

ارائه مدلی برای پیش بینی سایش غلتک‌های نورد گرم

امیر نورانی^۱

محمود سلیمی^{۲*}

* نویسنده مسئول: salimi@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این مقاله سعی شده است پدیده سایش به طور کامل معرفی گردد و پارامترهای مؤثر بر سایش غلتک‌های کاری نورد گرم مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، انواع مکانیزم‌های سایش غلتک‌های کاری و تفاوت آنها در قفسه‌های مختلف بیان شده‌اند. با استفاده از روش المان محدود، و نوشتن برنامه‌ی مربوطه، نورد گرم، مدل‌سازی شده و با استفاده از توزیع فشار در طول غلتک، سایش اندازه‌گیری می‌شود. برای به دست آمدن ضریب تجربی موجود در معادله، سایش ناشی از عبورهای مختلف، جمع و با سایش واقعی حاصل از نمونه تست انجام شده در خط نورد گرم شرکت فولاد مبارکه، کالیبره می‌شود. نتایج به وسیله مقایسه نیروی به‌دست آمده با نیروی نورد واقعی تأیید می‌شود. در نهایت سایش تئوری و تجربی برای یک قفسه با یکدیگر مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پروفیل سایش، نورد گرم، غلتک کاری، المان محدود.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان. www.SID.ir

۱- مقدمه

گرم در معرض تغییرات شدید در دما، خراشیدگی به وسیله‌ی اکسیدهای سخت و بارگذاری متناوب قرار دارند. تعجیبی نیست که سرعت سایش به وجود آمده یک محدوده‌ی وسیع تحقیقات را باعث شده که به‌طور مختصر به‌وسیله‌ی ویلیامز و یکسال [۷] و به‌وسیله‌ی دیکینسون [۸] مورد بازبینی قرار گرفته است. سایش یا تقریباً به‌صورت یکنواخت در طول سطح تماس است یا این‌که به‌صورت محلی در باندهای سایش عمیق‌تر وجود دارد.

۲- مکانیزم‌های سایش

موارد زیر، علل و عوامل اصلی ایجاد سایش در نورد گرم را بیان می‌دارد [۶]:

الف- سایدگی سطح غلتک در اثر تماس با ماده و غلتک‌های پشتیبان

ب- خستگی مکانیکی سطح غلتک در نتیجه‌ی بارگذاری متناوب غلتک‌ها

ج- خستگی حرارتی لایه‌های سطح که به‌طور متناوب به وسیله‌ی ورق گرم شده و به‌وسیله‌ی آب، خنک می‌شوند.

د- خوردگی

این در حالی است که مکانیزم‌های غالب سایش در نورد سرد، خراشیدگی، خوردگی و چسبندگی است. به‌طور کلی می‌توان تفاوت مکانیزم‌های سایش در قفسه‌های نورد گرم را به این صورت بیان کرد که در ایستگاه‌های اولیه به دلیل دمای بالاتر قطعه و زمان تماس بالاتر غلتک‌ها، خستگی حرارتی مکانیزم غالب سایش است و در ایستگاه‌های نهایی، به علت سرعت بالاتر و سختی بالاتر ماده، مکانیزم غالب سایش، خستگی مکانیکی و خراشیدگی می‌باشد.

اکنون دو نوع غلتک فولادی و چدنی در صنعت استفاده می‌شوند. که به دلیل تفاوت مکانیزم سایش، در ایستگاه‌های اولیه از غلتک‌های فولادی HiCr^f و HSS^d و در ایستگاه‌های نهایی از غلتک‌های چدنی استفاده می‌شود [۹].

سایش غلتک‌ها در نورد گرم و نورد سرد تفاوت‌هایی دارند که مربوط به نوع فرآیند و مؤلفه‌های موجود در هر یک می‌باشد. این تقسیم‌بندی، اولین بار در سال ۱۹۵۷ مطرح شد [۱] و گرچه پدیده‌ی سایش پیش از آن طبق اصول مهندسی مکانیک مثل تنش‌ها، کرنش‌ها، خنک‌کاری، گرمادهی و غیره مدنظر بوده است، اما لکن از آن تاریخ به بعد به‌طور خاص مورد توجه قرار گرفت و مهندسی سطح شامل اصطکاک، روغن‌کاری و سایش تحقیقات بیشتری را برانگیخت. در این میان سایش با توجه به پیچیدگی‌های خاص و ارتباط آن با علوم مختلف مثل مهندسی مکانیک، مهندسی مواد و مهندسی شیمی پژوهش‌های علمی و تجربی بیشتری را طلب می‌کند. در اوایل دهه‌ی ۶۰ اولین مطالعات توسط ساچز [۲] و سایر همکارانش با هدف درک نحوه‌ی سایش غلتک انجام گردید.

تانگ^۱ و چاکو [۳]، نمودارهای تجربی سایش غلتک‌های کاری در ایستگاه‌های نورد گرم فولاد را برای ابعاد و توناژ خاصی ارائه کردند و اهمیت این مبحث در نورد گرم را پیش از پیش نمایان ساختند. در سال ۱۹۷۷، اویکه [۴]، یک رابطه‌ی محاسباتی بر حسب شماره ایستگاه، تعداد کل ایستگاه‌ها، نیروی غلتک، عرض ورق، طول تماس غلتکی، کاهش ضخامت، طول ورق خروجی، قطر غلتک کاری و ثابت‌های تجربی که به جنس غلتک، دمای ورق، روغن کاری، خنک‌کاری و غیره بستگی دارند ارائه کرد. در سال ۱۹۸۵، ناکانیسی [۵]، به‌وسیله رابطه‌ایکه و توسعه‌ی آن، سایش در وسط ورق را به سایش غلتک موضعی کل در لبه‌ی ورق مرتبط ساخت و نشان داد این دو سایش با ضریبی متناسب یکدیگرند.

در سال‌های بعد اشخاصی مثل گینزبرگ [۶]، در مباحث پروفیل^۲ ورق و تختی^۳ و همچنین نورد سرد و گرم فولاد، کاربردهای پدیده سایش را مطرح ساختند. غلتک‌های نورد

1- Tong
2- Profile
3- Flatness

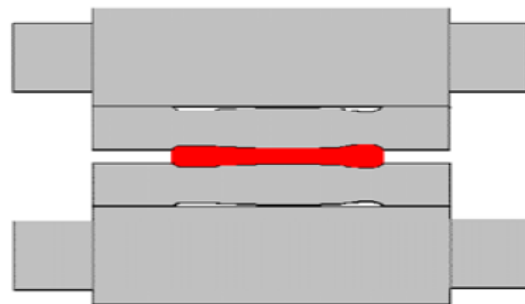
4- High Chromium Steel
5- High Speed Steel

