



دوازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

۶-۸ دی‌ماه ۱۳۹۰

شبیه‌سازی منحنی کشیدگی یک قفسه نورد گرم و بررسی پارامترهای موثر بر آن

محمد مشایخی^۱، علی حسین‌پور^{۲*}

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، a.hosseinpoor@me.iut.ac.ir

چکیده

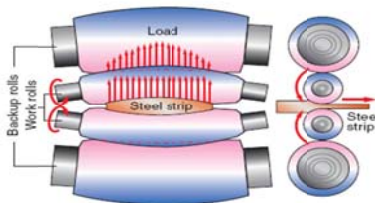
یکی از پارامترهای مهم در نورد گرم یک ورق، تعیین دقیق ضخامت ورق در پایان فرآیند است. تغییر شکل قفسه‌های نورد، ناشی از نیروی نورد، تغییر ضخامت ورق را به همراه دارد. از آنجا که اجزای قفسه نورد به علت وجود نیروی نورد و فشار ورق، دچار تغییر شکل الاستیک می‌شوند. به کمک منحنی کشیدگی تغییر شکل قفسه تعیین می‌گردد. در این تحقیق، منحنی کشیدگی یک قفسه نورد گرم در فولاد مبارکه اصفهان به روش اجزای محدود استخراج و به کمک داده‌های تجربی، اندازه‌گیری شده از خط نورد، مورد راستی آزمایی قرار می‌گیرد. اجزای اصلی تشکیل دهنده قفسه مدل‌سازی شده و با شبیه‌سازی بسته‌شدن غلتک‌ها در فرآیند نورد ورق، منحنی کشیدگی محاسبه می‌شود. در پایان تاثیر پارامترهای مختلف بر روی منحنی کشیدگی قفسه از جمله اثرات اصطکاک و تغییر قطر غلتک کاری و پشتیبان مورد بررسی قرار می‌گیرد. تطابق نتایج عددی به دست آمده با داده‌های تجربی صحت شبیه‌سازی‌های انجام گرفته را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند نورد گرم-منحنی کشیدگی-تغییر شکل غلتک

۱- مقدمه

برای باقی ماندن در بازار رقابت، تولید کنندگان فولاد به دنبال تولید فولاد با کیفیت مطلوب هستند. نورد گرم یکی از مهم ترین مراحل تولید ورق است که نقش به سزایی در کیفیت نهایی محصول دارد. یکی از پارامترهای مهم کیفیت در نورد گرم ورق تعیین دقیق ضخامت ورق در پایان فرآیند است. پارامترهای متعددی که در تعیین ضخامت ورق موثر هستند از آن جمله می‌توان به تاج اولیه غلتک، تاج حرارتی، خیز خمشی و پهن شدگی غلتکها در اثر نیروی نورد، تغییر شکل الاستیک تجهیزات قفسه و سایش غلتکهای کاری و پشتیبان اشاره نمود.

قطعاتی که در یک قفسه نورد به کار رفته اند، در معرض تغییر شکل الاستیک قرار دارند. شکل ۱ شماتیک مجموعه غلتکهای اصلی و پشتیبان را در فرآیند نورد همراه با تغییر شکل الاستیک مبالغه آمیز نشان می‌دهد.



شکل ۱- شکل شماتیک غلتکهای کاری و پشتیبان قفسه نورد

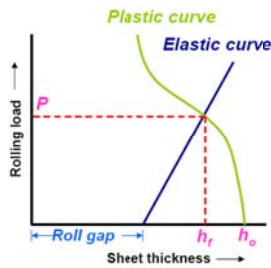
همراه با تغییر شکل اغراق شده

نسبت نیروی نورد به تغییر شکل عمودی کل نورد را ضریب فنریت قفسه یا سختی قفسه^۱ نامیده می‌شود. در عمل برای بدست آوردن تغییر شکل الاستیک اجزای قفسه، قبل از فرآیند نورد مجموعه قفسه را تحت تاثیر نیرویی بیشتر از نیروی نورد قرار داده و نمودار نیرو-تغییر شکل قفسه را ترسیم نموده و به کمک آن ضریب فنریت قفسه که همان شیب این نمودار است، را محاسبه می‌کنند.[1]

روشهای متعددی جهت بدست آوردن پروفیل ورق در ۴۰ سال گذشته استفاده شده است. روش تیر ساده در فنداسیون الاستیک در

¹ Mill Module

هنگام نورد فاصله به اندازه P/ks بیشتر می‌شود.



شکل ۲- منحنی تغییر شکل الاستیک قفسه و الاستیک-پلاستیک ورق [۲]

در شکل ۲ منحنی پلاستیک، منحنی تغییر شکل پلاستیک ورق از ضخامت اولیه h_0 به ضخامت نهایی h_f را نشان می‌دهد. و منحنی الاستیک نشان دهنده منحنی تغییر شکل الاستیک قفسه می‌باشد. بنابراین ضخامت نهایی ورق طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۳]:

$$h_f = c_0 + \frac{P}{k_s} \quad (2)$$

رابطه ۲ نشان می‌دهد، برای به دست آوردن ضخامت خروجی مطلوب باید فاصله‌ی اولیه غلتک‌ها c_0 به میزان P/ks کمتر از ضخامت نهایی باشد.

