

بررسی اثر اصطکاک بر تعریض و برآمدگی جانبی در نورد تخت به روش المان محدود

محمود سلیمی^{۱*} امین فضیله^۲

* نویسنده مسئول: Salimi@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این مقاله با شبیه سازی سه بعدی نورد تخت در نرم افزار ABAQUS، اثرات اصطکاک بر پخش عرضی و برآمدگی در سطوح مورد بررسی قرار گرفته است. برای تخمین این مقادیر، فرایند نورد به وسیله فورجینگ های پی در پی تخمین زده شده و افزایش طول یا تعریض متوسط از محاسبات قبلی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده بصورت نمودارهایی ارائه شده که نشان می دهد با افزایش اصطکاک، تعریض و برآمدگی جانبی ورق در نورد تخت افزایش می یابد. نتایج تئوری مدل سازگاری خوبی را با مقادیر تجربی پژوهشگران نشان می دهد. همچنین نتایج حاصل از اثر نسبت های مختلف عرض و ضخامت بر طول ناپایدار در نورد ورق مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: نورد، اصطکاک، تعریض، برآمدگی، فورجینگ

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۱- مقدمه

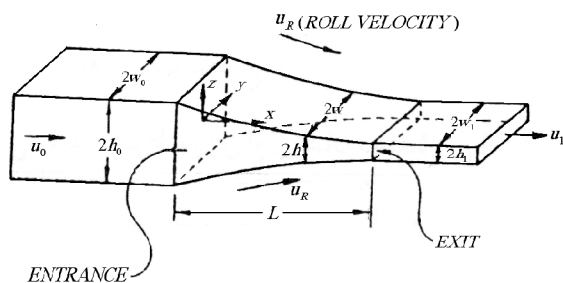
در این تحقیق با استفاده از شبیه سازی سه بعدی به بررسی اثر اصطکاک بر تعریض و برآمدگی جانبی پرداخته شده که نتایج آن با مقادیر ارائه شده محققین مطابقت خوبی دارد.

فرایند نورد به خاطر قابلیت تغییر، کارآیی و نرخ تولید بالا نقش مؤثری در تولید محصولاتی که دارای سطح مقطع یکنواخت هستند، دارد. برای افزایش کیفیت محصولات یا تولید محصولاتی با شکل‌های جدید یا ماده‌های جدید و یا نورد با سرعت‌های بالا، طراحی کالیبر و آنالیز فرایند از راه آزمایش، پرهزینه و وقت گیر می‌باشد. بنابراین ارائه روش‌های بررسی تغییر شکل‌های پیچیده و سه بعدی فلز در نورد تخت باعث کارآیی در طراحی و آنالیز فرایندهای نورد می‌شود.

۲- بررسی هندسه ناحیه تغییر شکل

در فرایند نورد تخت، یک میله با سطح مقطع مستطیلی بین یک جفت از غلتک‌های استوانه ای به شعاع R نورد می‌شود و ضخامت آن از $2h_0$ به $2h_1$ کاهش می‌یابد و عرض آن از $2w_0$ به $2w_1$ افزایش می‌یابد. تصویر طول کمان درگیری قطعه کار- غلتک طبق شکل (۱) به وسیله L نشان داده می‌شود. سیستم مختصات کارتزینی با محورهای x و y و z به ترتیب جهت‌های طول، عرض و ارتفاع را نشان می‌دهند و مرکز در نقطه میانی سطح مقطع ورودی در نظر گرفته شده است.

غلتک‌ها به صورت صلب فرض شده‌اند و از تغییرات تنش و کیش در ضخامت ورق صرف نظر شده است. همچنین فرض شده که در هر مقطع از ناحیه تغییر شکل پروفیل قطعه کار به صورت مستطیلی باقی می‌ماند.



