

## بررسی و شبیه‌سازی فرآیند نورد نامتقارن سیم

علی پرویزی<sup>۱</sup>، بهزاد پسوده<sup>۲</sup>، کارن ابری نیا<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: aliparvizi@ut.ac.ir

### چکیده

فرایند نورد نامتقارن سیم برای دو ماده مس و برنج با نرم‌افزار آباکوس مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. مدل المان محدود موردنظر در این شبیه‌سازی تیری نورد، انحنای خروجی و عرض سطح تماس را در حالت نامتقارنی فرایند (عدم برابری قطر غلتک‌ها، سرعت دورانی غلتک‌ها و صافی سطح غلتک‌ها) پیش‌بینی می‌کند. مواد مورد استفاده شده در تحلیل خاصیت کرنش سختی دارند. برای صحه‌گذاری بر داده‌های این مطالعه، نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی با نتایج مطالعه تحلیلی نورد متقارن تخت سیم سایر محققین مقایسه شده است. مقایسه نتایج تطابق خوب بین این دو روش را نشان می‌دهند.

### واژه‌های کلیدی

نورد نامتقارن سیم، نسبت قطر غلتک، انحناء در خروجی، عرض سطح تماس، نیروی نورد

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- استاد تمام، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

## ۱- مقدمه

ونشان دادند که تطابق خوبی بین نتایج تئوری و داده‌های تجربی خود وجود دارد.

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۲] تأثیرات ضریب اصطکاک، سرعت غلتک و درصد کاهش ضخامت را بر نیروی نورد و رفتار تغییر شکل بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که سرعت غلتک تأثیر زیادی بر نیروی فرآیند دارد، ولی بر رفتار تغییر شکل تأثیر کمی می‌گذارد. همچنین در این مقاله رابطه‌ای برای محاسبه کرنش عرضی ارائه نمودند که برای فولاد کم کربن و پرکربن قابل استفاده است. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت غلتک، مقدار نیروی لازم برای انجام فرآیند، کم می‌شود.

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۳] در ادامه تحقیقات خود، با استفاده از تحلیل قاجی، تأثیرات ضریب اصطکاک، درصد کاهش و تنش تسلیم را بر توزیع فشار و نیرو را در فرآیند متقارن نورد تخت سیم بررسی کردند. آن‌ها همچنین تأثیرات پارامترهای فوق را بر موقعیت زاویه خنثی نیز بررسی کردند. برای تحلیل قاجی، تغییرات عرض سطح تماس موردنظر قرار دادند و دو معادله دیفرانسیل به دست آوردند که با روش عددی اویلر حل شدند. سپس با انجام آزمایشات تجربی، نتایج تئوری خود را صحت‌گذاری و تأیید نمودند.

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۴] با روش FSEM<sup>۱</sup> تغییر شکل غیر همگن را در سیم مسی بررسی و میزان کرنش در اصطکاک‌ها و درصد کاهش‌های مختلف را به دست آوردند. آن‌ها متوجه شدند که باند برش ماکروسکوپ در مقطع سیم به وجود می‌آید و همچنین، میزان غیرهمگنی روی محورهای x و y باهم تفاوت دارد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که هرچه درصد کاهش ضخامت کمتر و اصطکاک افزایش یابد، میزان غیرهمگنی تغییر شکل افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که در فصل پیش عنوان گردید بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در مورد فرآیند نورد تخت سیم، تحقیقات محدودی انجام گرفته که عمدتاً محدود به فرآیند در حالت نورد متقارن می‌باشد. از طرفی، تفاوت عمده بین فرآیند نورد ورق و فرآیند نورد سیم این است که در اکثر تحلیل‌های قاجی فرآیند نورد ورق، با فرض عدم پهن شدن ورق، شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار می‌باشد. این در حالی است که در فرآیند نورد تخت سیم، ناگزیر می‌بایست کرنش در راستای عرضی و پهن شدن سیم نیز در نظر گرفته شود. لذا، هرچند بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات زیادی در مورد نورد نامتقارن ورق صورت گرفته است ولی در مورد نورد نامتقارن تخت سیم تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است. از این رو در این پایان‌نامه، فرآیند نورد نامتقارن سیم با استفاده از روش شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، با استفاده از مدل المان محدود، تأثیر پارامترهای هندسی و عملکردی فرآیند نورد نامتقارن سیم بر خروجی‌های فرآیند نظیر نیرو، در غلتک‌ها، انحنا در خروجی و میزان پهن شدن سیم (کرنش عرضی) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین به منظور صحت‌گذاری روابط از روابط تئوری مربوط به نورد متقارن سیم استفاده شده است.

