نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۲، سال ۱۳۹۶، صفحات ۴۱۳ تا ۴۲۲
DOI: 10.22060/mej.2016.718

# بررسی عوامل مؤثر بر توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی غلتکی مقطع گرد با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها

ولی علی میرزالو، میثم عبدالله زاده گاوگانی، سیروس احمدی*، علی دنیوی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

**تاریخچه داوری:**
دریافت: ۲۳ شهریور ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۲ آذر ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۱ مرداد ۱۳۹۵

**کلمات کلیدی:**
شکل‌دهی غلتکی
شبیه‌سازی اجزای محدود
طراحی آزمایش‌ها
توزیع کرنش

**چکیده:** مقادیر و نحوه توزیع کرنش‌ها از عوامل موثر بر عیوب هندسی در فرایند شکل‌دهی غلتکی می‌باشد. در این کار با شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد برای مقطع گرد با استفاده از روش اجزا محدود، عوامل موثر در توزیع کرنش‌ها در ورق تحت تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفته است. قطر غلتک‌ها، فاصله بین ایستگاه‌ها و سرعت پیمایش خطی ورق به عنوان عوامل ورودی و کرنش بیشینه طولی و یکنواختی توزیع کرنش در عرض ورق به عنوان توابع پاسخ در نظر گرفته شده است. با طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش طرح مرکب مرکزی و اجرای آنها با روش تحلیل اجزا محدود، مقادیر توابع پاسخ استخراج شده و با استفاده از آنالیز واریانس، تاثیر پارامترهای ورودی بر توابع پاسخ بررسی شده است. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌ها در قالب نمودارهای اثرات اصلی و متقابل استخراج و بحث شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که طبق آنالیز واریانس و نمودارهای اثرات اصلی با افزایش فاصله ایستگاه‌ها و قطر غلتک‌ها، کرنش بیشینه طولی کاهش می‌یابد. همچنین طبق نتایج آنالیز واریانس، تغییرات سرعت خطی ورق و قطر غلتک‌ها بر روی مدل تابع پاسخ یکنواختی توزیع کرنش عرضی موثر هستند ولی محدوده تغییرات خیلی کم است. همچنین تغییرات فاصله بین ایستگاه‌ها بر یکنواختی توزیع کرنش عرضی بی‌اثر است.

## ۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با قابلیت تولید محصولاتی از ورق‌های فلزی، دارای مزایایی از جمله سرعت بالا، دقت ابعادی، نیروی شکل‌دهی کم و پیوستگی در محصول می‌باشد. نمایی از فرایند که با عبور ورق از بین چند ایستگاه غلتکی انجام می‌شود در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرایند برخلاف بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، شکل‌دهی به صورت شدید و ناگهانی نیست زیرا تغییر شکل شدید می‌تواند سبب آسیب رساندن به غلتک‌ها و حتی برخی عیوب هندسی در محصول نهایی شود [۱]. تغییر شکل اصلی فرایند خمکاری عرضی می‌باشد که در طی فرایند، ورق حول خط مسیر اصلی خم می‌شود و بر حسب شکل قالب‌ها و نوع تغییر شکل‌ها حالت‌های مختلفی از کرنش‌های عرضی در ورق ایجاد می‌شود.

با وجود پیشینه این صنعت، به دلیل اثر کمیت‌های متعدد در این فرایند، هنوز روابط استاندارد و تثبیت‌شده برای آن ارائه نشده است و معمولا طراحی بر اساس تجربه و سلیقه انجام می‌شود [۳]. در زمینه شکل‌دهی غلتکی سرد تا کنون پژوهش‌های فراوانی انجام شده است. در اوایل بیشتر تحقیقات به صورت تجربی و موردی صورت می‌گرفت. با ایجاد و توسعه نرم‌افزارهای اجزاء محدود گستره وسیع‌تری در برابر محققان قرارگرفت تا به توسعه بیشتر تحقیقات بپردازند. باتاچاریا و همکاران [۴] کرنش طولی پوسته‌ای را در فرایند شکل‌دهی غلتکی برای زمانی که از یک یا چند دروازه غلتک استفاده

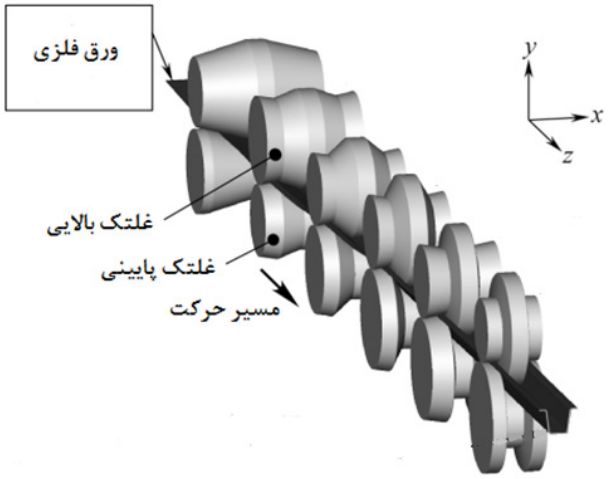


Fig. 1. scheme of the continuous roll forming process

شکل ۱: نمایی از فرایند پیوسته شکل‌دهی غلتکی [۲]

می‌شود، بررسی کردند. نتایج بررسی‌های آنها بدین صورت است که مقدار اوج کرنش به مقدار افزایش زاویه خم وابسته است. تاثیر پارامترهای سرعت خط، فاصله بین ایستگاه‌ها، فاصله بین جفت غلتک‌ها، ضریب اصطکاک و قطر غلتک‌ها بر روی مشخصه های محصول تولیدی توسط پارالیکاس و همکاران [۵] بررسی و مشخص شد که تغییرات در فاصله بین غلتک‌ها بر روی کرنش بیشینه طولی، کرنش پسماند و کرنش‌های عرضی موثر است. استفاده از روش سطوح پاسخ به منظور طراحی بهینه الگوی گل برای مقطع

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: si.ahmadi@urmia.ac.ir

کانالی شکل توسط ژنگ [۶] مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از مدل ریاضی به روش رویه پاسخ، به اثرات متقابل افزایش زاویه و شعاع غلتک بر زاویه برگشت فنری و بیشینه کرنش طولی لبه پرداخت. سلمانی تهرانی و بهرامی [۷]، طول تغییرشکل‌یافته در شکل‌دهی غلتکی لوله گرد را بررسی کردند. آنها فرضیات در نظر گرفته توسط باتاچاریا [۴] برای مقاطع کانالی متقارن را برای مقطع گرد در نظر گرفتند. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی توسط دادگر و همکاران [۸] به ارائه معیاری جهت بیان میزان برگشت فنری در فرایند منجر شد. همچنین با بررسی عوامل تاثیرگذار با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، الگویی مناسب جهت کنترل عوامل و بهبود خط تولید به دست آمد. محمد و همکاران [۹]، به بررسی عیب تابیدگی کف قطعات با مقطع متغیر تولیدشده با فرایند شکل‌دهی غلتکی پرداختند. نتایج نشان داد اندازه بال و زاویه خم موثرترین پارامترها بر روی تابیدگی هستند. قطعات ریلی لغزشی[1] تولیدشده در فرایند شکل‌دهی غلتکی توسط ناکسو و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به پارامترهای دخیل در فرایند و با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ تابع هزینه در فرایند به دست آمد. صفدریان و نائینی [۱۱] با بررسی تاثیر پارامترهای شکل‌دهی بر روی کرنش طولی بیشینه لبه و عیوب خمشی طولی به این نتیجه رسیدند که با افزایش زاویه خمش، عیب خمشی طولی افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه کرنش طولی در لبه مقطع کانالی با افزایش زاویه خمش و افزایش ضخامت ورق، افزایش می‌یابد. ابوابی و همکاران [۱۲]، اثر تنش‌های پسماند را در فرایند شکل‌دهی غلتکی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد به منظور پیش‌بینی دقیق عیوب احتمالی فرآیند از جمله برگشت فنری و خمش طولی صرفا استفاده از اطلاعات تست کشش کافی نمی‌باشد و لازم است در مورد ورقی با تنش پسماند اولیه، اطلاعات تنش پسماند نیز در نظر گرفته شود.

