

بررسی اثر پارامترهای هندسی بر زاویه‌ی پیچش مقطع در شکل‌دهی غلتکی مقطع کانال نامتقارن، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود

مهدی سلمانی تهرانی^۱، مهدی نیکفروز^۲
Tehrani-m@eng.sku.ac.ir

چکیده

شکل‌دهی غلتکی سرد فرآیندی است که در آن نوار ورق در حالت سرد با عبور پیوسته از بین مجموعه غلتک‌های دوار، بدون تغییر محسوس در ضخامت، به یک پروفیل با مقطع دلخواه شکل داده می‌شود. با توجه به نیاز به تولید قطعاتی با مقطع کانال نامتقارن، در این مقاله اثر پارامترهای هندسی بر زاویه‌ی پیچش مقطع در شکل‌دهی کانال نامتقارن بررسی می‌شود. منظور از عدم تقارن در این مقاله، تفاوت عرض بال‌های کانال است. برای این کار و با توجه به عدم وجود سابقه‌ی پژوهشی درباره‌ی کانال نامتقارن، یک فرایند نمونه‌ی شکل‌دهی کانال متقارن انتخاب شده است. ابتدا با شبیه‌سازی اجزای محدود این فرایند و مقایسه‌ی توزیع کرنش طولی در نزدیکی لبه‌ی بال با کرنش‌های تجربی، اعتبار نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است. سپس با تکرار شبیه‌سازی اجزای محدود برای مقطعی مشابه و با عرض بال‌های متفاوت و تغییر پارامترهای هندسی مانند تفاوت عرض بال‌ها، ضخامت ورق و زاویه‌ی پروفیل، اثر این پارامترها بر زاویه‌ی پیچش مقطع بررسی شده است. بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که زاویه‌ی پیچش مقطع با کاهش زاویه‌ی پروفیل و ضخامت ورق و نیز با افزایش تفاوت عرض بال‌ها، افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نسخه‌ی ۶/۷ نرم‌افزار ABAQUS انجام شده‌اند.

کلیدواژه:

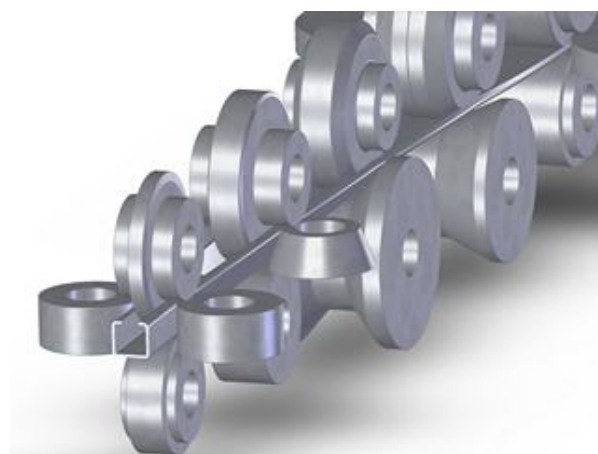
شکل‌دهی غلتکی سرد- مقطع کانال نامتقارن- زاویه‌ی پیچش مقطع- شبیه‌سازی اجزای محدود

۱- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، Mehdi.nikfo@gmail.com

۱- مقدمه

در فرایند شکل دهی غلتکی سرد، نوار ورق با عبور از بین تعدادی جفت غلتک و در طی چند ایستگاه، به پروفیل با مقطع دلخواه شکل داده می‌شود. هر مجموعه از غلتک که بخشی از عمل شکل‌دهی را انجام می‌دهد شامل یک غلتک بالایی، یک غلتک پایینی و در صورت نیاز، غلتک‌های جانبی می‌شود. شکل (۱) یک نمونه فرایند تولید پروفیل با استفاده از فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد را نشان می‌دهد. به هر مجموعه از این غلتک‌ها یک "ایستگاه غلتکی" یا "ایستگاه" گفته می‌شود. هر چه شکل مقطع نهایی پیچیده‌تر باشد، برای انجام موفقیت‌آمیز فرایند به تعداد ایستگاه بیشتری نیاز است. در این فرایند بر خلاف بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی فلزات، شکل‌دهی به‌صورت شدید و ناگهانی نیست. زیرا تغییر شکل شدید می‌تواند سبب آسیب رساندن به غلتک‌ها و حتی بروز برخی عیوب هندسی در محصول نهایی شود. به‌همین دلیل کنترل آهنگ تغییر شکل در انجام موفقیت‌آمیز فرایند بسیار مهم است.



شکل (۱): نمایش تولید پروفیل در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

مقطع کانال متقارن یکی از مقاطع پایه در این فرایند است که کاربردهای فراوانی در صنعت ساختمان‌سازی و صنایع خودروسازی دارد. در پژوهش‌های پیشین بر روی مقطع کانال نیز کانال به‌صورت متقارن در نظر گرفته شده است. برای مثال انگل^۱ [۱] برای نخستین‌بار بر اساس سال‌ها کار و تجربه، فرمولی را برای تعیین تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی و زاویه‌ی پروفیل هر ایستگاه، برای تولید مقطع کانال متقارن ارائه کرده است. اساس پیشنهاد او بر مبنای ثابت نگه داشتن مقدار افزایش زاویه‌ی پروفیل در هر مرحله و کمتر از یک حد بیشینه‌ی معین است. فیوتزل^۲ [۷] با انجام آزمایش‌های مختلف، شرایط مؤثر در شکل‌دهی کانال متقارن را بررسی کرده است. شرایط مورد بررسی او عبارتند از: فاصله‌ی بین دو ایستگاه متوالی، نیروی وارد بر غلتک‌ها، سرعت دوران غلتک‌ها و هم‌محوری غلتک‌ها. او با انجام پنجاه آزمایش و اعمال شرایط متفاوت برای نمونه‌های مختلف و اندازه‌گیری کرنش طولی به‌کمک کرنش‌سنج، کیفیت محصول را بررسی نموده تا بتواند شناخت بهتری از فرایند ارائه کند.