شکل (۱) هندسه قطعه کار هنگام نورد

اگرچه میزان تعریض، بیشتر به پارامترهای مستقل فرایند، مانند ابعاد سطح مقطع ورودی، درصد کاهش ارتفاع، نسبت‌های قطر غلتک به ضخامت، عرض اولیه به ضخامت، اصطکاک و سرعت ورودی بستگی دارد، ولی به دلیل اینکه این فاکتورها خیلی پیچیده و درهم آمیخته است، تخمین صحیحی از تعریض در دسترس نمی‌باشد. بنابراین موضوع تعریض همواره یکی از مسائل قابل توجه در نورد متقاطع می‌باشد. اکثر تئوری‌هایی که برای تغییر شکل سه بعدی نورد وجود دارد به صورت آزمایشی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. گیگو و همکارانش [۱] با به کار بردن اصل کار مینیمم برای نورد تخت، رابطه‌ای برای تعریض ارائه کردند. کوبایشی [۲] روشی برای تحلیل سه بعدی نورد بر اساس اصل اکسترمم برای مواد صلب- تماماً خمیری ارائه کرد. کندی [۳] با ارائه یک میدان سرعت، برای بررسی تعریض، افزایش طول و برآمدگی جانبی، که به روش حد نهایی استوار است، ارائه کرده است. هیل [۴] نرمی ماده را با اصول دقیقی ترکیب کرد و روش جدیدی برای بررسی فرایندهای شکل دهی ارائه کرد.

۳- روش عمومی هیل

در این روش، به انتخاب یک میدان تقریبی سرعت منفرد از رسته خاص که شرایط سینماتیکی را ارضاء نماید، نیاز است. توزیع تنش مربوطه در ناحیه تغییر شکل میدان سرعت انتخاب شده، معمولاً تمام شرایط استاتیکی را برآورده نمی‌کند. سؤالی که اکنون مطرح می‌شود چگونه انتخاب میدان سرعت از رسته میدان‌های سرعت مورد بررسی است تا بهترین شرایط استاتیکی را به وجود آورد.

در سالهای اخیر نیز با به کارگیری نرم افزارهای مختلف طراحی و مهندسی به شبیه سازی فرایندهای مختلف از جمله فرایند شکل دهی پرداخته‌اند.

مین یانگ و هی یانگ [۵] به بررسی اثر اندازه‌های غلتک‌ها بر فرایند نورد با شبیه سازی مدلی سه بعدی توسط المان محدود پرداختند. همین لاین لی و هی یانگ [۶] به بررسی اثر غلتک‌های پشتیان در نورد با شبیه سازی مدل سه بعدی پرداخته‌اند.

کند، یک میدان سرعت حالت دائم برای یک شکل خاص جسم (شکل سطح) می‌باشد. این شکل خاص جسم را می‌توان میدان سرعت که به عنوان جواب مسئله حالت دائم بدون محدودیت است، پذیرفت. بنابراین مسئله به همراه میدان سرعت $V(x)$ یک تابع شکل $S(x)$ دیگر را با شرایط مرزی اضافی زیر شامل می‌شود:

$$V(x) \text{ Grad } [S(x)] = 0 \quad (2)$$

که این فرمول مربوط به سطح S_C است.

$$\int_{S_I} V(x) \frac{\text{Grad}[s(x)]}{|\text{Grad}[S(x)]|} = 0 \quad (3)$$

که U به سرعت ورودی U_0 مربوط می‌شود، به طوری که $U_0 = U / (h_0 w_0)$.

شرایط مرزی اول نشان دهنده این است که سرعت مماس بر سطح بدون محدودیت است و شرط دوم دلالت بر ثابت بودن نرخ جریان حجمی ورودی و خروجی ناحیه تغییر شکل دارد.

۵- بررسی (فرمول بندی) میدان سرعت

بر اساس مفهوم توابع جریان دوگانه، میدان سرعت برای جسم تراکم پذیری در فضای سه بعدی، به صورت دو تابع جریان قابل بیان است. مؤلفه‌های سرعت را در جریان تراکم ناپذیر می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V = V_x \hat{i} + V_y \hat{j} + V_z \hat{k} = (\text{grad } \psi) \times (\text{grad } X)$$

یا

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial x}{\partial y} \\ V_y &= \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial x}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial x} \\ V_z &= \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

که V_x و V_y و V_z مؤلفه‌های بردار سرعت در مختصات کارتیزی و ψ و X دو تابع جریان می‌باشد.