معمولا در قطعات حاصل از فرایند نورد غلتکی سرد، عیوب مختلفی به وجود می‌آید که از جمله عوامل موثر بر این عیوب، توزیع کرنش‌ها می‌باشد. به علت توزیع نامتناسب کرنش‌ها در عرض سطح مقطع، عیوبی مانند پیچش و خمش طولی مطابق شکل ۲ رخ می‌دهد. به ویژه در محصولاتی که دارای ارتفاع و بال هستند این پدیده به خاطر نوع تغییر شکل و توزیع کرنش‌ها غیر قابل اجتناب است.

در تحقیقات پیشین، بررسی اثرات عوامل به صورت همزمان بر روی فرایند به ویژه توزیع کرنش‌ها، کمتر مورد توجه محققین بوده است و معمولا به صورت تجربی یک عامل را با چند حالت در نظر گرفته و فرایند را بررسی کرده اند؛ به عنوان مثال فرایند با دو یا سه سرعت خطی مختلف انجام شده و با مقایسه نتایج برای این حالات، درباره تاثیر سرعت بر روی بیشینه کرنش طولی نتیجه‌گیری می‌کردند، اما این روش به دلیل کم بودن تعداد مشاهدات دقت بالایی ندارد. در این تحقیق طراحی آزمایش‌ها به روش طرح مرکب مرکزی برای سه عامل قطر غلتک‌ها، فاصله بین ایستگاه‌ها و سرعت خطی ورق انجام شده و با روشهای آماری، اثرات اصلی و متقابل عامل‌ها بر

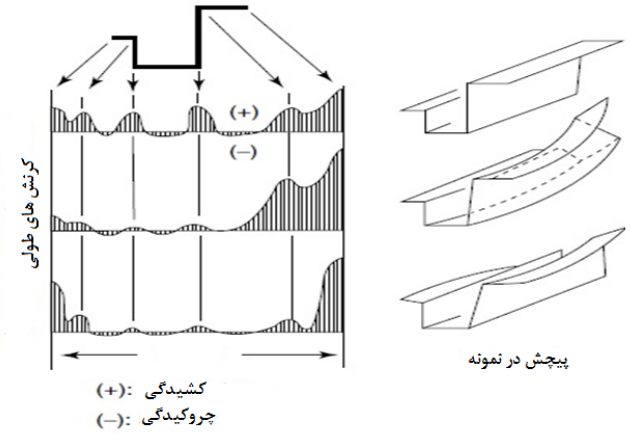


**Fig. 2. Non-uniform distribution of strain in the cross sections and defects created**

**شکل ۲: عدم توزیع یکنواخت کرنش در مقطع و عیوب ایجادشده [۱۳]**

روی کرنش بیشینه طولی و یکنواختی توزیع کرنش در سطح مقطع نمونه‌ها بررسی شده است.

## ۲- طراحی و تحلیل فرایند

یکی از عمده تولیدات خطوط شکل‌دهی غلتکی سرد، لوله‌های گرد درز جوش می‌باشد. این لوله‌های درز جوش یا مستقیما در صنعت به کار برده می‌شوند و یا در ادامه خط تولید بعد از عملیات جوشکاری توسط قالب‌های دیگری به لوله با پروفیل موردنظر تبدیل می‌شوند. در این تحقیق از اطلاعات خط تولید لوله دو اینچی درز جوشی استفاده شده که از ورقی با ضخامت ۳ میلیمتر توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی با استفاده از قالب‌های فشاری و قالب‌های راهنما تولید می‌شود. از مراحل شکل‌دهی توسط قالب‌های پره‌ای صرف‌نظر شد. چون یکی از نقش‌های غلتک پره‌ای، بهبود هندسه کلی ورق شکل داده شده می‌باشد، بنابراین تغییر شکل‌ها و عیوب مراحل قبلی را تغییر می‌دهد و اثرات آنها را خنثی و یا اصلاح می‌کند [۱۴].

در کارخانه محل تولید، ورق فلزی اولیه ابتدا در عرض مشخص بریده شده و انتهای آنها به هم جوش داده می‌شود و به صورت کلاف بزرگ جمع می‌گردد. برای شروع فرآیند، ابتدای ورق از بین غلتک‌ها عبور داده می‌شود و بعد از درگیری کامل غلتک‌ها با ورق، غلتک‌ها به آرامی شروع به دوران می‌کنند و به تدریج به سرعت دورانی مطلوب می‌رسند.

### ۲- ۱- مدلسازی اجزاء محدود فرایند

در این کار، شبیه‌سازی به وسیله نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس نسخه ۶,۱۱-۳ انجام گرفته است و محیط تحلیلی نیز تحلیل دینامیکی صریح تعیین شده است. تحلیل دینامیکی صریح مخصوص تحلیل‌های با مدل‌های بزرگ با پاسخ‌های زمانی دینامیکی کوتاه و همچنین تحلیل‌های با ناپیوستگی زیاد می‌باشد. این نوع تحلیل توانایی تعریف تماس‌های عمومی مختلف و استفاده از تغییر شکل‌های بزرگ را فراهم می‌سازد. در شکل ۳ نمایی از سری غلتک‌های طراحی و مونتاژشده در محیط نرم‌افزار نشان داده شده است.

1 Slide rail

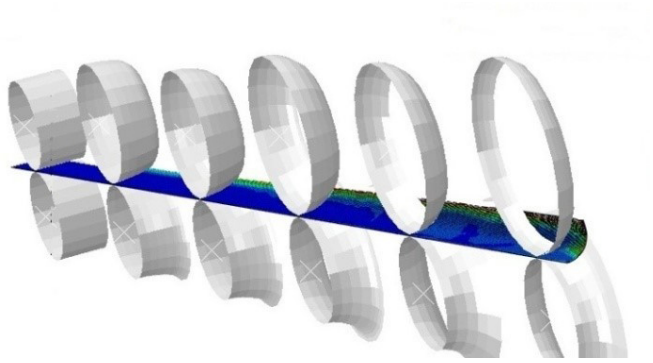

Fig. 3. The finite element modeling of the roll forming process

شکل ۳: مدل اجزا محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی

با توجه به اینکه قطعات تولیدی دارای تقارن صفحه‌ای هستند، به منظور کاهش زمان تحلیل تنها یک نیمه ورق شبیه‌سازی شده است. مدل شامل جفت غلتک‌های استوانه‌ای ایستگاه صفر، پنج جفت غلتک فرم‌دار ایستگاه‌های اصلی و چهار عدد غلتک راهنمای تکی و ورق می‌باشد. غلتک‌ها به صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند و نوار ورق نیز به صورت یک رویه مسطح مستطیلی با قابلیت شکل‌پذیری مدل شده است.

ورق از جنس فولاد St37 می‌باشد که آنالیز عناصر مربوط به آن در جدول ۱ آورده شده است. برای تحلیل فرایند، رفتار مکانیکی ماده با استفاده از نمودار تنش–کرنش حقیقی تعریف می‌شود. بنابراین برای تحلیل فرایند نیاز است که تنش–کرنش مهندسی حاصل از تست کشش طبق استاندارد ISIRI 10272 با استفاده از روابط موجود به تنش–کرنش حقیقی تبدیل شود. نمودار تنش–کرنش حقیقی مطابق شکل ۴ به دست آمده است.

