهای جنس ورق (تنش تسلیم و توان کارسختی)، ضخامت ورق و فاصله ی بین ایستگاه های بر عیب چین خوردگی لبه بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش تنش تسلیم عیب چین خوردگی افزایش و با افزایش توان کارسختی، ضخامت ورق و فاصله بین ایستگاه های، عیب چین خوردگی کاهش می یابد.

شکل دهی غلتکی سرد
عیب چین خوردگی لبه
شبیه سازی اجزای محدود
مقاطع عریض

Numerical and experimental study of the edge wrinkling defect of cold roll forming of wide profiles

Hossein Mohammadi Najafabadi¹, Hasan Moslemi Naeini^{1*}, Rasoul Safdarian², Davood Akbari¹, Mohammad Mahdi Kasaei³, Behnam Abbaszadeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2-Department of Mechanical Engineering, Behbahan Khatam Alanzbia University of Technology, Behbahan, Khoozestan, Iran

3- Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Qazvin, Qazvin, Iran

* P.O.B. 6361647189, Tehran, Islamic Republic of Iran, moslemi@modares.ac.ir

Keywords

Cold roll-forming
Edge wrinkling defect
Finite element simulation
wide profiles

Abstract

The Cold roll forming is a complex forming process which quality of its products is highly dependent on the process parameters. The edge wrinkling defect is one of the common defects in the cold roll forming process of wide profiles. Edge wrinkling leads to several problems such as decrease in dimensional quality, wearing of forming rolls due to contact with the buckled edge and non-uniform distribution of forming forces through the production line. In order to investigate the edge wrinkling defect in this study, the finite element simulation and experimental tests were used. At first, for validation of simulation results, one model in exact in accordance with experimental set up and with one holding station and one forming station to produce one trapezoidal profile was created. Then by simulating this process in Abaqus software and comparing the longitudinal strain in simulation and experimental results, the numerical model was validated. After verifying the numerical model, it was used for simulating a similar profile with two channels in transversal direction and in three forming stations and then the effect of sheet material (yield stress and work hardening exponent), strip thickness and distance between the roll stands are investigated on the edge wrinkling defect of products. Results of this study show that wrinkling increases with the yield stress increase, but decreases with increase in work hardening exponent, strip thickness and distance between the roll stands.

Please cite this article using:

H. Mohammadi Najafabadi, H. Moslemi Naeini, R. Safdarian, D. Akbari, M. M. Kasaei, B. Abbaszadeh, Numerical and experimental study of the edge wrinkling defect of cold roll forming of wide profiles, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 28-36, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

فرایند شکل دهی غلتکی سرد روشی است پیوسته برای ایجاد خم‌های متوالی در نوار فلز که بدون تغییر در ضخامت ورق و با عبور دادن آن از مجموعه غلتک‌های دوار، شکل مقطع مورد نظر را بوجود می‌آورد. در فرایند شکل دهی غلتکی مقاطع عریض، ورق با مقطع عریض از مجموعه‌ای از غلتک‌ها در راستای عرضی و افقی عبور کرده تا پروفیل نهایی که دارای دو یا چند پروفیل در راستای عرضی می‌باشد، به دست آید (شکل 1).

چین خوردگی لبه یکی از عیوب رایج در این فرایند است که به دلیل کرنش‌های کششی-فشاری مکرر و پشت سر هم اتفاق می‌افتد. این عیب نه تنها در محصول نهایی بلکه در محصول نیمه تمام از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر نیز رخ می‌دهد. این عیب سبب کاهش کیفیت محصول نهایی و باعث ایجاد مشکل در عملیات شکل دهی غلتکی می‌شود. مکانیزم این رخداد بسیار ساده است و عموماً در مراحل اولیه شکل دهی، با تغییر طول بخش‌هایی از لبه ورق اتفاق می‌افتد. در حین شکل دهی لبه‌های ورق هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی حرکت کرده و افزایش طول می‌دهد. افزایش طول لبه ورق وقتی که بخش‌هایی از لبه ورق وارد فضای بین غلتک‌ها می‌شود، اتفاق می‌افتد. لبه ورقی که در قسمت قبل افزایش طول داده وقتی که از فضای بین غلتک‌ها خارج می‌شود، باید در ایستگاه بعدی کاهش طول دهد، زیرا در نهایت لبه‌های ورق نیمه کاره یا محصول نهایی باید به صورت مستقیم و موازی در آید. وقتی که افزایش طول موضعی لبه بیش از حد باشد، انقباض و برگشتن لبه به حالت اولیه بسیار مشکل و یا غیر ممکن است که در این حالت عیب چین خوردگی در لبه اتفاق می‌افتد.

بررسی عیب چین خوردگی در فرایندهای شکل دهی ورق‌های فلزی توسط تعدادی از پژوهشگران انجام شده و تعدادی از محققان نیز پژوهش‌هایی را در مورد مطالعه عددی و تجربی فرایندهای شکل دهی غلتکی منتشر کرده‌اند. باتاچاریا و همکارانش [1] با انجام آزمایش‌های تجربی، کرنش طولی لبه را در فرایند شکل دهی غلتکی سرد محاسبه کردند.



Fig. 1 The final product of wide profile sheet

شکل 1 پروفیل نهایی محصولات با مقطع عریض

نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش زاویه خم، کرنش طولی لبه افزایش می‌یابد.