مقادیر ثابت توابع ψ و X ، سطوح جریان و تقاطع آنها خطوط جریان را نشان می‌دهند. یکی از خاصیت‌های توابع جریان، مماس بودن بردار سرعت بر سطوح جریان می‌باشد. بنابراین شرایط سرعت در یک مرز صلب ساکن را به

با توجه به عکس اصل کار مجازی $[V]$ ، برای یک زیررسته کافی است از حرکت‌های نرمال شده مجازی V_j ، شرایط استاتیکی کاملاً و به دقت برآورده می‌شوند:

$$\begin{aligned} &\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial V_j}{\partial X_i} dV \\ &= \int_{S_I} \tau_i V_j dS_L - p \int_{S_F} n_j V_j dS_F \\ &\quad + \int_{S_C} [(n_i \tau_i) n_j + m k t_j] V_j dS_C \end{aligned} \quad (1)$$

به طور کلی S شامل سه قسمت مجزا است مجزا تقسیم می‌شود که S_C سطح چسبیده (متصل) به ابزار یا نگهدارنده، S_F سطح آزاد و S_I سطح محل اتصال به ناحیه صلب، در صورت وجود می‌باشند. در معادله (۱)، τ_j نشان دهنده کشش یا فشار سطحی محاسبه شده از میدان تقریبی تنش σ_{ij} است. فشار یکنواخت سیال (p) می‌تواند روی سطح S_F وجود داشته باشد. تنش اعمال شده روی سطح S_C به وسیله تنش اصطکاکی ثابت mk (تنش تسلیم برشی جسم فرض می‌شود) بیان می‌شود. n_j برداری که عمود بر سطح به طرف خارج و t_j برداری که مماس در جهت خلاف نسبت به سرعت نسبی لغزشی در میدان تقریبی سرعت است. این روش در واقع برای هر نوع اصطکاکی قابل کاربرد است. تنش اصطکاکی ثابت برای سادگی به کار برده شده است.

۴- بررسی‌های ابتدایی

برای به کار بردن اصل اکسترمم یا معیار هیل در فرایندهای شکل دهی فلزات، شکل هندسی قطعه تغییر شکل یابنده در حالت پلاستیکی باید ارائه شود. بنابراین در فرایند نورد، اگر پخش عرضی مورد نظر باشد، کاربرد اصل اکسترمم یا روش هیل به صورت ساده و امکان پذیر نیست.

میدان‌های سرعت قابل قبول سینماتیکی حالت دائم به صورت زیر معرفی می‌شود. در بین تمام میدان‌های سرعت قابل قبول سینماتیکی، میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی حالت دائم، میدانی است که شکل موجود جسم را تغییر ندهد. بر اساس یکی از اصول اکسترمم، اگر میدان سرعتی که نرخ کل انرژی را مینیمم کند یا در رابطه هیل صدق

درستی این موضوع برای وقتی که کار سختی وجود ندارد قابل اثبات است).

معیار تسلیم طبق رابطه زیر به کار گرفته می شود:

$$\sigma'_z = k \quad (9)$$

که در این رابطه σ'_z مؤلفه تنش کاهش یافته در جهت z و k مقاومت تسلیم ماده در برش خالص می باشد. این معیار در سال ۱۹۵۰ توسط هیل ارائه شده است.

اگر نرخ کرنش ها را با استفاده از رابطه (۷) به دست آوریم، با توجه به رابطه (۹) و قانون لوی میسر داریم:

$$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{k} = 1 + \frac{h}{w} \frac{dw}{dh}$$

$$\frac{\sigma'_x - \sigma'_z}{k} = \frac{h}{w} \frac{dw}{dh} \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{xy}}{k} = \frac{-1}{2} y w h^2 \frac{d}{dh} \left(\frac{dw/dx}{h w^2} \right)$$

$$\frac{\tau_{xz}}{k} = \frac{-1}{2} z w h^2 \frac{d}{dh} \left(\frac{dw/dx}{w h^2} \right) \quad (11)$$

