

# تعیین منحنی‌های تپه اصطکاک در حین نورد سرد صنعتی ورق‌های آلومینیومی با استفاده از نرم‌افزار MATROLL

حسین عبدالهی علی بیگ<sup>i</sup>؛ کامران دهقانی<sup>ii</sup>

## چکیده

فرایند نورد سرد ورق، یکی از روش‌های رایج شکل‌دادن فلزات است و تولیدات حاصل از این فرایند، بخش مهمی از محصولات فلزی را در بر می‌گیرند. بنابراین کنترل دقیق این فرایند و آگاهی از پارامترهای مختلف موثر بر آن در حین یک فرایند واقعی نورد سرد ورق را لازم می‌نماید. یکی از عوامل بسیار مهم در حین فرایند نورد سرد آگاهی از نحوه توزیع فشار یا منحنی تپه فشار (تپه اصطکاک) می‌باشد که توزیع فشار غلظت‌ها را در منطقه تغییر شکل ورق نشان می‌دهد.

در این پژوهش از یک نرم‌افزار جدید (MATROLL) برای محاسبات و بهینه‌سازی فرایند نورد سرد ورق‌های آلومینیومی استفاده شد که این نرم‌افزار قادر است با دریافت اطلاعات اولیه یک نورد واقعی صنعتی، علاوه بر محاسبه نزدیک به ۳۰ پارامتر نورد، منحنی تپه فشار را نیز رسم نماید. در ادامه چهار پاس نورد سرد واقعی بر روی یک کویل از محصولات نورد گرم آلومینیوم صورت گرفت و با قرار دادن اطلاعات آن در مدل کامپیوتری یاد شده، محاسبات نورد انجام گرفت و منحنی‌های تپه فشار برای پاس‌های مختلف فرایند رسم شد. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل با نتایج ارائه شده از سوی سایر محققین در تمامی موارد، برابری بسیار خوبی دیده شد.

## کلمات کلیدی

نورد سرد، منحنی تپه فشار، نرم‌افزار MATROLL

## *Plotting The Friction Hills During The Real Industrial Cold Rolling of Sheet*

H. Abdollahi Ali Beik; K. Dehghani

### ABSTRACT

Rolling process is one of the most important way of metal forming. The results of this process are almost finished product, therefore controlling the parameters effecting this process is very important in order to have cold rolling products with high quality. Among the related parameters, the pressure distribution or friction hill within the roll gap is known as the most significant one.

In this study using in new software (MATROLL), after rolling calculation, this process is optimize for producing cold rolled sheets. This software is able to plot the friction hills as well as calculating about 30 rolling parameters. To verify the software operation, the real industrial rolling was carried out on tow coils of hot rolled products of Aluminum. The obtained results are in good agreements with the findings other researchers.

### KEYWORDS

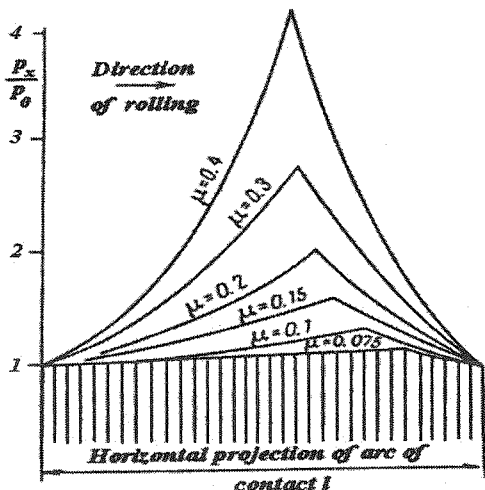
Cold rolling, Friction Hill, MATROLL software

<sup>i</sup> کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، نشانی پست الکترونیک:

Email : abdollahi.hossein@gmail.com

<sup>ii</sup> دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، نشانی پست الکترونیک Email : dehghani@aut.ac.ir

اصطكاكى در طول قوس تماس در اين نقطه عوض مى‌شود [۸]. منحنى‌هاى تپه فشار يا بلندى اصطكاك در واقع توزيع فشار غلتك‌ها به فلز در حال نورد را نشان مى‌دهند. همانگونه كه در شكل ۲ نشان داده شده است شكل اين منحنى‌ها به اين صورت است كه در آنها فشار غلتك روى قوس تماس از نقطه ورودى ورق به تدريج تا نقطه خنثى زياد شده تا به يك ماكزيمم مى‌رسد و سپس تا نقطه خروجى افت مى‌كند.

