

## شبیه سازی فرایند نورد سرد صفحات نازک و مطالعه‌ی تاثیر ضرایب اصطکاکی بر نیمرخ تنش به

### کمک نرم افزار ANSYS

مهرداد وزیری\*<sup>۱</sup> و علی بیضایی<sup>۲</sup>

#### چکیده

در این مقاله، فرایند نورد سرد با در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای و ویژگی‌های مواد به صورت الاستیک \_ پلاستیک (Elastic-Plastic) و الاستیک - سخت شوندگی خطی (Elastic-linear work hardening) با کاربرد نرم افزار Ansys، مورد بررسی قرار گرفته است. بمنظور طراحی غلتک‌ها و ساز و کار نورد و هم‌چنین، شناسایی نواحی بروز عیب، مطالعه‌ی اثر عوامل گوناگون بر نیمرخ‌های تنش از اهمیتی ویژه برخوردار است. لذا، ابتدا به کمک مقایسه‌ی شبیه‌سازی کنونی و نتایج آزمایشگاهی، به بررسی تاثیر عوامل گوناگونی از جمله، اثر نوع شبکه بندی و عامل همگرایی (نیرو، تغییر مکان و ممان) پرداخته می‌شود که در آن، شبیه سازی غلتک به صورت الاستیک و با اعمال شرایط کار سختی انجام شده است. پس از دستیابی به شبیه نهایی که دارای کم‌ترین خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی بوده است، تاثیر تغییر ضرایب اصطکاک بر تنش‌های برشی و نرمال در سطح تماس مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** نورد سرد، شبیه سازی، اجزا محدود، اصطکاک، کرنش صفحه ای، کارسختی، تغییر شکل پلاستیک.

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، گروه مکانیک، مرودشت، ایران.

۲- کارشناس ارشد مکانیک.

\*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: [mvaziri@miau.ac.ir](mailto:mvaziri@miau.ac.ir)

## پیشگفتار

فرایند نورد سرد یکی از کهن‌ترین فرایندهای کار روی فلزات است. بیش از نیم قرن است که بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد این فرایند آغاز شده است. روش‌های slip-line، upper bound و slab از جمله روش‌های تحلیلی هستند که به گونه‌ای گسترده‌تر در این زمینه کاربرد یافته‌اند، اما هیچ یک از روش‌های یاد شده قادر به شبیه‌سازی مناسب فرآیند نورد با توجه به پیچیدگی این فرایند نمی‌باشند. برای مثال، مهم‌ترین اشکال روش slip-line که باعث بروز خطا در محاسبات می‌شود را می‌توان ناتوانی این روش در اعمال شرایط کار سختی<sup>۱</sup> ذکر نمود. همان گونه که در بخش‌های بعد توضیح داده خواهد شد، صرف نظر کردن از این شرایط باعث افزایش خطای حل در صفحات نازک می‌شود.

تئوری‌های موجود در زمینه‌ی نورد سرد<sup>۲</sup> ورق‌های سخت و نازک به دلیل این‌که از تغییر شکل غلتک‌ها صرف‌نظر می‌کنند، قابل اطمینان و راضی کننده نمی‌باشند. افزون بر این، ساده سازی‌های انجام شده در مورد عواملی مانند اصطکاک و ویژگی‌های مواد نیز خود باعث ایجاد اختلاف میان جواب‌های آزمایشگاهی و تحلیلی می‌شوند. از جمله تئوری‌های ارایه شده بمنظور شبیه‌سازی فرایند نورد صفحات، تئوری‌های اوروان (۱۹۴۳)، کارمن (۱۹۲۵) و بلند و فُرد (۱۹۴۸) می‌باشند [۱] که براساس صلب فرض کردن غلتک‌ها بنا شده است. پس از آن جانسون و بنتال [۲] این موضوع را مطرح کردند که ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده میان دو غلتک، در دو ناحیه‌ی مجزا رخ داده و به وسیله‌ی ناحیه‌ی خنثی از یکدیگر جدا می‌شوند. این ناحیه در صفحات نازک وسیع شده و فاقد لغزش است. در این ناحیه بار گسترده‌ی اصطکاکی افت کرده و اصطکاک لغزشی کم می‌شود. پس از آن، فلک و جانسون در تئوری جدیدی فرض کردند که ناحیه‌ی خنثی به گونه‌ی مسطح باقی مانده و فشار تماس به صورت تقریبی از نیمرخ هرتز می‌باشد [۳]. این روش در سال‌های بعد به وسیله‌ی ساتکلیف و همکارانش به گونه‌ای کامل‌تر شبیه‌سازی شد [۴]. ایشان با کمک معادله‌های تعادل در

ناحیه‌ی لغزش و تشکیل ماتریسی که تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها را به فشار عمودی در ناحیه‌ی مسطح مرتبط می‌کند، به شبیه‌سازی ناحیه‌ی تغییر شکل پرداختند و به نتایجی دقیق‌تر دست یافتند. از روش‌های عددی بکار گرفته شده می‌توان به مطالعات دیکسون و همکارانش اشاره کرد [۵]. ابوالخیر با شبیه‌سازی فرایند به صورت steady-state به بررسی توزیع فشار در ناحیه‌ی تماس پرداخت [۶].

داوسون و تامسون اثر بار گذاری در ورود نورد و بار برداری در خروج نورد را نیز در شبیه‌سازی خود در نظر گرفتند و اثر کشش جلویی<sup>۳</sup> و کشش عقبی<sup>۴</sup> را در مورد نیمرخ فشار مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود از شبیه‌الاستیک-کاملاً پلاستیک استفاده کردند [۷].

