

# بررسی تجربی و عددی پارامترهای مؤثر بر گشتاور و توان در فرایند شکل دهی غلتکی سرد مقاطع کانال متقارن

یحیوب دادگر اصل (دانشجوی دکتری)  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی  
رسول صفدریان (استادیار)  
گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان  
حسن مسلمی نائینی\* (استاد)  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس  
ولی‌اله پناهی‌زاده رحیم‌لو (استادیار)  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

مهندسی مکانیک شریف، ایلینز ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)  
دوره ۳ - شماره ۲، ص. ۹۱-۹۷

در این نوشتار عوامل مؤثر بر گشتاور شکل دهی - شامل هندسه ی غلتک، ضخامت ورق، تنش تسلیم ورق، عرض ورق و زاویه ی شکل دهی - و نیز توان مورد نیاز در فرایند شکل دهی غلتکی سرد بررسی می شود. با توجه به ثابت بودن عرض کف پروفیل، افزایش عرض ورق سبب افزایش عرض بال مقطع می شود. این فرایند با نرم افزار اجزاء محدود Abaqus برای دو نوع هندسه با غلتک بالایی تخت و زاویه دار شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی ها نشان داد که افزایش استحکام تسلیم، زاویه ی شکل دهی و ضخامت ورق، به افزایش گشتاور وارد شده، به غلتک ها می انجامد و در نتیجه توان شکل دهی افزایش می یابد. افزایش عرض ورق باعث کاهش گشتاور مورد نیاز برای شکل دهی می شود. نتایج نشان می دهد که مقدار گشتاور اعمالی به غلتک ها و در نتیجه توان مورد نیاز شکل دهی برای ایستگاه شکل دهی با غلتک های بالایی تخت در تمام حالت های مورد بررسی کمتر است. بررسی تأثیر ضخامت و عرض ورق در آزمایش های تجربی، مؤید شبیه سازی های اجزای محدود است.

واژگان کلیدی: شکل دهی غلتکی سرد، گشتاور شکل دهی، هندسه ی غلتک، کرنش طولی، شبیه سازی اجزای محدود.

y.dadgar@srttu.edu  
safdanan@bkatu.ac.ir  
moslemi@modares.ac.ir  
v.panahizaf@yahoo.com

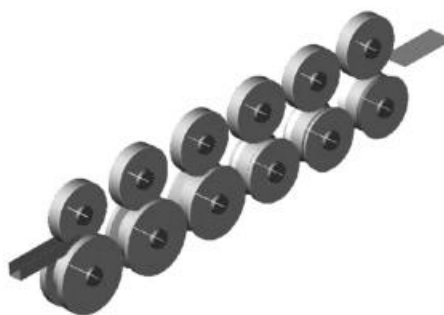
## ۱. مقدمه

از روی منجر می شود. از سویی، کم بودن مقدار شکل دهی در یک ایستگاه، علاوه بر طولانی کردن خط تولید و افزایش زمان شکل دهی، از راندمان شکل دهی می کاهد. از پارامترهای اساسی تأثیرگذار بر گشتاور و توان شکل دهی غلتکی سرد می توان به هندسه ی غلتک، تنش تسلیم و ضخامت ورق، زاویه ی شکل دهی در هر ایستگاه، شرایط روان کاری، سرعت دورانی غلتک و فاصله ی ایستگاه ها اشاره کرد. محققین با استفاده از نرم افزار Marc مقطع کانالی متقارن را بررسی [۱] و مقاطع ساده را مدل سازی کردند. آنها به محاسبه ی نظری کرنش خمیری پرداختند، و با به کارگیری کرنش سنج در آزمایش های تجربی، شاهد مطابقت خوب نتایج عددی و تجربی بودند. در مطالعه یی دیگر، با ارائه ی یک برنامه ی شبیه سازی اجزای محدود صلب - خمیری سه بعدی و با در نظر گرفتن مشخصه های نوع و ضخامت ورق، قطر و سرعت غلتک ها و رفتار تغییر شکل ماده، [۲] طول تغییر شکل را تخمین زدند. آنها نتیجه گرفتند که کارسختی تأثیر به سزایی در طول تغییر شکل ورق های از قبل

شکل دهی غلتکی سرد یکی از روش های رایج و پر بازده در صنعت شکل دهی ورقی فلزات است. این فرایند شامل چند مرحله شکل دهی فلز به صورت پیوسته و متوالی است که در هر مرحله با اعمال مقدار مشخصی شکل دهی، ورق به محصول نهایی نزدیک می شود. از کاربردهای این فرایند می توان به تولید پروفیل با مقاطع مختلف مانند کانالی، کلاهی، ناودانی، لوله یی و... اشاره کرد. در شکل ۱ طرح وارهیی از فرایند شکل دهی غلتکی سرد نشان داده شده است. یکی از مسائل بسیار مهم در بررسی فرایندهای شکل دهی فلزات، برآورد گشتاور و توان مورد نیاز در شکل دهی است. شکل دهی بیش از حد، باعث افزایش نامتعارف گشتاور و توان شکل دهی شده و به پیامدهایی چون سایش غلتک ها، خرابی زودتر از موعد پاتاقان ها، و کاهش بازدهی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۸/۳، پذیرش ۱۳۹۴/۱/۱۴



شکل ۱. طرح‌واره از فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد. [۳]

مقاطع کانالی مقایسه می‌شود. به دلیل تعدد پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی‌ها از روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده می‌شود. در بخش آزمایش‌های تجربی تحقیق حاضر یک سری آزمایش‌های تجربی برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها انجام شد. مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی، نشان‌گر مطابقت و هماهنگی بسیار خوب این نتایج است. در بین منابع مرتبط با تحقیق حاضر، فقط در یک مورد تأثیر استحکام ورق بر توان و گشتاور شکل‌دهی بررسی شده، [۱۹] در حالی که در تحقیق حاضر علاوه بر استحکام، تأثیر سایر پارامترها شامل ضخامت، عرض ورق و زاویه‌ی شکل‌دهی برگشتاور و توان شکل‌دهی بررسی می‌شود. علاوه بر این تأثیر دو نوع هندسه‌ی متفاوت برای غلتک بالایی بررسی می‌شود.