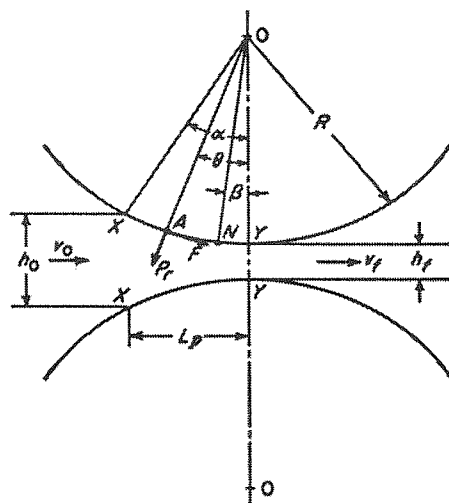


شكل (۲): منحنى‌هاى تپه فشار و اثر ضريب اصطكاك بر آنها [۸]

اين واقعيت كه فشار ماكزيمم نورد بر خلاف آنچه در مباحث تئورى نورد فرض مى‌شود به صورت يك حداكثر تيز ظاهر نمى‌شود نشان دهنده اين است كه نقاط خنثى روى يك خط قرار نمى‌گيرند بلكه در واقع روى يك سطح واقع مى‌شوند. از اهميت‌هاى تپه فشار اين است كه سطح زير منحنى تپه فشار با بار نورد متناسب است بنابراین برای انجام محاسبات بسيار دقيق نورد، بايد ابتدا ضريب اصطكاك تعيين و سپس تپه فشار يا اصطكاك رسم شده و آنگاه از سطح زير منحنى ياد شده انتگرال‌گيرى شود. اين مراحل همان مراحل هستند كه در نرم-افزار MATROLL اجرا مى‌شوند. دليل اصلى مورد توجه قرار گرفتن روش ترسيمى تپه فشار اين است كه در ميان روش‌هاى فراوان، اين روش درصد خطاى بسيار كمترى دارد زيرا برای رسم منحنى، روى قوس تماس نقاط مختلفى در نظر گرفته مى‌شود و نتيجه محاسبه بار نورد از طريق انتگرال‌گيرى و محاسبه جزء به جزء سطح زير منحنى بدست مى‌آيد و بيشتر محققين نيز آن را به عنوان روشى معتبر مى‌شناسند [۷ و ۸]. به طور كلى، تغييرات فشار از نقطه ورود ورق به غلتك‌ها تا نقطه خنثى را با  $P^-$  و تغييرات فشار از نقطه خنثى تا نقطه خروجى را با  $P^+$  نشان داده و مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه مى‌نمايند [۸]، [۷].

يكي از مهمترين پارامترهاى فرايند نورد، ضريب اصطكاك بين غلتك و ورق در حين نورد مى‌باشد. به دليل اهميت اصطكاك، تئورى‌هاى گوناگون در رابطه با توزيع نيروهاى اصطكاك و فشار حاصل از آن روى قوس تماس بيان شده است [۱] - [۴]. بعضى از محققين حتى روش‌هاى پيشرفته‌اى چون روش اجزاء محدود را برای بررسى ضريب اصطكاك در منطقه تغيير شكل برگزيده‌اند [۵]، [۶].

منطقه تغييرشكل در نورد به ناحيه‌اى گفته مى‌شود كه در آن ناحيه غلتك در تماس مستقيم با ورق قرار دارد و کاهش ضخامت در اين منطقه از غلتك صورت مى‌گيرد [۷]. شكل ۱ شماتيكي از يك فرايند نورد و منطقه تغيير شكل را نشان مى‌دهد كه در آن نقطه  $X$  محل ورودى ورق به غلتك‌ها و نقطه  $Y$  محل خروجى ورق از غلتك‌ها مى‌باشد كه منطقه واقع شده بين اين دو نقطه همان منطقه تغيير شكل ورق است.



شكل (۱): شماتيكي از فرايند نورد ورق [۷]

با توجه به اين شكل، به هر نقطه از سطح تماس در حين فرايند نورد دو نيروى عمودى  $P_r$  و نيروى اصطكاك  $F$  وارد مى‌شود. در هر نقطه از محدوده بين صفحه ورودى ورق به غلتك‌هاى نورد تا نقطه خنثى نظير نقطه  $A$ ، جهت نيروى اصطكاك به طرف داخل غلتك‌ها و در جهت كشيده شدن ورق به درون منطقه تغييرشكل است. در محدوده بين نقطه خنثى تا صفحه خروجى ورق نيز جهت نيروى اصطكاك دوباره به سمت درون منطقه تغييرشكل است، البته در جهت جلوگيرى از خروج ورق از بين غلتك‌ها مى‌باشد، بنابراین نقطه خنثى نقطه‌اى است كه نيروى اصطكاك در آن صفر است و جهت نيروهاى

حین نورد واقعی و صنعتی ورق‌های آلومینیومی می‌باشد که برای اولین بار ارائه می‌شوند و در هیچ مرجع دیگری وجود ندارند. چون تاکنون تمام منحنی‌های تپه فشار بطور شماتیک و فرضی و براساس نوردهای آزمایشگاهی و با در نظرگیری مقادیر فرضی برای ضریب اصطکاک و با خطای بسیار زیاد رسم می‌شده‌اند. در پایان، در مورد عملکرد صحیح و قابلیت توانایی بالای نرم‌افزار بحث شده است.