کوبایاشی و لی نیز فرآیند نورد سرد را برای مواد صلب-کاملاً پلاستیک در حالت پایدار و ناپایدار و با در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای بررسی کردند [۸]. لنارد و هو نیز با استفاده از روش اجزای محدود به تحلیل این فرایند پرداخته‌اند. بالا بردن دقت حل و اعمال شرایط واقعی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک متغیر در طول ناحیه‌ی تماس غلتک‌ها و صفحه و صلب نبودن غلتک‌ها از جمله امتیازهای تحلیل ایشان می‌باشد [۹]. دیکسیت نیز به شبیه‌سازی فرایند به صورت کرنش صفحه‌ای و اعمال شرایط کرنش سختی و اثر ناهمسانگردی<sup>۵</sup> برای مواد الاستیک-کاملاً پلاستیک پرداخته است [۱۰-۱۱]. بمنظور بررسی توزیع فشار به روش اجزا-محدود، شبیه‌سازی‌هایی نیز به وسیله‌ی لین و شن، کُمری، جیانگ و تیو به صورت سه بعدی انجام گرفته است [۱۲-۱۳].

همچنین، مطالعه‌ای به وسیله‌ی سزک، آکساکال و کان به روش تحلیل upper Bound انجام گرفته که در آن با شبیه‌سازی صلب پلاستیک به بررسی اثر اصطکاک و تغییر شکل‌ها اقدام شده است و معادله‌ها به کمک نرم افزار matlab 6.0 حل شده است [۱۴]. بررسی اثر اصطکاک بر نیمرخ تنش به وسیله‌ی جیانگ، زیونگ و وانگ انجام شده است. آن‌ها در شبیه‌سازی خود به صورت سه بعدی به شبیه‌سازی فرایند نورد سرد صفحه پرداختند

<sup>3</sup> - Forward Tension

<sup>4</sup> - Backward Tension

<sup>5</sup> - Anisotropy

<sup>1</sup> - Work Hardening-

<sup>2</sup> - Cold Rolling

کرنش‌های بزرگ، تماس و جدایش در ناحیه‌ی تماس گره‌ها، تغییر جهت اصطکاک و فرایند انتقال حرارت در سیستم از جمله توانایی‌های این المان می‌باشد.

از سوی دیگر، با توجه به این‌که برخی از فرانسج‌های جزء contact به خواص صفحه و غلتک‌ها، میزان تراکم شبکه بندی انجام شده روی صفحه و غلتک‌ها و میزان بار گذاری وابسته‌اند. لذا، لازم است تا تغییرات لازم در برخی از فرانسج‌ها به وسیله‌ی یک batch file و پس از هر مرحله از همگرایی اعمال شود. بار گذاری اعمال شده بر اساس جدول ۱ که دارای یک بارگذاری (loadcase) می‌باشد، انجام شده و بمنظور اعمال شرایط کرنش سختی از معادله‌ی بهبود یافته‌ی ludvic استفاده شده است [۱۶] و [۸].

$$\bar{\sigma} = Y_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{b}\right)^n$$

که مقادیر ثابت‌های  $n$ ،  $b$  و  $Y_0$  جهت آلومینیوم برابر  $0.26$ ،  $0.05$ ،  $50.3E6 \text{ N/mm}^2$  می‌باشد. این معادله بر اساس ثابت‌های آن که با توجه به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، در تحلیل‌های عددی که مبنای آن‌ها مطالعات کوبایشی<sup>۵</sup> است، بکار می‌رود. بمنظور اثبات دقت تحلیل انجام شده جدول ۱ کاملاً بر اساس محاسبات انجام شده در پژوهش‌های کوبایشی و الصالحی انتخاب شده است و پس از تایید صحت شبیه‌سازی انجام شده بر اساس جدول ۲، تحلیل‌ها روی صفحه‌ای از جنس فولاد انجام می‌گیرند.

### اثر عامل همگرایی

عامل‌های همگرایی شامل نیرو  $F$ ، تغییر مکان  $U$  و ممان  $M$  می‌باشند که در نرم افزار ANSYS موجودند. لذا، بمنظور بررسی عوامل یاد شده با ثابت نمودن سایر فرانسج‌ها اثر هر یک از ملاک‌های همگرایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

هدف از بررسی ملاک‌های همگرایی در شبیه ساخته شده، دستیابی به دقت کافی در کوتاه‌ترین زمان تحلیل است. بارگذاری براساس case1 جدول ۱ انجام شده و نتایج از نظر تغییرات نیمرخ تنش و تعداد تکرارهای لازم

و اثر اصطکاک را بر تغییر شکل صفحه مورد مطالعه قرار دادند [۱۵].

با توجه به موردهای بالا، تعیین فرانسج‌های نورد به گونه‌ی دقیق و در شرایط واقعی تنها با کاربرد روش اجزای محدود امکان‌پذیر است. چرا که با این روش می‌توان به گونه‌ای وسیع‌تر شرایط واقعی را در حل، اعمال کرد. در این مقاله با کاربرد روش اجزای محدود به بررسی اثر بارگذاری و کرنش سختی در مورد نیمرخ فشار پرداخته خواهد شد.