۳- معادله سایش، انواع آن و پارامترهای مؤثر

سایش یکنواخت به طور اساسی به وسیلهی خراشیدگی در ترکیب با خستگی حرارتی و با سایش خوردگی که یک نقش کم اهمیت تری را ایفا می کند ایجاد می شود. همچنین، خراشیدگی به عنوان دلیل اصلی به وسیلهی شاگسی [۱۰] و شیرایوا [۱۱] شناخته می شود. شکل پیشنهاد شده به وسیلهی ندا [۱۲] که اغلب در مدل های فرآیند استفاده شده عبارت است از:

$$d \propto \frac{P L}{w R} \quad (1)$$

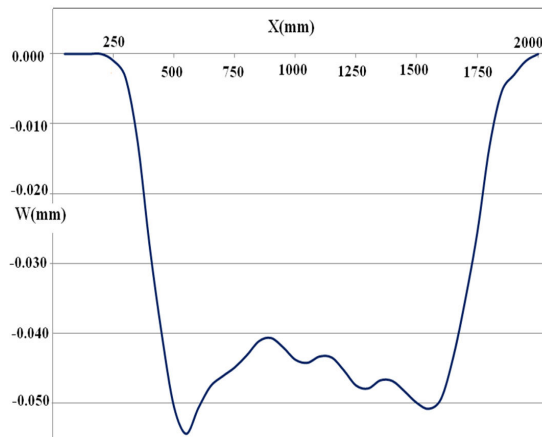
بقیهی روابط پیش بینی سایش، توسعه یافتهی این رابطهی اساسی هستند. استفاده از توزیع نیروی نورد برای پیش بینی سایش غیریکنواخت در طول غلتک مناسب است. این سایش های محلی هم در محل عبور لبه های ورق و هم در وسط غلتک ممکن است اتفاق بیفتد. گینزبرگ [۶]، سایش محلی غلتک نزدیک لبه های ورق را ناشی از توزیع نیروی غلتک می داند. کاهش سریعی در مقدار تخت شدن غلتک های کاری، در نزدیکی لبه های ورق رخ می دهد. این مسئله، منطقه تنش کششی را روی غلتک ایجاد می کند که با تنش های برشی ترکیب شده و باعث سایش بیشتر در لبه ها می شود (شکل ۱).



شکل (۱) سایش محلی در کناره ها

سایش محلی در وسط غلتک یا هر جای دیگر غیر از لبه نیز ممکن است به دلایلی همچون خنک کاری غیریکنواخت و پوسته شویی غیریکنواخت نوارهای طولی ورق رخ دهد. به این ترتیب که نوارهای طولی ورق که دانه های ریزتر دارند معمولاً سخت ترند و این دانه ها یک مقاومت بزرگ تری نسبت به تغییر شکل، در مقایسه با دانه های بزرگ تر نشان

می دهند (شکل ۲). در [۱۳] ادعا می شود که خنک کاری اضافی در نوارهای ورق در حین نورد گرم به سایش غیریکنواخت غلتک منجر می شود که در نهایت باعث ایجاد گرده هایی روی پروفیل ورق می شود.



شکل (۲) سایش محلی در میانه های غلتک

سایش یکنواخت، کاهش تدریجی مادهی غلتک مربوط به عکس العمل ها و تماس های بین غلتک و ورق و همچنین غلتک کاری با غلتک پشتیبان می باشد. این نوع سایش به توناژ مادهی نورد شده در عرض های مختلف مربوط است. برای کاهش اثر سایش یکنواخت روی پروفیل ورق، معمول ترین روش، استفاده از عرض های مختلف ورق در یک برنامه نورد مطابق با طرح تابوتی شکل می باشد.

پارامترهای مؤثر سایش در نورد گرم می توانند به صورت زیر دسته بندی شود:

- جنس ورق
- جنس غلتک
- پارامترهای فرآیند شامل برنامهی نورد و برنامهی هر عبور
- پارامترهای مهندسی سطح شامل اصطکاک، روان کاری و تخت شدن
- پارامترهای فیزیکی و هندسی

۴- تئوری، روش تحلیل و کار تجربی

روابط بسیاری برای مدل پروفیل سایش غلتک ها ارائه شده است. کاربرد این روابط بستگی به شرایط متفاوت نورد و روش مدل سازی دارد. مطابق با [۶]، سایش غلتک در قطر،

دقت می‌شود. به همین دلیل با هماهنگی‌های صورت گرفته ابتدا یک جفت غلتک، سنگ زنی و آماده شد و سپس پروفیل آن توسط پروفیل سنج ثبت شد. این پروفیل به عنوان پروفیل اولیه‌ی غلتک شناخته می‌شود. سپس غلتک وارد برنامه شد و تمام پارامترهای موجود در یک برنامه‌ی نورد که به عنوان «process log» شناخته می‌شود با درخواست رسمی از شرکت مزبور ثبت شد. این پارامترها شامل برنامه نورد^۱ و برنامه‌ی عبور^۲ است. این برنامه‌ها پارامترهایی مثل عرض ورق، توناژ نورد شده، کیلومتر نورد شده، سرعت غلتک‌ها در هر عبور، سرعت ورق، شتاب‌ها، شعاع غلتک، ضخامت‌های ورودی و خروجی، کاهش ضخامت اسمی، دمای ورودی و خروجی هر قفسه و ... را در خود دارند.

پس از اتمام نورد، غلتک‌های مزبور خارج شده و پس از عملیات خنک کاری به منظور برداشتن اثرات تاج حرارتی، پروفیل سطح آنها اندازه‌گیری گردید.

کد مربوط به حل مسئله‌ی نورد به زبان پیتون^۳ نوشته شد و از پارامترهای ثبت شده برنامه‌ی نورد و برنامه‌ی عبور به عنوان ورودی‌های کد مربوطه استفاده شد. همچنین، در کد پیتون دستوری مورد استفاده قرار گرفت که بتواند کل برنامه‌ی نورد را بدون وقفه اجرا کند و نتایج را در یک فایل ثبت کند. لازم به ذکر است که بعضی پارامترها به طور مستقیم وارد کد می‌شود و برخی با انجام عملیات مورد نیاز که این امر نیز در کد نوشته شده منظور گردیده تا کاربر بتواند از آن استفاده‌ی مناسب کند. پارامترهای ورودی کد مربوطه برای عبور ۱ به عنوان نمونه در جدول ۱ ذکر گردیده است. پارامترهای شعاع غلتک، طول اولیه‌ی تختال، عرض ورق، ضخامت‌های اولیه و ثانویه، دمای ورودی و خروجی، سرعت ورق، نوع ماده و طول اولیه به طور مستقیم از پارامترهای ثبت شده در برنامه‌ی نورد و برنامه‌ی عبور خوانده می‌شود؛ پارامترهای مورد نیاز دیگر شامل دو دسته اند: پارامترهایی که از روی پارامترهای فوق به دست می‌آیند مثل دمای میانگین، سرعت غلتک؛ و پارامترهایی که توسط فرمول‌ها و

با استفاده از رابطه‌ی زیر که در [۴] پیشنهاد شده می‌تواند محاسبه شود:

$$C_m = \alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{w_i l_i} \right)^a (r_i l_i)^b \frac{L_i}{\sqrt{2\pi R}} \delta_i(z) \quad (2)$$

$$C_m = \alpha$$

$$\delta_i(z) = 1 \quad \text{اگر } 0 < z \leq w_i / 2$$

$$\delta_i(z) = 0 \quad \text{اگر } z > w_i / 2$$

که z فاصله از وسط غلتک می‌باشد. در رابطه‌ی فوق برای هر عبور تنها یک مقدار سایش اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به تمایل به استفاده از توزیع فشار در مدل‌سازی در کار حاضر از رابطه‌ی زیر برای پیش‌بینی پروفیل سایش غلتک کاری استفاده می‌شود: [۴]

$$C(x) = k_w L_{plate} Q_1(x) \sqrt{1 + \frac{16 Q_1(x)^{(1-\nu)} \pi E}{h_o - h_1}} \quad (3)$$

که x فاصله از ابتدای غلتک می‌باشد. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار تجاری ABAQUS برای به‌دست آوردن $Q(x)$ در طول غلتک انجام می‌گیرد.