واکر و پیک [2] روشی تحلیلی را برای محاسبه کرنش‌های طولی در فرایند شکل دهی غلتکی سرد لوله‌های جوش مقاومت الکتریکی ارائه کردند. آن‌ها از رابطه‌های بدست آمده برای بهینه‌سازی و پیش‌بینی چین خوردگی لبه ورق استفاده نمودند.

ون و پیک [3] با استفاده از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس مدلی را برای پیش‌بینی کماتش موضعی لبه ورق در خطوط شکل دهی سراسیبی لوله ارائه دادند و توانستند ارتفاع مناسب ایستگاه‌ها را در مرحله راه‌اندازی خط به منظور جلوگیری از بروز کماتش لبه پیشنهاد دهند.

فرزین و همکارانش [4] معیار جدیدی را به نام حد کرنش کماتشی مبتنی بر تحلیل اجزای محدود فرایند شکل دهی غلتکی سرد معرفی کردند. بر اساس نتایج پژوهش آن‌ها، یک محصول زمانی فاقد کماتش لبه خواهد بود که کرنش طولی باقیمانده در راستای طولی آن صفر باشد. همچنین، حد کرنش کماتشی مستقل از زاویه شکل دهی بوده و تابعی از خواص جنس ورق و نسبت ضخامت ورق به طول بال است.

سلمانی تهرانی و همکارانش [۵،۶] با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود نشان دادند که با تغییر شکل ورق در هر ایستگاه شکل دهی، ناحیه بال در مقایسه با ناحیه‌های خم و کف ورق افزایش طول بیشتری می‌یابد که این افزایش طول پس از خروج از ایستگاه خود را به صورت چرخش سر ورق به سمت پایین نشان می‌دهد. اما از آنجایی که ایستگاه بعدی در همان ارتفاع ایستگاه قبلی قرار دارد خمش معکوسی به ورق اعمال می‌شود و ناحیه لبه ورق تحت فشار قرار می‌گیرد. در صورتی که این تنش فشاری از مقدار بحرانی کماتش عبور کند، لبه ورق ناپایدار و موج‌دار می‌گردد.

یانگ و همکاران [7] عیب چین خوردگی را در فرایند شکل دهی با بالشتک لاستیکی توسط شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی کرده و برای تأیید آن از آزمایش‌های تجربی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج عددی داشته و شبیه‌سازی عددی می‌تواند برای پیش‌بینی عیب چین خوردگی در این فرایند مورد استفاده قرار گیرد.

کسای [8] علت چین خوردگی در فرایند شکل دهی قفسه‌ای لوله را اعمال کاهش محیطی بیش از اندازه در مرحله پره‌ای دانست و با استفاده از این معیار، بیشینه عرض ورق ابتدایی در فرایند شکل دهی قفسه‌ای را پیشنهاد کرد.

کسای و همکاران [9] در پژوهشی عیب چین خوردگی در

دسته دوم، شبیه‌سازی‌هایی هستند که متشکل از یک ایستگاه نگه‌دارنده و سه ایستگاه شکل‌دهی و با تولید سه پروفیل دوزنقه‌ای انجام می‌شوند و به بررسی اثر پارامترهای جنس ورق و فاصله بین ایستگاهی بر عیب چین خوردگی می‌پردازند (جدول 2). برای بررسی تأثیر جنس ورق، دو پارامتر تنش تسلیم (σ_y) و توان کار سختی (n) به طور فرضی در سه سطح تغییر داده شدند و ضریب استحکام (K) با توجه به مقادیر آن‌ها و مطابق رابطه (1) تعیین شده و در نرم‌افزار آباکوس وارد شد.

$$K = E \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^{n-1} \quad (1)$$

در این شبیه‌سازی‌ها طول کف (b) 50 میلی‌متر، طول بال‌های داخلی (a) 25 میلی‌متر، ضخامت ورق (t) 0/7 میلی‌متر، شعاع خم (r) 2 میلی‌متر، زاویه پروفیل (α) 30 درجه و طول بال خارجی (c) 60 میلی‌متر انتخاب شدند.

2-1- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این بخش نحوه ایجاد مدل اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد برای شبیه‌سازی متشکل از یک ایستگاه نگه‌دارنده و یک ایستگاه شکل‌دهی (شبیه‌سازی‌های دسته اول) مقطع عریض در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تشریح می‌شود.

کلیه مراحل مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در نسخه 6.13 از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. به دلیل این که تغییر شکل غلتک‌ها در حین فرایند ناچیز است، در تحلیل‌های عددی انجام شده غلتک‌ها صلب فرض شدند. در این نرم‌افزار جسم صلب را می‌توان به صورت جسم صلب تحلیلی¹ یا جسم صلب گسسته² تعریف کرد. جسم صلب تحلیلی به دلیل آن که برخلاف جسم صلب گسسته، نیازی به شبکه‌بندی ندارد از کارایی محاسباتی بالاتری برخوردار است. در عین حال، جسم صلب تحلیلی فقط برای اجسام با شکل هندسی ساده قابل استفاده است.