## ۲- روش تحقیق

از آنجا که فرایند نورد یک تغییرشکل دوبعدی و یا به گفته رایج، کرنش صفحه‌ای است لازم است جهت محاسبات با نرم-افزار ابتدا منحنی تنش تسلیم فشاری در حالت دوبعدی بر حسب درصد کاهش سطح برای هر آلیاژ به دست آید. پس در گام نخست آزمایش فشار در حالت کرنش صفحه‌ای برای رسم منحنی تنش تسلیم فشاری دو بعدی - کاهش سطح بر روی نمونه‌هایی از آلیاژهای مختلف آلومینیوم صورت گرفت. در این آزمایش، مقادیر تنش مربوط به درصدهای کاهش سطح مقطع مختلف بدست آمده و در جدولی مرتب شده و از روی این اطلاعات، منحنی‌های  $S-r$  برای این آلیاژها رسم شدند. گفتنی است که برای این آزمایشات از نمونه‌های آنیل شده استفاده شد. طراحی نرم‌افزار MATROLL به گونه‌ای است که قادر خواهد بود از اطلاعات این نمودارها استفاده کرده و با توجه به درصد کاهش سطح مقطع در هر لحظه در منطقه تغییر شکل، تنش تسلیم هر نقطه از طول قوس تماس را محاسبه و در فرمول‌های ۱ و ۲ قرار داده تا فشار مربوط به هر نقطه در طول قوس تماس بدست آید.

در تهیه این نرم‌افزار، روش مناسب برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، روش Avitzur در نظر گرفته شد. چون در این روش، نزدیک به تمامی پارامترهای موثر بر ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده است. معادله ۴ برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک توسط Avitzur سفارش شده است [۱۱]:

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_a}{R}} \left[ \ln \left( \frac{h_a}{h_b} \right) + \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_a}{R}} \sqrt{\frac{h_b}{h_a} - 1} \right) + \frac{t_b - t_a}{2} \right]}{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma} \left[ \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_a}{R}} \sqrt{\frac{h_b}{h_a} - 1} \right) - 1 \right] \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_b}{h_a} - 1} + \left[ \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_a}{R}} \sqrt{\frac{h_b}{h_a} - 1} \right) - 1 \right] \times \left( \frac{t_a - t_b}{2} \right) \right] \quad (4)$$

که در رابطه ۴  $t_b$  تنش عقب‌کش،  $t_a$  تنش جلوکش،  $R$  شعاع غلتک،  $h_b$  ضخامت ورودی ورق،  $h_a$  ضخامت خروجی ورق و  $\sigma$  تنش سیلان است. بنابراین مطابق این تئوری، از مقادیر تنش‌های جلوکش و عقب‌کش، شعاع غلتک کاری و همچنین ضخامت‌های

$$P^+ = \frac{S \cdot h}{h_f} e^{\mu H} \left( 1 - \frac{t_a}{S_f} \right) \quad (1)$$

$$P^- = \frac{S \cdot h}{h_0} e^{\mu(H_b - H)} \left( 1 - \frac{t_b}{S_0} \right) \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲،  $t_a$  و  $t_b$  به ترتیب تنش‌های جلوکش و عقب‌کش در حین نورد،  $S_0$  و  $S_f$  به ترتیب تنش‌های تسلیم ورق در هنگام ورود و خروج از منطقه تغییرشکل،  $H$  و  $H_b$  ثابت قابل محاسبه و  $h_0$  و  $h_f$  ضخامت ورودی و خروجی ورق به منطقه تغییر شکل می‌باشند. همچنین  $S$ ،  $h$  و  $\mu$  به ترتیب تنش تسلیم و ضخامت لحظه‌ای ورق در هر نقطه دلخواه از قوس تماس و ضریب اصطکاک می‌باشند. مقدار تنش تسلیم دوبعدی لحظه‌ای، بر حسب درصد کاهش سطح مقطع تا آن نقطه، از روی منحنی تنش تسلیم فشاری دو بعدی - کاهش سطح (منحنی  $S-r$ ) بدست می‌آید. مقدار  $h$  از رابطه ۳ قابل محاسبه است که در آن  $R$  شعاع غلتک نورد و  $\varphi$  زاویه لحظه‌ای مربوط به  $h$  لحظه‌ای در قوس تماس می‌باشد:

$$h = h_f + R \varphi^2 \quad (3)$$

به این ترتیب با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی از  $\varphi$  می‌توان مقادیر فشار لحظه‌ای را در هر نقطه از قوس تماس محاسبه نمود و سپس منحنی تپه فشار را برای نورد رسم نمود. در این روش هرچه تعداد نقاط بیشتری انتخاب شود دقت تپه فشار رسم شده بیشتر خواهد بود.

در تحقیق حاضر، از نرم‌افزار جدیدی به نام MATROLL که توسط نویسندگان مقاله توسعه داده شده و قابلیت رسم منحنی‌های تپه فشار و محاسبه تمام پارامترهای مهم در حین یک فرایند نورد واقعی یا صنعتی را دارد، استفاده شده است [۹]، [۱۰]. نرم‌افزار MATROLL بر اساس تئوری‌های موجود نورد و روابط ریاضی حاکم بر آن طراحی و برنامه‌نویسی شده است. از نقاط قوت و بارز این نرم‌افزار این است که در محاسبات نورد، از مقادیر فرضی استفاده نمی‌کند، به این مفهوم که نرم‌افزار پارامترهایی نظیر درصد لغزش به جلو و ضریب اصطکاک را بر اساس تئوری‌های معتبر نورد محاسبه نموده و سپس با کمک این پارامترها، سایر محاسبات نورد را انجام داده و اقدام به رسم منحنی‌های تپه فشار برای حالت‌ها و شرایط مختلف نورد می‌نماید. برنامه‌نویسی نرم‌افزار گفته شده در محیط برنامه‌نویسی ویژوال دلفی ۶ انجام گرفته است.