## ۲. شبیه‌سازی اجزای محدود

### ۱.۲. طراحی آزمایش به روش تاگوجی

به دلیل تعدد عوامل مؤثر، آزمایشی بر مبنای روش تاگوجی طراحی شد. از آنجا که ماهیت روش تاگوجی با محدودیت‌هایی از لحاظ تعداد عوامل و سطوح آن مواجه است، انتخاب طرحی متناسب با آزمایش، از حالات از پیش تعیین شده روش تاگوجی، به عهده‌ی طراح است. نهایتاً طرحی شامل ۳۲ آزمایش برای پنج عامل، به صورت یک عامل دوسطحی و ۴ عامل چهارسطحی انتخاب شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. بعد از اجرای شبیه‌سازی‌ها نتایج توسط نرم‌افزار Minitab و به روش آنالیز پراکنش (ANOVA) تحلیل شد و نتیجه‌ی شبیه‌سازی برای تمام سطوح عوامل تخمین زده شد. دلیل انتخاب دو زاویه‌ی ۱۰ و ۲۰ درجه برای غلتک‌ها و همچنین چند استحکام متفاوت بصورتی که در جدول ۱ ارائه شده است، مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی تحقیق حاضر با نتایج مرجع مقایسه می‌باشد. محدودده‌ی سایر پارامترها — شامل ضخامت و عرض ورق — نیز نزدیک به مقادیر مورد استفاده در آزمایش تجربی انتخاب شده تا تأثیر این پارامترها برگشتاور و توان شکل‌دهی بررسی شود. به منظور بررسی اثر هندسه‌ی غلتک، استحکام تسلیم، زاویه‌ی خم، ضخامت و عرض ورق، شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شد که در ادامه روند مدل‌سازی و انجام شبیه‌سازی‌ها به تفصیل بیان شده است. هندسه‌ی غلتک‌ها عاملی تأثیرگذار برگشتاور غلتک‌ها و توان مورد نیاز شکل‌دهی است. هندسه‌ی زاویه‌دار و تخت مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۲.۲. مدل‌سازی فرایند

در جدول ۱ هندسه، استحکام‌های تسلیم، ضخامت‌ها و عرض‌های ورق و زوایای خم استفاده شده در شبیه‌سازی‌های مختلف درج شده است. مدل شامل چهار ایستگاه است که دو ایستگاه اول برای تغذیه‌ی ورق به ایستگاه‌های شکل‌دهی کاربرد دارد و دو ایستگاه بعد با زاویه‌های مساوی برای شکل‌دهی ورق مورد استفاده قرار

جدول ۱. پارامترها و سطوح مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها.

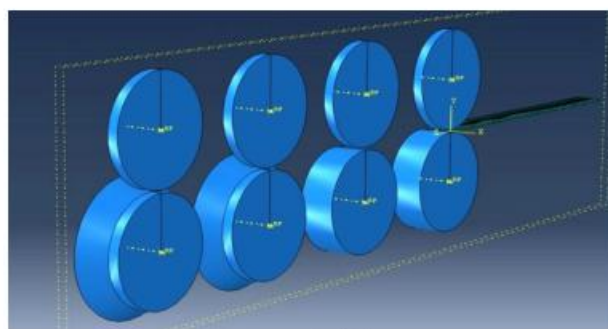
سطوح	پارامتر
۱۰ و ۲۰	زاویه‌ی شکل‌دهی (deg)
۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰	عرض ورق (mm)
۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰	استحکام تسلیم (MPa)
۲، ۲٫۵، ۳ و ۳٫۵	ضخامت ورق (mm)
تخت و زاویه‌دار	هندسه‌ی غلتک

شکل دهی شده دارد. در بررسی شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع باز متقارن، [۲] با در نظر گرفتن رفتار کشسانی - خمیرسانی ورق و منظور کردن اثر باوشینگ، تنش‌های عرضی، طولی و برشی محاسبه شد، و با محاسبه‌ی توان و کمینه‌کردن آن، پروفیل تغییر شکل ورق بین ایستگاه‌ها به دست آمد. سپس به کمک نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus شکل‌دهی یک مقطع کانالی شبیه‌سازی، [۵] و با انجام آزمایش‌های تجربی نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی ارزیابی شد. در تحقیقی دیگر نیز با ایجاد کد اجزای محدود پروفیل، [۶] چند مقطع — از جمله مقطع کانالی — شبیه‌سازی شد.