جدول 2 شبیه‌سازی‌های دسته دوم

Table 2 Second simulation category

پارامترهای آزمایش	تنش تسلیم (MPa)	توان کار سختی (n)	فاصله بین ایستگاهی (mm)
1	150	0/15	200
2	300	0/2	300
3	450	0/25	400

¹ Analytical rigid body

² Discrete rigid body

ناحیه‌ی فشاری بال ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج عددی آن‌ها، وقتی چین خوردگی بال رخ می‌دهد که کرنش طولی فشاری کوچک‌تر از کرنش طولی فشاری لازم که از طریق مدل‌سازی ریاضی بدست می‌آید، باشد. بنابراین مقایسه کرنش طولی فشاری بدست آمده از تحلیل اجزای محدود و کرنش طولی فشاری مورد نیاز، یک معیار مناسب برای پیش‌بینی عیب چین خوردگی لبه می‌باشد.

2- روش تحقیق

در این پژوهش بررسی‌ها بر روی پروفیل دوزنقه‌ای مقاطع عریض انجام شد. در شکل 2 ناحیه‌های مختلف این پروفیل دوزنقه‌ای نشان داده شده است.

با توجه به هدف تعریف شده در این پژوهش، دو دسته شبیه‌سازی انجام شد. در شبیه‌سازی‌های دسته اول، مدلی عددی دقیقاً مطابق با آزمایش‌های تجربی متشکل از یک ایستگاه نگه‌دارنده و یک ایستگاه شکل‌دهی برای تولید پروفیلی دوزنقه‌ای ایجاد شد. هدف از انجام این شبیه‌سازی‌ها صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با مقایسه کرنش‌های طولی حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی است (جدول 1). در این شبیه‌سازی‌ها طول کف (b) 30 میلی‌متر، طول بال‌های داخلی (a) 25 میلی‌متر، ضخامت ورق (t) 0/5 میلی‌متر، شعاع خم (r) 2 میلی‌متر، زاویه پروفیل (α) 30 درجه و طول بال خارجی (c) و فاصله بین ایستگاهی به عنوان متغیر انتخاب شدند. همچنین برای انجام آزمایش‌های تجربی از ورق St12 استفاده شد.

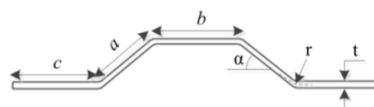


Fig. 2 Geometrical characteristics of a wide profile section

شکل 2 مشخصات هندسی یک پروفیل کانالی عریض (تک پروفیل)

جدول 1 شبیه‌سازی‌های دسته اول

Table 1 First simulation category

شماره آزمایش	طول بال خارجی (c) (mm)	فاصله بین ایستگاهی (mm)
1	100	310
2	100	530
3	130	310
4	130	530

نشان می‌دهد.

در سرهم‌بندی اجزای مدل شبیه‌سازی، ورق به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شد و غلتک‌ها نسبت به آن موقعیت‌دهی شدند. به منظور نگه‌داشتن ورق در آغاز شبیه‌سازی، یک ایستگاه با غلتک‌های بالایی و پایینی استوانه‌ای، قبل از ایستگاه شکل‌دهی اول قرار داده شد که هیچ نقشی در شکل‌دهی ورق نداشتند. از آنجا که ورق به‌صورت پوسته‌ای بدون ضخامت مدل شد، برای مماس کردن غلتک‌ها با ورق فاصله‌ای برابر با نصف ضخامت ورق بین غلتک‌ها و پوسته در نظر گرفته شد. غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی در لبه جلویی ورق و ایستگاه‌های بعدی در فواصل برابر با یکدیگر قرار داده شدند. غلتک‌های استوانه‌ای شامل غلتک‌های بالایی و پایینی در ایستگاه نگه‌دارنده و غلتک‌های بالایی و پایینی نگه‌دارنده کناری در ایستگاه شکل‌دهی اول، به صورت مماس با ورق موقعیت‌دهی شده و غلتک‌های پایینی ایستگاه شکل‌دهی که وظیفه خم کردن ورق را داشتند، در ارتفاعی مناسب زیر ورق قرار داده شدند به‌گونه‌ای که در آغاز شبیه‌سازی تماسی با ورق نداشته باشند. همچنین غلتک‌های بالایی ایستگاه‌های شکل‌دهی به گونه‌ای موقعیت‌دهی شدند که قطر بزرگ‌تر با ورق مماس شود. شکل 5 نمایی از مدل اجزای محدود ایجاد شده برای یکی از شبیه‌سازی‌های سه ایستگاهی را نشان می‌دهد. در این پژوهش از تحلیل دینامیکی "صریح"² به دلیل داشتن زمان شبیه‌سازی و واگرایی کمتر استفاده شده است.

در مرحله اول شبیه‌سازی، غلتک ایستگاه شکل‌دهی به سمت بالا جابه‌جا شده، تا این‌که به سطح پایینی ورق مماس شود (فاصله‌ای برابر با نصف ضخامت ورق تا پوسته). در مرحله دوم، غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی و غلتک‌های استوانه‌ای در ایستگاه نگه‌دارنده شروع به دوران کرده و در اثر نیروی اصطکاک بین ورق و غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی، ورق به سمت جلو کشیده می‌شود تا جایی که لبه جلویی ورق به اندازه فاصله بین ایستگاه‌ها از ایستگاه شکل‌دهی خارج می‌شود. در شبیه‌سازی‌های تک‌ایستگاهی، تحلیل به دو مرحله ذکر شده در بالا خلاصه می‌شد اما در شبیه‌سازی‌های سه ایستگاهی، مراحل اول و دوم برای ایستگاه‌های دوم و سوم تکرار می‌شد. به علت تقارن شکل‌دهی غلتکی ورق‌های عریض در راستای عرضی، نیمی از ورق و غلتک‌های شکل‌دهی مدل شدند. بنابراین شرط مرزی تقارن برای خط مرکزی ورق در همه مراحل شبیه‌سازی اعمال شد.

