

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/340738925>

Fundamental of flat rolling اصول و محاسبات نورد تخت

Book · January 2017

CITATIONS

0

READS

3,145

4 authors, including:



[Ali Akbar Mottahedi](#)

Iranian Research Organization for Science and Technology

42 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Aluminum production industries [View project](#)



oxygen bellowinng in electric arc furnace [View project](#)

بسمه تعالی



IROST

سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

اصول و محاسبات

نورد تخت

نویسندگان: علی اکبر متحدی^۱

مهدی متحدی^۲

آبان ۱۳۹۶ تهران، ایران

۱- عضو هیات علمی سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران

۲- دانشجوی دکترای مکانیک دانشگاه اشتهاد گارت

واژه‌گان کلیدی: غلتک؛ غلتک؛ نورد؛ نورد تخت؛ نورد سرد؛ نورد گرم؛ نیروی جداکننده غلتک؛

نیروی نورد؛ پارامترهای موثر در نورد؛ تنش در غلتک؛ المان محدود نورد؛ تکنولوژی نورد،

شکل‌دادن فلزات

مقدمه نویسنده

فرایند نورد فرایندی است پیوسته و با ظرفیت تولید بسیار بالا. متوسط ظرفیت سالانه در هر کارخانه نورد تخت به بیش از میلیون تن برای صنایع فولاد، حدود یک صد هزار تن برای صنایع مس و در صنعت آلومینیوم به بیش از دهها هزار تن در سال می‌رسد. در صنعتی با این مشخصات بالاترین هزینه‌ها در کارخانه هزینه توقف خط تولید و ضایعات است. برای مثال در نورد گرم صنعت فولاد که بعضا شمشهای آن حدود ۵۰ تن وزن دارند هر اتفاقی که به توقف خط نورد بیانجامد و باعث ضایعات شدن شمش گردد، اولاً و بلافاصله حدود دهها تن ضایعات را بر شرکت تحمیل خواهد نمود. ثانیاً کارخانه با توقف خط تولیدی مواجه می‌شود که هر ساعت توقف آن حدود صدها تن از تولید و آمار تولید، و در نتیجه فروش کارخانه می‌کاهد. ثالثاً معمولاً در هنگام بروز حادثه خسارتهایی وارد می‌شود که به علت حجیم و دقیق بودن قطعات بسیار گران بوده و تعویض و جبران آنها مشمول هزینه‌های بسیاری است. لذا دانش فنی و تسلط به تکنولوژی و فرایند نورد از اهمیت بالایی برخوردار است.

اما از آن رو که دانش شکل‌دادن فلزات و بویژه نورد در کشور ایران نسبت به سایر علوم مهندسی مثل مکانیک و یا متالورژی جدید بوده و عمر آن حتی کمتر از صنایع مربوطه به آن است، کتب نورد به زبان فارسی بسیار نادر است. از دلایل دیگر این کاستی آن است که دانش شکل‌دادن فلزات و نورد، ترکیبی از دانش مهندسی متالورژی، مکانیک به همراه ریاضیات پیشرفته‌تری است. و در واقع ترکیبی از دو مهندسی مذکور است. نگارنده که از اولین فارغ التحصیلان رشته شکل‌دادن فلزات کشور بوده، از سال ۱۳۶۴ در صنعت نورد یا تحقیقات مرتبط با این فناوری بوده و دوره‌های متعدد تئوری و عملی را در کشورهای مختلف بویژه صنایع آلمان گذرانده، همواره آرزو داشته است که بتواند علم و تجربه حاصل را برای دانشجویان، اساتید و بویژه مهندسان صنعت نورد مدون و به یادگار بگذارد. امید است قسمتی از دین خود را به فناوری ادا نموده باشد.

علی اکبر متحدی آبان ۱۳۹۶

فهرست مطالب

مقدمه: مروری بر صنعت نورد	۹
نورد	۱۰
ریخته‌گری اسلب یا تختال	۱۳
پیش‌گرم و همگن‌سازی	۱۳
نورد گرم	۱۶
نورد سرد	۱۷
آنیل	۱۹
نورد سطحی	۲۰
نورد زرزورق	۲۱
تجهیزات جانبی در صنعت نورد	۲۱
منابع	۲۲
فصل اول: مبانی نورد ورق و تئوریهای آن	۲۳
فهرست علامات	۲۴
مقدمه	۲۵
۱-۲- محاسبه نیروی نورد	۲۷
۱-۲-۱- تغییر شکل المان	۲۷
۱-۳- تعیین فشار وارده از طریق تنش موضعی	۲۹
۱-۳-۱- معادله دیفرانسیل حاکم و حل عمومی آن	۳۰
۱-۳-۲- نورد بدون اعمال نیروی خارجی	۳۴
۱-۳-۳- نورد با کشش از جلو یا عقب	۳۶
۱-۴- فرضیات و ساده‌سازی روش تخمین تنش	۳۷
۱-۴-۱- بحث ساده‌سازی‌ها	۳۷
۱-۴-۲- کاربردی بودن معادلات تخمین تنش	۴۰
۱-۵- تعیین بارهای وارد بر غلتک	۴۱

- ۴۱-۵-۱- تعیین محل نقطه خنثی..... ۴۱
- ۴۲-۵-۲- تعیین نیروی جدا کننده غلتک..... ۴۲
- ۴۳-۵-۳- گشتاور لازم و نیروی وارد بر غلتک..... ۴۳
- ۴۴-۵-۴- توان اتلافی در یاتاقان‌ها..... ۴۴
- ۴۵-۶-۱- اثر تغییر شکل الاستیک بر نورد سرد..... ۴۵
- ۴۵-۶-۱- حد اقل ضخامت ورق در هر پاس نورد..... ۴۵
- ۴۷-۶-۲- خم شدن غلتک Camber..... ۴۷
- ۴۹-۶-۳- تاثیرات مخرب Camber کم و زیاد بر روی ورق..... ۴۹
- ۵۲-۶-۴- خمش غلتک کاری و استفاده از غلتک‌های پشتیبان..... ۵۲
- ۵۳-۶-۵- تغییر شکل الاستیک ورق، نورد تمپرینگ..... ۵۳
- ۵۴-۷-۱- روش‌های دیگر تعیین نیروی وارد بر غلتک..... ۵۴
- ۵۴-۷-۱- روش Cook & Parker..... ۵۴
- ۵۵-۷-۲- روش نموداری Bland & Ford..... ۵۵
- ۵۶-۷-۳- معادله اکولند Ekelund..... ۵۶
- ۵۶-۷-۴- روش دیوس (C.E Davies)..... ۵۶
- ۵۷-۸-۱- دستگاه‌های نورد مخصوص..... ۵۷
- ۵۹-۹-۱- روغنکاری عملیات نورد سرد..... ۵۹
- ۶۰-۹-۱- نورد سرد فولاد..... ۶۰
- ۶۱-۹-۲- روغنکاری در نورد آلومینیوم..... ۶۱
- ۶۲-۹-۳- روغنکاری در نورد دیگر آلیاژها..... ۶۲
- ۶۲-۱۰-۱- پیشرفت‌های اخیر در نورد..... ۶۲
- ۶۲-۱۰-۱- تحلیل تئوری..... ۶۲
- ۶۳-۱۰-۲- فرایندهای جدید تولید کامپوزیت..... ۶۳
- ۶۴- مراجع..... ۶۴
- فصل دوم: اثر کاهش ضخامت، سرعت غلتک و ویسکوزیته روانکار بر اصطکاک
- ۶۷- در نورد سرد..... ۶۷

فهرست علامات فصل.....	۶۸
۱-۲- مقدمه.....	۶۹
۲-۲- بررسی آزمایشگاهی اصطکاک در نورد.....	۷۰
۳-۲- اثرات عوامل مختلف در روانکاری نورد.....	۷۲
۲-۳-۱- اثر کاهش ضخامت.....	۷۲
۲-۳-۲- اثر سرعت نورد.....	۷۵
۲-۳-۳- اثر ویسکوزیته‌های مختلف روغن.....	۷۶
۲-۴- مروری بر اثر عوامل مختلف اصطکاکی بر نیروی نورد.....	۷۸
مراجع.....	۸۰
فصل سوم: آنالیز المان محدود فشار نورد بر عرض ورق در عملیات نورد سرد..	۸۱
۳-۱- مقدمه (معرفی مدل).....	۸۲
۳-۱-۱- مدل المان محدود.....	۸۳
۳-۱-۲- شبکه بندی المان محدود.....	۸۵
۳-۱-۳- شرایط نورد.....	۸۶
۳-۲- نیروی خمشی.....	۸۷
۳-۲-۱- خصوصیات فشار نورد در عرض ورق.....	۸۷
۳-۲-۲- تاثیر عرض ورق بر توزیع فشار نورد کل.....	۸۸
۳-۲-۳- تاثیر نیروی خمشی بر روی توزیع فشار نورد.....	۸۹
۳-۳- توزیع فشار نورد.....	۹۰
مراجع.....	۹۱
فصل چهارم: تحلیل مدل سه بعدی المان محدود برای نورد سرد ورق‌های نازک	۹۳
فهرست علامات فصل.....	۹۴
۱-۴- مقدمه.....	۹۶
۲-۴- تحلیل تغییر فرم.....	۹۷
۳-۴- شرایط مدل سازی.....	۱۰۰
۴-۳-۱- شبکه بندی المان محدود.....	۱۰۰

۱۰۱	۴-۳-۲- شرایط مرزی سرعت
۱۰۲	۴-۳-۳- مدل سیلان ماده
۱۰۲	۴-۴- بررسی مدل سازی
۱۰۲	۴-۴-۱- تاثیر k_1, k_2
۱۰۴	۴-۴-۲- اثر پارامترهای نورد بر روی نتایج مدل سازی
۱۰۹	۴-۵- نتایج مدل گیری سیلان
۱۱۰	مراجع
۱۱۳	فصل پنجم: تحلیل ماکزیمم تنش ایجاد شده در غلتک در عملیات نورد سرد
۱۱۴	۵-۱- مقدمه
۱۱۵	۵-۲- خلاصه فرمول های لازم
۱۱۷	۵-۳- مثالهایی از محاسبه نیروی نورد
۱۲۲	۵-۴- تحلیل تنش غلتک بر اثر بار نورد
۱۲۳	۵-۴-۱- تاثیر Γ' بر روی ماکزیمم تنش
۱۲۵	۵-۴-۲- تاثیر شعاع گردن بر ماکزیمم تنش
۱۲۵	۵-۴-۳- تاثیر فاصله تکیه گاه تا قسمت اصلی غلتک بر توزیع تنش
۱۲۶	۵-۴-۴- بررسی نحوه تاثیر توزیع بار بر ماکزیمم تنش در غلتک
۱۲۶	۵-۴-۵- تحلیل تاثیر عددی پارامترهای مختلف و استخراج فرمول کلی
۱۳۱	۵-۴-۶- بررسی صحت فرمول بدست آمده
۱۳۳	مراجع
۱۳۵	فصل ششم: غلتک و سنگ زنی آن
۱۳۶	مقدمه
۱۳۶	غلتک
۱۴۰	انواع غلتک
۱۴۰	تقسیم بندی غلتک ها با توجه به فرایند تولید
۱۴۱	تقسیم بندی غلتک ها با توجه به جنس آنها
۱۴۱	تقسیم بندی غلتک ها با توجه به کاربرد آنها

۱۴۱.....	تقسیم بندی غلتک‌ها با توجه به شرایط کاری آنها.....
۱۴۲.....	سایر غلتک‌ها.....
۱۴۳.....	کر یا اسپول.....
۱۴۴.....	سختی سطح غلتک‌ها.....
۱۴۴.....	پرداخت سطح غلتک‌ها.....
۱۴۵.....	غلتک‌های عاج‌دار و امباس.....
۱۵۰.....	دستگاه سنگ غلتک.....
۱۵۳.....	منابع.....
۱۵۵.....	پیوستها
۱۵۵.....	استفاده از دستور quad در محیط MATLAB برای حل عددی انتگرال معین یگانه.....
۱۵۷.....	چگونگی ایجاد مدل انسیس.....

مقدمه

مروری بر صنعت نورد



نورد

صنعت نورد از مهمترین و موثرترین صنایع شکل‌دهی فلزات و فرایندهای ساخت و تولید است که توجه و بهینه‌سازی آن در صنعت به منظور توسعه ظرفیت تولید و سطح کیفی محصولات از اهمیت بالایی اقتصادی برخوردار است. هر ساله تحقیقات وسیعی در شرکت‌ها و سازمان‌ها و مراکز پژوهشی مختلف برای بهبود عملیات نورد و فناوریهای مربوط به آن در حال انجام است. [۱ و ۲] در فرایند نورد معمولاً از عرض و یا ضخامت کاسته و به طول اضافه می‌شود. نورد از فرایندهای قدیمی است. شاید نانوایان اولین کسانی هستند که از این روش برای باز کردن خمیر استفاده می‌کردند. شکلات‌سازان و آبنبات‌سازان نیز در تولید انبوه با نورد کار کرده‌اند. شکل ۱، تصویر نمونه‌ای از دستگاه نوردی که در سال ۱۳۴۰ در کارگاه آبنبات‌سازی حاج یعقوب در بسطام کار می‌کرده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمونه‌ای از اولین دستگاههای نورد

در سالهای اخیر دستگاههای نورد بسیار مدرن، کاملاً کامپیوتری، با توان و ظرفیت تولید بالا طراحی شده‌اند. ظرفیت بعضی از استندهای نورد تا نزدیک ده میلیون تن در سال می‌رسد و سرعت حرکت آن مثل یک اتوموبیل سواری مدرن است. یعنی سرعت خطی بیش از ۱۵۰ کیلو متر در ساعت و با قدرت چند هزار کیلو وات. از این رو کیفیت در نورد برای تجهیزات و تولیدات بسیار مهم است. هر ساعت توقف در چنین صنعتی، گاهی صدها هزار دلار خسارت دارد. اساساً

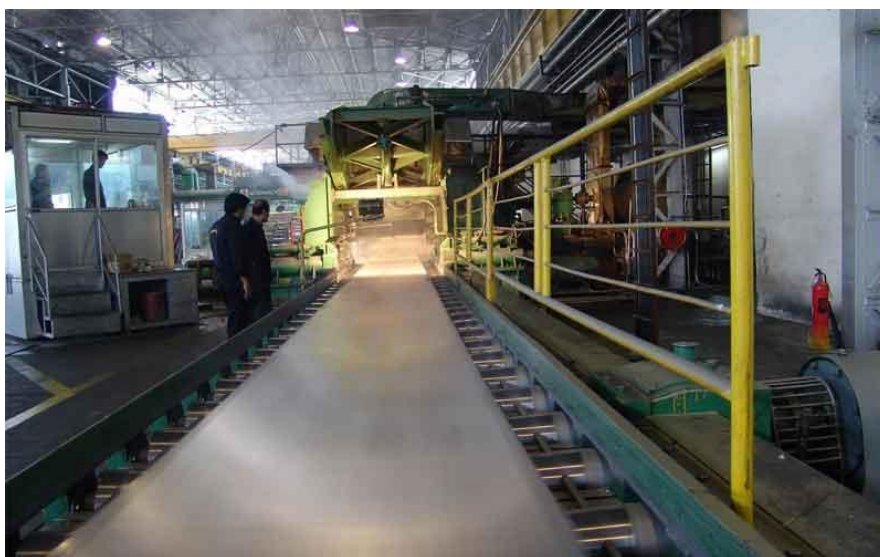
کارخانه‌های نورد مدرن به حجم سرمایه‌گذاریهای بسیار بالا بین یک صد میلیون تا چند میلیارد دلار نیاز دارد. لذا بهره‌وری در این نوع صنایع بسیار مهم است. سطح فناوری در صنایع پیشرفته گره بسیار بالا است. و اتوماسیون در آن بسیار مهم است. کشورهایی که بهره‌وری در آن پایین باشد و یا نتوانند از نیروی متخصص استفاده کنند در صنایع نورد نمی‌توانند پیشقدم باشند. شکل‌های ۲ و ۳ نورد گرم و شکل ۴ نورد سرد آلومینیوم را نشان می‌دهند. استندهای نوردهای سری (tondom mill) یا نوردهای پشت سر هم در شکل ۵ دیده می‌شود. در شکل ۶، عکسی از یک استند نورد را در حال ساخت نشان می‌دهد. در فرایند نورد با عبور فلز از بین دو غلتک از ضخامت آن کاسته می‌گردد. این کاهش ضخامت برای نورد تخت مثل ورق در شکل ۷ و برای نورد مقاطع مثل تیر آهن در شکل ۸ بصورت شماتیک آمده است.



شکل ۲: یک استند نورد گرم ورق آلومینیوم با عرض ۴۳۰۰ میلیمتر در حال نصب، این استند که بوسیله گروه گالبیاتی طراحی و ساخته شده است بیش از ۲۵۰ تن وزن دارد [۳]

از نظر متالورژیکی دانه‌های ماده فلزی در زیر غلتک بر اثر نورد تغییر فرم داده و در جهت نورد کشیده می‌شوند. در صورتی که نورد سرد باشد؛ در این فرایند فلز کارسخت شده و استحکام و

سختی آن افزایش می‌یابد. ولی در نورد گرم این دانه‌های کشیده شده مجدداً تبلور یافته و در نتیجه دانه‌های فلز ریزتر خواهند شد. این فرایند بصورت شماتیک در شکل ۹ نشان داده شده است. در نورد سرد بعد از آنکه فلز آنیل شد تبلور مجدد اتفاق می‌افتد، اما در نورد گرم در حین نورد تبلور مجدد خواهیم داشت.



شکل ۳: نورد گرم گروه کارخانه‌های تولیدی نورد آلومینیوم اراک



شکل ۴: کارخانه نورد با دو استند نورد سرد آلومینیوم [۴]

ریخته‌گری اسلب یا تختال: تختال یا اسلب (Slab) مواد اولیه نورد گرم ورق است. در گذشته ریخته‌گری تختال از طریق تک‌باره ریزی در قالب فلزی صورت می‌گرفت. اما ده‌ها سال است که اسلب از روش ریخته‌گری پیوسته تختالهای با ضخامت و عرض و طول متنوع ریخته‌گری می‌گردد. در این روش کیفیت تختالها بسیار بهتر است. ریخته‌گری پیوسته در حال توسعه است. سالها است که اسلبهای با ضخامت بسیار کم در حد چند سانتیمتر ریخته‌گری می‌شود. در عمل به این روش گفته می‌شود ریخته‌گری پیوسته ورق (continuous strip casting). ورقهای ریخته‌گری پیوسته نیازی به نورد گرم ندارند و در صورت نیاز به اکسید زدایی بعد از تراش زیر و رو (Scalping)، مستقیماً به نورد سرد می‌روند.



شکل ۵: استندهای نوردهای سری (tandem mill)

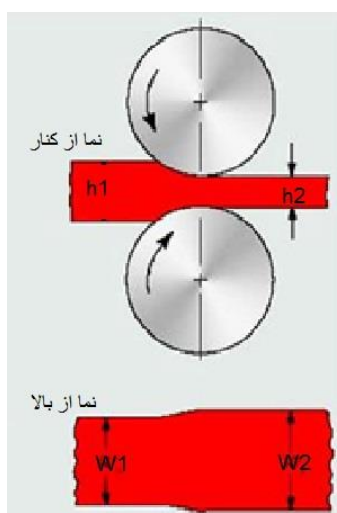
پیش گرم و همگن‌سازی

قبل از نورد گرم اسلب باید پیش‌گرم شده و به محدوده دمای کارگرم آلیاژ برسد. تا بتوان آنرا نوردگرم کرد. این کار در کوره‌های گرم کننده که به آن کوره پیش‌گرم گفته می‌شود انجام می‌گردد. کوره‌های پیش‌گرم با توجه به نوع بارگیری و تخلیه و سوخت انواع متفاوتی دارند. گاهی ممکن است داخل آن نیار به اتمسفر کنترل شده داشته باشد. آلیاژهایی که عناصر آلیاژی آن زیاده‌تر هستند و ساختاری دندریتی (dendritic microstructure) دارند گاهی نیاز دارند

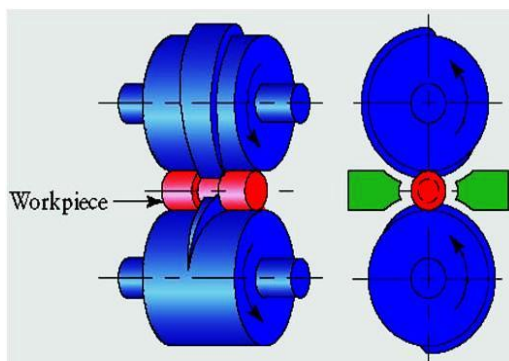
که قبل از نورد همگن شوند (Homogenizing). دمای همگن سازی معمولاً بالاتر از دمای پیشگرم برای کار گرم است. و باید کوره توان و امکان کار در این دما را داشته باشد.



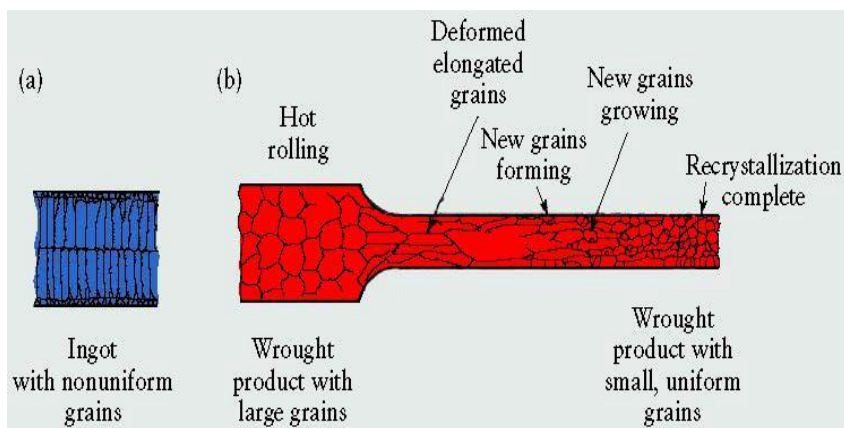
شکل ۶: عکسی از یک استند نورد چهار غلتکه در حال ساخت



شکل ۷: نورد ورق و تغییرات ضخامت در آن [۴]



شکل ۸: نمایش فرایند نورد مقاطع (مانند نورد برای تولید تیرآهن و نبشی) [۴]



شکل ۹: نمایش تغییر فرم دانه‌های بافت ورق در هنگام نورد گرم و سپس تبلور مجدد آن [۴]



شکل ۱۰: شمش (اسلب) ریزی تکباره در کارخانه نورد و تولید قطعات فولادی، تهران

نورد گرم

کاهش شدید ضخامت با استفاده از نورد گرم یکی از روش‌های معمول در تولید صفحات و ورق‌های ضخیم، میله‌های مستطیلی، دایره‌ای یا با سطح مقطع‌های پیچیده‌تر می‌باشد. این مسئله خصوصیات فلز ریخته‌گری شده را نیز بهبود می‌بخشد. این فرایند با شکستن ساختار ریخته‌گی و ریزکردن دانه‌های فلز و تبلور مجدد دینامیکی همراه است و در نتیجه همگونی بهتر و مقاومت مکانیکی و چقرمگی بیشتر فلز را باعث می‌شود. در طی فرایند نورد بر خلاف فرایندهای آهن‌گری و یا کشش عمیق، فشار و تغییرشکل همزمان به حجم کوچکی محدود می‌شود. در نتیجه امکان کار در تناژهای بالا با تجهیزات با حجم نسبتاً معمولی فراهم می‌آید. در نورد شمش یا ورق معمولاً به صورت پیوسته به داخل استند نورد تغذیه و معمولاً سرعت تولید ثابت می‌باشد. این مسئله ای بسیار مهم در نورد گرم است. زیرا ورق به سرعت با گذشت زمان که سرد می‌شود، سخت نیز می‌گردد. یک عامل محدود کننده در سرعت نورد گرم زمان لازم برای انتقال دوباره ورق به قسمت ورودی نورد می‌باشد. ورق‌های کوچک معمولاً به صورت دستی برگردانده می‌شوند، که در نتیجه، نیازمند توجه ویژه اپراتور می‌باشند.



شکل ۱۱: عکسی از یک کوره پیش‌گرم قبل از نورد گرم اسلب

یک کارخانه نورد گرم برای تولید ورق از ماده خام اولیه که شمش یا تختال نامیده می‌شود آغاز می‌کند. نورد گرم معمولاً از دو غلتک بزرگ که بر روی یکدیگر قرار داده شده‌اند، تشکیل شده

است. در نتیجه از آن به عنوان نورد دو غلتکه (استند دو غلتکه) در مقابل استندهای نورد پیچیده تر چهار تایی (استند چهار غلتکه) که در نورد سرد مورد استفاده قرار می گیرد، یاد می شود. غلتک‌های با پروفیل‌های ویژه برای تولید شکلها و پروفیل‌های مختلف استفاده می‌شوند، مانند دایره‌ای، شش‌وجهی، ناودانی، زاویه‌ای و تیرهای I شکل. این اشکال از اهمیت اقتصادی ویژه‌ای برخوردارند، زیرا تناژ بسیار عظیمی از آنها تولید می‌شود. اما غلتک‌ها معمولاً به صورت تقریباً تجربی طراحی می‌شوند، در حالی که به علت وجود تئوری‌های محدود تنها از تعدادی قوانین عمومی پیروی می‌کنند. در این پروژه‌ها ما بر آن نیستیم که نیروی وارد بر این شرایط پیچیده را تخمین بزنیم، بلکه یک تقریب کلی ممکن است از تئوری حاکم بر نورد ورق برای استفاده در نورد دیگر اشکال تولید بدست آید.



شکل ۱۲: عکسی از یک استند دو غلتکه نورد گرم برای مس و آلیاژهای آن

نورد سرد

برای آنالیزهای تئوری فرایند نورد، آنالیز نورد سرد ورق‌های عریض مناسب‌ترین روش می‌باشد. از این جهت تئوری نورد سرد به طور گسترده‌ای گسترش یافته است. معمولاً مقادیر خیلی زیادی و بزرگی از ورق با اندازه و خصوصیات مختلف نورد سرد می‌شوند. ورق‌های طولانی همگن به صورت کوئل تولید می‌شوند. از اینرو نیرو ثابت باقی می‌ماند و تنها کمی از رفتار در شروع و

انتهای کوئل متفاوت می‌باشد که باید کنترل گردند. نورد بر عکس فرایندهای کشش عمیق و تولید لوله‌ها که کوتاه است، فرایندی ممتد طول و پیوسته است. حتی ممکن است که چندین دستگاه نورد با یکدیگر پشت سر هم کار نمایند، لذا ضروری است که تنش کششی بین ورق‌ها در دستگاههای نورد در محدوده خاصی تحت کنترل باشد. در نورد همزمان با کاهش ضخامت ورق، طول آن افزایش می‌یابد و سرعت ورق خروجی ممکن است به مقادیر خیلی بالاتر، مثلاً ۴۰۰ متر بر دقیقه یا حتی بیشتر برسد. در شکل ۱۳ عکسی از یک دستگاه استند نورد سرد ۴ غلتکه که سرعت تولید آن ۲۵۰ متر بر دقیقه است در مجتمع صنایع مس شهید باهنر کرمان مشاهده می‌شود. در نوردهای مدرن این سرعت گاهی به ۸۰۰ متر در دقیقه هم می‌رسد. در نورد ممکن است که تنش کششی جلویی و تنش کششی عقبی به صورت دستی و یا با کنترل سرعت غلتک اعمال و یا تنظیم شود. اما ده‌ها سال است که از کامپیوتر برای کنترل این فرایندها در نورد استفاده می‌گردد.



شکل ۱۳: عکسی از یک استند ۴ غلتکه نورد سرد ساخت ژاپن

شکل ۱۴ عکسی از یک سیستم کنترل دستگاه نورد را نشان می‌دهد. به علت سرعت و سهم تولید بالای عملیات نورد سرد، طراحی فرایند نورد شامل برنامه صحیح از پاس‌های مختلف (pass schedual)، تعیین خصوصیات مواد، پذیرش و گیرش ورق یا شمش نوردی توسط غلتک، ظرفیت و نیروی نورد در دستگاه نورد، اثرات مهم اقتصادی بر صنعت نورد دارد.



شکل ۱۴: عکسی از سیستم کنترلی نورد سرد

آنیل (annealing)

بعد از نورد سرد و یا طی عملیات نورد سرد ممکن است یک یا چند بار ورق نیاز داشته باشد تا آنیل شود. آنیل در کوره‌های آنیل صورت می‌گیرد. معمولاً برای جلوگیری از اکسید شدن سطح ورق و یا سوختن روغنهایی که ورقها در هنگام نورد به آن آغشته شده اند، ممکن است کوره نیار به اتمسفر خنثی و یا کنترل شده داشته باشد. در صورت عدم استفاده از گاز خنثی در کوره ممکن است سطح ورق لکه‌های قهوه ای یا زرد دیده شود که اینها به علت سوختن روغنهای سطحی ورق هستند. در بعضی فلزات بعد از آنیل نیاز است که سطوح ورق ماشین کاری شوند (scalp).

آنیل یا تابکاری بسته به خواص مورد نیاز از نظر فرایندی به چند دسته تقسیم می‌شود.

آنیل کامل (full annealing): هدف از آنیل کامل بدست آوردن یک فلز با ساختار کاملاً تبلور مجدد یافته و نرم است تا بتواند مجدداً کار سرد زیادی را تحمل کند. محصول خروجی از آنیل

کامل باید ساختار دانه‌بندی ریزتر و یک‌نواختی نسبت به گذشته داشته باشد. و لذا درصد ازدیاد طول نسبی آن بهبود می‌یابد. در بعضی صنایع به آنیل کامل، آنیل میانی هم گفته می‌شود. زیرا برای ادامه نورد بکار می‌رود.

آنیل قسمتی (partial aneal / tempering): آنیل قسمتی در دما و زمان کمتری نسبت به آنیل کامل صورت می‌گیرد و کنترل آن نیز دشوارتر است. این عملیات حرارتی برای آن است که خواص مکانیکی خاصی را بدست آوریم. برای حذف پدیده گوشه‌دار شدن و کنترل سیلان مواد در کشش عمیق بهتر است خواص مکانیکی مورد نظر ورق با استفاده از آنیل قسمتی بدست آید. در شکل ۱۵ کوره‌های آنیل و کویل‌هایی که بعد از آن بسته بندی شده اند دیده می‌شود.



شکل ۱۵: عکسی از کارخانه مس شهید باهنر که در آن کوره‌های آنیل و کویل‌های مسی بسته بندی شده و آماده برای ارسال به مشتریان دیده می‌شود.

نورد سطحی (skin pass): خواص مکانیکی خاص ورق را از دو طریق می‌توان بدست آورد. اول نورد و آنیل قسمتی، دوم آنیل کامل و نورد. گاهی هدف آن است که خواص مکانیکی تثبیت شود و یا کمی بهبود یابد، چرا که ورق آنیل کامل شده آنقدر نرم است که خواص مکانیکی آن با کمترین واکنشی تغییر می‌یابد. در اینگونه موارد از نورد سطحی استفاده می‌شود. در این نوع نورد فقط مقدار کمی کاهش ضخامت اعمال می‌شود. همچنین این نوع نورد برای بهبود کیفیت سطحی و بهبود پرداخت سطح و از بین بردن موج و مارک غلتک نیز بکار می‌رود.

مهمترین کارکرد نورد سطحی برطرف کردن بافت (texture) و بهبود تختی (flatness) ورق است.

نورد زوروق (foil)

نورد زوروق نوعی نورد سرد است که ورق به ضخامتهای خیلی پایین کمتر از ۱۰۰ میکرون نورد می‌گردد. در سالهای اخیر با توسعه فناوری در نورد، زروقهای تا چند میکرون نیز از آلیاژهای مس و آلومینیوم تولید می‌گردند. نورد زوروق فرایندی پیوسته است که معمولاً با استندهای چهار غلتکه صورت می‌پذیرد. زیرا در نورد زوروق تغییر ضخامت کم است و لذا باید قطر غلتک کاری کم باشد تا بتواند ورق را گاز بگیرد.

تجهیزات جانبی در صنعت نورد

در صنعت نورد تجهیزات جانبی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. آنها شامل دو گروه می‌شوند.

الف: ماشین‌آلات و تجهیزات تولیدی تکمیل کننده که به آن خطوط سبک هم گفته می‌شود. مثل ماشینهای برش عرضی (cut to length)، برش طولی (slitting line)، فرم‌دادن سینوسی یا ذوزنقه‌ای، بسته‌بندی، لوله سازی و غیره است.

ب: تجهیزات جانبی مثل تصفیه خانه‌های روغن و آب، تهیه آب صنعتی، برق و الکترونیک، کنترل، ابزار دقیق، جرثقیل‌ها، لیفتراک‌ها، فیلتراسیون و غیره است.



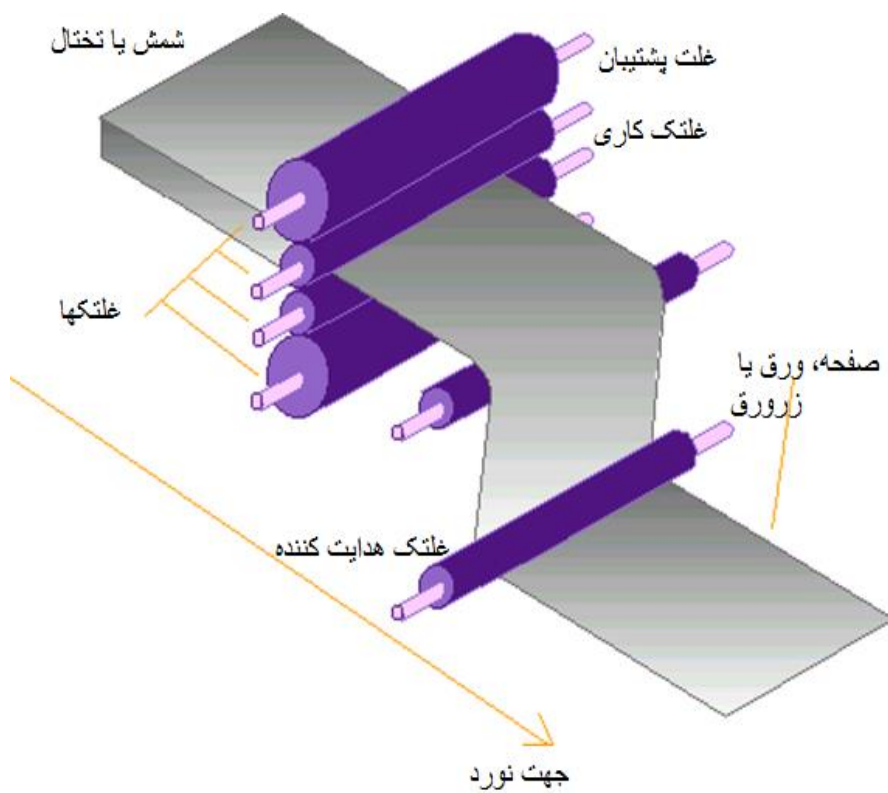
شکل ۱۶: برش عرضی

منابع

- 1- Mottahedi A. A., Simulation of flat rolling and analyzing of rolling pressure profile, Oriental Journal of Science & Technology Volume 1 No. 1, April, 2008,
- 2- Mottahedi A.A., Case Study of Galvanic Corrosion in Screw down of Hot Aluminum Rolling mill, KMCM2007, International Joint conference on Knowledge management for composite material, Düsseldorf, Germany, 3-6 July 2007
- 3- Mottahedi A. A., Investigation of Phase Transformation of Forged Steel Cold Rolls Due to Heat Affecting and Prevent its Failure, Defect and Diffusion Journal, 2009
- ۴- متحدی ع.ا.، بررسی امکان سنجی طراحی و ساخت غلتکهای فولادی آهنگری شده در ایران، تهران، ۱۳۹۲، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، گزارش پروژه منتشر نشده
- ۵- متحدی ع.ا.، متحدی مهدی، آنالیز، بررسی و تحلیل تنش در غلتکهای نورد تخت- تهران، ۱۳۸۹، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، گزارش پروژه منتشر نشده
- 6- www.rollingtech.com
- ۷- بررسی فنی و مدیریتی مجتمع صنایع مس باهنر کرمان (و ارائه راهکارهایی برای بهبود فناوری، بهره‌وری و مالی شرکت)، فروردین ۱۳۹۳
- ۸- فناوریهای نوین در شکل‌دادن فلزات، (تجربیات بازدید و مذاکره از شش صنعت مرتبط در آلمان و سوئیس)، شهریور ۱۳۹۳

فصل اول

مبانی نور و تئوری‌های آن



فهرست علامات فصل

R^*, R' شعاع تغییر شکل یافته و نیافته غلتک

L طول کمان تصویر شده تماس $L = \sqrt{R \cdot \Delta h}$

Δh کاهش در ضخامت ورق، $\Delta h = h_2 - h_1$

C^* یک ثابت الاستیک در معادله

S^* فنریت (بازگشت فنری)

g فاصله (گپ) بین دو غلتک

W عرض ورق

P نیروی نورد (KN)

T گشتاور نورد (Nm)

t_a, t_b تنش از جلو و عقب (تنش جلویی و عقبی)

k_s, k_b ثابت‌های تغییر فرم غلتک‌ها، به علت نیروی خمشی و برشی

α موقعیت زاویه ای عمومی، که از ناحیه خروجی تا ورودی اندازه گیری می‌شود.

α_N موقعیت زاویه ای نقطه خنثی

α_b^* زاویه گازگیری که برابر است با $\tan^{-1} \mu$

p_r فشار شعاعی نورد

p^* مولفه‌های نیروی نورد عمود بر سطح ورق

p^+, p^- نیروی نورد در قسمت ورودی و خروجی نقطه خنثی

λ بازوی اهرم

λ' بازوی اهرم برای غلتک تغییر فرم داده

۱-۱- مقدمه

صنایع نورد به طور گسترده برای انجام کار سرد و گرم بر روی قطعات مختلف در حجم و اندازه‌های متنوع استفاده می‌شود. بعضی ورق‌های استفاده شده در این عملیات ممکن است ورق فولادی با ۲۰ تن وزن یا بیشتر و با ضخامت ۳/۰ میلی‌متر باشد. هر کارخانه نورد ممکن است ورق‌های فولادی با عرض ۱/۸ متر تا سقف ۵۰۰۰ تن در هفته تولید نماید^[1-1]. آلومینیوم می‌تواند در ورق‌های با عرض ۴ متر نورد شود، اما از طرف دیگر، فویل‌های آلومینیومی ممکن است تنها ۰/۰۲۵ میلی‌متر (۲۵ میکرون) ضخامت داشته باشند. [۱ و ۲] در فناوریهای جدید صنعتی زوررق‌های (foil) آلومینیومی تا ضخامت پنج میکرون تولید می‌گردند.

در کشور ایران مدرنترین دستگاه‌های نورد را شرکت آلومینیوم هزار در کرمان و قدیمیترین آنها را مهمات سازی تهران برای نورد مس و برنج دارند. با این همه شرکت فولاد مبارکه از نظر تناژ تولید بالاترین ظرفیت کشور را دارا است سیستم‌های کنترلی و ماشین‌آلات نورد خود را کاملاً مدرن و به روز کرده است. مجتمع صنایع جانبی مس شهید باهنر کرمان نیز بزرگترین و مدرنترین تجهیزات نورد مس و آلیاژهای آنرا در خاورمیانه دارد (شکل ۱).

ظرفیت نوردهای تخت برای فولاد در حدود چند میلیون تن (یک تا پنج) و برای مس در حدود صد هزار تن و برای آلومینیوم در حدود چند ده هزار تن (ده تا هشتاد هزار تن) می‌باشند. در بخش‌های بعدی نشان داده خواهد شد که پذیرش ورق توسط غلتک، به صورت قید ماکزیمم کاهش سطح در هر پاس خواهد بود، که مستقیماً به شعاع غلتک و ضریب اصطکاک وابسته است.

$$(\Delta h)_{\max} = \mu^2 R \quad (1-1)$$

به علت اهمیت ضریب اصطکاک در نورد، فرایند نورد به کیفیت روانساز بستگی زیادی دارد. با این حال اگر اصطکاک خیلی بالا باشد، نیروی بین دو غلتک نیز بسیار زیاد خواهد شد. ولی تئوری در این میدان نیز به کمک می‌آید. اگرچه ماکزیمم کاهش سطح در هر پاس با افزایش قطر غلتک افزایش می‌یابد، اما نیروی نورد P برای یک کاهش سطح یکسان با افزایش اصطکاک شدیداً افزایش می‌یابد.

$$\frac{P}{w} = R \times \int p(R, \alpha). d\alpha \quad (1-2)$$

در نتیجه قطر یا شعاع غلتک غالباً تا حد امکان کوچک در نظر گرفته می شود، تا از بارها و نیروهای سنگین و در نتیجه به کارگیری تجهیزات عظیم اجتناب شود. این مزیت مهمی است که ورق می تواند به ضخامت های کوچکتری با غلتک با قطر کم نورد شود. در واقع برای تولید ورقهای ضخیم غلتک با قطر بالاتر و برای تولید ورق با ضخامت کم، غلتک با قطر کمتر الزامی است.

$$(h)_{\min} = 0.035 \mu RS \quad \text{mm} \quad (1-3)$$

این حد ضخامت می تواند به ویژه در فلزات سخت برای تولید ورق های با ضخامت کم و فویل خیلی مهم باشد. با این وجود غلتک های بلند و نسبتاً کم قطر زیر بار خم شده و باعث ایجاد اختلاف ضخامت بر روی ورق در حال نورد می شوند.

در نتیجه، غلتک های با قطر کم معمولاً با غلتک های با قطر بیشتر پشتیبانی می شوند و یک دستگاه نورد ۴ غلتکه را می سازند. برای تولید فویل ها و ورق های با ضخامت بسیار نازک، ممکن است به غلتک های پشتیبان بیشتری که یکی حامی دیگری است، نیاز شود. در این صورت ممکن است حتی غلتک کاری تنها ۵۰ یا ۲۵ میلیمتر قطر داشته باشد. چنین دستگاه های نوردی را نورد خوشه ای می نامند که توانایی تولید ورق هایی با ضخامت ۰/۲۵ میلیمتر (۲۵۰ میکرون) در فلزهای سختی مانند آلیاژهای زیرکونیوم و تیتانیوم را دارند^[3-1] برای آلیاژهای نرم که تنش سیلان S آنها کم باشد، مثل آلومینیوم، غلتک با قطر بالاتر می تواند مورد استفاده قرار گیرد. فویل های آلومینیومی در نوردهای دو غلتکه حتی تا ضخامت ۰/۰۲۵ میلیمتر (۲۵ میکرون یا حتی ۱۰ میکرون) نورد می شوند. فویل های نازک تر مانند زرورق سیگار یا پوسته شکلات به صورت ورق های دو لایه بر روی یکدیگر نورد می شوند. غلتک ها به وسیله پیچ هایی که به آن اسکرو می گویند به یکدیگر نزدیک می شوند تا فاصله بین آنها کاملاً پر شود. در استندهای مدرن بجای اسکرو از جکهای هیدرولیکی استفاده می شود. نزدیک شدن غلتک ها به هم تا حدی انجام

می‌شود که حتی گاهی غلتک در حضور ورق‌ها تحت فشار نیز قرار می‌گیرند. این در واقع معادل یک مقدار اولیه گپ منفی است. در نتیجه فاصله دو غلتک (gage) به وضعیت نورد حساس است و به وسیله تنش وارد شده از ورق جمع‌کن به ورق که به نیروی کششی جلویی و نیز نیروی کششی عقبی (ورق باز کن)، نیز بستگی دارد. لذا از این طریق نیز کنترل‌های میکرونی لازمه روی آن را انجام می‌دهند.

در تکنولوژی مدرن نورد فاصله بین دو غلتک بوسیله تجهیزات کاملاً کامپیوتری و از طریق فرمان دادن به جکهای هیدرولیکی (بجای اسکروهای مکانیکی) کنترل می‌شود. این مکانیزم را کنترل اتوماتیک فاصله دو غلتک (AGC: Automatic Gage Control) می‌نامند. این تکنولوژی در انحصار چند شرکت منجمله ABB است.

این تنش‌های کششی جلویی و عقبی البته موجب صاف نمودن ورق نیز می‌گردد.

تئوری نورد ورق همچنین روابط بین تمام عوامل موثر مثل، ضخامت و سختی ورق، کاهش سطح و ضخامت، قطر غلتک، فاصله دو غلتک، نیروی کشش جلویی و کشش عقبی، سرعت عملیات و ضریب اصطکاک در نواحی مختلف ورق را بیان می‌دارد. البته اینها لازمه فراهم آوردن یک فرایند نورد با کیفیت می‌باشند، که در آن شرایط نورد و دستگاه به خوبی انتخاب شده باشند. در عین حال پیش بینی عددی نیروی نورد به علت تنظیم جدول تعداد پاس‌های نورد مفید است. از این رو به دست آوردن نیروی وارده به غلتک در حین عملیات و تحلیل این نیرو در تنش ایجاد شده در بخش‌های بحرانی غلتک مانند گردن و کلگی از موضوعات مهمی می‌باشد که در این کتاب بحث شده اند.

۱-۲- محاسبه نیروی غلتک

۱-۲-۱- تغییر شکل المان

یک تخمین ساده از نیروی غلتک در نورد ورق صاف می‌تواند با فرض فرایند به عنوان یک تنش فشاری همسان بین ورق خوب روغن کاری شده به دست آید. طول L فرض می‌شود که در جهت سطح تصویر شده حاصل از تماس کمان غلتک با ورق باشد. از آن جا که عرض ورق W تصور می‌شود، سطح تصویر شده LW خواهد بود. معمولاً تنش سیلان فلز، به علت کار سختی، بالاتر از قطعه قبل از نورد است، اما در این محاسبات تقریبی این اجازه داده می‌شود، حداقل

برای ورق‌های سخت، که یک $\bar{Y}$ میانگین فرض شود. نیروی P لازم برای کمپرس (فشردن یا شکل‌دادن) ورق به صورت مقابل خواهد بود.

$$P = \bar{Y} L w \quad (1-4)$$

همچنان در صنعت معمول است که بار وارده بر غلتک با هر تن بر اینچ عرض تخمین زده شود و در نتیجه یک مقیاس سریع از فلزات مختلف ارائه می‌دهد. در نتیجه معادله به صورت مقابل نوشته می‌شود.

$$\frac{P}{w} = \bar{Y} L \quad (1-5)$$

از ابعاد شکل 1-1، این مسئله مشاهده می‌شود که طول تصویر شده L به شعاع غلتک و مقدار تغییر ضخامت بستگی دارد.

$$L^2 = R^2 - (R - 0.5\Delta h)^2 = R\Delta h - 0.25(\Delta h)^2 \quad (1-6)$$

در عمل شعاع غلتک همیشه خیلی بزرگتر از اختلاف ضخامت خروجی و ورودی است. یک نمونه رایج برای یک نورد کوچک می‌تواند $R=200$ میلیمتر و $h=1.5$ میلیمتر باشد. در نتیجه:

$$\frac{P}{w} = \bar{Y} \cdot \sqrt{R\Delta h} \quad , \quad L^2 \approx R\Delta h$$

حقیقتاً فرایندهای نورد سرد با ورق‌هایی پهن و ضخامت پایین سر و کار دارند که پهن‌شدگی یا افزایش عرض ورق (تعریض) در عملیات نورد قابل صرف نظر می‌باشد و در نتیجه این فرض صحیحی خواهد بود. اگر عملیات را به صورت کرنش صفحه‌ای فرض کنیم، که در آن تنش جاری شدن مناسب $S=2k$ خواهد بود که از حدود ۵۰٪ از Y تجاوز می‌کند ($S=1.55Y$). در نتیجه معادله باید به شکل مقابل تغییر کند.

$$\frac{P}{w} = \bar{S} \sqrt{R\Delta h} \quad (1-7)$$

این محدودیت کمتری برای بار غلتک قائل می شود، زیرا این فرمول تاثیر اصطکاک را نادیده می گیرد. با استفاده از نتایج آزمایش به دست آمده، اروان^۱ پیشنهاد داده که حدود ۲۰٪ بار برای اصطکاک در نظر گرفته شود. در نتیجه:

$$\frac{P^*}{w} = 1.2 \bar{S} \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1-8)$$

البته این فرمول برای هر جدول نوردی، کاملاً دقیق نمی باشد، اما خیلی ساده و کاربردی است. از این رابطه برای محاسبه نیروی وارد بر غلتک با تقریب نسبتاً خوبی استفاده می شود. این فرمول همچنین در بدست آوردن قطر غلتک صاف شده زیر بار (تخت شدگی غلتک) نیز کمک شایانی می کند، که به آن اشاره خواهد شد.

۱-۳- تعیین فشار وارده از طریق تنش موضعی

در دستگاه نورد معمولاً یک غلتک متحرک وجود دارد که ورق را بدون آن که هیچ گونه تنش کششی نیاز باشد، به داخل دستگاه هدایت می کند. نیروی مهم در واقع بار عمودی وارد بر غلتک است. استفاده از نیروهای کشش جلو و عقب و نیز غلتک های صاف کننده (brider roll) معمول هستند. آنها تعدیل کننده تنش بین استندهای دستگاه نورد بوده و نیروی نورد را کاهش داده و صافی ورق را افزایش می دهند، یک معیار خوب نیز برای کنترل گيج ارائه می دهند. از خصوصیات نورد سرد باید این نکته ذکر شود که بالا تر بودن سرعت خطی غلتک در قسمت ورودی در حضور اصطکاک کافی موجب پدید آمدن نیروی پیشران می شود.

با کاهش ضخامت ورق حین عملیات نورد، طول ورق افزوده شده و سرعت حرکت آن نیز افزایش می یابد، تا آنجا که در خروجی سرعت ورق از سرعت غلتک بیشتر خواهد بود و اصطکاک در جهت عکس به ورق نیرو وارد می کند. از این رو یک نقطه خنثی در طول فاصله بین دو غلتک وجود دارد که در آن هیچ لغزشی وجود ندارد و سرعت خطی غلتک و سرعت حرکت ورق با یکدیگر برابر می شوند، و در قبل و بعد از این نقطه جهت اعمال نیروی اصطکاک متفاوت است. این یک نکته مهم از خصوصیات نورد است.

فرضیات استفاده شده در تعیین نیروی وارد بر غلتک در عملیات نورد سرد عبارتند از:

¹ Orowan

- وضعیت کرنش صفحه ای
 - تغییر شکل همگن
 - ضریب اصطکاک ثابت
 - ثابت ماندن سطح تماس به صورت کمان دایره‌ای
 - وجود نقطه خنثی در طول کمان تماس
 - تغییر فرم الاستیک قابل صرف نظر
- اهمیت این‌ها، پس از به دست آوردن نتایج کاملاً مورد توجه قرار می‌گیرد. تحلیل به صورت منطقی کاملاً درست و قابل اطمینان است. محاسبات فشار بر روی غلتک می‌تواند به سادگی از معادلات دیفرانسیل پایه با حل توسط یک برنامه کوتاه کامپیوتری انجام شود. در این اینجا حل عددی معادله دیفرانسیل غلتک توسط روش سیمپسون ترکیبی در محیط متلب^۱ بیان شده است که در پیوست ۱ بدان اشاره می‌گردد.

۱-۳-۱- معادله دیفرانسیل حاکم بر نورد تخت و حل عمومی آن

نوشتن معادله نیروهای وارده بر المان A ، در واحد عرض از ناحیه تغییر شکل داده شده، در قسمت خروجی نقطه خنثی (شکل ۱-۱) نتیجه می‌دهد.