در این روش، اساس بر این است که همه‌ی پارامترهای مؤثر در پروفیل سایش غلتک در نظر گرفته می‌شوند. ضریب K_w یا همان ضریب تجربی سایش موجود در معادله، به عواملی مانند جنس غلتک، شرایط خنک کاری، ریزساختارهای موجود در ورق و غلتک، مکانیزم‌های سایش، دمای نورد و به طور کلی شرایط واقعی نورد بستگی دارد. از این رو در این کار یک تست تجربی در مقیاس نورد واقعی در خط نورد گرم شرکت فولاد مبارکه انجام شد.

روش کار به این شرح است که توقف خط تولید در وسط برنامه‌ی نورد صورت پذیرفت و غلتک قفسه‌های ۱ و ۲ تعویض گردید. علت تعویض غلتک در وسط برنامه این بود که سایش غلتک‌ها با پیشرفت برنامه افزایش می‌یابد و روی توزیع فشار مرحله‌ی بعد اثر می‌گذارد. همچنین، غلتک‌ها دارای تاج اولیه نیز می‌باشند (منظور از تاج، انحنا‌ی سطح غلتک از حالت تخت می‌باشد که به دو صورت محدب و مقعر ممکن می‌باشد) که مجموع این عوامل باعث کم‌شدن

1- Rolling programm
2- Pass schedule
3- Python

اعمال شد و غلتک‌ها بر خلاف برنامه‌ی زمان بندی شده زودتر تعویض شدند).

۳- تاج غلتک صفر است.

۴- نورد متقارن است.

۵- نورد کرنش صفحه‌ای است.

۶- دمای نورد میانگین دمای ورودی و خروجی قفسه است.

۷- فاصله غلتکی ثابت است.

۸- سرعت نورد ثابت بوده و در نتیجه نرخ کرنش ثابت است.

۹- فشار در طول غلتک، همان فشار روی گره‌های عرض ورق می‌باشد.

۱۰- سایش کل از جمع سایش‌های هر مرحله به دست می‌آید. در مورد فرض دوم که تاج غلتک صفر فرض شده است ذکر این نکته ضروری است که در کار جانسون^۱ [۱۴ و ۱۵] تحلیل کاملی در مورد اثر تاج غلتک بر نیروی نورد در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده و اثبات شده است که اثرات آن بر نیرو بسیار ناچیز است.

پارامترهای ورودی مسئله

- ۱- شعاع غلتک
 - ۲- ضخامت ورودی ورق
 - ۳- ضخامت خروجی ورق
 - ۴- عرض ورق
 - ۵- چگالی، مدول یانگ و ضریب پواسون ورق
 - ۶- سرعت دورانی غلتک
 - ۷- سرعت ورق
 - ۸- ضریب اصطکاک
 - ۹- زمان نورد
 - ۱۰- تعداد المان‌ها در عرض، طول و ضخامت ورق
 - ۱۱- رفتار پلاستیک ورق
- همه ابعاد به صورت متریک داده شده اند.

- برای توصیف رفتار پلاستیک ورق، دانستن دما و نرخ کرنش ضروری است. همان‌طور که بیان شد، دمای نورد دمای میانگین ورودی و خروجی محسوب می‌شود. به

نمودارهای مربوطه به دست می‌آیند مثل نرخ کرنش، ضریب اصطکاک و رفتار پلاستیک ماده که فرمول‌ها و نمودارهای مربوطه در ادامه خواهند آمد. بدیهی است خروجی کد مربوطه توزیع فشار روی سطح غلتک می‌باشد.

جدول (۱) پارامترهای ورودی برای عبور شماره ۱

پارامتر	مقدار
شماره‌ی عبور	۱
شماره‌ی تختال	۵۸۸
ضخامت اولیه، m	۰/۰۳۳۵۳
ضخامت ثانویه، m	۰/۰۲۰۸۱
کاهش ضخامت، %	۳۷/۹۳
دمای ورودی، °C	۹۷۱/۷۴
دمای خروجی، °C	۹۶۲/۶۷
دمای میانگین، °C	۹۶۷/۲۱
سرعت ورق، m/s	۱/۲۵۵
سرعت غلتک، rad/s	۳/۴۵
عرض ورق، m	۱/۱۲۵
زمان نورد، sec	۰/۲۸۸۷۵
اسم تجاری ماده	SAPH-440JIS3113
ضریب پواسون	۰/۳
چگالی ورق، kg/m ³	۷۸۰۰
مدول یانگ ورق، Pa	۲۰۰×۱۰ ^۹
نرخ کرنش، s ^{-۱}	۷/۷۲۹
ضریب اصطکاک	۰/۳۱۲
	(۰,۰)
	(ε ₁ ,σ ₁)
	(۰/۱۲۰۴۸۴۰۰۰,۱)
	(ε ₂ ,σ ₂)
	(۰/۱۶۰۶۱۶۰۰۰,۳)
	(ε ₃ ,σ ₃)
	(۰/۱۷۱۳۶۹۰۰۰,۵)
	(ε ₄ ,σ ₄)
	(۰/۱۷۴۱۹۵۰۰۰,۷)
	(ε ₅ ,σ ₅)
طول نورد شده، m	۹۶/۵۵

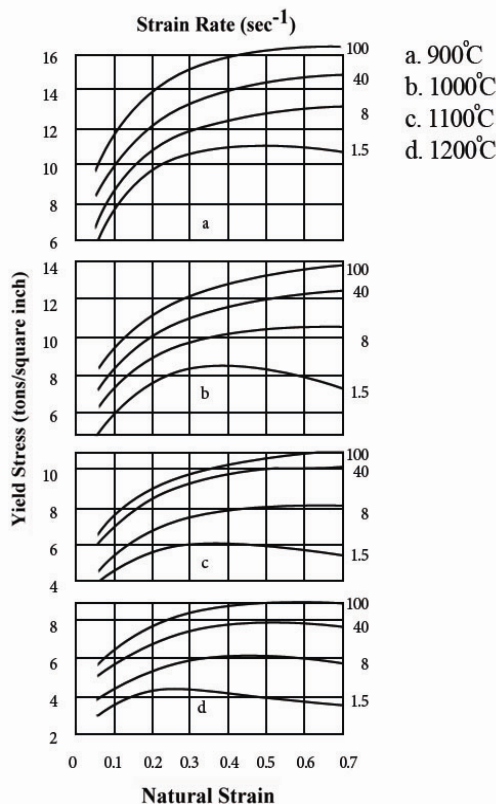
فرضهای مسئله

- ۱- از اثرات خمش و تختی غلتک بر توزیع فشار صرف نظر شده است.
- ۲- از اثرات سایش مرحله‌ی قبل روی توزیع فشار صرف‌نظر می‌شود (برای به حداقل رساندن این اثر، به جای یک برنامه‌ی نورد کامل، حدود یک سوم برنامه‌ی نورد

نقشی است که نرخ کرنش در مقاومت مکانیکی ماده دارد. در برخی موارد دیده شده است که تنش سیلان فلز به دلیل افزایش نرخ کرنش تا ۵ برابر، افزایش یافته است [۱۷]. این موضوع، هشدار می‌دهد که در نورد گرم فلزها کارآیی نرخ کرنش باید بسیار جدی دانسته شود.