باتاچاریا^۳ و اسمیت^۴ در کارهای تجربی خود با انجام آزمایش‌هایی به مطالعه بر روی شکل‌دهی مقطع کانال متقارن پرداخته‌اند. آنها در یکی از کارهای خود اثر افزایش زاویه خم در ایستگاه اول را بر روی کرنش طولی ناحیه بال و کف، بررسی کرده‌اند [۱۲]. در داخل کشور نیز سلمانی تهرانی [۲۶] ضمن تبیین چگونگی بروز پدیده‌ی کماتش لبه در شکل‌دهی کانال متقارن، روش پیش‌بینی این پدیده و محاسبه‌ی حد شکل‌دهی متناظر با آن را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، بیان کرده است. اما در برخی موارد نیز مقطع کانال نامتقارن که در آن عرض بال‌ها یکسان نیستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه‌ای از کاربرد کانال نامتقارن می‌توان ابزار را نام برد که در گچ‌بری برای حفاظت و مقاوم کردن لبه‌های گچ و ایجاد لبه‌ی پرداخت شده‌ی دلخواه استفاده می‌شود. تصویر این ابزار در شکل (۲) نشان داده شده است.

عدم تقارن در چنین حالتی سبب می‌شود که به‌دلیل یکسان نبودن کشیدگی ایجاد شده در بال‌ها در هنگام شکل‌دهی، مقطع خروجی از ایستگاه به‌صورت پیچ‌خورده خارج شود. شکل (۳) مقایسه‌ی مقاطع کانال متقارن و نامتقارن و زاویه‌ی پروفیل و نیز زاویه‌ی پیچش مقطع خروجی را نشان می‌دهد. در این شکل w عرض بال، d تفاوت عرض دو بال، θ زاویه‌ی پروفیل و α زاویه‌ی پیچش مقطع خروجی را نشان می‌دهد.

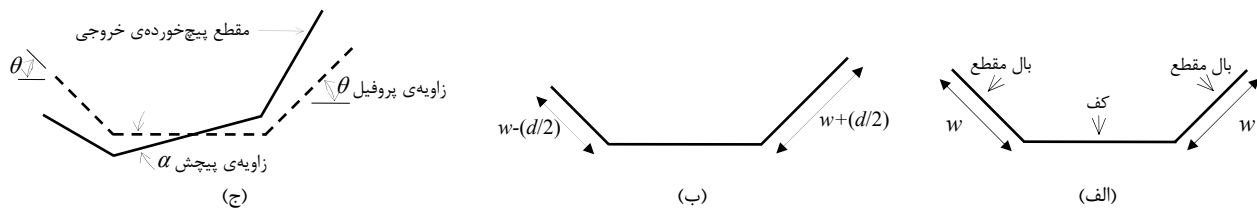
از یک دیدگاه، تحقیق‌های قبلی را می‌توان در دو دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی کرد: کارهای تجربی و آزمایشگاهی و کارهای تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی. از میان کارهای تجربی و آزمایشگاهی می‌توان به مراجع [۷-۱]، اشاره نمود. کارهای تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی نیز برخی مانند [۸-۱۵] بر اساس رهیافت محاسبه و کمینه‌سازی انرژی تغییر شکل استوار هستند که به روش‌های انرژی مشهور هستند. اما با توجه به محدودیت‌های ذاتی روش‌های انرژی از یک طرف و گسترش روزافزون امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری از طرف دیگر، بیشتر شبیه‌سازی‌های اخیر با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده‌اند که از آن میان می‌توان مراجع [۱۶-۲۷] را نام برد.

1- Angle
2- Fewtrell
3- Bhattacharyya
4- Smith



شکل (۲): ابزار گچ‌بری با پروفیل مقطع کانال نامتقارن که به‌روش شکل‌دهی غلتکی تولید می‌شود

شکل (۴) نیز پروفیل خروجی پیچ‌خورده را در یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد. پیچ‌خوردگی مقطع خروجی می‌تواند سبب معیوب شدن پروفیل و نیز آسیب رسیدن به غلتک‌ها شود. این امر بیان‌گر اهمیت بررسی زاویه‌ی پیچش مقطع خروجی و اثر پارامترهای فرایند بر آن است که تا کنون در پژوهش‌های انجام شده، مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، اثر تفاوت اندازه‌ی عرض بال‌ها، ضخامت ورق و زاویه‌ی پروفیل بر زاویه‌ی پیچش مقطع خروجی بررسی شده است.



شکل (۳): مقایسه‌ی مقطع کانال متقارن و نامتقارن و نمایش شماتیک پیچ‌خوردگی مقطع خروجی

الف: مقطع کانال متقارن

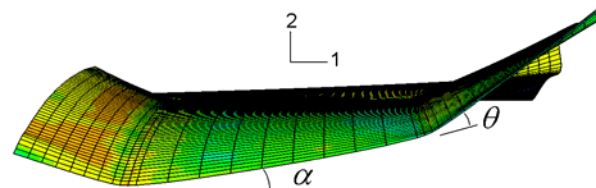
ب: مقطع کانال نامتقارن و معرفی تفاوت عرض دو بال d

ج: نمایش شماتیک پیچ‌خوردگی مقطع نامتقارن خروجی و معرفی زاویه‌ی پیچش α

بتواند مبنای مقایسه قرار گیرد، مشاهده نشد. اما همان‌گونه که گفته شد، دلیل اصلی پیچش مقطع، یکسان نبودن کشیدگی ایجاد شده در دو بال مقطع در هنگام شکل‌دهی است. بنابراین می‌توان شبیه‌سازی یک فرایند کانال متقارن نمونه که کرنش‌های طولی تجربی آن موجود است، را مبنای مقایسه و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی قرار داد. برای این کار آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۰] انتخاب شده است.