شیب منحنی الاستیک معرف ضریب سختی قفسه k_s می‌باشد که طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳]:

$$k_s = \frac{\Delta P}{\Delta h} \quad (3)$$

که در آن ΔP تغییرات نیروی نورد و Δh تغییرات فاصله‌ی غلتک‌ها می‌باشد.

کل تجهیزات قفسه نورد داخل سازه اصلی قرار دارند. سازه اصلی از دو دروازه اصلی ریخته‌گری شده تشکیل شده است که در دو سمت موتور و اپراتور قرار دارد. سطوح جانبی سازه که محل قرار گرفتن چوک غلتک کاری و پشتیبان می‌باشد در معرض سایش و خوردگی می‌باشد. به همین دلیل بر روی این سطوح لاینرهای جانبی سخت شده نصب می‌گردد. به منظور کاهش اصطکاک چوک غلتک و سازه، سطح لاینرهای جانبی گریس کاری می‌شود. به مرور زمان این لاینرها در معرض سایش قرار گرفته و تعویض می‌گردند. جنس اجزاء قفسه هفتم نورد نهایی در جدول ۱ بیان شده است [۱۸].

جدول ۱- جنس قطعات به کار رفته در قفسه [او ۱۶]

قطعه	جنس طبق نقشه	E(GPa)	N
Housing	Cast steel	210	0.3
Work Roll	Chill cast iron	100	0.25
BackUp Roll	Cast or forged steel	210	0.3
Capsule	40NiCrMo7UNI 7874	212	0.3
Liners	40NiCrMo7UNI 7874	212	0.3
Chocks	Fe430 UNI EN 10025	212	0.3

سال ۱۹۶۵ توسط Stone و Gray ارائه شد [7]. Shohet و Townsend روش ضرائب تاثیر را در سال ۱۹۶۸ ارائه کرده [7] و Hauquin در سال ۱۹۹۴ آنرا ارتقاء داد [9]. Slaganic در سال ۲۰۰۲ [8] و M.Knapinski در سال ۲۰۰۵ معادلات عددی جهت محاسبه تغییر شکل غلتکها بدست آوردند [6]. Malik روش المان محدود ترکیبی ساده شده را در سال ۲۰۰۷ ارائه کرد [7].

در زمینه منحنی کشیدگی قفسه و پارامترهای موثر در آن و تنظیمات قفسه قبل از فرآیند نورد تحقیق منسجمی منتشر نشده است و تنها تغییر شکل اجزاء قفسه از جمله تغییر شکل تجهیزات آن شامل غلتک‌های کاری، غلتک‌های پشتیبان، سازه اصلی به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ناشناخته بودن رفتار منحنی کشیدگی، اثر پارامترهای مختلفی چون اصطکاک، لقی بین اجزاء، تغییرات قطر غلتک کاری و پشتیبان بر منحنی نیز شناخته شده نیست. در این مقاله پس از معرفی اجزاء مختلف قفسه نورد نهایی به بررسی منحنی کشیدگی قفسه پرداخته می‌شود. سپس روش مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus بیان گردیده و پس از راستی‌آزمایی، نتایج ارائه می‌گردد. با شناخت منحنی کشیدگی، اثر پارامترهای مختلف بر منحنی بررسی می‌گردد.

۲- فرآیند نورد گرم و منحنی کشیدگی

این تحقیق بر روی واحد نورد نهایی شماره ۷ واحد نورد گرم مجتمع فولاد مبارکه متمرکز شده و نتایج تجربی از این واحد استخراج شده است. نورد نهایی از هفت قفسه تشکیل شده است وظیفه کاهش ضخامت ورق تا رسیدن به ضخامت نهایی را بر عهده دارد. قفسه هفتم نورد نهایی از دو غلتک کاری، دو غلتک پشتیبان، لاینرها، سیستم محرک (شامل دو جک هیدرولیک) و سازه اصلی تشکیل شده است. در این تحقیق برای تعیین منحنی کشیدگی قفسه نورد غلتک کاری و پشتیبان، برینگها و لاینرها در نظر گرفته شده است.