پس از مشخص شدن دما و نرخ کرنش از نمودارهای شکل (۳) [۱۸] و با استفاده از میان‌یابی برای به‌دست آوردن رفتار پلاستیک ماده استفاده می‌شود. در کد مربوطه برای دما و نرخ کرنش معلوم، در پنج کرنش ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ تنش‌های تسلیم داده شدند. البته کد مزبور این قابلیت را دارد که در کرنش‌های دیگری نیز رفتار ماده بیان شود. در حقیقت، ورودی‌های مورد نیاز، پنج کرنش و تنش‌های مربوط به آنها در یک دما و نرخ مشخص هستند.

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب، کاهش ضخامت‌ها و عرض‌های ورق‌های عبوری را برای ۵۱ عبور قفسه‌های یک و دو نشان می‌دهند.



شکل (۳) تنش تسلیم در دماهای مختلف بر حسب کرنش طبیعی برای فولادهای کم کربن [۱۷]

منظور به‌دست آوردن نرخ کرنش و با توجه به معلومات، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌گردد [۱۶]:

$$\epsilon' = \frac{\pi V}{30} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(1 + \frac{r}{4}\right) \sqrt{r} \quad (4)$$

• برای به‌دست آوردن ضریب اصطکاک از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [۱۶] که رابطه توصیه شده برای غلتک‌های فولادی مورد استفاده در قفسه‌های ۱ تا ۴ می‌باشد:

$$\mu = 0.055(1.05 - 0.0005T) \quad (5)$$

• زمان نورد به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که حداقل ۳۰ سانتیمتر از طول ورق نورد شود تا نورد، پایدار شده و از اثرات ضربه‌ای و تغییر شکل‌های نامناسب اولیه در نقطه‌ی گازگرفتگی صرف‌نظر گردد (مقدار لازم پس از تحلیل در نرم افزار حاصل شد؛ گرچه با مقدار کمتری نیز مسئله به حالت پایدار می‌رسد).

• تعداد المان‌ها به‌گونه‌ای منظور می‌گردد که با توجه به aspect ratio حداقل سه المان در جهت ضخامت ایجاد گردد؛ یعنی چون نسبت طول و عرض ورق نسبت به ضخامت آن زیاد است اگر تعداد المان‌ها به‌طور مناسب انتخاب نشوند ممکن است تعداد المان‌های ضخامت را برای تأمین ضریب منظری مناسب دو یا حتی یکی در نظر گیرد که با سعی و خطا، تعداد المان مناسب برای حالت کلی استخراج گردید.

• در این مدل، از المان‌شش‌گه‌ی 3D stress, linear, hex به‌صورت structured استفاده شد. ورق، solid (homogenous) و غلتک صلب فرض شد. حل dynamic, explicit از interaction (surface-to-surface) استفاده شد. شرایط مرزی به‌گونه‌ای است که مدل در جهت‌های عمود بر حرکت ورق متقارن، در وسط غلتک تنها چرخش و در مورد ورق در step 1 سرعت اولیه وجود دارد. همان‌گونه که گفته شد، دما به‌عنوان ورودی برای ورق و رفتار پلاستیک آن منظور می‌شود تا از حل couple جلوگیری شود.

بر خلاف نورد سرد، در نورد گرم افزایش سرعت نورد

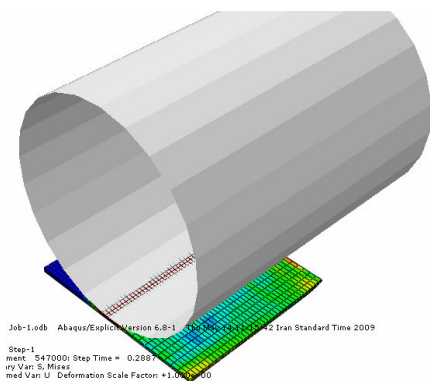
سبب افزایش فشار غلتک می‌شود. این تأثیر، عمدتاً به دلیل

لازم به ذکر است، اندیس‌های ۱ تا ۵۱ برای A بیانگر شماره‌ی عبور می‌باشد. پس از حاصل شدن جمع آنها و تقسیم $C(x)$ بر آن، k_{1W} به صورت منحنی به دست می‌آید. همچنین، ضریب سایش به صورت یک عدد حاصل از میانگین ضرایب به دست آمده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

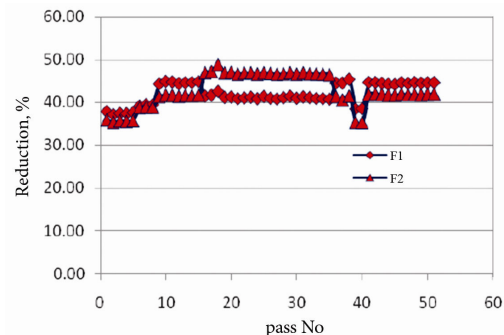
در شکل (۶)، غلتک و ورق مدل شده‌اند و با استفاده از کد مربوطه، تماس آنها به صورت خودکار انجام می‌شود. همان‌طور که گفته شد، غلتک، صلب فرض شده و رفتار الاستیک به صورت تعریف مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و رفتار پلاستیک ورق به صورت وارد کردن پنج نقطه از کارسختی ماده در دمای نورد و نرخ کرنش مربوطه وارد کد می‌شود.

در شکل (۶)، برای ساده‌سازی و سرعت حل، ۵۰ سانتیمتر از طول ورق مدل شده است و زمان پیشروی به گونه‌ای است که حداقل ۳۰ سانتیمتر از طول ورق، نورد شود. این مقدار پیشروی پس از بررسی چند نمونه و اطمینان از نورد پایا انتخاب گردید.

