

بررسی یک مدل نورد فویل همراه با اعمال اثرات روانسازی

مینا عرب اف

محمود سلیمی

محسن اصفهانیان

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک جامدات

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک،

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشگاه صنعتی اصفهان

*نویسنده مسئول: salimi@cc.iut.ac.ir

چکیده

در فرایند نورد سرد فویل ها، با توجه به ضخامت بسیار کم آنها (کمتر از $50 \mu\text{m}$) از تغییر شکل الاستیک غلتکها در برابر تغییر ضخامت ورق نمی توان صرف نظر کرد. بنابراین با در نظر گرفتن سیستم فویل و غلتک به عنوان یک سیستم فنر با ضریب سختی متغیر در طول ناحیه کاری و استفاده از تنش های تماسی هرگز می توان این تغییر شکل را به دست آورد. از طرف دیگر کاهش ضخامت در فویل ها احتیاج به نیروی نورد بالایی دارد که برای کاهش مقدار این نیرو و همچنین بهبود خواص سطحی می توان از روانسازهای ویژه ای استفاده کرد. در صورت صرف نظر کردن از این تغییرات تخمین دست پایی از میزان نیروی نورد خواهیم داشت که آن نیز بر انتخاب نوع روانکار مؤثر می باشد. بسته به خواص روانساز مورد استفاده و سرعت فویل، مکانیزمهای روانکاری متفاوتی به وجود می آید. مکانیزم روانسازی مخلوط مکانیزم غالب در فرآیند نورد سرد است در این تحقیق فرایند نورد فویل ها همراه با روانکاری مخلوط با استفاده از روش قاچی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: نورد سرد، فویل، روانکاری مخلوط، روش قاچی

مدل ارائه شده در این مقاله مشابه مدل های ارائه شده توسط کیف و جوناتر میباشد و از معادله درجه اول رینولدز برای تعیین ضخامت روانکار استفاده شده است و با استفاده از فرض های زیر به اصلاح مقادیر بدست آمده پرداخته و یک حل همگرا برای سرعت های معمول نورد بدست آمده است.

۲- مدل ریاضی

فرض های زیر در حل معادلات مربوط به تغییر شکل پلاستیک به همراه معادلات روانکاری به کار رفته است:

۱- کار سختی ماده به وسیله یک تابع خطی پله ای بیان و تغییر شکل های پلاستیک همسان فرض می شود

۲- با فرض شرایط کرنش صفحه ای از معیار تسلیم ون میز استفاده شده است.

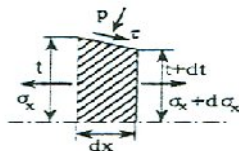
۳- جهت افقی و عمودی منطبق بر جهت تنش های اصلی می باشند.

۴- شرایط اصطکاکی منطبق بر اصطکاک کلمب در نظر گرفته می شود. لذا تنش اصطکاکی متناسب با فشار تماسی است و بیشینه مقدار تنش اصطکاکی برابر با تنش تسلیم برشی ماده کاری می باشد.

با استفاده از تئوری پلاستیسیته و روش قاچی (Slab Method) بر روی المانی از ورق که در شکل (۱) نشان داده شده است، می توان فشار را به ضخامت ورق و موقعیت المان در طول خط تماس وابسته ساخت.

$$\frac{d\sigma_x}{dx}t + (\sigma_x + p)\frac{dt}{dx} + \mu p = 0 \quad V_R \geq V_f \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx}t + (\sigma_x + p)\frac{dt}{dx} - \mu p = 0 \quad V_R \leq V_f \quad (2)$$



شکل ۱: المان به کار رفته در روش قاچی

فرایندهای شکل دهی فلزات شدیداً وابسته به اصطکاک و روانکاری می باشند در نورد سرد فولیل ها که در این تحقیق بررسی شده است، اصطکاک تأثیر به سزایی دارد، چرا که سطح تماس در مقایسه با حجمی از ورق که تغییر شکل پلاستیک می دهد بزرگ می باشد.

نکته قابل توجه دیگر در تولید فولیل ها، خصوصیات سطحی ورق می باشد لذا تریبولوژی از جهات مختلف حائز اهمیت می باشد و مطالعات تجربی سیستم نورد و مدل سازی های تئوری در بهینه سازی ترکیب پارامترهای نورد و دستیابی به روانسازهای جدید می توانند نقش مؤثری را ایفاء کنند.

در طول سالیان دراز مدل های زیادی ارائه شده اند که فرایند نورد را توصیف می کنند. مدل های افرادی چون اروان و پورشکو [۱] موفقیت زیادی در پیش بینی میزان تنش نورد سرد ورق های ضخیم داشتند. این مدل ها براساس کمان تماس دایره ای و استفاده از فرمول هیچکاک برای پیش بینی شعاع غلتک تغییر یافته، تدوین یافته اند. هنگامی که این مدل ها بر روی نورد ورقهای بسیار نازک (فویل ها) اعمال شد، به دلیل دایره نبودن غلتک در این مورد، حلها واگرا شد و مدل ها جوابگو نبود. فلک و جانسون [۲] فرض کردند هنگامی که غلتک تغییر شکل می دهد، پروفیل غلتک شامل یک ناحیه هموار می باشد و توزیع فشار را با استفاده از تئوری هرتر بیان کردند. استالبرگ و کیف [۳] نیز به بررسی نورد فولیل ها پرداختند و قسمت عمده تلاش خود را بر روی یافتن شکل خط تماس متمرکز کردند.