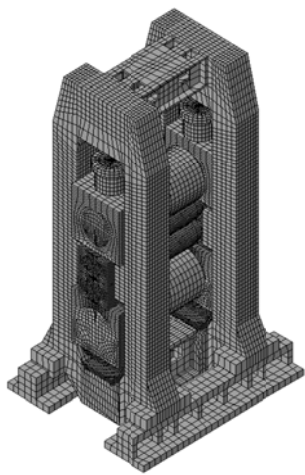
در فرآیند نورد گرم نیروی لازم جهت تغییر شکل ورق به صورت زیر تخمین زده می‌شود [2]:

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \left[\frac{1}{l_Q} (e^Q - 1) b \sqrt{R \Delta h} \right] \quad (1)$$

σ_0^- : تنش تسلیم میانگین، $Q = \mu L p / h^-$ ، μ : ضریب اصطکاک، L_p : طول تماس، h^- : ضخامت میانگین، b : عرض ورق، R : قطر غلتک، Δh : تغییر ضخامت است. نیروی نورد علاوه بر تغییر شکل ورق باعث تغییر شکل الاستیک کل تجهیزات قفسه نورد نیز می‌شود از این رو فاصله‌ی تنظیمی اولیه غلتک‌ها هنگام نورد بیشتر می‌گردد و باعث می‌شود که ضخامت نهایی ورق بیشتر گردد. در صورتی که کل قفسه نورد را به صورت یک فنر ساده با سختی الاستیک ks در نظر گرفته شود و فاصله‌ی اولیه غلتک‌ها در حالت بدون بار برابر با c_0 باشد،

بنابراین در این تحقیق از روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Abaqus/Standard غلتهای کاری و پشتیبان، لاینزهای مربوطه، سیستم حرکتی و سازه اصلی مدلسازی شده است. کلیه المانها از نوع مکعبی Standard/Quadratic/3Dstress(C3D20R) می باشد. المان C3D20R المان عمومی درجه دو با بیست گره و هشت نقطه انتگرال گیری می باشد. این المان از دقت بالایی برخوردار است ولی به دلیل بالا بودن حجم محاسبات زمان حل بسیار زیاد می باشد. شکل ۵ شبکه اجزای محدود قفسه هفتم نورد نهایی را نشان می دهد. به منظور بررسی مستقل بودن حل از شبکه، تحلیل در سه حالت با تعداد المانهای ۴۶۶۰۸، ۵۷۷۹۶ و ۱۰۴۷۱۷ انجام گردید.

با توجه به تعداد زیاد سطوحی که نسبت به یکدیگر حرکت دارند، بنابراین نیروی اصطکاک یکی از مهم ترین نیروهای موجود در قفسه است. جهت بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک بین سازه اصلی و چوک غلتهای بر روی منحنی، مسئله برای ضریب اصطکاک از صفر تا ۰/۱۶ مورد بررسی قرار می گیرد. در صورتی که در مدل اجزای محدود لقی بین چوک غلتهای کاری و پشتیبان و دروازه سازه اصلی مستقیماً مدل شود، حل عددی با مشکل همگرایی روبرو می شود. به همین دلیل فضای خالی مابین چوکها و دروازه سازه توسط اتصال دهنده^۲ پر گردید.



شکل ۵ - شبکه اجزای محدود قفسه هفتم نورد نهایی

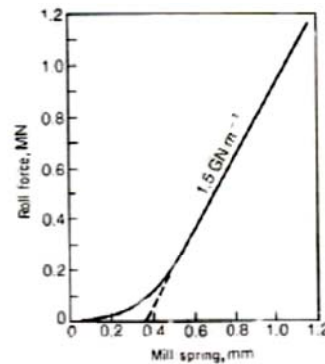
۵- نتایج تحقیق

شکل ۶ تنش های وارد شده به کل مجموعه قفسه را نمایش می دهد. حداکثر تنش ۱۹۵ MPa در سطوح تماس غلتهای کاری با یکدیگر است. با توجه به جنس غلتک در جدول ۱ و تنش تسلیم مربوطه که برابر با ۲۱۰ MPa است، می توان نتیجه گرفت کلیه قطعات

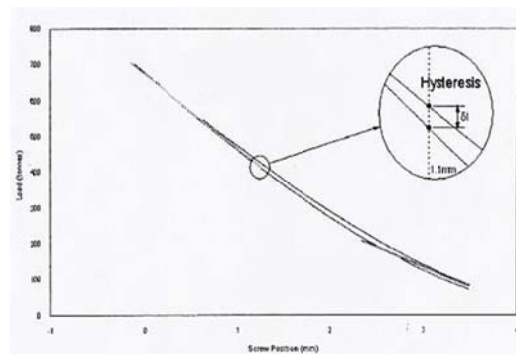
²Connector

۳- تعیین منحنی کشیدگی به روش تجربی

برای تعیین منحنی کشیدگی در نورد ابتدا سیستم محرک را تا اندازه ای که غلتهای با یکدیگر تماس پیدا کنند، جابجا می شوند. در ادامه غلتهای را تا اندازه ای جابجا می کنند که نیروی نشان داده در نیروسنج به هزار تن افزایش یابد، سپس با جدا نمودن نیرو به پانصد تن کاهش می دهند و در پایان غلتهای را کاملاً از هم جدا می کنند تا منحنی نیرو - تغییر مکان مطابق شکل ۳ به دست آید. در حالت ایده آل مسیر بارگذاری و باربرداری بر یکدیگر منطبق خواهد بود. به علت وجود اصطکاک و لقی اجزای سیستم، این دو مسیر بر یکدیگر منطبق نخواهند شد و حلقه پسماند ایجاد می شود (شکل ۴).