۲-۱- جزییات آزمایش باتاچاریا [۱۰]

باتاچاریا و اسمیت در کارهای تجربی خود با انجام آزمایش‌هایی به مطالعه بر روی شکل‌دهی مقطع کانال متقارن و بررسی اثر افزایش زاویه پروفیل در ایستگاه اول بر روی کرنش طولی ناحیه بال و کف، پرداخته‌اند [۱۰]. باتاچاریا و اسمیت آزمایش‌های خود را با استفاده از یک ماشین شکل‌دهی صنعتی با فاصله‌ی ایستگاه‌های (mm) ۱۴۵ و شعاع پایه‌ی غلتک‌های (mm) ۵۳ انجام داده‌اند. شکل (۵) هندسه‌ی غلتک‌ها را در آزمایش آنها نشان می‌دهد. در این آزمایش نوار ورقی از جنس فولاد معمولی به عرض (mm) ۴۰، ضخامت (mm) ۰/۶ و طول (mm) ۱۲۰۰ برای شکل‌دهی کانال متقارن با عرض کف اسمی (mm) ۲۰ انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری



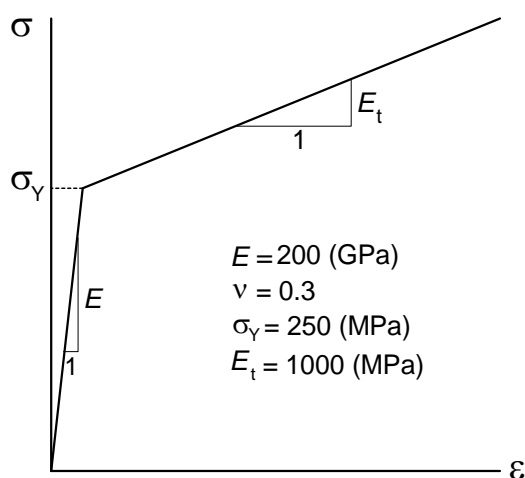
شکل (۴): نمایش پیچ‌خوردگی پروفیل نامتقارن خروجی، در یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده

برای این کار ابتدا با شبیه‌سازی آزمایش باتاچاریا [۱۰] در تولید کانال متقارن و مقایسه‌ی کرنش‌های طولی محاسبه شده با مقادیر تجربی، اعتبار نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داده می‌شود. سپس شبیه‌سازی‌ها برای مقطع نامتقارن مشابه تکرار و اثر تغییر پارامترها بررسی شده است. همچنان که اشاره شد توجه به پدیده‌ی پیچش در شکل‌دهی مقطع کانال نامتقارن، تازگی دارد و برای نخستین بار انجام شده است.

۲- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

ابتدا لازم است اعتبار نتایج شبیه‌سازی بررسی و تأیید شود. در پژوهش‌های پیشین هیچ‌گونه گزارشی درباره‌ی کانال نامتقارن که

شده است. برای مدل‌سازی غلتک‌ها از مدل جسم صلب تحلیلی و برای شبکه‌بندی ورق از المان پوسته‌ی S4R استفاده شده است. در شبکه‌بندی ورق تعداد ۱۵۰ المان در جهت طولی و ۲۰ المان در جهت عرضی استفاده شده است که در ناحیه‌ی خم، بیشترین فشردگی المان منظور شده است. با توجه به تقارن مقطع در مدل اجزای محدود نصف عرض ورق منظور شده است. طول ورق در مدل اجزای محدود کمی بیشتر از دو برابر فاصله‌ی ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است. نمودار تنش-کرنش ورق به صورت دوخطی با مقادیر مشخص شده در شکل (۷) در نظر گرفته شده است. غلتک‌های ایستگاه صفر به صورت استوانه‌ای با تماس بدون اصطکاک با ورق مدل شده‌اند که وظیفه‌ی آنها تنها نگه‌داشتن ورق است. ضریب اصطکاک غلتک‌های ایستگاه اول نیز با ورق ۰/۲ تعریف شده است.



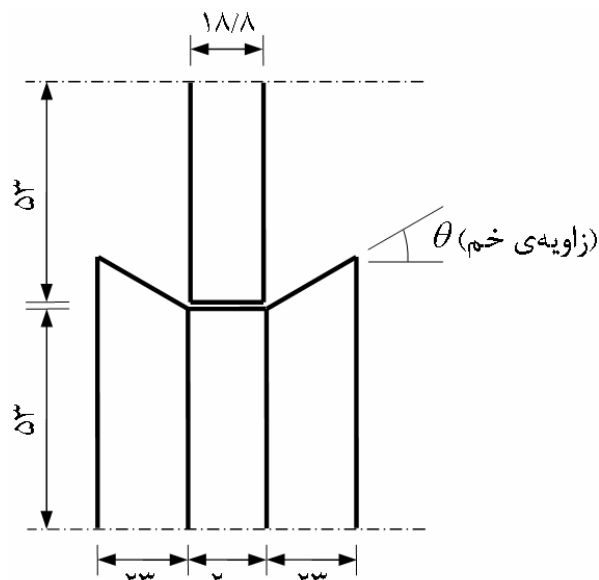
شکل (۷): شکل شماتیک نمودار تنش-کرنش دو خطی و مشخصات مکانیکی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها

۲-۳- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج

تجربی

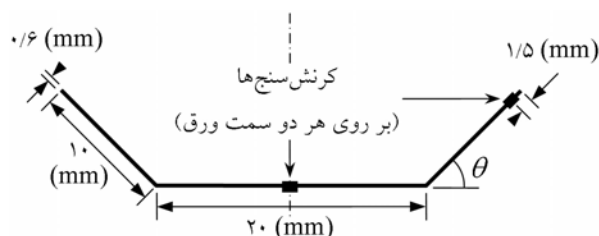
در کار تجربی باتاچاریا و اسمیت [۱۰]، کرنش طولی در سطح رویی و زیرین ورق، در فاصله‌ی ۱/۵ (mm) از لبه‌ی بال و نیز روی خط تقارن ورق به وسیله‌ی کرنش‌سنج‌های الکتریکی، تابعی از موقعیت طولی کرنش‌سنج ثبت شده‌اند. سپس با متوسط گرفتن مقادیر دو کرنش‌سنج بالا و پایین، کرنش غشایی محاسبه شده است. نمودارهای مشابه از شبیه‌سازی‌های انجام شده استخراج و در شکل‌های (۸-الف) تا (۸-د) رسم و با کرنش‌های تجربی مقایسه شده‌اند. در این شکل‌ها نتایج شبیه‌سازی مشابهی که در مرجع [۱۸] انجام شده‌اند نیز مشاهده می‌شود. شبیه‌سازی‌های مرجع [۱۸] با

کرنش طولی در طی فرایند، کرنش‌سنج‌های الکتریکی بر روی سطوح رویی و زیرین ورق، در فاصله‌ی ۱/۵ (mm) از لبه‌ی بال و روی خط تقارن مقطع (وسط ناحیه‌ی کف) و در فاصله‌ی ۴۰۰ (mm) از لبه‌ی جلویی نوار ورق چسبانده شدند.



شکل (۵): هندسه‌ی غلتک‌ها در آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۰] (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

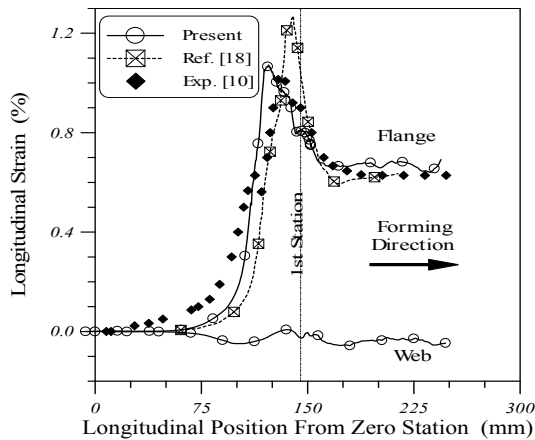
شکل (۶) موقعیت کرنش‌سنج‌ها و هندسه‌ی مقطع را در آزمایش باتاچاریا و اسمیت نشان می‌دهد. سپس با محاسبه‌ی متوسط کرنش سطح رویی و زیرین، کرنش طولی غشایی برحسب موقعیت طولی در فرایند محاسبه شده است. برای بررسی اثر افزایش زاویه پروفیل در ایستگاه اول، فرایند با یک ایستگاه و به ازای چهار زاویه‌ی پروفیل مختلف $\theta = 20^\circ, \theta = 30^\circ, \theta = 40^\circ$ و $\theta = 50^\circ$ تکرار شده است.



شکل (۶): موقعیت کرنش‌سنج‌ها و هندسه‌ی مقطع در آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۰]

۲-۲- مشخصات مدل اجزای محدود

برای شبیه‌سازی اجزای محدود آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۰] از حل‌گر دینامیک صریح نسخه‌ی ۶/۷ نرم‌افزار ABAQUS استفاده



شکل (د)

شکل (۸): مقایسه‌ی کرنش طولی غشایی محاسبه شده از شبیه‌سازی ABAQUS، با نتایج تجربی باتاچاریا و اسمیت [۱۰] و تحلیل مشابه در مرجع [۱۸]، برای چهار زاویه‌ی پروفیل (الف): $\theta = 20^\circ$ ، (ب): $\theta = 30^\circ$ ، (ج): $\theta = 40^\circ$ و (د): $\theta = 50^\circ$.

۳- بررسی پارامتری زاویه‌ی پیچش کانال نامتقارن

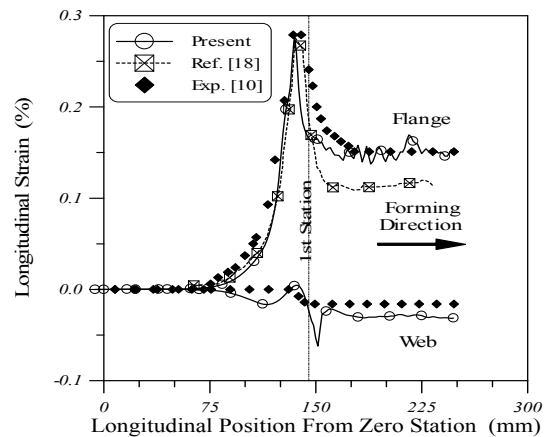
در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی کانال نامتقارن و اثر پارامترهای هندسی بر زاویه‌ی پیچش مقطع، ارائه و بررسی می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها بر اساس ابعاد هندسی و مشخصات مکانیکی آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۰] انجام شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها برای یک ایستگاه انجام شده که در آنها عرض ورق 40 (mm) و عرض کف اسمی 20 (mm) در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌ها دو مقدار $d=2\text{ (mm)}$ و $d=4\text{ (mm)}$ برای تفاوت عرض بال‌ها و سه حالت $\theta = 20^\circ$ و $\theta = 40^\circ$ برای زاویه‌ی پروفیل، سه حالت $t=1/5\text{ (mm)}$ و $t=2/5\text{ (mm)}$ در نظر گرفته شد. ترکیب این حالت‌ها در مجموع ۱۸ نتیجه می‌دهد. با توجه به نامتقارن بودن مقطع، شبیه‌سازی‌ها این قسمت برای تمام عرض ورق انجام شده‌اند. به همین دلیل زمان هر یک از شبیه‌سازی‌ها تقریباً دوبرابر مقطع متقارن است.