جدول ۱: عناصر و ترکیبات شیمیایی ورق فولادی

Table 1. The chemical compounds of steel sheet

| Al % | Cu % | Nb % | W % | B % | Fe % |
|---|---|---|---|---|---|
| ۰/۰۳۶ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۴۳ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۴۸ | ۹۸/۴۶۰ |
| **C %** | **Si %** | **Mn %** | **Cr %** | **Mo %** | **Ni %** |
| ۰/۲۴۰ | ۰/۲۷۰ | ۰/۶۶۰ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۲ |

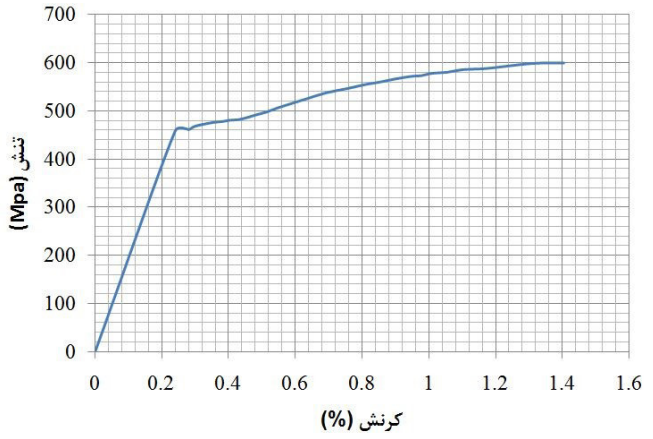


Fig. 4. True stress-strain diagram obtained by tensile test

شکل ٤: نمودار تنش–کرنش حقیقی به دست آمده از تست کشش ورق

به دلیل استفاده از مدل صلب تحلیلی در شبیه‌سازی غلتک‌ها، تماس بین غلتک‌ها با ورق از الگوریتم زوج تماسی تعریف شده است. برای اعمال قیدهای تماسی، روش سینماتیکی و نیز فرمول‌بندی لغزشی محدود انتخاب شد. در شبیه‌سازی این فرایند دو رفتار در جهت مماسی در نظر گرفته شد. برای نحوه کنش سطوح بر هم در جهت عمودی تماس سخت و برای جهت مماسی ورق با غلتک‌های ایستگاه صفر، رفتار بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. غلتک‌های ایستگاه صفر کاملا در جای خود ثابت هستند و فقط وظیفه نگهداری ورق را بر عهده دارند. اما برای غلتک‌های ایستگاه اول به بعد و غلتک‌های جانبی، رفتار اصطکاکی با مدل کولمب و ضریب اصطکاک همگن و ثابت ۰/۲ منظور شده است [۱]. غلتک‌ها به صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند و در نتیجه نیاز به المان‌بندی ندارند. به همین دلیل تنها نوار ورق است که باید شبکه‌بندی شود. برای شبکه‌بندی نوار ورق از المان پوسته‌ای با نام S4R استفاده شده و اندازه هر المان ۲ میلیمتر در جهت طولی و ۱ میلیمتر در جهت عرضی انتخاب شده است [۱].

### ۲– ۲– صحت‌سنجی شبیه‌سازی

به منظور اطمینان از نتایج شبیه‌سازی از نتایج آزمایش‌های تجربی موجود استفاده شده است. بدین منظور آزمایش باتاچاریا و اسمیت [۴]، که نتایج آزمایش تجربی آنها در دسترس است تحت شرایط مشابه شبیه‌سازی شد و نتایج آنها با نتایج تجربی مقایسه گردید. در این کار تجربی اثر افزایش زاویه پروفیل در ایستگاه اول بر روی کرنش طولی ناحیه بال و کف کانال متقارن در نورد غلتکی کانال U– شکل مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها با استفاده از یک ماشین شکل‌دهی صنعتی با فاصله ایستگاه‌های ۱۴۵ میلیمتر و شعاع پایه غلتک‌های ۵۳ میلیمتر صورت گرفته است. در این آزمایش نوار ورقی از جنس فولاد میلد استیل می‌باشد که به عرض ۴۰، ضخامت ۰/۶ و طول ۱۲۰۰ میلیمتر برای شکل‌دهی کانال متقارن با عرض کف اسمی ۲۰ میلیمتر انتخاب شده است.

## ۳– طراحی و اجرای آزمایش‌ها

به منظور طراحی آزمایش‌ها از روش طراحی مرکب مرکزی استفاده شده است [۱۵]. در کار حاضر عواملی که در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مهم و قابل کنترل هستند و به عنوان عوامل ورودی در آزمایش‌ها در نظر گرفته شده‌اند به ترتیب قطر غلتک‌های ایستگاه‌های اصلی، فاصله بین ایستگاه‌ها و سرعت خطی ورق می‌باشند. از آنجایی که این کار با مشارکت شرکت فولاد مهر سهند انجام گرفته است، دامنه تغییرات عوامل ورودی با توجه به مقادیر ممکنه در خطوط تولید و با کمک از تجارب متخصصین این شرکت تعیین شده است تا امکان استفاده کاربردی از نتایج این کار تحقیقاتی برای آن شرکت میسر باشد. محدوده مقادیر مورد استفاده در طراحی آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

بر اساس روش طرح مرکب مرکزی پنج سطح برای هریک از پارامترهای

قطر غلتک, فاصله بین ایستگاه‌ها و سرعت خطی طبق جدول ۳ ارائه می‌شود.

**جدول ۲: محدوده مقادیر عوامل ورودی فرایند شکل‌دهی غلتکی**

**Table 2. Input values of the parameters for the roll forming process**

| پارامتر | حداقل | حداکثر |
|---|---|---|
| شعاع غلتک فشاری (mm) | ۵۵ | ۹۰ |
| فاصله بین ایستگاه‌ها (mm) | ۵۳۰ | ۶۰۰ |
| سرعت خطی ورق (m/min) | ۳۰ | ۴۰ |

**جدول ۳: سطوح در نظر گرفته شده برای عوامل در آزمایش‌ها**

**Table 3. The Level of parameters to be intended for experiments**

| پارامتر | سطوح | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ |
| شعاع غلتک فشاری (mm) | ۴۳ | ۵۵ | ۷۲/۵ | ۹۰ | ۱۰۲ |
| فاصله بین ایستگاه‌ها(mm) | ۵۰۶ | ۵۳۰ | ۵۶۵ | ۶۰۰ | ۶۲۳ |
| سرعت خطی (m/min) | ۲۸/۲ | ۳۰ | ۳۲/۵ | ۳۵ | ۳۷ |

در این تحقیق هدف شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع گرد و بررسی عوامل موثر بر آن می‌باشد. همانطورکه قبلا اشاره شده بیشتر عیوب این فرایند به کرنش‌های اعمالی و نحوی توزیع آنها در مقطع نمونه برمی‌گردد. در این کار دو پارامتر از این کرنش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از این پارامترها کرنش بیشینه طولی مومسان در لبه ورق می‌باشد که آن را کرنش بیشینه طولی می‌نامند. هر چه مقدار این کرنش کمتر باشد، بهتر است. بیشترین مقدار این کرنش قبل از ورود ورق به دروازه رخ می‌دهد و در ادامه فرایند این مقدار به تندی کاهش می‌یابد. وجود این کرنش به دلیل طی شدن مسافت بیشتر لبه نسبت به کف ورق اجتناب‌ناپذیر است و مقدار بیش از اندازه آن باعث ایجاد عیوبی در محصول خروجی می‌شود به همین دلیل این مقدار باید در حداقل مقدار ممکن باشد. این پدیده را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد.

پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار می‌گیرد یکنواختی توزیع کرنش عرضی در مقطع ورق است. که در مطالب ارائه شده در قسمت‌های قبلی مشخص شد در صورت عدم یکنواختی در توزیع این نوع کرنش عیب پیچش در نمونه رخ خواهد داد. الگوی ارائه شده توسط طرح مرکب مرکزی برای آزمایش‌ها مطابق جدول ۴ می‌باشد. هریک از آزمایش‌ها مطابق مقادیر متغیرهای مربوطه در طراحی آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶,۱۱-۳ و تحلیلگر دینامیکی صریح، شبیه‌سازی شد و مقادیر خروجی استخراج گردید.