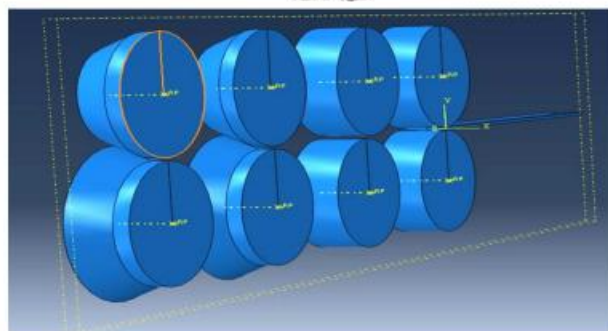
محققین با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Marc، روابطی برای طول تغییر شکل و نیز کرنش طولی در لبه‌ی مقطع کانالی ارائه کردند. [۷] آنان با یک طراحی فاکتوریل دوسطحی با استفاده از تحلیل اجزای محدود، به بررسی پارامترهای مؤثر بر کرنش بیشینه و طول تغییر شکل پرداختند. در تحقیقی دیگر تأثیر استحکام ورق بر طول تغییر شکل و کرنش طولی در لبه‌ی ورق بررسی، [۸] و مشاهده شد که با افزایش استحکام تسلیم، طول تغییر شکل و کرنش طولی کاهش می‌یابد. همچنین نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها بررسی شد [۹] و با یک سری آزمایش‌های تجربی، نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها و توان مصرفی به دست آمد. در مطالعه‌ی مذکور، تأثیر استحکام تسلیم بر بار و گشتاور غلتک بررسی و دو مدل برای بار و گشتاور ارائه شد. مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از مدل‌ها با نتایج آزمایش‌های تجربی به خوبی مطابقت داشت.

در مطالعات بعدی، [۱۰] محققین از نرم‌افزار اجزای محدود Metafor برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، در شکل‌دهی کانالی ساخته شده از فولاد ضدزنگ و فولاد با استحکام بالا استفاده کردند. محققین از تکنیک‌های بهینه‌سازی خبره برای تعیین پارامترهای بهینه فرایند، در ایستگاه پایانی فرایند شکل‌دهی غلتکی بهره بردند. [۱۱] از فولاد با استحکام بسیار بالا برای شکل‌دهی غلتکی مقطع V شکل استفاده شد و نتایج عیوب برگشت فزنی و شمشیری شدن در محصول نشان داده شد. در تحقیقات بعدی محققین به بررسی تأثیر انرژی خمش طولی بر طول تغییر شکل پرداختند [۱۲] که در آن نسبت انرژی خمش صرف شده برای خمش ورق در ناحیه‌ی بال ورق به انرژی محاسبه شده توسط باتاچاریا در ناحیه‌ی خم محاسبه، و مشاهده شد این انرژی قابل توجه است و باید ضمن افزودن آن به انرژی در نظر گرفته شده در مدل باتاچاریا، طول تغییر شکل مجدداً محاسبه شود. محققین با ارائه‌ی معیاری، به بررسی نقص چین خوردگی [۱۳] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود نرم‌افزار آباکوس پرداختند. در این معیار از کرنش طولی لبه استفاده شد؛ وقتی کرنش طولی لبه از حدی افزایش یابد، در لبه‌ی محصول چین خوردگی ایجاد می‌شود.

در این مطالعه اثر پارامترهای هندسه‌ی غلتک، تنش تسلیم، ضخامت و عرض ورق و همچنین زاویه‌ی شکل‌دهی برگشتاور و توان مصرفی بررسی می‌شود. آثار دو هندسه‌ی متفاوت از غلتک‌ها برگشتاور و توان در فرایند شکل‌دهی غلتکی

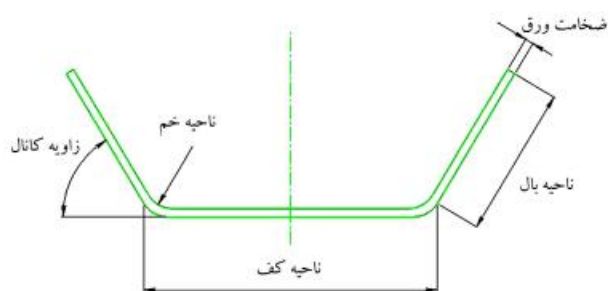


الف) تخت؛

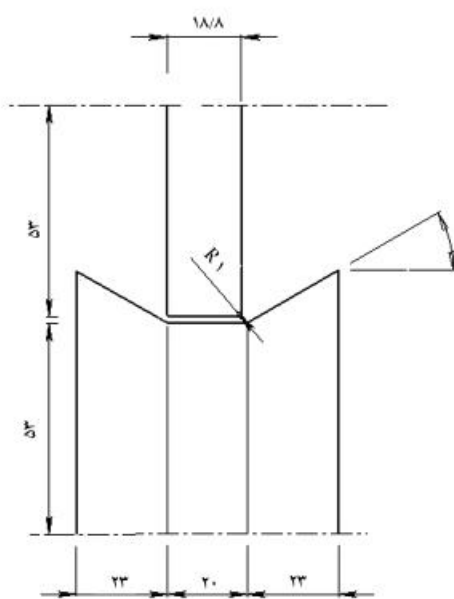


ب) زاویه دار.