۳-۱- بررسی اثر افزایش زاویه‌ی پروفیل، θ ، بر زاویه‌ی پیچش

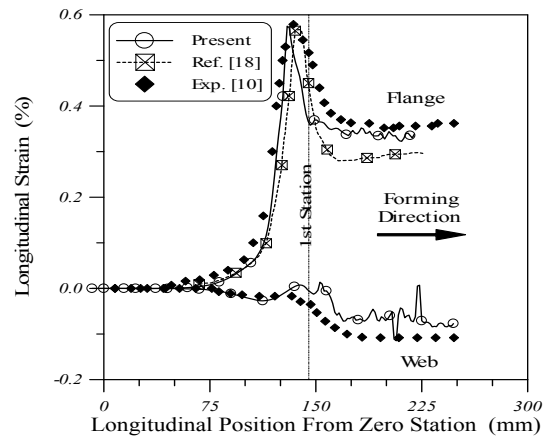
مقطع کانال، α

ابتدا اثر افزایش زاویه‌ی پروفیل، θ ، بر زاویه‌ی پیچش مقطع، α ، بررسی می‌شود. شکل‌های (۹-الف) تا (۹-ج) نمودار زاویه‌ی پیچش مقطع را بر حسب افزایش زاویه‌ی پروفیل، برای سه ضخامت و به‌ازای عرض بال ثابت نشان می‌دهند. همچنان که از این نمودارها مشخص است، با افزایش زاویه‌ی پروفیل، زاویه‌ی پیچش مقطع کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که برای مثال انتخاب شده، برای عرض بال‌ها و ضخامت‌های مختلف، با افزایش زاویه‌ی پروفیل از $\theta = 20^\circ$ به

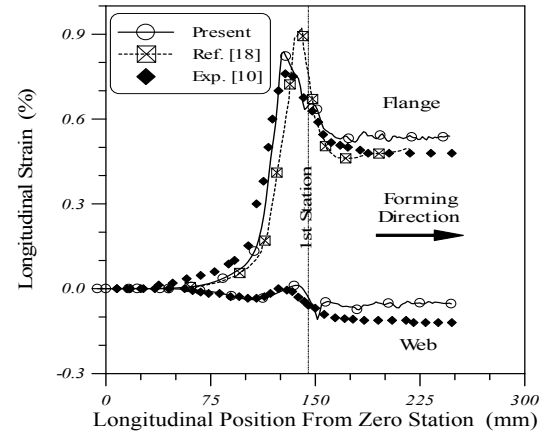
استفاده از حل‌گر ضمنی ABAQUS انجام شده‌اند و برای اعمال تغییر شکل، سر نوار ورق از بین غلتک‌های بدون اصطکاک کشیده شده است. همان‌گونه که مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و تجربی مشاهده می‌شود. برای مثال بیشترین مقدار خطای نسبی در کرنش بیشینه‌ی طولی حدود ۱۲٪ است.



شکل (الف)



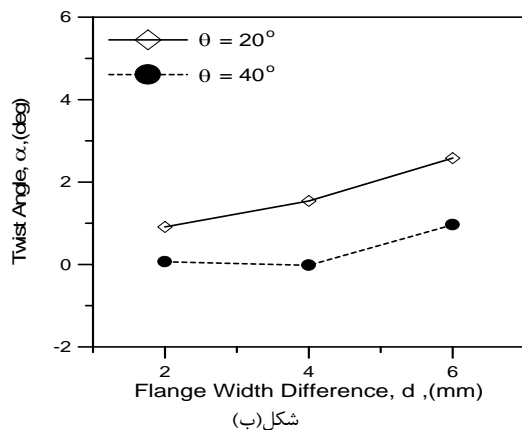
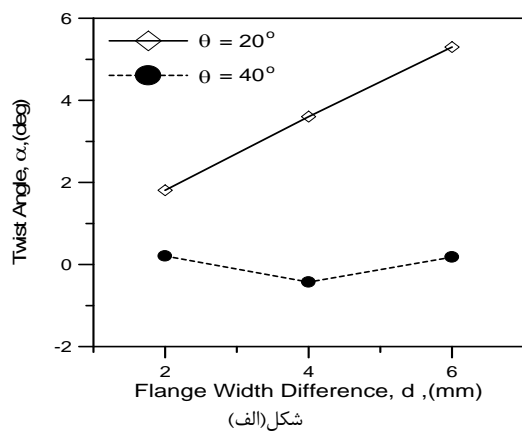
شکل (ب)