### شبیه‌سازی

بمنظور دستیابی به دقت کافی در شبیه‌سازی فرایند نورد به بررسی اثر عوامل گوناگون نیاز می‌باشد. به همین منظور، اثر فرانسج‌هایی همچون نوع شبکه بندی و عامل همگرایی (نیرو، تغییر مکان و ممان) بر دقت شبیه پرداخته شده است. پس از دستیابی به شبیه نهایی که دارای کم‌ترین خطا نسبت به نتایج FEM بدست آمده در مقاله‌های مشابه است، اثر سایر فرانسج‌ها در تطبیق نتایج با نتایج آزمایشگاهی لحاظ شده است. در این بررسی خواص صفحه به صورت الاستیک - سخت شونده خطی و محاسبات تنش و کرنش در ناحیه‌ی پلاستیک بر اساس تئوری پرناتل - روس<sup>۱</sup> بنا شده است. با توجه این موضوع که تحلیل به وسیله‌ی نرم افزار ANSYS انجام می‌گیرد لذا، انتخاب المان‌های مناسب جهت توانایی شبیه‌سازی کامل فرایند دارای اهمیت است. لذا، جهت شبیه‌سازی صفحه و غلتک‌ها، جزء PLANE42 تعیین گردیده که توانایی شبیه‌سازی شرایط کرنش صفحه‌ای<sup>۲</sup>، تغییر شکل‌های بزرگ<sup>۳</sup>، کرنش‌های بزرگ<sup>۴</sup> و تغییر شکل‌های پلاستیک را دارا می‌باشد. بمنظور شبیه‌سازی سطح تماس میان غلتک‌ها و صفحه و شبیه‌سازی مناسب اصطکاک از جزء CONTACT48 استفاده شد که اعمال شرایط کرنش صفحه‌ای و توانایی این جزء در تحلیل سطوح تماس به صورت کاملاً الاستیک و اعمال شرایط غیر خطی، مناسب بودن در تغییر شکل‌های بزرگ و

<sup>1</sup> - Prantle-Russ

<sup>2</sup> - Plane Strain

<sup>3</sup> - Large Deflection

<sup>4</sup> - Large Strain

<sup>5</sup> - Kobayashi

(تعداد تکرار تا رسیدن به همگرایی) در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به گراف‌های ترسیم شده و تعداد تکرارهای لازم جهت رسیدن به همگرایی، مطلوب‌ترین نوع شبکه بندی حالت شعاعی<sup>۳</sup> است.

در شکل ۴ اثر الاستیک فرض کردن غلتک‌ها در مقایسه با نتایج FEM و آزمایشگاهی ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، اثر الاستیک فرض کردن غلتک‌ها باعث افزایش صحت روند تغییرات تنش‌های نرمال در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی Al-salehi می‌شود [14].

اکنون با در دست داشتن شبیه مناسی که نتایج بدست آمده از آن با نتایج تحلیل‌های انجام شده در حالت rigid work hardening و شبیه‌سازی غلتک به صورت الاستیک یکسان است، به بررسی اثر تغییر ضرایب اصطکاک پرداخته می‌شود و نتایج با نتایج آزمایشگاهی Al-salehi مقایسه می‌گردد.

### اثر تغییرات ضریب اصطکاک

از جمله عوامل تاثیر گذار بر مقدار تنش‌های نرمال و گشتاور می‌توان به اثر زبری و صافی غلتک‌ها اشاره کرد. بمنظور بررسی مقدار این اثرگذاری، تغییرات تنش جهت حالت‌های گوناگون بارگذاری در جدول ۲ در خصوص صفحه‌ای از جنس فولاد ارائه می‌شود. که مقادیر ثابت-های  $b$ ،  $n$  و  $Y_0$  براساس رابطه‌ی Ludovic برابر ۰,۳، ۰,۰۴۴ و  $358E6 \text{ N/mm}^2$  می‌باشد. عامل اصطکاک در فرایند نورد از جمله عوامل مهم و تاثیر گذار بر نتایج بدست آمده از تحلیل‌هاست. تاکنون تمامی نتایج ارائه شده با فرض ثابت بودن ضریب اصطکاک و فرض اصطکاک خشک کولمب بوده است. ابتدا بمنظور اثرگذاری مقدار ضریب اصطکاک بر توزیع تنش‌ها و بارهای وارد بر غلتک به بررسی اثر ضریب اصطکاک‌های گوناگون بر تنش‌های نرمال و برشی، نیرو و گشتاور وارد بر غلتک پرداخته می‌شود.

بررسی صفحه‌ای از فولاد که دارای ویژگی‌هایی مطابق با جدول ۲ است، به ازای بارگذاری‌های ۱ تا ۴ انجام شده تا اثر تغییر ضریب اصطکاک در نسبت کاهش‌های

تا دستیابی به حل همگرا در کنار نتیجه‌ی تحلیل انجام شده به وسیله‌ی کوبیاشی در شکل ۱ مقایسه و ارائه شده است. با توجه به شکل ۱، توزیع تنش نرمال بدست آمده از حل کوبیاشی و شبیه ساخته شده در کنار یکدیگر ارائه شده اند تا بتوان نتایج را با یکدیگر مقایسه کرد. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که ترکیب دو عامل همگرایی نیرو و تغییر مکان افزون بر دقت به زمانی کوتاه‌تر تا رسیدن به همگرایی نیاز دارد که در این حالت بیش‌ترین اختلاف حدود ۳/۵ درصد است. علت این اختلاف در برخی از نقاط توزیع تنش نرمال را می‌توان علت نوع شبکه بندی و شبیه سازی سطح برخورد دانست. صرف نظر از اختلاف در برخی از نقاط، در سایر نقاط تطبیق قابل قبولی میان نتایج مشاهده می‌شود.

### اثر شبکه بندی

شبکه بندی انجام شده بر اساس دیاگرام رسم شده پس از چندین مرحله حل، بمنظور دستیابی به شبکه‌ی بهینه و نوع شبکه‌ی مناسب تعیین شده است. بدین منظور، دو حالت شبکه بندی به صورت شبکه بندی غیرشعاعی صفحه و غلتک<sup>۱</sup> و شبکه بندی شعاعی<sup>۲</sup> مورد مقایسه قرار گرفته اند، اختلاف میان دو نوع شبکه در غلتک، تنها در روش کنترل شبکه بندی می‌باشد. انتخاب نوع شبکه بندی مناسب جهت تقسیم بندی غلتک، بمنظور امکان تقسیم بندی هم‌هنگ غلتک و صفحه باعث می‌شود که نوع شبکه بندی شعاعی مناسب‌تر تشخیص داده شود. برنامه‌ی نوشته شده بمنظور انجام تحلیل به گونه ای است که جهت جلوگیری از ناهمگرایی ناشی از وجود گره‌ی برخورد در دو المان خطی هدف، طول مناسب تقسیم بندی روی محیط غلتک و ضلع بالایی صفحه انتخاب می‌شود. این امکان در برنامه لحاظ گردیده است تا در شبیه‌های گوناگون صفحه و غلتک که مورد تحلیل قرار می‌گیرند، بتوان تنها با وارد کردن ویژگی‌های فیزیکی و هندسی آن به تحلیل مساله پرداخت.