کیف و جونسون [۴] به بررسی تأثیر روانکاری مخلوط در نورد فولیل ها پرداختند. لو و کیف [۵] تأثیرات حرارت را نیز در مدل خود اعمال کردند. کیف و همکاران [۶] پیشنهاد کردند که ورق در ناحیه کاری منبسط می شود این انبساط می تواند هم در طول فرایند نورد و هم در طول مرحله فورجینگ، زمانی که چرخش غلتکها متوقف می شود، ایجاد شود. لی و ساتلکیف [۷] به استفاده از قانون هوک اصلاح شده برای شرایط کرنش صفحه ای به منظور محاسبه پروفیل فشار پرداختند، آنها دوباره اثبات کردند که پروفیل ورق در ناحیه میانی همچنان هموار باقی می ماند. کومار و دیکزیت [۸] اثرات کارسختی و اصطکاک را در نورد فولیلها به همراه اثرات روانکاری مطالعه کردند.

$$C_3 = a_0 \operatorname{tg} \alpha - t_0 \quad (۳-۹)$$

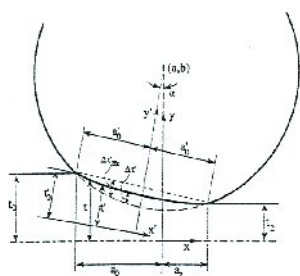
$$C_4 = R^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \quad (۴-۹)$$

$$C_5 = C_4 - C_2 \quad (۵-۹)$$

رابطه بین p_0 و a_0 به صورت زیر بیان می شود.

$$p_0 2R(1-\nu^2) \frac{1}{E_R} = \quad (۱۰)$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left[a_0^2 - (t_0 - t_2) \sqrt{R^2 - a_0^2} + 2a_0 \sqrt{a_0^2 - (t_0 - t_2)(2\sqrt{R^2 - a_0^2} + t_0 - t_2)} \right]}$$

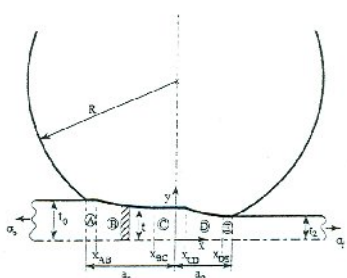


شکل (۳): جایجایی سطحی غلتک و انتقال سیستم مختصات به منظور تطبیق

تئوری هرتز با شرایط نورد [۳]

۳- ضخامت فویل در حین نورد و مرزهای نواحی مختلف

با توجه به وجود نواحی پنج گانه در حین نورد فویل ها (شکل (۴)) و وجود ناحیه تخت مرکزی به بررسی هر ناحیه به طور جداگانه پرداخته می شود.



شکل (۴): نواحی پنجگانه در مدل [۴]

۱- ناحیه E (بازیابی حالت الاستیک)

در این ناحیه ورق خاصیت الاستیک خود را باز می یابد. با این حال ما ورق را صلب فرض کرده و از تغییر شکلهای الاستیک صرف نظر می کنیم با توجه به برقراری معیار تسلیم در ابتدای این ناحیه رابطه (۲) به صورت زیر ساده می شود:

$$\left. \frac{-dp}{dx} \right|_{x=x_{DE}} t_2 - \mu p_{DE} = 0 \quad (۱۱)$$

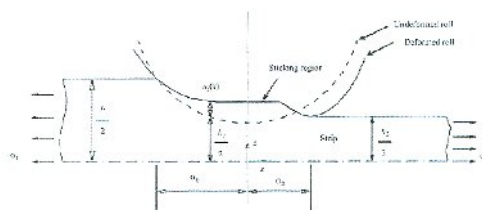
با نوشتن معادله تعادل در راستای محور y داریم:

$$\sigma_y = -p(1 + \mu \operatorname{tg} \alpha) \quad (۳)$$

با توجه به اینکه μ و $\operatorname{tg} \alpha$ (برای غلتکهای نسبتاً بزرگ) دارای مقادیر کوچکی می باشند، می توان از عبارت $\mu \operatorname{tg} \alpha$ در برابر ۱ صرف نظر کرد بنابراین:

$$\sigma_y = -p \quad (۴)$$

در حالتی که ماده ورق نرم باشد و یا حالتی که ضخامت ورق زیاد باشد (مانند نورد گرم) می توان از تغییر شکل الاستیک غلتکها صرف نظر نمود ولی در کاهش کوچک سطح مقطع و یا فویل ها ناحیه تماس کوچک می باشد، نمی توان از تغییر شکل الاستیک غلتکها صرف نظر نمود. در نورد فویل ها تغییر شکل الاستیک غلتکها به اندازه ای می باشد که در ناحیه تماس، منطقه ای ایجاد خواهد شد که غلتکها کاملاً تخت شده و کاهش ضخامت صورت نمی پذیرد (شکل (۲)).