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۱] تأثیر تغییرات ضخامت، سرعت غلتک و جنس ماده بر عرض ناحیه تماس و کرنش عرضی را در فرآیند نورد تخت سیم بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که جنس ماده و سرعت غلتک تأثیری بر عرض ناحیه تماس و کرنش عرضی نداشته و بیشترین تأثیر را بر این پارامتر، تغییرات ضخامت دارد. آن‌ها رابطه‌ای برای بیان تغییرات ضخامت و عرض سطح تماس ارائه کردند.

<sup>۱</sup> Finite Element and Slab Method

که نحوه توزیع فشار می‌تواند بر کرنش عرضی تأثیر بگذارد. این موضوع در نتایج کار عملی وی نیز نشان داده شد. بعلاوه خروجی‌های وی نشان داد که وجود کشش عقب و جلو باعث کاهش کرنش عرضی می‌شود.

واللائو و همکاران [۹] فرآیند نورد تخت سیم را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها تأثیر غیرهمگنی تغییر شکل بر توزیع تنش تماسی و تنش‌های پسماند را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر چه تغییر شکل غیرهمگن زیاد شود، دونقطه ماکزیمم در منحنی توزیع تنش دیده می‌شود و تنش‌های پسماند نیز افزایش می‌یابد.

لیانگ و همکاران [۱۰] نورد نامتقارن ورق را مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر عدم برابر بودن قطرها را بر توزیع تنش‌های نرمال، برشی و انحنای خروجی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک نسبت قطر بهینه می‌تواند به نحوی تعیین شود که منجر به تولید ورق تخت شود.

فرهادنیا و سلیمی [۱۱] با در نظر گرفتن یک ماده الاستو-پلاستیک با خاصیت کرنش صفحه‌ای، اقدام به تحلیل و اصلاح فرآیند نورد نامتقارن با روش قاچی نمودند. آن‌ها اثرات تنش برشی را در سراسر ضخامت ورق بررسی و برای اولین بار توانستند اثرات ممان خمشی در لحظه ورود ورق به منطقه تغییر شکل را بر انحناء ورق در خروجی منطقه تغییر شکل بررسی نمایند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که بکار بردن ممان خمشی در لحظه ورود ورق به داخل منطقه نوردکاری در یک جهت مناسب، از تاب برداشتن و خم شدن ورق جلوگیری می‌کند. همچنین استفاده از ممان خمشی در لحظه ورود موجب تغییر شرایط و ویژگی‌های فرآیند نورد متقارن شده و این فرآیند مشابه فرآیند نورد نامتقارن می‌شود.

ریچلسن [۱۲] فرآیند نورد نامتقارن ورق را به صورت الاستیک-پلاستیک شبیه‌سازی کرد. او تأثیر نسبت

همچنین میزان تأثیر اصطکاک بر غیرهمگنی در درصد کاهش‌های زیاد، بیشتر است.

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۵] نحوه ایجاد باند برش ماکروسکوپ را در مقطع سیم نورد شده مورد مطالعه قرار دادند. سه روش شامل FSEM، سختی‌سنجی ماکروسکوپ ویکرز و نمونه متالوگرافی برای پیدا کردن چگونگی ایجاد باند برش توسط آن‌ها استفاده شد. میدان کرنش مؤثر با روش FSEM در درصد کاهش‌های مختلف به دست آمد و با نمونه متالوگرافی و سختی‌سنجی ماکروسکوپ ویکرز مقایسه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مینیمم و ماکزیمم کرنش مؤثر در لبه‌های گرد و مرکز سیم می‌باشد. در شکل (۱-۲) تصویر به دست آمده از شبیه‌سازی برای باند برش نشان داده شده است.

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۶] در ادامه، پروفیل سطح مقطع سیم نورد شده را در درصد کاهش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند

کاظمی‌نژاد و کریمی طاهری [۷] با استفاده از روش FSEM میدان کرنش مؤثر در سیم تخت نورد شده و سیم پرس شده را بررسی کردند و از روش سختی‌سنجی ماکروسکوپ ویکرز برای صحنه‌گذاری شبیه‌سازی استفاده کردند. با استفاده از میدان کرنش مؤثر، غیرهمگنی تغییر شکل در سیم نورد شده و پرس شده، به دست آمد. نتایج آن‌ها نشان داد که برای سیم نورد شده و پرس شده، با کاهش میزان درصد کاهش ضخامت و افزایش اصطکاک، میزان غیرهمگنی تغییر شکل افزایش می‌یابد.