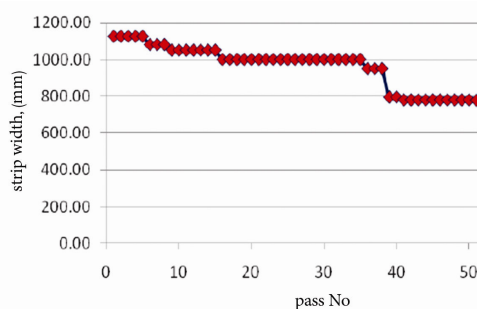
برای به دست آوردن توزیع فشار در طول غلتک (که برابر با توزیع فشار در عرض ورق فرض می‌شود) تعریف یک مسیر روی گره‌های عرضی ورق ضروری است. این مسئله در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۶) شبیه‌سازی غلتک و ورق



شکل (۴) کاهش ضخامت‌های ورق‌های عبوری برای قفسه‌های ۱ و ۲



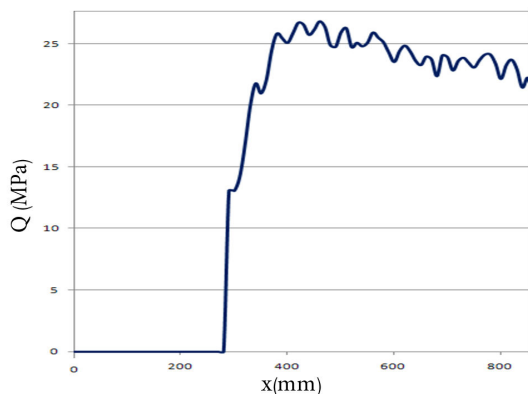
شکل (۵) عرض‌های ورق‌های عبوری

۵- نتایج

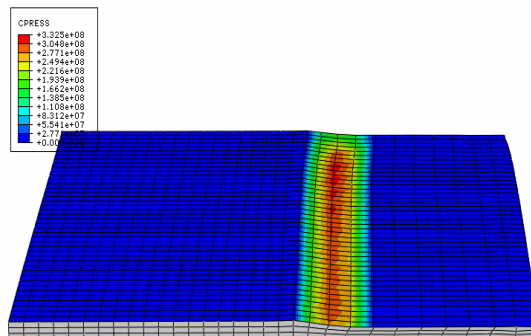
در این روش، هدف به دست آوردن ضریب k_{1W} می‌باشد. به این منظور پس از به دست آوردن فشار در گره‌های عرضی ورق، یکسان‌سازی محور در طول غلتک صورت گرفت و عدد A که در زیر تعریف می‌شود در هر ۱۰ میلیمتر طول غلتک به دست آمد و نتایج حاصل از جمع این اعداد همان پروفیل سایش کلی را می‌دهد که بایستی در ضریب مزبور ضرب گردد. ضریب k_{1W} از آن‌جا که به عنوان ضریب تجربی شناخته می‌شود از تقسیم پروفیل سایش واقعی به دست آمده در تست فوق بر پروفیل حاصل از جمع اعداد A به دست می‌آید. البته به دلیل اختلاف k_{1W} در نقاط مختلف، میانگین آن در نظر گرفته می‌شود.

$$A = L \pi a \tau \epsilon Q_1(x) \sqrt{1 + \frac{16 Q_1(x) \left(\frac{1-\nu^2}{\pi \epsilon} \right)}{h_0 - h_1}} \quad (6)$$

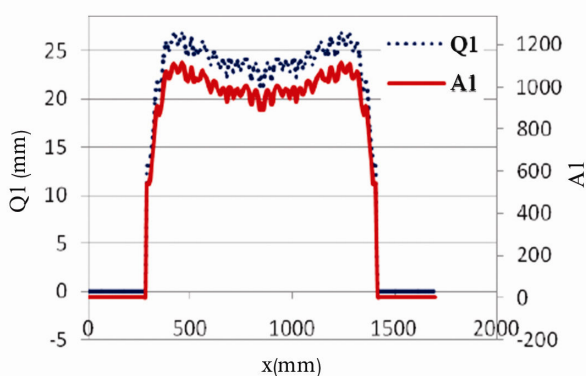
$$C(x) = k_{1W} (A_1 + A_2 + \dots + A_{51})$$



شکل (۸) توزیع فشار به دست آمده از المان محدود در نصف عرض ورق برای عبور ۱



شکل (۷) تعریف مسیر و کانستور فشار در عرض ورق



شکل (۹) توزیع فشار و A_1 نسبت به طول غلتک برای عبور ۱

توزیع فشار برای عرض‌های کوچک‌تر، دارای یکنواختی بیشتری در عرض می‌باشد که فرض یکنواختی سایش برای همه عرض‌ها را زیر سؤال برده و پیش‌بینی سایش غیریکنواخت را با استفاده از روش‌هایی مثل روش حاضر و یا تخمین توزیع نیروی نورد با یک چندجمله‌ای مناسب را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.

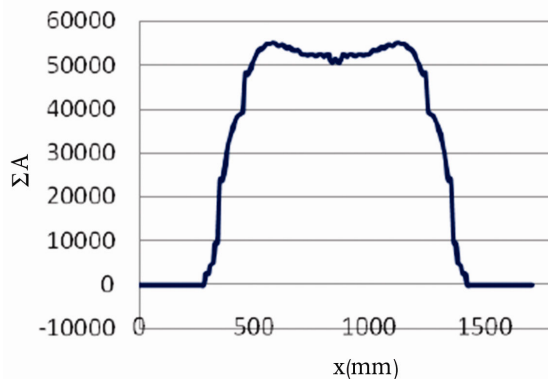
پس از حل مسئله‌ی نورد برای عبورهای ۱ تا ۵۱، اکنون نوبت به تأیید نتایج تئوری و تجربی می‌باشد. این کار به دلیل استفاده از روش المان محدود برای توزیع نیروی نورد در طول غلتک، با استفاده از مقایسه‌ی نیروهای تئوری و تجربی ثبت شده انجام می‌گیرد. نیروی تجربی از روی پارامترهای ثبت شده لحظه به لحظه در فرآیند نورد و به طور مستقیم خوانده می‌شود.

شکل (۱۰) این مقایسه را نشان می‌دهد که به صورت پیوسته و نقطه‌ای نشان داده می‌شود. گرچه حل المان

شکل (۸) نمونه‌ای از نمودار توزیع فشار نسبت به نصف عرض ورق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در زمان عملیات نورد، توزیع فشار روی ورق تغییر می‌کند که می‌توان این امر را به سه توزیع فشار ورودی، میانی و خروجی تقسیم کرد. هر سه این نمودارها از حل مذکور، اخذ شده و میانگین آنها به عنوان توزیع فشار آن عبور ثبت می‌شود. اگر چه سایش متناسب با فشار است، اما در عین حال به لغزش نسبی ورق و غلتک بستگی دارد. اگر چه می‌توان فشار ماکزیمم را برای سایش ملاک عمل قرار داد، اما باید توجه نمود که اتفاقاً در فشار ماکزیمم (نقطه‌ی خنثی) هیچ‌گونه لغزشی وجود ندارد. از این رو در اولین ساده‌سازی، فشار میانگین به عنوان فشار مورد نظر در سایش ملاک عمل قرار گرفت که به واقعیت نزدیک‌تر است.