شکل (۲): فرایند نورد برای زوایای درگیری غیر دایره ای [۶]

به منظور اعمال اثر تغییر شکل غلتک ها از نظریه هرتز برای تماس بین دو استوانه الاستیک به صورت زیر استفاده می شود.

$$p = p_0 \sqrt{1 - (x'/a_0')^2} \quad (۵)$$

$$a_0' = p_0 * 2R(1-\nu^2) * \frac{1}{E_R} \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن غلتکها به عنوان یک سیستم فنری با ضریب فنریت متغیر توزیع فشار به صورت زیر بیان می شود:

$$p = k(x') * \Delta t' \quad (۷)$$

با استفاده از هندسه نشان داده شده در شکل (۳) و با تبدیل دستگاه مختصات از $X'-Y'$ به $X-Y$ رابطه زیر حاصل میشود:

$$p = f(x, t) \quad (۸)$$

$$= p_0 \sqrt{1 - (C_1 - t \operatorname{tg} \alpha + x)^2 * \frac{1}{C_2} * \left(\frac{t + x \operatorname{tg} \alpha + C_3}{\sqrt{C_4 - (x - t \operatorname{tg} \alpha + C_1)^2 - C_5}} + 1 \right)}$$

که ثوابت C برابرند با:

$$C_1 = (bt \operatorname{tg} \alpha) \quad (۱-۹)$$

$$C_2 = (a_0'^2)(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \quad (۲-۹)$$

در این ناحیه نیز فولیل خاصیت الاستیک داشته، ضخامت ورق ثابت و برابر با t_1 خواهد بود. بسته به هندسه نورد و خصوصیات روانساز و فولیل این ناحیه می تواند وجود داشته یا وجود نداشته باشد. توزیع فشار را می توان با استفاده از رابطه (۸) به دست آورد.

۵- ناحیه D و بررسی وجود ناحیه C

در این ناحیه نیز همانند ناحیه B، تغییر شکل پلاستیک به صورت کاهش ضخامت نمایان می شود. معیار تسلیم در طول ناحیه ارضاء می شود. می توان رابطه (۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$V_R \leq V_{f1} - \left(\frac{4}{3} A_t \frac{1}{t} \frac{dt}{dx} + \frac{dp}{dx}\right)t + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e \frac{dt}{dx} - \mu p = 0 \quad (18)$$

در این ناحیه نیز معادله دیفرانسیلی به صورت زیر می توان بدست آورد:

$$\frac{dt}{dx} = - \frac{tf(x,t) + \mu p(x,t)}{\frac{4}{3} A_t + g(x,t)t - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e} \quad (19)$$

این معادله به صورت عددی برای شرط مرزی $x = x_{DE} : t = t_2$ حل می شود. لذا شکل خط تماس و نحوه کاهش ضخامت در این ناحیه نیز مشخص می شود. توزیع فشار نیز در این ناحیه مستقیماً با استفاده از رابطه (۸) به دست می آید.

۴- پیوستگی جریان مواد و پارامتر لغزش رو به جلو

با توجه به شرایط کرنش صفحه ای و شرط پیوستگی جریان مواد داریم:

$$V_f * t = V_{f2} * t_2 = V_{f0} * t_0 = V_{f1} * t_1 \quad (20)$$

لذا طبق تعریف، پارامتر لغزش رو به جلو برابر است با:

$$s = \frac{t_1}{t_2} - 1 \quad (21)$$

۵- محاسبه نیروی مورد نیاز برای نورد

نیروی نورد بر واحد پهنا از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F = \int_{x_1}^{x_2} p(t,x) dx \quad (22)$$

در هر ناحیه، با توجه به مشخص بودن تابعیت ضخامت (t) نسبت به X مقدار نیرو برای هر ناحیه به طور جداگانه به دست می آید و از این طریق کل نیروی مورد نیاز برای نورد مشخص می شود.

با انتگرال گیری از رابطه (۲) بر روی مرزهای ناحیه E و با اعمال کشش از جلویی برابر با σ_d در $X=a_2$ خواهیم داشت:

$$\frac{\mu}{t_2} \int_{a_2}^{x_{DE}} p dx + p_{DE} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e - \sigma_d \quad (12)$$

۲- ناحیه A (ناحیه الاستیک)

در این ناحیه فولیل خاصیت الاستیک دارد. این ناحیه از نقطه شروع درگیری آغاز می شود و با تسلیم ورق و برقراری رابطه تسلیم پایان می پذیرد. با توجه به برقراری معیار تسلیم در انتهای این ناحیه رابطه (۱) به صورت زیر ساده می شود:

$$d\sigma_x = \frac{\mu p}{t_0} dx \quad (13)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۱) بر روی مرزهای ناحیه A و با اعمال کشش از عقب برابر با σ_b در $X=a_0$ خواهیم داشت:

$$\frac{\mu}{t_0} \int_{-a_0}^{x_{AB}} p dx - p_{AB} = \sigma_b - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e \quad (14)$$

۳- ناحیه B و بررسی وجود ناحیه C

در این ناحیه تغییر شکل پلاستیک به صورت کاهش ضخامت رخ می دهد. معیار تسلیم در کل ناحیه B برقرار بوده با استفاده از فرض های بیان شده می توان معادله (۱) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$V_R \geq V_{f1} - \left(\frac{4}{3} A_t \frac{1}{t} \frac{dt}{dx} + \frac{dp}{dx}\right)t + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e \frac{dt}{dx} + \mu p = 0 \quad (15)$$

با مشتق گیری از رابطه (۸) نسبت به X می توان $\frac{dp}{dx}$ را به صورت مجموع دو تابع از X و t به دست آورد:

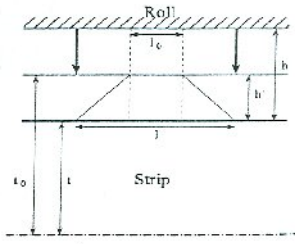
$$\frac{dp}{dx} = g(x,t) \frac{dt}{dx} + f(x,t) \quad (16)$$

با استفاده از رابطه اخیر و مرتب سازی آن معادله دیفرانسیلی به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$\frac{dt}{dx} = - \frac{tf(x,t) - \mu p(x,t)}{\frac{4}{3} A_t + g(x,t)t - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e} \quad (17)$$

با اعمال شرط مرزی $x = x_{AB} : t = t_0$ ، می توان به حل این معادله دیفرانسیل به صورت عددی پرداخت و t را به صورت تابعی از X، به دست آورد. به این ترتیب شکل خط تماس در این ناحیه مشخص می شود. نقطه پایانی این ناحیه، جایی خواهد بود که $\frac{dt}{dx}$ برابر صفر شود. در این صورت $t = t_1^p$ و $X = X_{BC}$ خواهد بود.