کارلسون [۸] برای بررسی توزیع فشار در نورد سیم، فرآیند نورد سیم را شبیه‌سازی کرد. در تحلیل وی، سیم قبل از نورد، کشیده شده بود. نتایج وی نشان داد که بجای اینکه ماکزیمم فشار در مرکز طول تماس باشد، ماکزیمم فشار در ورودی و به شکل پای اسب می‌باشد. همچنین وی نشان داد

ژانگ و همکاران [۱۶] از جمله آخرین تحقیقات در زمینه تحلیل فرآیند نورد نامتقارن ورق را از طریق روش قاجی در سال ۲۰۱۲ ارائه دادند. نوآوری آن‌ها در این تحقیق، ارزیابی و بررسی تأثیر مقادیر تنش‌های برشی فعال در صفحات عمودی ورق در منطقه تغییر شکل می‌شد که در تحلیل‌های قبلی نادیده گرفته شده بود.

کومار و دیگران [۱۷] نورد متقارن را با روش قاجی و با در نظر گرفتن اثرات کرنش سختی و اصطکاک بر روی فویل (ورق بسیار نازک که ضخامت آن کمتر از 0.2 mm می‌باشد) مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. در این تحقیق، مقدار گشتاور غلتک‌ها از طریق روابط تعادل انرژی محاسبه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات کرنش سختی و تخت شدن غلتک‌ها سبب افزایش مقدار فشار و نیروی نورد می‌شود.

## ۲- شبیه‌سازی فرآیند نامتقارن سیم

برای شبیه‌سازی نورد نامتقارن سیم، ابتدا باید سه قطعه مجزا تعریف نمود. این قطعات عبارت‌اند از:

- غلتک: دو تا از آن، جهت انجام فرآیند ایجاد می‌شود (شکل ۱-الف). در این فرآیند غلتک‌ها از نوع پوسته صلب<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است.
- سیم اولیه: این قطعه از نوع سه‌بعدی تغییر شکل پذیر مطابق شکل (۱-ب) انتخاب شده است. در این شبیه‌سازی از دو جنس سیم، مس و برنج برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

اصطکاک را بر انحناهای خروجی بررسی و نتیجه گرفت که انحنا به سمت غلتک با اصطکاک زیاد است.

اکبری موسوی و همکاران [۱۳] فرآیند نورد نامتقارن را با انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود، اثرات سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها بر روی توزیع تنش‌های برشی و عمودی، طول ناحیه برشی، انحناهای ورق خروجی و همچنین نیروها و گشتاورهای فرآیند نورد مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی آن‌ها مشخص گردید که با افزایش سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها، طول منطقه تغییر شکل افزایش و مقدار فشار نورد کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، مقدار نیروها و گشتاورهای نوردکاری هم کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش طول منطقه تغییر شکل لزوماً موجب افزایش انحناهای ورق خروجی نمی‌شود. آن‌ها نسبت سرعت زاویه‌ای ۱/۱۱ بین دو غلتک را شرایط بهینه مقدار سرعت زاویه‌ای برای انجام فرآیند نورد نامتقارن اعلام کردند. با توجه به این نسبت سرعت، ورق هیچ‌گونه انحنا در خروجی پیدا نمی‌کند و مقدار بهینه نیروها و گشتاورهای فرآیند از طریق این سرعت به دست می‌آید.

گودور و همکاران [۱۴] یک مدل تحلیلی برای محاسبه مقدار ضریب اصطکاک در فرآیند نورد نامتقارن در نظر گرفتند. آن‌ها با استفاده از انحنائی که ورق در هنگام خروج از منطقه تغییر شکل پیدا می‌کند، موفق شدند با ارائه روابط مناسب، مقدار ضریب اصطکاک را تخمین بزنند.

ینگ و همکاران [۱۵] اثرات فشار نورد نامتقارن را از طریق ایجاد یک مدل کرنش صفحه‌ای بر پایه‌ی روش قاجی مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود از اثرات کشش ورق از جلو و عقب صرف‌نظر کرده و از اصطکاک برشی ثابت در مدل خود استفاده کردند.

<sup>۱</sup> Rigid shell

همچنین سایر خواص در جدول (۲) ارائه شده است.

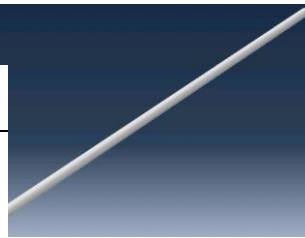
جدول (۲) خواص مکانیکی مس و برنج

خواص مکانیکی	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
مس	۱۱۷	۰/۲۸	۸۹۲۰
برنج	۱۰۶	۰/۳۲	۷۱۴۰