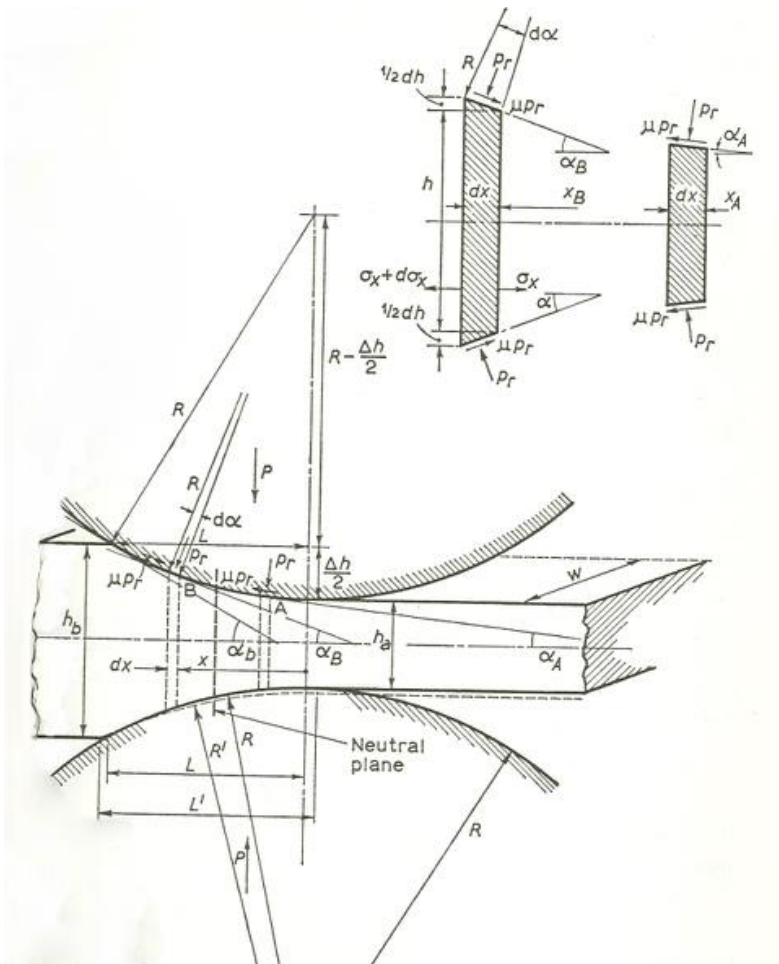
$$\begin{aligned} & \text{به علت تنش طولی} \\ & (\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - h\sigma_x \\ & 2 \times \left(P_r \frac{dx}{\cos(\alpha)} \right) \cdot \sin(\alpha), \end{aligned} \quad \text{به علت فشار شعاعی وارده بر هر دو غلتک}$$

$$2 \times \mu \left(P_r \frac{dx}{\cos(\alpha)} \right) \cdot \cos(\alpha), \quad \text{به علت اصطکاک هر دو غلتک}$$

برای حالت پایای نورد، معادلات بالا باید در تعادل با یکدیگر باشند، بنابراین:

$$h.d\sigma_x + \sigma_x.dh + 2P_r dx \cdot \tan(\alpha) + 2\mu P_r dx = 0 \quad (1-9)$$

¹ MATLAB



شکل ۱-۱- یک بخش از ناحیه تغییر فرم در نورد سرد ورق تخت، درحالیکه تنش‌های وارد بر دو المان ورق در دو طرف نقطه خنثی اعمال می‌شود، نشان داده شده است. خط چین، پروفیل غلتک پس از اعمال بار را نشان می‌دهد.^[۸-۱]

معادلات المان مشابه B، در ناحیه ورودی از نقطه خنثی نیز معادلات مشابهی را نتیجه می‌دهد، اما با نیروی اصطکاک در جهت مقابل

$$h d\sigma_x + \sigma_x dh + 2p_r dx \tan \alpha \pm 2\mu p_r dx = 0 \quad (1-10)$$

در اینجا علامت بالایی به ناحیه خروجی و علامت پایینی به ناحیه ورودی نقطه خنثی بر می‌گردد. با جایگذاری $dh = 2dx \cdot \tan g(\alpha)$ داریم:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + p_r dh \pm \mu p_r dh \cot \alpha = 0$$

$$d(h\sigma_x) = -p_r(1 \pm \mu \cot \alpha)dh \quad (1-11) \quad \text{یا}$$

از طرفی از آنجا که $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_3 = \sigma_y = -p$ مقدار σ_y با حل معادلات در جهت عمود بر جهت نورد به دست می‌آید.

$$\sigma_y dx = -P_r \frac{dx}{\cos(\alpha)} \cdot \cos(\alpha) + \mu P_r \frac{dx}{\cos(\alpha)} \cdot \sin(\alpha)$$

$$\sigma_y = -P_r(1 - \mu \tan(\alpha))$$

معمولاً هر دوی μ و $\tan \alpha$ مقادیر کوچکی هستند، (برای مثال $\mu = 0.07$ و $\tan \alpha = 0.1$) و در نتیجه ضرب آنها در مقایسه با اندازه واحد قابل صرف نظر خواهد بود. بنابراین $\sigma_y \approx -P_r$ ؛ فشار شعاعی P_r به همان میزان فشار عمودی P است و در نتیجه $\sigma_y = -P$ جایگزین می‌شود. با جایگذاری این مقادیر در شرایط سیلان ماده (جاری شدن) برای کرنش صفحه ای داریم:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K = S$$

$$\sigma_x + P = S, \quad d(\sigma_x) = d(S - P) \quad (1-12)$$

اگر روی فلز کار سختی انجام نشود، S ثابت می‌ماند؛ اما معمولاً ضروری است که مقداری برای افزایش S در حالی که ورق نورد می‌شود، در نظر گرفت. در نتیجه معادله (۱-۱۱) تبدیل می‌شود به:

$$d(h\sigma_x) = d(hS - hp) = -P(1 \pm \mu \cot \alpha)dh \quad (1-13)$$

شعاع غلتک‌ها ثابت فرض می‌شود، برای ساده سازی بهتر است که dh در ترم‌های قطبی (R) و α) نوشته شود.

$$dh = 2(R.d\alpha).Sin(\alpha)$$

$$d(hS - hp) = -2RpSin(\alpha).(1 \pm \mu Cot(\alpha))d\alpha \quad \text{پس:}$$

در ترم‌های بی بعد نسبت $\frac{P}{S}$:

$$\frac{d}{d\alpha} \left\{ hS \left(1 - \frac{p}{S} \right) \right\} = -2RpSin(\alpha).(1 \pm \mu Cot(\alpha))$$

$$hS \frac{d}{d\alpha} \left(1 - \frac{p}{S} \right) + \left(1 - \frac{p}{S} \right) \cdot \frac{d(hS)}{d\alpha} = -2Rp(Sin(\alpha) \pm \mu Cos(\alpha)) \quad (1-14)$$

یک ساده‌سازی پیشنهاد شده توسط بلند^۱ و فورد^۲ در سال ۱۹۴۸ [۴-۱] اجازه می‌دهد که این معادله مستقیماً انتگرال‌گیری شود. در بیشتر شرایط، تغییرات در فشار وارد بر موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف در گپ بین دو غلتک خیلی بیشتر از تغییرات در تنش سیلان (جاری‌شدن) است. به علاوه تغییر در ترم hS کوچک خواهد بود، به دلیل آن که با افزایش S ، h کاهش می‌یابد. بنابراین از ترم $\left(1 - \frac{p}{S} \right) \frac{d}{d\alpha} (hS)$ ممکن است در مقایسه با $hS \frac{d}{d\alpha} \left(1 - \frac{p}{S} \right)$ صرف نظر شود. این تقریب زمانی که نرخ کار سختی بالاست، معتبر نمی‌باشد (مثلاً برای اکثر فلزهای آنیل شده). همچنین زمانی که تنش کششی عقبی زیادی اعمال می‌شود، به علت کاهش تغییرات $\frac{p}{S}$ در طول سطح تماس آن‌طور که در معادله ۱-۱۹ دیده می‌شود، این تقریب قابل اجرا نخواهد بود. برای بیشتر نوردها عملاً در پاس‌های دوم یا بعدی خطای موجود تنها درصد اندکی خواهد بود. با اعمال فرضیات فوق، معادله ۱-۱۴ به معادله زیر تغییر می‌یابد:

$$hS \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{p}{S} \right) = 2Rp(Sin(\alpha) \pm \mu Cos(\alpha))$$

زاویه تماس معمولاً کوچک است، در نتیجه تقریب‌های بیشتر ممکن است ایجاد شود.

$$Cos(\alpha) \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} \approx 1, \quad Sin(\alpha) \approx \alpha$$

$$h = h_a + 2R(1 - Cos(\alpha)) \approx h_a + 2R \frac{\alpha^2}{2}$$

¹ Bland

² Ford

$$\frac{d}{d\alpha} \left(\frac{p}{S} \right) = 2R \frac{p}{S} \cdot \frac{\alpha \pm \mu}{h_a + R\alpha^2} \quad (1-15)$$

$$\frac{d\left(\frac{p}{S}\right)}{\frac{p}{S}} = \frac{2\alpha.d\alpha}{\frac{h_a}{R} + \alpha^2} \pm \frac{2\mu.d\alpha}{\frac{h_a}{R} + \alpha^2}$$

بنابراین:

هر دو طرف این معادله قابل انتگرال گیری برای رسیدن به یک جواب عمومی است

$$+ \text{Constant} \ln\left(\frac{p}{S}\right) = \ln\left(\frac{h_a}{R} + \alpha^2\right) \pm 2\mu \cdot \frac{1}{\sqrt{h_a} \cdot R} \tan^{-1} \frac{\alpha}{\sqrt{\frac{h_a}{R}}}$$

با معرفی نشانه

$$H = 2\sqrt{\frac{R}{h_a}} \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_a}} \cdot \alpha \right) \quad (1-16)$$

$$+ \text{Constant} \ln\left(\frac{p}{S}\right) = \ln\left(\frac{h}{R}\right) \pm \mu H$$

بنابراین در ناحیه خروجی نقطه خنثی

$$\frac{p^+}{S} = C^+ \cdot \frac{h}{R} \cdot e^{+\mu H} \quad (1-17a)$$

و در ناحیه ورودی آن

$$\frac{p^-}{S} = C^- \cdot \frac{h}{R} \cdot e^{-\mu H} \quad (1-17b)$$

مقادیر ثابت انتگرال ها از تنش متناظر در نقاط ورودی و انتهایی به دست می آید.

۱-۳-۲- نورد بدون اعمال نیروی خارجی (کششی جلو و یا عقب)

در صورت نداشتن کشش جلوبیی یا عقبی، تنش طولی در ابتدا و انتها باید صفر باشد؛

$$\sigma_{xa} = \sigma_{ab} = 0$$

$$H_a = 2\sqrt{\frac{R}{h_a}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{R}{h_a}} \alpha_a, \quad \frac{p_a}{S_a} = C^+ \cdot \frac{h_a}{R} \cdot e^{\mu H_a}$$

اما از آنجا که $H_a=0$ و از معادله 12-1 داریم $P_a=S_a-\sigma_{xa}=S_a$ در نتیجه:

$$1 = C^+ \cdot \frac{h_a}{R} \Rightarrow C^+ = \frac{R}{h_a}$$

$$\frac{p_b}{S_b} = C^- \cdot \frac{h_b}{R} \cdot e^{-\mu H_b} \quad , \quad H_b = 2 \sqrt{\frac{R}{h_a}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{R}{h_a}} \alpha_b \quad \text{در ورودی}$$

از آنجا که $\sigma_{xb}=0$ و $P_b=S_b-\sigma_{xb}=S_b$

$$1 = C^- \cdot \frac{h}{R} \cdot e^{-\mu H_b} \Rightarrow C^- = \frac{R}{h_b} \cdot e^{+\mu H_b}$$

معادله 17b-1 ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{p^+}{S} = \frac{h}{h_a} \cdot e^{\mu H} \quad (18a-1) \quad \text{در طرف خروجی:}$$

$$\frac{p^-}{S} = \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu H_b} \cdot e^{-\mu H} = \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu \cdot (H_b - H)} \quad (1-18b) \quad \text{و در طرف ورودی:}$$

تغییرات فشار بر روی غلتک ممکن است با توجه به معادلات فوق به صورت تابع زاویه‌ای در فاصله بین دو غلتک رسم شود.

تنش طولی در هر موقعیتی به سادگی از این معادلات به دست می آید. بنابراین:

$$\sigma_x = S - p, \quad \frac{\sigma_x}{S} = (1 - \frac{p}{S}) \quad (1-12)$$

این گراف‌ها به علت شکلشان اغلب به عنوان تپه اصطکاک نامیده می شوند. رابطه بین اصطکاک و بار وارد بر غلتک مستقیم است یعنی با افزایش اصطکاک نیروی نورد افزایش می‌یابد. به علت حضور اصطکاک بیشتر در نواحی دورتر از نقاط ابتدایی و انتهایی نیروی وارد بر غلتک برای تغییر فرم عمودی سطح مقطع ورق بیشتر خواهد بود. نیروی وارده به غلتک لازمه تغییر فرم ورق خواهد بود. بنابراین در نقاطی که تپه اصطکاکی داریم، این تغییر فرم افزایش خواهد یافت.

۱-۳-۳- نورد با کشش از جلو یا عقب

در بیشتر کارخانه‌های نورد، ورق از میان چندین استند نورد عبور می‌کند تا به ضخامت دلخواه نهایی برسد. برای نگه‌داشتن ورق به صورت صاف، و برای کنترل گیج، معمول است که یک کشش بین استند و ورق ایجاد می‌شود. حتی در نورد‌هایی با یک استند نیز این کشش توسط ورق جمع‌کن (کوئل پیچ) اعمال می‌شود. چنین کشش‌هایی دارای مزیت کاهش نیروی نورد نیز می‌باشند، که این مورد با قرار دادن شرایط مرزی مناسب برای کشش از جلو یا عقب (به ترتیب t_a و t_b) در معادله 7-1 قابل مشاهده خواهد بود.

در قسمت خروجی:

$$\sigma_{xa} = t_a, \alpha_a = 0, H_a = 0$$

از شرایط سیلان ماده (جاری شدن) (معادله 12-1) نتیجه می‌شود.

$$p_a = S_a - t_a$$

و ثابت انتگرال در معادله 17-1 با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{p_a}{S_a} = 1 - \frac{t_a}{S_a} = C^+ \cdot \frac{h_a}{R} \cdot e^{\mu H_a} = C^+ \frac{h_a}{R}$$

$$C^+ = \left(1 - \frac{t_a}{S_a}\right) \frac{R}{h_a}$$

$$C^- = \left(1 - \frac{t_a}{S_b}\right) \frac{R}{h_b} \cdot e^{+\mu H_b}$$

به طور مشابه در نقطه ورودی:

این ثابت‌ها با آن‌هایی که در غیاب کشش به دست آمدند متناظراند. اما در یک فاکتور $(1 - \frac{t}{s})$ ضرب شده‌اند.

دو رابطه‌ای که نیروی فشار را بر غلتک ارائه می‌کنند، با اعمال کشش خارجی نیروی کمتری را نشان می‌دهند.

$$\frac{p^+}{S} = (1 - \frac{t_a}{S_a}) \frac{h}{h_a} \cdot e^{\mu H} \quad (1-19a) \quad \text{خروجی}$$

$$\frac{p^-}{S} = (1 - \frac{t_b}{S_b}) \frac{h}{h_b} \cdot e^{\mu(H_b - H)} \quad (1-19b) \quad \text{ورودی}$$

این روابط جواب‌های صحیح و منطقی برای ابعاد بزرگ ورق در عملیات نورد سرد ارائه می‌دهند، اما مقدار خطای موجود برای ورق‌های صاف و نازک‌تر باید با معادله 1-20 تصحیح شود.

۴-۱- فرضیات و ساده سازی روش تخمین تنش

۴-۱-۱- بحث ساده سازی‌ها

تحلیل بالا مشتمل بر تعدادی فرضیات به شرح زیر بوده است.

(۱) **شرایط کرنش صفحه ای:** تقریباً در تمام نورد سرد عملاً ورق‌ها و نوارها، عرض ورق خیلی بیشتر از ضخامت آن h است. پس این فرض منطقی خواهد بود که شرایط کرنش صفحه ای در نظر گرفته شود و شرایط سیلان (برای جاری شدن) در کرنش صفحه‌ای می‌تواند اعمال شود تا رابطه بین P و σ_x بدست آید. این مسئله البته مستلزم یک پیش فرض است که P و σ_x تنش‌های اصلی باشند. به علت آنکه زاویه α معمولاً کوچک است و μ نیز معمولاً در نورد سرد کوچک است، این فرض برای اکثر عملیات منطقی است. اما اگر اصطکاک بالا باشد، جهت تنش‌های اصلی ممکن است بر روی جهات تنش‌های P و σ_x واقع نشود. اثر اصطکاک بالا را در کتاب‌ها و مقالات مرجع مخصوصاً کتاب‌های نورد گرم می‌توان مورد بررسی قرار داد.

(۲) **تغییر شکل یکنواخت:** در بیشتر نوردهای سرد، فلز در یک رفتار یکنواخت تغییر شکل می‌دهد، اما اگر اصطکاک بالا باشد و یا پاس خیلی سبکی در نظر گرفته شود (کاهش ضخامت کم باشد)، سطح ورق ممکن است از مناطق داخلی آن بیشتر تغییر شکل دهد و در نتیجه نمی‌توان مقدار σ_x را در سطح مقطع ورق ثابت فرض کرد. در چنین شرایطی به دست آوردن معادله دیفرانسیل مجاز نخواهد بود.

(۳) **ضریب اصطکاک ثابت:** به دست آوردن ضریب اصطکاک در بخش‌های مختلف کمان تماس، کاری بس دشوار است؛ اما چنین تلاشی برای به دست آوردن مستقیم ضریب اصطکاک

انجام شده است. [۵-۱] [۶-۱] مقایسه نتایج تئوری و تلاش‌های عملی انجام شده نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین استفاده از فرض اصطکاک در فرمول‌ها و نتایج تجربی برقرار است و در نتیجه این فرض معتبر خواهد بود، البته تا آنجا که این ضریب اصطکاک به نسبت کوچک باشد. برای مقادیر بالای μ و به ویژه برای اصطکاک چسبنده، یک اصلاح در فرمول‌ها ضروری است. (۴) **شعاع ثابت کمان غلتک:** در به‌دست آوردن معادله ۱۸-۱ و ۱۹-۱ فرض شده که غلتک جسمی صلب باشد. در حقیقت، غلتک به صورت الاستیک تا یک مقدار تغییر شکل می‌دهد و این امر باید در معادلات ملاحظه شود. یک اصلاح موثر این است که در نظر بگیریم غلتک تا شعاع بیشتر R' صاف خواهد شد، اما همچنان به صورت پروفیل دایره‌ای در سطح تماس باقی می‌ماند (شکل ۱-۱ را ببینید).

هیتچوک^۱ یک معادله برای شعاع تغییر یافته تحت بار پیشنهاد می‌دهد. [7-1]

$$R' = R \left(1 + \frac{C}{\Delta h} \cdot \frac{P}{w} \right) \quad (1-20)$$

جایی که ثابت C به ضریب الاستیک غلتک وابسته است (که این از تئوری الاستیسیته هرتز^۲ در تماس دو استوانه با یکدیگر به دست می‌آید، داریم

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} = \frac{16(1-\nu^2)p}{\pi E x_b^2}$$

در نتیجه C مقداری تقریباً برابر ۰.۲۲ / میلی‌متر مربع بر کیلو نیوتن برای غلتک‌های فولادی دارد. بنابراین برای مثال اگر $P/W=4$ کیلونیوتن بر میلی‌متر و $\Delta h=0.88$ میلی‌متر باشد. در نتیجه:

$$\frac{R'}{R} = 1 + \frac{0.022}{0.88} \times 4 = 1.1$$

برای نوارهای سخت تر، که ممکن است کاهش سطح کمتری تحت یک بار ثابت داشته باشند، صاف (تخت) شدگی غلتک بیشتر خواهد بود.

¹ Hitchcock

² Hertz

شعاع اصلاح شده R' باید در تمامی محاسبات بار غلتک مورد استفاده قرار بگیرد. این مسئله می تواند خیلی سریع توسط معادله ۱-۲۰ با استخراج بار تقریبی وارد از معادله ۱-۸ تخمین زده شود.

تقریبهای اضافی می تواند به استخراج دقیقتر بار کمک کند، اما دقت از این حد بالاتر معمولاً به انجام محاسبات بیشتر و طولانی تر آن نمی ارزد.

۵) **نقطه خنثی در طول کمان تماس:** این شرایط در تماس عملی نورد ملاحظه می شود. اگر نقطه خنثی در بین کمان تماس قرار نگیرد، نیروی اصطکاک تماماً در یک جهت عمل می کند و غلتک بر روی ورق می لغزد. اگر لازم باشد که ورق بدون اعمال نیرو به داخل استند رود، در این حالت مولفه طولی اصطکاک غلتک باید از فشار شعاعی بیشتر باشد.

۶) **تغییر فرم قابل صرف نظر الاستیک ورق:** ورق به صورت الاستیک در محدوده ورودی قبل از شروع تغییر فرم پلاستیک فشرده می شود و به صورت الاستیک پس از عبور از ناحیه خروجی به حالت اولیه باز می گردد. هر دو این مسائل طول کمان تماس را افزایش می دهد.

فشرده گی در ناحیه ورودی تقریباً قابل صرف نظر برای همه کاهش سطح های بالای ۲٪ است، اما تنش سیلان (جاری شدن) بزرگتر و در نتیجه تمایل کمتر غلتک به تغییر فرم در ناحیه خروجی، اثرات بازگشت الاستیک را مهمتر می نماید. اینها ممکن است تنها برای پاس هایی که از ۱۰٪ کاهش سطح تجاوز می کنند، صرف نظر شوند. این تصحیح های ساده سازی می تواند برای تغییر فرم الاستیک اعمال شود [1-9, 8-1]، اما برای نوردهای سبک، مثل نورد به منظور صاف کردن و (skin pass) جایی که کاهش سطح ممکن است کمتر از ۲٪ باشد، این مسائل بسیار عمده و تئوری ممکن است دیگر قابل قبول نباشد.

۷) **سرعت کم کار سختی:** مقدار کوچک $\frac{d}{d\alpha}(hs)$ در ساده سازی معادله ۱-۱۴ به کار گرفته می شود. این معمولاً یک ساده سازی منطقی برای فلزات کار سختی شده است که در پاس های دوم و بعد از آنیل کردن استفاده می شوند. با این حال برای ورق های آنیل شده، خطا ممکن است قابل توجه باشد و در نتیجه تطابق مناسب تحلیل تئوری با نتایج آزمایشگاهی نباید مورد انتظار باشد. اگر یک کامپیوتر برای حل معادله دیفرانسیل به کار گماشته شود، این خطا دیگر به حساب نمی آید.

نکته دوم در مورد فلزات آنیل شده این است که صافی سطح این نوع فلزات همگام با عملیات نورد به طور قابل ملاحظه ای تغییر می کند، در نتیجه شرایط اصطکاک ممکن است تفاوت کند. با این حال در اغلب موارد، نورد سرد با ورق های کار سخت شده سر و کار دارد، و پیش بینی و اصلاح فرمولی دقیق که برای فلزات آنیل شده به کار می رود لازم نمی شود، زیرا تنش سیلان (جاری شدن) کمتر بوده و ماکزیمم بار غلتک یا صاف شدگی غلتک بعید است که در پاس اول به مقدار بحرانی برسد.

۸) **کشش اعمالی اندک:** هدف اصلی و عمده از اعمال کشش از جلو در کارخانجات نورد تک استند این است که ورق به صورت رضایت بخشی به فویل تبدیل گردد و همچنین ورق های نورد شده در پایان عملیات نور صاف و تخت و بدون موج باشند. با این حال کشش جلویی و یا عقبی باعث کاهش بار وارده بر غلتک (کاهش نیروی نورد) می شود و می تواند در فرایند نورد ورق های نازک اهمیت ویژه ای پیدا کند، به این علت که کشش جلویی و عقبی، صاف یا تخت شدگی غلتک را کاهش می دهد. صاف شدگی غلتک باعث محدود کردن کاهش ضخامت برای ورق در حال نورد می شود. در چنین شرایطی، کشش از جلو و عقب متناسب با حد اکثر تنش سیلان ورق اعمال می گردد. افزایش تنش کششی و عقبی ممکن است باعث پارگی ورق بویژه در قسمت خروجی که ضخامت ورق کمتر است گردد.

زمانی که تنش های خیلی بالا اعمال می شود، در بعضی نقاط کمان تماس فشار نورد P در طول ممکن است از S اعمالی تجاوز نماید. با این حال، این مسئله چندان جدی نیست؛ از آنجا که تصحیح تپه اصطکاکی اعمال شده در معادله ۱-۱۸ خودش نتیجتاً کوچک تر خواهد بود و دقت آن متناظراً کمتر اهمیت خواهد داشت.

کشش بین استندها در کارخانه های نورد پشت سر هم (tandom mill) باید با دقت زیادی تنظیم و متناسب گردند.

۱-۴-۲- کاربردی بودن معادلات تخمین تنش

با توجه به مباحث بالا پیشنهاد می دهد که معادله ۱-۱۹ را می توان با اطمینان برای محاسبات بسیاری از نوردها به کار برد. مهمترین محدودیت کاربردی روابط یاد شده پایین بودن اصطکاک در نورد است، اما این مسئله نیز واقعی است، زیرا که در فرایند نورد ضریب اصطکاک در هنگام

تولید عملاً بین $\mu=0.03$ و $\mu=0.09$ قرار می‌گیرد. معادلات برای اولین پاس بعد از آنیل شدن در مقایسه با پاس‌های بعدی کمتر قابل اطمینان است. یک علت خطای در محاسبات با روابط فوق برای محاسبه نیروی نورد آن است که تغییرات تنش تسلیم در هنگام نورد ورق‌های آنیل شده زیاد است. به هر حال روابط یاد شده جایی که کشش‌های خارجی زیادی ($t=S$) هم اعمال شود، قابل قبول نخواهد بود.

در نوردهای سبک، زمانی که تغییر فرم الاستیک ورق اهمیت پیدا می‌کند، یک روش اصلاحی باید به کار گماشته شود، آنطوری که در بخش ۵-۶-۱ (نورد تمپرینگ) توضیح داده شده است. زمانی که اصطکاک بالاست، و بویژه زمانی که اصطکاک چسبنده وجود داشته باشد، معادلات دیفرانسیل باید بدون در نظر گرفتن فرض تغییر فرم همگن دوباره نوشته شوند.

۱-۵- تعیین بارهای وارد بر غلتک

۱-۵-۱- تعیین محل نقطه خنثی

فشار در نقطه خنثی را می‌توان از هر کدام از معادلات ۱-۱۹ به دست آورد. بنابراین، مقدار H متناظر با نقطه خنثی H_n از برابر قرار دادن طرف راست دو معادله ۱-۱۹ بدست می‌آید.

$$H_n = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} \ln \left\{ \frac{h_a}{h_b} \left(\frac{1 - \frac{t_a}{s_a}}{1 - \frac{t_b}{s_b}} \right) \right\} + H_b \right] \quad (1-21)$$

سپس موقعیت نقطه خنثی α_n می‌تواند با استفاده از معادله ۱-۱۶ و ۱-۲۱ بدست آید.

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{h_a}{R}} \tan \left[\frac{H_n}{2} \sqrt{\frac{h_a}{R}} \right] \quad (1-22)$$

قبل از آنکه به بحث نیروی جدا کننده غلتک وارد شویم، بهتر است نگاهی اجمالی به ماهیت نقطه خنثی و تغییر فشار در آن ناحیه بیندازیم؛ برای مقادیر معمول در محاسبات غلتک، ملاحظه می‌شود که فشار به صورت پیوسته از نقطه ورودی تا نقطه خنثی افزایش می‌یابد. پس از آن فشار تا رسیدن ورق به قسمت انتهایی کاهش می‌یابد. یک توزیع تخمینی از فشار در شکل

۲-۱ نمایش داده شده است. فشار ماکزیمم در نقطه خنثی را عموماً تپه اصطکاک می‌نامند. این مقدار ماکزیمم با افزایش ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

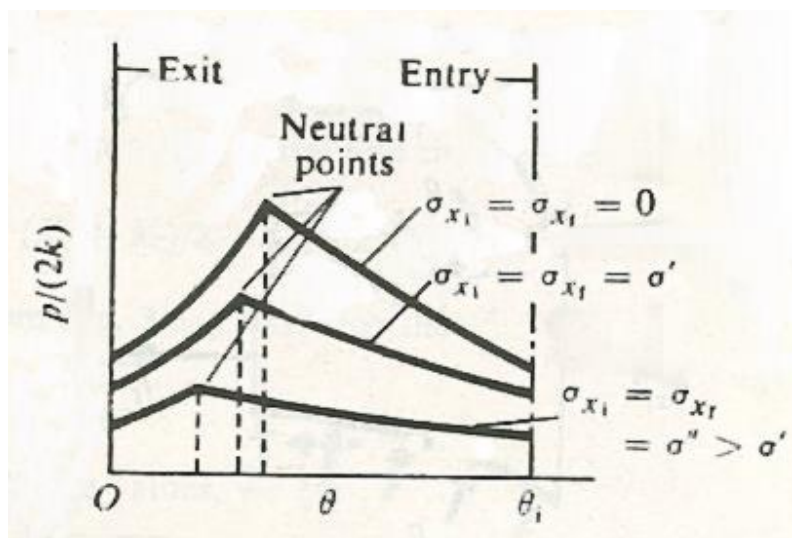
۲-۵-۱- نیروی جدا کننده غلتک (separating force)

با فرض اینکه عرض ورق در عملیات نورد سرد به صورت ثابت (پایسته) باقی می‌ماند، نیروی کل F که باعث می‌شود که غلتک‌ها در جهت عمودی از یکدیگر جدا شوند، با انتگرال گیری از فشار وارد بر غلتک در جهت عمودی به دست می‌آید. از آنجا که زاویه α معمولاً بسیار کوچک است، اثر یا مشارکت نیروی اصطکاک در بین نیروی وارد بر غلتک در جهت عمودی قابل صرف نظر خواهد بود. بنابراین:

$$F = \int_0^{\alpha_b} PR' \cos \alpha d\alpha \approx \int_0^{\alpha_b} PR' d\alpha \quad (1-23)$$

$$F = \int_0^{\alpha_n} P_{after} R' d\alpha + \int_{\alpha_n}^{\alpha_b} P_{before} R d\alpha \quad \text{پس}$$

انتگرال معادله ۲۳-۱ میتواند با روش‌های عددی و به کمک برنامه کامپیوتری محاسبه گردد.



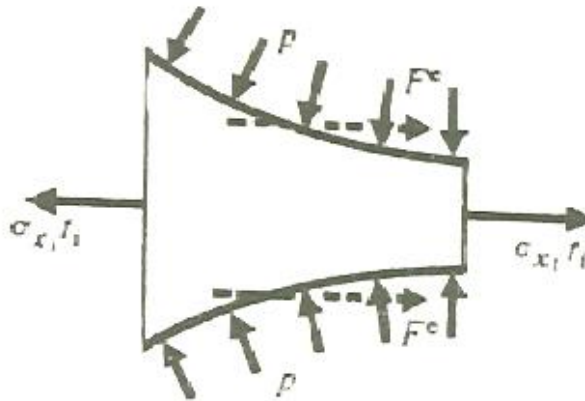
شکل ۲-۱ توزیع فشار در نورد [۵-۱]

۱-۵-۳- گشتاور لازم و نیروی وارد بر غلتک

یک گشتاور محرک برای غلبه بر گشتاور اعمالی بر غلتک ناشی از اصطکاک بین سطوح لازم می‌باشد. بنابراین گشتاور محرک متناظر با واحد عرض می‌تواند طبق رابطه زیر بیان شود:

$$\frac{T}{W} = \mu R^2 \left[- \int_0^{\alpha_N} P_{\text{after}}^+ d\alpha + \int_{\alpha_N}^{\alpha_b} P_{\text{before}}^- d\alpha \right] = + (1-24)$$

این مسئله باید مورد توجه قرار بگیرد که اصطکاک در مقابل چرخش غلتک قبل از نقطه خنثی مقاومت می‌کند، در حالیکه بعد از آن به چرخش غلتک کمک می‌نماید. با استفاده از این روش، نتیجه حاصل تفاضل دو ترم تقریباً برابر خواهد بود که باعث می‌شود خطای عددی مقدار قابل توجهی باشد. این مسئله استفاده از معادله (۱-۲۴) را در عمل محدود می‌کند.



شکل ۱-۳- تعادل ناحیه تغییر فرم [۵-۱]

یک روش جایگزین برای تعیین T بدست آوردن اصطکاک از تعادل نیرویی در جهت افق در ناحیه تغییر فرم در ورق است. شکل ۱-۳ ناحیه تغییر شکل یافته همراه با نیروهای وارد بر آن را نمایش می‌دهد.

شکل ۱،۳ همچنین یک نیروی معادل افقی F^e که نماینده نیروی اصطکاک معادل بین هر غلتک و ورق است را نشان می‌دهد (نیروی عکس العمل $-F^e$ از عمل F^e باید توسط گشتاور محرک غلتک تامین شود)، F^e را می‌توان با استفاده از معادله تعادل افقی سیستم به دست آورد.

بنابراین:

$$F^e = [(S_b h_b - S_a h_a) + \int_0^{\alpha_b} PR \sin \alpha d\alpha]$$

$$T \approx F^e R = R(S_b h_b - S_a h_a) + \int_0^{\alpha_b} PR^2 \sin \alpha d\alpha \quad (1-25) \quad \text{بنابراین:}$$

از آنجا که گشتاور T از معادله بالا به دست می‌آید، توان محرک برای هر غلتک بر واحد عرض از معادله زیر به دست می‌آید:

$$P_R = T \cdot \omega$$

در حالی که ω سرعت زاویه ای غلتک است.

۱-۵-۴- توان تلف شده در یاتاقان‌ها

اصطکاک در یاتاقان‌های تحمل کننده غلتک‌ها، به طور مشهود باعث اتلاف مقداری توان می‌شود. انجام یک تحلیل دقیق از اتلاف توان در یاتاقان‌ها بسیار پیچیده است. با این حال، برای تخمین تقریبی توان لازم عملیات نورد، کافی است فرض کنیم که توان تلف شده در هر یاتاقان از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$P_b = \frac{1}{2} \mu_b F_b d_b \omega \quad (1-26)$$

اگر μ_b ضریب اصطکاک در یاتاقان غلتک باشد (که مقدار محدوده حدودی آن بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ است). F_b بار شعاعی وارد بر یاتاقان، d_b قطر یاتاقان و ω سرعت زاویه ای غلتک است. با فرض پشتیبانی هر غلتک با دو یاتاقان، مشاهده می‌شود که $F_b = \frac{F}{2}$ است. بنابراین، کل توان اتلافی در هر پاس به صورت زیر خواهد بود.

$$P_L = \mu_b F d_b \omega$$

از این رو، کل توان لازم برای عملیات نورد در هر مرحله عبارت است از:

$$P = 2P_R + P_L \quad (1-27)$$

۱-۶- اثر تغییر شکل الاستیک بر نورد سرد

با هدف بررسی تحلیل فرایند نورد، این گونه ساده‌تر است که فرض کنیم همه ابزار آلات به صورت ایده آل صلب هستند، و این که ورق کاری از خود رفتاری به صورت پلاستیک نشان می‌دهد؛ که این بدان معنی است که هر گونه رفتار الاستیک در مقایسه با مقیاس بالای تغییر فرم پلاستیک اعمالی توسط عملیات قابل صرف نظر است. این فرض از دقت کافی جهت انجام اکثر محاسبات نورد سرد بر خوردار می‌باشد. در خیلی از عملیات‌ها همچون کشش سیم و اکستروژن، تنش‌های الاستیک موجب تغییرات کوچک در ابعاد نهایی می‌شود که معمولاً می‌توان از آن‌ها صرف نظر نمود. در عملیات نورد، تجهیزات و ابزار آلات به مقدار بیشتری با توجه به اندازه‌های آن‌ها و همچنین حالت فنریت آنها تغییر فرم الاستیک می‌دهند. هر چه ابعاد قطعات بزرگتر باشد تغییر شکل الاستیک آن بیشتر است.

در هنگام به دست آوردن معادله ۱-۲۰ مشخص شد که در نظر گرفتن تغییر فرم غلتک تحت بار در عملیات نورد امری تقریباً مهم است.

۱-۶-۱- حداقل ضخامت ورق در هر پاس نورد

زمانی که ورق‌های با ضخامت پایین نورد می‌شوند، این مسئله به وجود می‌آید که دیگر ورق کمتر از ضخامت معینی نورد نمی‌شود. تلاش بیشتر جهت انجام این امر موجب تغییر فرم بیشتر غلتک بدون هیچ گونه تغییر فرم پلاستیک در ورق می‌شود. دلیل این امر کاملاً مشخص نیست، اما ممکن است با چند بررسی ساده توصیف شود. ورق‌های مسی به راحتی بین غلتک‌های فولادی نورد می‌شوند، اما اگر ورق فولادی را زیر غلتک‌های مسی قرار دهیم، تغییر فرمی در ورق نخواهیم دید. این مورد سریعاً تنش سیلان (جاری شدن) یا سختی نسبی را یادآوری می‌کند، اما بیان نمی‌کند که چرا عملیات وابسته به ضخامت ورق خواهد بود. در حقیقت اگر سطح تماس به صورت کامل بدون اصطکاک بود، نورد ورق تا ضخامت‌های بینهایت کوچک امکان پذیر می‌بود (اگرچه در آن صورت لازم بود که ورق با نیروی خارجی به داخل غلتک هدایت شود، چون هیچ نیروی گاز گرفتنی وجود نداشت). با این حال مشاهده کردیم که اصطکاک باعث افزایش تنش طولی می‌گردد، که در نتیجه فشار غلتک را افزایش می‌دهد (تپه اصطکاک). اگر شعاع غلتک و زاویه شیب ثابت قرار داده شوند، ناحیه ای که نیروی اصطکاک بر آن عمل می‌کند نیز ثابت

خواهد ماند، اما سطح مقطع ورق با کاهش ضخامت کاهش خواهد یافت. نتیجه افزایش تنش طولی میانگین و افزایش فشار متناظر وارد بر غلتک همراه با کاهش ضخامت ورق در هر پاس را به دنبال خواهد داشت. بنابراین یک زاویه شیب معین نیازمند اعمال بار افزایشی در زمان کاهش ضخامت ورق است، که این مسئله متناظر با تغییر فرم ورق با سختی بیشتر است. زمانی که به یک ضخامت ویژه می‌رسیم، غلتک راحت تر از ورق تغییر فرم خواهد داد.

اگر زاویه شیب کاهش یابد، البته بار وارد بر غلتک نیز کاهش می‌یابد و ورق نازک تر می‌تواند نورد شود، اما در یک حد معین دیگر هیچ نوع کاهش ضخامتی ممکن نخواهد بود. به علت آنکه ناحیه تماس برای نورد با زاویه شیب ثابت و شعاع غلتک کوچکتر، کمتر خواهد بود. حد ضخامت کمتری نیز برای نورد با غلتک‌های با قطر کوچکتر فراهم می‌آید. یعنی هر چه قطر غلتک کمتر باشد مینیمم ضخامت ورق نوردی می‌تواند کمتر باشد. همچنین هرچه غلتک سخت تر باشد، ورق با ضخامت کمتری می‌تواند توسط آن نورد شود. در ضمن هرچه ضریب الاستیک غلتک بیشتر باشد، تغییر فرم آن در زیر بار کمتر خواهد بود و در نتیجه سطح تماس اصطکاکی کمتر بوده و ورق با ضخامت کمتر را می‌توان توسط آن نورد کرد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حد ضخامت به فاکتورهای زیر وابسته است:

$$h_{min} \propto C \cdot \mu \cdot R \bar{S}$$

اگر C پارامتر الاستیک تغییر شکل غلتک باشد، آن طوری که در معادله ۱-۲۰ بیان شد، برای نورد با غلتک‌های فولادی یک فرمول مفید برای بدست آوردن حداقل ضخامت ورق نوردی به صورت زیر خواهد بود [10-1].

$$h_{min} = 0.035 \mu R \bar{S} \text{ mm} \quad (1-28)$$

در نتیجه برای بدست آوردن نازک ترین ورق ممکن، فلز باید آنیل شود و ضریب اصطکاک باید کمترین مقدار ممکن را داشته باشد؛ که این امر با استفاده از غلتک‌های با صافی سطح بالا و روغنکاری مناسب به وجود می‌آید. استفاده از غلتک با قطر کوچکتر نیز مستقیماً به این امر کمک خواهد کرد.

برای آنکه به غلتک‌هایی با مقاومت بالا در مقابل تغییر شکل دست پیدا شود، جدیداً از کاربرد تنگستن به علت بالاتر بودن ضریب الاستیسیته آن در مقایسه با فولاد استفاده می‌شود. چنین غلتک‌هایی بسیار گران قیمت هستند ولی استفاده از آن‌ها در مقیاس صنعتی در موارد مورد استفاده به ویژه در نورد^۱ سندزیمیر همراه بهره اقتصادی بالایی بوده است. راه دیگر کاهش بار و در نتیجه تغییر فرم غلتک برای یک پاس ثابت، اعمال کشش از جلو و عقب بر ورق است، اما این مورد خیلی خطرناک است. مخصوصاً زمانی که ورق با ضخامت پایین و سرعت بالا نورد می‌شود. وقتی تمام موارد بالا رعایت شد، باز هم امکان نورد با ضخامت پایین با استفاده از جفت‌های دیگر نورد و استفاده از لایه‌های فشرده ورق بر روی یکدیگر وجود دارد. در تولید معمولاً عدم استفاده از حد نهایی کاهش ضخامت در هر پاس نورد، غیر اقتصادی خواهد بود.

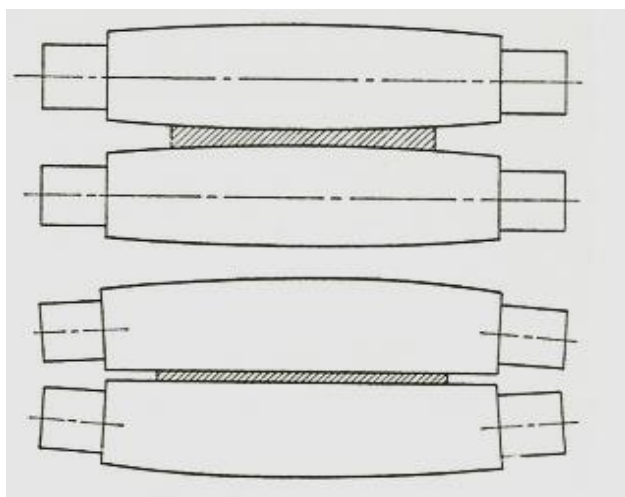
۱-۶-۲- خمش غلتک - کمبر^۲

همراه با صاف یا تخت شدن غلتک در ناحیه تماس، توزیع بار (نیروی نورد) در عرض ورق یک گشتاور خمشی حول گردن غلتک در یاتاقان‌ها تولید خواهد کرد. البته غلتک‌ها در مقایسه با اکثر تیرهای سازه‌ای خیلی کوتاه و مستحکم هستند، اما آن‌ها نیز ناچاراً تا یک مقدار کوچکی خم می‌شوند، که به صورت اغراق آمیز در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، این مسئله می‌تواند با دقت قابل قبولی محاسبه شود.

نتیجه چنین خمش غلتک ضخیم شدن ورق در قسمت مرکزی در مقایسه با لبه‌ها با اختلاف تقریباً در حد صدم میلیمتر خواهد بود. حتی چنین اختلافی برای ورق‌ها قابل قبول نخواهد بود. و باعث مشکلات تکنولوژیکی و کیفی بسیاری در نورد خواهد شد منجمله انواع ترک‌ها در ورق‌های ضخیم و یا موج در ورق‌های نازک. اولین راه حل این مشکل آن است که غلتک بصورت خم‌ره‌ای یا کرون‌دار سنگ زده شود. در نتیجه اثر صاف‌شدن غلتک و خم شدن آن با این پروفیل خنثی شده و ورقی صاف و موازی خروجی خواهد بود. البته عوامل بسیاری هنوز بر این پدیده اثر دارند مثل پروفیل دما در غلتک در هنگام نورد و پروفیل دبی و فشار روانساز بر سطح غلتک.

^۱ Sendzimir

^۲ Camber, Roll Bending



شکل ۴-۱- کمبر غلتک (شکل بالایی) و پیش خمش برای جلوگیری از اثر کمبر (camber) (شکل پایینی) [۱۰-۱]

در عمل مقداری از تصحیح کرون غلتک با سنگ زدن انجام می‌شود و درصد کمی از آن باقی گذاشته می‌شود زیرا ورق‌های کاملاً صاف و موازی مخصوصاً در پاس اول نورد تمایل دارند که به طرف چپ و راست حرکت کنند، ولی با مقدار کمی اختلاف ضخامت (در حدود ۲۵ میکرون) ورق در مسیر مستقیم هدایت می‌شود. علت دیگر به این مسئله بر می‌گردد که اگر کرون یا کمبر از حد معین بیشتر شود، در آن صورت ضخامت در مراحل بعدی مخصوصاً زمانیکه ورق ما بین پاس‌های مختلف تحت کشش از عقب و جلو می‌باشد با نازک تر شدن مرکز ورق نسبت به کناره‌های آن ممکن است موج وسط داشته باشد یا حتی زیر بار دو نیم شود. با این حال هم کمبر کم و هم بیشتر از حد مورد انتظار موجب پدید آمدن مشکلاتی در ورق می‌شود که در بخش‌های بعد به آن اشاره می‌شود. چندین فرمول با پیچیدگی‌های مختلف برای محاسبات کمبر در دسترس هستند. این فرمول‌ها بر اساس توجه به خم شدن غلتک به عنوان یک تیر سخت کوتاه به دست می‌آیند. تغییر شکل مرکزی بنابراین دو ترم را شامل می‌شود.

$$d = K_b \frac{WL^3}{EL} + K_s \frac{WL}{AG}, I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (1-29)$$

ثابت‌های K_b و K_s بستگی به ابعاد نسبی غلتک و ورق دارند ^[11-1]. L طول موثر تیر که همان طول بشکه غلتک باشد (برای دقت بیشتر بهتر طول غلتک از مرکز یک یاتاقان یا مرکز یاتاقان دیگر گرفته شود) و W بار وارد بر غلتک است، E و G مدول الاستیک و برشی غلتک و A سطح مقطع برش خورده غلتک خواهند بود. برای غلتکی که با ورق عریض که کل طول بشکه کاری غلتک را می‌پوشاند $K_b \approx 1.0$ و $K_s \approx 0.2$ و برای ورق با تنها در برگیرندگی نصف عرض غلتک (طول بشکه کاری غلتک)، $K_s \approx 1.0$ و $K_b \approx 0.5$ خواهد بود.

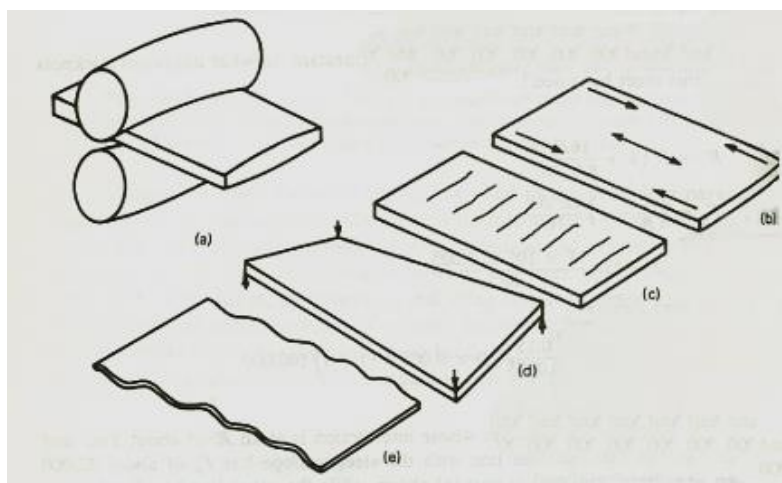
حتی زمانی که کمبر به صورت صحیح محاسبه و سنگ زده شده باشد، آن مقدار به صورت کاملاً دقیق برای یک بار ویژه و عرض خاص خواهد بود. به علاوه، کمبر معمولاً در ابتدای شروع فرایند به علت افزایش نا همگون دما در نقاط مرکزی در مقایسه با دو طرف غلتک، افزایش خواهد یافت. این مسئله بیشتر در نورد گرم حائز اهمیت است. این اثرات می‌تواند با ایجاد یک برنامه مناسب عملیات نورد که با یک ورق با عرض متوسط شروع می‌شود و کمبر کمتر از مقدار لازم برای کل عرض ورق جبران شود.

بعضی کنترلرهای موضعی کمبر به ویژه در نورد گرم با تغییرات مقدار خنک‌کننده در قسمت‌های مختلف سطح تماس غلتک می‌تواند بکار گرفته شود، که در نتیجه توزیع دمایی متغیر را روی غلتک نتیجه می‌دهد. روش‌های پیچیده‌تری نیز توسط افراد مختلف پیشنهاد شده‌اند که در مراجع به تفصیل بررسی شده‌اند. کمبر غلتک‌های نورد معمولاً در حدود چند دهم میلیمتر است. کمبر غلتک خیلی مهم است و مسائل زیاد کیفی ایجاد می‌کند که برای بدست آوردن ورق با کیفیت خوب سنگ زدن مناسب تنها کافی نیست. آنچه بعد از همه عوامل مهم است آن است که باید نورد بصورت پیوسته کار کند و توقف نداشته باشد و بتوان شرایط را برای این تولید پیوسته تحت کنترل گرفت. امروزه کامپیوترها بصورت آنلاین این کنترلرها را انجام می‌دهند.

۱-۶-۳- تأثیرات مخرب کمبر (خمشی یا کرون) کم و زیاد بر روی ورق

مقدار کمبر با توجه به عرض ورق، تنش سیلان (جاری شدن) ورق (فلز) و کاهش ضخامت در هر پاس تغییر می‌کند. فقدان کمبر یا ناکافی بودن آن موجب اثرات نشان داده شده در شکل ۱a-۵ می‌شود، جاییکه مرکز ضخیم تر به معنای ازدیاد طول پلاستیک بیشتر لبه‌ها نسبت به مرکز خواهد شد.

این مسئله باعث ایجاد یک تنش پسماند به صورت فشاری در لبه‌ها و کشش در مرکز می‌شود که در شکل ۵-۱b نشان داده شده است. این امر ممکن است موجب ترک‌های مرکزی (شکل ۵-۱c) یا اعوجاج در ورق (شکل ۵-۱d) یا لبه‌های ناصاف (شکل ۷، ۱۷c) شود. اگر به غلتک بیش از حد کمبر داده شود، همان گونه که در شکل ۶-۱a نشان داده شده است، تنش پسماند در جهت مخالف با آن چه در کمبر ناکافی بیان شد، خواهد بود. به این صورت که در مرکز ورق تنش فشاری و در لبه‌ها کشش خواهد بود (مطابق شکل ۶-۱b). این مسئله ممکن است موجب پدید آمدن ترک‌هایی در لبه‌ها (آن طور که در شکل ۶-۱c نشان داده شده است) یا باعث دو نیم شدن ورق (شکل ۶-۱d) یا پدید آمدن چروک‌هایی در مرکز ورق شود (شکل ۷، ۱۸e).