از آن‌جا که غلتک‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد را می‌توان از دوران یک منحنی دو بعدی حول یک محور ایجاد کرد، شکل هندسی آن‌ها پیچیده نیست. از سوی دیگر به دلیل هموارتر بودن سطوح ایجاد شده به روش صلب تحلیلی نسبت به سطوح صلب گسسته، در مسائل تماسی اغتشاش کم‌تری در پاسخ‌ها ایجاد می‌شود. بنابراین در این پژوهش غلتک‌ها به‌صورت یک جسم صلب تحلیلی مدل شدند.

ورق مورد استفاده به عنوان یک جسم پوسته‌ای همگن سه‌بعدی تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شد. از آنجا که المان‌های چندمنظوره برای مدل‌سازی کرنش‌های غشایی بزرگ مناسب هستند، المان پوسته‌ای S4R که یکی از المان‌های چندمنظوره است برای مدل‌سازی ورق انتخاب شد. انتخاب اندازه و نوع المان تأثیر قابل توجهی بر جواب‌های مسئله دارد که بایستی المان بهینه برای شبیه‌سازی مشخص شود. با کوچک کردن اندازه‌ی مش و مقایسه‌ی جواب‌های به‌دست آمده، در شرایطی که جواب‌ها تغییر قابل توجهی نکنند، اندازه‌ی بهینه‌ی مش به‌دست می‌آید. شکل 3 نمودار حساسیت به مش را بر حسب کرنش طولی در فاصله 8 میلی‌متری از لبه بال خارجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، اندازه مش $5\text{mm} \times 2\text{mm}$ بهینه می‌باشد و در نواحی کف، بال‌های داخلی و خارجی ورق این اندازه انتخاب شد.

همچنین در این شبیه‌سازی المان‌های ورق از نوع "کواد-دومینیت"¹ و تعداد گره هر المان چهار عدد انتخاب شده و رفتار مکانیکی ورق، الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد. همچنین برای به دست آوردن خواص مکانیکی ورق از داده‌های آزمایش کشش سرد استفاده شد.

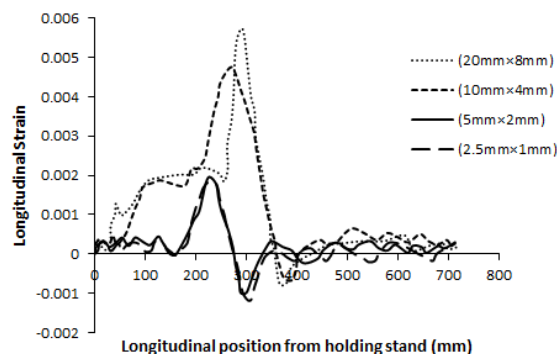


Fig. 3 Mesh size sensitivity curve

شکل 3 نمودار حساسیت به اندازه مش

شکل 4 نواحی مختلف یک نمونه ورق مش‌بندی شده را

² Explicit

¹ Quad-dominate

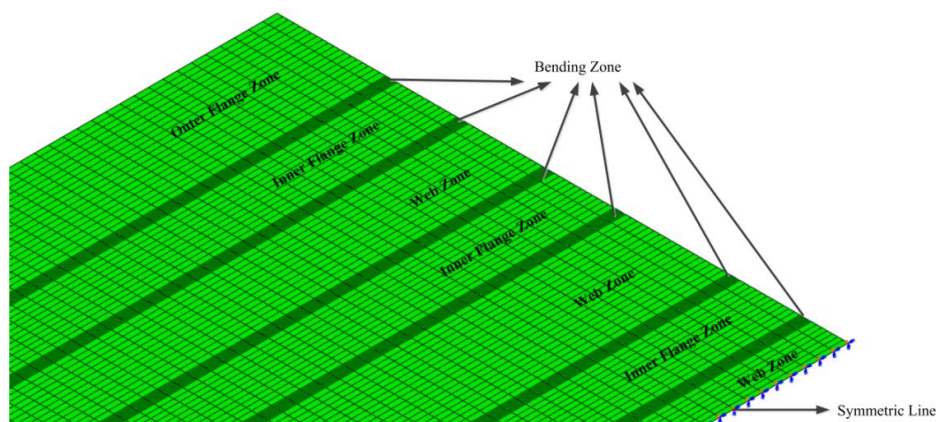


Fig. 4 Mesh generation of different areas on the strip

شکل 4 ایجاد مش در نواحی مختلف ورق

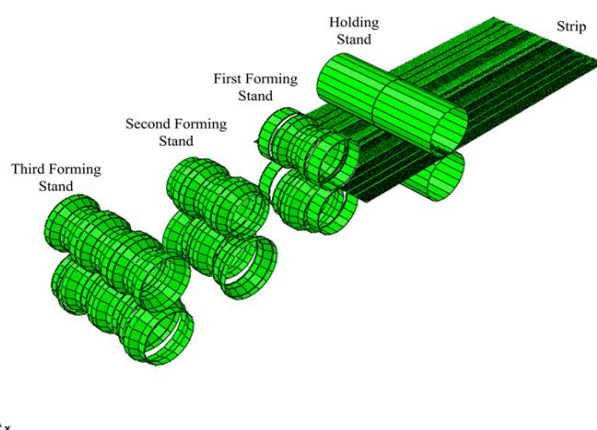


Fig. 5 Modeling of roll forming in the ABAQUS software

شکل 5 مدلسازی فرایند شکل دهی غلتکی در نرم افزار آباکوس

درجه) نسبت به راستای نورد با استفاده از دستگاه وایرکات تهیه شد.