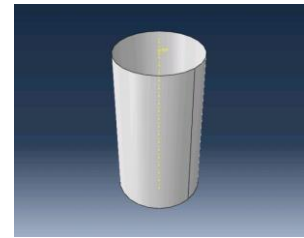
در بخش تعریف ویژگی‌های تماسی، تمامی عکس‌العمل‌های مکانیکی بین نواحی درگیر تعریف می‌شوند. از آنجایی که بدون وجود اصطکاک هیچ‌گونه درگیری بین سیم با غلتک‌ها رخ نمی‌دهد، اصطکاک نقش بسیار مهمی در فرآیند مورد بررسی دارد. به صورت پیش فرض، نرم افزار آباکوس از ضریب اصطکاک  $\mu$  استفاده می‌کند که مقدار آن از کاربر گرفته شده و در محاسبات قرار داده می‌شود. اما ارتباطی که بین ضریب اصطکاک و مقدار فاکتور اصطکاک وجود دارد که مشخص کننده مقدار فاکتور اصطکاک می‌باشد. در این پروژه فرض شده است که ارتباط بین فاکتور اصطکاک و ضریب اصطکاک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$mk = \mu p \quad (1)$$

در فرایند نورد سیم، مطابق شکل (۲)، غلتک‌ها دوران کرده و سیم به داخل فضای بین آن‌ها حرکت می‌کند. لذا، طی تغییر شکل پلاستیک زیادی که در سیم ایجاد می‌شود شکل سیم تخت می‌شود. با توجه به طبیعت دینامیکی فرآیند، تحلیل از نوع دینامیکی در نظر گرفته شده است. زمان تحلیل در انجام شبیه‌سازی ۶ ثانیه در نظر گرفته شده است. فعال نمودن گزینه Nlgeom در این حل موجب می‌شود تا تغییرات هندسه غیرخطی نیز در مسئله آورده شود. تحلیل صریح برای این کار مناسب‌تر بوده، بنابراین این فرایند



(ب)



(الف)

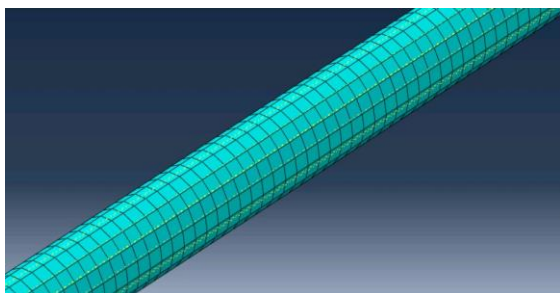
شکل (۱) نمای (الف) غلتک (ب) سیم مدل شده در فرآیند نورد نامتقارن سیم

لازم به ذکر است که قطر سیم اولیه برای مس  $3/2$  میلی‌متر و برای برنج  $2/5$  میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. سه درصد کاهش (۱۳٪-۳۰٪-۴۵٪) در این تحلیل استفاده شده است. برای این منظور، ۶ عدد غلتک با قطرهای (۷۳، ۶۹، ۶۴/۴، ۵۳/۶، ۴۹، ۴۵) میلی‌متر استفاده شده است. سه نسبت قطر غلتک ( $d_2 = 69/49 = 1.4$ ،  $d_3 = 73/45 = 1.6$ ،  $d_1 = 64.4/53.6 = 1.2$ ) مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه قطر غلتک‌ها، اصطکاک‌ها، سرعت‌ها و نسبت قطر غلتک‌ها در زیر هر شکل آورده شده است.

خواص مواد از مهم‌ترین پارامترها در فرآیند نورد سیم می‌باشد که تأثیر زیادی بر نیروی فرایند خواهد داشت. لذا باید به دقت انتخاب شوند. همان‌گونه که عنوان گردید در این شبیه‌سازی، سیم از جنس دو ماده مس و برنج مورد مطالعه قرار می‌گیرد تا نتایج آن‌ها با نتایج تئوری مقایسه شوند. رفتار پلاستیک مواد به صورت عددی در جدول (۱) آورده شده است.

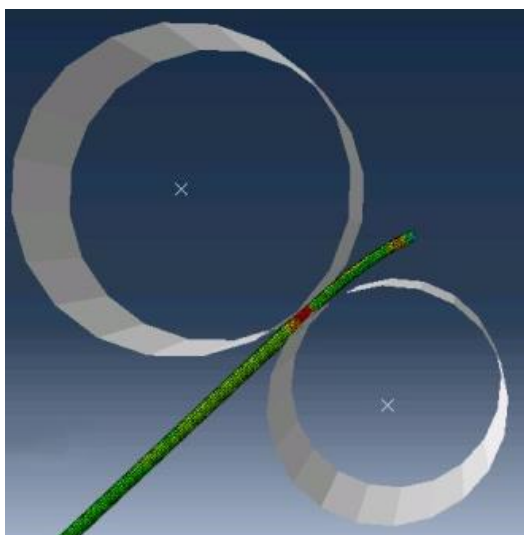
جدول (۱) رفتار پلاستیک مس و برنج

مس	
کرنش	۰، ۰/۱۱، ۰/۱۳، ۰/۱۵، ۰/۱۷
تنش (MPa)	۳۳۰، ۳۵۰، ۳۹۰، ۴۱۴، ۴۲۰
برنج	
کرنش	۰، ۰/۸، ۰/۲۴، ۰/۵، ۰/۸