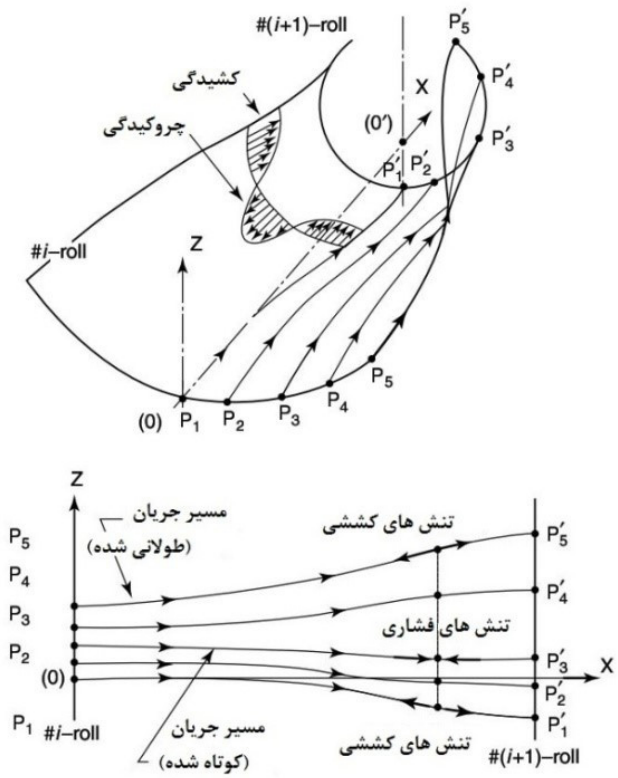


**Fig. 5. The lines in cross section of sheet in different direction during roll forming process**

**شکل ۵: مسافت طی شده در مسیرهای مختلف مقطع ورق در طی فرایند شکل‌دهی غلتکی مقطع گرد [۱۳]**

## ٤- استخراج مقادیر توابع کرنش

### ۴- ۱- کرنش بیشینه طولی لبه ورق

در فرایند شکل‌دهی غلتکی برای مقاطع گرد، طی شدن مسافت بیشتر در لبه ورق نسبت به وسط ورق سبب افزایش طول و تغییر شکل بیشتری در این ناحیه می‌شود.

این تغییر شکل زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که وارد ناحیه مومسان شود. هرچه مقدار این تغییر شکل مومسان کمتر باشد و تحت کنترل قرار گیرد، تسلط بر کیفیت محصول بیشتر و عیوب پدیدارشده کمتر خواهد بود.

در شکل ۶ کرنش‌های اعمالی در طی فرایند در دو ناحیه لبه و کف ورق گرد شده قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است در ناحیه لبه ورق مقادیر کرنش مومسان به مراتب بیشتر از کف ورق می‌باشد.

به منظور استخراج کرنش‌های بیشینه مومسان از آزمایش‌ها، در عرض ۷۳ میلیمتر از مرکز ورق یک المان تعریف شده و در هر ایستگاه بیشترین کرنش مومسان طولی استخراج می‌شود و در نهایت مجموع پنج ایستگاه محاسبه خواهد شد. در شکل ۷ نمونه‌ای از کرنش مومسان استخراجی آزمایش شماره ۵ نشان داده شده است.

جدول ٤: آزمایش‌های طراحی شده و مقادیر هریک از عوامل ورودی

Table 4. Design of Experiments and values of parameters

| شماره آزمایش | قطر غلتک (mm) | فاصله بین ایستگاه‌ها (mm) | سرعت خطی (m/min) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۵۵ | ۵۳۰ | ۳۰ |
| ۲ | ۹۰ | ۵۳۰ | ۳۰ |
| ۳ | ۵۵ | ۵۳۰ | ۳۵ |
| ۴ | ۹۰ | ۵۳۰ | ۳۵ |
| ۵ | ۵۵ | ۶۰۰ | ۳۰ |
| ۶ | ۹۰ | ۶۰۰ | ۳۰ |
| ۷ | ۵۵ | ۶۰۰ | ۳۵ |
| ۸ | ۹۰ | ۶۰۰ | ۳۵ |
| ۹ | ۴۳ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۱۰ | ۱۰۲ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۱۱ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۲۸/۲ |
| ۱۲ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۷ |
| ۱۳ | ۷۲/۵ | ۵۰۶ | ۳۲/۵ |
| ۱۴ | ۷۲/۵ | ۶۲۳ | ۳۲/۵ |
| ۱۵ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۱۶ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۱۷ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۱۸ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۱۹ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |
| ۲۰ | ۷۲/۵ | ۵۶۵ | ۳۲/۵ |

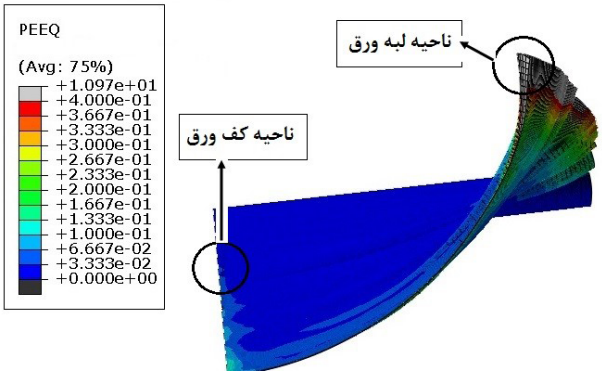


Fig. 6. Longitudinal strain on the edge and the bottom of the sheet by the rolling forming process

شکل ٦: کرنش‌ها طولی در لبه و کف ورق گرد شده توسط فرایند

### ۴- ۲- یکنواختی توزیع کرنش در عرض ورق

یکنواختی توزیع کرنش عرضی به عنوان یکی دیگر از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت محصول، در هریک از نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده محاسبه

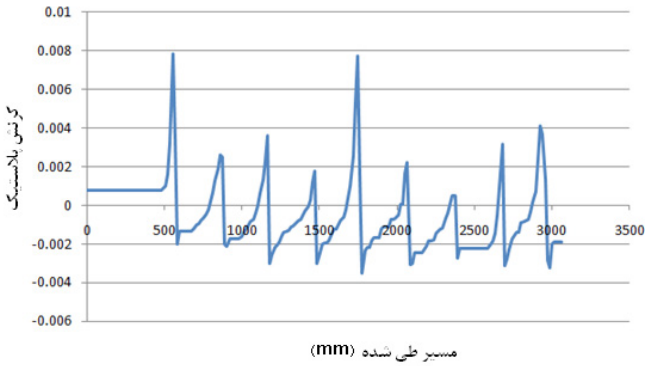


Fig. 7. The plastic strain diagram vs displacement in experiment 5

شکل ۷: نمودار کرنش مومسان بر حسب تغییر مکان در آزمایش ۵

شد. برای این منظور ابتدا مطابق شکل ۸، مسیری در عرض ورق گرد شده تعریف شد. سپس کرنش‌های عرضی در طول مسیر استخراج و با استفاده از رابطه ۱ میزان یکنواختی آنها بررسی شد. رابطه استفاده شده به معیار عدم یکنواختی شناخته شده است.

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|\bar{\varepsilon} - \varepsilon_i\right|\right)}{n} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، $\bar{\varepsilon}$ میانگین کرنش‌ها، $\varepsilon_i$ کرنش در هر نقطه و $n$ تعداد نقاط است.

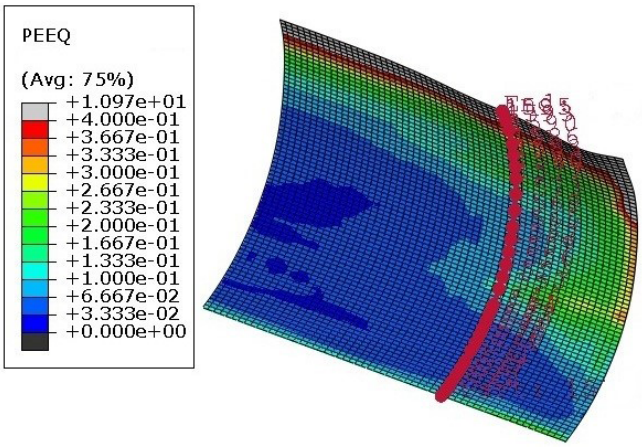


Fig. 8. The path defined for the rounded sheet section

شکل ۸: مسیر تعریف شده برای مقطع نمونه گرد شده

در جدول ۵ مقادیر به دست آمده برای کرنش بیشینه طولی و یکنواختی کرنش در عرض ورق برای تمام آزمایش‌های طراحی شده را می‌توان مشاهده کرد.