نوع شبکه بندی انجام شده در شکل‌های ۲ نمایش داده شده است و اثر آن‌ها بر توزیع تنش و زمان تحلیل

<sup>۱</sup> - Free Mesh

<sup>۲</sup> - Radial Mesh

<sup>۳</sup> - Radial

در ابتدا دارای روند افزایشی است و سپس دارای کاهش شدید می‌باشد. تاثیر دو اثر ذکر شده در پاراگراف قبل و ابتدای این پاراگراف که نشان دهنده‌ی دو تاثیر متفاوت بر روند گشتاور به ازای تغییر ضرایب اصطکاک شده است، باعث شکل خاص نمایش داده شده در شکل ۱۰ می‌باشد. در مقایسه گشتاور در نسبت کاهش‌های گوناگون، با افزایش نسبت کاهش میزان گشتاور افزایش یافته است چرا که هرچند به ازای اعمال نسبت کاهش‌های بزرگ، محل نقطه خنثی به سمت ورودی صفحه جابه جا می‌شود (که باعث کاهش گشتاور می‌گردد)، اما طول سطح تماس افزایش می‌یابد و این مسئله با همراه بودن افزایش تنش‌های برشی در نسبت کاهش‌های بزرگ در مقایسه با نسبت کاهش‌های کوچک، باعث بزرگ‌تر شدن مقداری و فرم خاص آن شده است.

### نتیجه گیری

می‌توان نتایج بدست آمده از مطالعه‌ی انجام شده را به صورت زیر عنوان کرد:

۱. بررسی اثر نسبت کاهش‌ها بر توزیع تنش‌های نرمال نشان دهنده‌ی این موضوع بود که تغییر شکل در نسبت کاهش‌های کوچک کاملاً ناکنواخت می‌شود. این در حالی است که با افزایش نسبت کاهش اعمالی، تغییر شکل یکنواخت‌تر شده و شکل توزیع تنش به سمت تپه اصطکاکی سوق می‌یابد. مطالعه‌ی مقدار تنش‌ها در هر حالت (تغییر شکل کم و یا زیاد) و با هر مقدار نسبت کاهش با شبیه‌سازی انجام شده قابل تحلیل است بنابراین، می‌توان بر اساس استحکام صفحات امکان نورد را در یک مرحله و یا چند مرحله بررسی کرد، در این حالت با توجه با جنس ورق، طراحی نورد می‌تواند در چند مرحله به صورت سری انجام گردد و اثر هر مرحله تغییر شکل به صورت مجزا بررسی شود. از آنجایی که یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در فرایند نورد ایجاد پارگی در صفحه‌ی تحت کشش می‌باشد، می‌توان با توجه به جنس صفحه بر اساس تنش‌های ایجاد شده امکان بروز عیب را شناسایی کرد و با طراحی تعداد مراحل و مقدار تغییر شکل و اصطکاک از ایجاد نقص در ورق جلوگیری نمود.

گوناگون بررسی گردد. بررسی شکل‌های ۵ و ۶ که تغییرات تنش‌های نرمال به ازای ضریب اصطکاک‌های گوناگون را نشان می‌دهند، روند اثرگذاری ضریب اصطکاک در نسبت کاهش‌های گوناگون یکسان است، بدین صورت که افزایش مقدار ضریب اصطکاک باعث افزایش تنش در محل نقطه خنثی شده و مقدار آن را در نزدیکی ناحیه‌ی ورودی صفحه به سمت صفر متمایل می‌کند. این بدان معنی است که افزایش ضریب اصطکاک باعث می‌گردد که توزیع تنش بیش‌تر به شکل تپه اصطکاکی<sup>۱</sup> باشد. با توجه به این که طول سطح تماس ثابت می‌باشد لذا، افزایش تنش‌های نرمال باعث افزایش نیروهای وارد بر غلتک می‌شود. در شکل ۷ تغییرات نیروی وارد بر غلتک به ازای تغییر ضریب اصطکاک در نسبت کاهش‌های گوناگون صفحه‌ی فولادی ارایه شده است. بررسی شکل‌های ۸ و ۹ که تغییرات تنش‌های برشی را به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در نسبت کاهش‌های گوناگون صفحه نشان می‌دهند، اثر یکسان تغییرات ضریب اصطکاک به ازای نسبت کاهش‌های گوناگون می‌باشد. افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش تنش‌های برشی و جابه‌جایی مکان نقطه‌ی خنثی به سمت ناحیه‌ی ورودی صفحه شده است. از آنجا که تنش‌های نرمال با افزایش ضریب اصطکاک افزایش یافته‌اند لذا، مقدار تنش‌های برشی نیز با افزایش این تنش باید افزایش یابد. از سوی دیگر، افزایش تنش‌های برشی باعث افزایش گشتاور وارد بر غلتک می‌شود، به همین جهت انتظار می‌رود که با افزایش ضریب اصطکاک گشتاور نیز افزایش یابد.