شکل (۳) نمای مش زده شده سیم

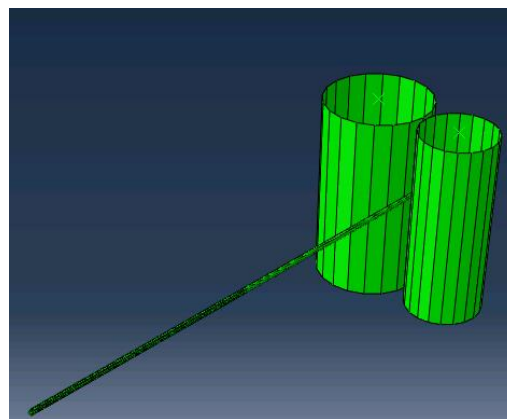
شکل (۴)، فرایند نورد نامتقارن سیم در حال انجام نمایش را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، سیم در خروجی دارای انحنا می‌باشد. این انحنا به سمتی است که سرعت محیطی غلتک کمتر است.



شکل (۴) سیم در حال عبور از فضای بین غلتک‌ها

در شکل‌های (۵) نیز سیم بعد از عملیات نورد و منطقه تغییر شکل سیم در فرایند نورد نامتقارن نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت در این تحلیل، عرض سطح تماس سیم می‌باشد که یکی از پارامترهای مهم خروجی فرآیند می‌باشد که می‌توان با کنترل پارامترهای ورودی، مقدار آن را به صورت دلخواه تعیین نمود.

به صورت صریح دینامیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل دینامیکی صریح مخصوص تحلیل‌های 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 می‌کند.

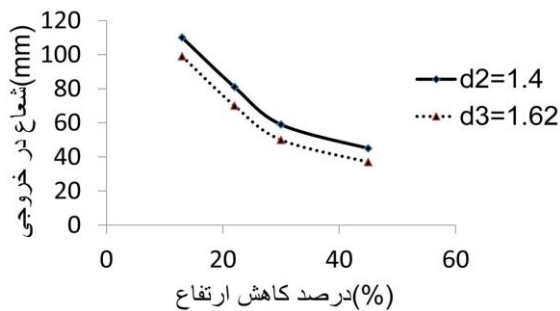


شکل (۲) فرایند نورد نامتقارن

در این شبیه‌سازی، هر دو غلتک در هیچ جهتی حرکت خطی ندارند. همچنین به جز دوران حول محور  $y$ ، دوران حول دیگر محورها نیز مقید شده است (راستای حرکت خطی سیم، محور  $x$  و راستای محور غلتک‌ها  $y$  می‌باشد) زمانی که آنالیز المان محدود دینامیکی صریح اجرا می‌شود، بازه زمانی بر اساس کوچک‌ترین اندازه مش‌بندی و نوع حرکت المان‌ها تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از قابلیت بزرگنمایی جرمی تأثیر بسیاری در پایداری فرآیند و نتایج در طول شکل‌دهی داشته و موجب تحت کنترل بودن زمان شبیه‌سازی می‌شود.

از آنجایی که غلتک‌ها از نوع صلب تحلیلی می‌باشند، نیازی به مش‌بندی ندارند. لذا مطابق شکل (۳)، فقط سیم المان‌بندی شده است.

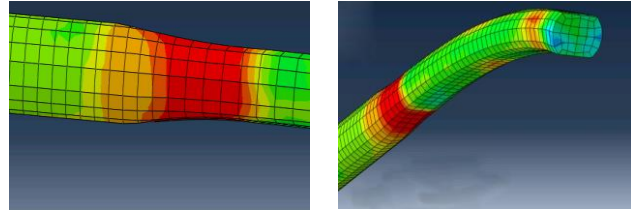
خروجی سیم کاهش می‌یابد. بعلاوه، نرخ کاهش برای مقادیر کوچک‌تر درصد کاهش ارتفاع، بیشتر می‌باشد. میزان ماکزیمم اختلاف شعاع در خروجی برای دو نسبت قطر مختلف در ۱۳٪ کاهش ارتفاع حدود ۴۰٪ می‌باشد که این مقدار در درصد کاهش ارتفاع ۲۵٪ کمتر و برابر ۱۰٪ است. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نسبت قطرهای مختلف بر شعاع خروجی در درصد کاهش ارتفاع‌های کمتر، بیشتر می‌باشد.