## ۵- نتایج و بحث

### ۵- ۱- نتایج صحت‌سنجی شبیه‌سازی

در کار تجربی باتاچاریا و اسمیت [۴]، کرنش طولی در سطح رویی و زیرین ورق، در فاصله ۱/۵ میلیمتر از لبه بال به وسیله کرنش‌سنج‌های الکتریکی، با تابعی از موقعیت طولی کرنش‌سنج، ثبت شده‌اند. سپس با

**جدول ۵: کرنش بیشینه طولی و یکنواختی توزیع کرنش هر آزمایش**

**Table 5. Maximum longitudinal strain and strain distribution uniformity for each of experiment**

| شماره آزمایش | یکنواختی توزیع کرنش عرضی ($\times 10^{-3}$) | مجموع کرنش‌های طولی بیشینه ($\times 10^{-3}$) |
|---|---|---|
| ۱ | ۶/۳۱۲۸ | ۴۱/۵۳۲ |
| ۲ | ۶/۵۷۴۲ | ۴۰/۲۴۴ |
| ۳ | ۶/۵۸۷۴ | ۴۳/۳۷۵ |
| ۴ | ۶/۸۱۹۸ | ۴۲/۸۶۳ |
| ۵ | ۶/۷۵۴۶ | ۳۳/۵۵۷ |
| ۶ | ۶/۳۹۷۶ | ۲۹/۲۸۲ |
| ۷ | ۶/۷۲۷۵ | ۳۷/۵۰۰ |
| ۸ | ۶/۴۱۶۷ | ۳۰/۶۸۷ |
| ۹ | ۶/۴۸۶۴ | ۴۱/۲۴۷ |
| ۱۰ | ۶/۱۹۱۵ | ۳۰/۳۵۴ |
| ۱۱ | ۶/۵۱۱۶ | ۳۴/۷۶۰ |
| ۱۲ | ۶/۲۵۶۶ | ۳۶/۱۲۴ |
| ۱۳ | ۵/۸۷۱۳ | ۵۲/۴۰۷ |
| ۱۴ | ۶/۶۰۷۰ | ۳۰/۳۸۸ |
| ۱۵ | ۶/۲۴۵۲ | ۳۹/۲۸۵ |
| ۱۶ | ۶/۲۴۵۲ | ۳۹/۲۸۵ |
| ۱۷ | ۶/۲۴۵۲ | ۳۹/۲۸۵ |
| ۱۸ | ۶/۲۴۵۲ | ۳۹/۲۸۵ |
| ۱۹ | ۶/۲۴۵۲ | ۳۹/۲۸۵ |
| ۲۰ | ۶/۲۴۵۲ | ۳۹/۲۸۵ |

متوسط گرفتن مقادیر دو کرنش‌سنج بالا و پایین، کرنش غشایی محاسبه شده است. کرنش‌های طولی نمونه‌های شبیه‌سازی‌های‌شده به صورت نمودار در شکل ۹ رسم و با کرنش‌های تجربی باتاچاریا و اسمیت [۴] مقایسه شده‌اند. همچنین در این شکل نتایج شبیه‌سازی مشابهی که در مرجع [۱۶] انجام شده نیز مشاهده می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها نیز با استفاده از حل‌گر ضمنی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده‌اند. همانگونه که مقایسه نتایج نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و تجربی مشاهده می‌شود. بنابراین به همین روش می توان بقیه شبیه‌سازی‌ها را نیز انجام داد و به جواب‌های خروجی استناد کرد. البته چنانچه قبلا ذکر شد طبق مرجع [۱] نتایج و روش شبیه‌سازی برای مقطع کانالی را برای مقطع گرد نیز می‌توان استفاده کرد.

## ۵- ۲- بررسی تاثیر عوامل بر روی کرنش بیشینه طولی

با در نظر گرفتن سطوح مختلف سه عامل قطر غلتک، فاصله بین ایستگاه‌ها و سرعت خطی ورق، طراحی آزمایش‌ها به روش طرح مرکب

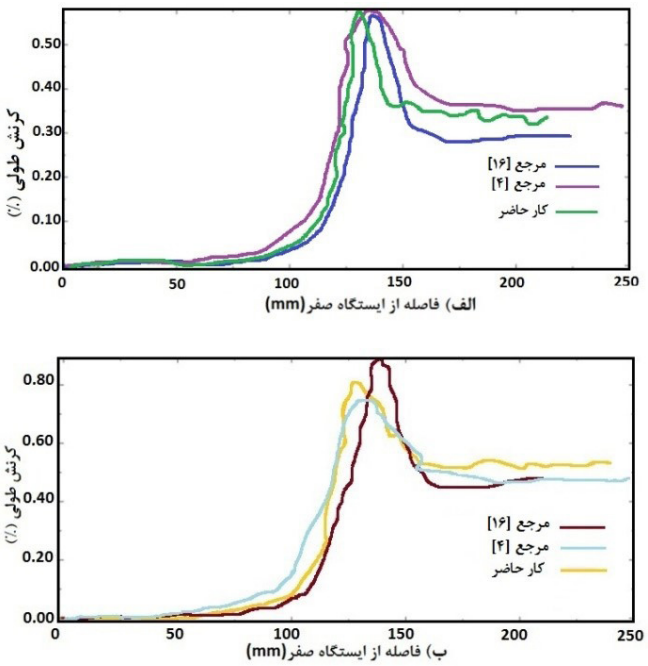


**Fig. 9. Comparison of present Finite Element with Bhattacharia's experimental study and McClure's simulation work, a) angle 30 b) angle 40**

**شکل ۹: مقایسه کار شبیه‌سازی شده با مطالعه تجربی باتاچاریا و اسمیت [٤] و شبیه‌سازی انجام شده توسط مک کلور [١٦] ، الف) در زاویه ۳۰ درجه ب) در زاویه ٤٠ درجه**

مرکزی انجام شد و شبیه‌سازی فرایند در ۲۰ آزمایش اجرا گردید. سپس دو پاسخ مجموع کرنش‌های بیشینه طولی در ایستگاه‌ها و یکنواختی توزیع کرنش عرضی محاسبه شد. در ادامه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها برای هریک از پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گرفته و اثر هریک از عوامل در پاسخ‌ها تجزیه و تحلیل می‌شود.

برای بررسی تاثیر پارامترها بر روی مجموع کرنش‌های بیشینه طولی از روش آنالیز واریانس با استفاده از مقدار آماری P-Value استفاده شده است. مقدار $P$ بیانگر روی دادن خطای نوع اول است. هر چه مقدار $P$ از ۰/۰۵ کمتر باشد بیانگر معنی‌دار بودن تاثیر پارامتر مورد نظر بر پاسخ است. برای صحت آنالیز واریانس، لازم است توزیع داده‌ها نرمال باشد. شکل ۱۰ نمودار احتمال توزیع نرمال برای مقادیر پاسخ می‌باشد که پراکندگی نقاط اطراف خط مورب نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع داده‌ها است.