۴- ناحیه C (ناحیه الاستیک)

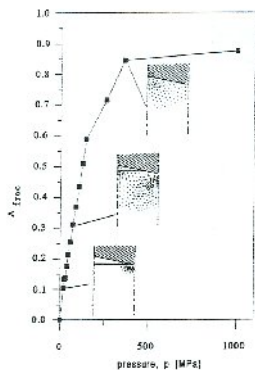


شکل (۵): کاهش ضخامت فیلم در نتیجه انبساط سطح فویل [۴]

۷- بررسی تماس ورق و غلتک

نتایج به دست آمده از محاسبات مختلف نشان داده که منحنی A_{frac} -P می تواند با سه رابطه خطی تقریب زده شود که هر کدام در محدوده فشاری خاصی صادق می باشند [۴]. شکل (۶) نمونه ای از این منحنی ها را نشان می دهد و نتایج حاصل از آن به صورت زیر می باشد:

$$A_{frac} = \begin{cases} 4.012 \cdot 10^{-3} \cdot p + 2.362 \cdot 10^{-2} & 0 \leq p \leq 140 \text{ Mpa} \\ 1.162 \cdot 10^{-3} \cdot p + 4.214 \cdot 10^{-1} & 140 < P \leq 365 \\ 4.758 \cdot 10^{-5} \cdot p + 8.278 \cdot 10^{-1} & 365 < P \leq 3620 \\ 1 & P > 3620 \end{cases} \quad (28)$$



شکل (۶): نتایج حاصل از آنالیز FE [۴]

با داشتن ضخامت لایه روغن در ناحیه کاری، h_{film} و ارتفاع برآمدگی ها می تواند اصلاح شده به صورت H_{frac} بیان شود.

$$H_{frac} = \begin{cases} 0 & h_{film} / h_{asp} > 1 \\ 1 - \frac{h_{film}}{h_{asp}} & \frac{h_{film}}{h_{asp}} > 1 - A_{frac} \\ A_{frac} & \frac{h_{film}}{h_{asp}} < 1 - A_{frac} \end{cases} \quad (29)$$

۶- استخراج ضخامت فیلم روغن ورودی به ناحیه پلاستیک

به منظور تعیین پارامتر h_{en} یا جدایی نامی سطوح در ناحیه ورودی از حل معادله هیدروپنماتیک رینولدز استفاده می شود. در این تئوری فشار فیلم روغن در صفحه ورودی برابر با فشار تغییر شکل (P_{AB}) قرار داده می شود که این مقدار طی یک حلقه تکرار بهتر می شود.

$$h_{en} = 1.417 \left(\frac{\eta_0 (V_f + V_r)}{p'} \right)^{3/4} \frac{\sqrt{R}}{(a_0 + a_2)^{1/4}} \quad (23)$$

در این رابطه جانسون فرض کرده که غلتکها تحت تأثیر فشار هر تری، تغییر شکل زیادی دارند. همچنین سطوح کاملاً هموار می باشند، ولی در عمل برجستگی های سطح غلتک ضخامت فیلم اولیه روانساز را تغییر می دهند. با فرض افزایش ضخامت فیلم روغن در ناحیه کاری و با توجه به مقادیر h_{en} و h_{asp} روابط زیر به دست می آید:

$$h_{en} \geq \frac{1}{2} h_{asp} \quad h^* = h_{en} + h_{asp} / 2 \quad (24)$$

$$h_{en} < \frac{1}{2} h_{asp} \quad h^* = \sqrt{2h_{en} \cdot h_{asp}}$$

۵- ضخامت فیلم روغن در ناحیه کاری

ضخامت فیلم روغن، h ، در هر نقطه از زاویه گاز توسط رابطه رینولدز به صورت زیر تعیین می شود:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta(V_r + V_f) \left(\frac{h - h^*}{h^3} \right) \quad (25)$$

در شرایط همدمایی، ویسکوزیته روانساز با استفاده از رابطه باروس بیان می شود:

$$\eta = \eta_0 e^{2p} \quad (26)$$

هنگامی که المان سطحی فویل از l_0 به l تغییر طول می دهد، ضخامت فیلم روانکار از h به h' کاهش می یابد (شکل (۵)). لذا می توان ضخامت فیلم روانکار را با توجه به گسترش سطح فویل در حین تغییر شکل پلاستیک اصلاح کرده و به صورت زیر ارائه کرد:

$$h' = \frac{2h}{\frac{t_0}{t} + 1} \quad (27)$$

۸- تنش برشی مماسی

با توجه به اساس رژیم روانکاری مخلوط به منظور تعیین تنش برشی میانگین (τ) به بررسی توأمان تنش برشی مماسی ناشی از برش، ویسکوزیته روغن (τ_h) و تنش برشی اصطکاکی ناشی از درگیری سطحی برجستگی های غلتک و ورق (τ_c) می پردازیم. طبق تعریف تنش اصطکاکی میانگین به صورت زیر به دست می آید:

$$\tau = \frac{\tau_h A_h + \tau_c A_c}{A_h + A_c} \quad (30)$$

با تعریف نسبت تماس به صورت زیر:

$$A_{frac} = \frac{A_c}{A_c + A_h} \quad (31)$$

و پس از در نظر گرفتن اصلاح اعمالی بر روی نسبت سطح تماس خواهیم داشت

$$\tau = \tau_h(1 - H_{frac}) + \tau_c H_{frac} \quad (32)$$

که در این رابطه:

$$\tau_h = \frac{\eta |V_R - V_f|}{h'} \quad (33)$$

و

$$\tau_c = \mu_h * p \quad (34)$$

می باشند.