از سوی دیگر، با توجه به این که نقطه‌ی خنثی با افزایش ضریب اصطکاک به سمت ناحیه‌ی ورودی صفحه جابه‌جا می‌شود، در نتیجه، طول ناحیه‌ی لغزش عقبی کوچک شده و طول ناحیه‌ی لغزش رو به جلو افزایش می‌یابد. این مساله باعث کاهش گشتاور وارد بر غلتک می‌شود. اثر دو عامل یاد شده باعث نوع خاص گشتاور وارد به غلتک بر حسب ضریب اصطکاک خواهد شد که این روند در شکل ۱۰ به ازای نسبت کاهش‌های گوناگون و ضرایب اصطکاک گوناگون ارایه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات گشتاور در یک نسبت کاهش مشخص

<sup>۱</sup> - Friction Hill

Materials Processing Technology, Vol. 60, pp. 87-94, 1996.

6- M. Abo-Elkhier, "Elasto-plastic finite element modeling of strip cold rolling using Eulerian fixed mesh technique", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 27, pp. 323-334, 1997.

7- P. R. Dawson and E. G. Tompson, "Finite element analysis of steady state elasto-viscoplastic flow by the initial stress rate method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 12, pp. 47-57, 1978.

8- G. J. Li and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic finite element analysis of plane strain rolling", J. Eng. Ind., Vol. 104, p. 55, 1982.

9- Y. J. Hwu and J.G. Lenard, "A finite element study of flat rolling", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, pp. 22-27, 1988.

10- R. S. Prakash, P.M. Dixit and G. K. Lal, "Steady state plane strain cold rolling of a strain hardening material", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 52, pp. 338-358, 1995.

11- U.S. Dixit and P.M. Dixit, "Finite element analysis of flat rolling with inclusion of anisotropy", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 39, pp. 1237-1255, 1997.

12- K. Komori, "Rigid-Plastic finite element method for analysis of three dimensional rolling", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 40, pp. 479-491, 1998.

13- Z. Y. Jiang and A. K. Tieu, "A simulation of three-dimensional metal rolling processes by rigid-plastic finite element", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 112, pp. 144-151, 2001.

14- S. Sezek, B. Aksakal, and Y. Can, "Analysis of cold and hot plate rolling using dual stream functions", Materials & Design, Vol. 29, pp. 584-596, 2008.

15- Z. Y. Jiang, S.W. Xiong and Q.J. Wang, "Modeling of the effect of friction on cold strip rolling", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 201, pp. 85-90, 2008.

16- F. A. R. Al-Salehi, T. C. Firbank and P. R. Lancaster, "An Experimental determination for the roll pressure distributions in cold rolling", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 15, pp. 693-700, 1973.

در این راستا، نتایج بدست آمده بر اساس بیشترین تنش برشی و محل ایجاد آن بسیار مفید می‌باشد.

۲. اثر افزایش ضریب اصطکاک بر تنش‌ها و نیروی وارد بر غلطک نشان دهنده‌ی آنست که با افزایش ضریب اصطکاک شکل توزیع تنش نرمال به شکل تپه اصطکاکی تبدیل می‌شود. افزایش تنش‌ها باعث تاثیر بر نیروهای وارد بر غلتک می‌شود.

۳. نتایج بدست آمده از تاثیر ضرایب اصطکاک و نسبت‌های کاهش گوناگون بر گشتاور وارد بر غلتک نشان دهنده‌ی آنست که گشتاور وارد بر غلتک در این شرایط تا حد ضریب اصطکاک معینی افزایش یافته و پس از آن دچار کاهش می‌شود. تحلیل گشتاور بر اساس مقدار بیشینه‌ی آن در تعیین روش انتقال نیرو به غلتک بسیار موثر است. انتخاب روش‌های گوناگون انتقال نیرو، نوع آن و جنس مواد بکار گرفته شده می‌تواند از نتایج بدست آمده در نمودارهای تحلیل گشتاور و تنش بدست آید.

### سیاسگزارى

نظر به این‌که این مقاله از نتایج طرح پژوهشی بدست آمده است، از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت که هزینه‌ی انجام این طرح را تامین نموده است، تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

- 1- W. F. Hosford, Metal forming Mechanics and Metallurgy, 3rd ed., p. 110, Cambridge University Press, New York 2007.
- 2- K. L. Johnson and R. H. Bental, "The onset of yield in the cold rolling of thin strip", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 17, pp. 253-264, 1969.
- 3- N. A. Fleck and K.L. Johnson, "Cold rolling of foil", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 206, pp. 119-131, 1992.
- 4- H. R. Le and M. P. F. Sutcliffe, "A robust model for rolling of thin strip and foil", International Journal of Mechanical Sciences Vol. 43, pp. 1405-1419, 2001.
- 5- W. Y. D. Yuen, A. Dixon and D. N. Nguyen, "The modeling of the mechanics of deformation in flat rolling", Journal of