Fig. 6 Standard specimens of the sheet in three directions: longitudinal, diagonal and transversal

شکل 6 نمونه های استاندارد از ورق در سه راستای طولی، قطری و عرضی

با توجه به این که غلتکها با استفاده از مدل صلب تحلیلی مدل شدند، برای تعریف تماس آنها با ورق از الگوریتم زوج تماسی و گزینه سطح به سطح¹ استفاده شد. در این تحقیق دو نوع کنش تماس مماسی در نظر گرفته شد. در حالی که برای تماس ورق با غلتکهای ایستگاه نگه دارنده، از مدل تماس بدون اصطکاک استفاده شد، تماس ورق با غلتکهای ایستگاه شکل دهی با مدل تماسی پنالتی و به کمک مدل اصطکاکی کولمب و ضریب اصطکاک همسان گرد 0/2 توصیف شد [6].

2-2- آزمون کشش سرد

برای تعیین دقیق خواص مکانیکی فولاد ST12، آزمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM E8 انجام گرفت. بدین منظور، مطابق شکل 6 نمونه های استاندارد از ورق در سه راستای طولی (0 درجه)، قطری (45 درجه) و عرضی (90

¹ Surface to surface

3-2- اندازه گیری عیب چین خوردگی در شبیه سازی های اجزای محدود

در این پژوهش برای اندازه گیری عیب چین خوردگی، کمیت نسبت دامنه (D) به طول موج (λ) مطابق رابطه (2) تعریف شد. در بررسی این پارامتر (E)، هر مقدار که این کمیت کمتر باشد، این عیب در شرایط بهتری قرار دارد و کیفیت محصول بهتر می باشد.

$$E = \frac{D}{\lambda} \quad (2)$$

همان طور که در شکل 7 نشان داده شده است، برای اندازه گیری نسبت دامنه به طول موج در شبیه سازی ها، یک مسیر در لبه ورق انتخاب شده و با گرفتن خروجی جابه جایی در راستای طولی (محور z) نسبت به جابه جایی در راستای عمود بر سطح ورق (محور y) از این مسیر بر روی محورها، نسبت دامنه به طول موج اندازه گیری شد.

قطری و عرضی نسبت به راستای نورد را نشان می دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، به دلیل یکسان بودن تقریبی نتایج در سه راستا، ورق مورد استفاده ایزوتروپ فرض شد و برای استفاده در فرآیند شبیه سازی از داده های تست کشش سرد در راستای طولی مطابق با جدول 3 استفاده شد.

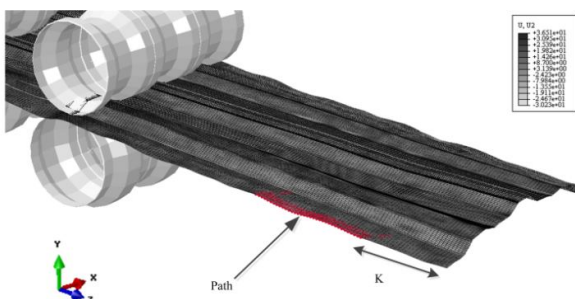


Fig. 7 Wrinkling defect measuring along the path in the FEM results
شکل 7 اندازه گیری عیب چین خوردگی از نتایج شبیه سازی در امتداد مسیر مشخص شده

4-2- آزمایش های تجربی

آزمایش های تجربی به منظور صحت سنجی نتایج مدل اجزای محدود و مطابق با شبیه سازی های دسته اول انجام شدند (جدول 1). برای انجام آزمایش های تجربی از ورق های فولادی St12 به طول 1000 میلی متر استفاده شد.

برای انجام آزمایش ها از دستگاه شکل دهی غلتکی سرد آزمایشگاه شکل دهی فلزات دانشگاه تربیت مدرس واقع در شرکت لوله و پروفیل پایا در شهرک صنعتی مورچه خورت اصفهان استفاده گردید. بعد از طراحی و ساخت غلتک های مربوط به پروفیل مورد نظر، غلتک ها بر روی دستگاه تنظیم و سوار شدند. در شکل 8 نحوه تنظیم دستگاه و سوار کردن غلتک های شکل دهی بر روی دستگاه نشان داده شده است.

با توجه به جدول طراحی شده برای آزمایش های عملی، برای هر ورق دستگاه را تنظیم کرده و محصول مورد نظر تولید شد. در شکل 9 یک نمونه از ورق های در حال شکل دهی نشان داده شده است. برای اندازه گیری کرنش از کرنش سنج های مقاومت الکتریکی چندمنظوره¹ استفاده گردید. به منظور جلوگیری از برخورد کرنش سنج ها با غلتک های بالایی، غلتک ها چند تکه ساخته شدند و نصب کرنش سنج ها مطابق شکل در فاصله مناسب عرضی و بر روی بال خارجی انجام شد.