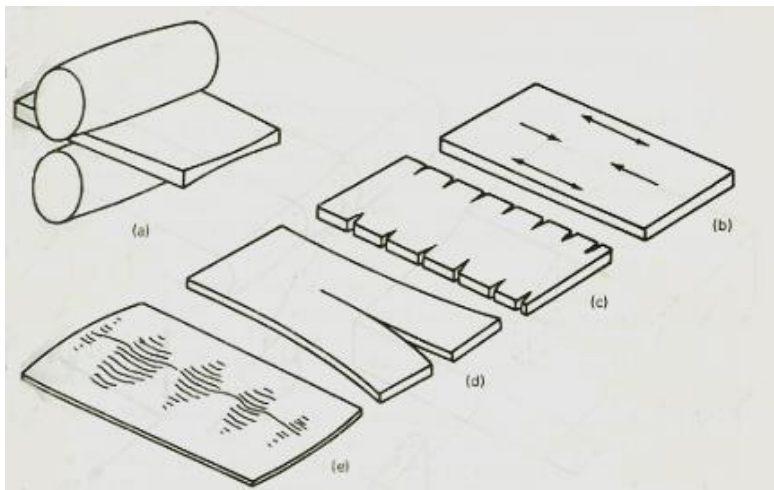


شکل ۵-۱- اثرات احتمالی، زمانی که از Camber ناکافی استفاده شود. [۱۱-۱]

دلایل فراوان اقتصادی، فنی و کیفی جهت اطمینان از کمبر صحیح برای رسیدن به صافی ورق لازم و جلوگیری از ترک در آن وجود دارد. تغییر ضخامتی تنها حدود ± 0.001 اینچ در ورق با ضخامت 0.032 اینچ بین مرکز و لبه ورق موجب 3% اختلاف خواهد شد. اگر مینیمم ضخامت ورق مورد نیاز باشد، با احتساب این خطا مقدار زیادی مواد به صورت اضافی استفاده شده است. در نتیجه، مشتری یا تامین کننده بسته به این که فولاد با وزن یا سطح فروخته شده است، باید چندین درصد مواد اضافه تر از آنچه مورد نیاز است تهیه کند. حتی اگر کمبر مناسب نیز انتخاب

شود، باز هم تمایل ایجاد ترک در لبه‌های ورق وجود خواهد داشت؛ که به علت اختلاف تنش که مورد بحث قرار گرفت به وجود می‌آید (شکل ۷-۱). به جز در نزدیک لبه‌ها، ماده تغییر شکل نیافته خارج از ناحیه پلاستیک، تغییر فرمی به صورت کرنش صفحه‌ای ($\epsilon_1=0$) بر منطقه تغییر فرم پلاستیک، با قرار دادن آن منطقه تحت نیروی فشاری در جهت Y ، اعمال می‌کند ($\sigma_y \approx 1/2 \sigma_z$).

با این حال در لبه‌ها σ_y ناگهان صفر می‌شود. پس کرنش صفحه‌ای دیگر در لبه‌ها مورد قبول نخواهد بود. اگر لبه‌ها به شرایط فشاری غیر محوری نزدیک شوند، سپس $\epsilon_y = \epsilon_x$ خواهد بود. بنابراین مقدار کرنش و ازدیاد طول در جهت X تنها نصف مقدار آن در مرکز ورق خواهد بود. از آنجایی که به هر حال لبه‌ها و مرکز باید ازدیاد طول برابر داشته باشند، در لبه‌ها یک تنش کششی ایجاد می‌شود $\sigma_x \sim -\sigma_z$.



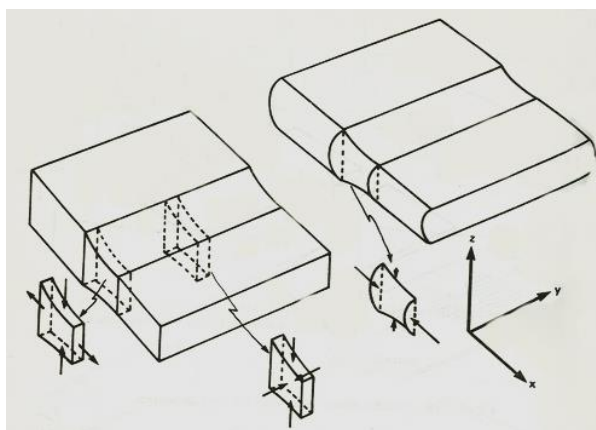
شکل ۱-۶- اثرات ممکنه زمانی که به غلتک بیش از حد Camber داده می‌شود. [۱-۱۱]

این تنش کششی می‌تواند موجب ترک در لبه‌های ورق شود، اگرچه اثر آن به میزان کمبر بیش از حد، تاثیرگذار نیست. عدم دستیابی به گوشه‌های صاف و مربع شکل، تمایل به ایجاد ترک در لبه‌ها را افزایش می‌دهد. با وجود یک لبه نسبتاً کوژدار، مواد در صفحه میانی حتی تنش فشاری کمتری را از طرف غلتک خواهند داشت. بنابراین افزایش کشش در جهت X برای نگه داشتن ازدیاد طول یکسان در عرض ورق ضروری به نظر می‌رسد. با لبه‌های کوژدار ترک در نتیجه در

کاهش ضخامت‌های کمتر پدید می‌آید. در نوردهای با چند بار نورد (پاس‌های بیشتر)، غلتک‌های کوچک جانبی برای جلوگیری از کوژ دار شدن ورق در لبه‌ها به کار گرفته می‌شود. به این غلتک‌ها سایدگاید یا نورد عمودی یا (edger) اجر گفته می‌شود. که نورد لبه‌ها را انجام می‌دهد و ورق را نیز هدایت می‌کند. البته نورد عمودی هر چند مثل سایدگاید عمل می‌کند اما در عمل بسیار قوی تر است.

۱-۶-۴- خمش غلتک کاری و استفاده از غلتک‌های پشتیبان

همان طور که دیدیم غلتک‌های با قطر کوچک تر برای نورد ورق‌های با ضخامت پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. این غلتک‌ها به آسانی زیر این بار خم می‌شوند و در نتیجه باید کمبر صحیح در آن‌ها به وجود آید یا با استفاده از غلتک‌های پشتیبان این مشکل را رفع نمود. این ساختار باعث ایجاد دستگاه نورد چهار غلتکه شده است که اتفاقاً پر کاربردترین نوع آن در صنایع نورد نیز می‌باشد. اگرچه ورق‌های با ضخامت‌های بالا و فویل‌های نرم با استندهای دو غلتکه با قطر بالا نیز نورد می‌شوند. زمانیکه غلتک کاری از قطر کمی برخوردار است، سختی مورد نیاز غلتک از طریق سختی غلتک کاری تامین می‌شود و اما بهتر است کمبر مورد نیاز بر روی غلتک پشتیبان اعمال شود. هر چند که شرایط نورد به علت تولیدات مختلف داعما تغییر می‌کند اقتصادی تر و راحتتر است که کمبر بر غلتک کاری نورد اعمال شود.



شکل ۱-۷- تغییرات تنش در گپ بین دو غلتک که ممکن است به ترک در لبای منجرشود

نورد شش غلتکه : برای نورد ورق‌های بسیار نازک باید از غلتک‌هایی با قطر بسیار کم استفاده نمود که ممکن است، علاوه بر خم شدن تحت بار، به علت وارد شدن نیروی مماسی بر سطح آن، در جهت افقی نیز خم شوند. برای آنکه چنین نوردی امکان پذیر باشد، هر غلتک کاری توسط دو غلتک پشتیبان حمایت می‌شود، که جهت محورهای آنها در جلو و عقب محور غلتک کاری قرار می‌گیرد و استند نورد شش محوره یا شش غلتکه را می‌سازند. این نوع نوردها چندان معمول نیستند، اما اصول آنها برای طراحی نورد خوشه ای سندزیمیر مورد استفاده قرار گرفته است.

۱-۶-۵- تغییر شکل الاستیک ورق، نورد تمپرینگ^۱

در بعضی از کاربردها، یک کاهش اندک در ضخامت ورق بویژه در تسمه (کوئل یا نوار) بعد از آنیل کردن نهایی مورد نیاز است. این نورد تمپرینگ برای بهبود تنش تسلیم یا حد سیلان (جاری شدن) فلز است. به ویژه برای فولاد نرم که عملیات کشش عمیق بر روی آن انجام خواهد گرفت، بسیار مهم است. قسمت اعظمی از همه ورق‌های فولادی نرم نورد شده در حقیقت توسط عملیات کشش عمیق به قطعات ماشین یا دیگر کالاهای مصرفی تبدیل می‌شود. اگر در کشش عمیق (deep drawing) ورق‌های آنیل شده مورد استفاده قرار گیرد، به علت رسیدن به نقطه تسلیم با حد سیلان (جاری شدن)، در یک منطقه به صورت بی قاعده تغییر فرمی به وجود می‌آید که به آن پوسته پرتغالی گفته می‌شود (orange pill). این پدیده با رنگ کردن نیز از بین نمی‌رود. علت علمی این تغییر فرم‌ها نوارهای لودر^۲ می‌باشد. با این حال خود این نقطه سیلان (جاری شدن) را می‌توان بلافاصله قبل از در معرض کشش قرار گرفتن ورق با نورد در کاهش سطح‌های پایین تر از ۱-۲٪ بالا برد. در نتیجه ورق از منطقه نوار لودر گذشته و با تحت کشش قرار گرفتن، دیگر بر روی سطح آن چروک ایجاد نمی‌شود. با گذشت ۲۴ ساعت از این تمپرینگ، تنش تسلیم یا حد سیلان (جاری شدن) به مقدار اولیه باز می‌گردد، با این حال ورق همچنان بعد از یک هفته یا بیشتر در شرایط آب و هوایی سرد قابل استفاده می‌باشد.

^۱ این فرایند برای اصلاح خواص مکانیکی بویژه برای ورق‌هایی که در کشش عمیق بکار می‌روند و نیز اصلاح موج ورق و تلرانسهای ضخامت آن استفاده می‌گردد. لذا هدف اصلی از این فرایند شکل دادن سنگین نیست.

^۲ Luder bands

چنین تغییر شکل‌های پلاستیک کوچکی قابل مقایسه با تغییر فرم الاستیک ورق است ولی از نظر کیفیت ورق قابل صرف نظر نمی‌باشد. فرض گرفتن ماده پلاستیک یا صلب برای این شرایط غیر معتبر خواهد بود. این مناطق در تماس با غلتک‌ها بار را مستقیماً افزایش و کمان تماس را عریض‌تر می‌نمایند که نتیجتاً باعث افزایش تپه اصطکاکی می‌شود. تئوری معمولی معادله ۱-۲۴ دیگر برای نورد تمپرینگ قابل استفاده نمی‌باشد. اما یک معادله جایگزین پیشنهاد شده است [9-1]

۱-۷-۷- روش‌های دیگر محاسبه نیروی وارد بر غلتک

روش و تئوری بیان شده در قسمت‌های قبل بر اساس اصول کاملاً فیزیکی به تحلیل نیروی وارد بر غلتک می‌پردازند و به راحتی با استفاده از یک کامپیوتر می‌توانند محاسبه شوند. با این حال این روش همچنان برای محاسبات دستی مشکل ساز خواهد بود. روش‌های سریع دیگری هم پیشنهاد شده اند، که این‌ها بیشتر بر اساس تجربه و نه با تکیه بر روش‌های تحلیلی بدست آمده‌اند.

۱-۷-۱- روش کوک^۱ و پارکر^۲

این روش برای اندازه‌گیری بارهای نورد ورق‌های آنیل شده در هر پاس نورد با جفت غلتک‌های با صافی سطح بالا به کار برده می‌شود. نتایج جهت نمایش تغییرات نسبت h_b/R با h_b^2/P_1 برای کاهش سطح‌های مختلف نمایش داده شده‌اند. (h_b ضخامت ورق ورودی، R شعاع غلتک، P_1 بار وارد بر غلتک بر واحد عرض آن).

پس یک منحنی برای ضخامت اولیه می‌تواند رسم شود، که P_1 را به عنوان تابعی از کاهش سطح مقطع نشان می‌دهد. برای نورد‌های چند پاسه که معمولاً نیز مورد نیاز می‌باشد، یک فرمول توسط کوک و پارکر برای میزان انرژی لازم در پاس‌های میانی معرفی شده است. سپس کل انرژی مصرف شده در مجموع پاس‌ها با انرژی لازم برای انجام تمامی تغییر ضخامت در یک مرحله برابر خواهد بود. بار لازم برای انجام این تغییر ضخامت تنها در یک مرحله توسط نمودار اولیه برای عملیات تک پاسه بدست می‌آید. بار واقعی پاس اول P به صورت مستقیم از این شکل به دست می‌آید و انرژی مربوطه تخمین زده می‌شود. یک تئوری ترکیبی از پاس‌های ۱ و ۲،

¹ Cook

² Parker

انرژی لازم را برای پاس دوم و از این رو بار P_2 به دست می‌آورد، و این امر ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که نیروی تمام بخش‌ها تا رسیدن به کاهش ضخامت نهایی به دست آید. این روش می‌تواند تقریباً برای تمام نوردهای چند پاسه با اعمال محاسبات ساده به کار گرفته شود. با آنکه نتایج بدست آمده در روش ارائه شده کاملاً آزمایشی می‌باشد، مقایسه انجام شده با روش‌های تحلیلی تطبیق واقعی و صحیحی را ارائه می‌نماید.

۱-۷-۲- روش نموداری بلند^۱ و فورد^۲

در معادله ۸-۱ یک روش سریع و آسان برای محاسبه نیروی وارد بر غلتک با فرض فشار ایده‌آل معادل به دست آمده است.

$$\frac{P}{\omega} = \bar{S} \sqrt{R \Delta h}$$

تأثیر اصطکاک در فرمول را می‌توان با ضرب نمودن آن در تابع f به دست آورد؛ بلند و فورد تابعی پیشنهاد کردند که وابسته به کاهش سطح r و χ است.

$$\chi = \mu \sqrt{\frac{R}{h_a}}$$

ترکیبی که با جزئیات تئوری نشان داده شد؛ بنابراین،

$$\frac{P}{\omega} = \bar{S} \cdot \sqrt{R \Delta h} \cdot f(\chi, r) \quad (1-30)$$

مقدار f برای مقادیر مختلف χ و r در فرم گرافیکی در مقاله آن‌ها نشان داده شده است [4-1]. بعلاوه، مقدار تابعی دیگر برای استفاده در بدست‌آوردن گشتاور نیز محاسبه شده است. البته این نیز ممکن است که روش، کشش اعمال شده را نیز شامل شود.

¹ Bland

² Ford

۱-۷-۳- معادله اکلوند^۱ [12-1]

یک تحلیل ابتدایی از تنش‌های وارد بر غلتک به وسیله اکلوند منجر به ارائه فرمولی برای نیروی وارد بر غلتک در سال ۱۹۲۷ گشت. فرمول وی حتی اثر تخت‌شدگی غلتک تحت بار را نیز شامل می‌شد.

$$\frac{P}{w} = \bar{S} \sqrt{R \Delta h} \left(1 + \frac{1.6 \mu \sqrt{R \Delta h} - 1.2 \Delta h}{h_a + h_b} \right) \quad (1-31)$$

رابطه قرار داده شده در پرانتز، همان طور که در معادله ۱-۳۰ بیان شد، تابعی از اصطکاک است؛ اما در فرم ساده تحلیلی موجود می‌باشد. این معادله پیش بینی خوب و قابل توجهی از نیروی وارد بر غلتک در عرض‌ها و اندازه‌های مختلف و تغییر ضخامت ارائه می‌دهد. این فرمول می‌تواند برای اهداف عمومی مثلاً در بدست آوردن جدول عملیات نورد برای استندهای دو غلتکه بدون کشش مورد استفاده قرار گیرد. شبیه دیگر معادلات، این نیز می‌تواند برای کشش با فاکتور تصحیح $(1 - \frac{t}{S})$ استفاده شود.

۱-۷-۴- روش دیویس^۲

یک روش ساده که شبیه روش کوک و پارکر است، اما زودتر توسط آقای دیویس پیشنهاد شد، تقریباً بیشتر در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرد^[13-1]. فشار میانگین وارد بر غلتک P_s ، که در واقع نیروی وارد بر غلتک تقسیم بر سطح تماس بین غلتک و ورق است، به صورت تجربی به دست می‌آید، با فرض این که هیچ تغییر شکل در غلتک در هنگام نورد ورق با تغییر ضخامت‌های مختلف به وجود نمی‌آید. مقادیر P_s سپس در مقابل درصد میانگین کاهش ضخامت کلی h_b/R رسم می‌شود.

کار انجام گرفته دیویس برای فولاد آنیل شده و بررسی برای ورودی و خروجی پاس بوده است. این بوجود آورنده یک نمودار برای نورد فلزات ویژه خواهد بود، با این تفاوت که فرم این نمودار

¹ Eklund² Davis

تنها برای پاس‌های اولیه خواهد بود. البته مفیدتر خواهد بود که در عمل اطلاعات به صورت ابتدایی برای پاس‌های حدوداً ۳۰٪ کاهش جمع آوری شود. استخراج از دو جدول نورد مورد بحث برای کاهش در هر پاس بین ۱۰٪ تا ۱۵٪ خطای کمتری را در مقایسه با حالتی که عملیات در چند پاس مختلف معادل می‌شود را در بر می‌گیرد. در تقریب اول، نمودار می‌تواند به صورت تقسیمی از تنش‌های سیلان (جاری شدن) مختلف طبقه بندی شود، اما از آنجا که با تغییر فلز اصطکاک نیز ممکن است تغییر نماید، ترجیح داده می‌شود که برای هر فلز یک نمودار بخصوص رسم شود. این روش ندرتاً دقیق تر از روش معادله اکلوند است، اما این مزیت را دارد که دانش و اطلاعات از تنش تسلیم یا حد سیلان فلز و اصطکاک آن در این روش لازم نمی‌باشد. پس این روش درجایی که تنها دستگاه نورد در اختیار است، پرکاربرد خواهد بود. معادله اکلوند بیشتر برای محاسبات روی کاغذ مفید خواهد بود؛ جاییکه زمان و یا امکان برای آزمایش بر روی دستگاه نورد وجود ندارد.

۱-۸- دستگاه‌های نورد مخصوص

در قسمت‌های قبلی بیان شد که نورد ورق‌های بسیار نازک مخصوص فویل‌های از جنس سخت، نیازمند استفاده از غلتک‌های با قطر کوچک است. این مسئله مشکل تغییر شکل غلتک و به طبع آن تلرانس ورق را به مقدار زیادی حل می‌کند. اما پشتیبانی از غلتک‌های با قطر پایین مثلاً ۱۰ میلی‌متر نیز بسیار مشکل خواهد بود. به این علت که از نظر هندسی تنها از غلتک پشتیبان با قطر حدود دو برابر قطر غلتک کاری می‌توان استفاده نمود. بنابراین چندین غلتک پشتیبان دیگر باید غلتک پشتیبان اولیه را پشتیبانی نمایند. معروف ترین نوع چنین نوردهایی استندهای نورد خوشه‌ای یا سندزیمیر^۱ است که چهار جفت غلتک با قطر نسبتاً بزرگ تکمیل کننده عملیات پشتیبانی خواهد بود (شکل ۱-۸).

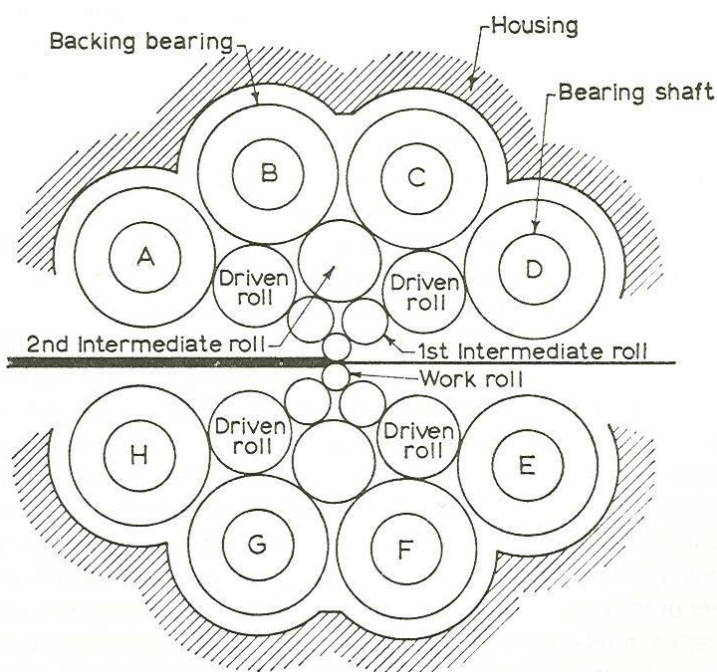
نیروی محرک به چهار غلتک پشتیبان در ردیف دوم اعمال می‌شود، و اصطکاک بین غلتک پشتیبان و غلتک کاری موجب به حرکت در آوردن غلتک کاری می‌گردد. پیچ تنظیم فاصله دو غلتک کاری با جابجایی غلتک‌های بیرونی در یاتاقان‌های پیچیده این نوع سیستم‌ها عمل می‌کند. دقت این حرکت با قرار دادن گنج‌های کنترل چندین برابر می‌شود. کمبر غلتک‌ها نیز

^۱ Sendzimir

با غلتک‌های بیرونی تعدیل می‌شود. در جدول ۱-۱ یک دسته از اندازه‌های نوعی از چنین نوردهایی آمده است. در چنین نوردهایی می‌توان ورق تا ضخامت ۰,۰۰۳ میلیمتر یعنی ۳ میکرون با تیرانس ۰/۱ (بک دهم) میکرون نیز تولید کرد.

جدول ۱-۱- نمونه ای از اندازه غلتک کاری و ورق سندزیم^[۱۳-۱]

۷,۵	۱,۱۲۵	۰,۲۵	قطر غلتک کاری (اینچ)
۲۰۰۰	۴۸	۶	عرض ورق (اینچ)
۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۰۱	حداقل ضخامت ورق (اینچ)



شکل ۱-۸- سطح مقطع برش خورده از یک استند نورد سرد سند سیمر برای نورد ورق‌های سرد با ضخامت نازک^[۱۳-۱]

برای آنکه اثر صاف شدگی غلتک را تا حد ممکن کاهش دهیم، معمولاً از غلتک‌های کاری از جنس کاربید تنگستن، که مدول ینگ بیشتری نسبت به فولاد دارند، استفاده می‌شود. مواد سخت شامل استنلس استیل، آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای نیکل و از این قبیل می‌تواند در این کارخانه‌ها نورد شود.

در فناوریهای جدید برای نورد ورقهای نازک با این نوع استندها، غلتک‌های کاری را به صورت قوس دار غیر سیلندری سنگ می‌زنند تا اولاً ورق به چپ و راست نلغزد و ثانیاً ورق کمتر موج داشته باشد.

۹-۱- روغنکاری در فرایند نورد سرد

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، گرچه نورد سطحی شرایط شدید اصطکاکی را شامل نمی‌شود، با این همه روانکاری که فیلم پیوسته‌ای از روغن را در هنگام نورد ایجاد کند اولاً به علت کاهش اصطحاک و نچسبیدن سطح ورق به غلتک و ثانیاً به جهت خنک‌کردن ورق و غلتک ضروری است. عدم روغنکاری خوب می‌تواند باعث مشکلات جدی شود. در عملیات نورد، حجم زیادی از خنک‌کننده استفاده شود. تانکرهای ۵۰ متر مکعبی به هیچ عنوان غیر معمول نیستند و حتی در مدارهای روغن بسته گاهی تا ۵ متر مکعب در هر ساعت لازم است خنک‌کننده اضافه شود. یون‌های کلسیوم در آب ممکن است با مواد محلولگر ترکیب شود، اما به علت ناپایستاری، محلولگر غیریونی ترجیح داده می‌شود، حتی اگر آب یونیزه شده مورد استفاده قرار گیرد. یون‌های آلومینیوم، منیزیوم و سیلیسیوم ممکن است به مرور زمان بر روی بدنه غلتک پدیدار شود. عوامل موثر در کیفیت روغنکار برای نورد سرد بسیار گسترده است. به هر حال یکپارچگی محصول از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. غلتک‌ها نیاز دارند که به صورت قابل اطمینانی برای جلوگیری از کمبر ناشی از تنش‌های حرارتی در سطح غلتک که موجب پدید آمدن سطحی نا صاف بر روی ورق می‌گردد، خنک شوند. در روغنکاری باید اثر خوردگی ورق و غلتک، که آن نیز در بوجود آمدن سطحی ناصاف دخیل خواهد بود. بجای ماندن اثر و خطی از ورق بر روی غلتک، مخصوصاً حین عملیات نورد و در پاس‌های بعدی آنیلینگ بسیار مهم است و باید شدیداً از آن اجتناب نمود.

ترکیب خصوصیات لازم برای مایع خنک کننده و یا روانکار نورد و نگهداری و پایداری آن در اندازه‌های بالا، توسعه روانسازهای نورد را بسیار مشکل می‌سازد. این مسئله در فصول بعدی بصورت کاربردی و جامع بررسی خواهد شد.

۱-۹-۱- نورد سرد فولاد

روغن پالم^۱ مشهورترین روانساز برای نورد ورق‌های فولادی نرم است. ویسکوزیته روانساز بسیار مهم است، زیرا اغلب یک تاثیر هیدرودینامیکی ویژه برای آن در نورد وجود دارد، اما روغن‌های معدنی ساده تنها تا مقدار کمی مفید واقع می‌شوند. بعضی عملیات مرزی ضروری به نظر می‌رسد و حتی روغن پالم معروف است که در حین عملیات به علت بوجود آمدن اسید چرب خصوصیات بهتری از خود نشان می‌دهد. روغن‌های مصنوعی پالم بر اساس آب کردن پیه نیز توسعه داده شده‌اند، اما مقبولیت عام پیدا نکرده‌اند. باقی ماندن روغن نورد بر سطح فلز باعث ایجاد لکه‌های قهوه‌ای رنگ بر روی ورق در هنگام آنیل ورق می‌گردد. لذا مسئله پاک کردن روغن از سطح ورق قبل از آنیل کردن، مسئله‌ای بسیار مهمی است تا از ایجاد لکه‌های قهوه‌ای بر روی سطح ورق جلوگیری شود. با این حال، به علت آنکه عملیات زدودن روانکار همیشه کامل انجام نمی‌شود، بهتر است عملیات آنیل کردن در حضور گاز خنثی انجام شود تا اثرات ناشی از خود روانکار یا حتی مخلوط شدن آن با روغن یاطاقان‌ها بر روی سطح ورق حداقل شود. به علت آنکه مسئله خنک کاری بسیار مهم است، در بسیاری از کارخانه‌های نورد از خنک‌ساز با پایه آب استفاده می‌شود. ساده‌ترین نوع استفاده از آب به اینصورت است که سطح ورق ابتدا با لایه‌ای از روغن پوشانده می‌شود، سپس آب به صورت کاملاً ساده بر روی ورق مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش اثرات مخرب بسیاری بر جای می‌گذارد و امروزه به صورت کامل منسوخ شده است. روش دیگر استفاده از محلول آب و روغن است که باز هم اثرات مخرب دارد و تنها در عملیات نورد با سرعت‌های بالا از این روش استفاده می‌شود. تقریباً تمامی روانکارها و خنک کننده‌های پایه آب، محلول‌های خنثی از روغن در آب هستند که محلول‌گرهای پیچیده بعلاوه چند ترکیب اضافه برای جلوگیری از خوردگی (ضد خوردگی و ممانعت کننده‌ها inhibitor)، اکسیداسیون، حمله باکتریایی و ضد کف (antifoam) به آنها اضافه می‌شود. بعضی از مهمترین محلول‌های مورد

¹ Palm

استفاده در ورق‌های فولادی بر اساس روغن‌های ریپسید^۱ و موم هستند. این مواد در حضور محلول‌گرهای یونیک پایسته می‌شوند و خیلی حساس به حضور کاتیون‌ها مخصوصاً Ca^{++} در آب سنگین هستند. تغییر در مناطق راکد و خوردگی بعدی ناشی از آن همیشه یک خطر در استفاده از محلول‌هاست، اما با توجه ویژه به طراحی و نگهداری می‌توان آنها را به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار داد. اما روغنکاری در نورد‌های خوشه‌ای مشکل‌تر و حساس‌تر است. زیرا نیازمند یک نوع روغن برای استفاده در یاطاقان‌ها و ورق به صورت همزمان است. در این شرایط از یک روغن معدنی به ترکیبات E.P و از یک ماده ضد اکسیداسیون استفاده می‌شود.

۱-۹-۲- روغنکاری در نورد آلومینیوم

آلومینیوم زمانی که در معرض اکسیداسیون شدید قرار می‌گیرد، به راحتی به سطح غلتک می‌چسبد. و این مسئله کمتر می‌تواند به طور کامل اجتناب شود، بلکه می‌توان آنرا کنترل نمود. معمول ترین روانکار نورد سرد روغن‌های معدنی با افزودنیهای مختلف مثلاً ۰/۲٪ آلیک اسید هستند. محلول‌ها به هر حال به طور فزاینده‌ای برای نورد ورق‌ها استفاده می‌شوند. یک مشکل عمده با هر دو نوع روانکارها بوجود آمدن لکه‌هایی بر روی سطح ورق است. این مشکل می‌تواند با باقیماندن ترکیبات معدنی روی ورق در طی مرحله آنیل شدن، اگر هوای کافی در کوره چرخانده نشود، افزایش پیدا کند. چنین لکه‌های قهوه‌ای یا سیاه را به سختی می‌توان بر طرف نمود. لکه‌های سفید ناشی از باقیمانده آب یا اکسیداسیون ورق نیز ممکن است در طول عملیات آنیل شدن تشکیل شود. به تازگی تغییری در افزودنی‌های آمینی پیشنهاد شده است، که از طرفی با کاهش تشکیل لکه‌ها، روانسازی خوبی نیز برای غلتک دارد.

مقادیر زیادی از صنعت نورد آلومینیوم مربوط به نورد زرورق یا فویل می‌شود. این کاربرد نیازمند غلتک‌های کاملاً جلا و صیقل داده شده با پروفیل نازکی از روغن هستند. پارافین در شکل کاملاً خالص نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ با این حال، مسئله لکه‌ها حین عملیات آنیلینگ بعدی، باز مشکل ساز خواهد شد. از افزودنی‌هایی همچون سولفور باید به شدت اجتناب شود. فویل‌های خیلی نازک معمولاً ۲ لایه نورد می‌شوند. سطح خارجی روشن و براق خواهد بود ولی سطح

¹ Ripeseed

داخلی بین دو لایه آلومینیوم با وجود استفاده از جداساز ورق مثل نایلون با این همه مات است. این ماتی سطح به علت اختلاف در تغییر فرم دانه‌های فلز است. این مسئله با جمع شدن روانکار در قسمت خاصی از ورق تشدید خواهد شد. ضمناً باید نسبت به پتانسیل خطر آتشگیری براده‌های باقیمانده آلومینیوم توجه نمود.

۱-۹-۳- روغنکاری نورد دیگر آلیاژها

روغنکاری در فرایند نورد فلزاتی نظیر مس و برنج تقریباً ساده تر است. برای روغنکاری آلیاژهای مس روغن‌های معدنی کافی بوده و افزودنی‌های مختلف اثر کمی خواهد داشت. از سولفور خالص باید شدیداً اجتناب شود، زیرا حتی مقدار کمی از آن سبب پدید آمدن لکه‌هایی بر روی سطح غلتک می‌شود. محلولی از روغن معدنی و سولفور معمولاً به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای سطحی با صافی بهتر بر روی برنج از روغن معدنی با ویسکوزیته کم با ۲۰-۳۰٪ اسید چرب در سرعت‌های نسبتاً پایین استفاده می‌شود.

تیتانیوم همانطور که در تمام عملیات‌های کار بر روی این فلز معمول است، به سختی بر روی سطح غلتک می‌چسبد. این فلز تنش سیلان (تنش تسلیم) بالایی دارد و در نتیجه ترجیحاً به صورت گرم نورد می‌شود، اگرچه می‌توان آنرا در نورد‌های خوشه‌ای با استفاده از روغن معدنی که به آن روغن کستور^۱ یا پتاسیوم اضافه شده است، نیز نورد کرد.

۱-۱۰- پیشرفت‌های اخیر در نورد

۱-۱۰-۱- تحلیل تئوری

ظاهراً علاقه کمتری برای تحلیل تئوری نورد ورق‌های صاف (نورد تخت) در مقایسه با دیگر عملیات‌ها وجود دارد؛ و این بدان علت است که تحلیل تئوری موجود جوابگوی محاسبات عملی در بدست آوردن نیروی وارد بر غلتک و توان لازم برای به حرکت در آوردن آن، درحالی‌که کرنش طولی به صورت یکپارچه است، می‌باشد. یک تعدیل ساده از معادله ۱-۷ به معادله زیر تبدیل می‌شود.

$$P = X \cdot w \cdot \bar{S} \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1-32)$$

^۱. Castor

اگر بار P ، عرض w ، و کاهش ضخامت Δh برای یک پاس نورد داده شده اندازه گیری شوند، ممکن است که مقداری برای X با علم به سختی ورق ورودی و خروجی با فرض ثابت ماندن شعاع R بدست آید. $\bar{S}$ تنش تسلیم میانگین هم می تواند به طور ساده از متوسط گیری تنش تسلیم ورق ورودی و خروجی بدست آید. مقدار X سپس باعث پیش بینی بار وارد بر غلتک در پاس های بعدی با در نظر گرفتن مقادیر سختی و در نظر گرفتن مقداری برای برگشت فنریت نورد، می شود.

در آزمایشگاه این روش تقریبی با افزایش تعداد پاس به سرعت در دقت بهبود ایجاد می کند و تعمیم آن به پاس های بعدی نیز با دقت بالا تری انجام می شود. بدون اطلاعات قبلی از غلتک و نورد، این امکان وجود دارد که برای مثال یک ورق ۱۰ میلیمتر ضخامت را تا 1.0 ± 0.02 میلیمتر با تنها دو یا سه پاس بیشتر نسبت به محاسبات تئوری، بدون آنکه بار وارده از حد بار مجاز تجاوز نماید، نورد نمود. محاسبات خیلی سریع تنها با استفاده از یک برنامه کامپیوتری قابل استفاده است.

۱-۱۰-۲- فرایندهای جدید نورد و تولید کامپوزیت

مهمترین پیشرفت در نورد متداول ورق گسترش استفاده از ابزار و گیج های کنترلی در قسمت های مختلف می باشد. این مسئله با انجام آزمایش اتوماتیک غیر مخرب همزمان با نورد ترکیب شده، تا از ایجاد اختلال در حین عملیات به صورت اتوماتیک جلوگیری شود. نورد کامپوزیت ها هیچ اصل جدید خاصی را در بر نمی گیرد. تنها توجه ویژه به جدول زمانی نورد و آماده سازی موارد بایستی مورد توجه قرار بگیرد.

به علت آنکه پودر راحت ترین صورت ماده است که قابل شکل دهی می باشد، نورد مستقیم پودرها در مقایسه با زمان های قبل از موارد اقتصادی مورد علاقه است. از آنجاکه هزینه تغییر شکل با معرفی روش های اقتصادی کاهش می یابد، انتظار می رود نورد به صورت پاششی مورد توجه ویژه قرار بگیرد. یک تکنیک نورد پاششی که نسبتاً توسعه یافته است، آن است که برای مثال یک ورق فولادی نازک با پاشش پودر فولاد و محکم شدن آن توسط عملیات نورد در دمای بالا تولید می شود [14-1]. در این روش در واقع می توان ورق های کامپوزیت با خصوصیات مختلف شیمیایی یا مکانیکی در ضخامت های مختلف تولید نمود.

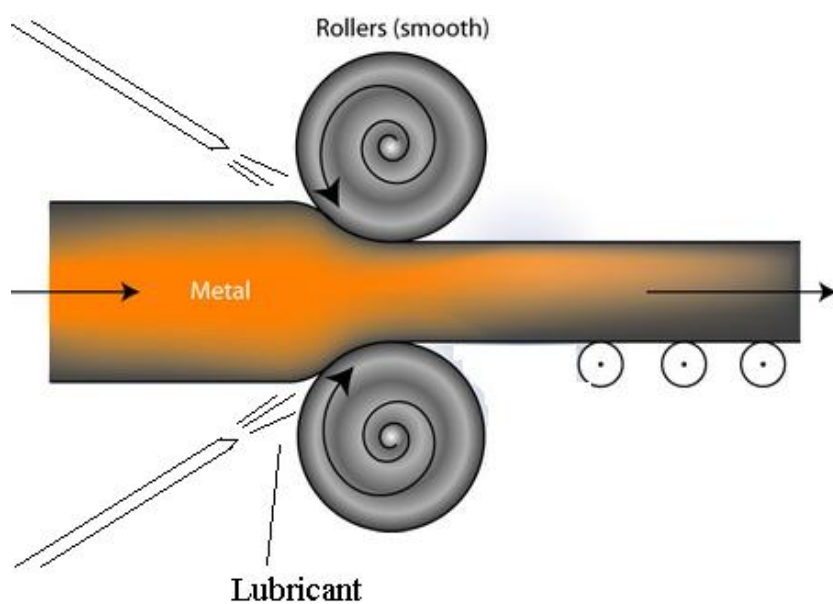
مراجع

- [1-1] Ascough, H. H., 'Improvements in wide strip mills', *Sheet Metal Ind.*, 40, No. 430, 117et seq., 1963.
- [2-1] Anon, 'Widest rolling mill for aluminium strip - British Aluminium Co. Falkirk', *Metal Treatment and Drop Forging*, Dec. 1961, p. 514.
- [3-1] Sendzimir, M. G., 'The Sendzimir cold strip mill', *J. Metals*, 8, 1,154-1,158, 1956.
- [4-1] Bland, D. R. and Ford, II., 'The calculation of roll force and torque in cold strip rolling with *tensions*', *Proc.Inst. Mech. Engrs.*, 159, 144-153, 1948.
- [5-1] Siebel, E. and Lueg, W., 'Measurement of stress in roll gap', *Stahl und Eisen*, 53, (14), 346-352, 1933.
- [6-1] Siebel, E. and Lueg, W., 'Untersuchungen uber die Spannungsverteilung im Walzspalt', *Mitt. K. W.Inst. Eisenforschung, Dusseldorf*, 15,1-14, 1933.
- [7-1] Hitchcock, J. B., 'Elastic deformation of rolls during cold rolling', ASME Research Publication *Roll Neck Bearings*, 1935.
- [8-1] Ford, B., Ellis, F. and Bland, D. R., 'Cold rolling with strip tension, Part II: Comparison of calculated and experimental results', *J. Iron and Steel Inst.*, 171,239-245, 1952. 9.10
- [9-1] Bland, D. R. and Ford, II., 'Cold rolling with strip tension, Part III: An approximate treatment of the elastic compression of the strip', *J. Iron and Steel Inst .*, 171,245-249,1952.
- [10-1] Tong, K. and Sachs, G., 'Roll separating force and minimum thickness of cold.rolled strips', *J. Mech. Phys. Solids*, 6,35-46,1957.
- [11-1] Cox, quoted by C. W. Starling, ref. 9.14, p. 57.
- [12-1] Ekelund, S., 'The analysis of factors influencing rolling pressure and power consumption in the hot rolling of steel', *Steel*, 93, Nos. 8-14, 1933 (translated from *Jernkontorets Ann.*, Feb. 1927, by B. Blomquist).
- [13-1] Davies, C. E. quoted by L. R. Underwood, 'Rolling mills, methods of roll load and power calculation', *Metal Ind.*, Feb. 27 et seq., 1948.

- [14-1] Singer, A. R. E., 'Spray rolling of metals.' *Prod. Eng.*, 51, 98-104, 1972
- [15-1] Rowe, G. W., 'Principles of Industrial Metalworking Processes', 2th ed, London: Edward Arnold Press, 1968.
- [16-1] Amitabha, G.; Asok, K. M., 'Manufacturing Science', 4th ed, New Delhi: East-West Press, 1991
- [17-1] Hosford, W. F.; Caddell, R. M., 'Metal Forming', 1th ed, US: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1983.
- [18-1] A. A. Mottahedi, [Investigation of Phase Transformation of Forged Steel Cold Rolls Due to Heat Affecting and Prevent its Failure], Defect and Diffusion Journal, 2009,
- [19-1] A. A. Mottahedi, [Investigation of locally defected of cold work forged Steel rolls in nonferrous rolling technology], KMCM2007, International Joint conference on Knowledge management for composite material, Düsseldorf, Germany, 3-6 July 2007
- [20-1] Ali Akbar Mottahedi, Mahdi Mottahedi [Investigation of Heat Affected and Phase Transformation of Sorbite to Troostite on Decreasing Fracture Toughness of Cold Rolls Steels], ICF12 2009 12th International Conference on Fracture 12-17 July 2009, Ottawa, Canada,
- [21-1] بررسی مسائل غلتک‌های نورد آهن‌گری شده و روش نگهداری آنها در صنایع نورد، علی‌اکبر متحدی، گروه کارخانه‌های تولیدی نورد آلومینیوم اراک، اراک، ایران، ۱۳۶۷

فصل دوم

اثر کاهش ضخامت، سرعت غلتک و ویسکوزیته روانکار بر اصطکاک
در نورد سرد



فهرست علامات فصل

H و h ضخامت ورودی و خروجی به ترتیب

L طول تماس تصویر شده

P نیروی جدا کننده دو غلطک صافی

R^* شعاع تغییر یافته غلطک

R_a صافی سطح میانگین

S_h لغزش از جلو

$2K$ حد جاری شدن میانگین (سیلان میانگین) هر پالس

w عرض ورق

α زاویه کمان تماس

μ ضریب اصطکاک

Forward slip لغزش از جلو

Backward slip لغزش به عقب

۲-۱- مقدمه

اثرات کاهش ضخامت، سرعت غلتک، نوع روانساز و ویسکوزیته بر روی نیروی جداکننده غلتک‌ها و صافی سطح ورق نورد شونده در طول عملیات نورد سرد آلومینیوم بررسی شد. افزایش سرعت یا ویسکوزیته باعث کاهش لغزش از جلو و نیز کاهش ضریب اصطکاک می‌شوند. نیروی بین دو غلطک با استفاده از روانساز کاهش پیدا می‌کند. افزایش کاهش ضخامت، افزایش در لغزش از جلو را نتیجه می‌دهد. صافی سطح ورق نورد شده به مقدار زیادی به صافی سطح غلطک و ناحیه تماس بستگی دارد. مکانیزم عمده تاثیر گذار در این مسئله به حبس شدن روانساز در ناحیه خاصی از منطقه نورد است. مهمترین خاصیت تاثیر گذار یک روانساز در واقع ویسکوزیته آن است. هر دوی روانسازهای طبیعی و مصنوعی به نظر می‌رسد که پارامترهای نورد را به یک میزان تحت تاثیر قرار می‌دهند. نتایج این تحقیق می‌تواند صنایع را در انتخاب روانسازهای طبیعی یا مصنوعی یاری دهد.

سرعت غلتک، صافی سطح اولیه، کاهش ضخامت و ویسکوزیته روانساز از ساده‌ترین پارامترهای قابل کنترل در نورد سرد هستند. ضخامت نهایی هر پاس نورد با تغییرات سرعت نورد تغییر می‌یابد^[۱-۲]. هر چه سرعت کمتر باشد ضخامت ورق نهایی کمتر خواهد بود. تحقیقات بسیاری نیز انجام شده که نشان می‌دهد با افزایش سرعت غلتک، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.^[۲-۲۰]

۳، ۴-۲۰، ۵-۲۰ آقای ساکای^۱ نشان داده است که صافی سطح ورق با افزایش سرعت غلتک، افزایش می‌یابد^[۴]. بعلاوه آنکه صافی به مکانیزم اصطکاکی موجود بین ورق و غلتک نیز وابسته است. ضمناً با افزایش کاهش سطح (افزایش تغییر ضخامت در هر پاس نورد)، صافی سطح میانگین کاهش می‌یابد^[۲-۷]. با این حال این فاکتور اخیر در منبعی دیگر دقیقاً متناقض ذکر شده است^[۲].

۶. که این مساله شاید به خاطر خواص روانساز و عملیات نورد بوده که باعث نشده ضخامت لازم از روغن بین ورق باقی بماند. همچنین با افزایش ویسکوزیته روانساز، صافی سطح افزایش می‌یابد^[۸-۹، ۲-۱۸]. در عین حال پرداخت بالای سطح غلتک نیز باعث افزایش اصطکاک می‌گردد^[۲].

۱۱، ۲. در نورد سرد، روانسازی معمولاً به عوامل پیچیده‌ای وابسته است^[۸]. تغییرات در سختی فلز

^۱ Sakai

^۲ این موضوع که افزایش پرداخت سطح غلتک باعث افزایش اصطکاک می‌گردد مورد وثوق نگارنده نیست و چنین پدیده‌ای را تا کنون در عمل مشاهده نکرده است با این همه به منظور توجه و بررسی سایر محققین ذکر شده است.

، رژیم انتقال روانساز و تغییر فرم پلاستیک در طی عملیات نورد همه در صافی و پرداخت سطح ورق در حال نورد به صورت چند جانبه موثرند. شاید مهمترین خصوصیت یک روانساز ویسکوزیته آن باشد که با افزایش آن ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد^[۲-۳، ۵-۲، ۱۳]. اکثر محققین به این نتیجه رسیده‌اند، آنچه که به نظر ناقص می‌رسد، توصیف کاملی از روانساز است. ویسکوزیته تقریباً توسط همه بیان شده، با این حال ترکیبات آن‌ها و افزودنی‌های آن اغلب به صورت کامل بیان نمی‌شود. هدف این بخش نیز این است که به چه دلیل و تحت چه شرایطی روانساز مصنوعی ممکن است با روغن‌های طبیعی در فرایندهای شکل‌دهی فلزات جایگزین شود و این مساله توجه ویژه به انتخاب روانساز را اجتناب ناپذیر می‌کند. در این بخش پاسخ برخی پرسشها جستجو می‌شود.

اولاً آیا پارامترهای نورد برای مثال نیروی جداکننده غلتک‌ها (نیروی نورد)، کشش از جلو و صافی سطح ورق نورد شده، به نوع روانساز (مصنوعی یا طبیعی بودن) بستگی دارد؟ ثانیاً آیا می‌توان تفاوت‌های بین این روانسازها را با بررسی تاثیر آن‌ها بر روی پارامترهای فوق کشف نمود؟

در این بخش نتایج اولیه و پاسخ‌های بعدی به این سوالات ارائه شده است.

۲-۲- بررسی آزمایشگاهی اصطکاک در نورد

آزمایش بر روی یک دستگاه نورد دو غلتکه در بخش مهندسی مکانیک دانشگاه واترلو انجام شده است. دستگاه نورد به یک موتور ۱۱ کیلو واتی جریان مستقیم توسط یک جعبه‌دنده چهار سرعته مجهز بوده است. سرعت توسط یک منبع قدرت SCR کنترل می‌شود و از ۲۰ میلیمتر بر ثانیه تا ۱۱۰۰ میلیمتر بر ثانیه متغیر است. ماکزیمم بار مجاز ۸۰۰ کیلونیوتن است. دستگاه نورد به دو حسگر مجهز شده است که زیر پیچ تنظیم نورد قرار گرفته‌اند. غلتک‌ها با ۱۵۰ میلیمتر قطر و ۲۰۰ میلیمتر طول با سختی سطحی^۱ ۹۵ شور و با ۱۲ خط به فاصله ۳۹/۳ میلیمتر از یکدیگر برای اندازه‌گیری لغزش از جلو در طول فرایند نشان گذاری شده‌اند. صافی سطح میانگین غلتک بالا ۵/۱ میکرون در جهت محیطی و ۵/۱۴ میکرون در جهت عرض است. قطعات نورد یک آلومینیوم آنیل شده AA1100H14 که تقریباً در شرایط H0 قرار دارد و

¹ Shore

آلومینیوم AA6061-T6 که ترکیب شیمیایی آن کاملاً مشخص است. ضخامت و عرض نمونه AA1100-H14 به ترتیب ۶/۳۷ و ۵۰ میلیمتر و برای AA6061-T6 به ترتیب ۳/۱۸ و ۳۸ میلیمتر است. طول نمونه ۲۰۰ میلیمتر، سختی سطح ویکرز AA1100H-14، ۳۷/۴، برای AA6068-T6، ۱۰۸ است. روانسازها ترکیبی از هیدروکربن‌های پارافینی و نفتالینی می‌باشند (روانساز شماره ۱). روانساز دیگر (شماره ۲) هیدروکربن مصنوعی استراست. هر دو آن‌ها با افزودنی‌های یکسانی آمیخته شدند. ترکیب و خصوصیات این روانسازها در جداول ۱-۲ تا ۴-۲ آمده است.

جدول ۱-۲- اجزا مختلف روانساز و افزودنی‌های موجود در آن.^[۳-۲]

Lubricant	1 (Vol %)	2 (Vol %)
Base oil A	40 64	-
Base oil B	56 11	-
Base oil C	-	96 75
Friction modifier A	1 30	1 30
Friction modifier B	1 23	1 23
EP/AW	0 72	0 72
Anti-oxidant	0 20 wt%	0 20 wt%

جدول ۲-۲- اجزا مختلف روانساز و افزودنی‌های موجود در آن.^[۵-۲]

Lubricant component	Description
Base oil A	Paraffinic and/or naphthenic hydrocarbon
Base oil B	Mixture of paraffinic hydrocarbons
Base oil C	Ester synthetic lubricant
Friction modifier A	Fatty alcohol derived from vegetable oil
Friction modifier B	Fatty acid derived from tallow
EP/AW	Phosphorous containing additive with extreme pressure/antiwear properties
Anti-oxidant	Anti-oxidant

جدول ۳-۲- خصوصیات روانساز با افزودنی [۵-۲]

Lubricant No	Kinematic viscosity (mm ² /s)		Density (kg/m ³) at 15°C
	at 40°C	at 100°C	
1	7 15	2 16	841 3
2	8 93	2 67	929 8

جدول ۴-۲- اجزا و خصوصیات روانساز بدون افزودنی [۵-۲]

Lubricant No	Kinematic viscosity (mm ² /s) at 37.8°C	Proportions (%)	
		SAE 5	SAE 60
3	23 32	100	0
4	37 0	82	18
5	61 9	60	40
6	105 0	42	58

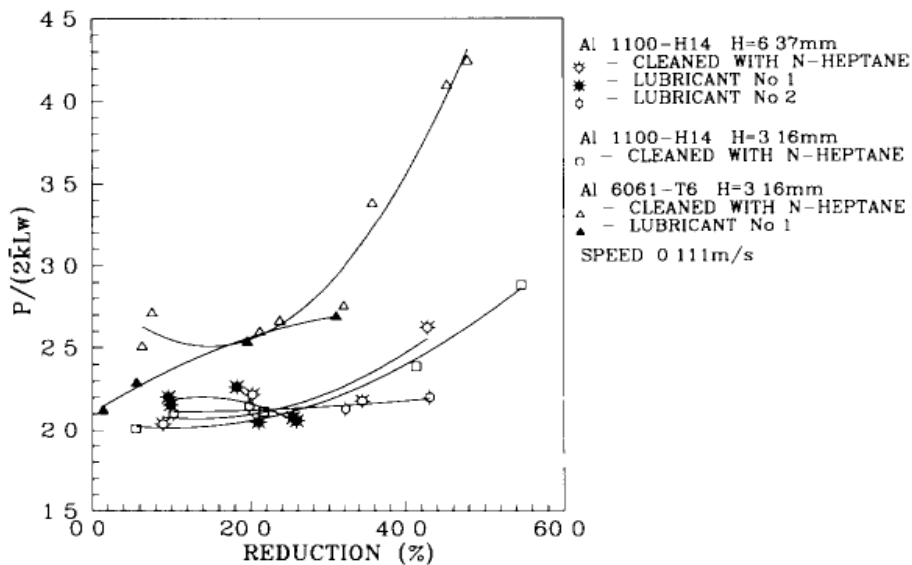
در طول عملیات نورد سرد خشک، غلتک و قطعه کار با ان-هپتان^۱ قبل از هر پاس گریس زدایی می‌شوند. در زمان نورد با روغن، روانساز به سطح قطعه کار و غلتک زده می‌شود. یک تکه کاغذ فشرده شده روغنی برای مالیدن روغن به صورت کاملاً یکنواخت بر روی سطح غلتک و قطعه کار استفاده شد. سپس قطعه کار توسط ان-هپتان گریس زدایی شد. نتایج آزمایش به شرح مبحث زیر آمده است.