شکل ۳ - منحنی کشیدگی [۲]



شکل ۴ - حلقه پسماند [۲]

۴- روش تحقیق

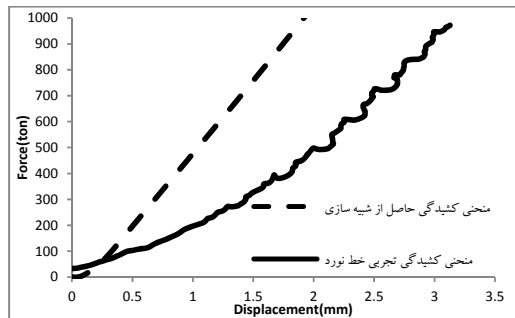
از آنجا که در فرآیند نورد تعیین تغییرشکل الاستیک مجموعه قفسه امکان پذیر نیست، از این رو لازم است این تغییرشکل ها به روش تحلیلی و یا روش عددی محاسبه شود و از آنجا که محدودیت های زیادی در تعیین دقیق تغییرشکل ها به روش تحلیلی وجود دارد از آن جمله محدود بودن روابط به قطعات خاص، فرضیات زیاد و مهم تر از همه غیر قابل استفاده برای قفسه ها با تعداد بیشتر از دو غلتک می باشد،

با افزایش نیرو، اولاً سطوح جدیدی در تماس با یکدیگر قرار گرفته و بر یکدیگر نیرو اعمال می‌کنند. ثانیاً المان‌های بیشتری در معرض تغییر شکل قرار گرفته و در نتیجه نیروی جهت مقاومت در برابر تغییر شکل وارد می‌کنند. پس هر چه جابجایی کپسول بیشتر شود، نیروی مقاوم در مقابل این جابجایی نیز بیشتر می‌گردد. نیروی بیشتر مقاوم در برابر جابجایی به معنی مقاومت بیشتر قفسه در مقابل تغییر شکل می‌باشد. یعنی با افزایش جابجایی کپسول قفسه سخت تر می‌شود. سختی قفسه همان شیب مماس بر منحنی کشیدگی قفسه است.

بعد از اینکه بر اثر نیروی اعمالی از طرف کپسول تمام تماس‌ها برقرار شد و کلیه قطعات در تغییر شکل مشارکت کردند، شیب نمودار ثابت می‌شود و نمودار رفتار خطی به خود می‌گیرد. در این شرایط مقدار سختی قفسه جهت استفاده در دیگر محاسبات، استخراج می‌گردد. سختی قفسه حاصل از شبیه‌سازی، برابر 566 ton/mm به دست آمده است، که نسبت به سختی واقعی قفسه که 508 ton/mm است، اختلاف $11/4\%$ وجود دارد. این اختلاف ناشی از خطای عددی مربوط به شبیه سازی اجزای محدود و پارامترهایی که در مدل سازی در نظر گرفته نشده‌اند، می‌باشد.

۶- مقایسه منحنی کشیدگی قفسه با نتایج تجربی خط نورد

شکل ۹ منحنی کشیدگی قفسه را نشان می‌دهد. منحنی نیروی خوانده شده از نیروسنج‌های کپسول هیدرولیک بر حسب موقعیت کپسول ترسیم شده است.



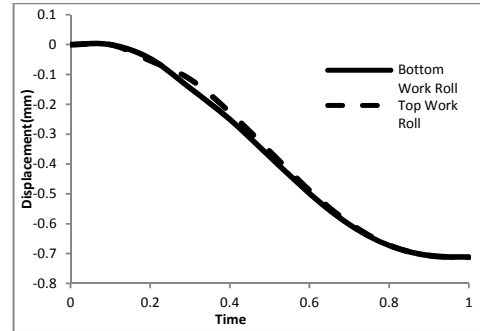
شکل ۹- مقایسه منحنی کشیدگی قفسه با نتایج تجربی خط نورد

سختی قفسه استخراج شده از سیستم کنترلی 508 ton/mm می‌باشد.

هنگام فرآیند استخراج منحنی کشیدگی، غلتک‌ها با سرعت بسیار کم می‌چرخند. غلتک‌های کاری بر روی برینگ‌ها و غلتک‌های پشتیبان بر روی ژورنال هیدرولیکی می‌چرخند. در صورتی که سرعت چرخش غلتک‌ها زیاد باشد، نوسانات نیرو در اثر خارج از مرکزی غلتک‌ها و همچنین به وجود آمدن نیروهای دینامیکی زیاد می‌شود. در صورتی که غلتک‌هایی که نمی‌چرخند را به یکدیگر فشرده کنند، باعث

در محدوده الاستیک تغییر شکل می‌دهد.