Fig. 8 Experimental roll forming setup
شکل 8 تنظیم دستگاه شکل دهی غلتکی برای انجام آزمایش های تجربی



Fig. 9 Experimental roll forming of wide Profile
شکل 9 آزمایش تجربی شکل دهی غلتکی سرد ورق با مقطع عریض

جدول 3 خواص مکانیکی فولاد St12 استفاده شده در شبیه سازی ها

Table 3 Mechanical properties of St12 steel used in simulations

تنش تسلیم (MPa)	درصد کشیدگی در استحکام نهایی (MPa)	شکست	توان کار سختی	ضریب استحکام (MPa)
142	276	62	0/245	580

3- نتایج و بحث

منحنی شکل 10 نتایج آزمایش کشش در سه راستای طولی،

¹ General purpose electrical resistance strain gauge

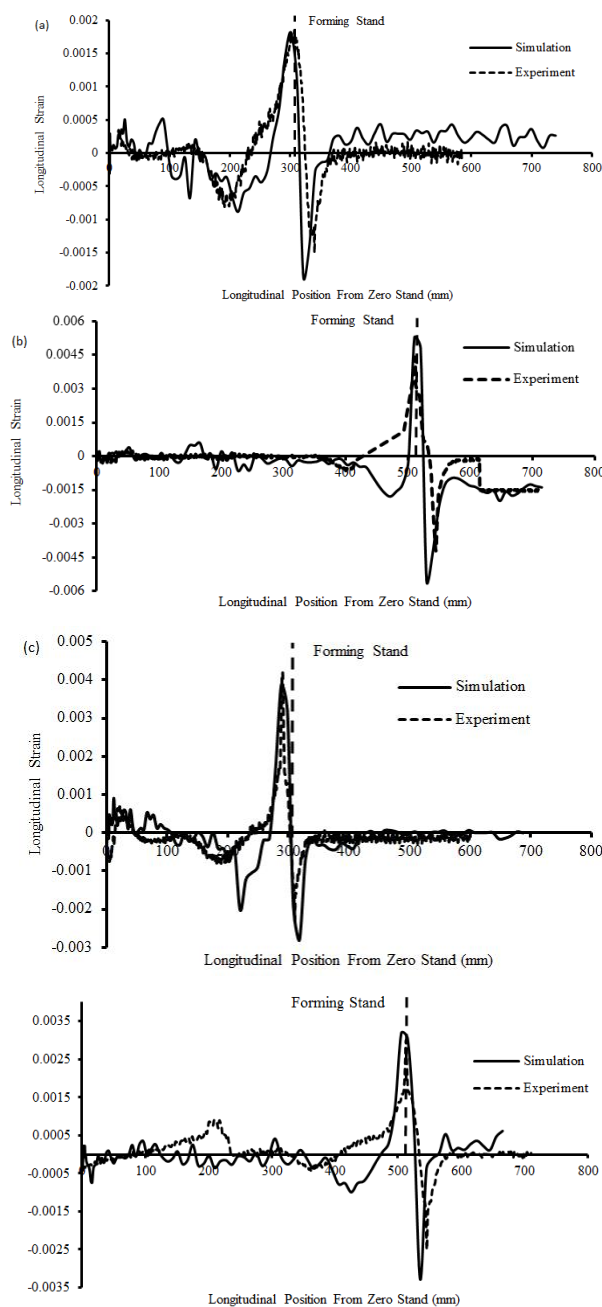


Fig. 11 Longitudinal strain comparison of simulation and experiment for four tests form table 1 (a) exp. 1 (b) exp. 2 (c) exp. 3 (d) exp. 4

شکل 11 مقایسه کرنش‌های طولی آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی (a) آزمایش 1 (b) آزمایش 2 (c) آزمایش 3 (d) آزمایش 4.

بنابراین افزایش تنش تسلیم بر فرایند شکل‌دهی اثر نامطلوب دارد. در واقع با افزایش تنش تسلیم ورق صلیب خمشی کل محصول افزایش یافته و باعث کاهش انحنای طولی محصول می‌شود که در نتیجه تنش‌های فشاری در لبه ورق زیاد شده و چین‌خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین اثر افزایش تنش تسلیم بر کاهش مقاومت در برابر چین‌خوردگی توسط پژوهشگران

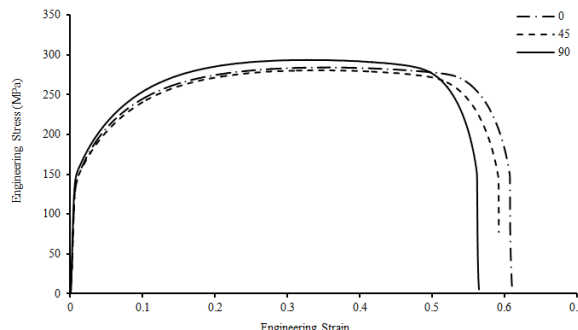


Fig. 10 Engineering stress-strain curve in three directions: longitudinal, diagonal and transversal

شکل 10 منحنی تنش-کرنش مهندسی در سه راستای طولی، قطری و عرضی

3-1- مقایسه نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی

مقایسه کرنش‌های طولی بدست آمده از آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی بر حسب جابه‌جایی ورق در شکل 11 آورده شده است. همان‌طور که این نمودارها نشان می‌دهد تطابق خوبی بین کرنش‌های طولی بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد که صحت روش بکار رفته برای مدل‌سازی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که حداکثر کرنش طولی در لبه ورق دقیقاً در نزدیکی ایستگاه شکل‌دهی اتفاق می‌افتد و این امر بخاطر کشیدگی ایجاد شده در ورق قبل از ورود به ایستگاه شکل‌دهی می‌باشد. در جدول 4 نیز مقایسه حداکثر کرنش طولی در آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی آورده شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، درصد خطا بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی کمتر از 10 درصد است که نشان از تطابق خوب بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی است.