۳-۲- اثرات عوامل مختلف در روانکاری نورد

۳-۲-۱- اثر کاهش ضخامت

¹ N-heptane

نیروی غلتک - اثر افزایش و کاهش ضخامت بر نیروی جدا کننده دو غلتک در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. نتایج مطابق آنچه که مورد انتظار بود پیش رفت. نیرو زمانی که ورق‌های تمیز نورد شدند بیشترین بود. اعمال روانساز چه به صورت طبیعی یا مصنوعی نیرو را به مقدار زیادی مخصوصا در کاهش ضخامت‌های بیشتر از ۳۵٪ کاهش می‌دهد. هر دوی روانسازها تقریبا اثر یکسانی بر روی نیروی جدا کننده غلتک داشتند. در کاهش ضخامت‌های کم، روغن با ویسکوزیته کم باعث می‌شود که عدم حضور یا حضور روانساز بر روی نیروی غلتک بی تاثیر جلوه کند و با استفاده از روغن‌های معدنی در هر تغییر ضخامتی بارهای کوچک مشاهده می‌شود. تفاوت بین نتایج بدست آمده در استفاده از روانساز مصنوعی یا طبیعی تقریبا قابل اغماض است.



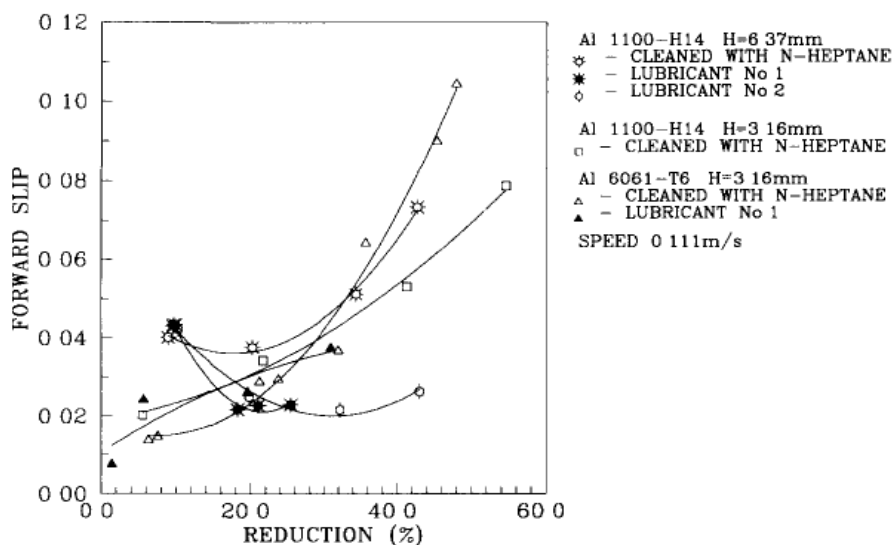
شکل ۱-۲ - نیروی جداکننده دو غلتک در مقابل مقدار درصد کاهش ضخامت [۹-۲]

لغزش از جلو: رابطه لغزش از جلو با تغییر ضخامت توسط شکل ۲-۲ توضیح داده شده است. معرفی یک روانساز مصنوعی یا طبیعی اندازه لغزش از جلو را در مقایسه با حالتی که از روانساز استفاده نمی‌شود، کاهش می‌دهد، که نشان دهنده وجود مکانیزم‌های متفاوت اصطکاکی در منطقه تغییر فرم است. لغزش از جلو به نظر می‌رسد که با افزایش کاهش ضخامت در مورد تماس فلز با فلز افزایش می‌یابد، با اینحال در زمانی که از روانساز استفاده می‌شود تا رسیدن به

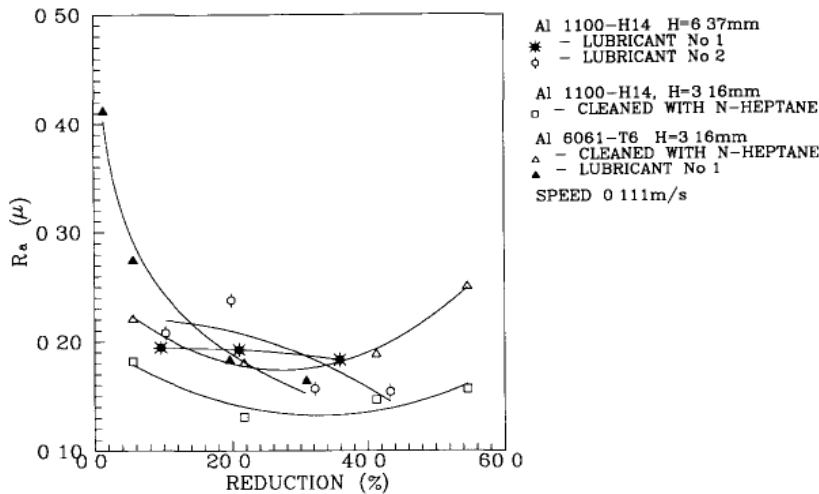
حالت پایا مقدار آن کاهش می‌یابد. هر دو روانسازها به مقدار مساوی در کاهش لغزش از جلو موثراند.

صافی سطح: شکل ۲-۳ تغییر در صافی سطح در مقابل کاهش ضخامت برای هر دو ماده را نشان می‌دهد. برای نمونه صافی سطح AA6061-T6 ابتدا کاهش می‌یابد، ولی به نظر می‌رسد که در کاهش ضخامت‌های بالاتر به یک مقدار پایسته‌ای می‌رسد. برای نمونه صافی سطح در آلیاژ AA1000-H14 با تغییر ضخامت‌های مختلف تغییر چندانی نکرده که نشان می‌دهد سختی سطح فلز در اینجا نقش بازی می‌کند.

همچنانکه در نتایج تحقیقات متفاوتی گزارش گردیده است، صافی سطح نهایی تا حدودی بستگی به مکانیزم روغنکاری در منطقه تماس دارد. اگر روانساز هیدرودینامیکی باشد، صافی سطح با کاهش ضخامت به علت تغییر فرم آزاد سطح، افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۲- لغزش از جلو (forward slip) در مقابل مقدار درصد کاهش ضخامت [۹-۲]



شکل ۲-۳- صافی سطح ورق خروجی در مقابل مقدار درصد کاهش ضخامت [۹-۲]

۲-۳-۲- اثر سرعت نورد (غلtek)

سه سرعت مختلف و دو ماده برای انجام این آزمایش انتخاب شدند. روانساز شماره ۱ در فرایند مورد استفاده قرار گرفت. شکل‌های ۲-۴ و ۲-۵ تغییر در صافی سطح و لغزش از جلو (شکل ۲-۴)، ضریب اصطکاک و نیروی جداکننده دو غلtek (شکل ۲-۵) را در مقابل سرعت عملیات نورد برای هر دو ماده AA6061-T6, AA1100-H14 نشان می‌دهند. با افزایش سرعت، تنش فشاری نوردی جلویی و ضریب اصطکاک تمایل به کاهش را برای هر دو ماده نشان می‌دهند.

این ویژگی می‌تواند به این علت باشد که روغن بیشتر در فاصله بین دو غلtek در طول کمان تماس محبوس می‌شود و با افزایش سرعت، روغن بیشتری محبوس و فشرده می‌شود. نتیجتاً، اصطکاک در طول کمان تماس در سرعت‌های بالاتر کاهش می‌یابد [۱۵-۲، ۲-۲، ۱-۲]. در سرعت‌های بالاتر به خاطر در تله افتادن روغن، سطح راحت‌تر تغییر فرم می‌یابد. از این رو نتیجتاً صافی سطح انتهایی (محصول خروجی) در سرعت‌های بالاتر بیشتر می‌باشد.

در شکل ۵ با تغییرات سرعت نیروی نورد تغییر چندانی نمی‌کند. اثر سرعت نورد بر نیروی نورد از دو جهت می‌باشد. با افزایش سرعت، اصطکاک و نیروی حاصل از حضور روغن بیشتر در فاصله بین دو غلtek کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش سرعت باعث سختی مواد بویژه مواد نرم در

فرایند کرنش سختی می‌شود. افزایش یا کاهش نسبی نیروی جدا کننده غلتک به این بستگی دارد که کدامیک از مکانیزم‌ها در یک فرایند خاص غالبند.

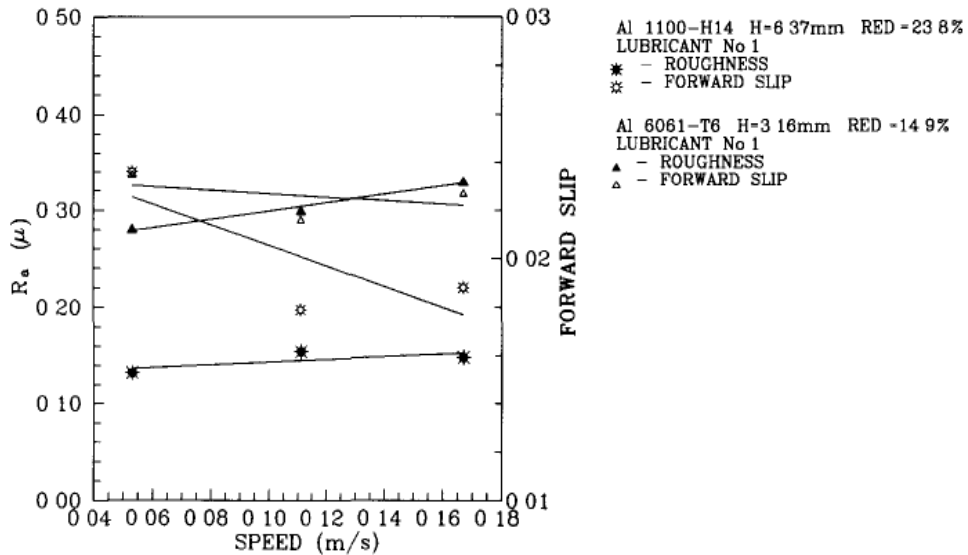
جالب است توجه شود که برای آلومینیم AA1100-H14 که در دمای 350°C برای مدت ۵ دقیقه آنیل شده بود و در تست‌های فشار حساسیت نسبت به کار سختی در آن مشاهده شده بود، نیرو با افزایش سرعت، به علت اثر معکوس کاهش نیرو با در تله افتادن روغن بین زاویه گاز گیری غلتک، تغییر چندانی نکرد. برای آلیاژ AA6061-T6 که نسبت به کرنش سختی غیر حساس بود، با افزایش سرعت، نیرو کاهش یافت. با توجه به آنچه بیان شد، ضریب اصطکاک، تنش فشاری نوردی جلویی، صافی سطح نهایی ورق و نیروی جداکننده غلتک‌ها، با تغییر در سرعت، به مقدار اندکی تغییر پیدا کرد.^۱

۲-۳-۳- اثر ویسکوزیته‌های مختلف روغن

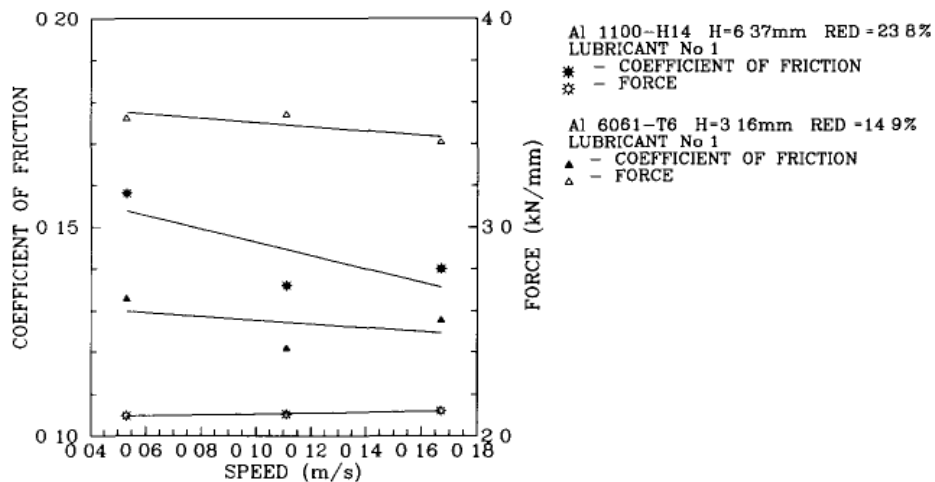
آزمایش‌های مختلف در این رابطه در دو کاهش سطح (۲۴/۷٪ و ۳۶/۱٪) با روانسازهای مختلف انجام شده است. برای روانساز با افزودنی‌ها، صافی سطح اولیه نمونه در جهت نورد، که با کاغذ سنباده شماره ۴۰۰ بوجود آمده است، در $R=0.39$ میکرون نگاه داشته می‌شود و با اندازه گیری‌های مختلف در طول دوره آمادگی کنترل می‌شود. برای روانساز بدون افزودنی هیچ عمل خاصی بر روی سطح انجام نشد. آزمایش‌ها در سرعت خطی ۰/۱۱۱ متر بر ثانیه انجام شد. فلز استفاده شده در آزمایش AA1100-H14 بود. شکل ۸ تغییر در لغزش از جلو و نیروی جدا کننده غلتک را با تغییر در ویسکوزیته نشان می‌دهد. هر دوی لغزش جلویی و نیروی جدا کننده غلتک با افزایش ویسکوزیته کاهش می‌یابند. بررسی‌های دیگر انجام شده نیز این مسئله را تصدیق می‌کند [۲-۳، ۹-۱۱].

دو سری روانساز در اینگونه آزمایش‌ها استفاده می‌شوند. ابتدا روغن با افزودنی‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. سپس روغن بدون افزودنی که مستقیماً از ترکیب SAE5، SAE60 در مقادیر ویژه که در جدول ۲-۴ آورده شده است، استفاده شد. با آماده سازی روانساز، لغزش از جلو با افزایش ویسکوزیته چه با حضور و چه با عدم استفاده از افزودنی کاهش می‌یابد.

^۱ در بعضی مواد که خاصیت سوپرپلاستیک (super plasticity) دارند نیز با افزایش سرعت نورد نیروی نورد کاهش می‌یابد.



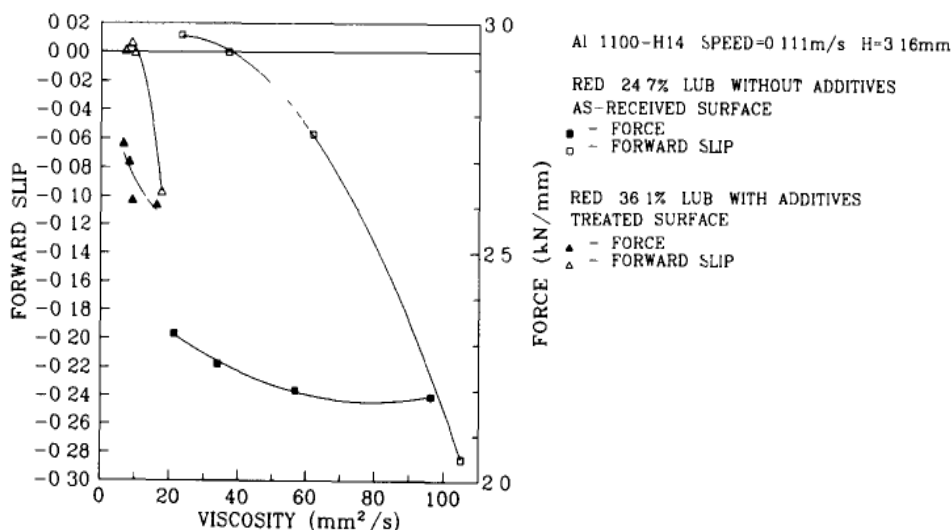
شکل ۴-۲- اثر سرعت نورد بر صافی سطح و لغزش جلویی [۹-۲ و ۱۰-۲]



شکل ۴-۵- اثر سرعت نورد بر ضریب اصطکاک و نیروی نورد [۹-۲ و ۱۰-۲]

ملاحظه گردید که ورق‌هایی که به صورت غیر مستقیم ساییده شده‌اند، به حبس کردن روغن در فضای بین دو غلتک تمایل دارند و لغزش از جلو در ویسکوزیته پایین‌تر منفی می‌شود (شکل ۴-۶). این مسئله زمانی که از روانساز بدون افزودنی استفاده می‌شود، متفاوت می‌شود؛ که

در اینصورت لغزش از جلو از آنجا که تست بر روی سطح بدون عملیات انجام شده در ویسکوزیته‌های بالاتر منفی می‌شود. تغییرات نیروی وارد بر غلتک بازمه با لغزش از جلو توافق دارد. این مورد باید مورد توجه قرارگیرد که وقتی روغن به اندازه 105 میلیمتر مربع برپائیه استفاده می‌شود، فرایند نورد بسیار ناپایا شده و لغزش غلتک بر روی ورق اتفاق می‌افتد. چندین نشانه بر روی غلتک این حالت لغزش را تایید می‌کند. کاهش لغزش از جلو با افزایش ویسکوزیته با تئوری پایه‌ای روانساز همخوانی دارد. معمول است که به منظور تشکیل یک فیلم روغن، سطح ابزار و روغن باید به نوعی به شکل گوه مانند باشد. بعلاوه، روانساز باید ویسکوزیته ویژه ای داشته باشد و الا نمی‌تواند در یک تماس به دام بیفتد و فیلم موثر را ایجاد نماید. از آنجا که ویسکوزیته افزایش می‌یابد، فشردن روغن در ناحیه تماس سخت خواهد بود، بنابر این لغزش جلویی با افزایش ویسکوزیته کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۶- لغزش جلویی نورد و نیروی وارد بر غلتک در مقابل ویسکوزیته [۱۷-۲]

۴-۲- مروری بر اثر عوامل مختلف اصطکاکی بر نیروی نورد

در بررسیهای انجام شده برای بدست آوردن اثر تغییر ضخامت، سرعت غلتک، نوع روانساز و ویسکوزیته بر روی نیروی جداکننده غلتک‌ها، لغزش جلویی نورد و صافی سطح دو آلیاژ مختلف

آلومینیوم با استحکام‌های متفاوت همراه با دو روانساز مختلف از نوع طبیعی و مصنوعی بعضی نتایج عمومی و ویژه که از این نقطه نظر به دست آمده اند نشان می‌دهند که به صورت عمومی، این حضور یا عدم حضور روانساز است که به طور ویژه بر روی نیروی وارد بر دستگاه نورد تاثیر می‌گذارد، و طبیعی یا مصنوعی بودن روانساز چندان تاثیرگذار نیست. بلکه مقدار و روانسازی مورد استفاده مهمتر به نظر می‌رسد.

همانطور که از قبل مشاهده شده است، استفاده از یک روانساز باعث کاهش نیروی جدایی دو غلتک می‌شود. لغزش جلویی نورد با افزایش تغییر ضخامت افزایش می‌یابد، البته اثر آن کمتر از اثر روغن و یا روانساز است. مکانیزمی که ظاهراً این پدیده‌ها را کنترل می‌کند، مقدار روغنی است که در ناحیه تماس گیر کرده است، همچنان که اگر سطح ورق نیز زبر باشد این اثر بیشتر مشهود است.

لغزش جلویی نورد، ضریب اصطکاک و نیروی جدایش غلتک با افزایش ویسکوزیته روانساز کاهش می‌یابد.

لغزش جلویی منفی در نورد و یا در بعضی فرایندهای نورد ناپایا زمانی اتفاق می‌افتد که ویسکوزیته از مقدار ۱۰۵ میلیمترمربع برثانیه تجاوز کند. در این حالت غلتک‌ها ورق را گاز نمی‌گیرند و ورق پس زده می‌شود.

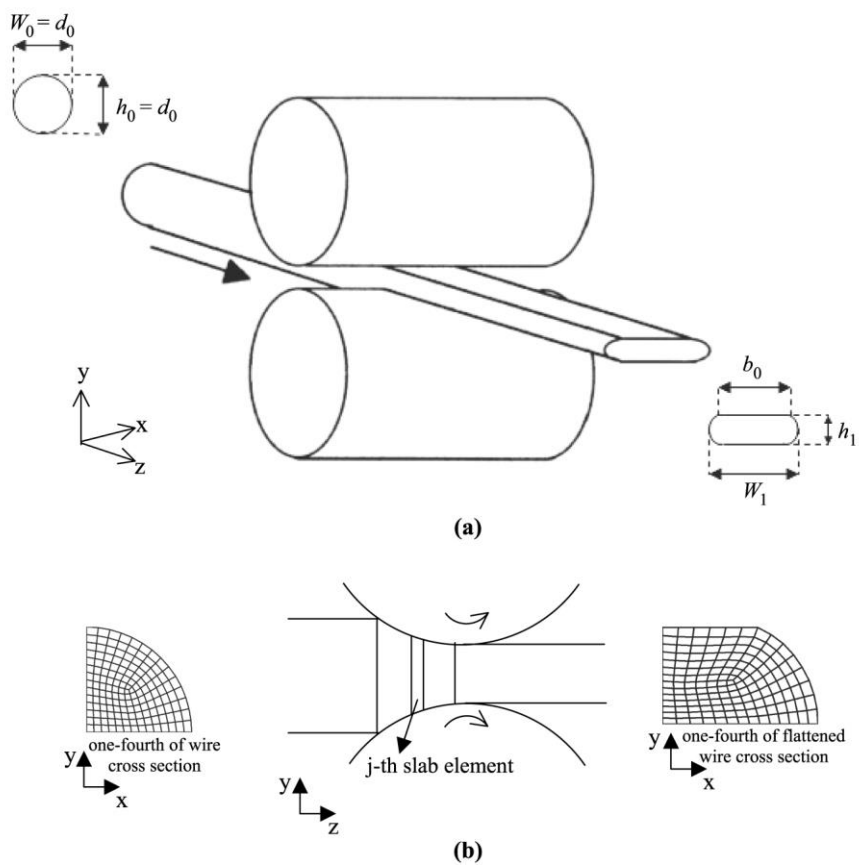
در اشل آزمایشگاهی هیچ تفاوت ویژه‌ای در رفتار دو نوع روانساز طبیعی و صنعتی مشاهده نشده است. اما در اشل صنعتی به علت‌های اقتصادی و فنی کارکردهای مختلفی از این دو نوع روغن دیده می‌شود.

مراجع

- [1-2] MD Stone, ASME, J Basic Eng, 81 (1959) 681
- [2-2] A N Karagmzls and J G Lenard, Eurotrtb 85, Lyon, France, 1985, pp 213-2 19
- [3-2] J P O'Donoghue and A Cameron, ASLE Trans, 9 (1966) 186
- [4-2] T Sakai, Y Salto and K Kato, Proc Int Con[on Steel Rollhng, Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1980 pp 1120-1131
- [5-2] T K Huang and C T Hsu, Technol Training, 13 (1988) 22 (m Chinese)
- [6-2] A Azushlma, Bull JSME, 21 (1978) 1402
- [7-2] H Yamamoto, Y UebomandK Kakapma, J JSTP, 25 (1984) 799
- [8-2] J A Schey, Tmbology m Metalworkmg-Fr~ctmn, Lubr~catmn & Wear, Amerman Society of Metals, Metals Park, Cleveland, OH, USA, 1983
- [9-2] T Matsushlta, K Takasuka, K Matsul, M Kageyama, Y Okamoto and H Kobayashl, R&D, Kobe Steel Eng Rep , Met Roll Technol , 33 (1983) 26
- [10-2] PW WhlttonandH Ford, m Proc Inst Mechan~cal Engineers, 169 (1955) 123-140
- [11-2] S Kondo, ASME, J Lubr Technol, 97 (1975) 37
- [12-2] S S LuandY H Chuang, J Tmb, 107 (1985) 522
- [13-2] T Mlzuno, K Matsubara and H Klmura, Bull JSME, 12 (1969) 359
- [14-2] Z Y Zhao, (Ed), Theory of Plastic Deformation of Metals, Metallurgical Press, Belpng, China, 1980, (m Chinese)
- [15-2] W L Roberts, Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, New York, 1978
- [16-2] JV ReldandJA Schey, ASLETrans,21 (1978) 191
- [17-2] J G Lenard, J Synth Lubr, 7 (1990) 193
- [18-2] Zhang, S.; Lenard, J.G., 'The effects of the reduction, speed and lubricant viscosity on friction in cold rolling', Journal of Materials Processing Technology, 30 (1992) 197-209

فصل سوم

آنالیز المان محدود فشار نورد در عرض ورق در عملیات نورد سرد



۳-۱- مقدمه (معرفی مدل)

برای دستیابی به کیفیت بالای محصول و کم کردن هزینه، ضروری است که محاسبات اولیه برای پیش‌بینی پارامترهای موثر در عملیات نورد قبل از عملیات تولید انجام گیرد. فشار غلتک و توزیع آن، برروی ضخامت و شکل نهایی ورق تاثیر گذار خواهد بود. تحقیق بر روی نیروی نورد از دیگر پارامترها مهم‌تر است.

روش‌های اصلی تحقیقاتی برای بررسی تغییرفرم و تنش در غلتک‌ها روش تابع تاثیر و المان محدود هستند، که اخیراً توسعه داده شده‌اند. روش تابع تاثیر اخیراً به طور گسترده در بدست آوردن تغییر شکل و تنش وارد بر غلتک بکار گرفته شده است، اما یک محدودیت در استفاده از مدل وجود دارد. زیرا ضرایب بدست آمده بر اساس معادلات تغییر فرم یک تیر ساده است [۱-۳]. روش المان محدود دو بعدی می‌تواند برای بدست آوردن نیروی فشار در نورد بکار گرفته شود. اما این روش برای شبیه سازی فشار نورد در جهت عرض ورق مناسب نیست. روش المان محدود سه بعدی شرایطی برای ایجاد شبیه سازی بهتر اجزای فیزیکی عملیات نورد ارائه می‌دهد. روش المان محدود سه بعدی دارای کارایی بالا در محاسبات می‌باشد و به صورت گسترده در فرایندهای نورد گرم مورد استفاده قرار گرفته است [۲-۳، ۳-۳، ۴-۳]. در فرایند نورد سرد ورق از اثر تغییر فرم الاستیک غلتک‌ها نمی‌توان صرف نظر کرد، و روش المان محدود الاستیک-پلاستیک سه بعدی نقشی ویژه در مدل سازی نورد سرد ورق بازی می‌کند. دو جنبه برای تحقیق در مورد نیروی غلتک وجود دارد؛ یکی پیش‌بینی نیروی نورد، که با محاسبات نسبتاً دقیق و سریع بدست می‌آید [۵-۳، ۶-۳، ۷-۳]، و تحقیق اصلی که توزیع فشار در جهت نورد را مدل سازی می‌نماید. بسیاری از محققان کارهای قابل توجهی برای بدست آوردن توزیع فشار در جهت نورد با استفاده از روش المان محدود انجام داده اند [۸-۳ تا ۱۳-۳]. جنبه دیگر تحقیق در مورد توزیع فشار در عرض ورق و تمام سطح تماس است. محققین دیگری نیز کارهای ارزنده‌ای در این زمینه انجام داده اند [۱۴-۳ تا ۱۷-۳]. در این میان مورد توجه قرار دادن شکل ورق، لبه‌ها، پوشش‌ها و... در مورد ورق و غلتک به طور ویژه بسیار مهم است. در تحقیق حاضر، فرایند نورد سرد در یک دستگاه نورد ۴ غلتکه با روش المان محدود الاستیک-پلاستیک با استفاده از نرم افزار مارک^۱ مدل شده است. در مدل صورت گرفته، تغییر شکل الاستیک غلتک کاری و پشتیبان، تغییر فرم الاستیک-

¹ Marc

پلاستیک ورق و فشار بین غلتک کاری و پشتیبان مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مدل سازی صورت گرفته، خصوصیات فشار نورد در عرض ورق مورد بررسی قرار گرفت، و چگونگی تغییر آن با پارامترهای مختلف نورد در عرض ورق مورد تحقیق قرار گرفت.

۳-۱-۱-۳- مدل المان محدود

از آنجا که شرایط نورد و خصوصیات آن پارامتری متقارن هستند، یک چهارم از مدل هندسی برای انجام شبیه سازی انتخاب گشت. پارامترهای هندسی مدل در جدول ۳-۱ نشان داده شده‌اند. مدل استفاده شده، مدل اصلاحی^۱ لاگرانژ، معیار تنش سیلان^۲ فن مایسس، و روش تغییر شکل بوده‌اند.

اصطکاک پدیده پیچیده‌ای است که وابسته به خصوصیات سطح مانند صافی سطح، تنش عمودی و سرعت نسبی است. مشهورترین مدل اصطکاکی مدل اصطکاکی کلمبی است. اما این مدل زمانیکه تنش عمودی بالا است اغلب همخوانی صحیحی با نتایج آزمایشگاهی ندارد. اگر تنش و نیروی عمودی بسیار زیاد باشد، طبق مدل اصطکاک کلمبی، نیروی اصطکاک و به تبع آن تنش برشی ناشی از آن، آنقدر زیاد خواهد بود که از تنش سیلان یا حد شکست ماده نیز ممکن است فراتر رود. از آنجاکه این مسئله به صورت فیزیکی امکان پذیر می‌باشد. یک مدل اصطکاکی بر اساس برش چسبنده (sticky) انتخاب می‌شود. مدل اصطکاکی برشی بیان می‌کند تنش اصطکاکی یک بخش از تنش معادل در ماده است.

$$\sigma_f \leq -\mu \frac{\sigma}{\sqrt{3}} t \quad (3-1)$$

$$t = \frac{V_r}{|V_r|} \quad (3-2)$$

در حالیکه σ_f تنش اصطکاکی مماسی مگاپاسکال؛ μ ضریب اصطکاک؛ σ تنش معادل مگاپاسکال؛ t بردار مماسی در جهت سرعت نسبی و V_r سرعت نسبی لغزش است.

^۱ Lagrange

^۲ Von Mises

در معادله ۲-۳، مقدار t به صورت مثبت یا منفی با V_r تغییر می‌کند، و در نتیجه نیروی اصطکاک غیرپیوسته خواهد بود (شکل ۱-۳، $V_c=0$). این غیر پیوستگی در σ_f موجب سختی محاسبات و عدم دسترسی به یک نتیجه همگرا در محاسبات عددی می‌شود. از اینرو یک مدل اصطکاکی برشی اصلاح شده، با استفاده از تابع Arctan بکار گرفته می‌شود.

$$\sigma_f \leq -m \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \text{Arc tan} \left[\frac{V_r}{V_c} \right] \cdot t \quad (3-3)$$

جدول ۱-۳ - پارامترهای هندسی مدل (ابعاد به میلیمتر) [۳-۱]

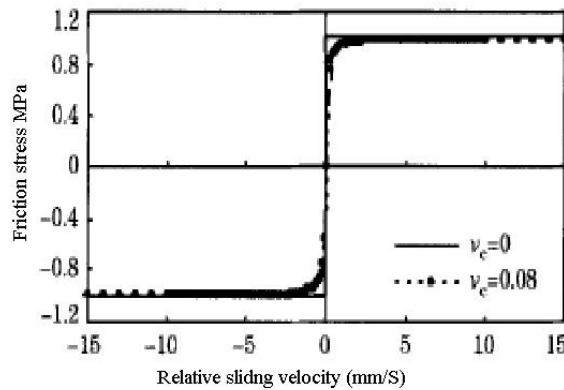
۱۲۰۰	قطر غلتک	غلتک پشتیبان
۱۳۵۰	طول بشکه غلتک	
۷۰۰	قطر گردن غلتک	
۴۷۰	قطر غلتک	غلتک کاری
۱۵۱۰	طول بشکه غلتک	
۲۸۵	قطر گردن غلتک	
۱/۰	ضخامت	ورق
۷۰۰ و ۹۶۰ و ۱۲۳۰	عرض	

جایی که V_c مقدار سرعت نسبی است، لغزش اتفاق افتاده است. مقدار V_c در تعیین اینکه چطور شبیه یک مدل ریاضی، تابع پله را نمایندگی کند، بسیار مهم است. مقدار بالای V_c کاهش موثر اصطکاک را نتیجه می‌دهد. مقدار کوچک آن نیز باعث همگرایی ضعیف می‌شود. در تحقیق مقابل مقدار $V_c=0.08$ است. تقریب‌های استفاده شده در مدل $(m \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 1, |t| = 1)$ و

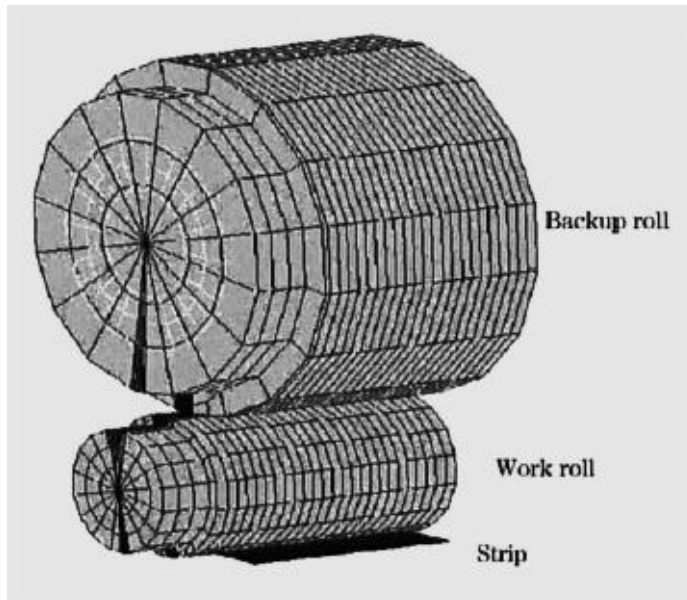
اصطکاک برشی در شکل ۱-۳ نشان داده شده اند.

۳-۱-۲- شبکه بندی المان محدود

غلتک به عنوان یک جسم الاستیک و ورق به عنوان یک جسم الاستیک پلاستیک مد نظر گرفته می‌شود. برای کاهش المان‌ها تنها قسمت تماس غلتک و ورق به قسمت‌های زیادی تقسیم شده‌اند (شکل ۳-۲). المان ۲۰ نودی ایزو پارامتریک، به صورت شش وجهی دلخواه برای ورق و قسمت‌های تماس و المان ۸ نودی برای غلتک انتخاب شد.

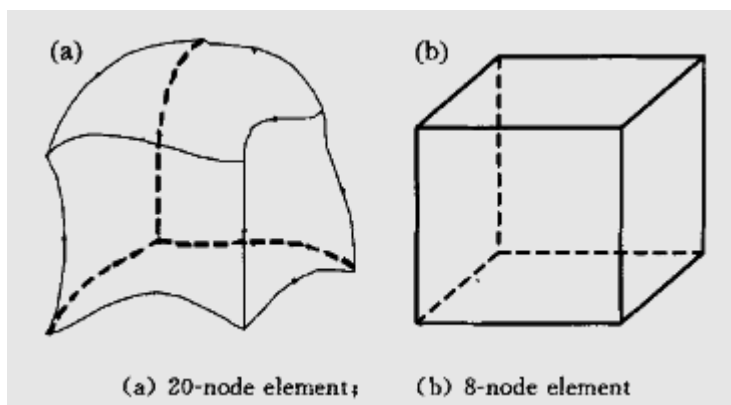


شکل ۳-۱- منحنی اصطکاک برشی [۳-۶]



شکل ۳-۲- مدل المان محدود [۳-۷]

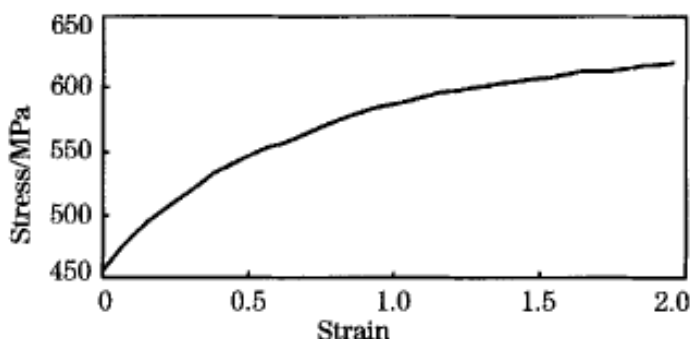
درمقایسه با المان ۸ نودی، المان ۲۰ نودی می‌تواند منحنی واقعی را بهتر مدل کند (شکل ۳-۳). المان ۲۰ نودی برای جایگزینی جابجایی‌ها از میانمایی تابع درجه ۳ استفاده می‌کند؛ بنابراین در تحلیل الاستیک مدلی بهتر از میدان کرنش ارائه می‌دهد. المان ۸ نودی از تابع میانمایی خطی استفاده می‌نماید. بنابراین کرنش در طول المان ثابت خواهد بود، که در واقع مدلی ضعیف از رفتار برشی و خمشی خواهد بود.



شکل ۳-۳- المان شش وجهی دلخواه ایزوپارامتریک [۱۱-۳]

۳-۱-۳- شرایط نورد

منحنی پلاستیک کرنش ورق فولاد منگنز دار در شکل ۴-۳ آورده شده است و خصوصیات فیزیکی مدل در جدول ۲-۳ نمایش داده شده است، همچنین پارامترهای نورد در جدول ۳-۳ ارائه گردیده است.



شکل ۴-۳- منحنی کرنش پلاستیک [۸-۳]

جدول ۳-۲- خصوصیات فیزیکی غلتک و ورق [۳-۳]

غلتک	Young modulus MPa	2.156×10^5
	Poisson ratio	0.3
	Density (Kg/m ³)	7.85×10^3
ورق	Young modulus MPa	2.156×10^5
	Poisson ratio	0.3
	Density (Kg/m ³)	7.85×10^3

جدول ۳-۳- شرایط نورد [۳-۳]

Bending force KN	0.2000 , 400
Forward tension (MPa)	246
Backward tension (MPa)	147
Friction coefficient	0.05
Rolling velocity (mm/s)	9050

۳-۲- نیروی خمشی

بر اساس نتایج مدلسازی فرایند نورد تحت نیروی خمشی مختلف (۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو نیوتن) و ورق‌های با عرض مختلف (۷۰۰، ۹۶۰، ۱۲۳۰ میلیمتر) توزیع فشار نورد در طول عرض ورق بدست می‌آید.

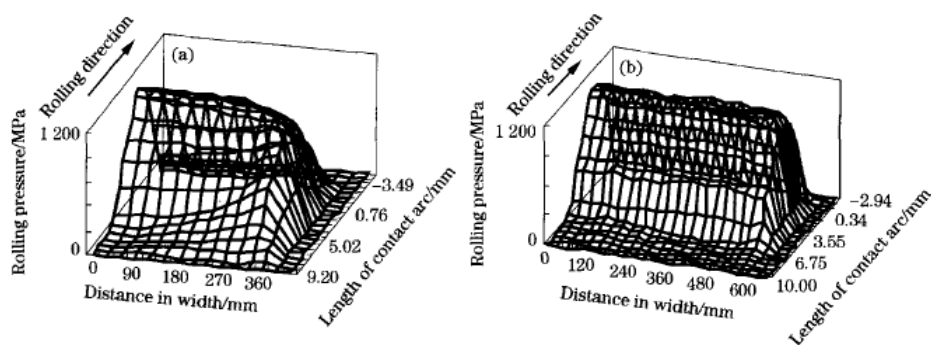
۳-۲-۱- خصوصیات فشار نورد در عرض ورق

توزیع فشار نورد در ناحیه تماس در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-۵ دیده می‌شود، بدون نیروی خمشی، در ناحیه ورودی فشار، نورد از مرکز تا لبه افزایش می‌یابد و در لبه‌ها به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. در نقطه خنثی فشار تغییر کرده و در لبه‌ها کاهش می‌یابد. فشار در ناحیه خروجی نیز شبیه تغییرات فشار در ناحیه ورودی است. از شکل ۳-۵ دیده می‌شود که نیروی خمشی باعث می‌شود که فشار نورد در جهت عرض تقریباً یکنواخت شود.

۳-۲-۲- تاثیر عرض ورق بر توزیع فشار نورد کل

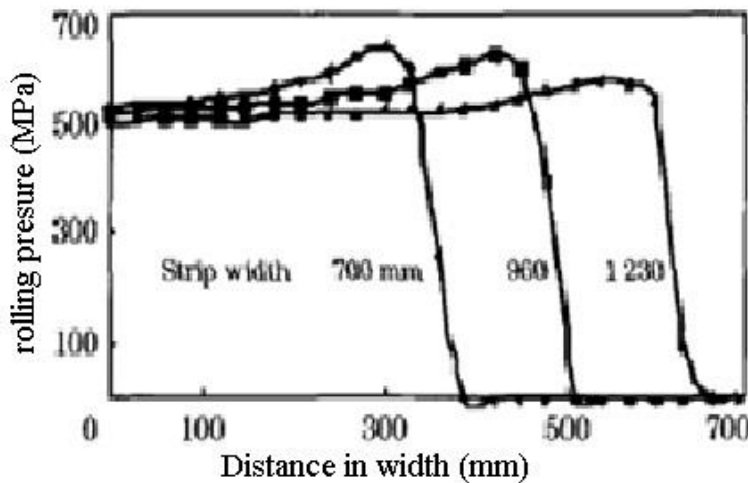
فشار نورد کل با جمع نیروها در جهت نورد به دست می‌آید. توزیع فشار نورد کل در طول عرض ورق برای ورق‌های مختلف در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۳-۶ دیده می‌شود، بدون نیروی خمش، نیروی نورد پیوسته از مرکز تا لبه‌ها افزایش می‌یابد و با افزایش عرض ورق، مقدار افزایش و ماکزیمم فشار نورد کاهش می‌یابد.

با آنالیز اطلاعات از نتایج مدلسازی، زمانیکه عرض ورق ۷۰۰ میلیمتر است، فشار نورد در مکانی به فاصله تقریبی ۱۴۰ میلیمتر تا لبه ورق شروع به افزایش می‌کند، و فشار نورد در فاصله تقریبی ۵۰ میلیمتری تا لبه ورق به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. زمانیکه عرض ورق ۹۶۰ میلیمتر است، نیروی نورد در مکانی تقریباً ۱۵۰ میلیمتر مانده به انتهای ورق شروع به افزایش می‌کند، و نیروی وارد بر غلتک در مکانی تقریباً ۶۰ میلیمتر مانده به انتهای ورق به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. زمانیکه از ورق با عرض ۱۲۳۰ میلیمتر استفاده شد، نیروی نورد در مکان ۱۳۵ میلیمتر مانده به انتهای ورق شروع به افزایش کرده و در ۷۵ میلیمتر تا لبه ورق به مقدار ماکزیمم خود رسید.



(a) Strip width of 700 mm, no bending force; (b) Strip width of 1 230 mm, bending force of 400 kN

شکل ۳-۵- فشار نورد در ناحیه تماس [۱۳-۳]



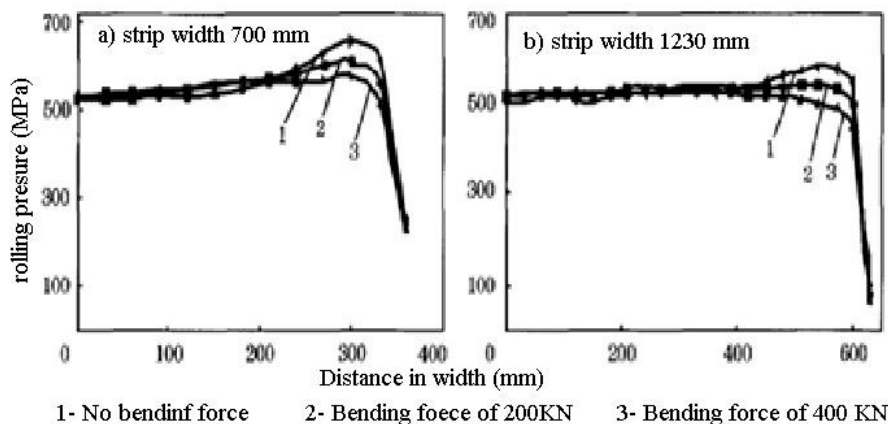
شکل ۳-۶- نیروی نورد در عرض ورق برای پهنای مختلف ورق [۱۳-۳]

همانطور که از اطلاعات بالا دیده می‌شود، بدون نیروی خمش، فشار وارد بر غلتک تا لبه ورق افزایش می‌یابد و هیچ رابطه‌ای با عرض ورق ندارد. برای ورق با عرض‌های متفاوت، مقدار نیروی جدایش دو غلتک در محلی تقریباً ۱۴۰ میلی‌متر مانده به انتهای ورق بوجود می‌آید، و با افزایش عرض ورق، مقدار فاصله محل ماکزیمم فشار تا لبه نیز افزایش می‌یابد، اما این افزایش بسیار محدود است.

۳-۲-۳- تاثیر نیروی خمشی بر روی توزیع فشار نورد

توزیع کلی فشار نورد در طول عرض ورق تحت نیروهای خمشی مختلف غلتک در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-۷ دیده می‌شود، واضح است که نیروی خمش، توزیع فشار نورد را در نواحی نزدیک لبه ورق تحت تاثیر قرار می‌دهد، و با افزایش در نیروی خمش، افزایش در فشار نورد به صورت پیوسته کاهش می‌یابد.

زمانیکه عرض ورق ۷۰۰ میلی‌متر است، افزایش فشار نورد تحت نیروهای خمشی مختلف همچنان وجود خواهد داشت. اما زمانیکه عرض ورق ۱۲۳۰ میلی‌متر بود، افزایش فشار نورد تحت نیروی خمشی ۲۰۰ کیلو نیوتن خیلی کمتر و تحت نیروی خمشی ۴۰۰ کیلو نیوتن تقریباً ناپدید شد. مقدار ماکزیمم فشار نورد نزدیک لبه‌های ورق با افزایش در نیروی خمش کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۷- نیروی نورد در عرض ورق برای نیروهای خمشی مختلف [۱۳-۳]

۳-۳- توزیع فشار نورد

(۱) خصوصیات توزیع فشار نورد در عرض ورق نشان می‌دهد که بدون نیروی خمشی، فشار نورد افزایش می‌یابد و به یک مقدار ماکزیمم در لبه ورق، چه در قسمت ورودی و چه در قسمت خروجی، می‌رسد. در نقطه خنثی فشار نورد هیچ تغییری در مرکز نشان نمی‌دهد، و در لبه‌ها کاهش می‌یابد. نیروی خمشی غلتک می‌تواند باعث پیوسته شدن فشار نورد در جهت عرض ورق شود.

(۲) با افزایش عرض ورق، افزایش فشار در نزدیکی لبه‌ها و مقدار ماکزیمم فشار، کاهش می‌یابد. برای نورد ورق با عرض ۷۰۰ میلیمتر ضروری است نیروی خمشی غلتک ۴۰۰ کیلونیوتن وجود داشته باشد تا فشار را در نزدیکی لبه‌ها پیوسته نگاه دارد؛ اما نورد ورق با عرض ۱۲۳۰ میلیمتر تنها نیازمند ۲۰۰ کیلونیوتن نیروی خمشی برای رسیدن به نتیجه مشابه بود.

(۳) با افزایش نیروی خمشی، افزایش فشار نورد در نزدیکی لبه ورق و مقدار ماکزیمم فشار کاهش می‌یابد. زمانیکه ورق به میزان کافی عریض باشد، با افزایش در نیروی خمشی، فشار نورد تغییر خاصی در کل عرض ورق نمی‌کند.

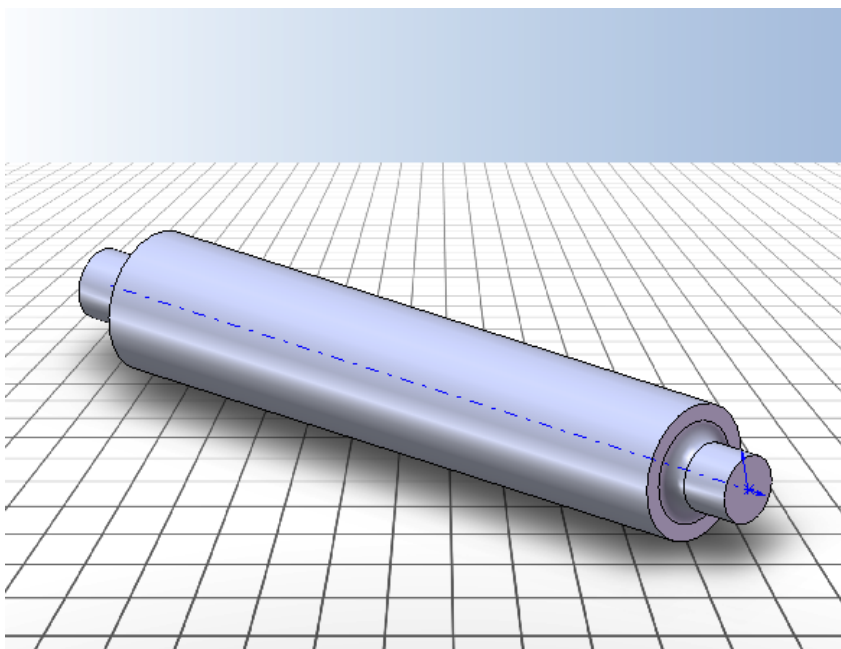
مراجع

- [1-3] Ginzburg Vladimir B. High-Quality Steel Rolling Theory and Practice [MI. New York, USA: Marcel Deker Inc, 1993.
- [2-3] LIU Xiang-hua. Rigid-Plastic FEM and Its Application in Rolling [MI. Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 1994 (in Chinese).
- [3-3] Yuuji Mitai, Hisasi Iribe. Analysis of Strip Rolling by Three Dimensional Rigid Plastic FEM [R]. Tokyo: NIPP Steel,1992.
- [4-3] Xiong S, Liu X, Wang G. Simulation of Vertical-Horizontal Rolling Process During Width Reduction by Full Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Method [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, 6 : 757-765.
- [5-3] Gao H , Ramalingam S C, Barber G C, et al. Analysis of Asymmetrical Cold Rolling With Varying Coefficients of Friction [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(1-2): 178-182.
- [6-3] Jeswiet J. Aspect Ratio, Friction Forces and Normal Force in Strip Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53(3-4): 846-856.
- [7-3] Le H R, Sutcliffe M P F. A Robust Model for Rolling of Thin Strip and Foil [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(10): 1405-1419.
- [8-3] Cavaliere Miguel A, Goldschmit Marcela B, Dvorkin Eduardo N. Finite Element Analysis of Steel Rolling Processes [J]. Computers and Structures, 2001, 79(22-25) : 2075-2089.
- [9-3] Angelov T , Nedev A. Finite-Element Analysis of a Hot-Rolling Problem With Nonlinear Friction [J]. Advances in Engineering Software, 1997, 28(9): 555-561.
- [10-3] Yuen W Y D, Dixon A, Nguyen D N. The Modelling of the Mechanics of Deformation in Flat Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60(1-4) , 87-94.
- [11-3] Liu Y J, Tieu A K, Wang D D, et al. Friction Measurement in Cold Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1-3): 142.145.

- [12-3] ZHU Guang-ming, DU Feng-shan, SUN Deng-yue, et al. FEM Revise of Hitchcock Equation of Calculating Working Roll's Contact Flattening in Cold Strip Steel Rolling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 135-137 (in Chinese).
- [13-3] SUN Deng-yue, DU Feng-shan, ZHU Guang-ming, et al. Accurate and Fast Simulation of Rolling Force Model in Cold Strip Rolling [J]. Iron and Steel, 2003, 38 (6) : 32-35 (in Chinese).
- [14-3] Lin Zong-Ching, Lin Wen-Huei. Analysis of the Variation of the Cold-Rolling Characteristics of Rolling Force, Strip Shape, Stress and Temperature, for a Three-Dimensional Strip [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 54(1-4) : 326-340.
- [15-3] XIE Hong-biao, XIAO Hong, ZHANG Guo-min, et al. Analysis of Strip Rolling Pressure Distribution for Different Width by Explicit Dynamic FEM [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(1): 61-64 (in Chinese).
- [16-3] XU Zhi-rang, SUN Zhong-jian. Calculation of Rolling Force Transversal Distribution for 4-High Mill [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(4): 23-26 (in Chinese).
- [17-3] ZHANG Guo-min, XIAO Hong, XIE Hong-biao. Analysis of Strip Rolling Using Three-Dimensional Coupled Finite Element Method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11 (5) : 46-49 (in Chinese).
- [18-3] XU Zhi-rang. Contact Pressure and Spalling of the Roll in a Four-High Mill [J]. Mechanical Science and Technology, 1998, 7(4): 598-600 (in Chinese).
- [19-3] LIU, X.; SHI, X.; LI, S.; XU, J.; WANG, G., 'FEM Analysis of Rolling Pressure Along Strip Width in Cold Rolling Process, Journal of Iron and Steel Research, International., 2007, 14(5): 22-26.