۹- تشریح فرایند حل معادلات

به منظور حل معادلات مورد نظر، مراحل زیر در نظر گرفته می شوند:

۱- ابتدا می بایستی به محاسبه توزیع فشار، شکل خط تماس و یافتن مرزهای نواحی پنج گانه پرداخته شود. به این منظور با فرض مقدار اولیه $H_{frac} = 1$ ابتدا به بررسی ناحیه E می پردازیم. روابط (۱۰) برای $X = X_{DE}$ و (۱۱) و (۸) تشکیل یک دستگاه معادلات را می دهند که به وسیله آن می توان شرایط مرزی هندسی a_2 و a_0 و X_{DE} را به دست آورد. لذا فشار بین نواحی D و E یعنی p_{DE} و ماکزیمم فشار p_0 وابسته به معادله هرتز و ثوابت هندسی C به دست می آید. از این طریق توزیع فشار در ناحیه خروجی قابل محاسبه می باشد. پس از آن در ناحیه A با حل عددی معادله (۱۴) می توان X_{AB} را به دست آورد و توزیع فشار بر روی ناحیه ورودی نیز به دست می آید. با استفاده از روش انتگرال رونگ- کوتا مرتبه ۷ و ۸ که از X_{AB} شروع می شود، معادله

دیفرانسیل (۱۷) حل می گردد. در نتیجه شکل خط تماس در ناحیه B به دست آمده همچنین شرط $\frac{dt}{dx} = 0$ بررسی می گردد. بار دیگر از روش انتگرال گیری رونگ کوتا مرتبه ۷ و ۸ که از X_{DE} شروع می شود و در جهت خلاف X حرکت می کند استفاده کرده و این بار با حل معادله (۱۹) شکل خط تماس در ناحیه D به دست می آید. در صورت ارضاء شرط دوم وجود ناحیه C اثبات شده و مقادیر مرزی X_{BC} و X_{CD} به دست می آیند.

با مشخص شدن توزیع فشار p در کل نواحی می توان میزان تنش برشی خشک را با استفاده از رابطه $\tau = \mu_b * p$ با فرض $\mu_b = 0.1$ به دست آورد.

۲- با استفاده از رابطه (۲۳) به محاسبه ضخامت فیلم اولیه روغن پرداخته می شود و سپس با توجه به میزان ارتفاع برجستگیها به اصلاح ضخامت فیلم روغن می پردازیم.

۳- با استفاده از مقادیر p و $\frac{dp}{dx}$ به دست آمده، به حل عددی رابطه (۲۵) پرداخته، مقادیر ضخامت فیلم روغن در ناحیه تغییر شکل پلاستیک به دست می آید و سپس با استفاده از رابطه (۲۷) به اصلاح این مقادیر پرداخته می شود.

۴- مقدار تنش برشی هیدرودینامیک τ_h با استفاده از رابطه (۳۳) در نقاط مختلف خط تماس به دست می آید.

۵- با توجه به روابط ارائه شده در معادله (۲۸) و با توجه به مقادیر فشار در نقاط مختلف خط تماس می توان توزیع A_{frac} را به دست آورد. با استفاده از رابطه (۲۹) به اصلاح آن پرداخت و توزیع H_{frac} را بر روی ناحیه کاری به دست آورد.

۶- با استفاده از رابطه (۳۲) می توان مقادیر τ را به دست آورده و توزیع ضریب اصطکاک (μ) را در طول خط تماس با استفاده از رابطه $\mu = \frac{\tau}{p}$ به دست آورد.

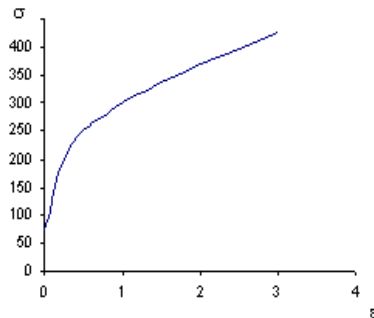
۷- مقدار میانگینی برای μ ضریب اصطکاک و در نتیجه توزیع فشار تماس جدیدی با توجه به مرحله ۱ به دست می آید.

۸- مراحل ۲ تا ۷ تا رسیدن به معیار همگرایی $\frac{|F_n - F_{n-1}|}{F_n} < 0.001$ تکرار می شود.

به منظور حل معادلات، برنامه ای در محیط نرم افزار MATLAB نوشته شده است.

۱۰- نتایج محاسبات

در مدل حاضر غلتک ها از جنس فولاد با مدول یانگ ۲۱۰Gpa و قطر ۱۶۲ mm میلی متر در نظر گرفته شده است. سطح غلتکها سنگ زده شده تا زبری میانگین سطح معادل $0.1 \mu m$ حاصل شود. جنس ورقها از مس با ضخامت اولیه $2t_0=0.05mm$ و پهنای $w=1mm$ و زبری سطح معادل $5 \mu m$ می باشند. منحنی تنش - کرنش ماده ورق طبق نمودار شکل (۷) می باشد. ضخامت ورق مورد نظر برای تولید $2t_2=0.03mm$ می باشد. در نتیجه ضریب کاهش برابر ۴۰٪ به دست می آید.