3-2- بررسی تأثیر پارامتر تنش تسلیم بر عیب چین‌خوردگی

در شکل 12 تأثیر پارامتر تنش تسلیم بر عیب چین‌خوردگی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تنش تسلیم، عیب چین‌خوردگی افزایش یافته و در نتیجه کیفیت محصول بدتر شده است.

جدول 4 مقایسه حداکثر کرنش طولی در آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی

Table 4. Longitudinal strain comparison of simulation and experimental tests

شماره آزمایش	شبیه‌سازی	تجربی	درصد خطا (%)
1	0/001810	0/001844	1/8
2	0/00155	0/0017	8/8
3	0/0038	0/0042	9
4	0/0032	0/0030	6/6

دیگری نیز تأیید شده است [10-12].

3-5- بررسی تأثیر پارامتر فاصله بین ایستگاهی بر عیب

چین خوردگی

در شکل 15 تأثیر پارامتر فاصله بین ایستگاهی بر عیب چین خوردگی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش فاصله بین ایستگاهی، عیب چین خوردگی کاهش یافته و در نتیجه کیفیت محصول بهتر شده است. در واقع با افزایش فاصله بین ایستگاه های شکل دهی امکان برگشت بخش الاستیک تنش ایجاد شده در ورق در ایستگاه قبل وجود خواهد داشت و از تشدید کرنش در ایستگاه بعد جلوگیری می شود و بنابراین تأثیر مثبت بر کاهش چین خوردگی دارد. همچنین با افزایش فاصله بین ایستگاهی طول موج چین های ایجاد شده افزایش یافته و بنابراین پارامتر چین خوردگی کاهش می یابد. بنابراین افزایش فاصله بین ایستگاهی بر فرایند شکل دهی اثر مطلوب دارد.

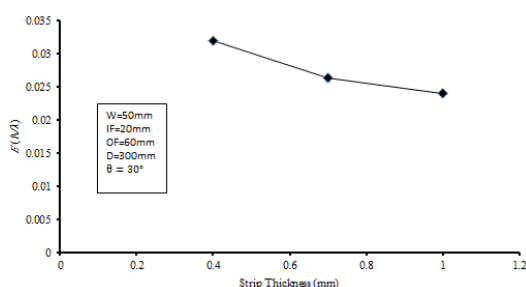


Fig. 14 Effect of strip thickness on the wrinkling

شکل 14 تأثیر ضخامت ورق بر عیب چین خوردگی

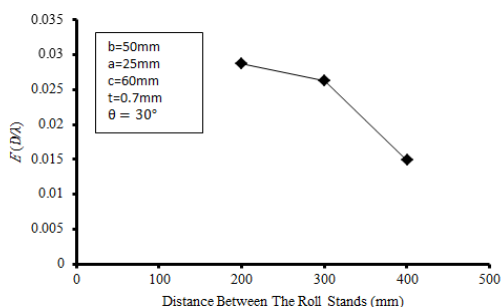


Fig. 15 Effect of distance between the roll stands on the wrinkling

شکل 15 تأثیر فاصله بین ایستگاهی بر عیب چین خوردگی

4- نتیجه گیری

در این پژوهش با انجام آزمایش تجربی و شبیه سازی اجزای محدود، تأثیر پارامترهای جنس ورق (تنش تسلیم و توان کارسختی)، ضخامت ورق و فاصله بین ایستگاهی بر عیب چین خوردگی بررسی شد. ابتدا برای تأیید نتایج شبیه سازی، یک مدل دقیقاً مطابق با آزمایش های تجربی متشکل از یک ایستگاه

3-3- بررسی تأثیر پارامتر توان کارسختی بر عیب

چین خوردگی

در شکل 13 تأثیر پارامتر توان کارسختی بر عیب چین خوردگی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش توان کار سختی، عیب چین خوردگی کاهش یافته است. بنابراین پارامتر توان کارسختی باعث بهتر شدن کیفیت محصول شده و بر فرایند شکل دهی اثر مطلوب دارد. البته هاتچینسون [13] و همچنین وانگ و همکارانش [14] نیز نشان دادند مقاومت در برابر چین خوردگی با افزایش نمای کار سختی افزایش می یابد.

3-4- بررسی تأثیر پارامتر ضخامت ورق بر عیب چین خوردگی

در شکل 14 تأثیر پارامتر ضخامت ورق را بر عیب چین خوردگی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ضخامت ورق عیب چین خوردگی کاهش یافته است که علت این امر این است که با افزایش ضخامت ورق، صلبیت خمشی بال خارجی ورق که چین خوردگی روی آن اتفاق می افتد افزایش یافته و در نتیجه مقاومت ورق در برابر چین خوردگی افزایش یافته است.