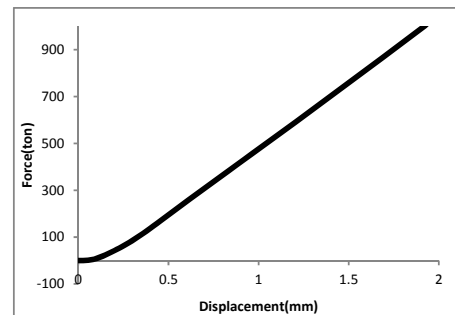
جابجایی نقطه تماس وسط هر غلتک کاری در شکل ۷ آمده است. با توجه به اینکه غلتک کاری بالایی باعث حرکت غلتک کاری پایینی می‌شود، مسیر دو منحنی مشابه یکدیگر است. بدین ترتیب تماس بین دو غلتک کاری به خوبی مدل گردیده است.



شکل ۷ - جابجایی نقطه تماس وسط غلتک های کاری

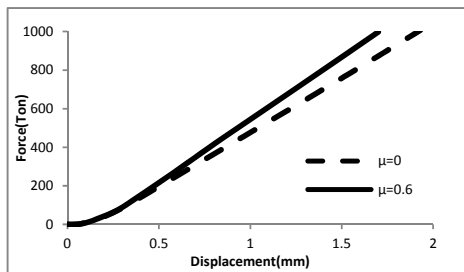
از حل مدل اجزاء محدود جابجایی و نیروهای وارد شده بر کپسول به دست می‌آید. در مدل اجزاء محدود، جابجایی به کپسول اعمال شده و نیرو مانیاتور می‌گردد. یعنی کپسول به سمت پایین حرکت می‌کند، تا نیرو به 1000 ton برسد. در این مرحله حل متوقف می‌گردد.

با ترسیم نیروی به دست آمده بر حسب جابجایی اعمالی، منحنی کشیدگی به دست می‌آید. شکل ۸ منحنی کشیدگی قفسه را نشان می‌دهد. در ابتدای حل به دلیل وجود لقی‌های عمودی بین قفسه، بدون تغییر قابل ملاحظه در نیرو، جابجایی تغییر می‌کند. ولی بعد از عبور از لقی‌های عمودی، نیرو نیز از جابجایی تبعیت کرده و افزایش می‌یابد. با پایین آمدن کپسول، چوک غلتک پشتیبان بالایی نیز به سمت پایین حرکت می‌کند. غلتک پشتیبان بالایی که در تماس با غلتک کاری بالایی می‌باشد، تحت خمش قرار می‌گیرد. با افزایش فشار کپسول، غلتک پشتیبان بالایی بر غلتک کاری بالایی نیرو اعمال می‌کند. نیروی وارد شده بر غلتک کاری بالایی، باعث فشرده شدن قسمت بشکه ای آن می‌شود.



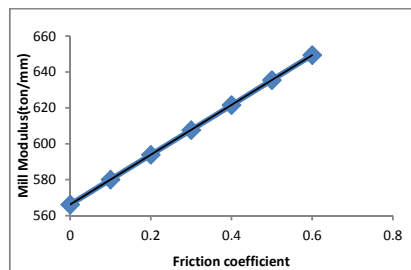
شکل ۸ - منحنی کشیدگی قفسه

و شیب آن پرداخته شده است. جهت بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک بر روی منحنی، مسئله برای ضریب اصطکاک از صفر تا ۰/۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضریب اصطکاک صفر به معنی گریسکاری مناسب و یا وجود لقی بین چوک و سطح داخلی دروازه سازه می‌باشد. هر چه ضریب اصطکاک بیشتر شود، نیروی اصطکاک وارد شده به چوک بیشتر می‌باشد. نیروی اصطکاک در مقابل حرکت چوک مقاومت کرده و باعث می‌شود تغییر شکل قفسه سخت تر شود. بنابراین با افزایش نیروی اصطکاک سختی قفسه بیشتر می‌شود. شکل ۱۰ منحنی سختی قفسه در دو حالت ضریب اصطکاک صفر و ۰/۶ را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب اصطکاک، شیب منحنی یعنی سختی قفسه افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰- سختی قفسه برای ضریب اصطکاک مختلف

در شکل ۱۱ تغییرات سختی قفسه نسبت به ضریب اصطکاک نشان داده شده است. تغییرات سختی قفسه نسبت به ضریب اصطکاک خطی است. تغییر شکل قطعات مختلف تأثیر عمده ای بر روی سطوح تماس چوک و دروازه سازه ندارند. بنابراین نیروی اصطکاک وارد شده بر چوک، از تغییر شکل بقیه قطعات مستقل بوده و فقط تابع خطی از ضریب اصطکاک می‌باشد. بنابراین سختی قفسه نیز تابع خطی از ضریب اصطکاک است.