شکل (۷): منحنی تنش - کرنش برای ماده کاری مس

به منظور بررسی اثر نوع روغن و لزجت آن بر روی نتایج به دست آمده از مدل از سه نوع روغن متفاوت استفاده می شود که به تفکیک در جدول (۱) آورده شده است.

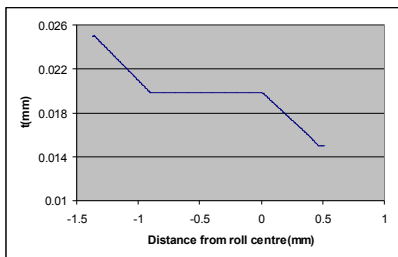
مقادیر کشش از عقب $\sigma_b=10Mpa$ و کشش از جلو $\sigma_d=20Mpa$ می باشد.

۱۰-۱) شکل خط تماس

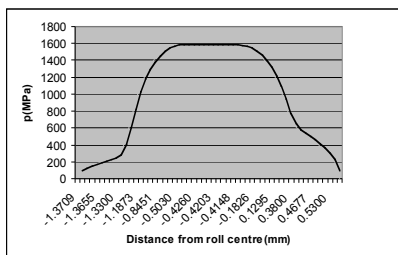
شکل خط تماس به صورت شکل (۸) خواهد بود. نواحی ورودی، خروجی و همچنین ناحیه هموار مرکزی به خوبی دیده می شود. در مدلهایی که غلتک را به صورت دایره ای در نظر گرفته و از ناحیه تخت مرکزی صرف نظر می شود، نقطه انتهایی ناحیه کاری منطبق بر تقاطع خط المکزین غلتکها و محور تقارن ورق می باشد در صورتی که در عمل به دلیل تغییر شکل الاستیک غلتکها، نقطه انتهایی ناحیه کاری دارای فاصله ای نسبت به این خط می باشد.

۱۰-۲) توزیع فشار تغییر شکل بر روی خط تماس

توزیع فشار تغییر شکل بر روی ورق مس با استفاده از مدل حاضر و در نظر گرفتن اثر اصلاحی بر روی A_{frac} و به دست آوردن H_{frac} در شکل (۹) آورده شده است. با استفاده از تئوری بیان شده در این مقاله مشابه تئوری نورد معمولی یک نقطه خنثی در ناحیه نورد وجود دارد و نیز منحنی فشار در همین نقطه دارای ماکزیمم فشار خود می باشد.

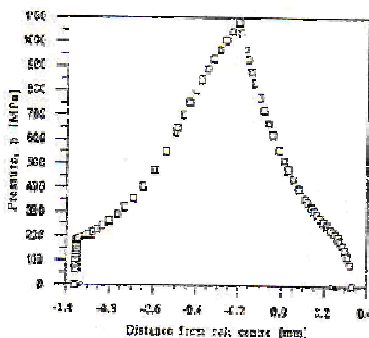


شکل (۸) شکل خط تماس در زاویه بلعش با استفاده از مدل حاضر برای ورق مس



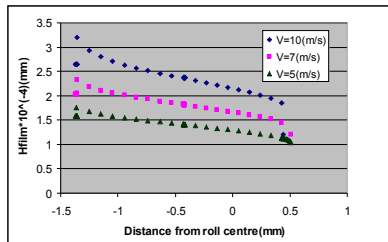
شکل (۹): توزیع فشار تماسی در زاویه بلعش با استفاده از مدل حاضر

توزیع فشار تغییر شکل بر روی ورق آلومینیوم با استفاده از نتایج ارائه شده توسط کیف و جوناتر با شرایط مشابه آنچه در بخش قبل بیان شد به صورت شکل (۱۰) می باشد.



شکل (۱۰): توزیع فشار تماسی در زاویه بلعش با استفاده از مدل کیف جوناتر

روغن کافی برای جدا کردن سطح تماس مشترک غلتک ها در قسمت ورودی، وارد نمی شود و سطح تماس به سرعت در قسمت ورودی افزایش می یابد. پس سرعت به عنوان عامل تعیین کننده نوع رژیم روانکاری می تواند در نظر گرفته شود.



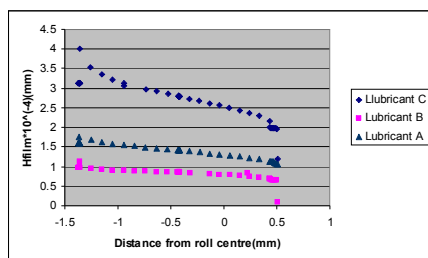
شکل (۱۲): توزیع ضخامت فیلم روانکار در سرعت های مختلف با استفاده از مدل حاضر

جدول (۱): ویسکوزیته دینامیک سه نوع روانکار در سه محدوده فشار متفاوت

$1000 \leq P \text{ Mpa}$		$30 \leq P < 1000 \text{ Mpa}$		$0 \leq P < 330 \text{ Mpa}$		روانکار
$\gamma (\text{mm}^2 / \text{N})$	$\eta_{0,2} (\text{NS} / \text{mm}^2)$	$\gamma (\text{mm}^2 / \text{N})$	$\eta_{0,2} (\text{NS} / \text{mm}^2)$	$\gamma (\text{mm}^2 / \text{N})$	$\eta_{0,1} (\text{NS} / \text{mm}^2)$	
۰/۰۰۰۲۲	$۳/۶۴ \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۰	$۳/۶۵ \times 10^{-5}$	۰/۰۲۹	$۰/۶ \times 10^{-1}$	A
۰/۰۰۰۲۲	$۷/۸ \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۰	$۷/۲۹ \times 10^{-5}$	۰/۰۲۹	$۱/۲ \times 10^{-1}$	B
۰/۰۰۰۲۲	$۱/۹۷ \times 10^{-5}$	۰/۰۰۲۰	$۱/۸۲ \times 10^{-5}$	۰/۰۲۹	$۳/۰ \times 10^{-1}$	C