شکل (۷) تأثیر درصد کاهش ارتفاع بر شعاع سیم مسی در خروجی برای دو نسبت قطر غلتک

$$h_0 = 3.2 \text{ mm}, n_u = n_l = 9 \text{ rpm}, \mu = .2$$

نتایج تحلیل‌ها برای محاسبه پهنای سطح تماس سیم نورد شده که با استفاده از روش المان محدود به دست آمده است، در شکل (۸) - (الف)، نشان داده شده است. در شکل‌های (۸) - (ب) و (ج)، تأثیر درصد کاهش ارتفاع بر عرض سطح تماس برای سیم‌های مسی و برنجی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای مقادیر بزرگ‌تر درصد کاهش ارتفاع، میزان عرض سطح تماس بیشتر می‌شود. نتایج با رابطه تئوری کاظمی‌نژاد [۲] مقایسه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که داده‌های حاصل از تئوری و مطالعه شبیه‌سازی تطابق مناسبی دارند. با این حال، نتایج حاصل از معادله تئوری نورد متقارن سیم از نظر مقدار با نتایج شبیه‌سازی تا حدودی اختلاف دارد. علت این موضوع، فرضیات استفاده شده در حل تحلیلی می‌باشد. ولی در حالت

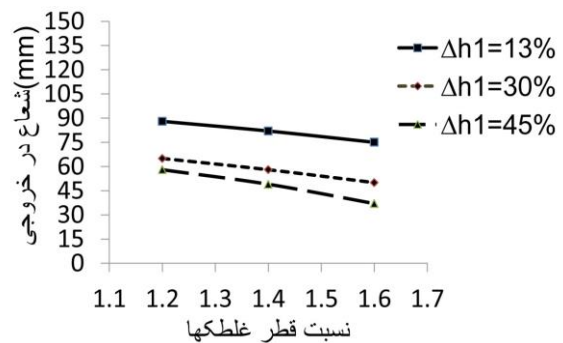


شکل (۵) (الف) سیم بعد از عملیات نورد (ب) منطقه تغییر شکل سیم در فرایند نورد نامتقارن

شکل (۵) (الف) سیم بعد از عملیات نورد (ب) منطقه تغییر شکل سیم در فرایند نورد نامتقارن

### ۳- نتایج و بحث

شکل (۶)، نمایانگر تأثیر نسبت قطر غلتک‌ها بر شعاع سیم در خروجی به ازای درصد کاهش‌های مختلف ارتفاع می‌باشد. بر اساس این نتایج، به ازای یک درصد کاهش مشخص، هرچه نسبت قطر غلتک بیشتر شود، شعاع کمتر می‌شود. همچنین این نتایج بیانگر آن می‌باشد که هر چه میزان درصد کاهش ارتفاع بیشتر شود میزان انحناء نیز بیشتر شده و انحناء به سمت غلتک با قطر کوچک‌تر خواهد بود. چون سرعت زاویه‌ای غلتک با قطر کوچک‌تر کمتر می‌باشد، سیم نورد شده در خروجی به سمت آن انحناء خواهد داشت.



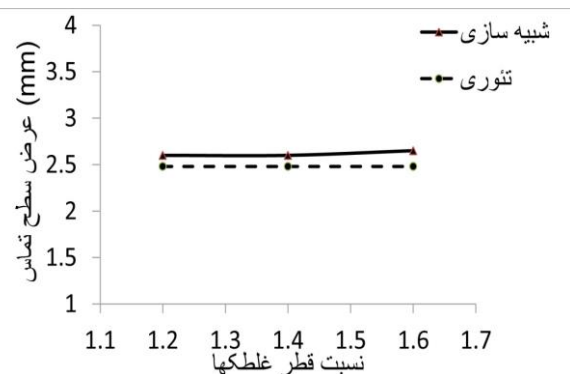
شکل (۶) تأثیر نسبت قطر غلتک‌ها بر شعاع سیم مسی در خارج ناحیه تغییر شکل برای درصد کاهش‌های مختلف

$$h_0 = 3.2 \text{ mm}, n_u = n_l = 9 \text{ rpm}, d_1 = 1.2,$$

$$d_2 = 1.4, d_3 = 1.6, \mu = .2$$

شکل (۷)، تأثیرات درصد کاهش ارتفاع بر شعاع سیم خروجی را در دو نسبت قطر غلتک مختلف نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد کاهش ارتفاع، شعاع