بنابراین، هدف از تحقیق حاضر، رسم یکی از مهمترین پارامترهای نورد، یعنی منحنی‌های تپه فشار یا تپه اصطکاک در

ورودی و خروجی ورق به طور مستقیم برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده می‌شود [۱۱]. همچنین از دیگر پارامترهای مهم در محاسبات نورد و از جمله ضریب اصطکاک مقدار لغزش به جلو می‌باشد. درصد لغزش به جلو واقعی را می‌توان از طریق علامت‌گذاری روی غلتک و سپس بررسی اثر آن روی ورق نورد شده بدست آورد [۸]. در تحقیق حاضر درصد لغزش به جلو با استفاده از تئوری‌های موجود برای نورد محاسبه می‌شود. در این تئوری‌ها جهت محاسبه لغزش به جلو، بیشتر اثر پارامترهایی مانند سرعت خروجی ورق نورد شده و سرعت خطی غلتک‌ها را در نظر می‌گیرد [۷].

نرم افزار مورد بحث شامل یک فرم عمومی جهت شروع برنامه است که در این فرم، در آغاز نوع آلیاژ مورد نظر و همچنین نوع دستگاه نورد انتخاب می‌شود. دو فرم دیگر نیز برای هر پاس نورد جهت ورود اطلاعات اولیه در نظر گرفته شده است. اطلاعات این دو فرم شامل گروه آلیاژی، تعداد پاس‌های نورد، ضخامت اولیه و نهایی ورق، عرض ورودی و خروجی ورق، قطر غلتک کاری، درجه حرارت اولیه ورق (درجه حرارت محیط)، سرعت خطی غلتک، ولتاژ و شدت جریان موتورهای جلوکش و عقب‌کش و همچنین ولتاژ و شدت جریان موتور اصلی نورد می‌باشد [۱۲]. پس از تکمیل و تأیید اطلاعات خواسته شده در این فرم‌ها، نتایج نورد شامل ۲۸ پارامتر مهم و مؤثر بر فرایند و همچنین منحنی‌های تپه فشار رسم شده در پنج فرم متوالی نشان داده می‌شود. فرم هفتم از برنامه *MATROLL* برای هر پاس نورد، مربوط به رسم منحنی‌های تپه فشار توسط مدل است که برای دو حالت مختلف در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از هفتمین فرم از برنامه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۳، منحنی رسم شده در قسمت پایین مربوط به وقتی است که تنش‌های جلوکش و عقب‌کش به ورق در حال نورد وارد می‌شوند. همچنین برای بررسی اثر تنش‌های جلوکش و عقب‌کش منحنی تپه فشار بدون در نظر گرفتن نقش این تنش‌ها نیز توسط مدل رسم می‌شود منحنی رسم شده بالایی در این شکل مربوط به این حالت است. در دو طرف راست و چپ فرم ارائه شده در شکل ۳، مقادیر عددی استفاده شده برای رسم منحنی‌ها که توسط نرم‌افزار محاسبه شده‌اند آمده است. این مقادیر عددی شامل زاویه تماس بر حسب رادیان از صفر در نقطه خروجی تا مقدار ماکزیم آن یعنی زاویه گیرش در نقطه ورودی ورق و همچنین فشار لازم برای نورد در هر زاویه از طول قوس تماس می‌باشند. همچنین در قسمت چپ منحنی رسم شده در فرم، سه دکمه در نظر گرفته شده است که این دکمه‌ها به ترتیب جهت افزایش بزرگنمایی

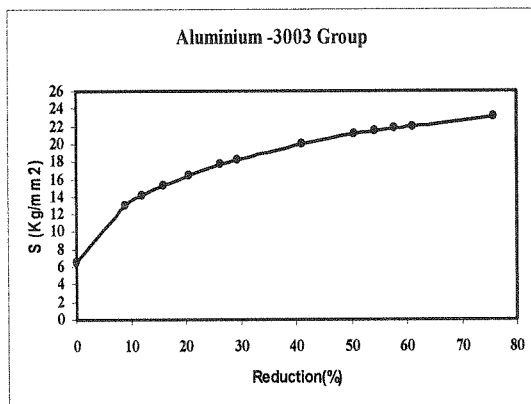
کاهش بزرگنمایی و همچنین ارسال نمودار مورد نظر به چاپگر می‌باشند.

در ادامه تحقیق حاضر، جهت رسم منحنی‌های تپه فشار یا بلندی اصطکاک برای نورد صنعتی آلومینیوم، چهار پاس نورد سرد واقعی روی یک کوئل از محصولات نورد گرم از آلیاژهای ۳۰۰۳ آلومینیوم با یک دستگاه نورد چهار غلتکی رفت و برگشتی صورت گرفت. برای هر پاس، شرایط نورد متفاوت در نظر گرفته شد و قبل از انجام هر پاس فرایند نورد و همچنین در حین آزمایش، اطلاعات اولیه مورد نیاز مشخص گردید. این اطلاعات برای چهار پاس نورد صورت گرفته بر روی کوئل مزبور، در جدول ۱ نشان داده شده است.