فرض شده که نوار از بین غلتک ها به وسیله کشش های مجازی که به صورت عمودی روی سطوح ورودی و خروجی عمل می کنند، کشیده شود. بنابر $4T_0$ و $4T$ نشان دهنده این کشش های مجازی روی سطوح ورودی و خروجی باشند. به واسطه قضیه اساسی محاسبه تغییرات و با توجه به اینکه η به طور کلی اختیاری فرض شده است، معیار هیل معادله دیفرانسیل زیر را نتیجه می دهد:

$$h \frac{dA(x)}{dx} + B(x) = 0 \quad 0 \leq x \leq 1$$

$$\frac{T_0}{h_0} = A(0), \quad \frac{T_1}{h(1)} = A(1) = \int_{h_1}^{h_0} B(x) \frac{dh}{dx} + \frac{T_0}{h_0} \quad (12)$$

که $A(x)$ و $B(x)$ از روابط زیر به دست می آیند:

$$A(x) = w(\sigma_x - \sigma_y) + \frac{1}{h} \frac{a}{dx} (h \int_0^w y \tau_{xy} dy)$$

$$A(x) = w(\sigma_x - \sigma_z) + \frac{1}{h} \frac{d}{dx} (w \int_0^h z \tau_{xz} dz) \quad (13)$$

۷- بررسی اصطکاک در رابطه هیل

در رابطه (۱)، اصطکاک به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$I = \int_{s_c} \pm mk t_j U_j ds_c \quad (14)$$

وسیله انتخاب تابع جریانی که مرز ابزار را به عنوان یک سطح جریان در نظر می گیرد، می توان ارضا کرد.

یکی از خاصیت های از فرایندهای حالت دائم، صفر بودن سرعت عمود بر سطح صلب است. اگر در طول سطح صلب تابع جریان ثابت بماند، این شرط سینماتیکی ارضا خواهد شد. یک انتخاب برای تابع جریان ψ که این شرایط را در نورد تخت ارضا کند، به صورت زیر است:

$$\psi = U \frac{-z}{h} \quad (5)$$

تابع جریان دیگر به گونه ای انتخاب می شود که میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی استخراج شده از توابع جریان، میدان سرعت حالت دائم باشد یا اینکه جسم را تغییر ندهد. فرض کنیم تابع جریان ψ به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$x = U \frac{y}{w} \quad (6)$$

با جایگذاری ψ و X در معادله (۴) میدان سرعت و شرایط مرزی به صورت زیر خواهد بود:

$$V_x = \frac{U}{wh}$$

$$V_y = U \frac{y}{w^2 h} \frac{dw}{dx}$$

$$V_z = U \frac{z}{wh^2} \frac{dh}{dx} \quad (7)$$

$$\left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=1} = 0$$

$$W(0) = W_0$$

۶- محاسبه تابع عرض نوار

برای هماهنگ کردن معادلات (۷) یک خانواده قابل مقایسه از حرکت نرمال شده متعامد به صورت زیر ارائه شده است:

$$U_x = \frac{U \eta}{h}$$

$$U_y = -U \frac{y}{h} \frac{d\eta}{dx}$$

$$U_z = -U \frac{z}{h} \frac{d\eta}{dx} \eta$$

$$\left. \frac{d\eta}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d\eta}{dx} \right|_{x=1} = 0 \quad (8)$$

که η یک تابع دلخواه از x می باشد.

برای حل معادله هیل، روش تغییرات که دارای سطوح پرشی در ورودی و خروجی هستند، را به کار می بریم

که در رابطه کلی هیل اثر داده می‌شود. که تابع عرض نوار برای حالتی که اصطکاک وجود دارد، به صورت زیر خواهد بود:

$$h \frac{dA(x)}{dx} + B(x) + C(x) = 0 \quad (20)$$

که $C(x)$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C(x) = \pm mk \left(\frac{w^2}{h_R W_R} - w \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \right) \sqrt{1+h'^2} \quad (21)$$

که h_R و w_R نشان دهنده مقادیر نصف ارتفاع و عرض ناحیه تغییر در نقطه خنثی می‌باشند. با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) و (۱۳) و (۲۱) و جایگزینی در رابطه (۲۰) تابع کلی عرض نوار به صورت یک معادله دیفرانسیل درجه ۴ به دست می‌آید که شرایط مرزی آن به صورت زیر است:

$$W(0) = w_0 \quad w'(0) = 0 \quad w'(1) = 0$$

$$w'''(0) = \frac{1}{\varphi(0)h(0)} \left[\frac{6}{w_0} - w''(0)h(0)\varphi(0) - w''(0) \right] \quad (22)$$