نتایج به دست آمده به خوبی نشان‌دهنده میزان اثر هر عامل به صورت مجزا و متقابل در مدل تابع پاسخ کرنش بیشینه طولی می‌باشد که در جدول ۶ ارائه شده است. در بین سه عامل، عامل سرعت خطی کمترین اثر را در تغییرات پاسخ دارد این در حالی است که عامل قطر غلتک و فاصله بین ایستگاه دارای اثر قابل توجهی در تابع پاسخ کرنش بیشینه طولی می‌باشند. همچنین با توجه به مقادیر به دست آمده برای $P$ می‌توان گفت که صورت درجه دو قطر غلتک و سرعت خطی و اثر متقابل قطر غلتک و فاصله ایستگاه‌ها موثر است و بقیه موارد اثر چندانی در تغییرات مجموع کرنش

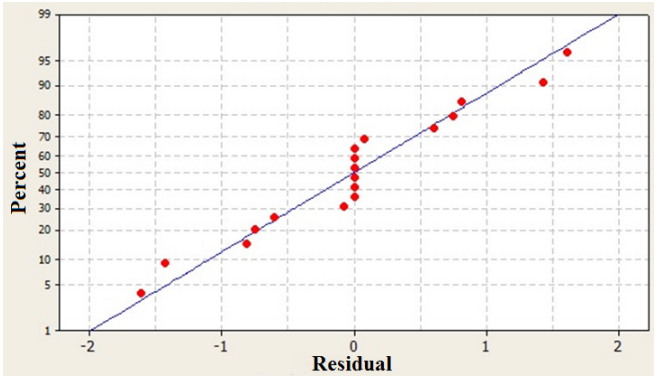


Fig. 10. Normal distribution probability for maximum longitudinal strain

شکل ۱۰: نمودار احتمال توزیع نرمال برای کرنش‌های بیشینه طولی

طولی نخواهند داشت. مقدار کفایت مدل $R^2$ برابر با ۹۶٪ به دست آمد که مقداری قابل قبول می‌باشد. پارامتر $R^2$ مشخص‌کننده کفایت مدل می‌باشد که نشان‌دهنده میزان تخمین صحیح داده‌ها با مدل است. برای محاسبه $R^2$ از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{Error}}{SS_{Total}} = \frac{SS_{Regression}}{SS_{Total}} \quad (۲)$$

در این رابطه $SS_{Error}$ مجموع مربع‌های ناشی از خطا، $SS_{Regression}$ مجموع مربع‌های ناشی از تیمارها و $SS_{Total}$ مجموعه کل تصحیح شده مربع‌ها می‌باشد.

جدول ٦: مقادیر $P$ برای عوامل در کرنش بیشینه طولی

Table 6. P-Value for parameters in maximum longitudinal strain

| عامل | $P$ |
|---|---|
| قطر غلتک(mm) | ۰/۰۰۰ |
| سرعت خط(m/min) | ۰/۰۳۰ |
| فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۰۰۰ |
| قطر غلتک(mm)×قطر غلتک(mm) | ۰/۰۰۹ |
| سرعت خط(m/min)×سرعت خط(m/min) | ۰/۰۰۵ |
| فاصله ایستگاه(mm)× فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۳۱۵ |
| قطر غلتک(mm)× سرعت خط(m/min) | ۰/۶۳۰ |
| قطر غلتک(mm)× فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۰۳۰ |
| سرعت خط(m/min)× فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۸۰۸ |
| $R\text{-}Sq$ = ۹۶/۰٪ | |

از نمودار اثرات اصلی برای مقایسه اثرات عوامل بر روی پارامتر خروجی همراه با استفاده از مقادیر به دست آمده از آنالیز واریانس استفاده می‌شود. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ تاثیر هر عامل بر روی پاسخ را به صورت مجزا نشان می‌دهند.

با توجه به مقادیر $P$ و نمودارهای اثرات اصلی، به صراحت می‌توان گفت

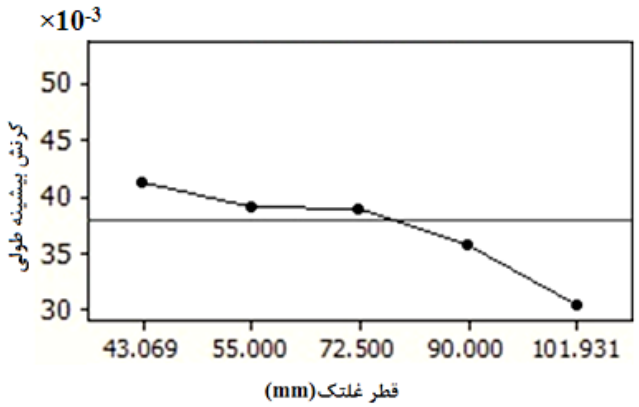


Fig. 11. The effect of roll diameter on maximum longitudinal strain

شکل ۱۱: نمودار اثر قطر غلتک بر کرنش بیشینه طولی

که قطر غلتک‌ها و فاصله بین ایستگاه‌ها تاثیر قابل توجهی بر روی مجموع کرنش‌های بیشینه طولی دارند. مطابق شکل ۱۱ با افزایش قطر غلتک‌ها مجموع کرنش‌های بیشینه طولی، کاهش می‌یابد. افزایش قطر غلتک سبب افزایش سطح تماس بیشتر بین غلتک و ورق می‌شود و در نتیجه سطح بیشتری از ورق تحت تنش قرار می‌گیرد که به طبع ناحیه متاثر از کرنش‌ها وسیع تر و تمرکز تنش کمتری وجود دارد و در نتیجه اختلاف کرنش‌ها و کرنش بیشنه طولی در لبه کمتر می‌شود.

در مورد اثر سرعت خطی هرچند مقدار P-value مربوط به آنالیز واریانس برای آن کمتر از ۰/۰۵ را نشان می‌دهد اما مطابق شکل ۱۲ دارای اثر ناچیزی در تغییرات کرنش بیشینه طولی است طوریکه تغییرات کرنش بیشینه طولی در دامنه مورد نظر کمتر از ۰/۰۰۵ است که تغییرات کمی است و می‌توان گفت در محدوده سرعت موردنظر تابع پاسخ تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

مطابق شکل ۱۳ با افزایش فاصله بین ایستگاه‌ها مجموع کرنش‌های بیشینه طولی، کاهش می‌یابد. افزایش فاصله بین ایستگاه ها سبب افزایش طول تغییر شکل در نوار ورق می‌شود و افزایش طول تغییر شکل نیز سبب کاهش آهنگ شکل‌دهی و در نتیجه کم شدن کرنش بیشینه طولی خواهد شد.

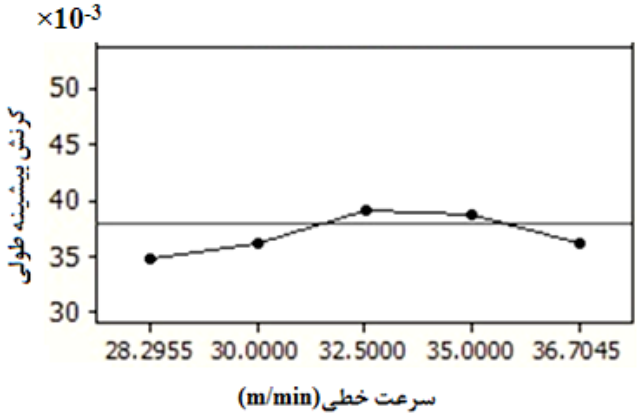


Fig. 12. The effect of line speed on maximum longitudinal strain

شکل ۱۲: نمودار اثر سرعت خطی بر کرنش بیشینه طولی

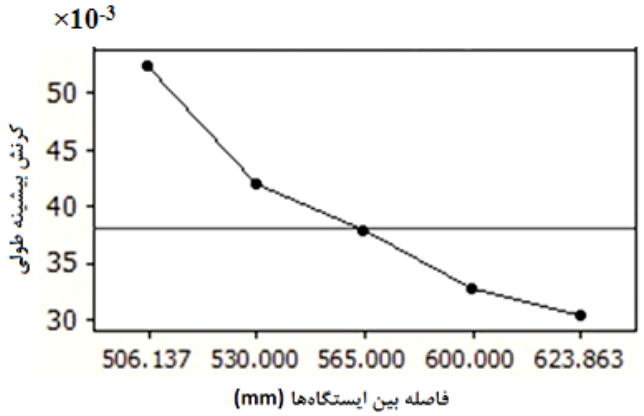


Fig. 13. The effect of distance of station on maximum longitudinal strain

**شکل ۱۳: نمودار اثر فاصله بین ایستگاه‌ها بر کرنش بیشینه طولی**

اما در مورد تاثیرات سرعت خطی ورق می‌توان گفت که این عامل نسبت به دو عامل دیگر اثر کمتری دارد و به طور تقریبی می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش سرعت خطی ورق، مجموع کرنش‌های بیشینه طولی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۴ نمودار اثرات متقابل بر روی مجموع کرنش‌های بیشینه طولی نشان داده شده است. با توجه به مقادیر حاصل از آنالیز واریانس و نمودار شکل ۱۴، تنها برای دو عامل قطر غلتک و فاصله بین ایستگاه‌ها اثر متقابل مشاهده می‌شود ولی با توجه به نوع ماهیت فرایند این اثر متقابل نیز در نمودار چندان محسوس به نظر نمی‌رسد.