شکل ۱۱ - تغییرات سختی قفسه نسبت به ضریب اصطکاک

در عمل بعد از این که نیروی کپسول به ۱۰۰۰ ton رسید، فشار کپسول را کاهش داده تا غلتک ها به تدریج از یکدیگر جدا شوند. هنگام باربرداری نیز، نیرو و جایجایی مانیتور می‌شود. در صورتی که مسیر بارگذاری و باربرداری متفاوت باشد، حلقه ای موسوم به حلقه پسماند ایجاد می‌شود. در صورتی که این حلقه در اثر نیروی اصطکاک باشد،

تخریب سطح آنها می‌شود. بنابراین منحنی کشیدگی در سرعت چرخش بسیار کم، به دست می‌آید. علت نوسانات موضعی نیرو در منحنی، چرخش غلتک‌ها است.

مسیر منحنی کشیدگی حاصل از مدل اجزای محدود و منحنی کشیدگی واقعی یکسان می‌باشد. سختی قفسه حاصل از مدل اجزای محدود نسبت به سختی قفسه به اندازه ۱۱/۴٪ اختلاف دارد. این اختلاف ناشی از خطای عددی مربوط به شبیه‌سازی اجزای محدود و همچنین پارامترهایی که در نظر گرفته نشده‌اند، است. چرخش غلتک ها یکی از پارامترهایی است که در مدل‌سازی نشده است. با توجه به اینکه چرخش غلتک‌ها باعث به وجود آمدن نیروهای دینامیکی و همچنین نوسانات نیرو می‌شود، در حل استاتیکی امکان مدل‌سازی آن وجود ندارد.

در مدل اجزای محدود چوک غلتک‌ها و خود غلتک به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند. یعنی برینگ ها و ژورنال هیدرولیک هم‌جنس با چوک مدل شده و از جزئیات آنها صرف‌نظر شده است. در صورتی که جزئیات برینگ ها مدل شوند، مدل اجزای محدود بسیار پیچیده می‌شود و امکان حل آن وجود ندارد.

بنابراین از عوامل موثر بر منحنی کشیدگی، عواملی چون چرخش غلتک‌ها، لقی برینگ‌ها و یکسان نبودن سختی قفسه دو طرف سازه در مدل اجزای محدود، مدل‌سازی نشده‌اند.

۷- بررسی عوامل تأثیرگذار بر منحنی کشیدگی قفسه نورد

در بخش قبل سختی حاصل از مدل اجزای محدود ارائه گردید و مشاهده شد با افزایش بار گذاری، شیب منحنی افزایش پیدا می‌کند و سپس شیب منحنی ثابت می‌شود. با توجه به اینکه مدل ارائه شده از دقت کافی و نسبتاً خوبی برخوردار است، می‌توان از این مدل جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف بر منحنی کشیدگی و سختی قفسه استفاده کرد.

۷-۱۱ اثر اصطکاک

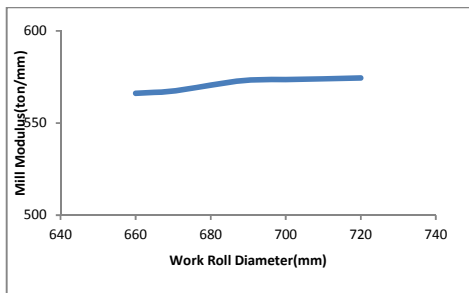
با توجه به تعداد زیاد سطوحی که نسبت به یکدیگر حرکت دارند، بنابراین نیروی اصطکاک یکی از مهم‌ترین نیروهای موجود در قفسه است. چوک ها در داخل دروازه سازه اصلی مقید شده‌اند بنابراین سطوح جانبی چوک ها در تماس با سطوح داخلی دروازه سازه اصلی می‌باشند. سطوح داخلی سازه اصلی در معرض سایش است به همین دلیل با استفاده از روانساز از سایش آنها جلوگیری می‌شود. با استفاده از روانکاری بر روی این سطوح، اصطکاک بین چوک ها و این سطوح کاهش می‌یابد. ولی در صورت عدم استفاده از روانساز در زمان مناسب و یا مقدار کافی، نیروی اصطکاک حائز اهمیت خواهد بود. به همین دلیل در این قسمت به بررسی اثر ضریب اصطکاک بر منحنی کشیدگی قفسه

پسماند اصطکاکی نامیده می‌شود.

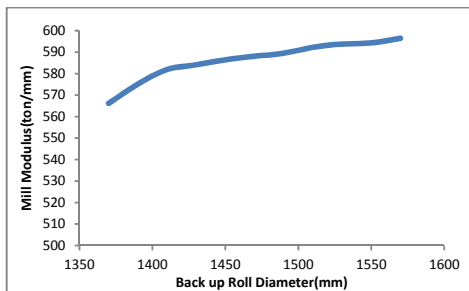
شکل ۱۲ حلقه پسماند اصطکاکی را برای ضریب اصطکاک $\mu=0/6$ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که ضریب اصطکاک صفر می‌باشد، مسیر بارگذاری و باربرداری بر هم منطبق است. هر چه ضریب اصطکاک بیشتر شود، اختلاف مسیر بارگذاری و باربرداری بیشتر می‌شود. به نحوی که در $\mu=0/6$ این اختلاف به بیشترین مقدار خود می‌رسد. حلقه پسماند تشکیل شده ساعتگرد می‌باشد. بدین معنی که در ابتدای حل، در اثر تغییر ناچیز در جا به جایی، نیرو تغییر زیادی می‌کند و همچنین در شروع بارگذاری در اثر کم شدن جابه‌جایی، در نیرو کاهش قابل ملاحظه ای اتفاق می‌افتد. از بررسی اثر اصطکاک بر منحنی کشیدگی مشخص گردید که با افزایش ضریب اصطکاک، علاوه بر افزایش خطی سختی قفسه، حلقه پسماند اصطکاکی در منحنی کشیدگی به وجود می‌آید.