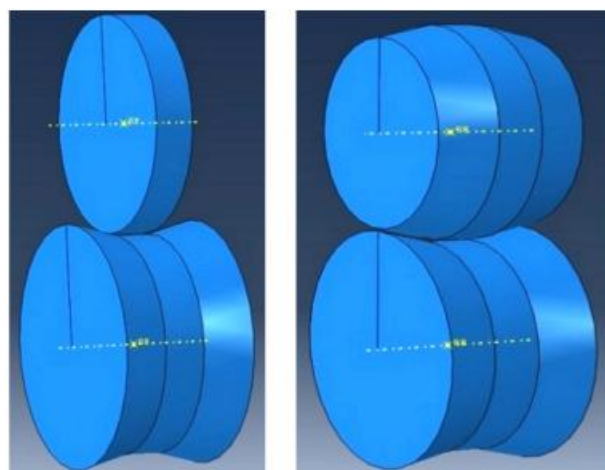
شکل ۳. نحوه‌ی سوارکردن غلتک‌های نگه‌دارنده و غلتک‌های شکل‌دهی روی ورق در خط تولید برای هندسه‌ی غلتک بالایی.



شکل ۴. قسمت‌های مختلف یک مقطع و اندازه‌های هر قسمت.



شکل ۵. مشخصات غلتک‌های شکل‌دهی.



ب) تخت.

الف) زاویه دار؛

شکل ۲. شمایی از غلتک‌های شکل‌دهی با هندسه‌ی غلتک بالایی.

می‌گیرد. از آنجا که زاویه‌ی شکل‌دهی در ایستگاه بعدی روی نیرو و گشتاور وارد بر غلتک‌ها در ایستگاه مورد نظر اثر می‌گذارد، به منظور رفع این تأثیر و نیز تعیین اثر واقعی زاویه‌ی شکل‌دهی هر ایستگاه بر نیرو و گشتاور در آن ایستگاه، زاویه‌ی دو ایستگاه شکل‌دهی مساوی در نظر گرفته شد تا در ایستگاه دوم عملاً تغییر شکلی روی ورق اعمال نشود. غلتک‌ها مطابق شکل ۲ در نرم‌افزار کتیا مدل، با پسوند igs ذخیره و به نرم‌افزار Abaqus منتقل شدند.

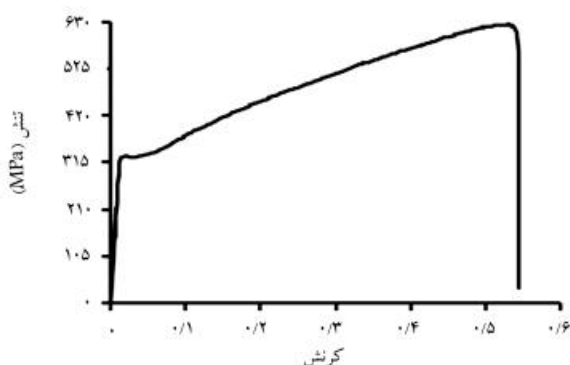
از آنجا که فاصله‌ی بین ایستگاه‌ها ۱۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد، چون ورق باید در هر لحظه دست کم با دو ایستگاه شکل‌دهی درگیر باشد، ورقی به طول ۳۰۰ میلی‌متر مدل شد. غلتک بالایی در ایستگاه‌های شکل‌دهی تخت است و غلتک پایینی در این ایستگاه‌ها دارای پروفیلی زاویه‌دار است و در واقع عامل اصلی ایجاد خم روی ورق است. فاصله‌ی بین غلتک‌ها به اندازه‌ی ضخامت ورق در نظر گرفته شد. در شکل ۳ نحوه‌ی سوارکردن غلتک‌های نگه‌دارنده و غلتک‌های شکل‌دهی بر روی ورق نشان داده شده است.

مقطع کانالی مورد بحث در این مطالعه یک صفحه‌ی تقارن دارد که از خط مرکزی آن می‌گذرد. با توجه به تقارن مذکور، نیمی از آن مدل شد. در شکل ۴ قسمت‌های مختلف یک مقطع به همراه اندازه‌هایی که براساس آنها غلتک طراحی شده، نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز شمایی از غلتک‌های شکل‌دهی بالا و پایین و اندازه‌های آنها نشان داده شده است.

با توجه به ناچیز بودن مقدار تغییر شکل غلتک‌ها از یک سو، و مد نظر نبودن بررسی تغییر شکل غلتک‌ها در این مطالعه از سوی دیگر، غلتک‌ها را صلب و ورق را شکل‌پذیر در نظر گرفتیم. المان‌های هشت‌گره‌یی از نوع C3D8R برای شبکه‌بندی ورق استفاده شده است. از آنجا که هدف اندازه‌گیری نیرو و توان شکل‌دهی بوده است و نیروی ناشی از شبیه‌سازی با المان توپر به نتایج تجربی نزدیک‌تر است، از المان توپر برای مدل‌سازی ورق استفاده شده است. محققین این موضوع را در قالب مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی با المان توپر و المان پوسته بررسی کرده‌اند<sup>[۱۳]</sup> و نتیجه گرفته‌اند که برای بررسی نیرو نتایج مدل‌سازی با المان توپر بهتر از المان پوسته است. در طول ضخامت ورق سه ردیف المان در نظر گرفته شده است. همچنین برای اطمینان از جواب، ناحیه‌ی خمش با المان‌های ریزتری شبکه‌بندی شده است (دو المان در هر میلی‌متر). در شکل ۶ نمایی از ورق شبکه‌بندی شده نشان داده شده است.



شکل ۸. نمایی از دستگاه آزمایشگاهی.



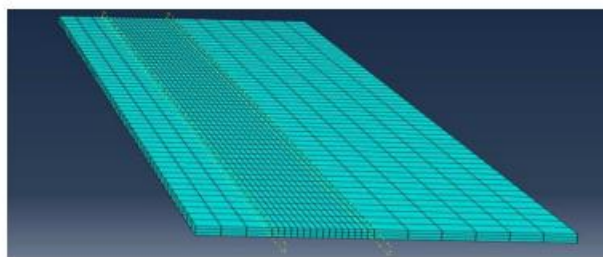
شکل ۹. نتایج آزمون کشش ورق ST12.