۱۰-۵) بررسی تغییرات ضخامت فیلم روانکار در روانکارهای متفاوت

با تغییر نوع روانکار همانگونه که در شکل (۱۴) آورده شده است ضخامت فیلم روغن با افزایش ویسکوزیته افزایش می یابد. که این به نوبه خود باعث کاهش ضریب اصطکاک شده و در نتیجه نیروی مورد نیاز برای نورد کاهش می یابد.

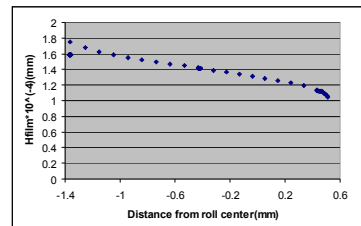


شکل (۱۴): تغییرات ضخامت فیلم روانکار در روانکارهای متفاوت

مشابه همین نتایج نیز توسط کیف و جونانر ارائه شده است که با مقایسه شکل‌های (۱۴) و (۱۵) می توان تطابق نتایج دو مدل را با یکدیگر مشاهده نمود.

۱۰-۳) توزیع ضخامت فیلم روانکار در ناحیه کاری

با توجه به تعریف رژیم روانکاری مخلوط که ضخامت روانکار بایستی از میانگین ارتفاع برجستگی ها کمتر باشد و با توجه به شکل (۱۱) می توان تشکیل فیلم روغن را در حالت روانکاری مخلوط مشاهده نمود. در عمل در صورتی که متوسط فیلم روغن از سه برابر میانگین ارتفاع زبری های سطح کمتر باشد رژیم روانکاری مخلوط حاصل می شود و عملاً برجستگیها با هم درگیر می شوند.



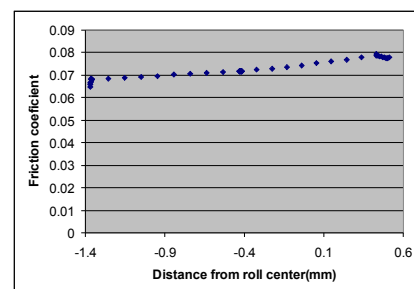
شکل (۱۱): توزیع ضخامت فیلم روانکار با استفاده از مدل حاضر

برای ورق مس

شکل (۱۲) ضخامت فیلم روغن را در سرعت های مختلف نشان می دهد. داده های استفاده شده به جز سرعت مانند قسمت قبل است. همانطور که مشاهده می شود برای سرعت های بالای غلتک ضخامت فیلم روغن افزایش میابد. زیرا در سرعت های پایین،

۱۰-۴) بررسی ضریب اصطکاک میانگین در طول ناحیه کاری

تغییرات ضریب اصطکاک از ورودی تا خروجی در طول فرایند نورد در شکل (۱۳) دیده می شود. در سرعت های نورد پایین، در اولین قسمت خط تماس شاهد افزایش ضریب اصطکاک میانگین ($\bar{\mu}$) به دلیل افزایش مقدار نسبت سطح تماس می باشیم، در حالی که در سرعتهای بالای نورد مقدار کافی روغن برای جدا کردن دو سطح از یکدیگر وجود دارد.



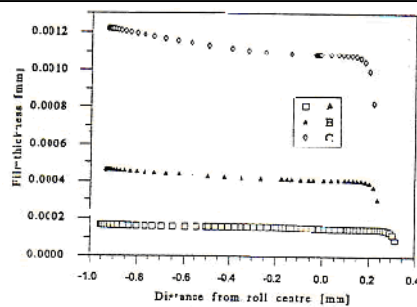
شکل (۱۳) توزیع ضریب اصطکاک میانگین در طول ناحیه کاری با استفاده از

مدل حاضر بر روی ورق مس

- ۱- با توجه به تاثیر روانکار بر روی ضخامت ورق، با در نظر گرفتن این اثرات به نتایج دقیق تری می توان دست یافت.
- ۲- با تغییر مشخصات روانکار مورد استفاده می توان به روانساز بهینه دست یافت و به منظور تحویل و کنترل ضخامت مطلوب نهایی فویل علاوه بر دخالت دادن پارامترهای نیروی نورد و سرعت از آن استفاده کرد.
- ۳- استفاده از یک روانساز مناسب می تواند موجب کاهش اثر تماس زبری ها و در نتیجه بهبود کیفیت ورق شود.