در ادامه با قرار دادن این داده‌های اولیه در نرم افزار *MATROLL*، منحنی‌های تپه فشار برای هر چهار پاس نورد صورت گرفته شده رسم گردیدند.

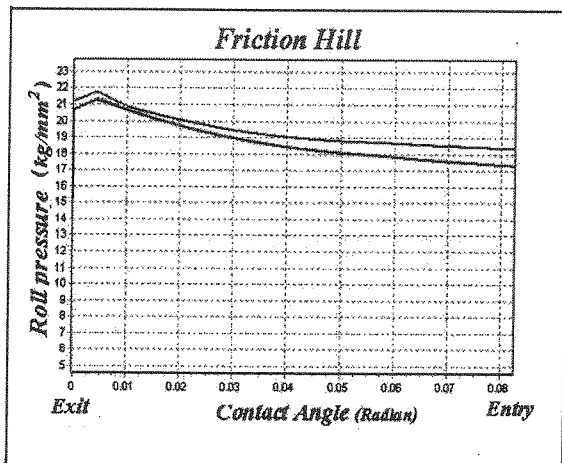
### ۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش فشار در حالت کرنش صفحه‌ای بر روی نمونه آلومینیومی آنیل شده، بر اساس نتایج بدست آمده، منحنی *S-r* برای آلیاژ ۳۰۰۳ آلومینیوم رسم شد که این منحنی در شکل ۴ نشان داده شده است.

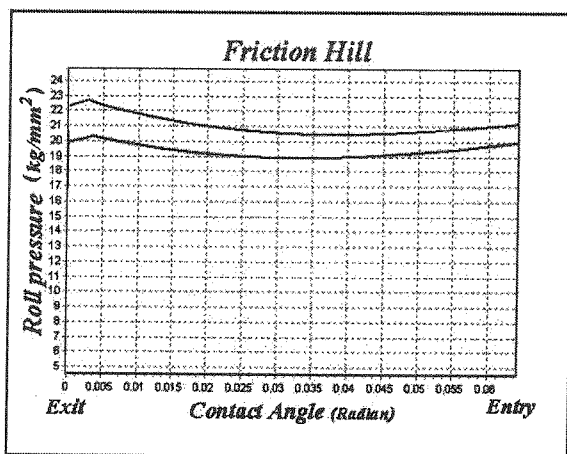


شکل (۴): منحنی تنش تسلیم بر حسب درصد کاهش سطح برای آلیاژ ۳۰۰۳ آلومینیوم

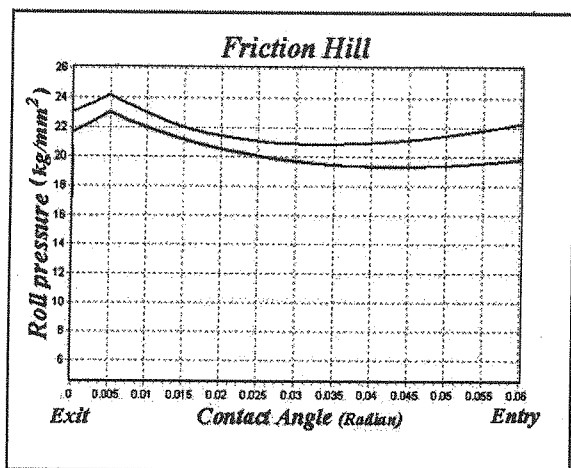
در شکل ۵ نیز همین منحنی که از نتایج تحقیقات [۱۳] Larke به دست آمده ارائه شده است. با توجه به اینکه محقق این منحنی را برای آلومینیوم پیشنهاد داده است دیده می‌شود که منحنی بدست آمده در این پژوهش با تحقیقات Larke برابری خوبی دارد.



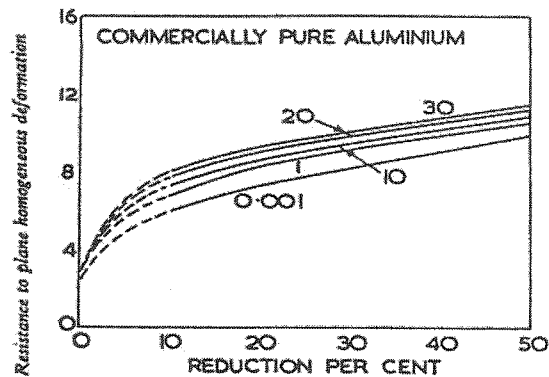
شکل (۷): منحنی تپه فشار رسم شده برای پاس دوم نورد (a) منحنی بالا بدون اعمال کشش (b) منحنی پایین با اعمال کشش



شکل (۸): منحنی تپه فشار رسم شده برای پاس سوم نورد (a) منحنی بالا بدون اعمال کشش (b) منحنی پایین با اعمال کشش



شکل (۹): منحنی تپه فشار رسم شده برای پاس چهارم نورد (a) منحنی بالا بدون اعمال کشش (b) منحنی پایین با اعمال کشش