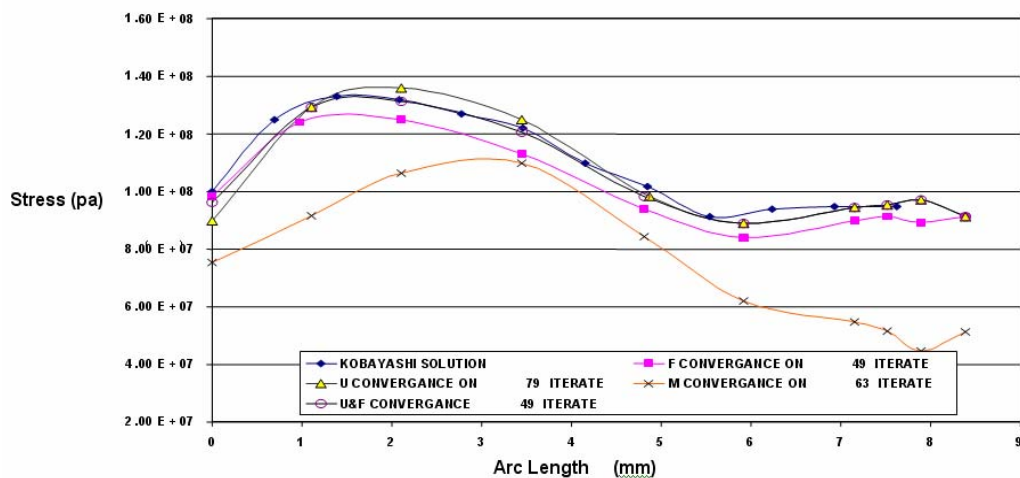
پیوست‌ها

جدول ۱

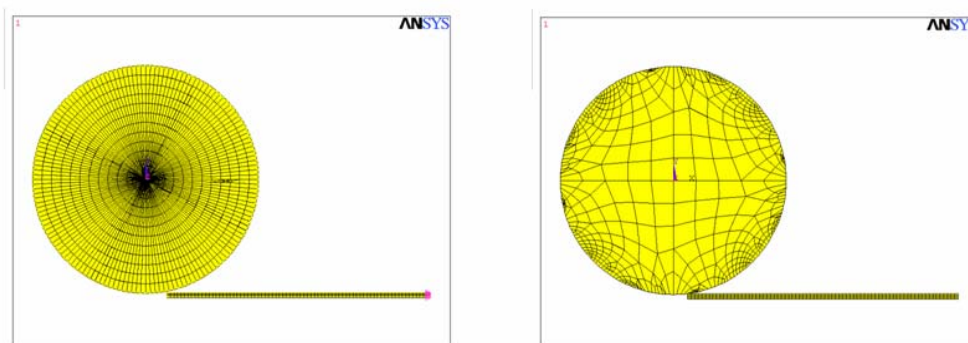
Case no.	$h_0$	$h_1$	Reduc%	H	Roll speed	Roll diam	Material	Friction coeff
۱	۶/۲۷۴	۵/۳۸۵	۱۴/۱۷	۱/۷۹	۰/۱۶ m/sec	۱۵۸/۷۵ mm	Al	۰/۱

جدول ۲

Case no	$h_0$ (mm)	$h_1$ (mm)	Reduc (%)	Roll dia	Roll speed (m/sec)	Material	Coeff-friction
۱		۰/۹۲	۸				۰/۰۶
۲	۱	۰/۸۴	۱۶	۱۳۰/۰۰ mm	۰/۲۵	Steel	۰/۱۵
۳		۰/۷۶	۲۴				۰/۳۰
۴		۰/۶۸	۳۲				



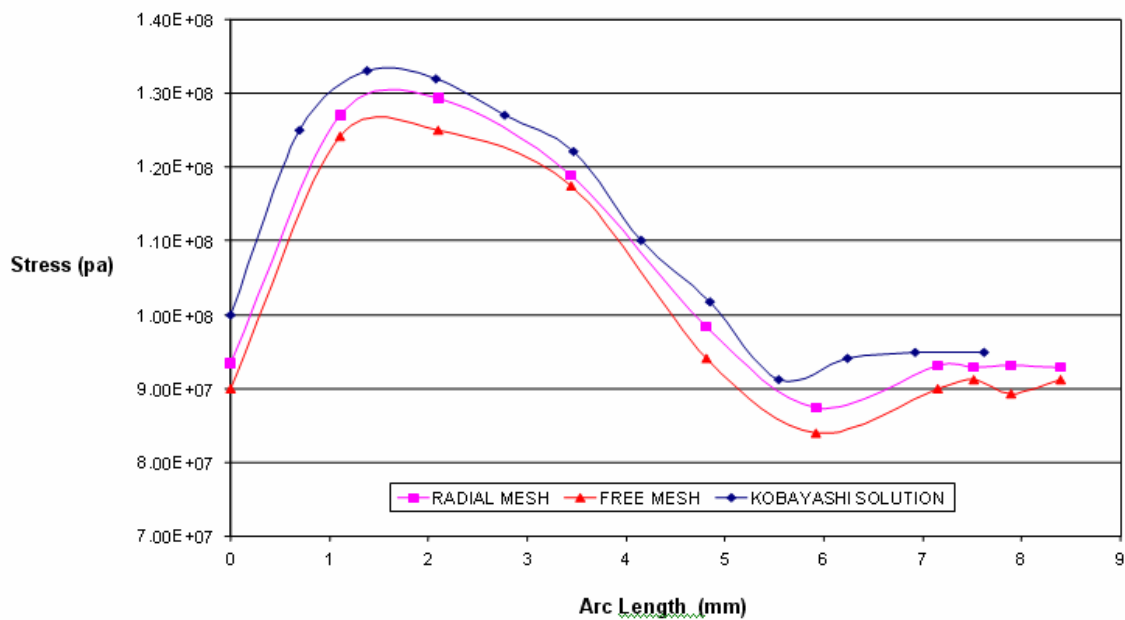
شکل ۱- تغییرات تنش‌های نرمال و تکرارهای لازم تا دستیابی به همگرایی به ازای ملاک‌های گوناگون.



الف) شبکه شعاعی.