فهرست علائم

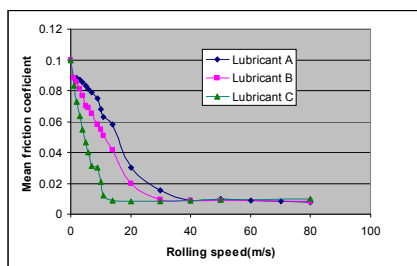
A_c	سطح تماس در روانکاری مرزی
A_h	سطح تماس در روانکاری هیدرودینامیک
A_{frac}	نسبت سطح تماس
A_i, B_i	ضرایب ثابت در رابطه تنش کرنش
a_0	فاصله بین نقطه شروع درگیری و محور تقارن عمودی غلتکها
a_2	فاصله بین نقطه انتهای درگیری و محور تقارن عمودی غلتکها
b	فاصله بین مرکز غلتک و محور تقارن افقی غلتکها
$\Delta t'$	جابجایی سطح غلتک
E_R	مدول یانگ غلتک
F	نیروی نورد
h	ضخامت فیلم روانکار
h'	ضخامت فیلم روانکار پس از اعمال اثر گسترده گی سطح ورق
h_{asp}	ارتفاع برجستگیهای سطح
h_{en}	ضخامت فیلم روانکار در ورود به زاویه درگیری
$K(x)$	تابع موجود در رابطه خطی فشار-جابجایی
p	فشار تماسی
p_0	بیشینه مقدار فشار تماسی وابسته به هر تر
R	شعاع غلتک
t	نصف ضخامت ورق
t_0	نصف ضخامت ورق قبل از نورد
t_1	نصف ضخامت ورق در نقطه خشی یا ناحیه C
t_2	نصف ضخامت ورق بعد از نورد



شکل (۱۵): تغییرات ضخامت فیلم روانکار در روانکارهای متفاوت در مدل کیف و جونا تر

۱۰-۶) بررسی تغییرات ضریب اصطکاک میانگین در روانکارهای متفاوت

اثرات تغییرات نوع روانکار با استفاده از داده های جدول (۱) در شکل (۱۶) آورده شده است. با افزایش سرعت هر چه روغن دارای ویسکوزیته بالاتری باشد، میزان کاهش ضریب اصطکاک میانگین بیشتر خواهد شد.



شکل (۱۶) اثر ویسکوزیته روانکار بر روی ضریب اصطکاک میانگین

۱۱- بحث و نتیجه گیری

امروزه اکثر فعالیت ها بر روی مکانیزم روانکاری مخلوط متمرکز شده است. به دلیل سطح براقی که این مکانیزم ایجاد می کند، نیرو و گشتاور نسبت به اصطکاک خشک بسیار کمتر است. چنین چیزی مطلوب کارخانه های نورد می باشد و سعی می کنند مکانیزم غالب، روانکاری مخلوط باشد. از طرفی نوع روغن مورد استفاده به منظور دستیابی به شرایط بهینه نیز حائز اهمیت می باشد. معمولاً تولید روغن های نورد انحصاری و دارای فرمول سری می باشد. لذا گاهی اوقات، کارخانه های نورد با کمبود نوع خاصی از روغن مواجه می شوند. آنها می توانند با استفاده از مدل هایی نظیر آنچه در اینجا بیان شد، روغن های مشابه را تشخیص داده و مشکلات خود را مرتفع سازند.

با مطالعه نتایج به دست آمده می توان به نکات زیر اشاره کرد:

[5]- Luo, Ch., Keife, H., "A Thermal Model for the foil Rolling Process", J. of Mat. Proc. Techn., Vol 74, pp. 158-173, 1998.

[6]- Keife, H. Shi, J., Mc Elwain, D.L.S, and Lag Lands, T.A.M., "Foil Rolling : A New Interpretation of Emperimental Results", J. of Mat. Proc. Techn., Vol. 121, pp. 50-59, 2002.

[7]- Le, H.R., Sutcliffe, M.P.F., "Rolling of Thin Strip and Foil: Application of a Tribological Model for Mixed Lubricatoin", J. of Tribology, Vol. 124, p. 129, 2002.

[8]- Kumar, D., Dixit, U.S., "A Slab Method Study of Strain Hardening and Friction Effects in Cold Foil Rolling Process", J. of Mat. Proc. Techn., Vol. 171, pp. 331-340, 2006.

V_f	سرعت ورق
V_r	سرعت غلتک
$x-y$	دستگاه مختصات کارتیزین
$x'-y'$	دستگاه مختصات کارتیزین در راستای مماس و عمود بر غلتک

فهرست علائم یونانی

α	زاویه بین دستگاه مختصات $x-y$ و $x'-y'$
γ	ضریب فشار لزجت
μ	ضریب اصطکاک
$\bar{\mu}$	ضریب میانگین اصطکاک
μ_b	ضریب اصطکاک در شرایط روانکاری مرزی
ν	نسبت پواسون برای ماده کاری غلتک
η	لزجت دینامیکی روانکار
η_0	لزجت دینامیکی روانکار در فشار مبنا
σ_b	کشش ورودی ورق
σ_d	کشش خروجی ورق
σ_e	تنش مؤثر در ماده کاری
σ_x	تنش افقی در ماده کاری
τ	تنش برشی اصطکاک در روانکاری مخلوط
τ_c	تنش برشی اصطکاک در روانکاری مرزی
τ_h	تنش برشی اصطکاک در روانکاری هیدرودینامیک

مراجع:

[1]- Orowan. E., Porscoe. K.J., "A simple Method of Calculating Roll Pressure and Power Consumption in Hot Flat Rolling", Iron and Steel Institute, London, No.3, 4pp. 124-126, 1946.

[2]- Fleck, N. A., Johnson, K. L., "Towards a New Theory of Cold Rolling Thin Foil", Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, pp. 7, 1987.

[3]- Stahlbery , Uif, Keife, H., "Improved Flatness in Cold Rolling of Copper Foils", J. of Mat. Proc. Techn., Vol. 37, pp. 157-174, 1993.

[4]- Keife, H., Jonsater, T., "Influence of Rolling Speed upon Friction in Cold Rolling of Foils", J. of Tribology, Vol. 119, pp. 349-357, 1997.