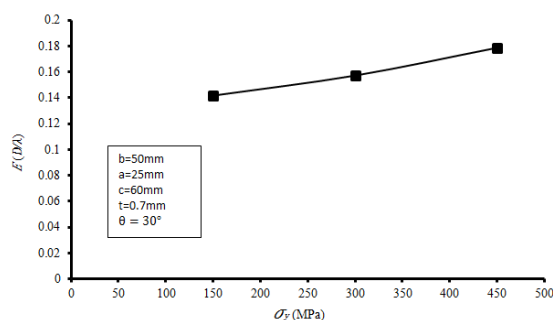


Fig. 12 Effect of yield stress on the wrinkling

شکل 12 تأثیر تنش تسلیم بر عیب چین خوردگی

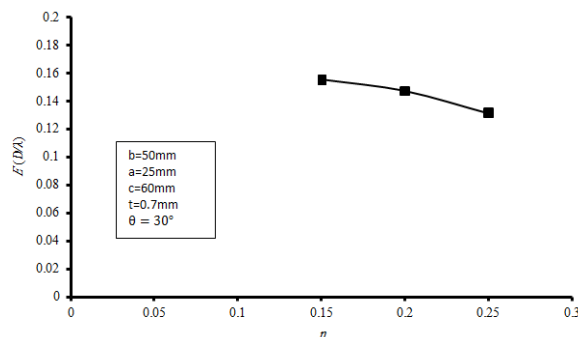


Fig. 13 Effect of work hardening exponent on the wrinkling

شکل 13 تأثیر توان کار سختی بر عیب چین خوردگی

- نگهدارنده و یک ایستگاه شکل دهی برای تولید یک پروفیل دوزنقه‌ای شبیه سازی شد. تطابق خوب بین کرنش‌های طولی بدست آمده از نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی صحت روش بکار رفته برای مدل سازی را نشان داد. پس از صحت سنجی مدل عددی، از آن برای شبیه سازی مقطعی مشابه و دارای سه کانال در راستای عرضی و در سه ایستگاه شکل دهی استفاده و تأثیر پارامترهای مورد نظر بر عیب چین خوردگی لبه بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش تنش تسلیم عیب چین خوردگی افزایش و با افزایش توان کارسختی، ضخامت ورق و فاصله بین ایستگاهی، عیب چین خوردگی کاهش می یابد. بنابراین افزایش تنش تسلیم ورق اثر نامطلوب و افزایش توان کارسختی، ضخامت ورق و فاصله بین ایستگاهی اثر مطلوبی بر کیفیت محصول دارند.
- 5- مراجع**
- [6] M. S. Tehrani, H. M. Naeini, P. Hartley, H. Khademizadeh, Localized edge buckling in cold roll-forming of circular tube section, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1, pp. 617-620, 2006 .
- [7] Y. N. Sun, W. Min, X. D. Wu, Wrinkling prediction in rubber forming of Ti-15-3 alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 10, pp. 3002-3010, 2013 .
- [8] M. Kasaei, H. M. Naeini, R. A. Tafti, M. S. Tehrani, Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp. 190-199, 2014 .
- [9] M. M. Kasaei, H. M. Naeini, B. Abbaszadeh, M. Mohammadi, M. Ghodsi, M. Kiuchi, R. Zolghadr, G. Liaghat, R. A. Tafti, M. S. Tehrani, Flange Wrinkling in Flexible Roll Forming Process, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 245-250, 2014 .
- [10] A. Szacinski, P. Thomson, The effect of mechanical properties on the wrinkling behaviour of sheet materials in the yoshida test, *Journal of mechanical working technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 87-102, 1984 .
- [11] R. Narayanasamy, J. Satheesh, C. S. Narayanan, Effect of annealing on combined forming, fracture and wrinkling limit diagram of Aluminium 5086 alloy sheets, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol. 4 ,No. 1, pp. 31, 2008 .
- [12] [12] R. Narayanasamy, J. Satheesh, C. Narayanan, Experimental evaluation of wrinkling limit diagrams for aluminium alloy 5052 sheets annealed at different temperatures, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 4 ,No. 3, pp. 149-163, 2008 .
- [13] J. Hutchinson, K. Neale, Wrinkling of curved thin sheet metal, *Plastic Instability*, pp. 71-78, 1985 .
- [14] C. T. Wang, G. Kinzel, T. Altan, Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 53, No. 3-4, pp. 759-780, 1995.
- [1] D. Bhattacharyya, T. Maltby, T. Martin, S. Panton, Prediction of Strain Development while Roll Forming Fundamentals Sections, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, pp. 871-876, 1990 .
- [2] T. R. Walker, R. J. Pick, Approximation of the axial strains developed during the roll forming of ERW pipe, *Journal of materials processing technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-44, 1990 .
- [3] B. Wen, R. J. Pick, Modelling of skelp edge instabilities in the roll forming of ERW pipe, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 41, No. 4, pp. 425-446, 1994 .
- [4] M. Farzin, M. S. Tehrani, E. Shamel, Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125, pp. 626-632, 200 .^۲
- [5] M. S. Tehrani, P. Hartley, H. M. Naeini, H. Khademizadeh, Localised edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section, *Thin-walled structures*, Vol. 44, No. 2, pp. 184-196, 2006 .