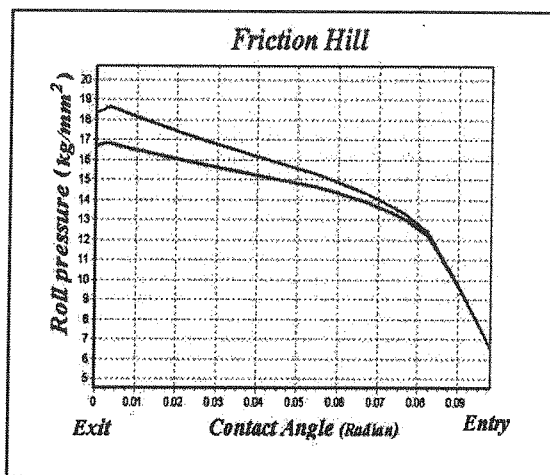
شکل (۵): منحنی تنش تسلیم بر حسب درصد کاهش سطح پیشنهاد شده [۱۳] Larke

در جدول ۲ مقادیر محاسبه شده فشار ماکزیم نورد توسط نرم افزار MATROLL که مربوط به نقطه خنثی می باشد نشان داده شده است.

جدول (۲): مقادیر محاسبه شده فشار در نقطه خنثی

پاس نورد	۱	۲	۳	۴
فشار ماکزیم نورد $Kg/mm^2$	۱۶/۸	۲۱/۳	۲۰/۳	۲۲/۰

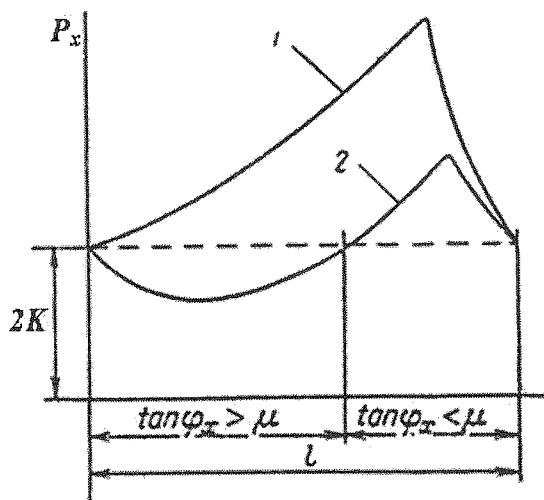
همچنین منحنی های تپه فشار رسم شده توسط مدل در شکل های ۶ تا ۹ برای چهار پاس مختلف نورد صورت گرفته شده نشان داده شده اند.



شکل (۶): منحنی تپه فشار رسم شده برای پاس اول نورد (a) منحنی بالا بدون اعمال کشش (b) منحنی پایین با اعمال کشش

ورودی و قبل از نقطه خنثی دارای یک افت می‌باشند که قابل بحث خواهد بود و از این بابت نیز می‌توان نتایج مدل را با نتایج تحقیقات سایرین مقایسه نمود.

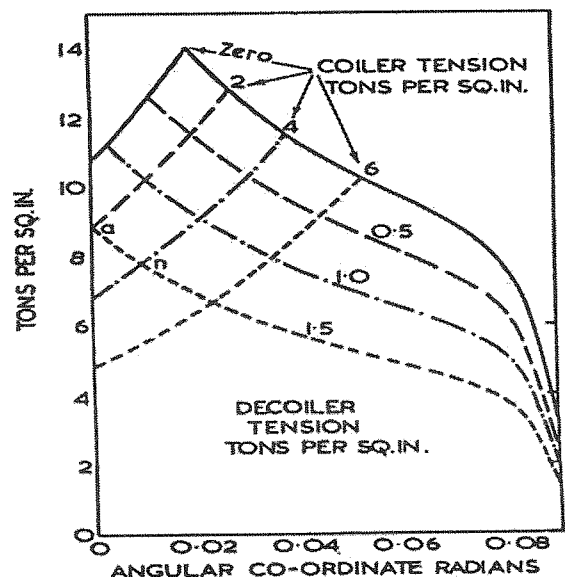
Tselikove [۱۴] در تحقیقات خود اشاره می‌کند که در منحنی‌های بلندی اصطکاک، یک افت در زاویه‌های نزدیک زاویه اصطکاک یا بزرگتر از آن دیده می‌شود. به عبارت دیگر برای حالتی اتفاق می‌افتد که زاویه تماس بزرگتر از زاویه اصطکاک باشد و در این صورت، فشار در همان قسمت از سطح تماس نسبت به حالتی که زاویه تماس روی کل قوس کوچکتر از زاویه اصطکاک باشد، مقداری افت دارد. نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققین در این رابطه در شکل ۱۱ نشان داده شده است که دیده می‌شود در این مورد نیز برابری خوبی بین نتایج ارائه شده توسط نرم‌افزار MATROLL با نتایج سایرین وجود دارد. Tselikove بیان می‌کند که در چنین شرایطی تنش طولی متغیر  $\sigma_x$  که در منطقه تغییر شکل به ورق وارد می‌شود، نه تنها به نیروهای اصطکاکی در سطح تماس بلکه به تغییرات مولفه افقی فشار  $P_x$  وارد بر سطح تماس نیز وابسته خواهد بود. شایان گفتن است که این شکل جالب منحنی همیشه در زاویه‌های گیرش بزرگتر از زاویه اصطکاک ظاهر خواهد شد. به عبارت دیگر، همزمان با کاهش فشار، نیروهای اصطکاکی نیز در این قسمت از سطح تماس دارای کاهش می‌شوند. اما پس از گذشتن از این منطقه دوباره فشار و نیروی اصطکاک زیاد می‌شود.