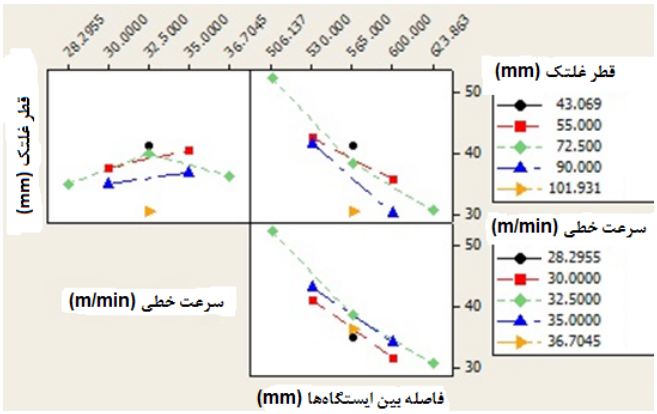


Fig. 14. The diagram of factors interactions on the maximum longitudinal strain

**شکل ۱۴: نمودار اثرات متقابل عوامل بر کرنش بیشینه طولی**

### ۵- ۳- بررسی تاثیر عوامل بر روی یکنواختی توزیع کرنش عرضی

در قسمت‌های قبلی نحوه محاسبه یکنواختی توزیع کرنش عرضی با استفاده از معیار غیر یکنوختی بیان شد. و مقدار ایده‌آل برای این پارامتر مقدار صفر می‌باشد یعنی هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، توزیع یکنواخت‌تر است.

در شکل ۱۵ نمودار احتمال توزیع نرمال برای مقادیر پاسخ نشان داده شده که تا حدودی بیانگر نرمال بودن توزیع داده‌هاست. مقادیر حاصل از آنالیز واریانس تاثیر پارامترها بر مدل رگرسیون در جدول ۷ ارائه شده است.

همچنین مقدار کفایت مدل $R^2$ برابر ۹۷/۱٪ می‌باشد که مقدار قابل قبولی است.

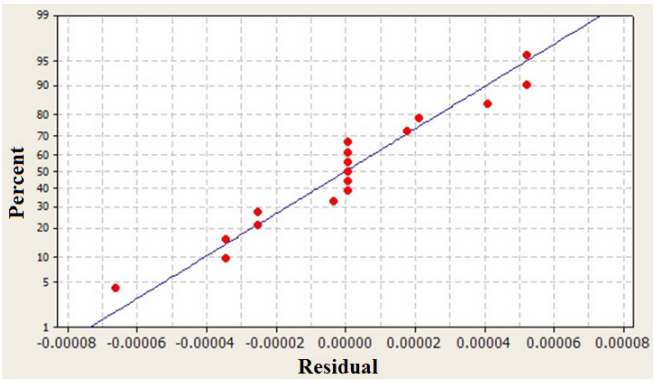


Fig. 15. Normal distribution probability for strain distribution uniformity

**شکل ۱۵: نمودار احتمال توزیع نرمال برای یکنواختی توزیع کرنش عرضی**

نتایج حاصل از آنالیز واریانس در جدول ۷ نشان می‌دهد که عوامل قطر غلتک و سرعت خط موثر بوده اما عامل فاصله ایستگاه‌ها موثر نمی‌باشد همچنین صورت درجه دوم هر سه عامل و اثر متقابل قطر غلتک و فاصله بین ایستگاه و تا حدودی اثر متقابل سرعت خط و فاصله ایستگاه در تابع پاسخ یکنواختی کرنش عرضی موثر می‌باشند.

**جدول ۷: مقادیر $P$ برای عوامل در یکنواختی توزیع کرنش**

Table 7. P-Value for parameters in strain distribution uniformity

| عامل | $P$ |
|---|---|
| قطر غلتک(mm) | ۰/۰۰۰ |
| سرعت خط(m/min) | ۰/۰۳۰ |
| فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۰۰۰ |
| قطر غلتک(mm)×قطر غلتک(mm) | ۰/۰۰۹ |
| سرعت خط(m/min)×سرعت خط(m/min) | ۰/۰۰۵ |
| فاصله ایستگاه(mm)× فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۳۱۵ |
| قطر غلتک(mm)× سرعت خط(m/min) | ۰/۶۳۰ |
| قطر غلتک(mm)× فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۰۳۰ |
| سرعت خط(m/min)× فاصله ایستگاه(mm) | ۰/۸۰۸ |
| $R\text{-}Sq$ = ۹۷/۱٪ | |

شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نمودار اثرات اصلی عوامل بر روی یکنواختی توزیع کرنش عرضی را نشان می‌دهند. همانطور که مشخص است با توجه به اینکه تغییرات تابع پاسخ یکنواختی کرنش عرضی در هر سه مورد کمتر از ۰/۰۰۰۷ است صرفا با مشاهده نمودار اثرات اصلی نمی‌توان با صراحت، نظری درباره نوع رفتار و اثر عوامل بیان کرد هر چند که با توجه به مقادیر آنالیز واریانس، قطر غلتک بیشترین اثر را بر روی یکنواختی توزیع کرنش عرضی دارد که این با توجه به نوع فرایند و ناحیه شکل‌دهی که بین غلتک‌ها وجود دارد

معقول به نظر می‌رسد.