فصل چهارم

تحلیل مدل سه بعدی المان محدود برای نورد سرد ورق‌های نازک با تغییر اصطکاک



فهرست علامات فصل

B اشتقاق فضایی مناسب از تابع حالت

$\bar{B}$ ماتریس میانگین المان

b_x عرض ورق در ناحیه تغییر فرم

b_{zk} گسترش در جهت ضخامت در k امین المان

Δb گستردگی

D تابع کرنش و دما

g فاکتور تراکم پذیری

h ضخامت میانگین ورق در ناحیه گازگرفتگی غلتک

K_1, K_2 ثابت برای مناطق لغزش از جلو و عقب

K تنش برشی مجاز

k_1, k_2 ثابت‌های مثبت

k_3 ثابت مثبت خیلی کوچک

L طول تصویر شده ناحیه تغییر فرم

M تعداد المان‌ها

m شاخص حساسیت نرخ کرنش

m_1 فاکتور اصطکاک

m_2 تعداد گره‌ها در قسمت خروجی ورق

m_3 تعداد المان‌ها در جهت ضخامت

N تابع حالت

N_1 تعداد گره‌ها

N_e تعداد نقاط Gauss یک المان

P نیروی جدا کننده غلتک

S لغزش از جلو

T همگرایی

 T_1 تنش

V حجم

 V_x, V_y, V_z مؤلفه‌های سرعت در جهات X و Y و Z V_R سرعت مماسی غلتک $V_g, \Delta V_f$ سرعت نسبی بین سطوح ورق و غلتک‌ها σ حد تسلیم ماده $\bar{\sigma}$ تنش معادل σ_s حد جاری شدن σ_z تنش در طول ضخامت ε^+ نرخ کرنش معادل $\bar{\varepsilon}$ کرنش معادل τ_f تنش برشی اصطکاکی β موقعیت زاویه ای در گاز گرفتگی غلتک λ ضریب کاهش سرعت

۴-۱- مقدمه

با توسعه علم و تکنولوژی، دو راه اصلی برای تولیدکنندگان ورق و محصولات آن جهت افزایش رقابتشان در فروش محصولات فولادی وجود دارد. یکی توسعه محصولات جدید با قیمت پائین تر است و دیگری بهبود کیفیت محصولات با استفاده از روش‌ها و تکنولوژی جدید است که در عملیات نورد معرفی می‌شود. ورق نازک تولید شده در کارخانجات نورد سرد کاربرد وسیعی در صنعت دارد. با این حال، مسئله دشوار در تولید مدل دقیق و قابل اطمینان از نورد سرد ورق‌های نازک فقدان یک شرایط اصطکاکی تعریف شده در ناحیه تماس غلتک با ورق می‌باشد که در نتیجه عیوب را به صورت تغییر فرم ورق یا ناصافی آن نشان می‌دهد. این مسئله ای پیچیده برای محققان است تا بر این مشکلات فائق آیند.

تحقیقات نشان می‌دهد که سطح تماس ورق- غلتک، که شامل اصطکاک، روانساز و پوشش می‌شود، اثر ویژه ای بر روی دقت ابعادی و کیفیت سطحی ورق دارد^[۱-۴، ۲]. اصطکاک در تماس غلتک و ورق یک مسئله مهم در تئوری و عمل کار پلاستیک است. روش قدیمی این است که فرض شود نیروی اصطکاک در گاز گرفتگی غلتک بخشی از نیروی عمودی است، با ضریب اصطکاکی که در طول زاویه گاز گرفتگی غلتک ثابت باقی می‌ماند. با این حال، تحقیقات بعدی نشان داد که ضریب اصطکاک در قسمتهای مختلف کمان گازگرفتگی متفاوت است^[۳-۴]، این مسئله نیروی فشار وارد بر غلتک و کنترل همزمان آن را با مشکل روبرو می‌کند.^۱ زهانگ^[۴-۴] مکانیک نورد سرد ورق‌های نازک و^۲ فلیک^[۵-۴] نورد سرد فویل‌ها را با اصطکاک ثابت بررسی و مطالعه نموده اند. روش سه بعدی المان محدود (FEM) برای تحلیل نورد ورق‌ها^[۱۱-۴ تا ۶-۴] تغییر شکل^[۱۲-۴، ۱۳-۴] و نورد اسلب^[۱۴-۴ تا ۱۶-۴] در گذشته انجام شده است. جیانی^۳^[۱۷-۴ تا ۲۱-۴] از روش المان محدود برای حل مسائل نورد سرد شکل‌های ویژه، با مدل اصطکاک متغیر استفاده نموده است^[۲۱-۴، ۱۸-۴]. برای ایجاد یک مدل واقعی، ضروری است که یک مدل اصطکاکی متغیر در قسمت گاز گرفتگی غلتک بکار گرفته شود. هدف این مقاله مدل سازی نورد سرد ورق‌های صاف نازک با بررسی تغییرات اصطکاک در قسمت گازگرفتگی غلتک با روش سه بعدی

¹ Zhang² Fleck³ Jiany

الاستیک- پلاستیک المان محدود است. سپس فشار نورد مدل شده، نیروی جدا کننده غلتک، گسترده‌گی و لغزش از جلو در شرایط اصطکاکی مختلف مقایسه شد.

۴-۲- تحلیل تغییر فرم

طبق اصول تغییر^[۱۷-۴]، میدان سرعت واقعی باید طبق تابع زیر مینیموم شود.

$$\Phi = \frac{1}{m+1} \iiint_v \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dv + \iint_{s_f} \tau_f \Delta V_f ds \pm \iint_{s_v} T_1 v ds = \phi^p + \phi^f + \phi^t \quad (4-1)$$

درحالی که ترم اول در قسمت راست نرخ کار تغییر فرم پلاستیک است (ϕ^p) ، $\bar{\sigma}$ تنش معادل، $\bar{\epsilon}$ نرخ معادل کرنش و m شاخص حساسیت به نرخ کرنش است. ترم دوم در سمت راست معادله (۴-۱) کار نیروی اصطکاک است (ϕ^f) ، ΔV_f سرعت نسبی لغزش در تماس صفحه تماس ورق و غلتک است، جاییکه یک تنش برشی اصطکاکی T_f اعمال می‌شود. در مدل با اصطکاک متغیر، اصطکاک در طول کمان ناحیه تماس در ناحیه تغییر فرم، تغییر می‌کند. در این مطالعه، مدل تنش برشی اصطکاکی^[۶-۴] طبق زیر اصلاح می‌شود.

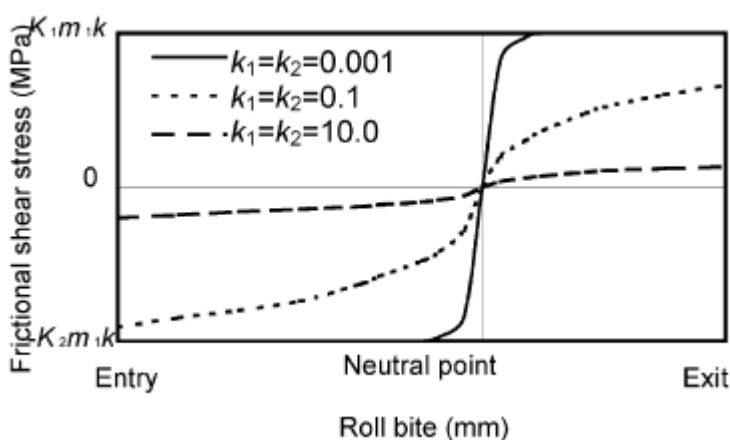
$$\tau_f = K_f \frac{m_1 \sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{V_g}{k_i} \right\} \right) \quad (4-2)$$

زمانیکه m_1 فاکتور اصطکاک، σ_s تنش جاری شدن، K_i یک ضریب که توصیف کننده تغییرات تنش برشی اصطکاکی در ناحیه تغییر فرم، K_1 و K_2 ثابت‌هائی به ترتیب برای لغزش از جلو و عقب در ناحیه لغزش است. k_i یک ثابت مثبت، K_1 برای لغزش از جلو و K_2 برای لغزش از عقب در ناحیه لغزش است. سرعت نسبی لغزش V_g بین ورق و غلتک طبق رابطه زیر بدست می‌آید :

$$V_g = \sqrt{(v_x \sec \beta - V_R)^2 + v_y^2} \quad (4-3)$$

در حالیکه V_x و V_y مؤلفه‌های سرعت در جهات x و y هستند. β موقعیت زاویه ای گره، V_R سرعت مماسی غلتک و توزیع این مدل‌های تنش برشی اصطکاکی در شکل ۴-۱ نشان داده می‌شود. زمانیکه $K_i = 0.0$ و $K_1 = K_2 = 0.1$ است، معادله ۴-۲ مدل اصطکاک ثابت را توصیف می‌کند. ΔV_f سرعت نسبی لغزش در طول سطح تماس غلتک- ورق است و می‌تواند با معادله زیر تقریب زده شود.

$$\Delta V_f = \sqrt{(v_x \sec \beta - V_R)^2 + v_y^2} = V_g \quad (4-4)$$



شکل ۴-۱- مدل تنش برشی اصطکاکی [۴-۶]

ترم سوم در طرف راست معادله (۴-۱) (ϕ^t) نرخ کار تنش است که T_1 تنش و V سرعت سطح مقطع تحت تنش می‌باشد در اینجا "-" تنش از جلو و "+" نشان دهنده تنش از عقب است. با فرض آنکه ماده به صورت الاستیک-پلاستیک باشد، از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$\sigma = D \varepsilon^{\frac{1}{m}} \quad (4-5)$$

جاییکه D تابع کرنش و دما و m شاخص حساسیت به نرخ کرنش است. روند اجرایی مدل استاندارد المان محدود ۳ بعدی الاستیک-پلاستیک برای ماده قابل تراکم طبق روش مقابل است. یک حجم کنترل V با M المان هشت گره‌ای شش وجهی که به N_1

گره متصل شده است. در هر المان توزیع سرعت u می‌تواند در فرم برداری با رابطه زیر نشان داده شود.

$$u = N_v^T \quad (4-6)$$

جاییکه v بردار سرعت گره ای و N تابع حالت ماتریس المان است. تانسور نرخ کرنش هم از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\dot{\varepsilon} = Bv \quad (4-7)$$

در جاییکه ماتریس B شامل اشتقاقات فضایی مناسب توابع حالت است. بنابراین تابع انرژی معادله ۴-۱ می‌تواند با مجموع تابع انرژی در سطح المان تقریب زده شود، که در نتیجه معادله زیر را نتیجه می‌دهد.

$$\begin{aligned} \Phi \approx \sum_{i=1}^e \phi^i = \sum_{i=1}^e \left[\frac{1}{m+1} \int_{v_i} \sigma_s \sqrt{v^T B^T Z B v + \frac{1}{g} v^T \bar{B}^T C^T C \bar{B} v} dv \right. \\ \left. + \int_{s_f} \frac{m_1 \sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{v^T N^T v - 2v_R^T N^T \begin{Bmatrix} \cos \beta \\ 0 \\ \sin \beta \end{Bmatrix} + v_R^2 + k_3^2 - k_3} \right) dS \pm \int_{s_t} T_1 v_t dS \right] \end{aligned} \quad (4-8)$$

g فاکتور تراکم پذیری، k_3 ثابت مثبت کوچک، برای C و Z به مرجع^[۴-۱۷] مراجعه شود. برای این منظور لازم است :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v} = 0 \quad (4-9)$$

این می‌تواند با معادله تکرار شونده^۱ نیوتن-رافسون جایگزین شود.

¹ Newton-Raphson

$$v_j = v_{j-1} + \lambda \Delta v_j \left[-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial v \partial v^T} \right]_{j-1} \Delta v_j = \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial v} \right\}_{j-1} \quad (4-10)$$

در حالیکه λ ضریب کاهش سرعت است. نیروی نورد می تواند طبق معادله ۴-۱۱ محاسبه شود.

$$P = \int_0^l \int_0^{b_x} \sigma_z dy dx \quad (4-11)$$

در حالیکه l و b_x طول و عرض تصویر شده ورق در ناحیه تغییر فرم هستند. σ_z تنش در جهت ضخامت است. لغزش از جلو می تواند از معادله ۴-۱۲ بدست آید.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{m_2} v_{xi}}{m_2 V_R} - 1 \quad (4-12)$$

v_{xi} سرعت گره در محصول خروجی، m_2 تعداد گره ها در ورق خروجی، گستردگی نیز با معادله ۴-۱۳ قابل محاسبه می باشد.

$$\Delta \bar{b} = \frac{1}{m_3} \sum_{k=1}^{m_3} \Delta b_{zk} \quad (4-13)$$

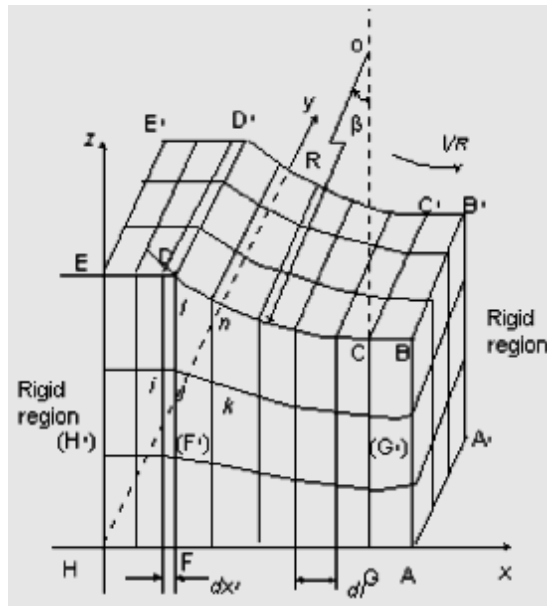
m_3 تعداد المان ها در جهت ضخامت و Δb_{zk} گستردگی در جهت ضخامت در المان k ام است.

۴-۳- شرایط مدل سازی

۴-۳-۱- شبکه بندی المان محدود

از آنجا که تغییر فرم نسبت به هر دو صفحه $Y-X$ و $Z-X$ متقارن است، یک چهارم از قطعه تحت عملیات نورد همانطور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده، تنها مورد بررسی قرار می گیرد. المان های شش وجهی ایزوپارامتریک با هشت نقطه^۱ گاوس در طول ورق مورد استفاده وقع شد. تعداد المان ها در طول جهات x ، y و z به ترتیب ۱۰، ۸ و ۵ انتخاب شد که ۴۰۰ المان و ۵۹۴ نود را نتیجه داد. یک لایه المان نازک^[۴-۲۱] در ناحیه ورودی گازگرفتگی غلتک نیز وجود دارد.

¹ Gauss



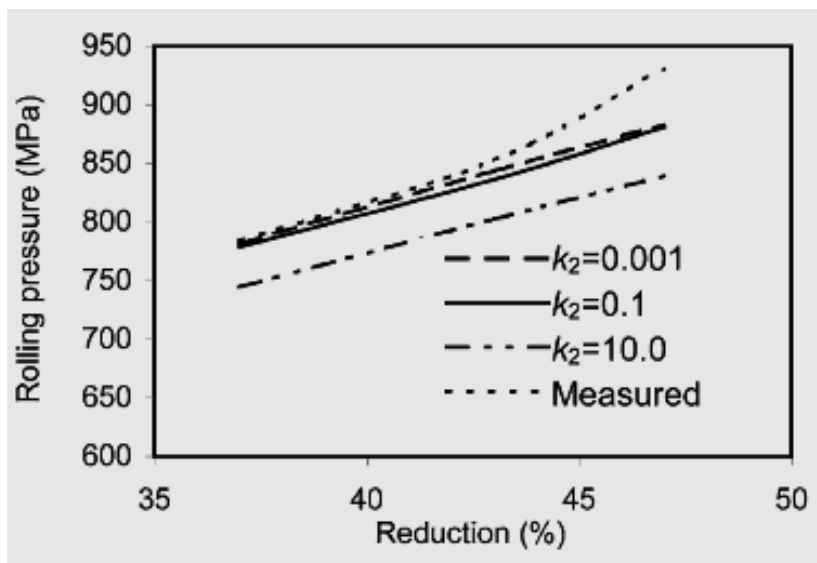
شکل ۲-۴- شبکه‌بندی انجام شده در مدل المان محدود نورد ورق [۷-۴]

۲-۳-۴- شرایط مرزی سرعت

شرایط مرزی سرعت در جدول ۱-۴ نشان داده شده است. V_x ، V_y و V_z مؤلفه‌های سرعت در جهات x ، y و z هستند.

جدول ۱-۴- شرایط مرزی سرعت (شکل ۲-۴ را ببینید). [۷-۴]

Position	Velocity
AA_1B_1B	$v_y = v_z = 0$
HH_1E_1	$v_y = v_z = 0$
CDD_1C_1	$v_z/v_x = -\tan \beta$
BCC_1B_1	$v_z = 0$
HH_1A_1A	$v_z = 0$
$EHAB$	$v_y = 0$



شکل ۴-۳- تأثیر k_2 بر روی نیروی نورد [۱۹-۴]

۴-۳-۳- مدل جریان (سیلان) ماده

یک مدل از ماده، فولاد کم کربن، برای مدل نورد ورق استفاده شد. معادله زیر برای توصیف رفتار فولاد کم کربن استفاده شد [۷-۴].

$$\sigma = 245.98 + 702.66\bar{\epsilon}^{0.58} \quad (\text{MPa}) \quad (4-14)$$

جایی که $\bar{\epsilon}$ کرنش پلاستیک است، برای مس نیز معادله ۴-۱۵ حاکم است.

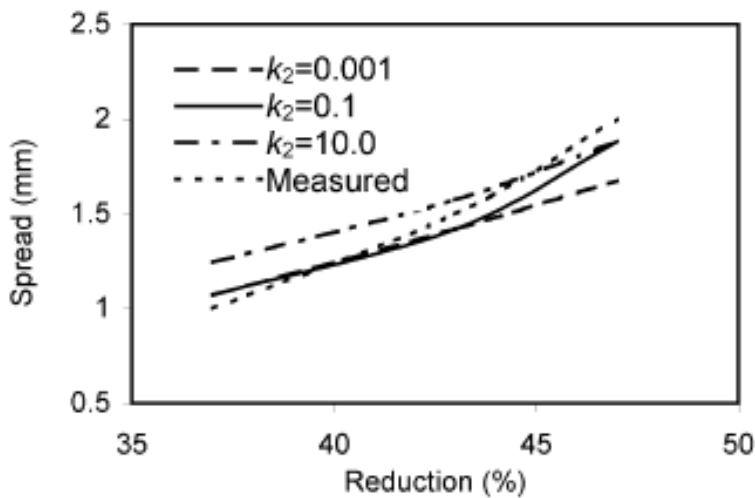
$$\sigma = 70.3(1 + \bar{\epsilon}/0.022)^{0.49} \quad (\text{MPa}) \quad (4-15)$$

۴-۴- بررسی مدل سازی

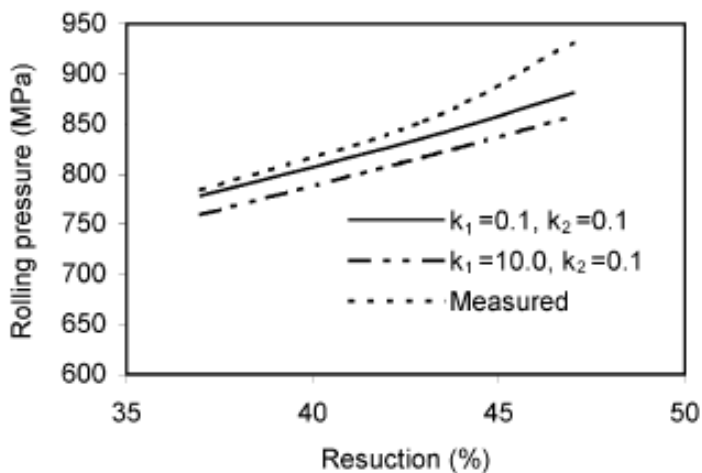
۴-۴-۱- تأثیر k_1 و k_2

از مدل سازی با فولاد کم کربن، شکل های ۴-۳ و ۴-۴ تأثیر کاهش ضخامت بر فشار نورد و گستردگی ورق برای مقادیر مختلف k_2 و مقدار ثابت $k_1 = 0.1$ را نشان می دهند. مشاهده می شود که k_2 اثر ویژه ای بر روی نتایج مدل سازی دارد. هر چه k_2 کوچکتر باشد، نیروی فشار

بیشتر خواهد بود و زمانی که k_2 کمتر از یک دهم ۰.۱ است، نیروی نورد محاسبه شده به مقدار اندازه گیری شده نزدیک تر است. مقدار گستردگی محاسبه شده برای $k_2 \leq 0.1$ هم نزدیک نتیجه اندازه گیری شده است، زمانی که تغییر ضخامت کوچکتر از ۴۳٪ است.



شکل ۴-۴- تاثیر k_2 بر روی سرعت [۱۹-۴]

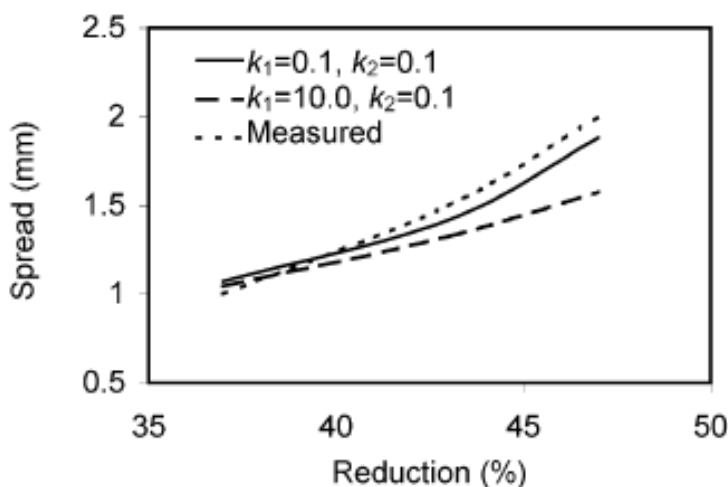


شکل ۴-۵- تاثیر k_1 بر روی نیروی نورد [۱۹-۴]

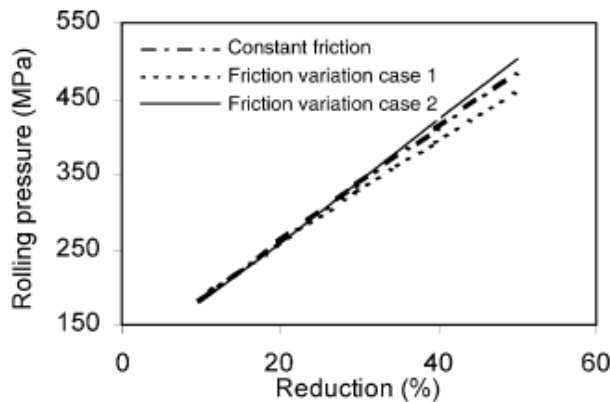
برای $k_2 = 0.1$ نیز تغییر k_1 بر روی نتایج مدل سازی تأثیر دارد. این مسئله در شکل‌های 4-5 و 4-6 قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که نتایج محاسبه شده در توافق خوبی با مقادیر اندازه گیری شده برای $K_1 = 0.1$ هستند. بنابراین، نتایج مدل سازی به نتایج اندازه گیری شده بسیار نزدیک اند، زمانیکه k_1 و k_2 کمتر از ۰,۱ هستند.

۴-۲-۴ اثر پارامترهای نورد بر روی نتایج مدل سازی

نورد مس با غلتک کاری به قطر ۱۵۸,۷۶ میلیمتر و قطر ۷۶,۲ میلیمتر و سرعت محیطی m/s ۰,۱۶ و ضریب اصطکاک $m_1 = 0.4$ مدل شد. برای اولین مورد $K_1 = K_2 = 1.0$ و $k_1 = k_2 = 0.1$ و برای مورد ۲ $K_1 = 0.7$ و $K_2 = 1.4$ و $k_1 = k_2 = 0.1$ در نظر گرفته شد. اثر کاهش ضخامت بر روی نیروی وارد بر غلتک در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش کاهش ضخامت، نیروی وارد بر غلتک نیز افزایش می‌یابد و تفاوت بین فشارهای نورد مختلف از اصطکاک ثابت بدست آمد و مدل با اصطکاک متغیر در کاهش ضخامت‌های زیر ۳۰٪ چندان قابل توجه نیست. می‌توان مشاهده نمود که ثابت‌های K_1 و K_2 بر روی فشار وارد بر غلتک تأثیر گذارند؛ بر مقدار فشار وارد بر غلتک زمانی که K_1 کاهش می‌یابد و یا K_2 افزایش می‌یابد، افزوده می‌شود (مورد ۲ اصطکاک متغیر).

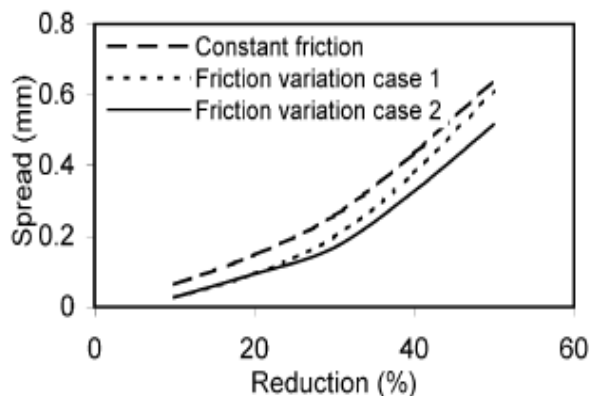


شکل ۴-۶- تأثیر k_1 بر روی گستردگی [۱۹-۴]

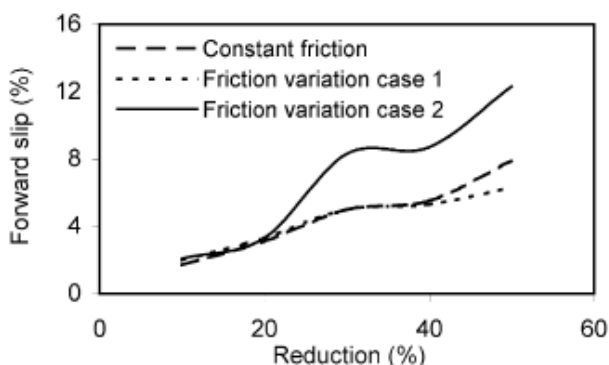


شکل ۴-۷- تأثیر کاهش ضخامت بر روی نیروی نورد [۴-۱۷]

زمانیکه K_1 کاهش می‌یابد، منطقه لغزش از جلو افزایش می‌یابد، مقاومت در برابر تغییر فرم ورق افزایش می‌یابد و بنابراین فشار وارد بر غلتک افزایش می‌یابد. تغییرات اصطکاک در زاویه گازگرفتگی تأثیر عمده‌ای بر روی گسترده‌گی دارد (آنطور که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است). مشاهده می‌شود که گسترده‌گی با کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. ضمناً با کاهش K_1 و افزایش K_2 (مورد دوم اصطکاک متغیر) از گسترده‌گی کاسته می‌شود، به این علت که لغزش از جلو افزایش می‌یابد (شکل ۴-۹) و فلز بیشتری در جهت نورد جریان پیدا می‌کند و از جریان فلز در جهت عرض کاسته می‌شود. از شکل ۴-۸ می‌توان دریافت که اثر تغییرات اصطکاک بر روی گسترده‌گی برای کاهش ضخامت‌های زیر ۲۵٪ چندان قابل توجه نیست.



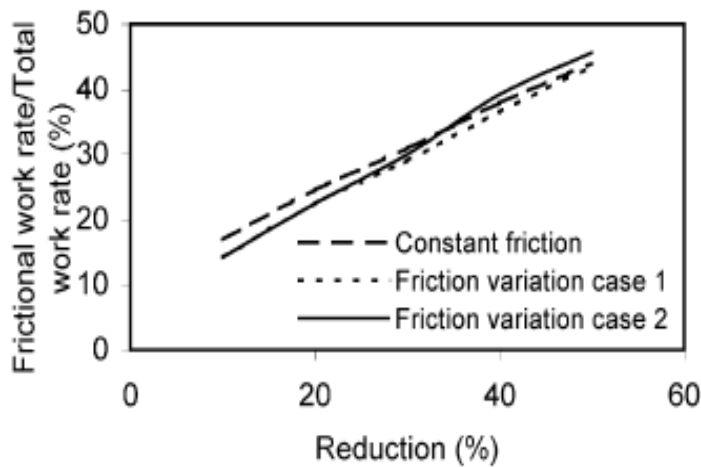
شکل ۴-۸- تاثیر کاهش ضخامت بر روی گستردگی [۱۱-۴]



شکل ۴-۹- تاثیر کاهش ضخامت بر روی لغزش از جلو [۱۱-۴]

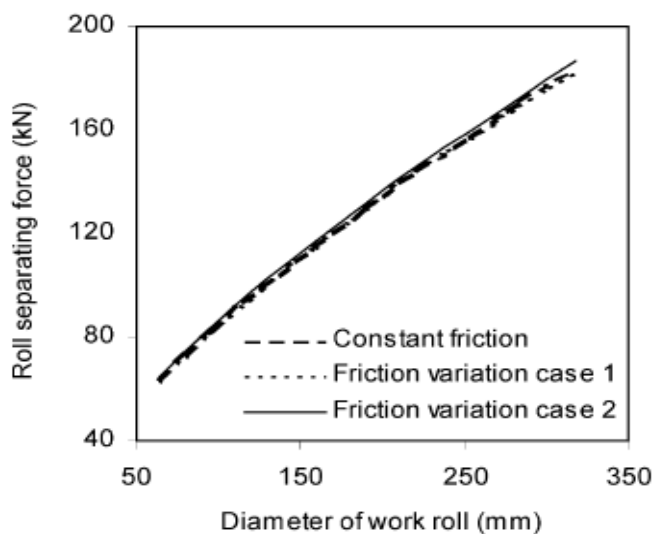
شکل ۴-۱۰ اثر کاهش ضخامت بر نرخ کار اصطکاک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدل‌های اصطکاک متغیر تأثیر ویژه بر روی نرخ کار نیروی اصطکاک دارند، مخصوصاً "زمانیکه K_1 و K_2 در کاهش ضخامت‌های بالای ۳۰٪ تغییر می‌کند. اثر قطر غلتک کاری بر روی نیروی جدا کننده غلتک‌ها در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود اثر قطر غلتک کاری بر روی نیروی جدا کننده بین دو غلتک نیز افزایش می‌یابد و اثر قطر غلتک کاری بر روی نیروی وارد بر نورد در دو فرض اصطکاک ثابت و متغیر چندان تفاوتی با یکدیگر نمی‌کند.

به علت افزایش طول تماس، پارامترهای مربوط به ناحیه تماس ($\frac{l}{\lambda}$ ، L طول ناحیه تماس، h ضخامت میانگین ورق در طول ناحیه گازگرفتگی) افزایش می‌یابند که باعث تغییر پروفیل تنش در ناحیه گازگرفتگی و در کل افزایش نیروی جدا کننده غلتک را نتیجه می‌دهد. بنابراین برای آنکه نیروی نورد را کاهش دهیم و انرژی را در طول فرایند نورد ذخیره کنیم، ضروری است در صورت عملیاتی بودن برای کاهش قطر غلتک اقدام مؤثر به عمل آید.

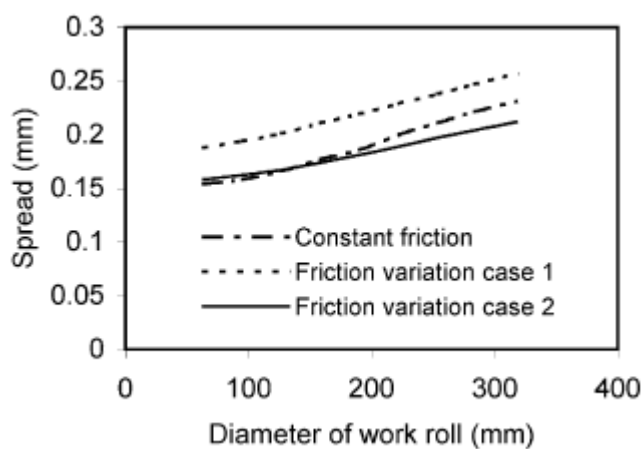


شکل ۴-۱۰- تاثیر کاهش ضخامت بر روی نرخ کار نیروی اصطکاک [۴-۱۱]

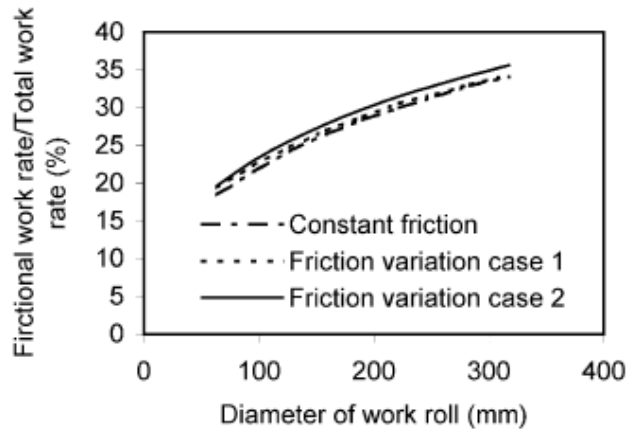
با این حال، این مورد اثر زیادی بر روی گستردگی و نرخ کار اصطکاک زمانیکه از مدل اصطکاک متغیر استفاده می‌نمائیم (اشکال ۴-۱۲ و ۴-۱۳) دارد. همچنین مشاهده شد، زمانیکه قطر غلتک را افزایش می‌دهیم، نیروی جداکننده غلتک، گستردگی و نرخ کار نیروی اصطکاک افزایش می‌یابد. با یک غلتک کاری بزرگتر، هر دو مورد سطح تماس و زاویه گازگرفتگی افزایش می‌یابند و بنابراین نیروی جدا کننده غلتک و نرخ کار اصطکاک بیشتر را نتیجه می‌دهد.



شکل ۴-۱۱- تاثیر قطر غلتک کاری بر روی نیروی جدا کننده غلتک [۴-۱۹]



شکل ۴-۱۲- تاثیر قطر غلتک کاری بر روی گستردگی [۴-۱۹]



شکل ۴-۱۳- تاثیر قطر غلتک کاری بر روی نرخ کار نیروی اصطکاک [۴-۱۹]

۴-۵- نتیجه گیری از مدل

یک مدل برای نورد سرد ورق که در آن اصطکاک به صورت متغیر در نظر گرفته شد، بسیار تأثیرگذار بر نتایج مدل سازی تشخیص داده شد. نتایج مدل سازی زمانی که k_1 و k_2 کوچکتر از 0.1 بودند نزدیک مقادیر اندازه گیری شده بدست آمد.

ثابت‌های K_1 و K_2 نیز بر روی مدل سازی تأثیرگذار بودند. عملیات نورد و لغزش از جلو زمانی که K_1 کاهش و K_2 افزایش می‌یابند، افزایش می‌یابد، اگر چه گستردگی کاهش خواهد یافت. زمانی که یک مدل اصطکاکی متغیر بکار گرفته شد، نتایج محاسبه شده، همچون فشار نورد و گستردگی در انطباق مناسبی با مقادیر اندازه گیری شده هستند. مدل اصطکاک متغیر همچنین بر روی نتایج مدل سازی زمانی که پارامترهای نورد، همچون قطر غلتک و تغییر ضخامت ورق متغیر است، تأثیرگذار است.

نرخ کار نیروی اصطکاک، گستردگی و نیروی جدا کننده غلتک (نیروی نورد) با افزایش قطر غلتک، افزایش می‌یابد. بنابراین اگر می‌خواهیم نیروی کمتری به سیستم نورد وارد شود و انرژی بیشتری ذخیره نمائیم، در صورت عملیاتی بودن لازم است که از غلتک با قطر کوچکتر استفاده نمود. مدل اصطکاک متغیر می‌تواند مدل بهتر ایجاد نموده که دسترسی به نتایج صحیح تر را نتیجه می‌دهد.

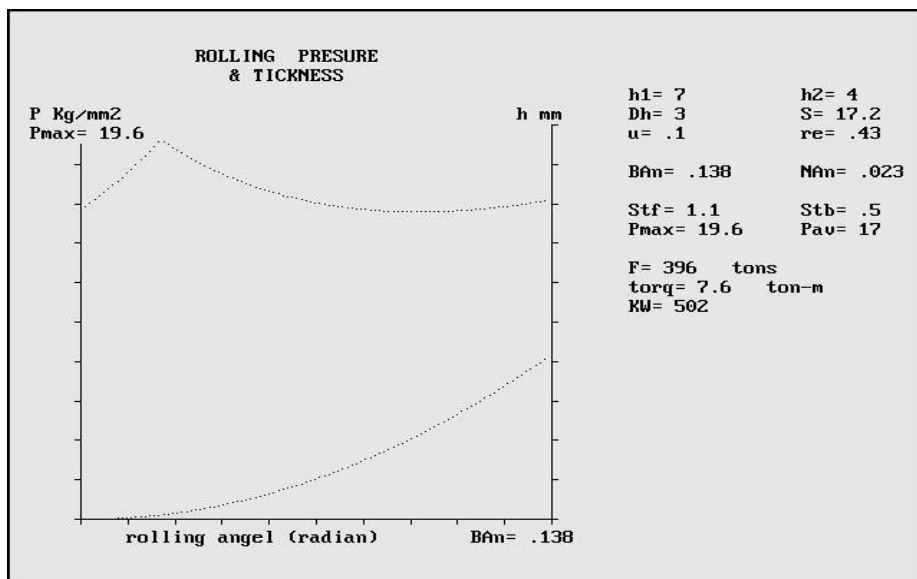
مراجع

- [1-4] Munther P, Lenard JG. Tribology during hot, flat rolling of steels. *Cirp Annals* 1995;44(1):213–6.
- [2-4] Beynon JH. Tribology of hot metal forming. *Tribology Int* 1998;31(1-3):73–7.
- [3-4] Liu YJ, Tieu AK, Wang DD, Yuen WYD. Friction measurement in cold rolling. *J Mater Proc Technol* 2001;111:142–5.
- [4-4] Zhang LC. On the mechanics of cold rolling thin foil. *Int J Mach Tools Manufact* 1995;35(3):363–72.
- [5-4] Fleck NA, Johnson KL, Mear M, Zhang LC. Cold rolling of foil. *Proc of Inst Mech Engrs Part B: J Engng Manufact* 1992;206:119.
- [6-4] Kobayashi S, Oh SI, Altan T. Metal forming and the finite element method. New York: Oxford University Press, 1989.
- [7-4] Liu XH. Rigid-plastic FEM and its application in steel rolling. Beijing: Metallurgy Industrial Press, 1994.
- [8-4] Hartley P, Sturgess CEN, Liu C, Rowe GW. Experimental and theoretical studies of workpiece deformation, stress, and strain during flat rolling. *Int Mater Reviews* 1989;34:19–34.
- [9-4] Osakda K, Nakano J, Mori K. Finite element method for rigidplastic analysis of metal forming—formulation for finite deformation. *Int J Mech Sci* 1982;24(8):459–68.
- [10-4] Mori K, Osakada K, Oda T. Simulation of plane-strain rolling by the rigid-plastic finite element method. *Int J Mech Sci* 1982;24(9):519–27.
- [11-4] Chenot JL, Montmitonnet P, Buessler P, Fau F. Finite element computation of spread in hot flat and shape rolling with a steady state approach. *Engineering Computations* (Swansea, Wales) 1991;8(3):245–55.
- [12-4] Wen SW, Hartley P, Pillinger I, Sturgess CEN. Roll pass evaluation for three-dimensional section rolling using a simplified finite element method. *Proc of Inst Mech Engrs Part B: J Engng Manufact* 1997;211 (B2):143.

- [13-4] Hartley P, Wen SW, Pillinger I, Sturgess CEN, Petty D. Finite element modelling of section rolling. *Ironmaking and Steelmaking* 1993;20(4):261–3.
- [14-4] Liu C, Hartley P, Sturgess CEN, Rowe GW. Finite-element modeling of deformation and spread in slab rolling. *Int J Mech Sci* 1987;29(4):271–83.
- [15-4] Nikaido H, Naoi T, Shibata K, Kondo T, Osakada K, Mori K. Numerical simulation of width spread of ‘dog-bone’ slab in nonsteady horizontal rolling. *J Japanese Society Technol Plasticity* 1984;25(277):129–35.
- [16-4] Jiang ZY, Hu WP, Thomson PF, Lam YC. Analysis of slab edging by a 3-D rigid viscoplastic fem with the combination of shifted incomplete cholesky decomposition and the conjugate gradient method. *Finite Elements in Analysis and Design* 2001;37(2):145–58.
- [17-4] Jiang ZY. Forming processes, theory of the strip with longitudinal ribs and its application. Ph.D. thesis, Northeastern University, Shenyang, 1995.
- [18-4] Jiang ZY, Tieu AK. Modelling of rolling of strips with longitudinal ribs by 3-D rigid visco-plastic finite element method. *ISIJ Int* 2000;40(4):373–9.
- [19-4] Jiang ZY, Xiong SW, Liu XH, Wang GD, Zhang Q. 3-D rigidplastic fem analysis of the rolling of a strip with local residual deformation. *J Mater Proc Technol* 1998;79(1-3):109–12.
- [20-4] Jiang ZY, Liu XL, Liu XH, Wang GD. Analysis of ribbed-strip rolling by rigid-viscoplastic FEM. *Int J Mech Sci* 2000;42(4):693–703.
- [21-4] Jiang ZY, Tieu AK. A method to analyse the rolling of strip with ribs by 3-D rigid visco-plastic finite element method. *J Mater Proc Technol* 2001;117:146–52.
- [22-4] Jiang, Z.Y.; Tieu, A.K., ‘A 3-D finite element method analysis of cold rolling of thin strip with friction variation’, *Tribology International* 37 (2004) 185–191.

فصل پنجم

تحلیل ماکزیمم تنش ایجاد شده در غلتک در عملیات نورد سرد



۵-۱- مقدمه

در فصول قبل مقدمه ای از عملیات مختلف نورد سرد و چگونگی محاسبه نیروی جدا کننده در غلتک جهت انجام عملیات نورد سرد مورد بررسی قرار گرفت. کلیه روش‌های تحلیلی و تجربی موجود صرفاً به بررسی نیروی وارد بر غلتک پرداخته و هیچگاه به بررسی این نیروها در غلتک پرداخته‌اند. فصول ۲، ۳ و ۴ نیز به بررسی عوامل و پارامترهای مختلف بر روی این نیرو و ارائه روش المان محدود برای بررسی تاثیر عوامل بر روی این نیرو پرداخته است.

با این حال، با بررسی نتایج تحقیقات و گزارشات ارائه شده در مقالات و غیرو به نظر می‌رسد، نقطه‌ای مبهم در تحقیقات موجود وجود دارد، که آن‌ها را از تبدیل شدن به یک تحقیق عملیاتی قابل کاربرد در صنایع باز می‌دارد. از آنجا که مشکلات زیادی در عملیات نورد، به علت اعمال بار بیش از حد به غلتک وجود دارد، لزوم یک جدول یا فرمول که به وسیله آن بتوان حد تنش وارد بر غلتک را محاسبه نمود، ضروری به نظر می‌رسد. چه بسا بسیار غلتک‌های نورد که نه به دلیل خستگی ناشی از عملیات نورد متعدد، و نه به علت مشکلات ساختاری موادی، بلکه تنها به دلیل بی دقتی اپراتور یا مهندس طراح خط نورد در محاسبه نیروی وارده منهدم شده‌اند و هزاران دلار به صاحبان صنایع ضرر رسانیده‌اند. لذا تبدیل نیروی وارده به غلتک به تنش و از آنجا یافتن ماکزیمم تنش در عملیات نورد جهت جلوگیری از شکسته شدن غلتک حین عملیات نورد پروژه‌ای کاربردی و قابل استفاده در صنایع است. نگارنده در این فصل سعی دارد با استفاده از پژوهش دیگر نگارندگان و یا حل عددی معادلات آنها و به دست آوردن نیروی خاص جهت نورد یک ورق فولاد معمولی، و سپس با بررسی تاثیر این نیرو با تغییر پارامترهای مختلف هندسی و چگونگی اعمال بار به یک فرمول عمومی جهت به دست آوردن ماکزیمم تنش در عملیات نورد شود.

در این بخش ابتدا خلاصه ای از فرمول‌های لازم برای انجام محاسبات نورد که در فصل ۱ ارائه گشت بیان می‌شود. سپس به حل عددی معادلات فوق در محیط^۱ متلب برای به دست آوردن نیروی نورد برای ضخامت‌های مختلف نورد می‌نماییم. پس از آن یکی از نیروهای موجود را انتخاب نموده و در محیط نرم افزار^۲ آنسیس با تغییر پارامترهای مختلف هندسی غلتک و

^۱ MATLAB

^۲ ANSYS

چگونگی اعمال بار پروفیل تنش در غلتک در حالات مختلف نقاط بحرانی ماکزیمم تنش در آن نقاط را به دست می‌آوریم و در انتها فرمولی برای تبدیل نیروی نورد به ماکزیمم تنش در غلتک در عملیات نورد ارائه می‌دهیم.

۵-۲- خلاصه بعضی فرمول‌های لازم

$$(\Delta h)_{\max} = \mu^2 R \quad (5-1)$$

$$(h)_{\min} = 0.035 \mu R \bar{S} \quad \left(\bar{S} \frac{kN}{mm^2} \right) \quad (5-2)$$

$$\frac{P^*}{\omega} = 1.2 \bar{S} \sqrt{R \Delta h} \quad (5-3)$$

$$H_x = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_x}} \operatorname{tg}^{-1} \left(\sqrt{\frac{R'}{h_x}} \cdot \alpha_x \right) \quad (5-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P^+}{\bar{S}} = \left(1 - \frac{t_a}{S_a} \right) \frac{h}{h_a} e^{\mu H} \quad (\text{exit}) \\ \frac{P^-}{\bar{S}} = \left(1 - \frac{t_b}{S_b} \right) \frac{h}{h_b} e^{\mu(H_b - H)} \quad (\text{entry}) \end{array} \right\} \quad \frac{P}{\omega} = R' \int_0^{\alpha_b} P d\alpha \quad (5-5a)$$

$$F^e = R' \left[\int_0^{\alpha_b} P \alpha d\alpha \right] \quad (5-5b)$$

$$R' = R \left(1 + \frac{C}{\Delta h} \cdot \frac{P}{\omega} \right) \quad (C=0.022 \text{ mm}^2/\text{kN} \text{ برای غلتک‌های فولادی}) \quad (5-6)$$

$$\alpha_b = \sqrt{\frac{\Delta h}{R'}} \quad (5-7)$$

$$h = h_a + R \alpha^2 \quad (5-8)$$

$$K = \frac{S}{2} = \frac{Y}{\sqrt{3}}$$

برای برش خالص داریم:

$$S = 1.55 Y$$

برای کرنش صفحه ای:

$$\varepsilon_t = \ln(1 + e_t) \quad (5-9)$$

برای کرنش طبیعی لگاریتمی داریم (ε_t) :

که در آن فرمول e_t کرنش خطی است

$$\begin{cases} r = \frac{A_0 - A_1}{A_0}, \varepsilon_{01} + \varepsilon_{12} = \varepsilon_{02} \\ \varepsilon_{01} = Ln \frac{h_1}{h_0} = Ln \frac{A_0}{A_1} = Ln \frac{1}{1-r} \end{cases} \quad (5-10)$$

$$d = K_b \frac{WL^3}{EI} + K_s \frac{WL}{AG}, I = \frac{\pi d^4}{64} \quad \text{فرمول محاسبه کمبر:}$$

که در فرمول فوق برای بار کامل بر طول غلتک $K_b=1.0$ و $K_s=0.2$ می‌باشند. برای نورد ورق که تنها بر روی نصف طول غلتک قرار می‌گیرد، $K_b=0.5$ و $K_s=0.1$ می‌باشند.

$$H_n = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} Ln \left\{ \frac{h_a}{h_b} \left(\frac{1 - \frac{t_a}{S_a}}{1 - \frac{t_b}{S_b}} \right) \right\} + H_b \right] \quad (5-11)$$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{h_a}{R}} \operatorname{tg} \left[\frac{H_n}{2} \sqrt{\frac{h_a}{R}} \right] \quad (5-12)$$

$$\frac{P}{\omega} = R' \left\{ \int_0^{\alpha_n} P^- d\alpha + \int_{\alpha_n}^{\alpha_b} P^+ d\alpha \right\} \quad (5-13)$$

و معادله تنش-کرنش مواد پس از کار سختی به صورت نمایی به شکل زیر است. که در آن Y_0 تنش سیلان (جاری شدن) اولیه است.

$$\begin{cases} \sigma = Y_0 + \beta \varepsilon^m \\ m = \varepsilon_u, \beta \frac{\sigma_u - Y_0}{\varepsilon_u^m} \end{cases} \quad (5-14)$$

فرمول گشتاور و توان لازم برای انجام عملیات نورد به شکل فوق است.

$$T = F^e R' = \frac{1}{2} R' (t_b h_b - t_a h_a) + \int_0^{\alpha_b} P R'^2 \alpha d\alpha \quad (5-15)$$

$$P = 2P_R + P_L = 2(T\omega) + (\mu_b F_b d_b \omega) \quad (5-16)$$

در فرمول فوق F_b نیروی شعاعی وارد بر هر یاتاقان است.

باید دقت نمود از آن جا که H_n عددی مثبت است، پس باید $\frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{h_a}{h_b}\right) \geq -H_b$ باشد.

۵-۳- مثالهایی از محاسبه نیروی نورد

در این بخش به ارائه یک راه کار علمی برای استفاده از فرمول‌های فوق جهت به دست آوردن نیروی وارد بر غلتک و نیروی لازم جهت عملیات نورد پرداخته شده است. برای این منظور یک ورق فولادی st37 با سطح مقطع 20×2000 میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. نیروی نورد را برای تغییر ضخامت از ۲۰ میلی‌متر تا به ترتیب ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶ و ۱۵٫۵ به دست آورده شد.

با استفاده از غلتک عملیات حرارتی شده با قطر ۴۰۰ میلی‌متر محاسبه این نیروها انجام شد (برای فولاد معمولی st37-2، $E=2.156 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ، $Y_{st37-2}=235 \text{ N/mm}^2$). به علت کار سختی ورق حین عملیات تنش تسلیم ماده در ورودی و خروجی عملیات متفاوت خواهد بود. بدین منظور برای به دست آوردن $\bar{S}$ ، از فرمول ساده $\bar{S} = \frac{S+1.5S}{2}$ ، $\bar{S}=1.25S$ استفاده شده است. بررسی بعدی انجام گرفته برای مقایسه فرمول فوق حد تنش خروجی که از معادله ۵-۱۴ به دست می‌آید، تطابق مناسبی را برای تغییر ضخامت‌های مذکور نشان داده. بنابراین استفاده از ساده سازی فوق جهت به دست آوردن $\bar{S}$ ، عملیاتی به نظر می‌رسد.

جهت ارضا شرط $\frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{h_a}{h_b}\right) \geq -H_b$ تا بتوان ورق را تا ضخامت‌های مختلف مذکور نورد کرد،

از ضریب اصطکاک بالای ۰/۰۹ در عملیات نورد سرد استفاده شده است و جهت به دست آوردن نیروی ورق از ضخامت ۲۰ تا ۱۹ میلی‌متر به ترتیب زیر عمل شد.