۱/۱۵٪ می‌باشد. بنابراین در هر بار تعویض غلتک کاری می‌توان از تغییرات سختی قفسه صرف‌نظر کرد و از سختی قفسه قبلی جهت محاسبات سیستم کنترلی استفاده کرد.

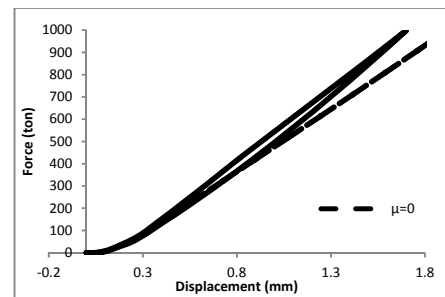
با افزایش قطر غلتک پشتیبان، سختی قفسه افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه محدوده مجاز قطر غلتک پشتیبان از محدوده مجاز قطر غلتک کاری بزرگتر است، بنابراین میزان تغییرات سختی قفسه در این محدوده نیز بیشتر بوده و ۵٪ می‌باشد. در صورتی که در تولید ورق، نیاز به دقت بسیار بالایی باشد، در هر تعویض غلتک پشتیبان لازم است سختی قفسه دوباره محاسبه گردد.



شکل ۱۴- اثر تغییرات قطر غلتک کاری بر سختی قفسه



شکل ۱۵- اثر تغییرات قطر غلتک پشتیبان را بر سختی قفسه



شکل ۱۲- حلقه پسماند اصطکاکی برای $\mu=0/6$

۷-۲ تاثیر تغییر قطر غلتک کاری و پشتیبان

در اثر گردش غلتک کاری و همچنین تغییر شکل ورق، بیشترین سایش در غلتک کاری و پشتیبان اتفاق می‌افتد. در اثر سایش، صافی سطح غلتک کاری و پشتیبان کاهش می‌یابد. جهت دستیابی به کیفیت مطلوب ورق، می‌بایست از غلتک با صافی سطح مناسب استفاده کرد. بدین منظور غلتک‌هایی که در اثر سایش صافی سطح خود را از دست داده‌اند، تعویض کرده و پس از سنگ زنی سطح آن، مجدداً استفاده می‌شود. در اثر سنگ زنی سطح غلتک، قطر غلتک کاهش می‌یابد. قطر مجاز غلتک کاری از ۶۶۰ mm تا ۷۲۰ mm و قطر مجاز غلتک پشتیبان از ۱۳۷۰ mm تا ۱۵۷۰ mm است. با توجه به این که غلتک کاری و پشتیبان دو جزء مهم قفسه نورد است، لازم است اثر تغییر قطر غلتک کاری و پشتیبان بر سختی قفسه بررسی شود. در شکل ۱۳ تغییرات سختی قفسه بر حسب تغییر قطر غلتک کاری و شکل ۱۴ تغییرات سختی قفسه بر حسب تغییر قطر غلتک پشتیبان نشان داده شده است.

با افزایش قطر غلتک کاری، سختی قفسه افزایش پیدا می‌کند. افزایش سختی قفسه در محدوده‌ی مجاز قطر غلتک کاری، حداکثر

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق به کمک روش اجزای محدود، منحنی کشیدگی قفسه نورد شبیه‌سازی گردید. در مدل اجزای محدود، تجهیزاتی از قفسه که در منحنی نقش عمده‌ای بر عهده دارند، شبیه‌سازی شد. غلتک‌های کاری و پشتیبان، چوک غلتک‌های کاری و پشتیبان، لاینرها، کپسول هیدرولیک، سازه اصلی و تکیه‌گاه کف از اجزای اصلی سیستم در شبیه‌سازی است. به کمک نرم افزار Standard/Abaqus، قطعات، شرایط مرزی شامل نیروها و جابجایی و ارتباط بین اجزا مختلف قطعات مدل گردید. المان مکعبی درجه دو جهت شبکه اجزای محدود قطعات استفاده شد. منحنی کشیدگی حاصل از مدل اجزای محدود، از مسیر کلی منحنی کشیدگی تبعیت می‌کند. شیب منحنی کشیدگی معیار سختی قفسه نامیده می‌شود. سختی قفسه حاصل از مدل اجزای محدود، نسبت به سختی قفسه ۱/۱۱۴٪ اختلاف دارد. این اختلاف از پارامترهای مدل نشده شامل چرخش غلتک‌ها و تکیه‌گاه‌های آنها و همچنین از خطای عددی روش المان محدود نتیجه می‌شود.

deformation and stress distributin under thermo mechanical loading in cold rolling”, Journal of materials processing technology, Vol. 147, pp. 255-267, 2004.