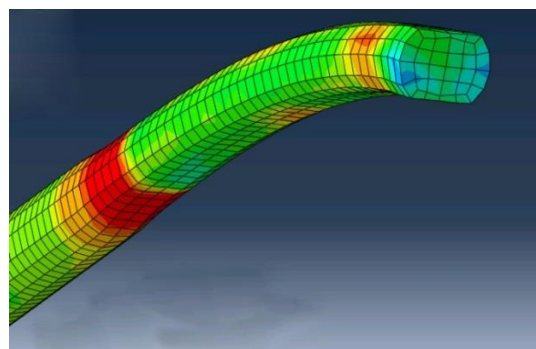
داده‌های حاصل از فرمول می‌باشد. اگرچه یک شیب مثبت در هر دو منحنی‌ها دیده می‌شود، ولی می‌توان نتیجه گرفت که نسبت قطر غلتک‌ها تأثیر قابل توجهی بر پهنای سطح سیم ندارد.



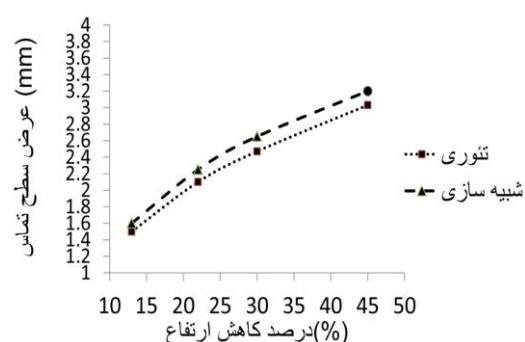
شکل (۹) تأثیر نسبت قطر غلتک بر پهنای سطح تماس سیم مسی

شکل (۹)  $h_0 = 3.2 \text{ mm}$ ,  $n_u = n_l = 9 \text{ rpm}$ ,  $\Delta h = 30\%$ ,  $\mu = 0.2$  تأثیر درصد کاهش ارتفاع بر نیروی نورد و مقایسه باحالت تحلیلی نورد متقارن کاظمی نژاد [۳] در شکل (۱۰)، نشان داده شده است. در این شکل با افزایش درصد کاهش ارتفاع، نیروی نورد افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر شبیه‌سازی کمتر از داده‌های حاصل از مطالعه تحلیلی می‌باشد، که علت آن نامتقارنی فرایند در شبیه‌سازی می‌باشد. در این شکل برای انجام شبیه‌سازی، از حالت‌های نامتقارنی عدم برابری در قطر غلتک‌ها مدنظر قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در درصد کاهش ارتفاع‌های بیشتر اختلاف بین آن‌ها زیاد می‌شود به طوری که در درصد کاهش ارتفاع ۲/۳ میلی‌متر میزان اختلاف به ۱۲٪ می‌رسد. این نشان می‌دهد که در درصد کاهش ارتفاع‌های بالاتر تأثیر نامتقارنی فرایند بر نیروی نورد نامتقارن سیم بیشتر است.

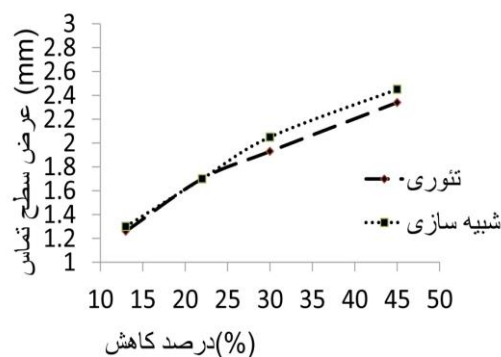
کلی مقادیر به دست آمده برای دو حالت، تطابق مناسبی دارند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۸) (الف) پهنای سطح تماس سیم در خروجی ناحیه تغییر شکل. تأثیر درصد کاهش ارتفاع بر پهنای سطح تماس (ب) سیم مسی (ج) سیم برنجی

$$n_u = n_l = 9 \text{ (rpm)}, d_2 = 1.4, \mu = 0.2$$

تأثیر نسبت قطر غلتک‌ها بر پهنای سطح تماس سیم مسی در شکل (۹)، نشان داده شده است. در این شکل نتایج حاصل از شبیه‌سازی با فرمول تئوری مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی بیشتر از

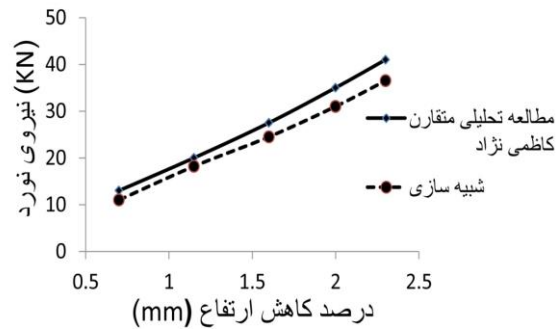


## فهرست علائم

$\mu$	ضریب اصطکاک کولمب
$F$	نیروی نورد کاری (KN)
$b$	عرض سطح تماس سیم (mm)
$L$	طول تماس ورق با غلتکها (mm)
$\Delta h$	درصد کاهش ورق (%)
$m$	فاکتور ضریب اصطکاک در سطوح تماس
$k$	تنش تسلیم برشی سیم (MPa)
$d$	نسبت قطر غلتکها
$n_u, n_l$	سرعت دورانی غلطکهای بالا و پایین
$h_o$	ضخامت اولیه سیم