#### ۴. نتایج و بحث

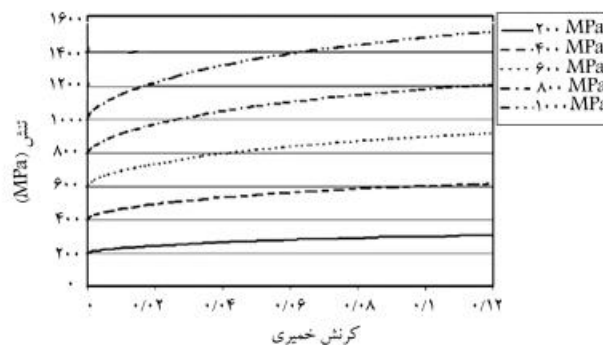
به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus، نتایج مدل‌سازی‌ها به دو صورت صحت‌سنجی شد: ۱. با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی تحقیق حاضر؛ ۲. از مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر با نتایج محققین دیگر. از آنجا که آزمایش‌های تجربی به منظور بررسی تأثیر دسته‌ی از پارامترها بر توان مصرفی انجام شده، نتایج آنها در بخش بررسی تأثیر پارامترها (بخش ۲.۴) ارائه و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شود.

##### ۱.۴. صحت نتایج شبیه‌سازی با نتایج لیندگرن

در ادامه، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحقیق لیندگرن<sup>[۸]</sup> مقایسه می‌شود. برای این منظور تعدادی شبیه‌سازی براساس اطلاعات ذکر شده در این مرجع انجام و کرنش طولی لبه‌ی حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده تأثیر افزایش استحکام ورق مورد استفاده در شکل‌دهی برای دو زاویه‌ی ۱۰° و ۲۰° درجه روی کرنش طولی لبه مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی مورد نیاز برای بررسی تأثیر استحکام از شکل ۷ استخراج شده است. در شکل ۱۰ نتایج این بررسی نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، افزایش استحکام تسلیم منجر به کاهش کرنش طولی شده است. دلیل این امر را می‌توان کاهش میزان تغییر شکل و کشش در ناحیه‌ی بال ورق و اثر افزایش استحکام تسلیم و در نتیجه کاهش کرنش طولی لبه دانست. مقایسه‌ی شکل ۱۰ الف با شکل ۱۰ ب نشان می‌دهد که با افزایش زاویه‌ی شکل‌دهی، مقدار کرنش طولی لبه به شدت زیاد شده است. دلیل این امر



شکل ۶. نمایی از ورق شبکه‌بندی شده.



شکل ۷. منحنی تنش حقیقی - کرنش خمیری حقیقی. [۸]

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، فرض شد که ماده در تمام جهات خواص همسان‌گرد دارد. برای تعیین دقیق مقدار نیرو و گشتاور وارده بر غلتک‌ها، باید حالات ارتجاعی و خمیری و نیز رفتار کارسختی ماده در نظر گرفته شود که در این راستا قانون کارسختی همسان‌گرد مورد استفاده قرار گرفت. ناحیه‌ی کشسانی در نرم‌افزار Abaqus با وارد کردن مدول یانگ ۲۰۷ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ مشخص می‌شود. برای معرفی ناحیه‌ی خمیری، منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی به نرم‌افزار داده شد. در شکل ۷ هم منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی ۷ ماده با تنش‌های تسلیم در جدول ۱ نشان داده شده است. هدف استفاده از این خواص، مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر با نتایج مطالعات پیشین<sup>[۸]</sup> است. سرعت حرکت ورق در طول خط تولید معادل ۰/۶ متر بر ثانیه تنظیم شد. این سرعت براساس شرط شبه‌استاتیک بودن فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد انتخاب شده است. سرعت دورانی به غلتک پائینی اعمال شده و غلتک بالایی به صورت هرزگرد در نظر گرفته شده که با نیروی ناشی از اصطکاک بین ورق و غلتک می‌چرخد. برای ایجاد کشش در ورق در بین ایستگاه‌ها ۰/۵ درصد افزایش سرعت در ایستگاه‌های بعدی اعمال شد. ضریب اصطکاک بین ورق و غلتک با توجه به استفاده نکردن از روان‌کار<sup>[۹]</sup> برابر ۰/۱ انتخاب شد.

##### ۳. آزمایش‌های تجربی

برای صحت‌سنجی نتایج مدل اجزای محدود در نرم‌افزار Abaqus تعدادی آزمایش تجربی انجام شد. بدین منظور، از یک دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد (شکل ۸) و نیز از ورق ST12 استفاده شد. برای استخراج خواص مکانیکی این ورق، آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 روی آن انجام شد تا از این خواص در شبیه‌سازی‌ها استفاده شود (شکل ۹).

جدول ۲. مشخصات ضخامت‌ها و عرض‌های ورق در آزمایش‌های تجربی.

شماره نمونه	عرض ورق (میلی‌متر)	ضخامت ورق (میلی‌متر)
۱	۴۰	۱٫۲۵
۲	۴۰	۲
۳	۷۰	۱٫۲۵
۴	۷۰	۲

جدول ۳. مقایسه‌ی توان مصرفی تجربی و شبیه‌سازی.