شرط مرزی آخری صفر بودن T_0 کشش از عقب می‌باشد. همچنین φ به صورت زیر تعریف شده است:

$$\varphi(x) = \frac{dx}{dh} = \frac{\sqrt{R^2 - (1-x)^2}}{1-x} \quad (23)$$

۸- حل مسئله تعریض با نرم افزار ABAQUS

فرایندهای شکل دهی، فرایندهایی کاملاً غیر خطی هستند. این مسئله موجب شده است که تحلیل این فرایند با کمک روشهای محاسباتی به تکنیک‌های پیچیده و همچنین پایدار نیاز داشته باشد. نرم افزار ABAQUS یکی از نرم افزارهایی است که در این زمینه از قابلیت‌های بسیار برجسته ای برخوردار است. از مزایای این نرم افزار نسبت به نرم افزارهای مشابه مانند ANSYS قدرتمندی در مش بندی‌های مختلف می‌باشد. با توجه به خصوصیات مسئله مورد بررسی در این پروژه و نیاز به مدل سازی سه بعدی و نیز پیچیدگی‌های تماس‌های موجود، بهترین انتخاب استفاده از نرم افزار ABAQUS بود.

در حالت کلی برای حل معادلات غیر خطی دو روش صریح^۱ و غیر صریح^۲ وجود دارد. روش حل غیر صریح

که t_j بردار مماس بر سطح تماس قطعه کار- ابزار در جهت خلاف حرکت نسبی آنهاست. رابطه فوق برای وقتی در نظر گرفته شده است که ابزار ثابت بوده و قطعه کار دارای حرکت می‌باشد. در نورد چون ابزار (غلتک‌ها) نیز دارای حرکت هستند، رابطه (۱۴) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$I = \int_{S_c} \pm mk |\Delta u| dS_c \quad (15)$$

که $|\Delta u|$ اندازه اختلاف سرعت بین قطعه کار و غلتک در سطح تماس می‌باشد. با توجه به میدان سرعت ارائه شده $|\Delta u|$ برابر است با:

$$|\Delta u| = U \sqrt{\left(\frac{y\eta'}{h} \right)^2 + \left(\frac{U_R}{U} - \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \eta \right)^2} \quad (16)$$

بنابراین اثر اصطکاک در رابطه هیل به صورت زیر خواهد بود:

$$I_1 = \pm mk U \int_0^1 \left\{ \sqrt{\left(\frac{w\eta'}{h} \right)^2 + \left(\frac{U_R}{U} - \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \eta \right)^2} + \frac{h}{|\eta'| w} \left(\frac{U_R}{U} - \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \eta \right)^2 \right. \\ \left. \times \ln \left[\left(\frac{wh'}{h} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{w\eta'}{h} \right)^2 + \left(\frac{U_R}{U} - \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \eta \right)^2} \right] \right\} w \sqrt{1+h'^2} dx \quad (17)$$

با توجه به اینکه سرعت فلز در جهت عرضی نسبت به جهت طولی خیلی کمتر است و اصطکاک در جهت طولی اثر بیشتری در تعریض دارد و همچنین به دلیل پیچیدگی رابطه (۱۷) از اصطکاک در جهت عرضی صرف نظر می‌شود. بنابراین:

$$I = \pm mk \int_0^1 \int_0^w \left(\frac{U_R}{U} - \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \eta \right) \sqrt{1+h'^2} dy dx \quad (18)$$

U_R سرعت مماسی غلتک می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت متوسط فلز در نقطه خنثی برابر با سرعت غلتک می‌باشد و با استفاده از قانون پیوستگی می‌توان در هر نقطه از ناحیه تغییر شکل نوشت:

$$I = \pm mk \int_0^1 \left[\left(\frac{w^2}{h_R W_R} - W \frac{\sqrt{1+h'^2}}{h} \right) \sqrt{1+h'^2} \right] \eta dx \quad (19)$$

معمولاً برای مسائل مناسب است که بتوان با تعداد نسبتاً کمی نمو^۱ به جواب دست یافت.