## مراجع

- [1] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., A theoretical and experimental investigation on wire flat rolling process using deformation pattern, *Material Design*, Vol. 26, 2005, pp. 99-103.
- [2] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 160, 2005, pp. 313-320.
- [3] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., Calculation of rolling pressure distribution and force in wire flat rolling process, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 171, 2006, pp. 253-258.
- [4] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., Deformation inhomogeneity in flattened copper wire, *Material Design*, Vol. 28, 2007, pp. 2047-2053.
- [5] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., The prediction of the macroscopic shear bands in flat rolled wire using the finite and slab element method, *Materials Letters*, Vol. 60, 2006, pp. 3265-3268.
- [6] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., A study on the cross-section profile of flat rolled wire, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 200, 2008, pp. 325-330.



شکل (۱۰) تأثیر درصد کاهش ارتفاع بر نیروی نورد و مقایسه با حالت نورد تحلیلی متقارن.

$$h_0 = 5.5 \text{ mm}, n_u = n_l = 42 \text{ rpm}, \mu = .17, \\ K = 250 \text{ (MPa)}, d_2 = 1.4$$

## ۴- نتیجه گیری

فرآیند نورد سرد نامتقارن سیم با در نظر گرفتن نسبت قطر غلطکهای مختلف به صورت شبیه سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که هر چه نسبت قطر غلتکها افزایش یابد، میزان انحنای سیم در خروجی افزایش می یابد. همچنین درصد کاهش ارتفاعهای بیشتر نیز باعث افزایش انحنای سیم در خروجی می شود. همچنین علاوه بر نتیجه گیری هایی که برای شبیه سازی در بالا بیان شد، می توان به این نکته اشاره کرد که با توجه با داده های شبیه سازی هر چه درصد کاهش ارتفاع بیشتر شود شعاع سیم در خروجی کمتر می شود. بررسی نیروهای فرآیند نشان داد که با افزایش درصد کاهش ارتفاع، نیرو کاهش میابد ولی میزان انحنا در خروجی افزایش میابد. بعلاوه برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از این شبیه سازی، از یافته های تحلیلی کارهای قبلی استفاده شد که مطابقت خوبی نشان داد.

- [7] Kazeminezhad M., Karimi Taheri A., The effect of 3D and 2D on flattened wires, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 202, 2008, pp. 553-558.
- [8] Carlsson B., The contact pressure distribution in flat rolling of wire, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 73, 1998, pp. 1-6.
- [9] Vallellano C., Cabanillas P.A., Garcia-Lomas F.J., Analysis of deformation and stress in flat rolling of wire, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 195, 2008, pp. 63-71.
- [10] Liang Haq, Hong-shuang DI, GONG. Dian.yao, Analysis of sheet curvature in asymmetrical cold rolling, *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 20, 2013, pp. 34-37.
- [11] Farhatnia F., Salimi M., An analytical approach to asymmetrical hot-sheet rolling considering the effects of the shear stress and internal moment at the roll gap, *International Journal of Mechachanical Engineering Science*, Vol. 3, No. 4, 2011, pp. 147-163.
- [12] Richelsen A., Elastic plastic analysis of the stress and strain distribution in asymmetric rolling, *International Journal of Mechachanical Engineering Science*, Vol. 76, 1997, pp. 1199-1211.
- [13] Akbari Mousavi S.A.A., Ebrahimi S.M., Madoliat R., Three dimensional numerical analysis of asymmetric rolling, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 40, 2007, pp. 725-729.
- [14] Gudur P.P., Salunkhe M.A., Dixit U.S., A theoretical study on the application of asymmetric rolling for the estimation of friction, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 34, 2008, pp. 315-327.
- [15] Yong T., Yan-hui G., Wang Z.D, Wang G.D., Analysis of Rolling Pressure in Asymmetrical Rolling Process by Slab Method, *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 38, 2009, pp. 22-26.
- [16] Zhangn S.H., Zhao D.W., Gao C.R., Wang G.D., Analysis of asymmetrical sheet rolling by slab method, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 65, 2012, pp. 168-176.
- [17] Kumar D., Dixit U.S., A slab method study of strain hardening and friction effects in cold foil rolling process, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 171, 2006, pp. 331-340.