در ابتدا نیروی تقریبی نورد را از معادله ۵-۳ محاسبه گردید.

$$\begin{cases} \frac{P^*}{\omega} = 1.2\bar{S}\sqrt{R\Delta h} = 1.2(1.2 \times 1.55 \times 235)\sqrt{200 \times 1} = 7.727 \frac{kN}{mm} \\ \bar{S} = 1.25S = 1.25 \times 1.55Y \end{cases}$$

(به علت آن که عملیات نورد سرد را می‌توان نوعی کرنش صفحه ای فرض نمود $S=1.55Y$ است).

سپس شعاع تغییر شکل یافته از معادله ۵-۶ را محاسبه می‌نماییم:

$$R' = R \left(1 + \frac{c}{\Delta h} \cdot \frac{P}{\omega} \right) = 200 \left(1 + \frac{0.022}{1} \times 7.727 \right) \approx 234 \text{ mm}$$

بعد از آن زاویه کمان تماس را از معادله ۵-۷ می‌یابیم:

$$\alpha_b = \sqrt{\frac{\Delta h}{R'}} = \sqrt{\frac{1}{234}} = 0.065 \text{ rad} = 1.87^\circ$$

برای بدست آوردن زاویه نقطه خنثی باید ابتدا H_n را به دست آوریم. بدین منظور لازم است ابتدا H_b را بیابیم.

$$H_b = 2 \sqrt{\frac{R'}{h_b}} \text{tg}^{-1} \left(\sqrt{\frac{R'}{h_b}} \cdot \alpha_b \right) = 2 \sqrt{\frac{234}{20}} \text{tg}^{-1} \left(\sqrt{\frac{234}{20}} \times 0.065 \right) = 1.497$$

$$H_n = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} \text{Ln} \left(\frac{h_a}{h_b} \right) + H_b \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{0.09} \text{Ln} \left(\frac{19}{20} \right) + 1.497 \right] = 0.464$$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{h_a}{R'}} \text{tg} \left[\frac{H_n}{2} \sqrt{\frac{h_a}{R'}} \right] = \sqrt{\frac{19}{234}} \text{tg} \left[\frac{0.464}{2} \sqrt{\frac{19}{234}} \right] = 0.019 = 0.54^\circ$$

سپس با استفاده از معادلات ۵a-۵ نیروی وارد بر غلتک را می‌یابیم:

$$\frac{P}{\omega} = R' \left\{ \int_0^{\alpha_n} P^- d\alpha + \int_{\alpha_n}^{\alpha_b} P^+ d\alpha \right\}$$

$$\bar{P} = \bar{S} \frac{h}{h_b} e^{\mu(H_b - H)}, P^+ = \bar{S} \frac{h}{h_a} e^{\mu H}$$

$$h = h_a + R\alpha^2 = 19 + 200\alpha^2$$

برای حل انتگرال فوق ناگزیر به استفاده از حل عددی هستیم. بدین منظور از نرم افزار انسیس، از توضیحی که در پیوست ۲ ارائه شده است، استفاده می‌کنیم. بنابراین پس از حل خواهیم داشت:

$$\frac{P}{\omega} = 9.2205 + 23.4035 = 7.634 \frac{kN}{mm}$$

همانطور که در فصل اول بحث شد، نیروی وارد بر غلتک از دو مولفه شعاعی و مماسی تشکیل شده است. مولفه شعاعی از فرمول ۵a-۵ به دست آمد. برای بدست آوردن مولفه مماسی ناشی از اصطکاک ورق و غلتک از معادله ۵b-۵ استفاده می‌نماییم (نحوه به دست آوردن این فرمول در فصل ۱ مورد بحث قرار گرفته است).

$$F^e = R' \left[\int_0^{\alpha_b} P \alpha d\alpha \right] = R' \left[\int_0^{\alpha_n} P^- \alpha d\alpha + \int_{\alpha_n}^{\alpha_b} P^+ \alpha d\alpha \right]$$

معادله فوق نیز در محیط MATLAB توسط برنامه مذکور، تنها با اندکی تغییرات قابل حل می‌باشد (به پیوست ۱ مراجعه شود):

$$F^e = 0.234(0.0870 + 0.9949) = 0.253 \frac{kN}{mm}$$

در اینجا دو مولفه نیروی نورد برای ورق فولادی از ضخامت ۲۰ تا ۱۹ میلی متر توسط غلتک با قطر ۴۰۰ میلی متر به دست آمد. اثر این نیروها بر تعداد و پروفیل تنش در غلتک در بخش‌های بعد بررسی خواهد شد.

در اینجا چنین محاسباتی را بار دیگر برای تغییر ضخامت به ۱۸، ۱۷، ۱۶ و ۱۵،۵ میلی متر تکرار می‌کنیم. برای تغییر ضخامت از ۲۰ به ۱۸ میلی متر:

$$\frac{P^*}{\omega} = 1.2(1.55 \times 1.25 \times 235) \sqrt{200 \times 2} = 10.927 \frac{kN}{mm}$$

$$R' = 200 \left(1 + \frac{0.022}{2} \times 10.927 \right) = 224 mm$$

$$\alpha_b = \sqrt{\frac{2}{224}} = 0.094 = 2.71^\circ$$

$$H_b = 2\sqrt{\frac{224}{20}} \operatorname{tg}^{-1} \left[\sqrt{\frac{224}{20}} \times 0.094 \right] = 2.04$$

$$H_n = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{0.09} \operatorname{Ln} \left(\frac{18}{20} \right) + 2.04 \right] = 0.435$$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{18}{224}} \operatorname{tg} \left[\frac{0.435}{2} \sqrt{\frac{18}{224}} \right] = 0.017 = 0.5^\circ$$

$$\frac{P}{\omega} = R' \left[\int_0^{\alpha_n} P^- d\alpha + \int_{\alpha_n}^{\alpha_b} P^+ d\alpha \right]$$

$$P^- = S \frac{h}{h_b} e^{\mu(H_b - H)}, P^+ = \bar{S} \frac{h}{h_a} e^{\mu H}, h = h_a + R\alpha^2 = 18 + 200\alpha^2$$

$$\Rightarrow \frac{P}{\omega} = 8.2219 + 41.0352 = 11.034 \frac{kN}{mm}$$

$$F^e = R' \left[\int_0^{\alpha_n} P^- \alpha d\alpha + \int_{\alpha_n}^{\alpha_b} P^+ \alpha d\alpha \right] = R' (0.0694 + 2.3406) = 0.540 \frac{kN}{mm}$$

برای تغییر ضخامت از ۲۰ تا ۱۷ میلی متر:

$$\frac{P^*}{\omega} = 13.383 \frac{kN}{mm} \rightarrow R' = 219.63 mm \rightarrow \alpha_b = \sqrt{\frac{3}{219.63}} = 0.117 = 3.35^\circ$$

$$H_b = 2.451 \rightarrow H_n = 0.322 \rightarrow \alpha_n = 0.0124 rad = 0.36^\circ$$

$$\frac{P}{\omega} = 5.9016 + 58.0654 = 14.049 \frac{kN}{mm}$$

$$F^e = R' (0.0364 + 3.9320) = 0.872 \frac{kN}{mm}$$

برای تغییر ضخامت از ۲۰ به ۱۶ میلی متر:

$$\frac{P^*}{\omega} = 15.453 \frac{kN}{mm} \rightarrow R' = 217 mm \rightarrow \alpha_b = 0.136 rad \approx 3.89^\circ$$

$$H_b = 2.775 \rightarrow H_n = 0.148 \rightarrow \alpha_n = 5.456 \times 10^{-3} rad \approx 0.156^\circ$$

$$\frac{P}{\omega} = 2.5345 + 75.1202 = 16.851 \frac{kN}{mm}$$

$$F^e = R'(0.0069 + 5.6850) = 1.235 \frac{kN}{mm}$$

برای تغییر ضخامت از ۲۰ به ۱۵,۵ میلی متر:

$$\frac{P^*}{\omega} = 16.391 \frac{kN}{mm} \rightarrow R' = 216mm \rightarrow \alpha_b = 0.144rad = 4.13^\circ$$

$$H_b = 2.905 \rightarrow H_n = 0.036 \rightarrow \alpha_n = 1.29 \times 10^{-3} rad \approx 0.037^\circ$$

$$\frac{P}{\omega} = 0.5903 + 83.4361 = 18.150 \frac{kN}{mm}$$

$$F^e = R'(0.00038 + 6.56670) = 1.418 \frac{kN}{mm}$$

اگر P° را نیروی وارد بر واحد طول غلتک فرض شود:

$$P^\circ = \sqrt{\left(\frac{P}{\omega}\right)^2 + (F^e)^2}$$

با خلاصه سازی نتایج جدول ۵-۱ را خواهیم داشت:

جدول ۵-۱- خلاصه نتایج بدست آمده برای نورد ورق تا ضخامت‌های مختلف

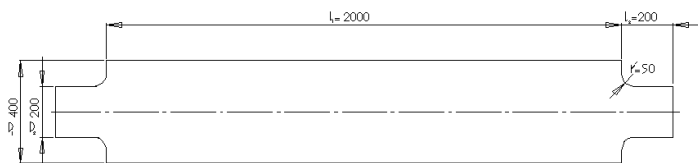
Δh (mm)	$\frac{P}{\omega} \left(\frac{kN}{mm} \right)$	$F^e \left(\frac{kN}{mm} \right)$	$P^\circ \left(\frac{kN}{mm} \right)$	α_b (deg)	α_n (deg)
1	7.634	0.253	7.638	1.87	0.54
2	11.034	0.54	11.076	2.17	0.5
3	14.049	0.872	14.076	3.55	0.36
4	16.851	1.235	16.896	3.89	0.156
4.5	18.15	1.418	18.205	4.13	0.037

به سادگی قابل مشاهده است که با افزایش تغییر ضخامت، نیروی وارد بر غلتک P° و نیروی لازم جهت انجام عملیات نورد F^e افزایش می‌یابد. همچنین قابل تامل است که با افزایش تغییر ضخامت و نیروی نورد نقطه خنثی از قسمت ورودی دور شده و به قسمت خروجی نزدیک

می‌شود، یعنی قسمت بیشتری (کمان بزرگتری) توسط غلتک باید به داخل کشیده شود و همین امر نیز سبب افزایش نیروها می‌گردد.

۵-۴- تحلیل تنش غلتک بر اثر بار نورد

در بخش قبل با استفاده از فرمول‌های موجود به محاسبه دو مولفه شعاعی و مماسی (اصطکاکی) پرداخته شد. اما بررسی پارامترهای مختلف در تنش ایجاد شده در غلتک توسط این نیرو به بررسی فاکتورهای مختلف هندسی و ارائه یک فرمول برای محاسبه ماکزیمم تنش در غتک بر اساس نظریه تنش فون مایسس می‌پردازیم. برای این منظور غلتکی با خصوصیات هندسی زیر در نظر می‌گیریم (شکل ۵-۱). برای نیل به فرمولی جامع با خصوصیات فوق لازم است، ابتدا پارامترهای مختلف شناسایی شوند.



شکل ۵-۱ نمایش شماتیک از یک غلتک نورد سرد

با نگاهی اجمالی به شکل ۵-۱ پارامترهای زیر به نظر در ماکزیمم تنش موجود تاثیر گذارند.

- نسبت قطر اصلی به قطر گردن غلتک $\frac{D_1}{D_2} = \frac{R_1}{R_2}$.
- مقدار نیروی وارد بر غلتک (نیروی جدا کننده غلتک).
- شعاع فیلت در محل اتصال بشکه غلتک به گردن r' .
- نسبت فاصله تکیه گاه تا بشکه غلتک l_2 به طول اصلی غلتک l_1 .
- نسبت طول خط بارگزاری به طول کل غلتک.

فاکتورهای بالا با توجه به نمونه عمومی از غلتک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با اینحال ممکن است با تغییر شکل غلتک فاکتورهای دیگری نیز مورد توجه قرار بگیرند ولی از آنجا که غلتک

مورد بررسی، یک مورد عمومی بوده است، این فاکتورها نیز به عنوان فاکتورهای قابل بسط به تمامی غلتک، ابتدا به صورت جداگانه و سپس به صورت جمعی مورد تحلیل قرار می گیرند. لازم به ذکر است، ابتدا با یک تحلیل تنش ابتدایی محل تنش ماکزیمم در غلتک شناسایی شد. این محل ها اغلب در نزدیکی محل فیلت و در بعضی موارد در زیر تکیه گاه ها و یاتاقان ها به صورت تنش لهیدگی مشاهده شد. از آنجا که تنش لهیدگی و تمرکز تنش در تکیه گاه ها اغلب موجب بروز خطای بسیار در تحلیل مسائل تنش می شود، و خود نیازمند بررسی جامع تر محل و موضع تنش می باشد، از بررسی این نقاط (تنش در تکیه گاه ها) به عنوان نقطه ای که ممکن است تنش در آنجا ماکزیمم می شود، خودداری شده و تنها به بیان اینکه تحت چه شرایطی تنش در این نقاط ماکزیمم می شود، بسنده می شود بنابراین تحلیل و فرمول به دست آمده بر اساس تنش ماکزیمم در محل فیلت به دست می آید، که البته تقریباً حالتی کلی خواهد بود، زیرا تحلیل انجام شده با نرم افزار انسیس نیز تنها در شرایطی خواص تنش ماکزیمم را خارج از نقطه مذکور نشان می داد.

برای تحلیل فوق با استفاده از نیروی جدا کننده غلتک خاصی در محیط انسیس به بررسی نحوه تاثیر پارامترهای مذکور در ماکزیمم تنش پرداخته شد. نحوه عملکرد و انتخاب المان ها به صورت مشروح در پیوست ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است نتایج به دست آمده میانگین دو حل عددی بر اساس حل المانی و حل نودی بوده است.

بعد از بررسی تک تک عامل های فوق و نحوه تاثیرگذاری آن ها به عنوان یک تابع جداگانه، به ترکیب این فرمول ها و ارائه فرمول کلی در این بحث پرداخته شد.

۵-۴-۱- تاثیر r' بر روی ماکزیمم تنش

غلطکی با خصوصیات موجود در شکل ۵-۲ تنها با این تفاوت که شعاع فیلت r' از ۳۰ تا ۷۰ میلی متر تغییر می کند را در نظر می گیریم. فرض می کنیم ورق St37 از ضخامت ۲۰ تا ۱۹ میلی متر با این غلتک نورد بشود. با توجه به محاسبات انجام شده و نیروی جدا کننده به دست آمده، اثر تغییر این شعاع فیلت را بر روی تنش ماکزیمم به دست می آوریم. با توجه به محاسبات انجام شده در فصول قبل برای طول غلتک ۲۰۰۰ میلی متر،

$$\begin{cases} \frac{P}{\omega} = 7.634 \frac{kN}{mm} \rightarrow P = 15.268 kN \\ F^e = 0.253 \frac{kN}{mm} \rightarrow F^e = 506 kN \end{cases}$$

تحلیل انجام شده در نرم افزار انسیس نتایج زیر را برای شعاع فیلتهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ نشان داد.

جدول ۵-۲. نتایج به دست آمده با تغییر شعاع مختلف فیلته

r'(mm)	Nodal Solution (N/mm ²)		Element Solution (N/mm ²)		S _{max,average} (N/mm ²)
	S _{min}	S _{max}	S _{min}	S _{max}	
30	13.382	2299	12.371	2385	2342
40	17.504	1972	14.551	2048	2010
50	23.061	1728	17.297	1850	1789
60	15.929	1476	12.459	1673	1574.5
70	19.529	1430	17.681	1577	1503.5

انجام تحلیل با شعاع فیلته بیشتر نشان می دهد که نقطه بحرانی به محل تکیه گاه و نیز به نقاطی که در شکل زیر (۳-۵) نشان داده شده است، انتقال می یابد که در این جا مورد بررسی قرار نگرفته اند.



شکل ۵-۲- یک غلتک شماتیک که در آن نقاط خارج از تحلیل نشان داده اند.

۵-۴-۲- تاثیر شعاع گردن بر ماکزیمم تنش

اثر شعاع R_2 بر ماکزیمم تنش نیز با اعمال همان نیروی نورد حاصل از رول ورق st37 از ضخامت ۲۰ تا ۱۹ میلی متر به دست می‌آید. مشخصات هندسی غلتک همان شکل ۵-۱ است. با این تفاوت که شعاع فیلت $r'=25$ میلی متر بوده و D_2 متغیر خواهد بود. با در نظر گرفتن شعاع ۷۵، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۵، ۱۲۵ نتایج زیر حاصل شد.

جدول ۵-۳- تنش‌های بدست آمده از حل نرم افزار با توجه به تغییر پارامتر R_2

R2 (mm)	Nodal Solution (N/mm ²)		Element Solution (N/mm ²)		$S_{max,average}$ (N/mm ²)
	S_{min}	S_{max}	S_{min}	S_{max}	
75	17.977	5184	16.173	5426	5305
90	16.534	3064	16.435	3238	3151
100	14.042	2537	13.315	2681	2609
115	12.084	1694	8.156	1811	1752.5
125	8.001	1353	13.845	142	1390.5

۵-۴-۳- تاثیر فاصله تکیه گاه تا قسمت اصلی غلتک بر توزیع تنش

با توجه به شکل ۵-۲ تاثیر طول l_2 با مقادیر هندسی نشان داده شده در شکل، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر مورد بررسی l_2 ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ میلی متر بودند. نتایج در جدول ۵-۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۴- تنش‌های بدست آمده از حل نرم افزار با توجه به تغییر پارامتر l_2

l_2 (mm)	Nodal Solution (N/mm ²)		Element Solution (N/mm ²)		$S_{max,average}$ (N/mm ²)
	S_{min}	S_{max}	S_{min}	S_{max}	
150	19.543	1282	16.624	1407	1344.5
175	27.215	1404	22.399	1495	1449.5
200	21.839	1731	14.215	1814	1772.5
250	16.95	2090	13.251	2215	2152.5
300	29.234	2475	19.146	2718	2596.5

۵-۴-۴- بررسی نحوه تاثیر توزیع بار بر ماکزیمم تنش در غلتک

با فرض اینکه در عمیات نوردی خاص نیروهای $P=15268$ و $F^e=50.6$ کیلو نیوتن بر غلتک وارد شوند، و با فرض آنکه این بارها در طول l' از طول کل l_1 بر غلتک وارد می‌شوند و با فرض مقادیر هندسی موجود در شکل ۵-۲، تحلیل این نیرو در شش نسبت طول $\frac{l'}{l_1}$ ، $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{2}$ ، $\frac{2}{3}$ ، $\frac{3}{4}$ ، $\frac{4}{4}$ انجام گشت و نتایج در جدول زیر ثبت شد.

جدول ۵-۵- تنش‌های بدست آمده از حل نرم افزار با توجه به تغییر پارامتر $\frac{l'}{l_1}$

$\frac{l'}{l_1}$	Nodal Solution (N/mm ²)		Element Solution (N/mm ²)		$S_{\max, \text{average}}$ (N/mm ²)
	$S_{\min}$	$S_{\max}$	$S_{\min}$	$S_{\max}$	
1/4	28.616	1593	23.08	1703	1648
1/3	31.547	1459	20.981	1563	1511
1/2	31.605	1462	20.981	1563	1512.5
2/3	27.704	1716	25.371	1835	1775.5
3/4	31.158	1596	23.394	1706	1651
4/4	24.532	1607	12.956	1728	1667.5

مقایسه مقادیر مختلف $S_{\max, \text{average}}$ برای $\frac{l'}{l_1}$ های مختلف به هیچ گونه نتیجه منطقی و رابطه خاصی منجر نمی‌شود. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که چگونگی توزیع بار بر غلتک تقریباً در مقدار تنش ماکزیمم، اثر منظمی ندارد.

۵-۴-۵- تحلیل تاثیر عددی پارامترهای مختلف و استخراج فرمول کلی

برای به دست آوردن فرمول کلی برای محاسبه ماکزیمم تنش در غلتک از آن رو مهم است که به وسیله آن می‌توان ماکزیمم بار را پیش‌بینی نمود. و در نتیجه با این پیش‌بینی‌ها می‌توان از شکست احتمالی غلتک در عملیات نورد جلوگیری نمود. بدین منظور با استفاده از اعداد به دست

آمده و با استفاده از تابع میانیاپ توانی، بهترین نمودار گذرنده از نقاط را شناسایی کرده و اثر آن پارامتر خاص را به صورت عددی منظور می‌نماییم.

با توجه به این که عامل $\frac{l'}{l_1}$ در توزیع تنش بی تاثیر بوده و یا نا مشخص تشخیص داده شد، فرمول زیر به عنوان فرمول کلی به صورت تابعی توانی از عوامل مختلف ارائه می‌شود.

$$S_{\min} = (P^\circ \times l') \times \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{n_1} \times \left(\frac{1}{r'_2}\right)^{n_2} \times \left(\frac{l_2}{l_1}\right) \times k$$

که در فرمول بالا P° برآیند نیروی اصطکاک و نیروی جدا کننده وارد بر غتک و k ضریب ثابتی است که با مقایسه نتایج بایستی یافته شود. n_1 ، n_2 و n_3 نیز با توجه به توابع میانیاپی شده یافته می‌شوند.

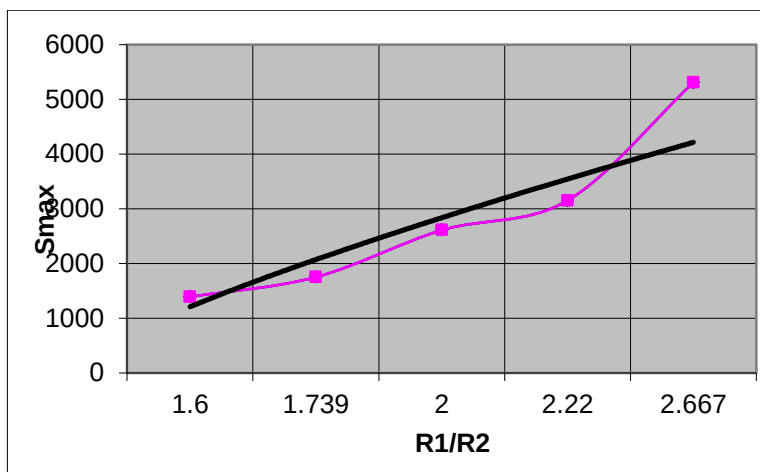
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{200}{75} = 2.667 \rightarrow \bar{S} = 5305 \frac{kN}{mm^2}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{200}{90} = 2.22 \rightarrow \bar{S} = 3151 \frac{kN}{mm^2}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{200}{100} = 2 \rightarrow \bar{S} = 2609 \frac{kN}{mm^2}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{200}{115} = 1.739 \rightarrow \bar{S} = 1752.5 \frac{kN}{mm^2}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{200}{125} = 1.6 \rightarrow \bar{S} = 1390.5 \frac{kN}{mm^2}$$



شکل ۵-۳- نمودار تغییر تنش ماکزیمم بر حسب R_1/R_2 همراه با تابع همپوش آن

$$S = K_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{n_1}$$

$$S = 415.18 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2.5946}$$

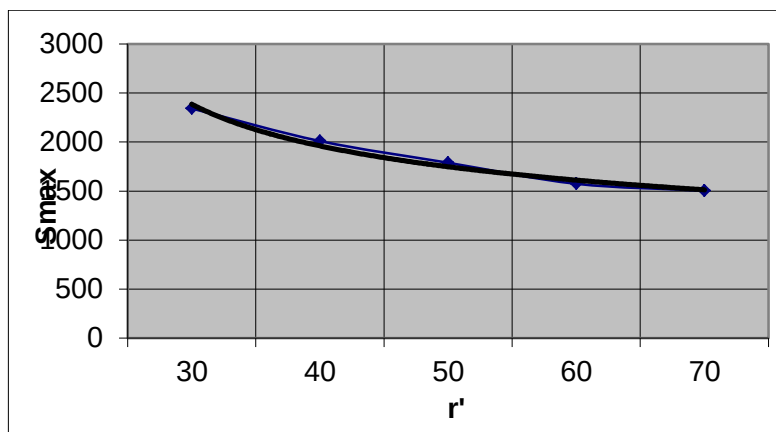
$$r' = 30mm \rightarrow \bar{S}_{\max} = 2342 \frac{N}{mm^2}$$

$$r' = 40mm \rightarrow \bar{S}_{\max} = 2010 \frac{N}{mm^2}$$

$$r' = 50mm \rightarrow \bar{S}_{\max} = 1789 \frac{N}{mm^2}$$

$$r' = 60mm \rightarrow \bar{S}_{\max} = 1574.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$r' = 70mm \rightarrow \bar{S}_{\max} = 1503.5 \frac{N}{mm^2}$$



شکل ۵-۴- نمودار تغییر تنش ماکزیمم بر حسب r' در شکل مقابل همراه با تابع همپوش آن

$$S = K_2 r'^{-n_2}$$

$$S = 14681(r')^{-0.5397}$$

$$\frac{l_{21}}{l_1} = \frac{150}{2000} = 0.075 \rightarrow \bar{S}_{\max} = 1344.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{l_{22}}{l_1} = \frac{175}{2000} = 0.0875 \rightarrow \bar{S}_{\max} = 1449.5 \frac{N}{mm^2}$$

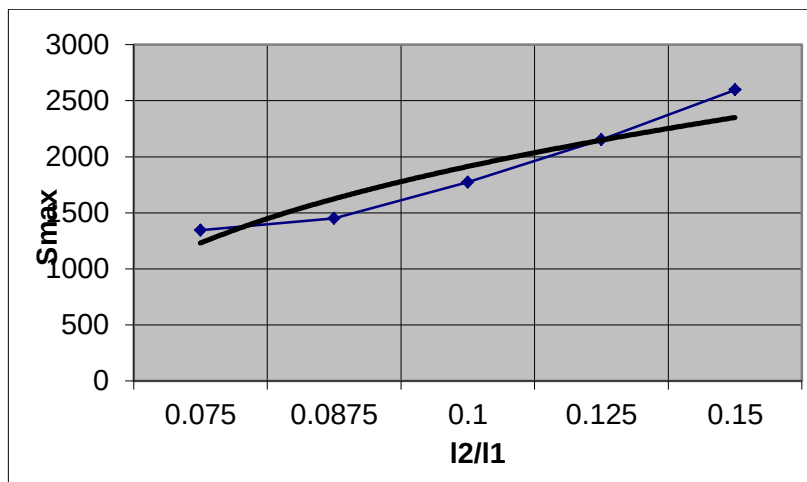
$$\frac{l_{23}}{l_1} = \frac{200}{2000} = 0.1 \rightarrow \bar{S}_{\max} = 1772.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{l_{21}}{l_1} = \frac{250}{2000} = 0.125 \rightarrow \bar{S}_{\max} = 2152.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{l_{21}}{l_1} = \frac{300}{2000} = 0.15 \rightarrow \bar{S}_{\max} = 2596.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$S = K_3 \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^{n_3}$$

$$S_{\max} = 16621 \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^{0.9812}$$



شکل ۵-۵- نمودار تغییر تنش ماکزیمم بر حسب l_2/l_1 در شکل همراه با تابع همپوش آن

با توجه به نتایج به دست آمده فرمول کلی به صورت زیر پدیدار می‌شود:

$$\bar{S}_{max} = (P^\circ \times l') \times \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{2.5946} \times \left(\frac{1}{r'}\right)^{0.5397} \times \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^{0.9812} \times K \quad (5-17)$$

مقدار K را می‌توان با میانگین K از چندین اطلاعات وجود به دست آورد. بدین صورت که در بخش قبل با داشتن خصوصیات هندسی ماکزیمم تنش بوسیله نرم افزار انسیس مشاهده شد. حال با عملیاتی معکوس با فرض کردن K به عنوان مجهول از معادله فوق مقدار K را برای چندین داده مشخص جدول زیر به دست می‌آوریم.

جدول ۵-۶- مقدار تنش ماکزیمم بر حسب تمامی پارامترهای موثر برای یافتن مقدار K

S_{max} (N/mm ²)	$P^\circ \times l'$ (kN)	R_1/R_2	$1/r'$	l_2/l_1	$K \times 10^{+3}$ بدست می‌آید
1772.5	15268	2	0.02	0.125	1.22123
1449.5	15268	2	0.02	0.0875	1.417162
1390.5	15268	1.6	0.04	0.1	1.463684
3151	15268	2.22	0.04	0.1	1.418035
2342	15268	2	0.039	0.1	1.532888
1574.5	15268	2	0.0167	0.1	1.48836

اگر مقایر K را بر حسب افزایش $\bar{S}_{\max}$ مرتب نماییم داریم:

جدول ۵-۷- مقدار K بدست آمده بر حسب تنش بدست آمده مختلف

$S_{\max}$ (N/mm^2)	1390.5	1449.5	1574.5	1772.5	2342	3151
$K \times 10^{+3}$	1.46368 4	1.41716 2	1.4883 6	1.2212 3	1.53288 8	1.41803 5

مقایسه مقادیر مختلف K با افزایش $S_{\max}$ نشان می‌دهد که K هیچگونه رابطه خاصی با $S_{\max}$ ندارد، پس می‌توان برای یافتن K از K های موجود میانگین‌گیری نمود. $K=1.4235 \times 10^{-3}$ بنابراین فرمول ماکزیمم تنش در غلتک حین عملیات نورد سرد به صورت مقابل خواهد بود:

$$S_{\max} = \left(P \frac{N}{mm} \times l' \right) \times \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2.5946} \times \left(\frac{1}{r} \right)^{0.5397} \times \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^{0.9812} \times 1.4235 \times 10^{-3} \quad (5-18)$$

۵-۴-۶- بررسی صحت فرمول بدست آمده

موضوع فوق مورد بررسی محققان کمی‌قرار گرفته تحقیقات کاربردی زیادی صورت نگرفته و فرمولی بدین شکل ارائه نشده و لذا اطلاعاتی بدست نیامده است. از دیگر کارهای انجام شده در این مبحث جز در مورد بدست آوردن نیروی اصطکاک و جداکننده غلتک در مجلات یا کنفرانس‌های مختلف در دسترس نبوده است. متأسفانه به علت پرهزینه بودن عملیات نورد، انجام آزمایش جهت بررسی فرمول فوق نیز با مشکل روبرو است. با مقایسه این فرمول با نتایج تحلیلی بدست آمده از فرمول‌هایی که برای نیروهای نورد ارائه شده اند و مقایسه آنها با حد عددی انجام شده با نرم افزار برای چندین اطلاعات دیگر تطبیق مناسبی یافته می‌شود.

فرمول ۵-۱۸ به عنوان یک فرمول ساده و کاربردی می‌تواند به عنوان اولین قدم برای بررسی در عملیات نورد همراه با فرمول ساده ۵-۳ برای بدست آوردن نیروی نورد بکار گرفته شود. تحقیق و تحلیل و تحقیق بیشتر پیرامون محل تنش ماکزیمم و مقدار آن با توجه به شکل هندسی

غلتک‌های مختلف و چگونگی بکارگیری آنها با توجه به روند انجام شده در پروژه می‌تواند پژوهشهای جدیدی ادامه یابد. راه‌های کاهش ماکزیمم تنش موجود در غلتک نیز با توجه به فرمول ۵-۱۸ کاملاً روشن است. با اینحال گاهی موارد قیود هندسی طراح را از انجام تمامی راهکارها برای کاهش این تنش باز می‌دارد. در ضمن لازم به ذکر است، اگرچه اکثر ترک‌ها، تنش‌ها و شکست‌ها در قسمت تماس گردن و بشکه غلتک رخ می‌دهد، امکان ایجاد تنش لهیدگی در یاتاقان‌ها و دیگر نقاط که در بخش‌های قبل ذکر شد، وجود دارد، که این مسئله خارج از بحث فرمول فوق بوده است. بعلاوه این فرمول تنها به بحث در مورد بار استاتیکی و تنش ایجاد شده در غلتک می‌پردازد. ممکن است به علت سرعت بسیار بالای غلتک و مدت زمان کار با تنش چه بسا کمتر به علت خستگی غلتک دچار شکست شود. بررسی خستگی غلتک و ارائه یک فرمول محاسباتی ساده برای عمر یک غلتک با توجه به فرمول تنش ارائه شده نیز می‌تواند به عنوان راهی جدید برای بررسی و تحلیل تنش در عملیات نورد قلمداد شود.

مراجع

- [۱-۵] ایگور پوپوف؛ "مقاومت مصالح"؛ ترجمه شاهپور طاحونی؛ انتشارات پارس آیین؛ چاپ چهاردهم؛ زمستان ۸۲.
- [۲-۵] دهقان، رشیدی نیا، رضائی، یوسفی؛ "محاسبات عددی"؛ مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ چاپ اول؛ ۱۳۸۳.
- [۳-۵] جمشیدی.ن، داورزنی.ج؛ "راهنما و کاربرد MATLAB 7.0"؛ انتشارات ناقوس، چاپ دوم، ۱۳۸۴.
- [۴-۵] جمشیدی.ن، جوانبخت.ب؛ "طراحی اجزا و مقاومت مصالح به کمک ANSYS"؛ انتشارات سیمسن دخت؛ چاپ اول، زمستان ۸۴.
- [۵-۵] محبی.م، پناهی.ر؛ "آموزش ANSYS"؛ انتشارات ناقوس، چاپ اول، بهار ۸۱.
- [۶-۵] جاهد مطلق.ج، نوبان.م، اشراقی.م؛ "اجزا محدود ANSYS"؛ انتشارات دانشگاه تهران؛ چاپ دوم؛ پاییز ۸۳.
- [۷-۵] رفیع زاده.م، مالکی.ع، "راهنمای MATLAB"؛ انتشارات دانشگاه امیرکبیر، چاپ اول؛ زمستان ۸۱.
- [۸-۵] علیزاده.ی، عزیزی.ج، "آزمایش های مقاومت مصالح"؛ انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر؛ چاپ اول؛ ۸۵.
- [۹-۵] ساعتچی.ا، ادیسی.ج؛ "کلید فولاد"؛ انتشارات ارکان اصفهان؛ چاپ اول؛ بهار ۷۱.

فصل ششم

غلتک و سنگ زنی غلتک



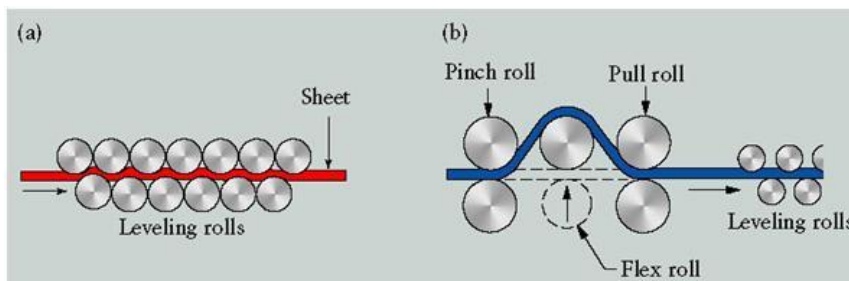
مقدمه

هر ساله تحقیقات وسیعی در شرکت‌ها و سازمانها و مراکز پژوهشی مختلف برای بهبود عملیات نورد و فناوریهای مربوط به آن از جمله ساخت غلتک در حال انجام است. غلتک از مهمترین اجزا تجهیزات نورد می باشد که کیفیت و تناژ تولید محصولات نوردی به میزان زیادی به کیفیت آن بستگی دارد. غلتکها از نظر شکل ظاهری به دو گروه غلتکهای کالیبر (غلتکهای نورد مقاطع) و غلتکهای نورد تخت تقسیم می شوند. اما از نظر مواد به سه گروه چدنی، فولادی ریخته گری و فولادی آهنگری شده تقسیم می شوند. از این میان غلتکهای فولادی آهنگری شده به سه دلیل از اهمیت بیشتری برخوردار می باشند، اولاً؛ دقت در فرایند تولید، ثانیاً؛ اهمیت کاربرد آنها و ثالثاً؛ قیمت مناسب. غلتک از تجهیزات مصرفی محسوب می شود. غلتکها جدای از آنکه به علت خرابی، شکست یا ترک وغيره ممکن است از رده خارج گردند، به مرور زمان بر اثر سایش باید عوض شوند. ظرفیت نصب شده صنعت نورد ایران مجموعاً بیش از حدود پانزده میلیون تن است که قسمت اعظم آن مربوط به صنایع فولاد است. نیاز به غلتک در صنعت نورد بالا بوده و سالانه هزینه زیادی را نیز به خود اختصاص می دهد. از آن گذشته با توجه به ارزش افزوده بالای غلتکهای فولادی آهنگری شده که قیمت آن دهها برابر مواد اولیه است فناوری ساخت غلتک نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. غلتکها بر خلاف ظاهر زخیم، زمخت و سخت، بسیار حساس بوده و باید حتماً در شرایط مناسب و کنترل شده ای نگهداری شوند. مثلاً یک غلتک نورد تخت باید روی پایه های تخته ای نگهداری و هر هفته ۴۵ درجه دور خود چرخش داشته باشد تا تحت تاثیر وزن خود خمش نیابد.

غلتک

غلتک اصلی ترین ابزار شکل دادن فلز در فرایند نورد است. کاربرد غلتک تنها برای نورد و شکل دادن سنگین (bulk metal forming) نیست بلکه بعضاً غلتک برای فرم دادن یا صاف کردن ورق و سایر محصولات نوردی نیز استفاده می شود که در صنعت به فرایند شکل دهی، فرم دهی یا گاهی ورقکاری مشهورند (sheet metal forming) (شکل ۶-۱). شل ها هم که برای تولید ورقهای ریخته گری پیوسته از طریق ماشین کاستر (شکل ۶-۱) بکار می روند از فولاد آهنگری شده ساخته می شوند. شل ها دو جداره بوده و آبگرد است تا پوسته خارجی را خنک کرده

و باعث انجماد فلز گردد. در این بخش غلتک‌های شکل‌دادن سنگین فلزات بصورت اختصار مورد بحث واقع می‌شود. از نظر ژئو مکانیکال بر اثر ممان ناشی از نیروی نورد که گاهی به صدها تن می‌رسد، غلتک‌ها در هنگام کار عملاً خم می‌شوند (bending). بر اثر این ممان و نیز خمش، غلتک تحت تنش‌های فشاری و کششی قرار می‌گیرد که دائماً محل آن با دوران غلتک تغییر می‌کند، بنابراین غلتک به شدت تحت تنش‌های خستگی نیز قرار دارد [۳ و ۲]. این فرایند بصورت شماتیک در شکل ۳-۶ آمده است. برای جلوگیری از گسترش ممان و کاهش تنش‌های وارد به غلتک از استندهای ۴ یا حتی ۶ غلتکه (طبقه) استفاده می‌شود. در این نوع استندها غلتک‌های کاری بوسیله غلتک‌های پشتیبان (در استند ۴ غلتکه) حمایت و پشتیبانی می‌گردد (شکل ۴-۶). در استند ۶ غلتکه بین غلتک پشتیبان و غلتک کاری، غلتک‌های میانی قرار دارد.

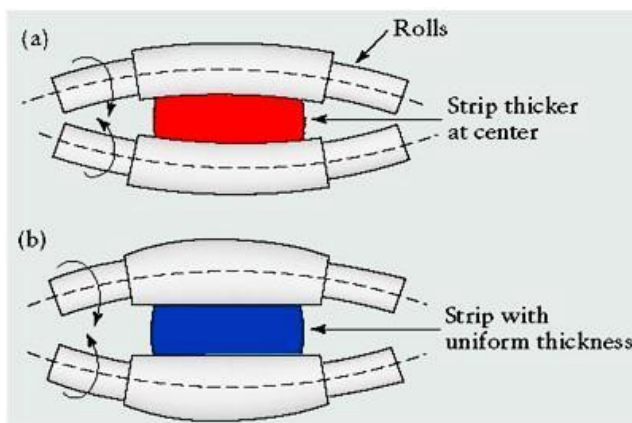


شکل ۳-۶: نمایش مکانیزم صاف کننده‌ها و چگونگی کار غلتک‌های صاف کننده [۱]

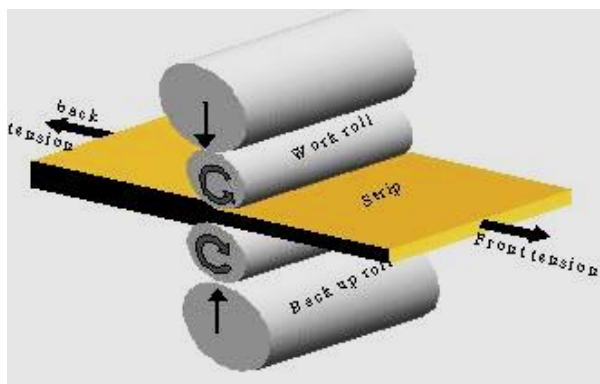


شکل ۳-۶: ماشین ریخته‌گری پیوسته ورق (کاستر) آلومینیوم، و استفاده شل در آنها

غلتک‌ها علاوه بر تنش‌های کششی و فشاری ناشی از نیروی نورد، تحت تاثیر تنش‌های برشی حاصل از سیلان ماده و اصطکاک با محصول نوردی قرار می‌گیرد که این تنش‌ها از سطح به مغز غلتک گسترش می‌یابند. چگونگی این تنش در غلتک و ورق بصورت شماتیک در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



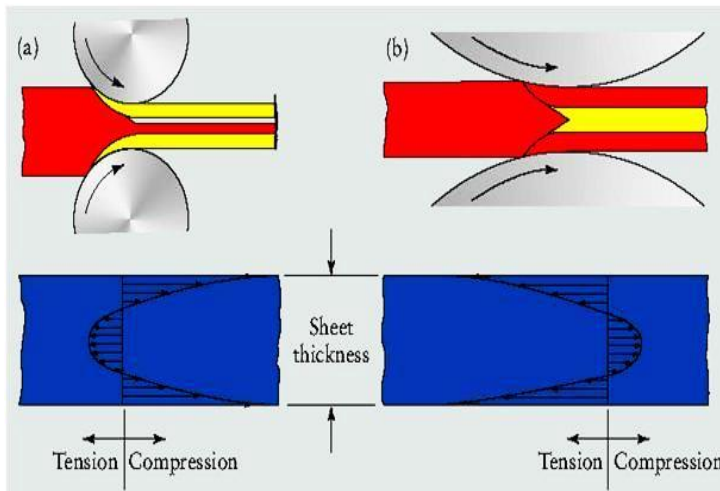
شکل ۵-۶: نمایش خمش غلتک بر اثر بارهای سنگین نیروی نورد و چگونگی ایجاد خستگی [۱]



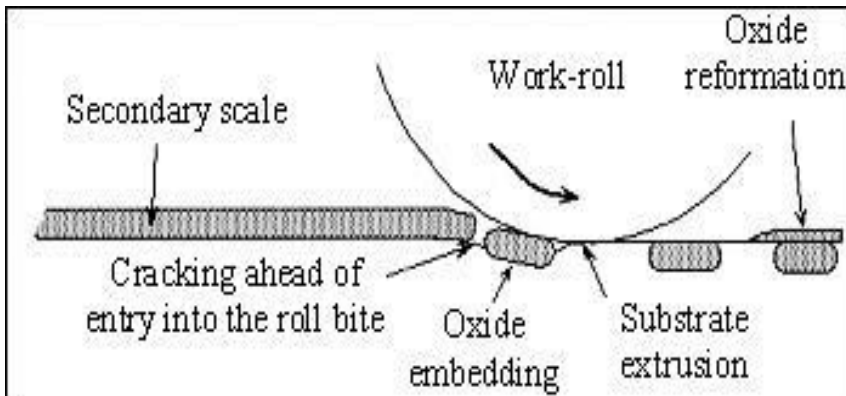
شکل ۶-۴: فرایند نورد در یک استند چهار غلتکه [۱]

ساختار میکروسکوپی لایه خارجی (سطحی) غلتک‌های کاری فولادی آهن‌گری شده برای فرایند نورد سرد، مارتنزیت و بسیار سخت است. این ساختار تحت هر سانحه‌ای که به گرم‌شدن غلتک منجر شود تغییر فاز داده و ممکن است عیوب متالورژیکی و تنش‌های داخلی را در غلتک ایجاد

نماید [۴]. یکی از مسائل اساسی در هنگام نورد و کار غلتک که در ارتباط با نورد سرد ممکن است پیش آید، صدمه دیدن سطح غلتک است. این صدمه به دلایل مختلف مکانیکی یا حرارتی ممکن است به وجود آید [۴ و ۵ و ۶]. حتی شکسته شدن پوسته اکسیدی سطح ورق در نورد، گاهی می‌تواند ایجاد یک شار حرارتی موضعی در سطح غلتک نماید [۱]، (شکل ۶-۶).



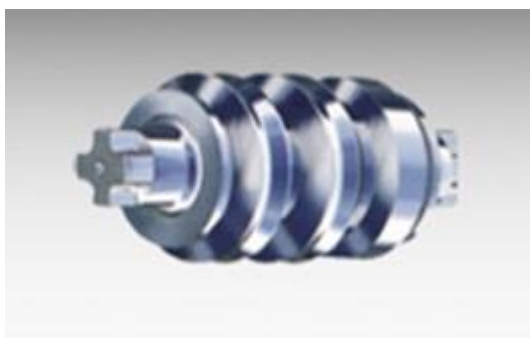
شکل ۶-۵: نمایش پروفیل تنش در ورق هنگام نورد تخت [۱]



شکل ۶-۶: شکسته شدن پوسته اکسیدی سطح ورق در نورد می‌تواند ایجاد یک شار حرارتی موضعی در سطح غلتک نماید [۱]

انواع غلتک

غلتک از مهمترین اجزاء تجهیزات نورد می‌باشد که کیفیت و تناژ تولیدی محصولات به کیفیت آن بستگی زیادی دارد. غلتک‌ها با توجه به کاربرد و یا نوع جنس تقسیم بندی‌های مختلفی دارد. تقسیم بندی غلتک‌ها با توجه فرایند تولید: غلتک‌ها از نظر شکل ظاهری به دو گروه کلی غلتک‌های کالیبر (غلتک‌های نورد مقاطع) که در شکل ۶-۷ یک نمونه آن نشان داده شده است و غلتک‌های نورد تخت (شکل ۶-۸) تقسیم می‌شود.



شکل ۶-۷: تصویری از یک غلتک کالیبر که برای نورد مقاطع بکار می‌رود [۷]

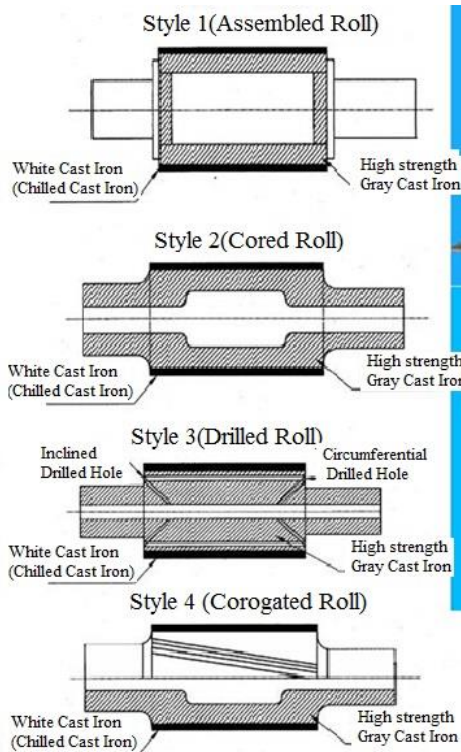


شکل ۶-۸: تصویری از غلتک نورد تخت (غلتک پشتیبان آهن‌گری شده) [۷]

تقسیم بندی غلتک‌ها با توجه به جنس آنها: غلتک‌های نورد برای شکل دادن فلزات، از نظر مواد به چهار گروه چدنی، فولادی ریخته‌گی و فولادی آهنگری شده و تنگستن‌کاربید تقسیم می‌شوند. تصویری از فرایند غلتک ریخته‌گی به روش گریز از مرکز در شکل ۶-۹ آمده است.

تقسیم بندی غلتک‌ها با توجه به کاربرد آنها: غلتک‌ها با توجه کار برد آنها در استند به غلتک‌های پشتیبان، غلتک‌های کاری و غلتک‌های میانی تقسیم می‌شوند که هر یک آنالیز، فرایند تولید و عملیات حرارتی مخصوص به خود را دارا هستند.

تقسیم بندی غلتک‌ها با شرایط کاری آنها: شرایط متفاوت کاری نورد مانند نورد سرد، گرم و یا ولرم، باعث می‌شود آنالیز و عملیات حرارتی متفاوتی برای ساخت غلتک‌ها اعمال شود. غلتک‌های کاری نورد گرم باید در محدوده دمایی بالایی عملیات حرارتی برگشت (tempering)، از فاز مارتنزیت (martensite) برگشت داده شوند. در حالی که غلتک‌های کاری نورد سرد در محدوده دمایی پایینی برگشت داده می‌شوند.



شکل ۶-۹: فرایند ریخته‌گی غلتک به روش گریز از مرکز با سطح خارجی سخت شده [۷]

سایر غلتک‌ها: غلتک‌هایی که وظیفه شکل‌دادن سنگین فلزات را ندارند معمولاً نیروی زیادی بر آنها اعمال نمی‌شوند و از این جهت از اهمیت کمتری برخوردارند. با این همه در صنعت نورد انواع بسیاری از این نوع غلتک‌ها استفاده می‌شوند که بعضاً وظیفه حمل و هدایت یا جهت دادن به مواد و قطعات تولیدی را بر عهده دارند. این موارد نیز باید بسته به کارکرد خود از مقاومت سایشی، زبری و پرداخت سطح خاصی برخوردار باشند. بعضی از غلتک‌ها برای خم‌کاری استفاده می‌شوند که به فرایند آنها ورق‌کاری (sheet metal forming) گفته می‌شود. این فرایند با فرایند شکل‌دادن سنگین فلزات (Bulk metal forming) کاملاً متفاوت است.

غلتک نهایتاً باید سنگ زده شود، سنگ زدن و نگهداری غلتک از فناوری خاصی برخوردار است. در شکل ۶-۱۰ تصویری از یک ماشین سنگ‌زنی غلتک دیده می‌شود. سازندگان غلتک معمولاً تجهیزات دیگر ریخته‌گری و آهن‌گری شده مثل تجهیزات نیروگاهی و نفت و شفتهای بزرگ توربین‌ها را نیز می‌سازند.



شکل ۶-۱۰: عکسی از یک ماشین سنگ‌زنی غلتک تخت برای سنگ‌زنی غلتک‌های کاری نورد ورق‌های تا عرض ۴۵۰۰ میلیمتر. این ماشین در سال ۲۰۱۵ در کارخانه آلومینیوم hydro نصب شده است و توانایی سنگ‌زنی غلتک تا عرض ۶۵۰۰ میلیمتر را دارد.

غلطکها جدای از آنکه به علت خرابی، شکست، یا ترک و غیره ممکن است از رده خارج گردند، به مرور زمان بر اثر سایش باید عوض شوند. شکل ۶-۱۱ خراب شدن یک غلتک بر اثر ترکهای ناشی از تنشهای مختلف اعمال شده بر آن را نشان می‌دهد.