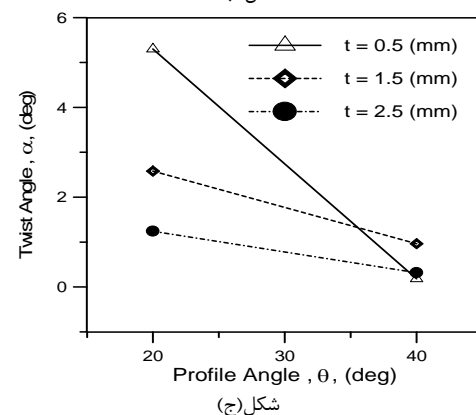
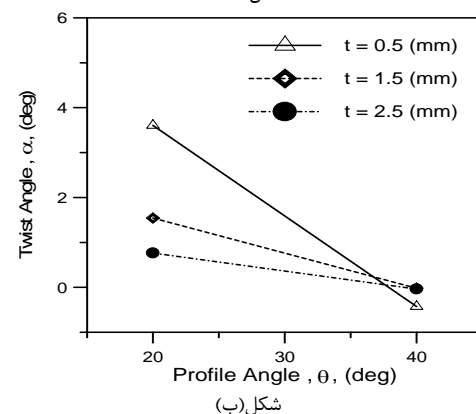
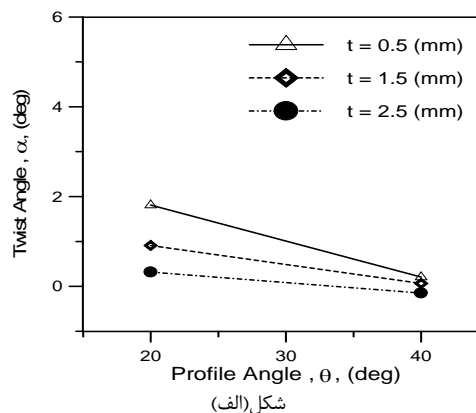
شکل (ج)

مشاهده می‌شود که با افزایش تفاوت عرض بال‌ها، زاویه‌ی پیچش مقطع نیز زیاد می‌شود. شدت این روند افزایشی با افزایش ضخامت کمتر می‌شود. به‌علاوه برای زاویه‌ی پروفیل $\theta = 40^\circ$ ، تغییرات زاویه‌ی پیچش مقطع به‌مراتب کمتر از زاویه‌ی پروفیل $\theta = 20^\circ$ است. البته در قسمت (الف) و (ب) این شکل، برای زاویه‌ی پروفیل $\theta = 40^\circ$ ابتدا کاهش و سپس افزایش دیده می‌شود. اما همان‌گونه که در این شکل‌ها می‌توان دید، اندازه‌ی زاویه‌ی پیچش برای مثال انتخاب شده در زاویه‌ی $\theta = 40^\circ$ ، کوچک و در حدود 1° است. با توجه به کوچک بودن زاویه‌ی پیچش در این حالت و حساسیت احتمالی به خطاهای عددی، احتمال داده می‌شود این تغییر روند ناشی از خطاهای عددی باشد.

به‌جز این تغییرات جزئی، دلیل این تغییرات را می‌توان در تفاوت کرنش‌های طولی بیشینه در لبه‌ی بال‌های مقطع جستجو کرد. اگر کرنش بیشینه در لبه‌ی بال عریض‌تر را با $(\epsilon_{\max})_1$ و کرنش بیشینه در لبه‌ی بال کم‌عرض‌تر را با $(\epsilon_{\max})_2$ نشان دهیم، آنگاه اختلاف نسبی این کرنش‌ها با تعریف زیر، تعیین‌کننده‌ی میزان زاویه‌ی پیچش مقطع است.



$\theta = 40^\circ$ ، زاویه‌ی پیچش مقطع به مقداری بین صفر تا 1° همگرا می‌شود.



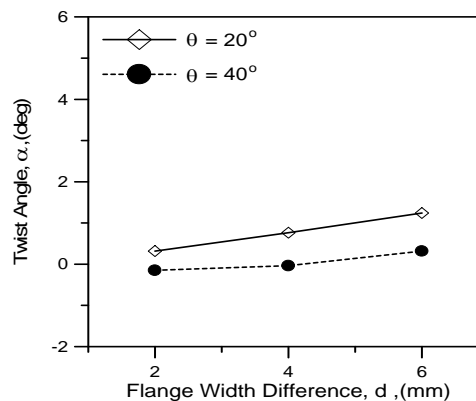
شکل (۹): اثر افزایش زاویه‌ی پروفیل بر زاویه‌ی پیچش مقطع به ازای تفاوت عرض بال‌های مختلف، الف): $d = 2$ (mm)، ب): $d = 4$ (mm) و ج): $d = 6$ (mm)

۳-۲- بررسی اثر افزایش تفاوت عرض بال، d ، بر زاویه‌ی پیچش مقطع کانال، α

نمودارهای شکل (۹) را می‌توان از یک دید دیگر نیز نگاه کرد. اگر برای هر ضخامت، زاویه‌ی پیچش مقطع، α ، بر حسب افزایش تفاوت عرض بال‌ها، d ، رسم شود، نمودارهای شکل (۱۰) به‌دست می‌آید.

جدول (۱)، کرنش‌های بیشینه‌ی لبه‌ی دو بال و تفاوت نسبی آنها را برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود بیشترین اختلاف نسبی کرنش‌های بیشینه مربوط به ضخامت $t=0/5$ (mm) و تفاوت عرض بال‌های $d=6$ (mm) و زاویه‌ی پروفیل $\theta=20^\circ$ است که بزرگترین زاویه‌ی پیچش مقطع نیز برای همین حالت مشاهده شد.