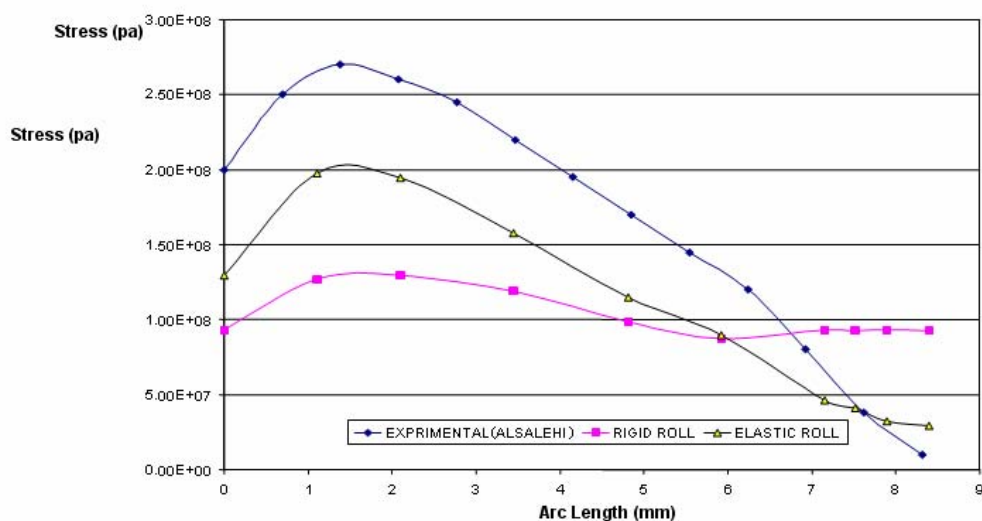
ب) شبکه غیر شعاعی.

شکل ۲

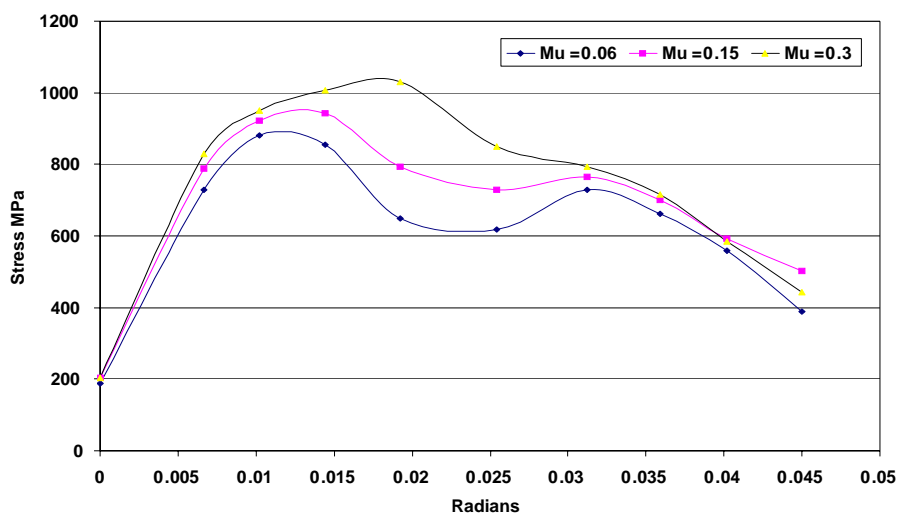


شکل ۳ - تغییرات تنش به ازای شبکه بندی غیر شعاعی و شعاعی.

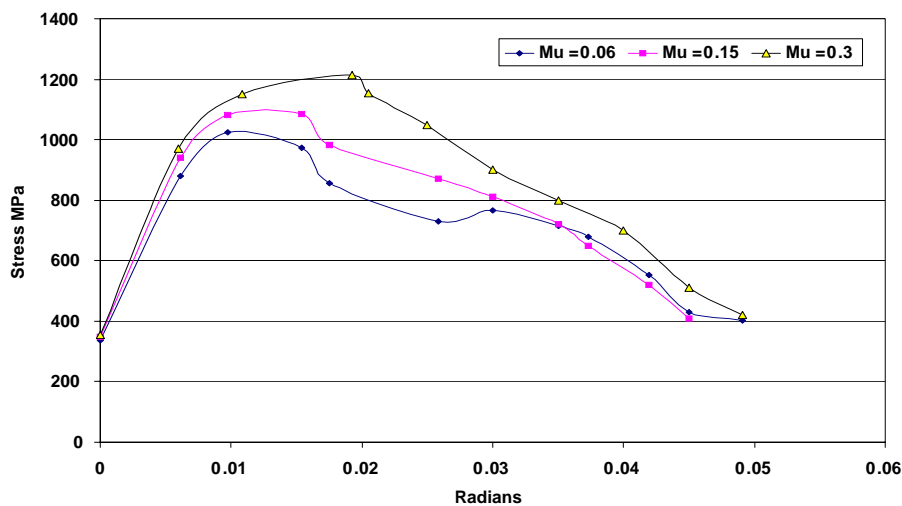




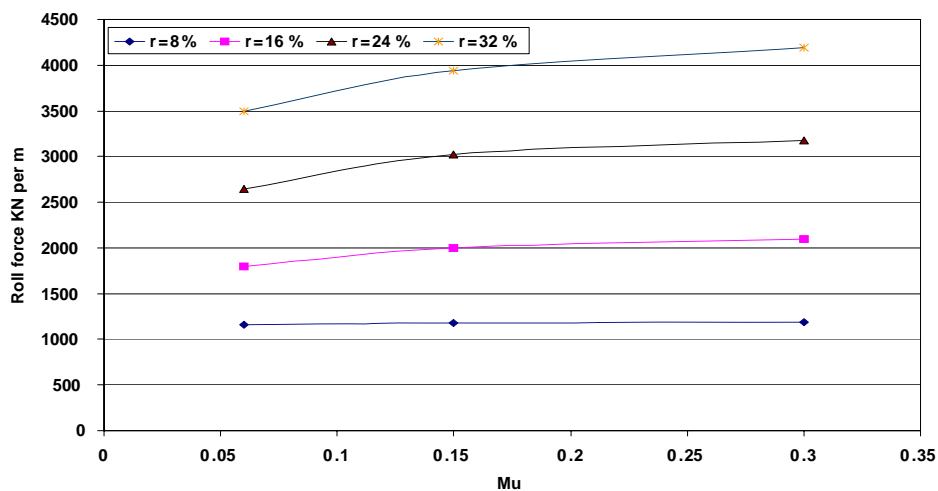
شکل ۴- تغییرات تنش به ازای شبیه‌سازی صلب و الاستیک غلتک‌ها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی.