کر (cor) یا اسپول (Spool) در پیچش کوئل ورق نورد شده بکار می‌رود. این قطعه از فولاد آهن‌گری شده یا فولادهای ریخته‌گری گریز از مرکز با استحکام بالا و همراه با عملیات حرارتی ساخته می‌شوند. شکل ۶-۱۲ عکسی از چند کر یا اسپول را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۱: عکسی از خراب شدن غلتک چدنی بر اثر ترکهای ناشی از تنشهای مختلف کاری [۷]



شکل ۶-۱۲: کر (cor) یا اسپول (Spool) که در پیچش کوئل ورق نورد شده بکار می‌رود [۷]

سختی سطح غلتک‌ها: سختی سطح غلتک بسته به نوع کارکرد آن متفاوت است. سطح غلتک‌های کاری فولادی آهنگری شده را جهت افزایش مقاومت سایشی آن معمولاً تا عمق حدود ۲ اینچ با روش القایی فرکانس بالا سخت می‌کنند. شکل ۶-۱۳ عکسی از عملیات سخت کاری سطح غلتک را با کوره القایی فرکانس بالا نشان می‌دهد. غلتک بسته به نوع و شرایط کار، هر چند هزار تن تولید باید سنگ زده شود. از این رو بعد از مدتی مقدار عمق سخت شده کم و کمتر می‌شود تا پایان یابد. در آن زمان غلتک کار کرد خود را از دست داده است. سختی سطح غلتک‌ها معمولاً با مقیاس سختی شور (shore) اندازه‌گیری می‌شود. در جدول ۶-۱ تبدیل سختی در استانداردهای مختلف شامل برینل، راکول سی، شور سی و شور دی که معمولاً در صنعت غلتک کاربرد دارد آمده است. در این جدول اندازه برینل با ساچمه به قطر ۱۰ میلیمتر و وزنه ۳۰۰ کیلوگرمی و اندازه شور با دستگاه ساخت کارخانه شور (Shore) اندازه گرفته شده است. [۸]

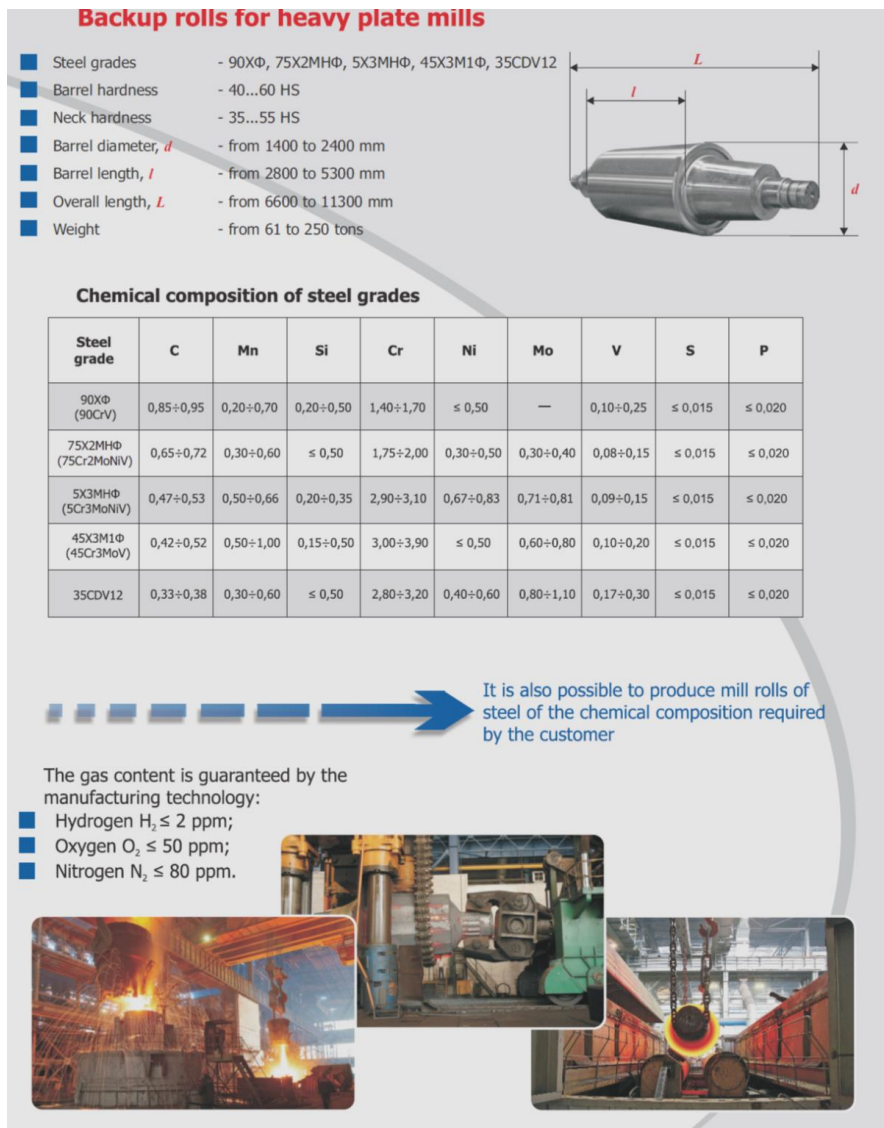


شکل ۶-۱۳- عکسی از کوره القایی فرکانس بالا برای عملیات حرارتی سخت کاری سطح غلتک

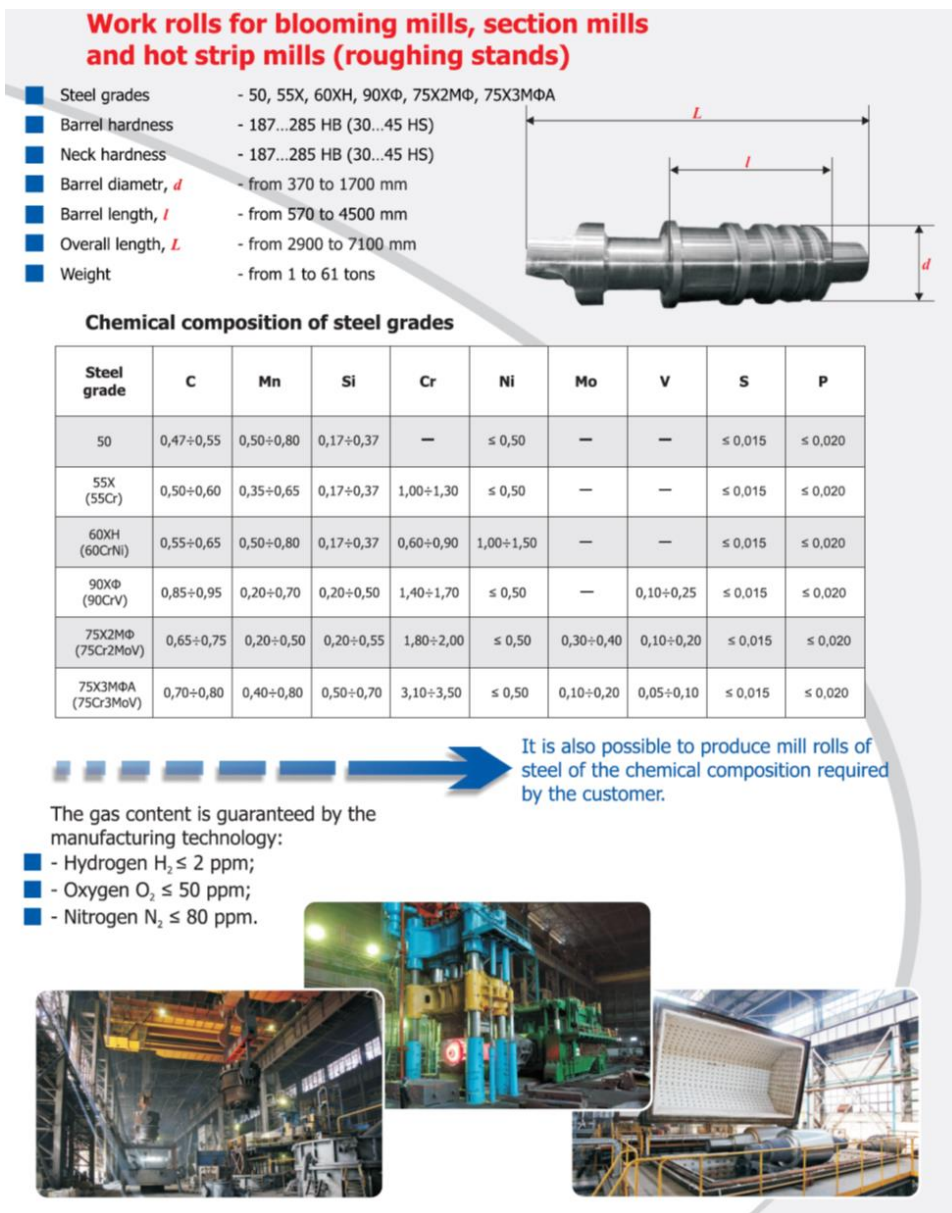
پرداخت سطح غلتک‌ها: سطح غلتک بسته به وضعیت و شرایط نورد و با توجه به کیفیت مورد نیاز سطح محصول تولیدی تغییر می‌کند. بعد از عملیات سنگ زنی سطح غلتک باید آزمایش زبری سنجی شوند.

غلتک‌های عاج دار و امباس: ورق‌های عاج دار که معمولاً برای کف‌های ضد سایش و ضد لغزنده مثل کف قطار و اتوبوس بکار می‌رود و یا ورق‌های امباس شده که مصارف زینتی یا پخش کننده نور دارند نیز از طریق نورد تولید می‌شوند. برای تولید این نوع محصولات از غلتک‌های عاج‌دار و یا امباس استفاده می‌شود.

مشخصات، ابعاد، آنالیز و تصاویری از ساخت یک غلتک پشتیبان در شکل ۶-۱۴ و برای یک غلتک کاری در شکل ۶-۱۵ نشان داده شده است. [۷]



شکل ۶-۱۴: مشخصات، ابعاد، آنالیز و تصاویری از فرآیند ساخت یک غلتک پشتیبان [۷]

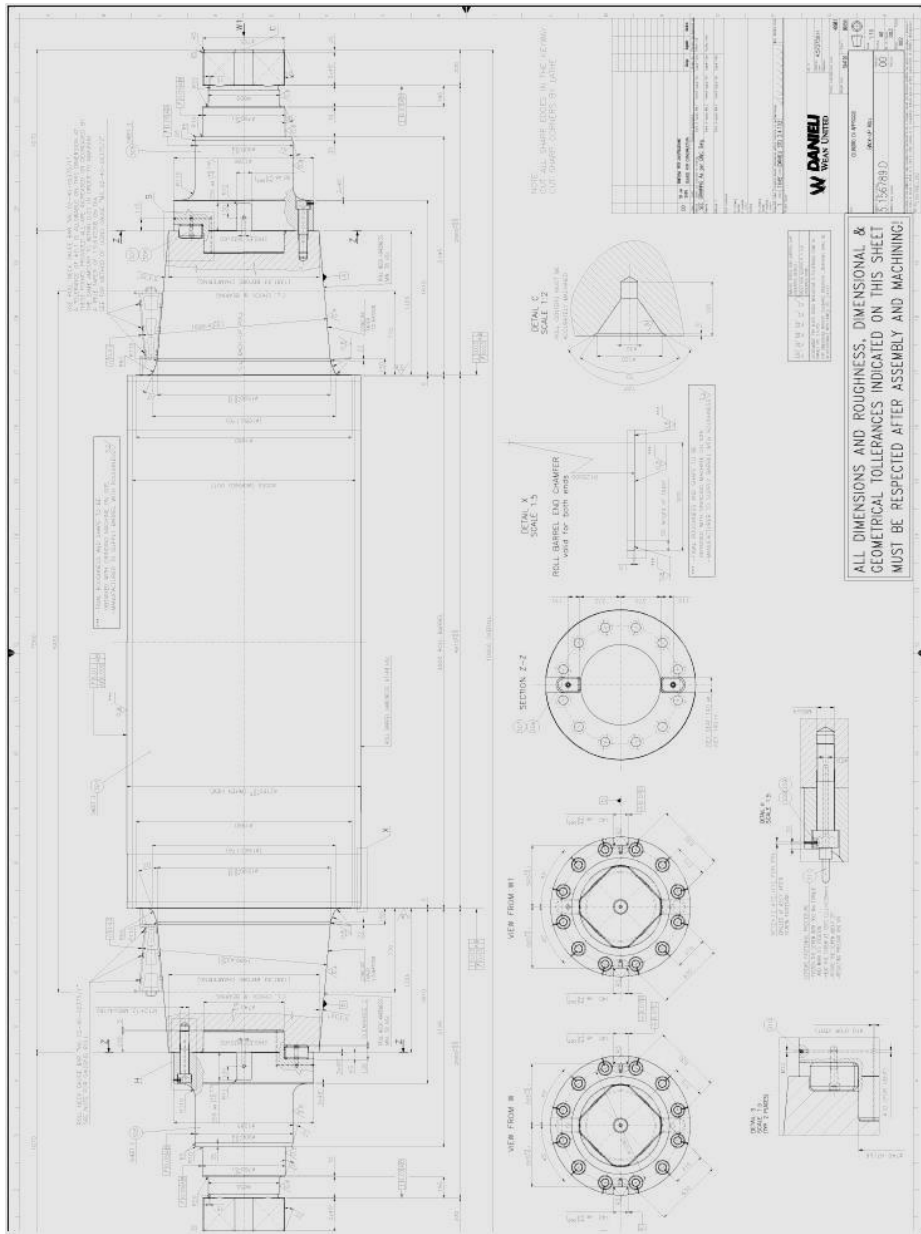


شکل ۶-۱۴: مشخصات، ابعاد، آنالیز و تصاویری از فرآیند ساخت غلتک کاری [۷]

جدول ۶-۱: سختی در استانداردهای مختلف برینل، راکول سی به شور سی و شور دی [۸]

Brinell	Rockwell C	Shore C (SG)	Shore D (SG)
170	–	26	26
180	–	28	28
190	–	29	29
200	–	30	30
210	–	32	33
220	–	33	34
230	–	34	35
240	–	36	37
250	–	38	39
260	–	40	41
270	–	41	43
280	–	43	45
290	–	44	46
300	31	45	47
310	33	46	49
320	34	47	50
330	35	49	51
340	36	50	52
350	37	51	54
360	39	52	55
370	40	54	56
380	41	55	58
390	42	56	60

400	43	57	61
410	44	59	62
420	45	60	64
430	*	61	65
440	46	62	66
450	47	64	68
460	48	65	70
470	49	66	71
480	50	67	72
490	*	69	74
500	5'1	70	75
510	52	71	76
520	*	72	77
530	53	74	78
540	54	75	79
550	*	76	80
560	55	77	81
570	*	78	82
580	56	79	83
590	*	80	84
600	57	81	85
620	58		
630	59		
640	*		
650	60		



شکل ۶-۱۵: نقشه ای از مشخصات غلتک در استند ۴ غلتکه فولاد اکسین اهواز-ایران، با فناوری شرکت دانیلی ایتالیا [۸]

دستگاه سنگ غلتک

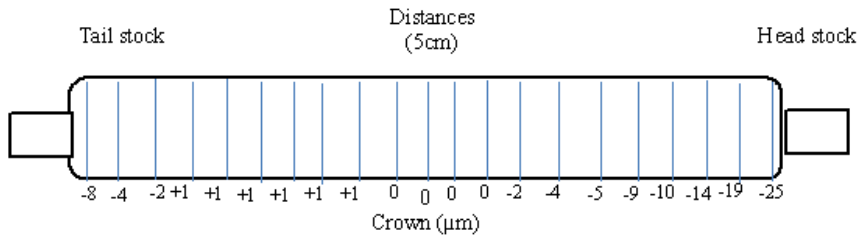
اهمیت غلتک‌های نورد و نگهداری آنها قبلاً بیان شد. باید یاد آور شد که فرایند سنگ‌زنی غلتک و ماشین سنگ‌زنی غلتک از اهمیت بالایی برخوردار است. یک ماشین خوب باید بتواند کلیه سطح غلتک را با یک سرعت ثابت بدون هیچگونه لرزشی، با دقت بسیار بالا، پرداخت‌های مناسب و به انتخاب اپراتور سنگ بزند. از آن مهمتر آن است که کرون (Crown) منفی یا مثبت را بتواند با دقت بسیار بالا و فروفیل مناسب در سطح غلتک ایجاد کند. از این رو ماشین‌های سنگ‌زنی در طبقه تجهیزات دقیق قرار می‌گیرد. یک ماشین سنگ غلتک چند میلیون دلار ارزش دارد.



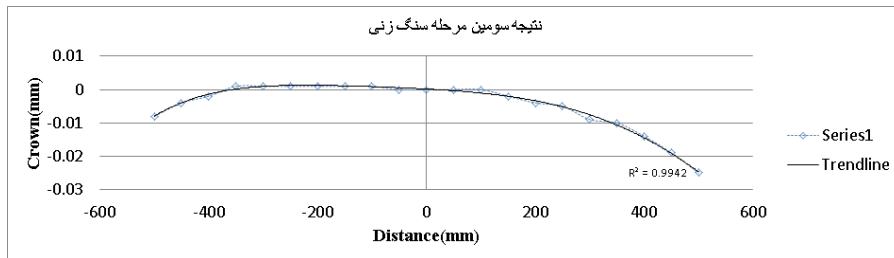
شکل ۶-۱۶: عکسی از یک ماشین سنگ غلتک مدرن برای سنگ‌زنی غلتک‌های پشتیبان تا وزن ۵۵ تن با دقت میکرون. (ماشین هرکولس آلمانی با بیش از ۱۰۰ سال تجربه)

در حین سنگ‌زنی غلتک باید تاج (کرون یا کمبر) آن کاملاً با ابزارهای دقیق اندازه‌گیری شود. در شکل‌های ذیل نمونه‌ای از بررسی‌های لازم برای کنترل دستگاه سنگ برای امکان سنگ‌زنی با کرون مناسب ۲۵ μm را که توسط نگارنده و همکاران مهندس تیم تحقیقاتی مس باهنر انجام شده مشاهده می‌شود. در این مرحله غلتک به میزان ۱۰ پاس سنگ‌زنی گردید که نتیجه آن به شرح زیر آمده است. در این عملیات قابلیت ایجاد کرون (Crown) بین ۱۵ تا ۲۵ میکرون با

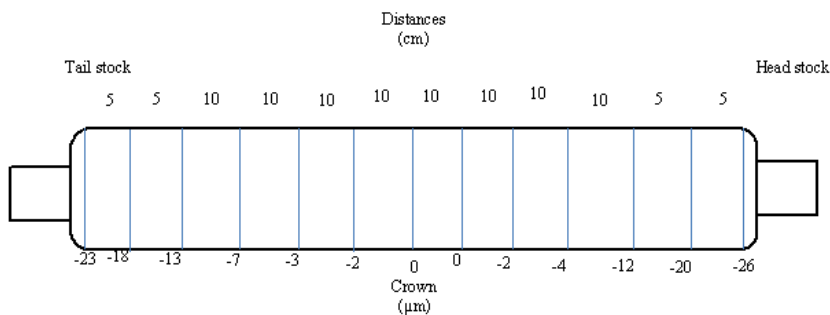
حفظ شرایط کاری در طول بشکه ای 1000 mm برای دستگاه سنگ بوجود آمده است. در زیر روش کنترل سنگ زنی با اندازه گیری و رسم پروفیل آن مشخص می شود. [۸]



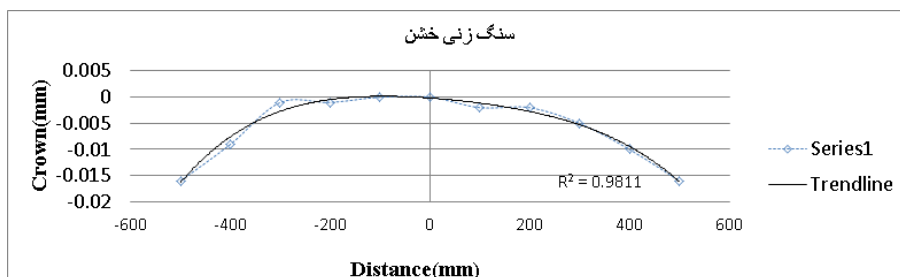
شکل ۶-۱۷: پروفیل کرون غلتک با کرون ۲۵ میکرون، پروفیل کرون متوازن نیست. [۸]



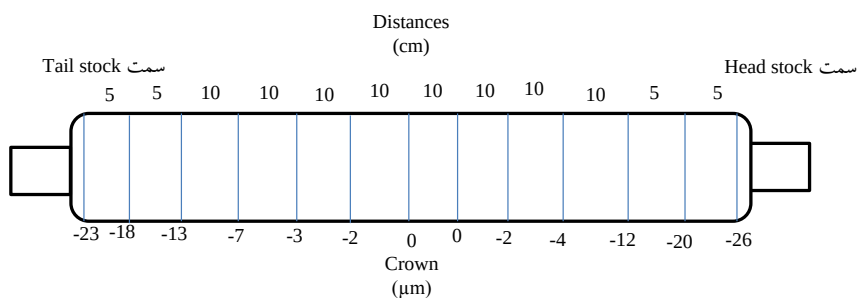
شکل ۶-۱۸: پروفیل کرون غلتک با کرون ۳۰ میکرون، پروفیل کرون متوازن نیست. [۸]



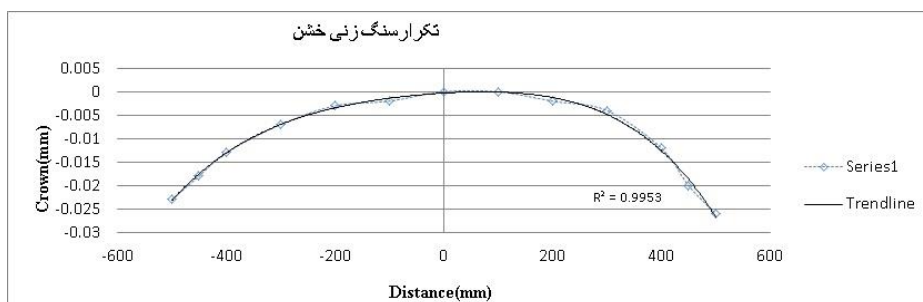
شکل ۶-۱۹: طول بشکه غلتک و کرون های سنگ زده شده تا ۲۵ میکرون. در این سنگ زنی پروفیل کرون تقریباً متوازن است. [۸]



شکل ۶-۲۰: نمودار کرون غلتک سنگ زده شده تا 0.02 میلیمتر (۲۰ میکرون) [۸]



شکل ۶-۲۱: غلتک و پروفیل مقدار کرون در بشکه غلتک تا ۲۵ میکرون [۸]



شکل ۶-۲۲: نمودار پروفیل کرون غلتک تا ۲۵ میکرون با سنگ زنی خشن، در این غلتک پروفیل سنگ زنی کرون مناسب است. [۸]

منابع

- ۱- متحدى ع. ا.، متحدى مهدى ، آناليز، بررسى و تحليل تنش در غلتك‌هاى نورد تخت- تهران، ۱۳۸۹، سازمان پژوهشهاى علمى و صنعتى ايران، (گزارش پروژه منتشر نشده)
- 2- Mottahedi A.A., Case Study of Galvanic Corrosion in Screw down of Hot Aluminum Rolling mill, KMCM2007, International Joint conference on Knowledge management for composite material, Düsseldorf, Germany, 3-6 July 2007
- 3- Mottahedi A. A., Investigation of Phase Transformation of Forged Steel Cold Rolls Due to Heat Affecting and Prevent its Failure, Defect and Diffusion Journal, 2009
- ۴- بررسى اثر تغيير فاز متالورژيکى و اشکالات ناشى از آن در سطوح قطعات بزرگ فولاد آهنگرى شده دوار، على اکبر متحدى، پنجمين کنفرانس تجهيزات دوار، تهران ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳
- ۵- بررسى آناليز شوک حرارتى غلتکهاى فولادى نورد سرد توليد شده با عمليات فورج، على اکبر متحدى، مریم حائری فر، پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی، IMAT2016، دانشگاه شیراز، ۱۸ و ۱۹ آبان ۱۳۹۵، شیراز، ایران
- 6- Mottahedi A. A., Simulation of flat rolling and analyzing of rolling pressure profile, Oriental Journal of Science & Technology Volume 1 No. 1, April, 2008,
- ۷- متحدى ع. ا.، بررسى امکان سنجى طراحى و ساخت غلتکهاى فولادى آهنگرى شده در ايران، تهران، ۱۳۹۲، سازمان پژوهشهاى علمى و صنعتى ايران، (گزارش پروژه منتشر نشده)
- ۸- بررسى فنى و مکانیزم کرون زنى دستگاه سنگ غلتک (بررسى و امکان سازى کرون با دقت بالا برای غلتک‌هاى نورد) با همکارى عبدالرضا حسين زاده، رضا محمدى، سيد محمد مهدى روح الامينى، محسن دوروزى، اسفند ۱۳۹۳
- ۹- گلغذار محمد على، اصول و کاربرد عمليات حرارتى فولادها (ويرايش دوم)، مرکز نشر دانشگاه صنعتى اصفهان، چاپ اول ۱۳۷۸
- 10- American Society for Materials, metals handbook, 10th Ed, vol.4, heat treatment, printed in the United States of America

- 11- http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- 12- American Society for Materials, metals handbook, 10th Ed, vol.4, heattreatment, printed in the United States of America
- 13- http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- 14- LIU, X.; SHI, X.; LI, S.; XU, J.; WANG, G., [FEM Analysis of Rolling Pressure Along Strip Width in Cold Rolling Process], Journal of Iron and Steel Research, International, 2007, 14(5): 22-26.
- 15- Jiang, Z.Y.; Tieu, A.K., [A 3-D finite element method analysis of cold rolling of thin strip with friction variation], Tribology International 37 (2004) 185–191.
- 16- www.rollingtech.com

پیوستها

پیوست ۱:

استفاده از دستور **quad** در محیط **MATLAB** برای حل عددی انتگرال معین یگانه

برای استفاده از این تابع بهتر است ابتدا با ماهیت آن آشنا شویم. **quad** یا تابع قدیمی تر آن در متلب که منسوخ شده است (**quad8**) یک روش عددی برای تخمین جواب یک انتگرال با استفاده از روش سیمپسون تطبیقی است. چگونگی اعمال تابع به صورت زیر است:

q=quad (fun,a,b)

q=quad (fun,a,b,tol)

q=quad (fun,a,b,tol,trace)

مربع سازی یک روش عددی است که برای یافتن مساحت زیر نمودار یک تابع در یک بازه مشخص استفاده می شود.

$$q = \int_a^b f(x).dx$$

q=quad (fun,a,b) تلاش می کند، تا مقدار یک انتگرال را در فاصله مشخص **a** تا **b** با خطای 10^{-6} با استفاده از روش مربع ساز بازگشتی سیمپسون تطبیقی محاسبه نماید؛ **fun** در واقع نمونه ای از یک تابع است که هم در محیط **M** فایل یا به عنوان یک تابع دلخواه استفاده می شود. تابع زیر انتگرال به شرطی تخمین صحیح از هر المان متغیر **x** ارائه می دهد، که تابع **y=fun(x)** توافق برداری با بردار **x** داشته باشد، یعنی در واقع خود نیز **(y)** یک بردار باشد.

تابع **q=quad(fun,a,b,tol)** از یک روش منسوخ تخمین خطای **tol** به جای خطای اولیه که 10^{-6} است، استفاده می کند. مقادیر بالای **tol** موجب تخمین توابع کمتر و در نتیجه سرعت بالاتر محاسبات می شود، که جواب با دقت کمتر را در بر خواهد داشت. در متلب نسخه 5.3 و قبل تر از آن، تابع **quad** یک الگوریتم کمتر مورد اطمینان بود، که با خطایی حدود 10^{-3} عمل می کرد.

برای روشن تر شدن استفاده از تابع قبل از نشان دادن تابع استفاده شده در محاسبات به مثال زیر توجه کنید. اگر تابع myfun را در M فایل ساخته باشیم با دستور مقابل در محیط اصلی می‌توان انتگرال آنرا محاسبه نمود.

`Q=quad(@myfun,0,2)`

در حالیکه M فایل به صورت مقابل بوده است:

`function y=myfun(x)`

`y=1./(x.^3-2*x-5);`

در محیط اصلی نیز می‌توان بدون رجوع به M فایل با استفاده از دستور زیر مقدار انتگرال را محاسبه نمود.

`F=@(x)1./(x.^3-2*x-5);`

`Q=quad (F,0,2);`

با رجوع به شکل پ ۱-۱ در انجام این پروژه نیز ابتدا توابع زیر تعریف شدند.

`function y=zzz(x)`

`y=...`

سپس در محیط اصلی با دو دستور زیر مقدار W جواب انتگرال تابع y تا ۱۰ رقم اعشار محاسبه شده است.

`W=quad(@zzz,0,0.031)`

`Vpa(W,10)`

در شکل پ ۱-۱ برنامه نوشته شده، دستوری برای علاقه مندان جهت استفاده مستقیم از کد متلب برای نوشتن برنامه محاسبه انتگرال با استفاده از روش سیمپسون تطبیقی آورده شده است.

```

1 function y = zzz(x)
2 %Load +
3 %y=(1.55+235) * ((9+200*x.^2)/9) .* exp(0.09*(2*((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*atan(((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*x)));
4 %Load -
5 %y=(1.55+235) * ((9+200*x.^2)/10) .* exp(0.09*(3.895-(2*((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*atan(((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*
6 %Frection+
7 %y=((1.55+235) * ((9+200*x.^2)/9) .* exp(0.09*(2*((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*atan(((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*x)))).*
8 %Frection-
9 %y=((1.55+235) * ((9+200*x.^2)/10) .* exp(0.09*(3.895-(2*((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*atan(((213.6./(9+200*x.^2)).^(0.5)).*
10 %
11 %
12 %
13 %I=quad('zzz',0,0.031)
14 %vpa (W,10)
15 %
16 %integral of f using Composite Simpson rule, n must be even.
17 %function I=Simp(f,a,b,n)
18 %h=(b-a)/n;
19 %S=feval(f,a);
20 %for i=1:2:n-1
21 % x(i)=a+h*i;
22 % S=S+4*feval(f,x(i));
23 %end
24 %for i=2:2:n-2
25 % x(i)=a+h*i;
26 % S=S+2*feval(f,x(i));
27 %end
28 %S=S+feval(f,b)
29 %I=h/3*S

```

شکل پ ۱-۱- برنامه موجود برای حل عددی انتگرال در محیط MATLAB

پیوست ۲

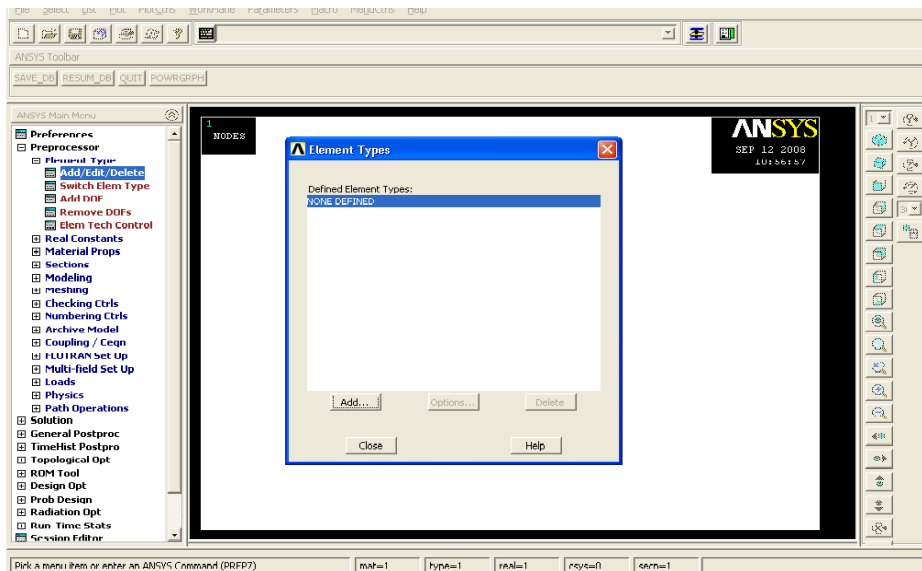
چگونگی ایجاد مدل ANSYS

با فرض اینکه خواننده مقاله آشنایی مقدماتی با ANSYS، آیکون‌های مختلف، محل و کاربرد آنها دارد، به توضیحی در مورد چگونگی انجام تحلیل انجام شده در محیط ANSYS می‌پردازیم.

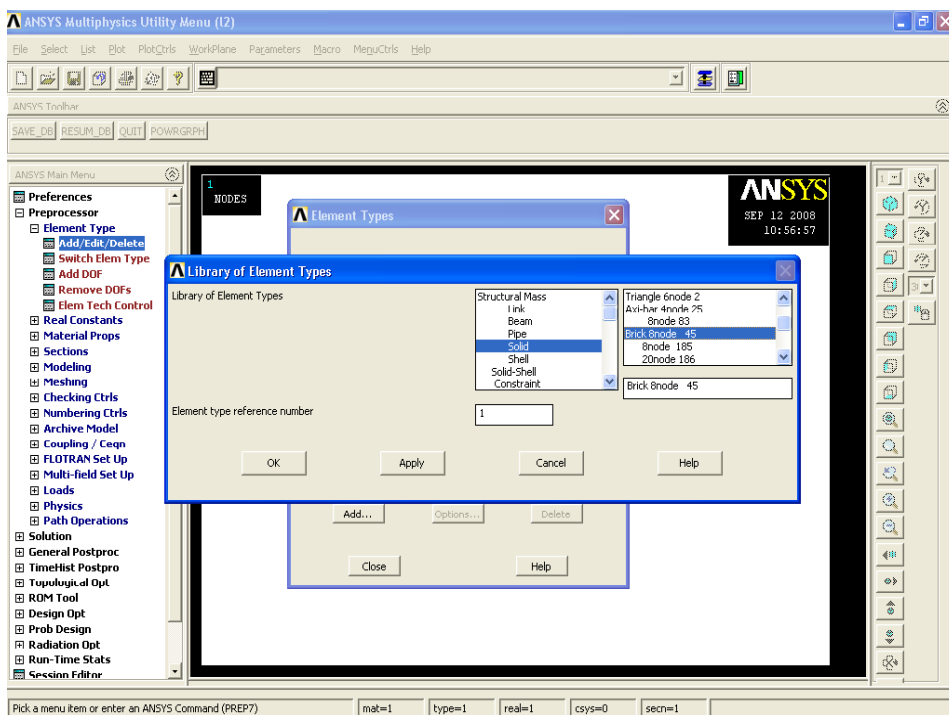
ANSYS را با توجه به آنکه به طور پیش فرض در محیط Metaphysics قرار دارد، با انتخاب یک Jobname دلخواه باز می‌نماییم.

(۱) Preprocessor- Element Type- Add/Edit/Delete (شکل پ ۲-۱)

(۲) سپس از قسمت Library Element Types در محل Structural Mass المان Brick 45 node 8 را انتخاب می‌نماییم. زیرا هم المان ۳ بعدی است که برای مسائل دارای حجم قابل استفاده است و ضمناً تعداد گره‌های آن نیز کم می‌باشد و زمان حل با توجه به تعداد المان‌های بالا در مش‌بندی پایین می‌آید. المان فوق نیاز به Real Constant ندارد. بنابر این، خصوصیات ماده مورد استفاده را به صورت زیر تعریف می‌نماییم (شکل پ ۲-۲).



شکل پ ۲-۱- محل آیکون ایجاد کننده المان

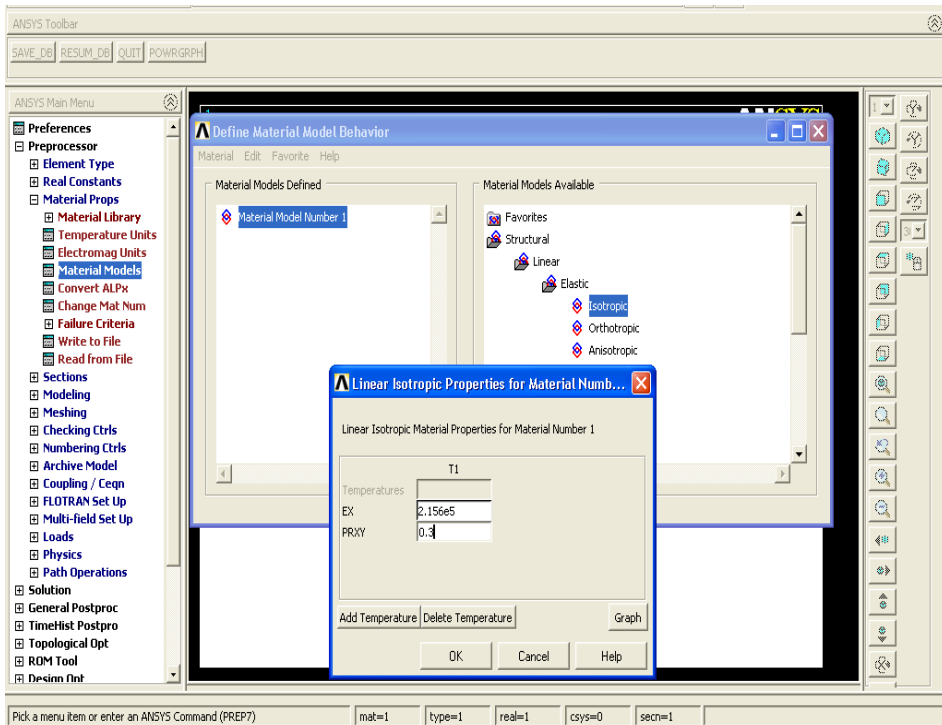


شکل پ ۲-۲- چگونگی انتخاب المان مورد نظر در محیط ANSYS

۳) با آنکه ماده مورد استفاده برای جنس غلتک فولاد عملیات حرارتی شده است، و کارخانه‌های مختلف سازنده بر حسب تناژ لازم جنس خاصی را تولید می‌کنند، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون برای اغلب فولادها ثابت بوده و به ترتیب $2/156$ و $0/3$ می‌باشد. بنابر این:

Preprocessor- Material Props- Material Models- Structural- Linear- Elastic- Isotropic

در جدول برای EX و PRXY به ترتیب اعداد 2.156×10^5 و 0.3 قرار می‌دهیم (شکل پ ۲-۳).



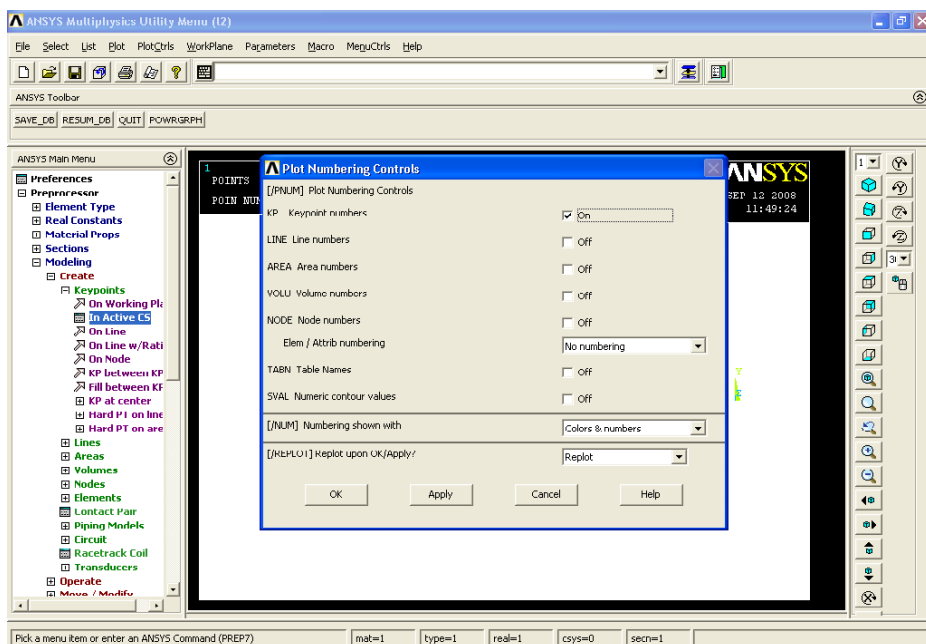
شکل پ ۲-۳- چگونگی وارد کردن اطلاعات ماده مورد نظر در محیط ANSYS

توجه داریم، نوع واحد در ANSYS اصلاً مورد توجه نیست. کافی است یک واحد را در نظر گرفته و تمام اعداد را بر حسب همان واحد وارد نماییم. ضمناً این نکته قابل توجه است که فرض بر این است که غلتک زیر بار تغییر فرم پلاستیک نمی‌دهد، پس محاسبات انجام شده تماماً در محیط تغییر شکل الاستیک رخ می‌دهد.

برای ایجاد مدل غلتک میتوان به صورت ایجاد مدل خارجی در فضای CAM در یکی از نرم افزارهای ... Solid Works, Catia, و سپس انتقال آن به فضای ANSYS عمل نمود. برای اشکال هندسی ساده تر می‌توان از خود جعبه ابزارهای مدلینگ ANSYS نیز استفاده نمود. برای ایجاد مدل غلتک راه دوم انتخاب شده است.

۴) برای شماره گذاری Keypoints ها (شکل پ ۲-۴):

Plotctrls- Numbering- KP keypoints numbers- On- OK



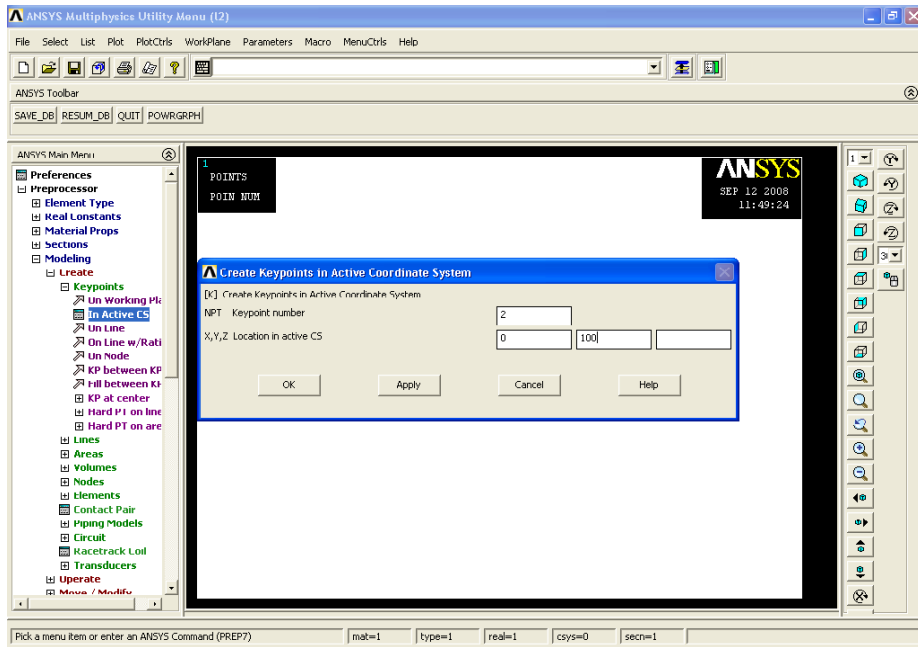
شکل پ ۲-۴- چگونگی شماره گذاری نقاط در محیط ANSYS

۵) Preprocessor- Modeling- Create- Keypoints- In Active CS

با استفاده از روش بالا ۵ Key Point با مختصات زیر بوجود می‌آوریم (شکل پ ۲-۵ و جدول پ ۲-۱):

	1	2	3	4	5	6	7	8
x	0	0	-100	-100	-2100	-2100	-2200	-2200
y	0	100	100	200	200	100	100	0
z	0	0	0	0	0	0	0	0

جدول پ ۲-۱- مختصات نقاط ایجاد شده برای طرح مدل اولیه

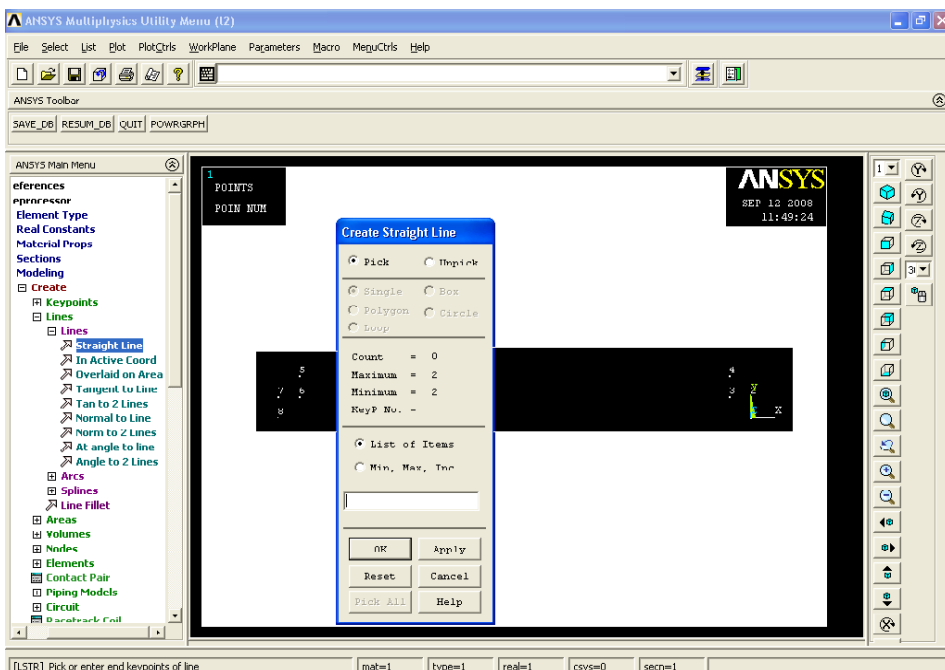


شکل پ ۲-۵- چگونگی ایجاد نقاط با مختصات مشخص در محیط ANSYS

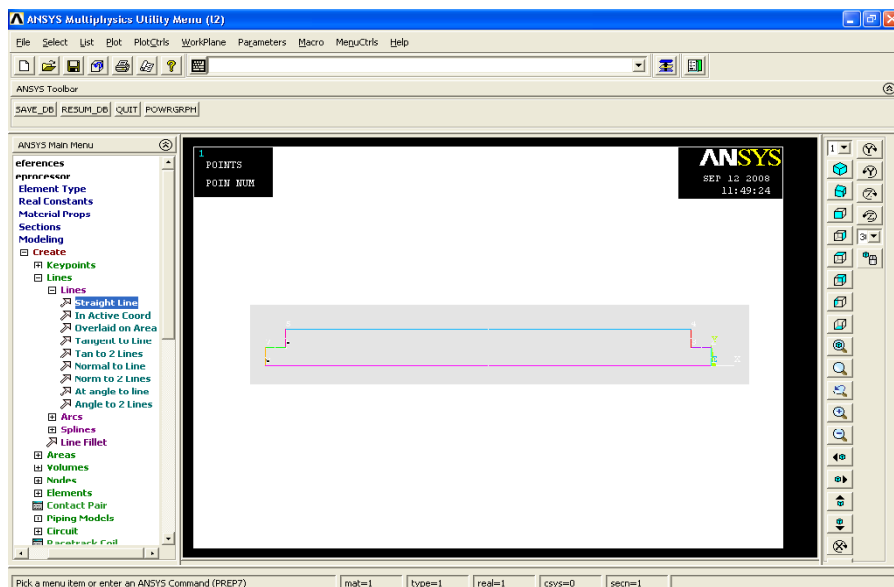
حال از میان Key Point های ایجاد شده، خطوط مختلف می گذرانیم.

۶- Preprocessor- Modeling- Create- Lines- lines- Strait Lines

(شکل پ ۲-۶) بر روی نقطه ۱ و سپس ۲ کلیک می نماییم. یک خط ایجاد می شود. بر روی نقاط ۲ و ۳ کلیک می نماییم؛ خط دیگری بوجود می آید و الی آخر که نقطه ۸ را به نقطه ۱ وصل می نماییم. با بوجود آمدن کلیه خطوط شکلی شبیه شکل پ ۲-۷ بوجود می آید. سپس گزینه OK از جعبه ابزار Create Straight Line را انتخاب می نماییم.



شکل پ ۲-۶- چگونگی گذراندن خط از نقاط معلوم

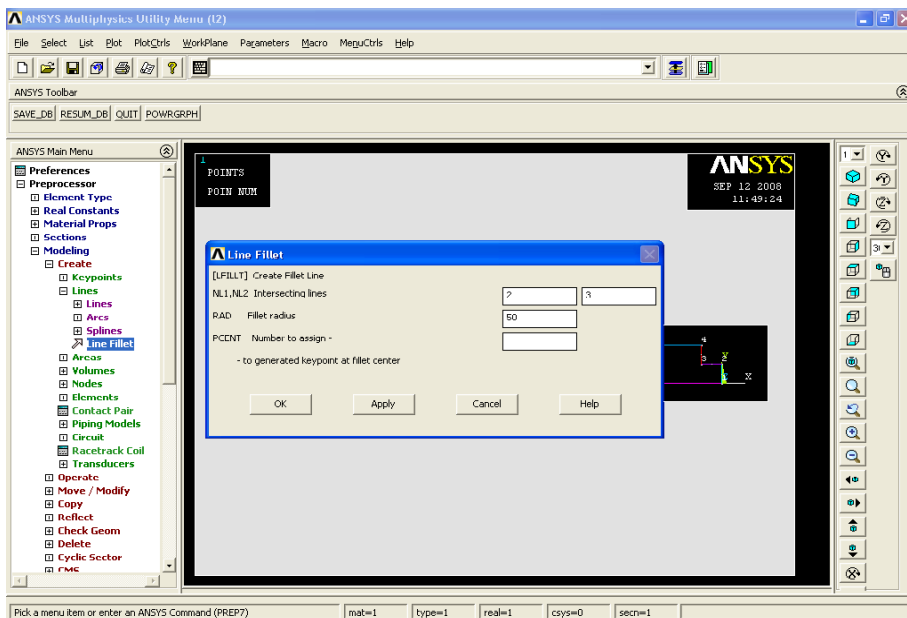


شکل پ ۲-۷- شکل مدل اولیه پس از گذراندن خطوط از میان نقاط

حال بایستی گوشه‌های لازم را برای انجام تحلیل فیلِت بزنییم. پس به صورت زیر عمل می‌نماییم.

Preprocessor- Modeling- Create- Lines- Line Fillet (۷)

ابتدا خطوط ایجاد شده بین نقاط ۳ و ۲ و سپس خطوط ایجاد شده بین نقاط ۳ و ۴ را انتخاب می‌نماییم. سپس گزینه OK از جعبه Line Fillet را انتخاب می‌نماییم. سپس در قسمت Fillet Radius عدد ۵۰ را وارد می‌نماییم. سپس همین روند را برای خطوط ایجاد شده بین نقاط ۶ و ۷ و ۷ و ۸ تکرار می‌نماییم. شکل پ ۲-۸ روند شماتیک جعبه ابزار فیلت را نشان می‌دهد. در پایان مرحله شکلی شبیه شکل پ ۲-۹ بوجود می‌آید.