شکل (۱۱): توزیع تئوری فشار برای دو حالت مختلف روی قوس تماس [۱۳]، [۱۴].

در تحقیق دیگری که این بار توسط Tselikove و همکارانش [۱۵] صورت گرفته است نیز استدلال مشابهی برای این شکل منحنی تپه فشار مطرح شده است. بنابراین مقایسه و برابری

با توجه به شکل منحنی‌های تپه فشار رسم شده برای پاس‌های مختلف نورد دیده می‌شود شکل ۶ که مربوط به پاس اول نورد می‌باشد با سایر منحنی‌ها تفاوت دارد. این نتیجه با تحقیقات سایر پژوهشگران برابری دارد، طبق نظر Larke [۱۳] علت افت شدید منحنی‌های تپه فشار رسم شده برای پاس اول نورد، سرعت بالای تغییر شکل و افزایش کارسختی بعد از آنیل می‌باشد که Rowe [۷] نیز در تحقیقات خود به آن اشاره می‌کند. در شکل ۱۰ منحنی تپه فشار فرضی برای پاس اول نورد آلومینیوم ارائه شده توسط Larke آمده است، همانگونه که مشاهده می‌شود برابری بسیار خوبی بین نتایج حاصل از نرم‌افزار MATROLL و نتایج سایر محققین مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰): منحنی تپه فشار رسم شده برای آلومینیوم پس از عملیات آنیل [۱۳]

بنابراین چون در پاس اول از ورق‌های آنیل شده استفاده می‌شود بنابراین سرعت افزایش کارسختی نسبت به پاس‌های بعدی بیشتر است. در نتیجه، منحنی در قسمت ورودی ورق افت زیادی خواهد داشت که از این بابت نتایج نرم‌افزار ارائه شده با نتایج تحقیقات دیگران مطابقت دارد. با افزایش کارسختی و زیاد شدن تعداد پاس‌های نورد، به تدریج از این شیب زیاد منحنی کاسته می‌شود که به عنوان نمونه می‌توان منحنی رسم شده برای پاس دوم نورد را با پاس اول مقایسه نمود.

نکته جالب توجه دیگر مربوط به منحنی‌های رسم شده توسط نرم‌افزار MATROLL برای پاس‌های سوم و چهارم نورد یعنی شکل‌های ۸ و ۹ می‌باشد. با توجه به این شکل‌ها دیده می‌شود که منحنی‌های تپه فشار رسم شده در نزدیک نقطه

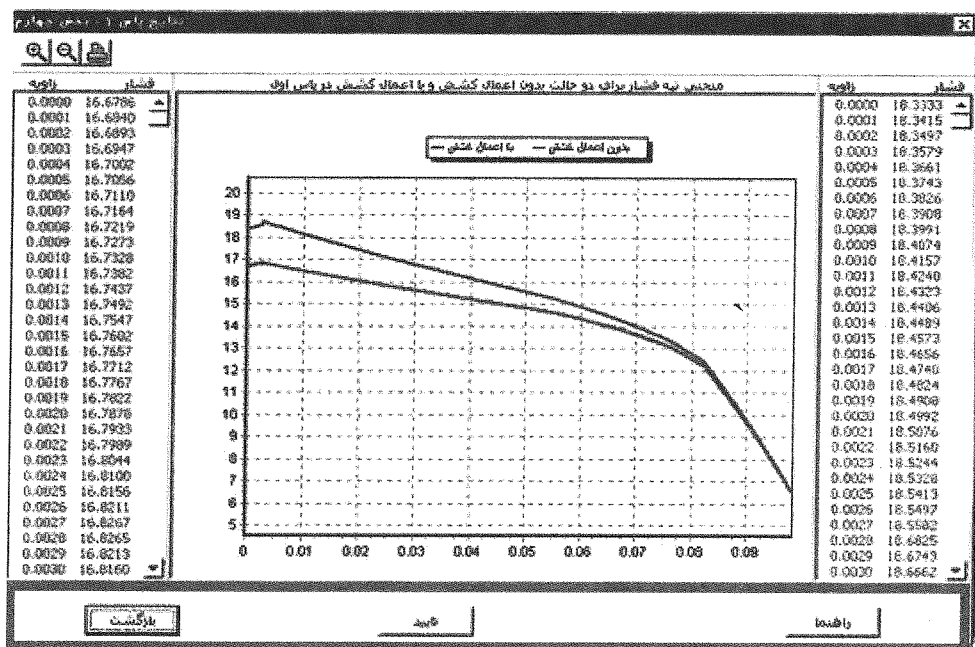
بسیار زیادی می‌باشد. جهت تایید صحت عملکرد نرم‌افزار اطلاعات واقعی مربوط به یک دستگاه نورد صنعتی به عنوان input استفاده شده و نتایج به دست آمده output برابری بسیار خوبی با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین دارد.