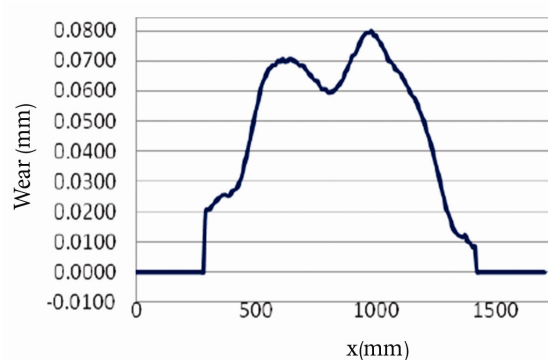
پس از ثبت توزیع فشارهای هر عبور و به دلیل عدم یکسان بودن فواصل گره‌ها برای عبورهای مختلف، عمل یکسان سازی محور x (عرض ورق) انجام شد. در محور طولی مطلق، طول غلتک، ۲ متر در نظر گرفته می‌شود و صفر غلتک، ابتدای سمت چپ می‌باشد. در نهایت، با به دست آوردن توزیع فشار در هر ۱ سانتیمتر عرض ورق (به دلیل انجام میان‌یابی کاملاً دقیق)، توزیع فشارها برای هر عبور ثبت و با استفاده از رابطه‌ی (۶)، نمودار A برای هر عبور به دست آمد. شکل (۹)، توزیع فشار و A_1 در طول غلتک برای عبور یکم را نشان می‌دهد. همان‌طور که از روابط نیز مشخص است، شکل کیفی نمودار A و Q مشابه هستند و این، در نهایت به یکسان بودن شکل نمودار توزیع فشار و سایش می‌انجامد.

شکل (۱۱)، نمودار ΣA نسبت به طول غلتک می‌باشد که با استفاده از جمع A_1 تا A_{51} در طول ورق به دست آمده است. لازم به ذکر است به دلیل فرض متقارن بودن کامل نورد و مدل‌سازی نصف عرض ورق در مدل پیشنهادی، توزیع فشار و در نهایت A_1 تا A_{51} و ΣA در نصف دیگر ورق، مشابه با یکدیگر محسوب می‌شود.



شکل (۱۱) نمودار جمع A_1 تا A_{51} در طول غلتک

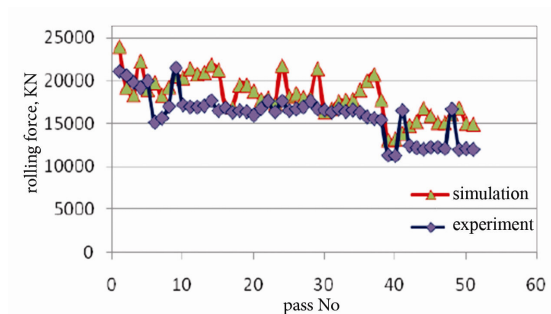
اختلاف دو نمودار اولیه و نهایی سطح غلتک کاری (که به وسیله‌ی گیج متصل به دستگاه سنگ‌زنی کارگاه غلتک نورد گرم اندازه‌گیری می‌شوند) به عنوان پروفیل سایش می‌باشد که در شکل (۱۲)، قابل مشاهده است. این نمودار، پس از یکسان‌سازی محورها، کم کردن خطای هم‌محور نبودن و در نهایت، به دست آوردن اختلاف دو نمودار مذکور به دست آمده است.



شکل (۱۲) منحنی سایش تجربی قفسه ۱

اگر چه در نمودار فوق، سایش غیر یکنواختی در حدود $10\mu\text{m}$ مشاهده می‌شود و همچنین در اطراف، سایش‌های

محدود، در بعضی عبورها تفاوت‌هایی با نتایج تجربی ثبت شده نشان می‌دهد ولی به‌طور کلی و با کمی اغماض می‌توان نتایج حل انجام شده را مورد اطمینان قرار داد و نمودارهای زیر را به عنوان تأییدی برای روش پیشنهاد شده تلقی کرد. علاوه بر مباحث فوق، از نمودارهای زیر، استنباط می‌شود که به‌طور کلی و طبق انتظار، با کاهش عرض‌های عبوری، نیروی مورد نیاز نورد نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در شرکت فولاد مبارکه از روش تابوتی برای توزیع عرض‌های عبوری یک برنامه‌ی نورد استفاده می‌شود، ولی در مورد آزمایش شده به دلیل تعویض غلتک‌ها در بین برنامه و وجود عرض‌های نهایی (قسمت پایین تابوت)، پدیده‌ی کاهش تدریجی عرض‌های عبوری وجود دارد.

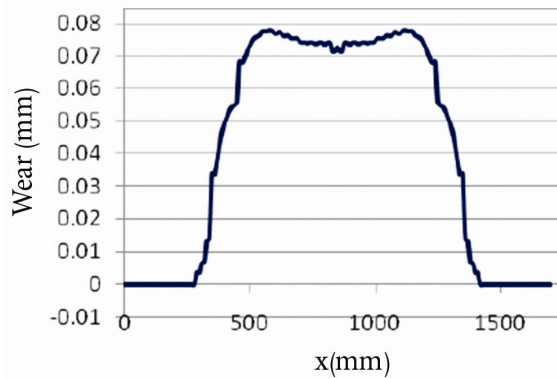


شکل (۱۰) مقایسه نمودارهای نیروی نورد تجربی و تئوری برای عبورهای مختلف

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌کنید، نیروی نورد حاصل شده از حل المان محدود، نوعاً بزرگ‌تر از نیروی تجربی است. نیروی نورد برای هر عبور بسته به اصلاحات اعمالی در خط، به وسیله‌ی جک‌های هیدرولیکی، قابل تغییر است که در روش موجود در نظر گرفته نمی‌شود. این اصلاحات، مربوط به کاهش ضخامت‌ها، تنظیم تاج ورق و برطرف کردن تأثیرات تختی غلتک و جبران آن می‌باشد که در حین یک عبور اعمال می‌شود. نیروی مقایسه‌شده در این جا میانگینی از نیروهای نورد برای هر عبور می‌باشد که به عنوان یک عدد با روش پیشنهادی مقایسه می‌شود.

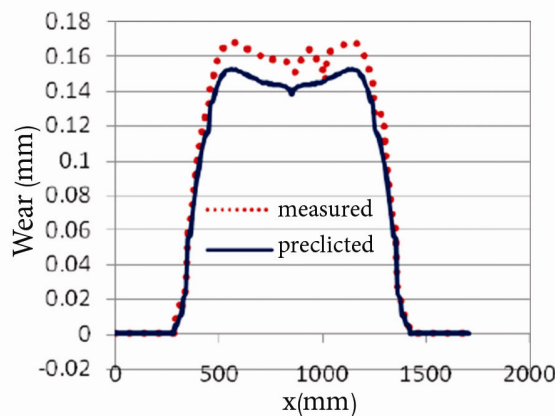
پس از تأیید مدل پیشنهادی با نتایج تجربی، اکنون نوبت به به دست آوردن ضریب تجربی سایش، k_w است که با مقایسه و کالیبره کردن نمودار حاصل از سایش غلتک مورد آزمایش با نمودار ΣA نسبت به طول غلتک، به دست می‌آید.

شکل (۱۴) نیز مشخص است، کیفیت پروفیل سایش به خوبی حفظ شده و استفاده از ضریب تجربی میانگین می‌تواند به عنوان تقریب مناسبی به کار رود.