شماره نمونه	شدت جریان مؤثر (آمپر)	توان تجربی (وات)	توان شبیه‌سازی (وات)	درصد اختلاف تجربی و شبیه‌سازی
۱	۱٫۳	۴۷۹٫۱	۴۵۳٫۴۷	۵٫۳
۲	۱٫۷	۶۲۶٫۶	۵۸۴٫۱۱	۶٫۸
۳	۱٫۱	۴۰۵٫۴	۳۶۶٫۷۶	۹٫۵
۴	۱٫۴	۵۱۶	۴۹۵٫۸۱	۳٫۹



شکل ۱۱. نمایی از یک ورق شکل داده شده.

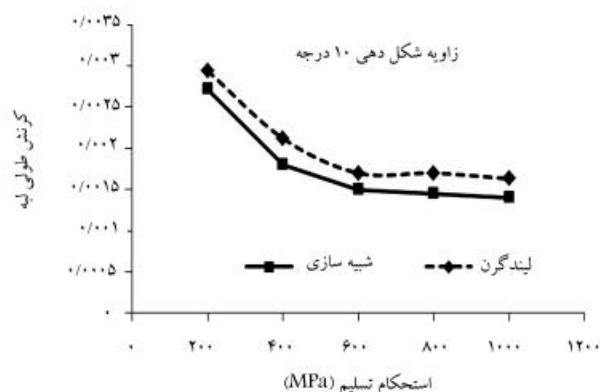
گشتاور شکل‌دهی را از نرم‌افزار استخراج و با داشتن سرعت دورانی غلتک‌ها، توان شکل‌دهی را با استفاده از رابطه‌ی ۲ به دست آورد:

$$P = T \cdot \omega \quad (2)$$

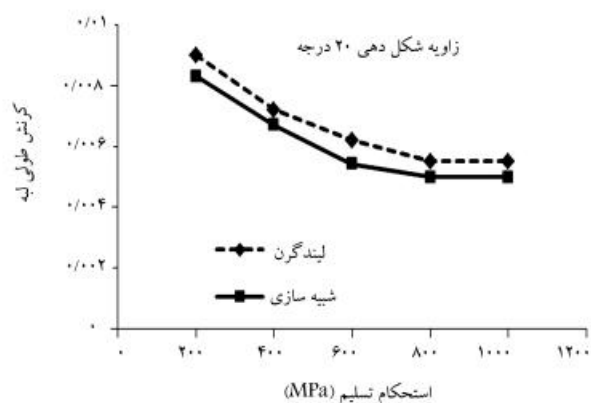
که در آن،  $T$  گشتاور و  $\omega$  سرعت دورانی غلتک‌هاست. برای نمونه‌های ۱ تا ۴، توان شکل‌دهی در شبیه‌سازی محاسبه شد. در جدول ۳ مقادیر توان مصرفی حاصل از شبیه‌سازی و نیز درصد اختلاف نسبی آن با توان‌های آزمایش‌های تجربی درج شده است.

مشاهده می‌شود که درصد اختلاف بسیار کم است و آن نیز ناشی از استهلاک مکانیکی دستگاه آزمایش و عوامل بیرونی مانند نوسان جریان برق است که منطقی به نظر می‌رسد. به این ترتیب مشاهده می‌شود که نتایج آزمایش‌های تجربی، نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها را به خوبی تأیید می‌کند. علاوه بر این اطلاعات جدول ۳ بیان می‌دارد که با افزایش ضخامت، توان مصرفی افزایش و با افزایش پهنای ورق، توان مصرفی کاهش می‌یابد. در شکل ۱۱ یک نمونه از محصول تولید شده در آزمایش‌های تجربی ارائه شده است.

در شکل ۱۲ چگونگی تغییرات گشتاور وارد بر غلتک پایینی ایستگاه شکل‌دهی



الف) بیشترین کرنش طولی لبه برای زاویه ی ۱۰ درجه؛



ب) بیشترین کرنش طولی لبه برای زاویه ی ۲۰ درجه.

شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های گزارش‌شده در تحقیقات پیشین. [۸]

افزایش مقدار شکل‌دهی و کشیدگی در ناحیه‌ی بال ورق بر اثر افزایش زاویه‌ی خم است. مقایسه‌ی مذکور بیان می‌دارد که نتایج شبیه‌سازی این تحقیق با نتایج تحقیقات پیشین [۸] از نزدیکی و هماهنگی خوبی برخوردار است.

#### ۲.۴. صحت نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی تحقیق حاضر

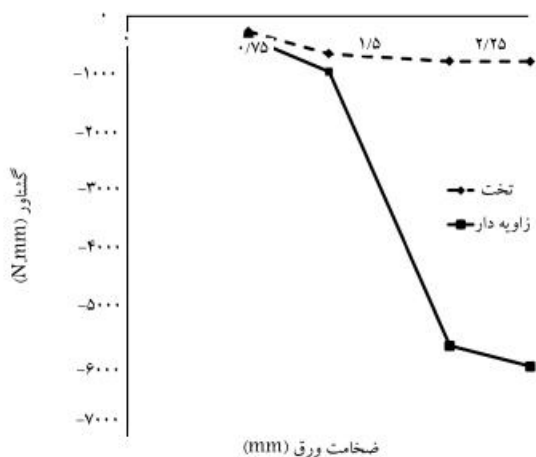
در این قسمت ضمن مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایش‌های تجربی، تأثیر عرض و ضخامت ورق بر توان مصرفی بررسی می‌شود. به منظور بررسی اثر عرض و ضخامت ورق بر گشتاور شکل‌دهی، آزمایش‌هایی بر اساس عرض‌ها و ضخامت‌های ارائه‌شده در جدول ۲ انجام شد.