نکته‌ای که در اینجا لازم است به آن اشاره شود، پدیده‌ی جابه‌جایی عرضی ورق در هنگام شکل‌دهی است که در شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد. منظور از جهت عرضی در اینجا، جهت ۱ در شکل (۴) است. این پدیده که ناشی از نامتقارن بودن مقطع است و در نتیجه عدم توازن نیروهای وارد بر ورق در جهت عرضی است، تا حدودی روی روند پاسخ‌ها تأثیر گذاشته است. چرا که جابه‌جایی عرضی می‌تواند روی الگوی تغییر شکل ورق تأثیر بگذارد. احتمالاً زاویه‌ی پیچش منفی در برخی حالت‌های شبیه‌سازی که متناظر با منفی شدن r نیز هست، به‌دلیل همین پدیده است.



شکل (ج)

شکل (۱۰): اثر افزایش تفاوت عرض بال بر زاویه‌ی پیچش مقطع به ازای ضخامت‌های مختلف، الف): $t=0/5$ (mm)، ب): $t=1/5$ (mm) و ج): $t=2/5$ (mm)

بدیهی است که انتظار می‌رود $(\epsilon_{max})_1$ از $(\epsilon_{max})_2$ بزرگتر باشد.

$$r = \frac{(\epsilon_{max})_1 - (\epsilon_{max})_2}{(\epsilon_{max})_2} \times 100 \quad (1)$$

جدول (۱): کرنش‌های بیشینه‌ی لبه‌ی دو بال و تفاضل نسبی آنها، برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی کانال نامتقارن

ضخامت (mm)	زاویه‌ی پروفیل	تفاوت عرض بال‌ها	$(\epsilon_{max})_1$ (%)	$(\epsilon_{max})_2$ (%)	$r=100 \times [(\epsilon_{max})_1 - (\epsilon_{max})_2] / (\epsilon_{max})_2$ (%)
$t = 0/5$	$\theta = 20^\circ$	$d = 2$	۰/۳۹	۰/۴۶	۱۸
		$d = 4$	۰/۳۳	۰/۵۲	۵۸
		$d = 6$	۰/۳۰	۰/۵۴	۸۰
	$\theta = 40^\circ$	$d = 2$	۱/۱۳	۱/۱۶	۲/۷
		$d = 4$	۱/۰۷	۱/۲۲	۱۴
		$d = 6$	۱/۱۰	۱/۲۴	۱۳
$t = 1/5$	$\theta = 20^\circ$	$d = 2$	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۰۲
		$d = 4$	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۰۲
		$d = 6$	۰/۶۱	۰/۵۹	-۰/۰۳
	$\theta = 40^\circ$	$d = 2$	۲/۰۲	۲/۰۷	۲/۵
		$d = 4$	۲/۰۱	۲/۰۴	۱/۵
		$d = 6$	۲/۰۴	۲/۰۳	-۰/۵
$t = 2/5$	$\theta = 20^\circ$	$d = 2$	۰/۶۵	۰/۶۲	۴/۸
		$d = 4$	۰/۶۱	۰/۵۷	-۶/۶
		$d = 6$	۰/۵۷	۰/۵۵	-۳/۷
	$\theta = 40^\circ$	$d = 2$	۱/۹۴	۲/۱۴	۱۰/۳
		$d = 4$	۱/۷۸	۲/۲۳	۲۵/۳
		$d = 6$	۱/۸۶	۲/۲۵	۲۱

هندسی بر زاویه‌ی پیچش مقطع بررسی شد. برای این کار از مشخصات آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۱۰] برای کانال متقارن، به‌عنوان مبنای شبیه‌سازی‌ها و اعتبارسنجی نتایج آن استفاده شد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌دهی غلتکی مقطع کانال نامتقارن (کانال با عرض بال‌های مختلف)، اثر پارامترهای