شکل (۱۴) نمودار سایش قفسه ۱ با استفاده از ضریب تجربی

شکل (۱۵) سایش اندازه‌گیری شده‌ی تجربی غلتک قفسه ۲ را با سایش تئوری (با اعمال k_w به دست آمده) مقایسه می‌کند که موافقت قابل قبولی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵) مقایسه سایش تجربی و تئوری قفسه ۲

بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در سایش

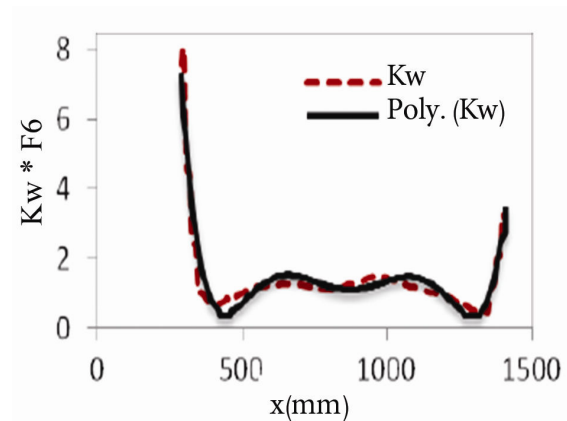
در این بخش، سعی بر آن است که تأثیر عوامل مختلف بر سایش مورد بررسی قرار گیرد. سایش غلتک‌های نورد، تحت تأثیر عوامل زیادی می‌باشد که با توجه به تغییرات آن عوامل در هنگام پروسه نورد و نداشتن کنترل دقیق روی آنها، تحقیق دشوار و گاهی پیچیده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد، تغییرات سایش با نیروی نورد رابطه‌ای مستقیم دارد. با افزایش دمای قطع کار، سایش غلتک کم می‌شود که این

غیرهمگونی وجود دارد، اما با توجه به این که این نمونه‌ی تجربی، با شرایط واقعی و نه آزمایشگاهی به‌دست آمده، می‌تواند به عنوان الگویی برای به‌دست آوردن ضریب تجربی سایش به کار رود. در حقیقت، طبق رابطه‌ی (۶)، ضریب تجربی سایش، k_w از تقسیم نمودار شکل (۱۲) بر نمودار شکل (۱۱) به‌دست می‌آید.

با انجام کار فوق، منحنی تغییرات k_w نسبت به طول غلتک مطابق شکل (۱۳) به‌دست می‌آید.

طبق نمودار زیر، تغییرات k_w در طول غلتک تقریباً ناچیز به نظر می‌رسد و آن‌چه در اطراف مشاهده می‌شود مربوط به پرش مقدار آن در اطراف است که با توجه به همگونی‌های مشاهده شده در نمودار تجربی به‌دست آمده چندان دور از ذهن نمی‌باشد. در یک تقریب ساده می‌توان با گذراندن یک چندجمله‌ای مرتبه ۵، یک نمودار بر حسب فاصله از سر غلتک را برای k_w بیان کرد. معادله این چندجمله‌ای به‌صورت زیر است:

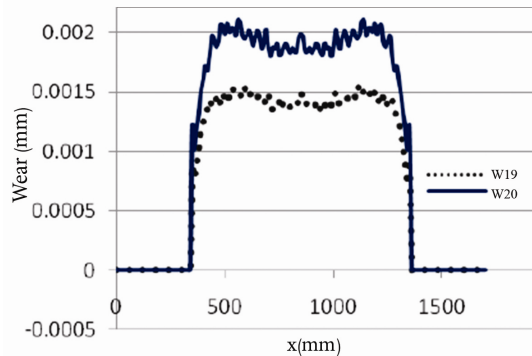
$$k_w(x) = -5E^{-12}x^5 + 1E^{-8}x^4 - 1E^{-5}x^6 + 0.06x^2 - 1/966x + 233/7 \quad (7)$$



شکل (۱۳) چندجمله‌ای تخمین زده برای k_w

همان‌طور که گفته شد، با توجه به تغییرات ناچیز k_w در طول غلتک، می‌توان با یک تقریب ساده، آن را به عنوان یک عدد حاصل از میانگین آن در طول غلتک در نظر گرفت. این مقدار برابر 1×10^{-6} می‌باشد. نمودار سایش به‌دست آمده با در نظر گرفتن این عدد میانگین برای غلتک مذکور به‌صورت زیر حاصل خواهد شد. همان‌طور که در

بزرگ‌تر، سایش بیشتری را باعث می‌شود. لازم به ذکر است در محاسبه سایش عبورهای مختلف، از ضریب تجربی سایش به‌دست آمده استفاده شده است.



شکل ۱۷- مقایسه سایش دو مرحله با طول نورد شده متفاوت

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

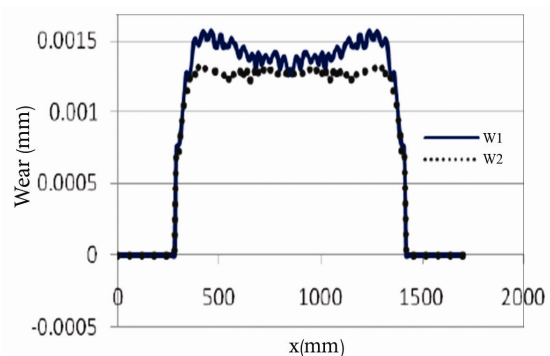
سایش، یک پدیده مهم در استهلاک ماده است که به عوامل گوناگون بستگی دارد. از آن‌جا که در این پدیده پارامترهای مؤثر زیادی وجود دارد، استفاده از یک مدل پیش‌بینی نیازمند شناخت کامل از این پارامترها و میزان تأثیر آنها می‌باشد. از نقاط قوت روش موجود می‌توان به در نظر گرفتن سایش محلی و کلی به دلیل وارد کردن $Q(x)$ در معادله اشاره کرد. همان‌طور که اشاره شد، روابط سایش به کار رفته به دلیل عدم وجود تابعیت x پاسخگوی سایش‌های محلی و کانتور مناسبی از سایش در طول غلتک نمی‌باشند و پروفیل سایش مزبور، شکلی مانند نمودار انباشتگی تناژ-عرض خواهد داشت. هر چند، عدم توانایی در برآورد کانتور سایش غلتک‌های پشتیبان و نیاز به زمان زیاد برای شبیه‌سازی از نقاط ضعف این روش می‌باشد.

می‌توان اذعان نمود سایش به دلیل استهلاک ماده یک پدیده پیچیده و غیر قابل پیش‌بینی است که حتی شرایط تولید ماده و ریزساختارهای موجود در آن نیز نقش انکارناپذیری در میزان، مکانیزم و پروفیل آن ایفا می‌کنند.