در آزمایش‌های تجربی، مقدار شدت جریان عبوری از موتور سه‌فاز محرک غلتک‌ها به کمک یک مولتی‌متر اندازه‌گیری، و شدت جریان مؤثر از روی آن محاسبه شد. توان مصرفی از رابطه‌ی ۱ به دست آمد که در آن  $P$  توان مصرفی،  $\bar{V}$  ولتاژ سه‌فاز متوسط،  $I_{eff}$  شدت جریان مؤثر،  $\eta$  بازده موتور، و  $\cos(\bar{\varphi}) = 0.7$  از مشخصات موتور محرک (مربوط به اختلاف فاز) است:

$$P = \sqrt{3} \bar{V} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\bar{\varphi}) \cdot \eta \quad (1)$$

بازده موتور با توجه به شرایط کاری آن ۸٪ و ولتاژ متوسط ۳۸۰ ولت در نظر گرفته شد. در جدول ۳ شدت جریان‌های مؤثر اندازه‌گیری شده به همراه توان مصرفی متناظر با آنها ارائه شده است.

برای محاسبه‌ی توان شکل‌دهی در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus می‌توان



شکل ۱۴. اثر ضخامت ورق بر گشتاور غلتک.

#### ۴.۴. اثر ضخامت ورق بر گشتاور غلتک

در شکل ۱۴ تأثیر افزایش ضخامت محصول تولیدی روی گشتاور وارد بر غلتک‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که افزایش ضخامت ورق باعث زیاد شدن گشتاور وارد بر غلتک‌ها می‌شود اما در هندسه زاویه‌دار میزان افزایش گشتاور بیشتر است. که مقدار این افزایش با زیاد شدن ضخامت ورق به بیش از ۱/۲۵ میلی‌متر، با شیب ملایم‌تری دنبال می‌شود.

#### ۵. نتیجه‌گیری

از مسائل بسیار مهم در طراحی و بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، تخمین گشتاور شکل‌دهی و توان مورد نیاز برای شکل‌دهی است. از پارامترهای اساسی تأثیرگذار بر گشتاور و توان شکل‌دهی، می‌توان به هندسه غلتک، تنش تسلیم، ضخامت و عرض ورق و زاویه‌ی شکل‌دهی اشاره کرد. بدین‌منظور یک سری شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus به صورت سه‌بعدی انجام شد. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر عبارت است از:

۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در خصوص پیش‌بینی توان مصرفی ایستگاه شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، با نتایج تجربی به‌خوبی مطابقت دارد. بنابراین می‌توان از شبیه‌سازی با نرم‌افزار برای تعیین توان مصرفی و در نتیجه انتخاب موتورهای مورد نیاز برای خطوط تولید فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد استفاده کرد.

۲. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش استحکام تسلیم، زاویه‌ی شکل‌دهی، ضخامت ورق و کاهش عرض ورق، گشتاور مورد نیاز برای شکل‌دهی برای دو نوع هندسه غلتک بالایی زاویه‌دار و تخت افزایش می‌یابد. بنابراین مهندسين طراحی و تولید می‌توانند با در نظر گرفتن تأثیر هر کدام از کمیت‌های مذکور روی گشتاور غلتک و توان شکل‌دهی، نوع و توان موتورهای محرک را با توجه به گشتاور مورد نیاز برای شکل‌دهی مشخص‌سازند و نسبت به بهینه‌سازی مصرف انرژی اقدام کنند.

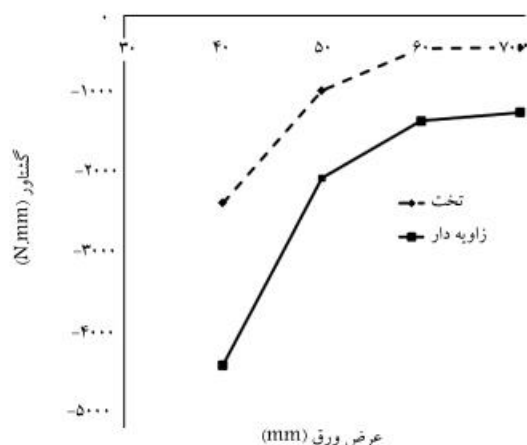
۳. در غلتک‌های بالایی زاویه‌دار با افزایش پارامترهای ذکر شده، گشتاور وارد بر غلتک‌ها با نرخ بیشتری نسبت به غلتک تخت افزایش خواهد یافت. در غلتک زاویه‌دار، چون ورق در ناحیه‌ی بال بین دو غلتک بالایی و

بر اساس تغییر عرض ورق برای دو هندسه‌ی غلتک متفاوت تخت و زاویه‌دار حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است.