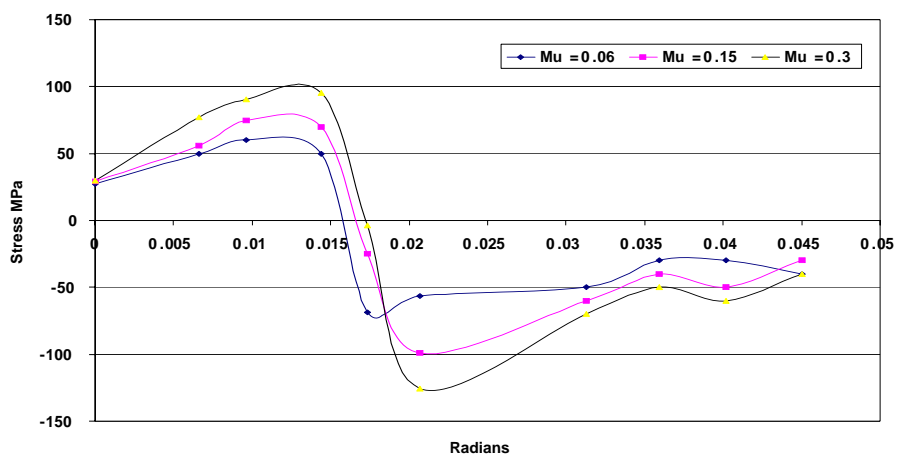
شکل ۵- توزیع تنش نرمال به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در  $r=8\%$ .



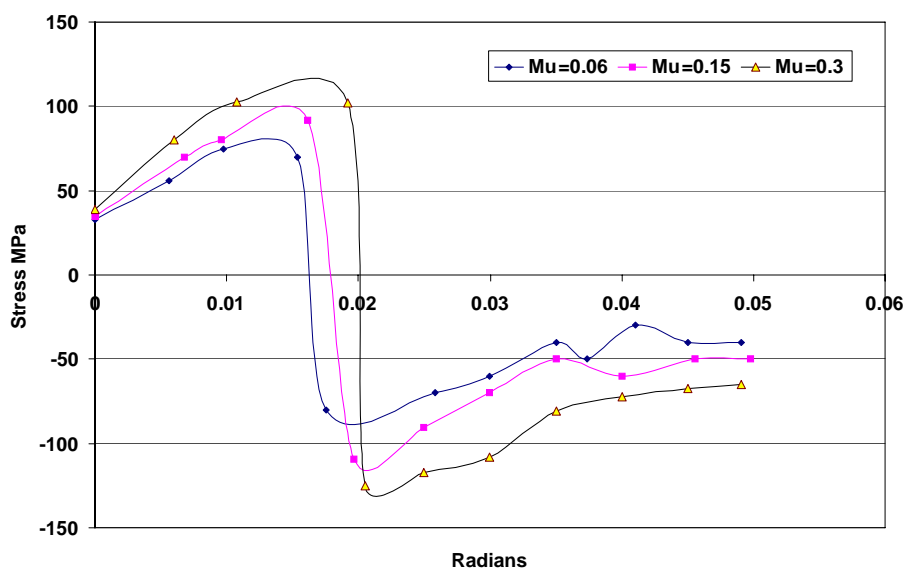
شکل ۶- توزیع تنش نرمال به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در  $r=16\%$ .



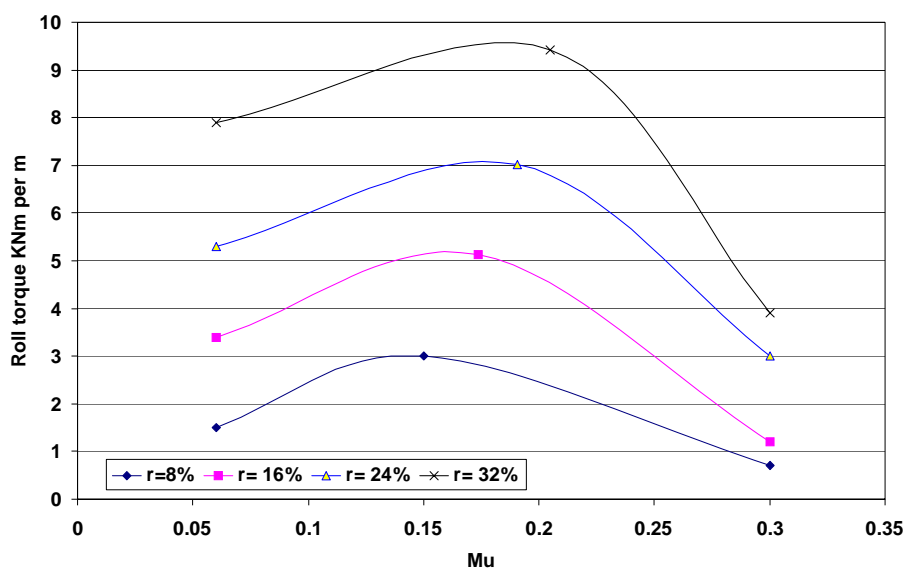
شکل ۷- تغییرات نیروی وارد بر غلتک به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در نسبت کاهش های گوناگون.



شکل ۸- توزیع تنش برشی به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در  $r=8\%$ .



شکل ۹- توزیع تنش برشی به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در  $r=16\%$ .



شکل ۱۰- تغییرات گشتاور وارد بر غلتک‌ها به ازای تغییرات ضریب اصطکاک در نسبت کاهش‌های گوناگون.