[۹]Pośpiech, J., “Calculation method for deformations of stand and rolls to obtain products with small dimension of tolerances”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, pp. 417-422, 2005.

[۱۰]Forouzan, M. R., Salimi, M., “Determination of bending actuators set points to control crown and flatness in hot rolling of strip”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 670-677, 2002.

[۱۱]Sikdar, S., Shylu, J., Pandit, A., Dasu, R., “Analysis of roll stack deflection in a hot strip mill”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol 29, No. 3, 2007.

[۱۲]Salgani, V., “Mathematical modeling of roll load and deformation in four-high strip mill”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 695-699, 2002.

[۱۳]Kainz, A., Krimpelstatter, K., Zeman, K., “FE-Simulation of thin strip and temper rolling processes”, Abaqus Austria Users’ Conference, 2003.

[۱۴]Hacquin, A., Montmeitonnet, P., Guillerault, J., “A three dimensional semi analytical model of rolling stand deformation with finite element validation”, European journal of mechanics, A/Solids, Vol. 17, no. 1, pp. 79-106, 1998.

[۱۵]Montmitonnet, P., Buessler, P., “A review on theoretical analyses of rolling in Europe”, ISIJ international, Vol. 31, No. 6, pp. 525-538, 1991.

[۱۶]Montmitonnet, P., “Hot and cold strip rolling processes”, Computer method in applied mechanics and engineering, Vol. 195, pp.6604-6625, 2006.

[۱۷]Kim, T., Lee, W., Hwang, S., “An integrated FE process model for the prediction of strip profile in flat rolling”, ISIJ international, vol. 43, no. 12, pp.1947-1956, 2003 .

[18] جزوه آموزشی سیکل تولید مجتمع فولاد مبارکه، ۱۳۸۵

نتایج مدل ارائه شده به نتایج واقعی نزدیک است و می توان از نتایج آن استفاده کرد. با استفاده از منحنی حاصل از مدل اجزای محدود، می توان رفتار منحنی را بررسی کرد. همچنین مدل ارائه شده، امکان بررسی فرآیند بارگذاری و باربرداری منحنی کشیدگی را دارا است. پس از اطمینان از نتایج مدل ارائه شده، به بررسی اثرات پارامترهای مؤثر در منحنی چون اصطکاک، قطر غلتک کاری، قطر غلتک پشتیبان پرداخته شد.

با افزایش ضریب اصطکاک علاوه بر افزایش سختی قفسه، حلقه پسماند نیز به وجود می آید. لقی عمودی اثری جز جابجایی کل منحنی ندارد. افزایش قطر غلتک کاری و پشتیبان تغییر چندانی در سختی قفسه نمی دهد، از این رو در تعویض این غلتک ها نیازی به محاسبه مجدد سختی قفسه نمی باشد.

با استفاده از نتایج حاصل از بررسی تأثیر این پارامترها، می توان منحنی های به دست آمده در خط نورد را بهتر تفسیر کرد. از مقایسه ی منحنی های به دست آمده از خط نورد با نتایج مدل سازی اثر پارامترهای مختلف بر منحنی ها، می توان به وجود عیوب در قفسه از جمله وجود گیر مکانیکی، لقی عمودی پی برد.

بنابراین مدل اجزای محدود ارائه شده، کمک شایانی در جهت بررسی منحنی کشیدگی و تشخیص عیوب قفسه می کند.

۹- مراجع

[۱]Wusatowski, Z., Fundamental of Rolling, Pergamon Press, Oxford, 1969.

[۲]Lenard, J., Primer on Flat Rolling, Elsevier Ltd., London, 2007.

[۳]Ginzburg, V., Ballas, R., Flat Rolling Fundamentals (Manufacturing Engineering and Materials Processing), Marcel Dekker Inc, New York, 2007.

[۴]Ginzburg, V., Flat rolled steel processes- advanced technologies, CRC Press, New York, 2007 .

[۵]Ginzburg, V., High-Quality Steel Rolling (Manufacturing Engineering and Materials Processing), CRC Press, New York, 1993.

[۶] مشکسار، م، اصول مهندسی نورد، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۸۱.

[۷]Malik, A.S., Grandhi, R.V., “A computational method to predict strip profile in rolling mills”, Journal of materials processing technology, No. 206, pp. 263-274, 2008.

[۸]Pietrzyk, M., Cser, L., Lenard, J.G., Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products, Elsevier Science Ltd, London, 1999.

[۹]Knapanski, M., “FEM 3D analysis of roll deflection during plate rolling”, Journal of Metalurgica, Vol. 44, No. 3, pp.175-179, 2005.

[۱۰]Malik, A.S., Khan, O., Sheikh, A.K., “Roll