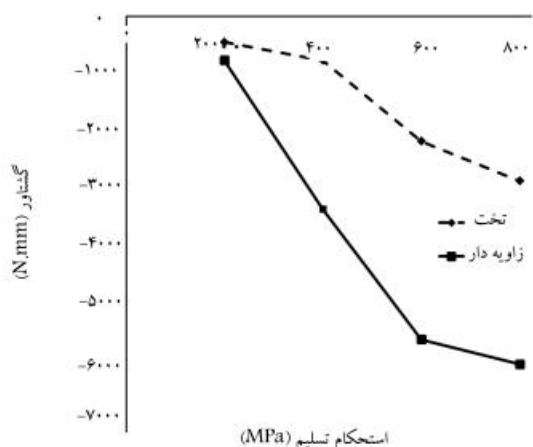
چنان‌که مشاهده می‌شود افزایش عرض ورق برای هر دو نوع هندسه‌ی غلتک سبب کاهش گشتاور وارد بر غلتک پایین شده است (شکل ۱۲). در توجه این امر می‌توان گفت که با زیاد شدن عرض ورق، طول تماس بین غلتک و ورق زیادتر می‌شود. از آنجاکه نیروی عامل رانش ورق در طول خط تولید همان نیروی اصطکاک مابین ورق و غلتک است، با افزایش طول تماس مقدار این نیرو زیاد شده و ورق راحت‌تر به درون فاصله‌ی بین غلتک‌ها کشیده می‌شود. علاوه بر این پدیده که وقتی غلتک بالایی ایستگاه شکل‌دهی به‌صورت تخت باشد میزان گشتاور نسبت به زمانی که این غلتک زاویه‌دار است، کاهش می‌یابد.

#### ۳.۴. اثر استحکام تسلیم بر گشتاور غلتک

در این بخش، اثر استحکام تسلیم روی توان و گشتاور وارد بر غلتک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۱۳، افزایش استحکام تسلیم موجب افزایش گشتاور وارد بر غلتک پایینی شده است؛ این افزایش در هندسه‌ی غلتک زاویه‌دار محسوس‌تر است. با توجه به نمودارها، در استحکام‌های تسلیم بیشتر از ۶۰۰ مگاپاسکال، این روند افزایش با شیب ملایم‌تری دنبال شده است. منفی بودن مقدار گشتاورهای داده شده در نمودار ناشی از راستای چرخش غلتک پایینی برای کشیدن ورق به سمت جلو است.



شکل ۱۲. اثر عرض ورق بر روی گشتاور غلتک.



شکل ۱۳. اثر استحکام تسلیم بر گشتاور غلتک.

## فهرست علائم

- $R\lambda$ : شعاع لیه!  
 $P$ : توان شکل‌دهی!  
 $T$ : گشتاور شکل‌دهی!  
 $\bar{V}$ : ولتاژ سه‌فاز متوسط!  
 $I_{eff}$ : شدت جریان مؤثر!  
 $\eta$ : بازده موتور!  
 $\bar{\sigma}$ : اختلاف فاز!  
 $\omega$ : سرعت دورانی.

پائینی محصور است، و نیز با توجه به حضور نیروی اصطکاک بین ورق و غلتک‌ها (علاوه بر فشار غلتک‌ها)، گشتاور شکل‌دهی بیشتر از غلتک تخت است.

۴. مقدار گشتاور اعمالی به غلتک‌ها و در نتیجه توان مورد نیاز شکل‌دهی برای ایستگاه‌های شکل‌دهی با غلتک‌های بالایی تخت در تمام حالت‌های مورد بررسی کم‌تر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به فرایند ساخت ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر ایستگاه‌های شکل‌دهی با غلتک‌های بالایی تخت، برای تولید مقاطع کانالی باید از این نوع هندسه‌ی غلتک استفاده شود.

## منابع (References)

- Senanayake, J. "The application of computation and experimental to metal deformation in cold roll forming", *J. Material Processing Technology*, **45**, pp. 155-163 (1994).
- Hong, S., Lee, S. and Kim, N. "A parametric study on forming length in roll forming", *Journal of Materials Processing Technology*, **113**, pp. 774-778 (2001).
- Groche, P., Von Breitenbach, G., Jöckel, M. and Zettler, A. "New tooling concepts for future roll forming applications", *4th International Conference on Industrial Tools (ITIC)*, pp. 121-126 (2003).
- Tajdari, M. "Analysis of cold roll forming process for production of open section", Ph.D Thesis, Esfahan University of Technology (1998). (In Persian)
- McClure, C.K. and Li, H. "Roll forming simulation using finite element analysis", *Manufacturing Review*, **8**, pp. 114-122 (1995).
- Brunet, M. "Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code", *J. Materials Processing Technology*, **80-81**, pp. 213-219 (1998).
- Lindgren, M. "An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a roll formed U-channel developed by FE-analyses", *Steel Research Int.*, **78**(1), pp.82-87 (2007).
- Lindgren, M. "Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel", *Journal of Materials Processing Technology*, **186**, pp. 77-81 (2007).
- Lindgren, M. "Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed", *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, pp. 44-47 (2007).
- Rossi, B., Degée, H. and Boman, R. "Numerical simulation of the roll forming of thin-walled sections and evaluation of corner strength enhancement", *Finite Elements in Analysis and Design*, **72**, pp. 13-20 (2013).
- Wiebenga, J.H., Weiss, M., Rolfe, B. and van den Boogaard, A.H. "Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, **213**, pp. 978-986 (2013).
- Moslemi Naeni, H. salmani Tehrani, M. and Safdarian R. "Investigating the weight of out-of-plane bending energy in predicting deformation length In roll forming of symmetric channel section", *16th International Conference Of Metalforming*, Poland (2008).
- Salmani Tehrani, M. "Analysis and prediction of defects in the cold roll forming of symmetric channel sections", Ph.D Thesis of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology (2006). (In Persian)
- Hellborg, S. "Finite element simulation of roll forming", M.Sc. Thesis of Mechanical Engineering, Linköping University (2007).