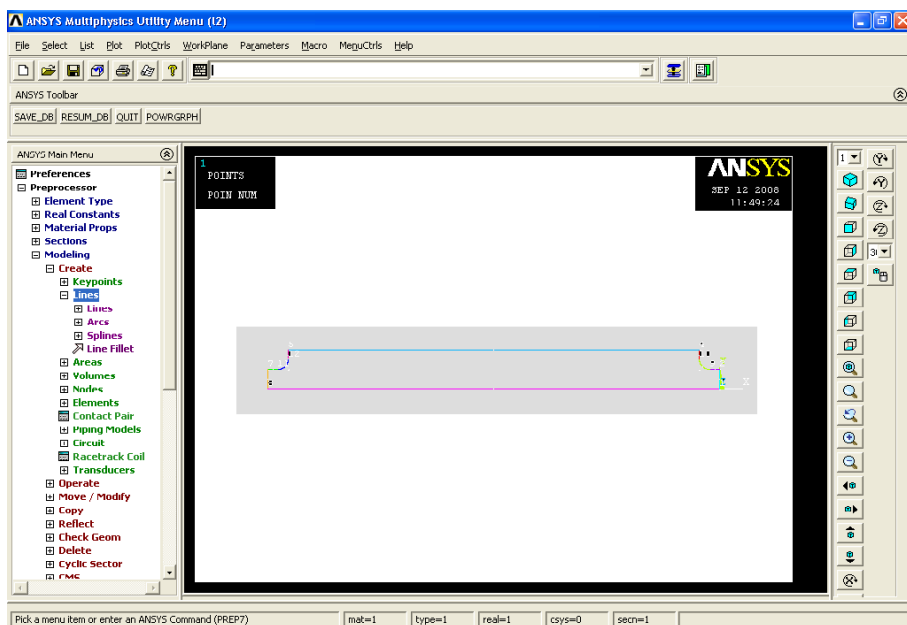


شکل پ ۲-۸- چگونگی انجام فیلت در محیط ANSYS

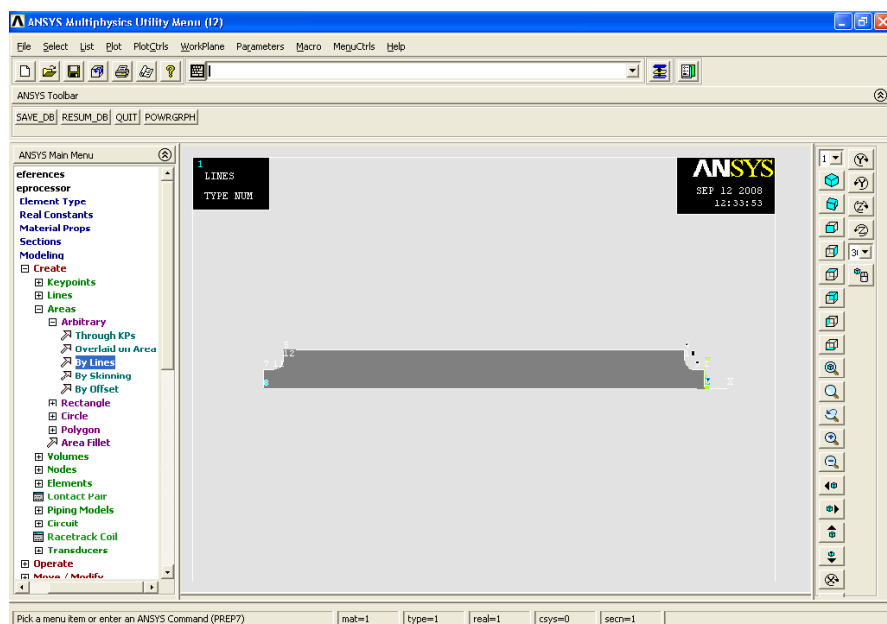
حال باید صفحه گذرنده از خطوط ایجاد شد را توسط روند زیر بوجود آوریم:

Preprocessor- Modeling- Create- Areas- Arbitrary- By lines (۸)

سپس کلیه خطوط موجود و بعد گزینه OK را انتخاب می‌نماییم. شکل ایجاد شده شکل پ ۲-۱۰ خواهد بود.



شکل پ ۲-۹- شکل مدل اولیه پس از انجام فیلت بر روی قسمت‌هایی از آن



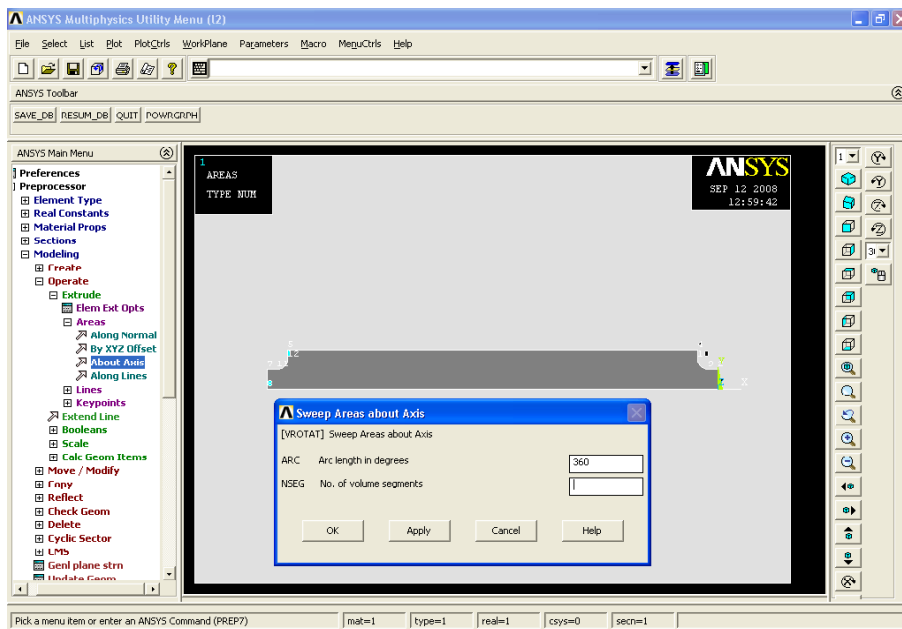
شکل پ ۲-۱۰- چگونگی ایجاد صفحه با حضور چند خط در محیط ANSYS

حال باید با یک Extrude حول محور x شکل شماتیک غلتک را بوجود آوریم. پس به ترتیب زیر عمل می‌نماییم.

۹) Preprocessor- Modeling- Operate- Extrude- Area- About Axis

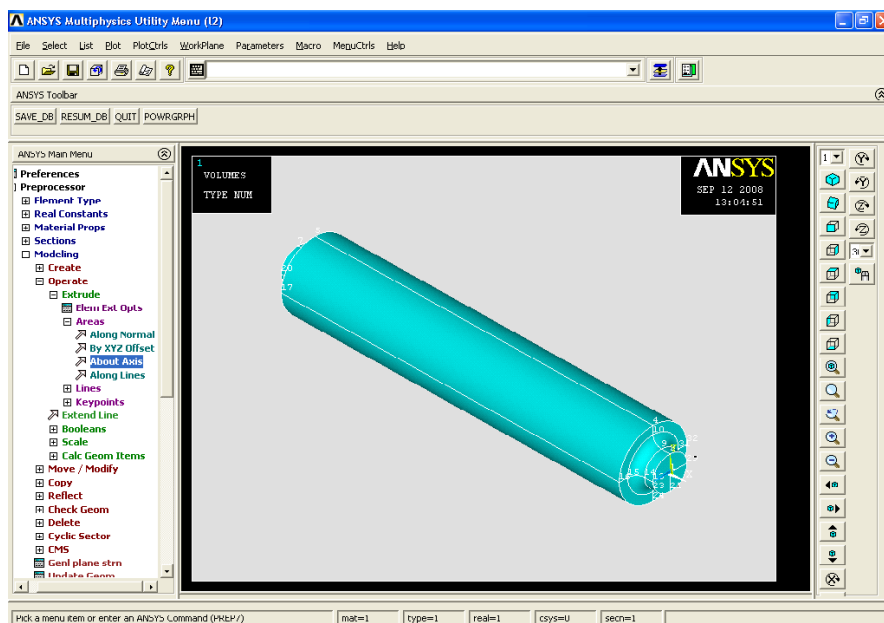
سپس با استفاده از پیکان بر روی صفحه کلیک کرده و گزینه OK را انتخاب می‌نماییم؛ و بعد از آن دو نقطه ۱ و ۸ برای انتخاب خطی که حول آن عمل Extrude انجام می‌شود، را انتخاب می‌نماییم، و سپس گزینه OK را می‌گزینیم.

در جعبه پیش رو در بخش ARC عمل Sweep را ۳۶۰ درجه و در بخش NSEG تعداد حجم ایجاد شونده را خالی به معنای ایجاد یک حجم کلی انتخاب کرده و گزینه OK را انتخاب می‌نماییم. (شکل پ ۲-۱۱) حجم بوجود آمده در انتهای این بخش با نمای ایزومتریک به صورت شکل پ ۲-۱۲ خواهد بود.



شکل پ ۲-۱۱- ایجاد مدل سه بعدی از یک صفحه با استفاده از دستور Sweep در محیط

ANSYS

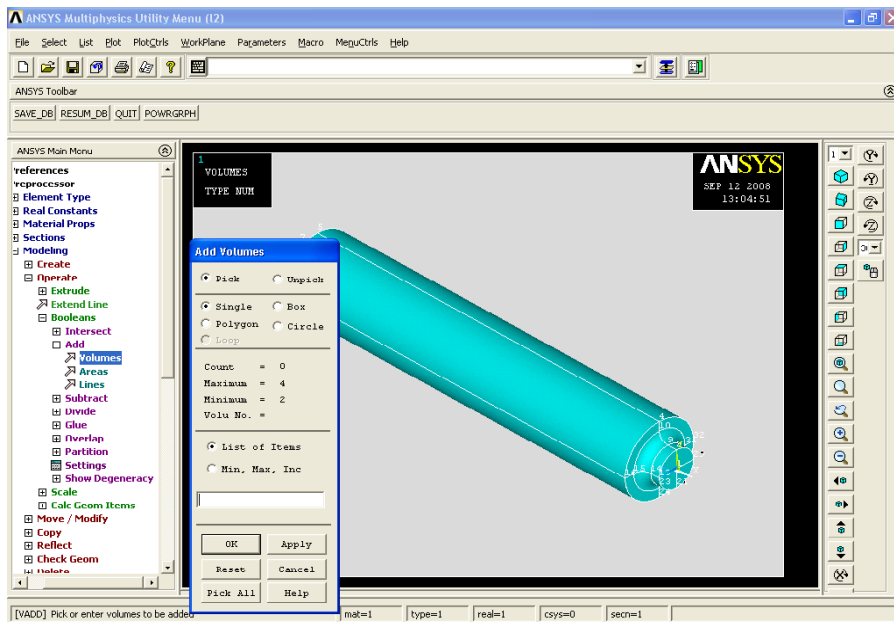


شکل پ ۲-۱۲- نمای ایزومتریک مدل سه بعدی غلتک

از آنجا که پس از انجام عملیات Sweep حتی با انتخاب گزینه 1 حجم، ANSYS چهار حجم مجزا بوجود می‌آورد، باید حجم‌های بوجود آمده را قبل از انجام عملیات مشبندی به یکدیگر متصل و Add نماییم. بدین جهت به ترتیب زیر عمل می‌نماییم.

۱۰. Preprocessor- Modeling- Operate- Booleans- Add- Volumes

سپس با توجه به شکل پ ۲-۱۳ گزینه Pick all را انتخاب کرده و در واقع تمامی اجسام به یکدیگر Add می‌شوند.

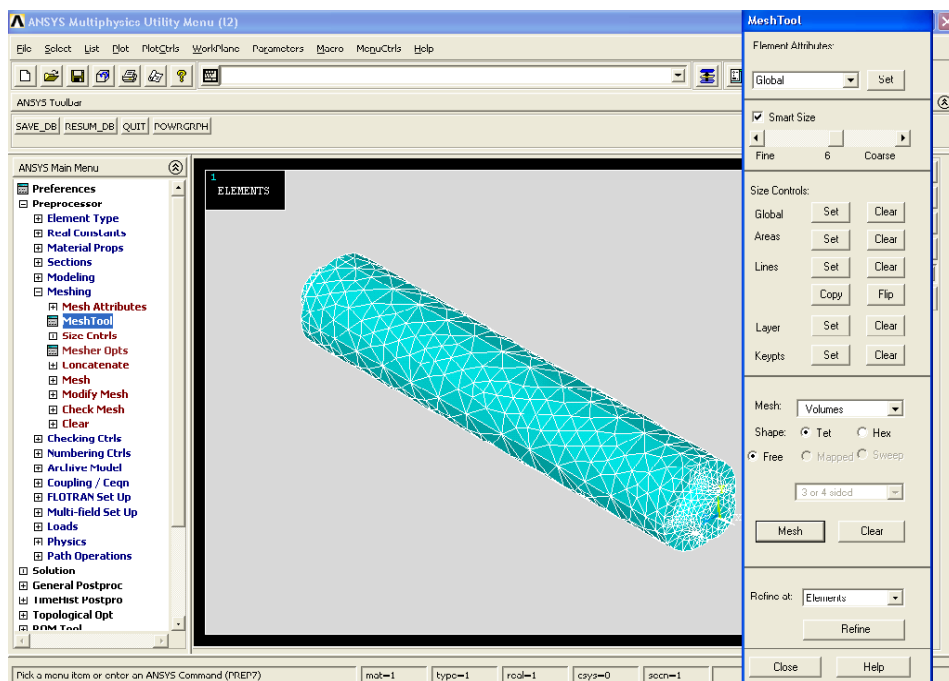


شکل پ ۲-۱۳- چگونگی به هم پیوستن چند حجم در محیط ANSYS

عملیات ایجاد مدل اولیه در اینجا به پایان می‌رسد. حال باید عملیات مش‌بندی را اجرا نماییم. بدین منظور از مش با المان‌های درشت و آزاد جهت تسریع در عملیات مش‌زنی استفاده می‌نماییم. ضمناً متوجه این موضوع هستیم که ANSYS به صورت خودکار در نقاط تیز مش ریزتری می‌زند.

۱۱) Preprocessor- Meshing- Mesh Tool

در جعبه ابزار پیش رو بر روی گزینه Smart Size تیک می‌زنیم و آنرا بر روی ۶ قرار می‌دهیم. سپس گزینه Mesh حجم غلتک و گزینه OK را به ترتیب انتخاب می‌نماییم. شکل پ ۲-۱۴ نمای شبکه بندی شده غلتک مدل شده را نشان می‌دهد.



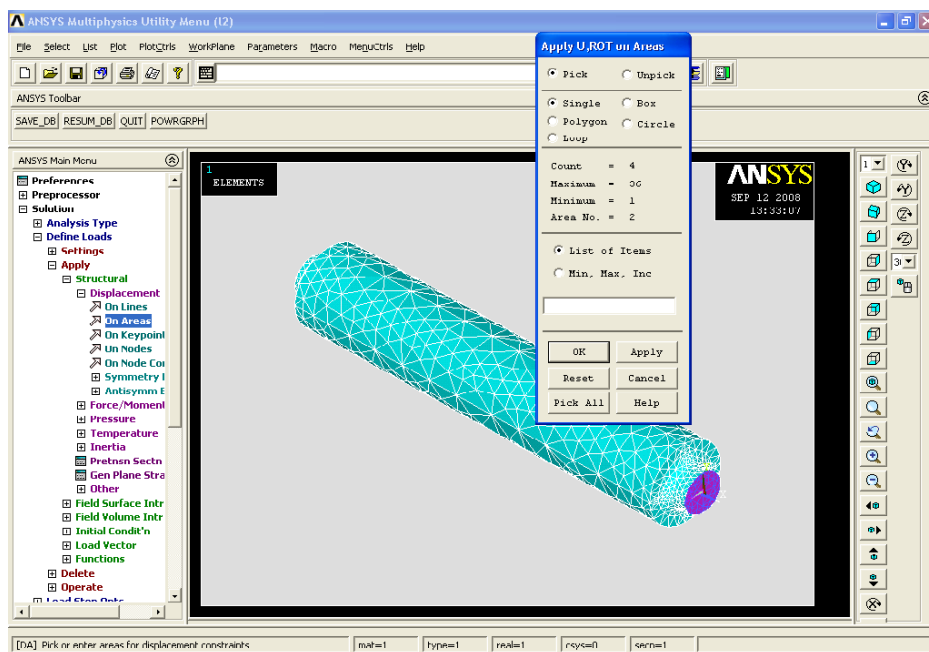
شکل پ ۲-۱۴- شمایل غلتک مدل شده حین انجام عملیات شبکه بندی

عمل مش بندی نیز در اینجا به پایان رسید. حال برای اعمال بار بر روی غلتک باید در ابتدا مدلی از تکیه گاه‌ها ارائه شود. باید به این نکته توجه نمود که علی رغم آنکه یکی از تکیه گاه‌ها Clamp است، تکیه گاه دیگر در جهت X از آزادی برخوردار است. برای این منظور به ترتیب زیر عمل نماییم.

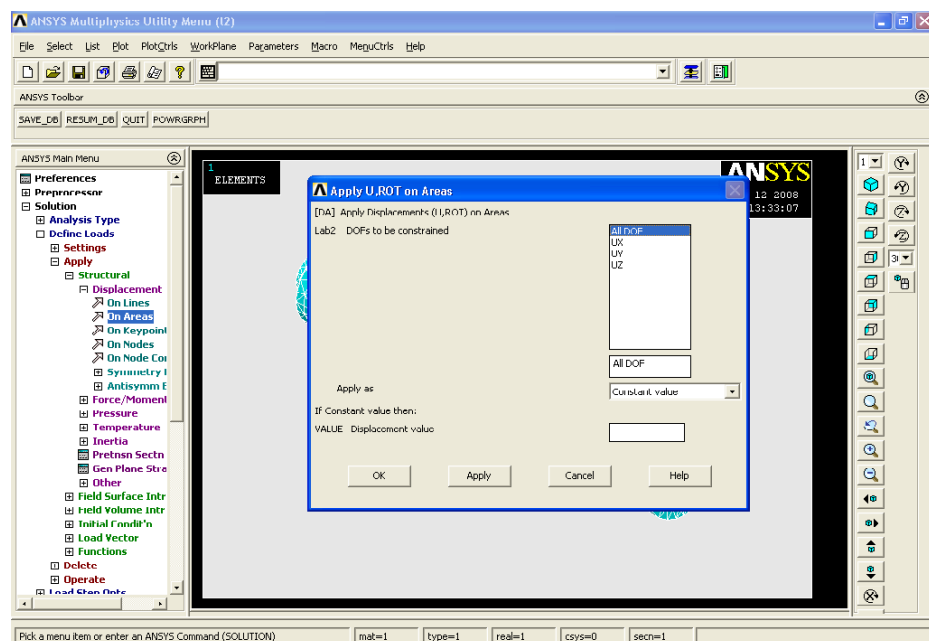
۱۲) Solution- Define Loads- Apply- Structural- Displacement- On Area

در قسمت سمت راست غلتک چهار بخش دایره کوچک تر را انتخاب نموده (مطابق شکل پ ۲-۱۵) و گزینه OK را انتخاب می‌نماییم. سپس در جعبه Apply U, ROT on Area گزینه All DOF را انتخاب کرده و در قسمت Constant Value, Apply As بخش Value Displacement عدد صفر "۰" را وارد می‌نماییم و گزینه OK را انتخاب

می‌نماییم. (شکل پ ۲-۱۶)



شکل پ ۲-۱۵- انتخاب چهار سطح ناحیه ای خاص از غلتک برای ایجاد قید حرکت بر روی آن

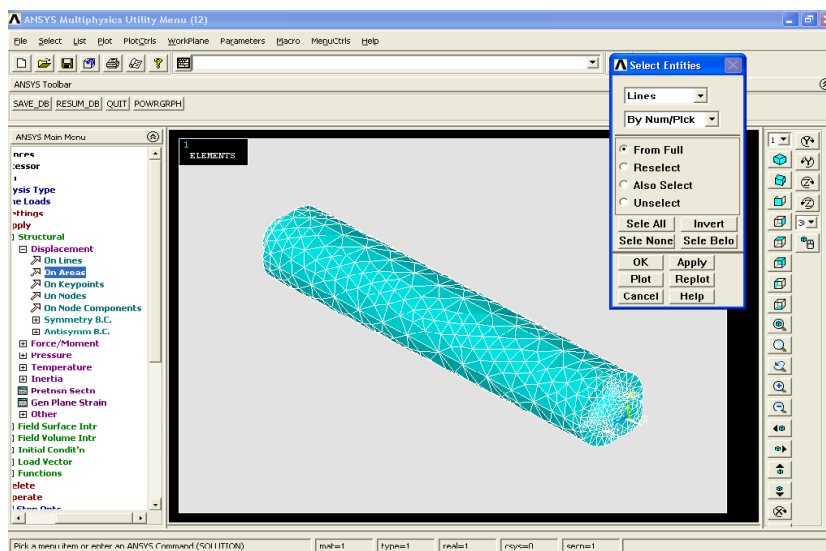


شکل پ ۲-۱۶- چگونگی ایجاد قید یک سر گیردار در محیط ANSYS

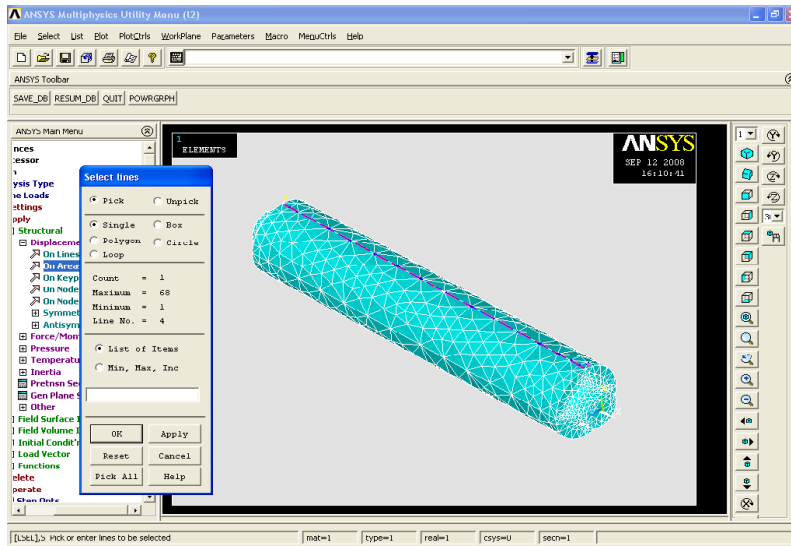
سپس با استفاده از Dynamic Model Mode به شکل Mouse مدل را در جهت قسمت سمت چپ آن می‌چرخانیم. سپس عملیات بالا را اینبار یکبار در جهت Y و یکبار در جهت Z تکرار می‌کنیم. توجه داریم عدم انتخاب جهت X بدین معناست که مدل در تحلیل در جهت X از آزادی عمل حرکت برخوردار است.

پس از اعمال قیود تکیه گاه باید به اعمال نیرو بر غلتک پرداخته شود. با آنکه بار وارده بر غلتک فشاری است، متاسفانه در نرم افزار ANSYS, Item فشار برای اعمال بر خطی از مدل سه بعدی قابل کاربرد نیست. از اینرو باید به گونه ای دیگر این نیروی جدا کننده غلتک اعمال شود. بدین منظور از گره‌های (نود) ایجاد شده در عملیات مش‌بندی استفاده می‌نماییم. بدین صورت که ابتدا فشار را در طول خط بار ضرب می‌نماییم و سپس بر تعداد گره‌های موجود تقسیم می‌نماییم. نیروی بدست آمده را، چه نیروی جدا کننده غلتک و چه اصطکاک، می‌توان بر گره‌ها اعمال نمود. بدین جهت به ترتیب زیر عمل می‌کنیم.

۱۳) Select- Entities در جعبه فوق Lines را انتخاب نموده و سپس By Num/Pick را انتخاب می‌نماییم. گزینه From Full و سپس OK را انتخاب می‌کنیم. (شکل پ ۲-۱۷) سپس خط طولی روی غلتک را انتخاب نموده، ازجعبه Select Lines گزینه OK را انتخاب می‌نماییم. (شکل پ ۲-۱۸)

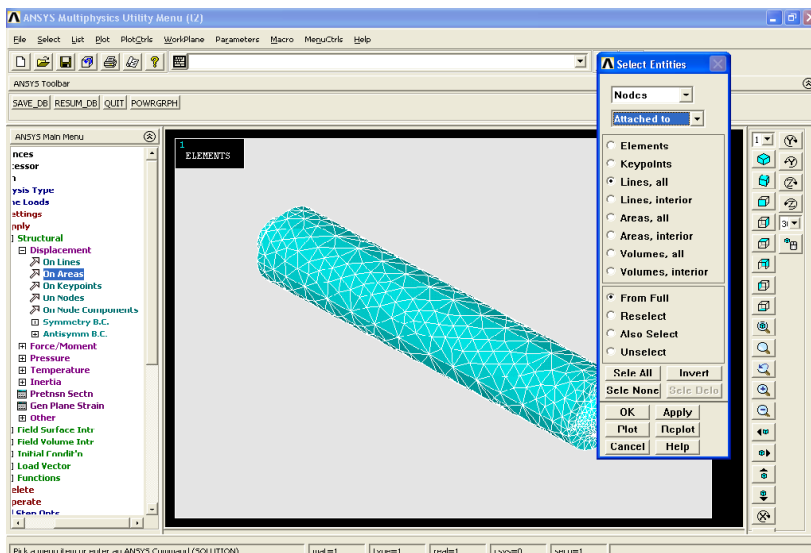


شکل پ ۲-۱۷- مراحل انتخاب یک خط از میان یک مدل سه بعدی در ANSYS



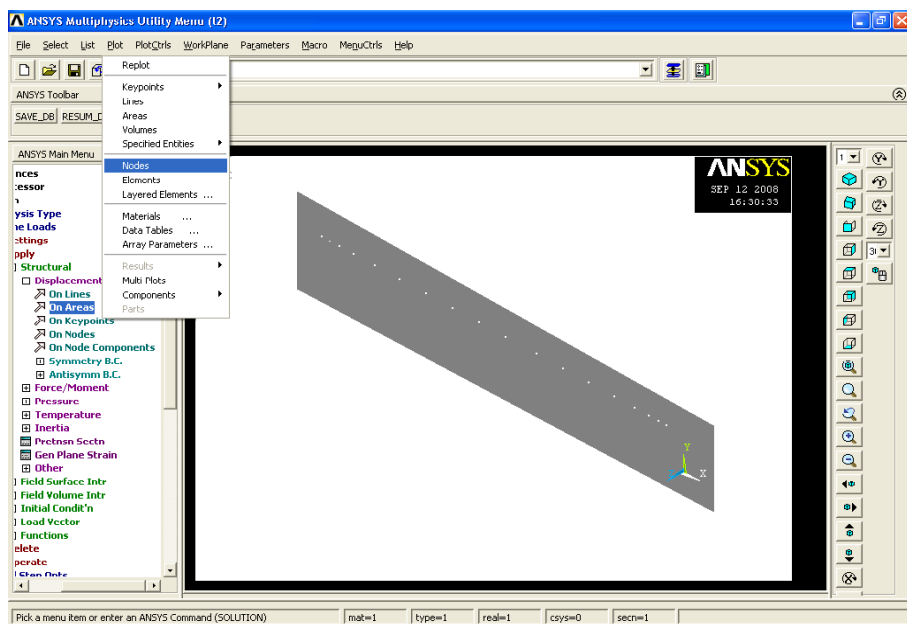
شکل پ ۲-۱۸- انتخاب خط مورد نظر در مدل و تایید انتخاب صحیح آن

۱۴) دوباره Select را برگردانده، در جعبه فوق Nodes را انتخاب کرده و سپس Attached to را انتخاب می‌نماییم. گزینه From Full, Lines, All و OK را به ترتیب می‌گزینیم. (شکل پ ۲-۱۹)



شکل پ ۲-۱۹- مراحل انتخاب گره از میان مدل سه بعدی در محیط ANSYS

(۱۵) سپس Plot-Nodes را انتخاب می‌نماییم. (شکل پ ۲-۲۰)

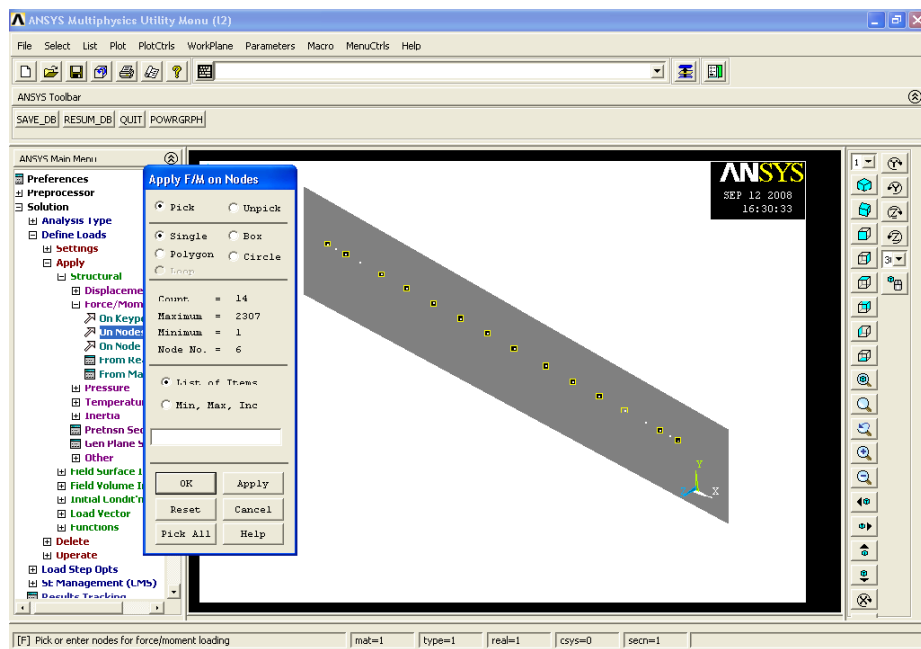


شکل پ ۲-۲۰- چگونگی نمایش نودهای انتخابی جهت اعمال بار بر روی آنها

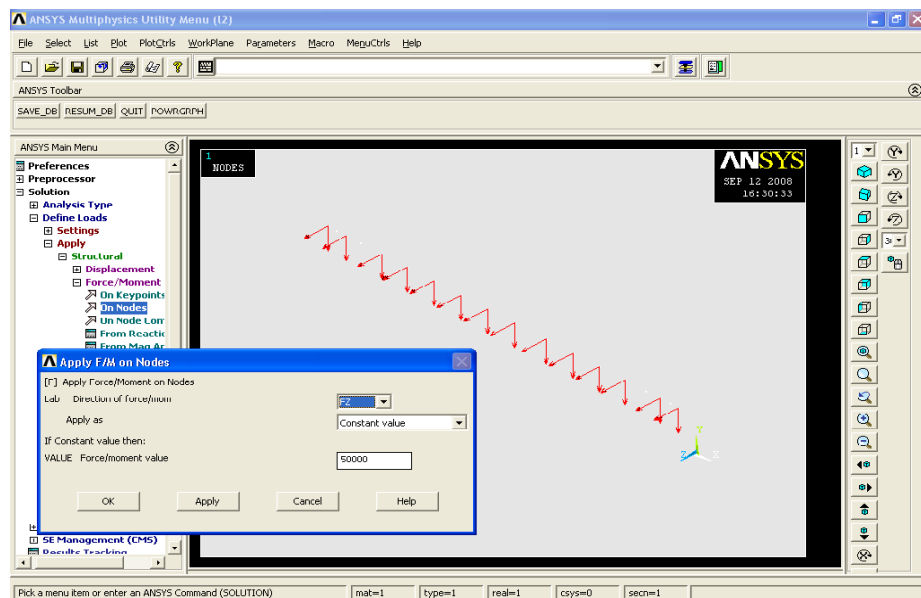
با مشخص شدن گره‌های موجود بر خط انتخاب شده می‌توان به اعمال دو بار مختلف عمودی بر این گره‌ها پرداخت. بدین منظور به شکل زیر عمل می‌کنیم.

(۱۶) Solution- Define Loads- Apply- Structural- Force/Moment- On Nodes

گره‌ها را انتخاب نموده و گزینه OK را انتخاب می‌نماییم. (شکل پ ۲-۲۱) سپس در جعبه ابزار Apply F/M On Nodes جهت نیرو را FY به عنوان نیروی جدا کننده غلتک انتخاب کرده و مقدار Constant آنرا در بخش Force/Moment Value مقداری که در فصول قبل بدان اشاره شد، برای مثال ۲۰۰۰۰۰۰- قرار می‌دهیم. با تکرار همین روند برای FZ به نمایندگی نیروی اصطکاک مقدار ۵۰۰۰۰ را قرار می‌دهیم. (شکل پ ۲-۲۲)

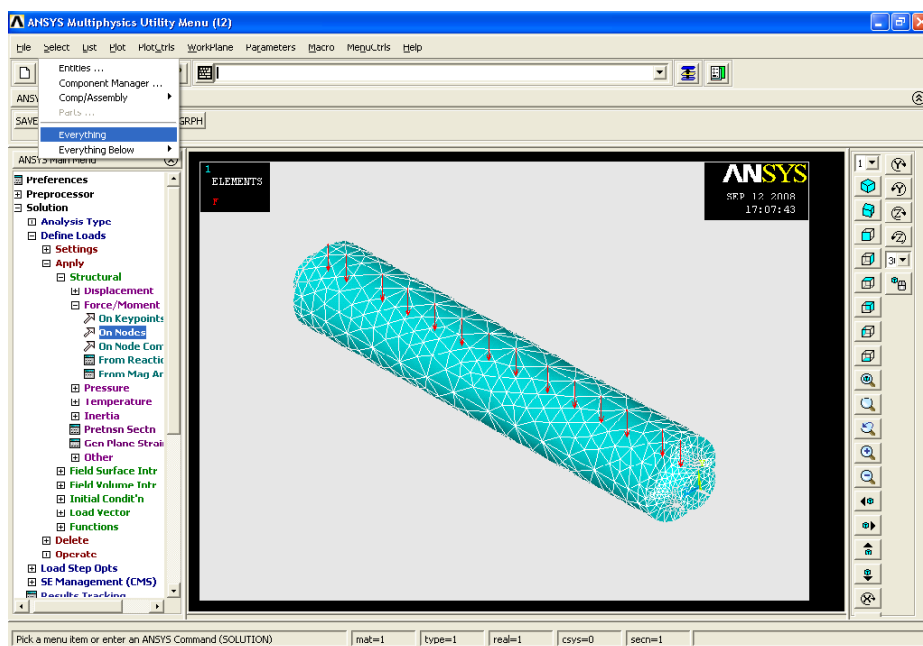


شکل پ ۲-۲۱- چگونگی اعمال بار بر گرههای انتخابی در محیط ANSYS



شکل پ ۲-۲۲- اعمال بار در جهات مختلف بر گرههای انتخابی

۱۷) Plot- Elements, Select- Everything (شکل پ ۲-۲۳)

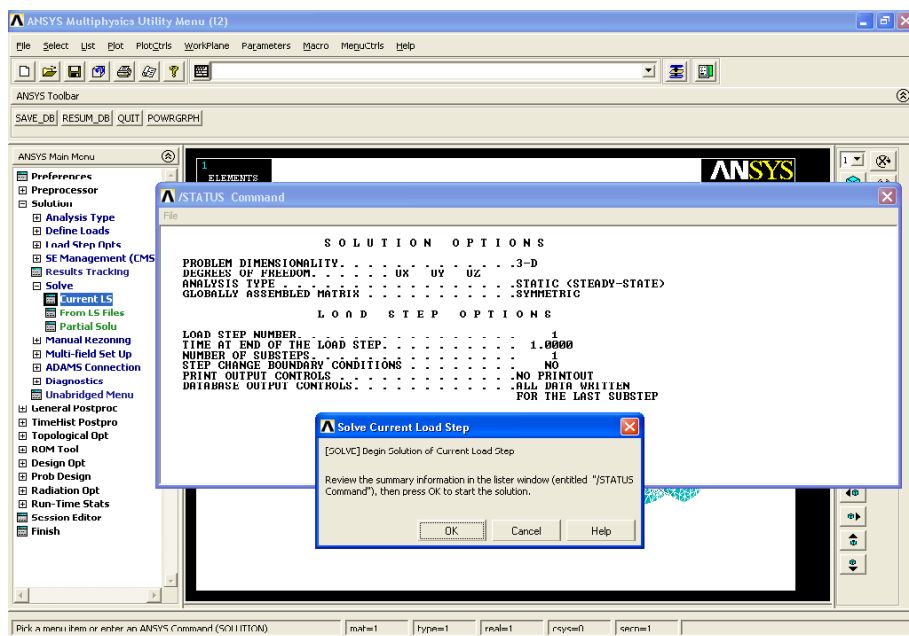


شکل پ ۲-۲۳- نمایش مدل کلی سه بعدی همراه با بارهای وارده

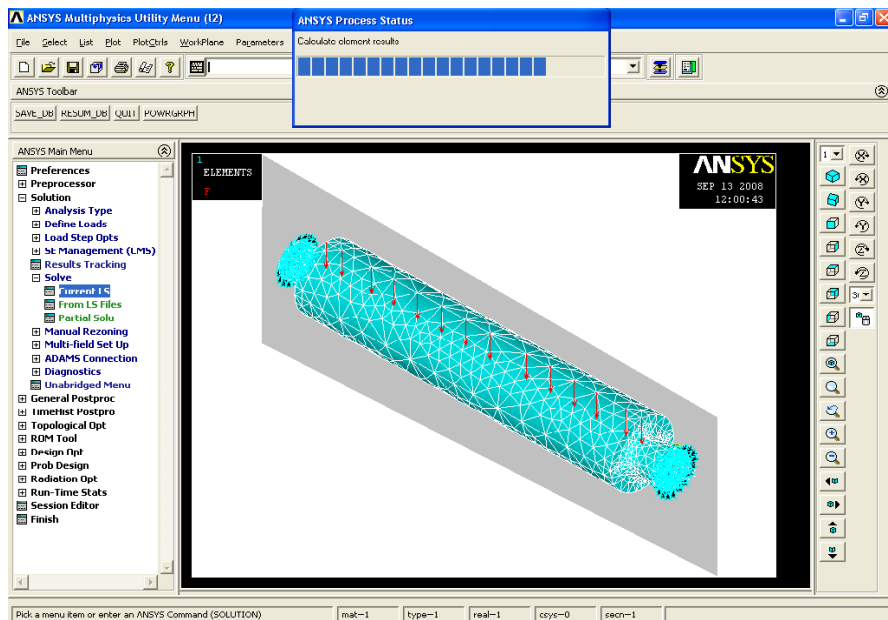
حال بارگذاری لازم جهت حل مسئله هم انجام شده و به بخش حل مسئله می‌رسیم.

۱۸) Solution- Solve- Current LS

به ترتیب در جعبه ابزارهای بوجود آمده گزینه OK و سپس X برای بستن جعبه را انتخاب می‌نماییم. (شکل پ ۲-۲۴) جعبه دیگری مبنی بر اخطارهای موجود برای حل مسئله باز می‌شود. این اخطارها مثلاً اخطار درشت بودن مش یا انتخاب نوع المان بهتر برای حل مسئله می‌تواند باشد. به هر حال برای شروع حل گزینه Yes را انتخاب می‌نماییم. شکل پ ۲-۲۵ برنامه در حال حل را نشان می‌دهد.



شکل پ ۲-۲۴- چگونگی ایجاد دستور برای حل مسئله در فضای ANSYS

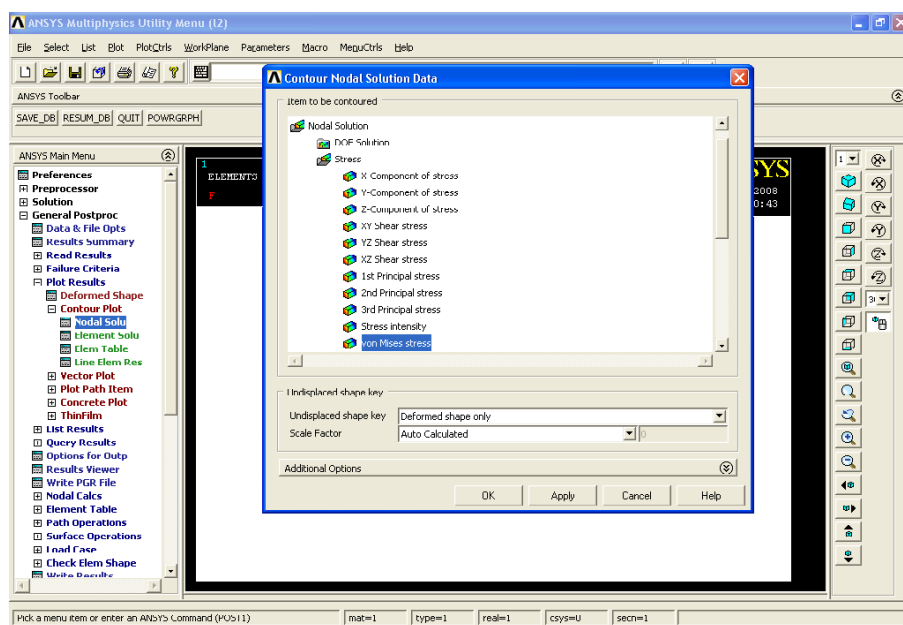


شکل پ ۲-۲۵- شمایل مدل در حال حل در محیط ANSYS

پس از انجام مرحله حل نوبت به مرحله فراخواندن اطلاعات از مدل تحلیل شده است. برای این منظور از جعبه ابزارهای قسمت General Postproc استفاده می‌نماییم و به ترتیب زیر عمل می‌نماییم.

۱۹) General Postproc- Plot Results- Contour plot- Nodal Solu/ Element Solu

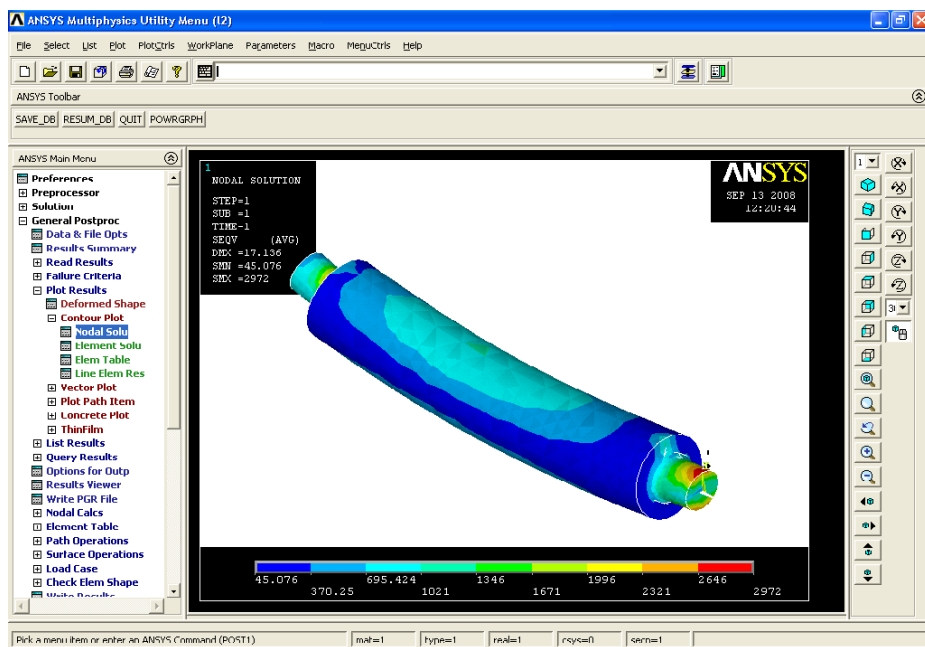
در جعبه باز شده، آنالیز Stress و سپس گزینه Von Mises Stress را انتخاب نموده و OK می‌نماییم. (شکل پ ۲-۲۶) دیگر گزینه‌ها را بدون تغییر باقی می‌گذاریم.



شکل پ ۲-۲۶- چگونگی مشاهده نتایج حاصل از حل تنش در محیط ANSYS

مدل تغییر شکل یافته همراه پس از تحلیل همراه با نمایش Contour تنش آن در شکل ۲۷ قابل مشاهده است. SMN و SMX معیاری برای مینیمم و ماکزیمم تنش هستند که به صورت واحد در نظر گرفته شده و از قبل نمایش می‌دهند. طیف رنگی قابل مشاهده در پایین شکل پ ۲-۲۷ نیز طیف تنش از مینیمم تا ماکزیمم را در مدل را نمایش می‌دهد. نکته قابل ملاحظه توجه به معیار DMX است که معیاری از مقدار خطا در انجام تحلیل است. عوامل خطا می‌تواند

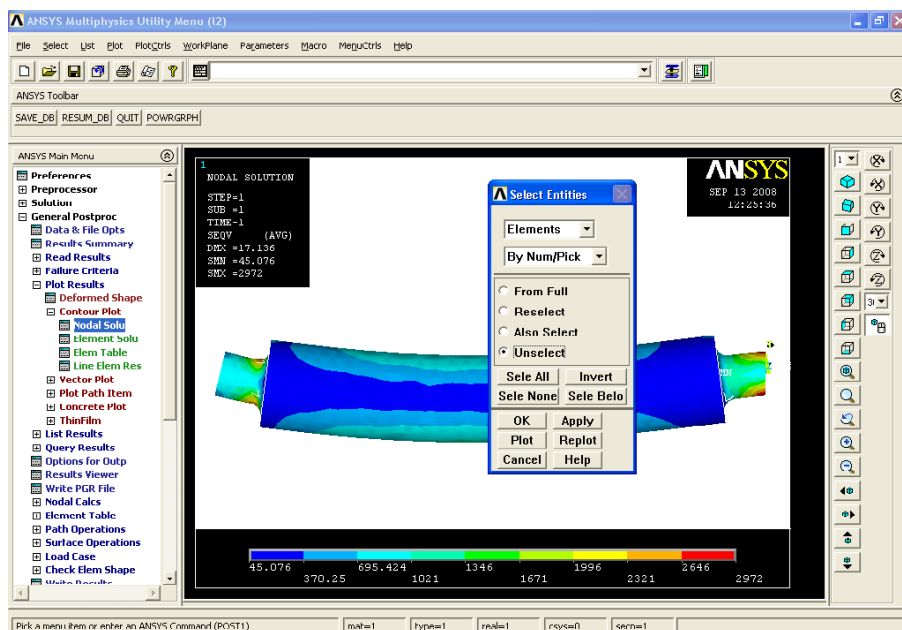
به بالا بودن DMX منجر شود. با انتخاب مش ریزتر یا نوع المان تحلیل مناسب تر می توان این مقدار را کاهش داد. ضمناً عوامل خطا می تواند به علت وجود ماکزیمم تنش در لبه ها یا تکیه گاه ها نیز باشد به این علت که عموماً ANSYS تحلیل صحیحی از تنش در در نفاط تیز و محل های با تمرکز تنش در مقایسه با عمل نشان نمی دهد. بنابراین این نقاط باید نادیده گرفته شده و در تحلیل به اصطلاح unselect شوند. راه دیگر درک صحت تحلیل انجام شده مقایسه Nodal Solu و Element Solu است. هر چه مقادیر ماکزیمم و مینیمم تنش در این تحلیل ها به یکدیگر نزدیکتر باشد، حل مسئله صحیح تر بوده است.



شکل پ ۲-۲۷- طیف رنگی تنش در قسمت نتایج برای مقایسه بهتر نتایج

با نگاهی به شکل پ ۲-۲۷ به سادگی مشاهده می شود که نقاط ماکزیمم تنش در قسمت تکیه گاه پدید آمده است. همانطور که بیان شد باید این نقاط به گونه ای unselect شده و تحلیل مجدد انجام گیرد تا تنش ماکزیمم واقعی بدست آید. بدین منظور به ترتیب زیر عمل می نماییم. در ابتدا گزینه Front View را انتخاب نموده تا دید بهتر نسبت به مدل داشته

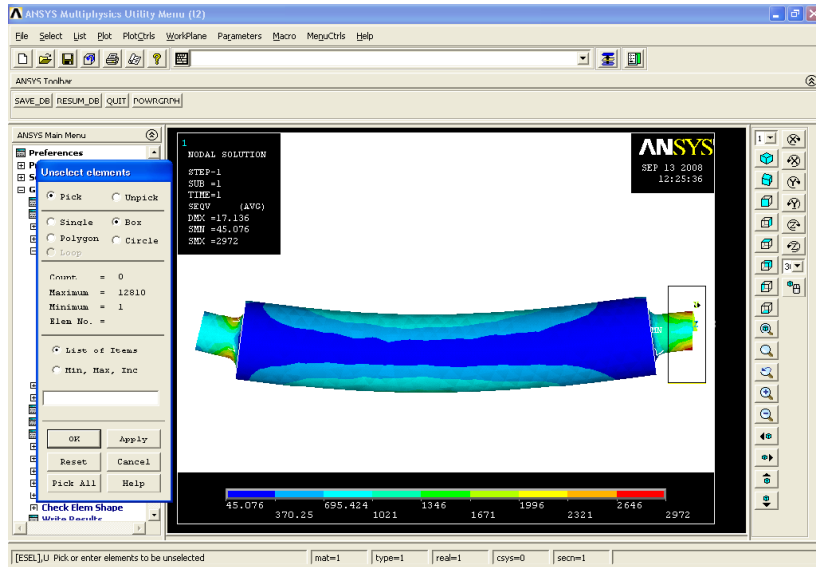
باشیم. سپس Select- Entities و از جعبه پدید آمده گزینه unselect, By Num/Pick, Element و OK را به ترتیب انتخاب می‌نماییم. (شکل پ ۲-۲۸) در جعبه unselect Elements گزینه Box را انتخاب نموده و محل تکیه گاه Clamp را با کشیدن یک جعبه حول آن unselect می‌نماییم، (شکل پ ۲-۲۹) و گزینه OK را انتخاب می‌نماییم. با این کار نمایش المان‌های تکیه گاه را در Stress Countor منتفی می‌نماییم.



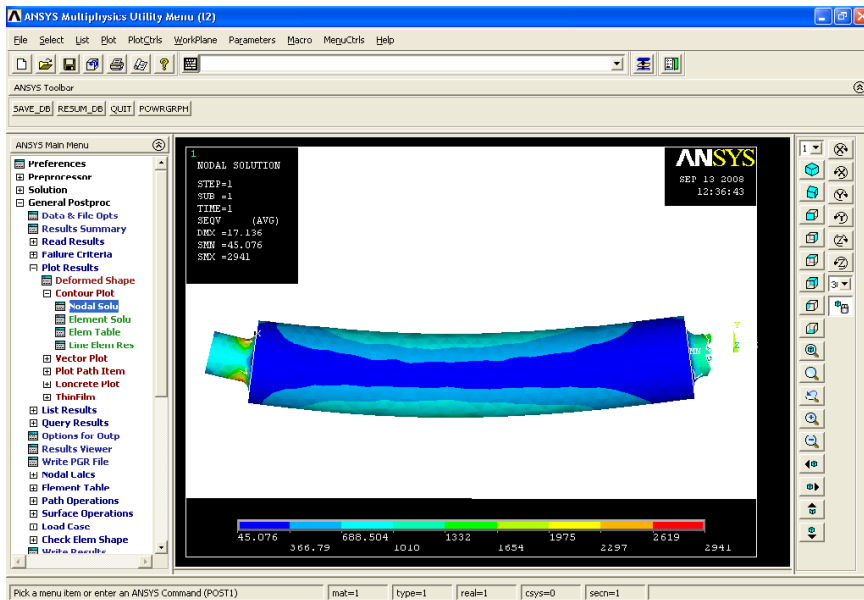
شکل پ ۲-۲۸- مراحل غیر فعال کردن چند المان در بخش مشاهده نتایج

دوباره General Postproc- Plot Results- Countor Plot- Nodal Solu/ Element Solu و سپس در جعبه باز شده Stress Analysis و Von Mises Stress را انتخاب می‌نماییم. همانطور که در شکل پ ۲-۳۰ مشاهده می‌شود، دیگر قسمت unselect شده نمایش نتایج نشان داده نشده و مقدار ماکزیمم تنش به محل Fillet زده شده انتقال پیدا کرده است، که در واقع محل واقعی ماکزیمم تنش در را نشان می‌دهد. برای انتخاب مقدار صحیح ماکزیمم تنش روند شماره ۱۹ را یکبار دیگر برای Element Solution انجام داده و از دو حل المان و گره میانگین گیری می‌نماییم.

به این روش تحلیل تنش مدل غلتک در محیط ANSYS انجام شد و با تغییر پارامترهای مختلف مذکور و ثبت تنش میانگین بدست آمده فرمول بدست آمده در فصول قبل بدست آمد.



شکل پ ۲-۲۹- ادامه مراحل غیر فعال کردن چند المان در بخش مشاهده نتایج



شکل پ ۲-۳۰- نمای مدل جدید با غیر فعال شدن نقاط دلخواه



IROST

Ministry of Science, Research and Technology
Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST)

FUNDAMENTALS OF FLAT ROLLING

**By: 1- Ali Akbar Mottahedi
2- Mahdi Mottahedi**

- 1- IROST, Department of Advanced Materials and Renewable Energies
Tehran, Iran, Email: mottahedi@irost.org, mottahedi@yahoo.com
- 2- Stuttgart University, Germany

Nov. 2017, Tehran, Iran

Keywords: Rolling, Flat Rolling, Cold Rolling, Hot Rolling, Rolling Force, Rolling Parameter, Rolling Stress, Roll Defect, Roll, FEM and Rolling, ANSYS and Rolling