- در بررسی اثر تفاوت عرض بال‌ها، ضخامت ورق و زاویه‌ی پروفیل، نتایج زیر از شبیه‌سازی‌ها به‌دست آمد.
۱. زاویه‌ی پیچش مقطع با کاهش ضخامت، افزایش می‌یابد.
 ۲. زاویه‌ی پیچش مقطع با کاهش زاویه‌ی پروفیل افزایش می‌یابد.
 ۳. همچنین زاویه‌ی پیچش مقطع با افزایش تفاوت عرض بال‌ها نیز افزایش می‌یابد.
 ۴. برای مثال انتخاب شده، با افزایش زاویه‌ی پروفیل از $\theta = 20^\circ$ به $\theta = 40^\circ$ ، زاویه‌ی پیچش مقطع به مقداری بین صفر تا 1° همگرا می‌شود.
 ۵. پارامتر اختلاف نسبی کرنش‌های بیشینه‌ی دو بال که در مقاله با r نشان داده شد، نقش اساسی در اندازه‌ی زاویه‌ی پیچش مقطع دارد.
 ۶. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌عنوان یک پیشنهاد کاربردی می‌توان نتیجه گرفت که اگر پروفیل قالب، کمی در جهت خلاف پیچش مقطع خروجی چرخش داده شود، می‌تواند در اصلاح پیچش مقطع خروجی مؤثر باشد. زیرا با این کار میزان کشیدگی اعمال شده در دو بال، یکنواخت‌تر می‌شود.
 ۷. بروز پدیده‌ی جابه‌جایی عرضی ورق در حین شکل‌دهی که به‌دلیل نامتقارن بودن مقطع رخ می‌دهد، تا حدودی بر روی روند نتایج اثر گذاشته است.
- ### ۵- مراجع
- [6] D. Bhattacharyya, T. C. Maltby, T. A. Martin and S. M. Panton, "Prediction of Strain Development while Roll Forming Fundamentals Sections", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, pp. 871-876, 1990.
 - [7] J. Fewtrell, "An Experimental Analysis of Operating Conditions in Cold Roll Forming", Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1990.
 - [8] M. Kiuchi, T. Koudabashi, "Roll Forming of Circular Tube-Automated Design System of Optimal Roll Profiles", *International Conference 'Tubes and Energy'*, Eurogress-Aachen, West Germany, pp. 1/4/1-1/4/15, 11-12 Oct. 1983.
 - [9] M. Kiuchi, T. Koudabashi and T. Sato, "Automated Design System of Optimal Roll Profiles for Roll Forming of Welded Pipe and Tube", *Proceeding of the 3th International Conference of Steel Rolling*, Tokyo, pp. 335-342, 2-6 Sept. 1985.
 - [10] D. Bhattacharyya, P. Smith, C. H. Yee and I. F. Collins, "The Prediction of Deformation Length in Cold Roll Forming", *J. of Mech. Working Technol.* 9, pp. 181-191, 1984.
 - [11] S. M. Panton, "Computer Aided for Roll Forming Design", Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1987.
 - [12] G. Nefussi and P. Gilormini, "A Simplified Method for the Simulation of Cold Roll Forming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 10, pp. 867-878, 1993.
 - [13] G. Nefussi and P. Gilormini, "A kinematical Method for the Simulation of Cold-Roll Forming Process", *ECCOMAS*, Barcelona, 2000.
 - [14] T. Toyooka, "Computer Simulation for Tube- Making by the Cold Roll-Forming Process", Ph.D. Thesis, The University of Aston in Birmingham, 1999.
 - [15] H. Moslemi Naeini, M. Salmani Tehrani and R. Safdarian, "Investigating the Weight of Longitudinal out-of-Plane Bending Energy in Predicting "Deformation Length" in Roll-Forming of Symmetric Channel Section", *Proceedings of the 12th MetalForming Conference*, pp. 141-144, Krakow, Poland, 21-24 Sept., 2008.
 - [16] M. Brunet, "Numerical Analysis of Cold-Forming Residual Stresses in Thin-Walled Structures", *NUMIFORM Conference*, Balkema, Rotterdam, 1992.
 - [17] N. Rebelo, J. C. Nagtegaal, L. M. Taylor and R. Passman, "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods in the Simulation of Metal Forming Processes", *ABAQUS Users Conf.*, Newport, RI, 1992.
 - [18] C. K. McClure and H. Li, "Roll Forming Simulation using Finite Element Analysis", *Manufacturing Review*, Vol. 8, pp. 114-122, 1995.
 - [19] B. Wen and R. J. Pick, "Modeling of Skelp Edge Instabilities in the Roll Forming of ERW Pipe", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 41, pp. 425-446, 1994.
 - [20] R. S. Senanayake, I. M. Cole and S. Thiruvarduchelvan, "The Application of Computational and Experimental to Metal Deformation in Cold Roll Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp. 155-163, 1994.
 - [1] R. T. Angel, "Designing Tools for Cold Roll Forming, The Iron Age", Vol.16, No.3, pp. 83-88, 1949.
 - [2] H. Ona, T. Jimma and N. Fukaya, "Experiments on the Forming of Straight Asymmetrical Channels - Research on the High Accuracy Cold Roll Forming Process of Channels Type Cross Section", *Journal of JSTP*, Vol. 22, pp. 1244-1251, Dec. 1981.
 - [3] H. Ona, T. Jimma, M. Shimada and H. Morimoto, "Research on High Accuracy Col Roll Forming Process. Experiment on the Pocket Wave of Wide Profiles", *Journal of JSTP*, Vol. 23, pp. 664-671, Jly. 1982.
 - [4] H. Ona, T. Jimma, H. Kozono and T. Nakako, "Development in CAD for Cold Roll Forming", *Proceeding of the 26th international M.T.D.R. Conference*, pp. 49-54, Manchester, 1986.
 - [5] M. Kiuchi, "Overall Study on Roll Forming Process of Square and Rectangular Pipes", *Proceeding of the 2nd international Conference on Rotary Metalworking Processes*, pp.213-226, 1982.

- [25] A. Alsamhan, I. Pillinger and P. Hartley, "The Development of Real Time Re-meshing Technique for Simulating Cold-Roll-Forming Using FE Methods", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147.
- [26] Q. V. Bui., L. Papeleux, R. Boman, J. P. Ponthot, P. Wouters, R. Kergen and G. Daolio, "Numerical Simulation of Cold Roll Forming Process", *Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming*, pp. 141-144, Cluj, Romania, 27-29 Apr, 2005.
- [۲۷] م. سلمانی تهرانی، "تحلیل و پیش‌بینی عیوب در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع متقارن پایه، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود"، پایان‌نامه‌ی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
- [21] F. Heislitz, H. Livatyali, M. A. Ahmetoglu, G. L. Kinzel, and T. Altan, "Simulation of Roll Forming Process With 3-D Code PAM-STAMP", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 59-67, 1996.
- [22] C. Dong, D. Onipede, "Deformation Mechanics in Cold-Roll-Formed Wide Profiles", *Proceedings of the 5th International LS-DYNA Conference*, Southfield, USA, 21-22 Sep 1998.
- [23] M. Kiuchi, I. Nakata and F. Wang, "FEM Simulation of Roll-Forming Process of ERW Pipe by Flexible Forming Mill", *4th Joint Workshop on Production Technology*, Japan, 1998.
- [24] A. Alsamhan, P. Hartley and I. Pillinger, "The Computer Simulation of Cold-Roll-Forming Using FE Methods and Applied Real Time Re-meshing Techniques", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 102-111, 2003.