به‌طور کلی استفاده از روش‌های پیش‌بینی پروفیل سایش غلتک بدون در نظر گرفتن شرایط تجربی و ضرایب حاصل از فرآیند خط نورد مورد بررسی، غیر قابل توجیه است. در

امر با توجه به نمودار کارسختی فولاد کم‌کربن، شکل (۳)، که بیانگر کاهش تنش تسلیم با افزایش دماست، قابل توجیه است. با افزایش سرعت نورد، سایش افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت نورد و در نتیجه، افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم و در نتیجه، نیروی نورد بیشتر شده و سبب افزایش میزان سایش خواهد شد. در مورد قطر غلتک نیز بایستی اشاره نمود طبق رابطه‌ی (۱) با کاهش قطر، سایش افزایش می‌یابد. همچنین، عرض ورق، نسبت عکس و طول نورد شده، نسبت مستقیم با میزان سایش خواهند داشت. در مورد جنس غلتک‌ها با توجه به شماره قفسه، مکانیزم سایش متفاوت است که بدین منظور از غلتک‌های HiCr در قفسه‌های ۱ تا ۴ و از غلتک‌های IC در سه قفسه‌ی انتهایی نورد گرم استفاده می‌شود.

در شکل (۱۶) مقایسه‌ای میان سایش عبور اول و دوم برنامه تست شده صورت گرفته است. این مقایسه به دلیل مشابهت این دو عبور در همه پارامترها غیر از نیروی نورد انجام شده که مشاهده می‌شود نیروی ورق اول بیش از ورق دوم است (مقایسه نیرویی بین نیروهای تجربی ثبت شده صورت می‌گیرد). همان‌طور که در شکل مشخص است با ثابت بودن همه پارامترها نیروی نورد بزرگ‌تر، سایش بیشتری را سبب شده است.



شکل ۱۶- مقایسه سایش دو عبور با نیروی متفاوت

در شکل (۱۷) سایش عبورهای نوزده و بیستم به دلیل مشابهت تقریبی در همه پارامترها به جز طول نورد شده، مقایسه می‌شوند. ورق بیستم به دلیل طول نورد شده‌ی

L_{plate}, L	طول ورق نورد شده، mm	این مقاله سعی شد اساس کار بر نتایج و گراف‌های تجربی به‌دست آمده باشد که این امر به دلیل شرایط پیش‌بینی نشده‌ی موجود، دارای ناهمگونی‌هایی نیز هست. در کل، روش‌های پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی در مقیاس واقعی، از تطابق خوب و قابل قبولی برخوردار بود.
n	تعداد کل ورق‌های نورد شده	با توجه به مدل ارائه شده و شرایط تجربی موجود در خط نورد گرم، موارد زیر برای ادامه‌ی کار پیشنهاد می‌گردد:
N	سرعت زاویه‌ای غلتک، rpm	۱- در نظر گرفتن تأثیر تخریب غلتک بر سایش به‌وسیله‌ی روابط موجود و به‌دست آوردن ضرایب با استفاده از کالیبره کردن با نتایج تجربی
P	نیروی نورد، kN	۲- در نظر گرفتن سایش غلتک‌های پشتیبان به‌وسیله‌ی روابط موجود و به‌دست آوردن ضرایب با استفاده از کالیبره کردن با نتایج تجربی
$Q_1(x)$	توزیع نیروی نورد، MPa	۳- مدل‌سازی غلتک غیر صلب و به‌دست آوردن توزیع فشار ناشی از آن در مدل پیشنهادی
r	کاهش ضخامت، %	۴- مدل کردن تاج اولیه‌ی ورق و غلتک برای به‌دست آوردن توزیع فشار در طول غلتک در مدل پیشنهادی
R	شعاع غلتک، mm	۵- به‌دست آوردن ضریب تجربی سایش برای غلتک‌های با جنس متفاوت در مدل پیشنهادی
t	زمان نورد، sec	۶- سرعت بخشیدن (آنلاین کردن) حل المان محدود به وسیله آموزش نتایج آن با شبکه عصبی
T	دمای نورد، $^{\circ}C$	
V	سرعت ورق، ms^{-1}	
w	عرض ورق، mm	
	علائم یونانی	
α	ضریب تجربی	
v	ضریب پواسون	
θ	زاویه تماس، rad	
μ	ضریب اصطکاک	
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش، s^{-1}	

مراجع

- [1] Burwell J.T., Survey of possible wear mechanisms, Wear, Vol. 1, 1957, pp. 119-141.
- [2] Sachs G., Latorre J.V., Roll Wear in Finishing Trains of Hot Strip Mills, J. Iron & Steel Eng., No. 12, 1961, pp. 71.
- [3] Tong K.N., Chakko M.K., Predictions of Roll Spalling in 4-High Mills Based on Fatigue Strength of Roll Materials and Wear Pattern of Rolls, AISE Yearly Proceedings, 1964, pp. 539-569.
- [4] Oike Y., Tetsu-to-Hagane J., Iron & Steel Inst, Vol. 63 No. 4, 1977, p.S222 (in Japanese).
- [5] Nakanishi T., Application of Work Roll Shift Mill HCV Mill to Hot Strip and Plate Rolling, Hitachi Review, Vol. 34 No. 4, 1985, pp.153-160.
- [6] Ginzburg V.D., Profile and Flatness of Flat Rolled Products, New York, 1989, pp. 24-171.

فهرست علائم

a, b	ضرایب تجربی
$C(x)$	سایش در طول غلتک، mm
C_m	مقدار سایش قطری mm
d	سایش قطری، mm
E	مدول الاستیسیته غلتک، MPa
h_0	ضخامت ورودی، mm
h_l	ضخامت خروجی، mm
i	شماره عبور
k_w	ضریب تجربی سایش
l	طول تماس غلتک با ورق، mm

- [7] Williams R.V., Boxall G.M., Roll Surface Deterioration in Hot Rolling Mill, J. Iron Steel Inst., Vol. 203, 1965, pp. 367-377.
- [8] Schey J.A., Tribology in Metalworking. Friction, Lubrication and Wear, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983, pp. 131-341.
- [9] Pellizzari M., Molinari A., Straffelini G., Tribological behaviour of hot rolling rolls, Wear, Vol. 259, 2005, pp. 1281-1289.
- [10] Shaughnessy R.N., J. Iron Steel Inst., Vol. 206, 1968, pp. 981-986.
- [11] Shiraiwa T., Matsuno F., Taghashira H., Tetsu-to-Hagane, J. Iron & Steel Inst, Vol. 57, 1971, pp. 131-145.
- [12] Toda K., Imai, I., Inui R., Proc. Conf. Sci. Tech. Iron Steel, Iron Steel Inst., Japan, Tokyo, 1971, pp. 736-739.
- [13] Melfo W.M.C., Analysis of Hot Rolling Events that Lead to Ridge-Buckle Defect in Steel Strips, PhD thesis, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, Australia, 2006.
- [14] Jonsson M., TM-Rolling of Heavy Plate and Roll Wear, Licentiate thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Material Mechanics, Luleå University of Technology, Sweden, 2006.
- [15] Jonsson M., FEM-Simulation on the Influence of Roll Wear on Roll Force Prediction with CVC-Rolls, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Material Mechanics, Luleå University of Technology, Sweden, May 2004.
- [16] Ginzburg V.B., steel rolling technology, New York, 1985.