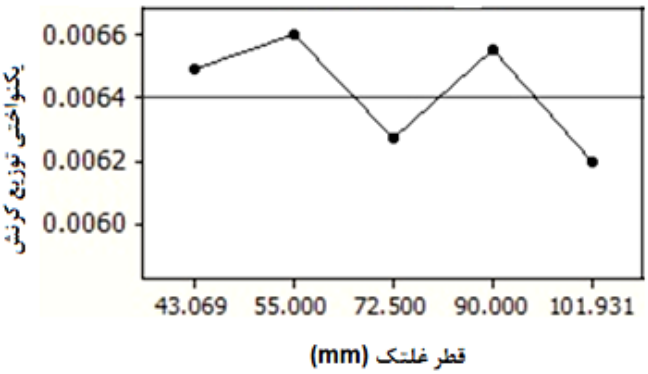


Fig. 16. The effect of roll diameter on strain distribution uniformity

شکل ۱۶: اثر قطر غلتک بر یکنواختی توزیع کرنش

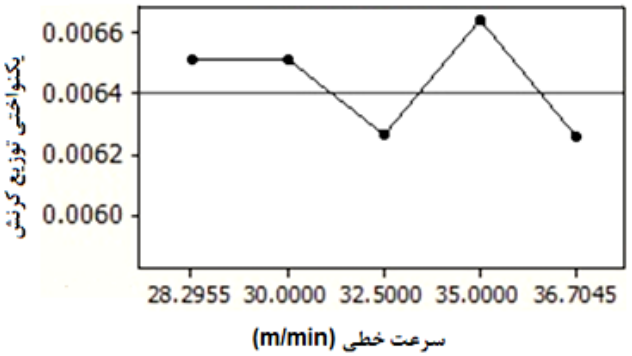


Fig. 17. The effect of line speed on strain distribution uniformity

شکل ۱۷: اثر سرعت خطی بر یکنواختی توزیع کرنش

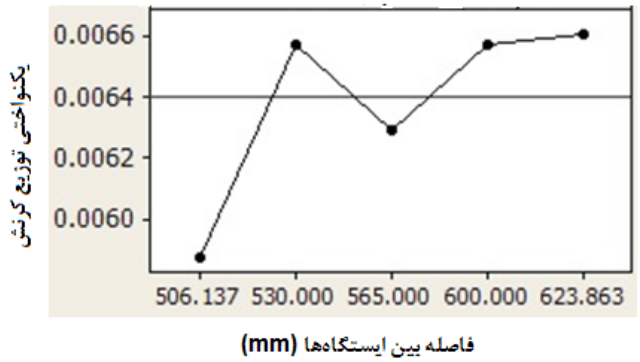


Fig. 18. The effect of distance of station on strain distribution uniformity

شکل ۱۸: اثر فاصله بین ایستگاه‌ها بر یکنواختی توزیع کرنش

در شکل ۱۹ نمودار اثرات متقابل بر روی یکنواختی توزیع کرنش عرضی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اثرات متقابل مطابق نتایج انالیز واریانس می‌باشد یعنی اثر متقابل قطر غلتک و فاصله بین ایستگاه و تا حدودی اثر متقابل سرعت خط و فاصله ایستگاه در تابع پاسخ یکنواختی کرنش عرضی قابل توجه است و اثر متقابل سرعت خط و قطر غلتک کمتر می‌باشد.

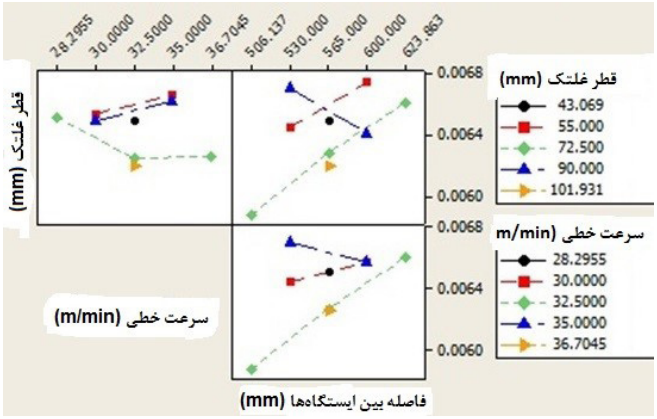


Fig. 19. The diagram of factors interactions on strain distribution uniformity

شکل ۱۹: نمودار اثرات تعاملی عامل‌ها بر یکنواختی توزیع کرنش عرضی

## ٦- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر سه عامل قطر غلتک‌ها، فاصله بین ایستگاه‌ها و سرعت خطی ورق بر روی مجموع کرنش‌های بیشینه مومسان طولی و یکنواختی توزیع کرنش عرضی در فرایند شکل‌دهی غلتکی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا با استفاده از روش طرح مرکب مرکزی، طراحی آزمایش صورت گرفت و در ادامه با اجرای آزمایش‌ها به روش اجزاء محدود نتایج استخراج گردید. با استفاده از نمودار توزیع احتمال نرمال، نرمال بودن توزیع داده‌ها برای هر دو پاسخ مورد تایید قرار گرفت. در ادامه با رسم نمودارهای اثرات اصلی و متقابل، تاثیر عوامل بر هریک از پاسخ‌ها مورد بررسی شد. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- قطر غلتک‌ها و فاصله بین ایستگاه‌ها تاثیر قابل توجهی بر روی مجموع کرنش‌های بیشینه مومسان طولی دارند. با افزایش فاصله بین ایستگاه‌ها و یا افزایش قطر غلتک‌ها مجموع کرنش‌های بیشینه مومسان کاهش می‌یابد. اما در مورد تاثیرات سرعت خطی ورق با توجه به مقدار خیلی کم تغییرات کرنش بیشینه طولی در اثر سرعت خط می‌توان گفت که اثر این عامل نسبت به دو عامل دیگر قابل توجه نیست. در مورد اثر متقابل می‌توان گفت اثر متقابل پارامترها در تاثیر بر تابع پاسخ بیشینه کرنش طولی قابل توجه نیست.
- در مورد تاثیر پارامترها بر یکنواختی توزیع کرنش عرضی می‌توان گفت که نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد که قطر غلتک‌ها بیشترین اثر را بر روی یکنواختی توزیع کرنش عرضی دارد بعد از آن سرعت خطی ورق بیشترین اثر را دارد ولی فاصله بین ایستگاه‌ها تقریبا بی‌اثر است. اما نمودارهای اثرات اصلی نشان می‌دهند که تغییرات مقدار توزیع کرنش عرضی در محدوده تغییرات پارامترها خیلی کم می‌باشد و براساس نمودارهای اثرات اصلی نمی‌توان در مورد تاثیر پارامترها قضاوت کرد. در مورد اثر متقابل پارامترها می‌توان گفت اثر متقابل قطر غلتک و فاصله بین ایستگاه و تا حدودی اثر متقابل سرعت خط و فاصله ایستگاه در تابع پاسخ یکنواختی کرنش عرضی قابل توجه است.

## منابع


[1] Salmani Tehrani, M., Nikfroz, M., (2009). "The effect of geometrical parameters on the angle of twist sections roll forming asymmetric channel simulation using Finite Element." *Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 2(3).

[2] Binti Mohd saffe, S. N., Nagamachi, T., (2014). "Residual stress around cut end of hat steel channel by roll forming " *Procedia Engineering* 81: 5.

[3] Moslemi naeini, H., Azizi tafti, R., Tjdari, M., (2011). "Using artificial neural networks for estimation of spring back in cold roll forming." *Amikabir journal of mechanical engineering* 42(3).

[4] Bhattacharyya, D., Smith, P., yee, C.H., Collins, I.F., (1984). "The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness." *First international con. on tech. of plasticity*, Tokyo, The japan Sock. for tech of plasticity: 5.

[5] Paralikas, J. (2009). "Investigation of the effects of main roll forming process parameters on quality for a V-section profile form AHSS." *international journal of advance technology* 44: 14.

[6] Zeng, G. (2009). "Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method." *Materials and Designs* 30: 8.

[7] Salmani Tehrani, M., Bahrami, M., (2010). "Investigate numerical and analytical of the round tube roll forming." *Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 3(2).

[8] Dadgar asl, Y., Tajdari, M., Moslemi naeini, H., (2015). "prediction of required torque in cold roll forming process OS a channel section using artificial neural network." *modares mechanical engineering* 15(7).

[9] Mohamadi, M., Moslemi naeini, H., Kasaei, M.M., Salmani tehrani, M., (2014). "investigation of twist defect floor of profiles with variable area in flexible roll forming process." *modares mechanical engineering* 14(6).

[10] Minjin oh., M. K. l., N., (2010). "robust design of roll formed slide rial using response surface method." *journal of mechanical science and technology* 24(12).

[11] Safdarian, R., Moslemi naeini, H., (2015). "the effects of parameters on the cold roll forming of channel section." *journal of thin-walled structures* 92: 6.

[12] Abvabi, A., Rolfe, B., Hodgson, P.D., (2015). "the influence of residual stress on a roll forming process." *international journal of mechanical science*.

[13] Halmos, G. T. (2006). *roll forming handbook*, Taylor & Francis.

[14] Moslemi naeini, H., Tajdari, M., Mazdak, S., (2007). "the optimal angle of the blades in the shape and its effect on sheet rolled in the cold roll forming process." *fifteenth annual conference of mechanical engineering*, Amirkabir university of technology.

[15] Alimirzaloo, V. (2011). *optimization of compressor blade final forging in air engine*. Mechanical Engineering, Amirkabir University. Ph.D.

[16] McClure, C. K., Li, H., (1995). "roll forming simulation using finite element analysis." *Manufacturing review* 8(2): 8.



برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

V. Alimirzaloo, M. Abdolahzade Gavgani, S. Ahmadi, A. Donyavi, “Investigation of Effective Factors on Strain Distribution in Round Section Roll Forming Process Using Design of Experiments” Amirkabir J. Mech. Eng., 49(2) (2017) 413-422.

DOI: 10.22060/mej.2016.718