۲. با مقایسه منحنی تپه فشار رسم شده برای آلومینیوم آنیل شده در پاس اول نورد با نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران برابری بسیار خوبی دیده می‌شود. این موضوع در مورد منحنی‌های تپه فشار رسم شده برای پاس‌های سوم و چهارم نورد نیز درست می‌باشد.

شکل منحنی‌های بدست آمده توسط نرم‌افزار برای پاس‌های سوم و چهارم با نتایج ارائه شده توسط محققین دیگر می‌تواند بیانگر عملکرد صحیح و مناسب نرم‌افزار ارائه شده در انجام محاسبات نورد و رسم منحنی‌های تپه فشار باشد.

#### ع- نتیجه

۱. منحنی‌های تپه فشار یا اصطکاک رسم شده توسط نرم-افزار MATROLL به علت انجام محاسبات دقیق در تعیین ضریب اصطکاک و انجام محاسبات فشار غلتک‌ها در نقاط زیادی از طول قوس تماس (بیش از ۱۰۰۰ نقطه) دارای دقت



شکل (۳): هفتمین فرم برنامه مربوط به رسم منحنی تپه فشار در دو وضعیت با اعمال تنش‌های جلوکش و عقبکش و بدون اعمال این تنش‌ها

جدول (۱): اطلاعات اولیه نورد واقعی برای پاس‌های مختلف کویل اول

شماره پاس نورد	۱	۲	۳	۴
سرعت غلتک‌ها	m/s	۰/۸۳۳	۱/۵۰۰	۱/۳۳۳
ضخامت ورودی ورق	mm	۶/۶۵	۴/۶۵	۲/۲
ضخامت خروجی ورق	mm	۴/۶۵	۲/۲	۱/۵
شعاع غلتک کاری	mm	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
ولتاژ موتور نورد	V	۶۷۰	۶۶۵	۶۴۰
شدت جریان موتور نورد	A	۱۰۰۰	۸۰۰	۶۳۳
ولتاژ موتور جلوکش	V	۱۶۵	۷۰	۸۰
شدت جریان موتور جلوکش	A	۵۰۰	۴۶۰	۴۴۵
ولتاژ موتور عقبکش	V	۰	۹۵	۹۵
شدت جریان موتور عقبکش	A	۰	۴۹۸	۴۹۰
عرض غلتک کاری	mm	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
عرض ورق	mm	۱۱۰۰	۱۰۸۰	۱۰۵۰

- Dehghani, K.; Abdollahi, H.; Abbasi, Sh.; "Analyzing the cold rolling of aluminum using a new software (MATROLL)", Journal of Materials Science Forum, Vols. 519-521, p.p. 1533-1538, 2006.
- Abdollahi Ali Beik, H.; Dehghani, K.; "Irregularity in Friction Hills during the Cold Rolling of Materials", International Journal of Material Forming, Springer Paris, Vol. 1, 2008.
- Avitzur, B.; Metal Forming: Processes and Analysis, 1<sup>st</sup> Edition, McGraw Hill Book Company, 1979.
- عبداللهی علی بیگ، حسین؛ دهقانی، کامران؛ "تعیین ضریب اصطکاک در حین نورد صنعتی آلومینیوم با یک مدل کامپیوتری"، مجموعه مقالات هفتمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ص ۵۳ تا ۶۰، مهرماه ۱۳۸۲.
- Larke, E. C.; The Rolling of Strip, Sheet and Plate, Fletcher and Sons Ltd., Norwich, 1967.
- Tselikove, A.; Stress and Strain in Metal Rolling, MIR Publishers, Moscow, Russia, 1967.
- Tselikove, A.; Niktin, G. S.; Rokotian, S. E.; The Theory of Lengthwise Rolling, MIR Publishers, Moscow, Russia, 1981.
- Tieu, A. K.; Liu, Y. J.; "Friction Variation in the Cold-Rolling Process", Tribology International, Vol. 37, p.p. 177-183, 2004.
- Pawelski, H.; "Friction Inhomogeneities in Cold Rolling", Journal of Materials Processing Technology, Vols. 125-126, p.p. 392-397, 2002.
- Gao, H.; Ramalingam, S. C.; Barber, G. C.; Chen, G.; "Analysis of Asymmetrical Cold Rolling with Varying Coefficients of Friction", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 124, p.p. 178-182, 2002.
- Liu, Y. J.; Tieu, A. K.; Wang, D. D.; Yuen, W. Y. D.; "Friction Measurement in Cold Rolling", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, p.p. 142-145, 2001.
- Jiang, Z. Y.; Tieu, A. K.; "A 3-D Finite Element Method Analysis of Cold Rolling of Thin Strip with Friction Variation", Tribology International, Vol. 37, p.p. 185-191, 2004.
- Jiang, Z. Y.; Tieu, A. K.; Zhang, X. M.; Lu, C.; Sun, W. H.; "Finite Element Simulation of Cold Rolling of Thin Strip", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, p.p. 542-547, 2003.
- Rowe, G. R.; Principles of Industrial Metalworking Processes, 1<sup>st</sup> Edition, Poland, 1969.
- Wusatowski, z.; Fundamentals of Rolling Principles of Industrial Metalworking Processes, 1<sup>st</sup> Edition, Edward Arnold Ltd., UK, 1977.