ABAQUS/Standard از این روش استفاده می‌کند. در روش صریح در قسمت ABAQUS/Explicit قابل دسترسی است که در این روش از الگوریتم انتگرال‌گیری تفاضل مرکزی^۲ استفاده می‌کند.

مشخصات فولاد AISI 1018 (نورد گرم) به کار رفته در این مدل سازی بصورت جدول زیر می‌باشد: [۸]

معمولاً برای مسائل مناسب است که بتوان با تعداد نسبتاً کمی نمو^۱ به جواب دست یافت.

ABAQUS/Standard از این روش استفاده می‌کند. در روش صریح در قسمت ABAQUS/Explicit قابل دسترسی است که در این روش از الگوریتم انتگرال‌گیری تفاضل مرکزی^۲ استفاده می‌کند.

مشخصات فولاد AISI 1018 (نورد گرم) به کار رفته در این مدل سازی بصورت جدول زیر می‌باشد: [۸]

جدول (۱) مشخصات فولاد AISI 1018

مقدار	مشخصه
۷۸۰۰ (kg/m^3)	چگالی
۱۹۰ (GPa)	مدول الاستیسیته
۰/۳	نسبت پواسون
۶۳۴ (MPa)	مقاومت کششی
۳۸۶ (MPa)	حد تسلیم

۹-۱- بررسی جریان فلز برای پیشگویی برآمدگی جانبی در نورد تخت

برای بررسی برآمدگی جانبی، فرایند نورد تخت به وسیله مراحل پی در پی فورجینگ تقریب زده می‌شود. در این قسمت افزایش طول یا تعریض متوسط در هر مرحله لازم است. با توجه به اینکه از نتایج قسمت قبل پروفیل تعریض و مشتقات آن در دست است، مقدار افزایش طول و یا تعریض در هر مرحله با استفاده از اطلاعات قسمت قبل محاسبه می‌شود. سیستم مختصات که در بررسی به کار برده شده است در شکل (۲) نشان داده شده است. ارتفاع ناحیه تغییر شکل $h(x)$ در طول مختصات x فقط با x تغییر می‌کند که مقدار آن از هندسه غلتک‌ها قابل محاسبه است. پروفیل تعریض $\bar{W}(x)$ که به عنوان تعریض متوسط مقطع در نقطه x در نظر گرفته شده است از محاسبات قبلی (روش هیل) به دست می‌آید.

۹-۲- فهرست اصطلاحات مربوط به پروفیل برآمدگی

عرض خروجی هرگز به صورت مستقیم نمی‌باشد و همواره دارای مقداری برآمدگی جانبی است. شکل پروفیل برآمدگی به شرایط نورد بستگی دارد در ادامه اصطلاحات مربوط به برآمدگی مصرفی شود.

با توجه به ابعاد شکل مقطع‌های خروجی نشان داده شده در شکل‌های (۳) و (۴)، پروفیل برآمدگی تکی وقتی تعریف می‌شود که عرض در مرکز یا نصف ضخامت مقطع نورد شده w_c مطابق شکل (۳)، برابر عرض ماکزیمم مقطع خروجی باشد.

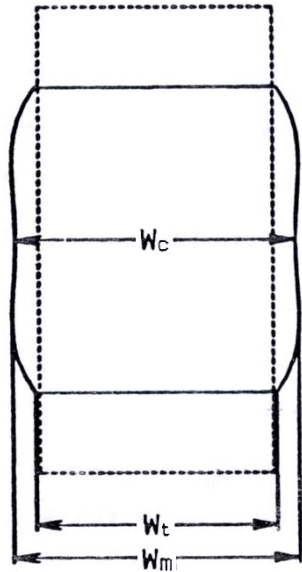
۹-۲- برآمدگی سطوح جانبی آزاد در نورد با غلتک‌های تخت

در واقع، در نورد میله و شمش، جریان فلز به صورت سه بعدی است. در طول فرایند فلز در بین غلتک‌ها در جهت طولی افزایش طول و در جهت عرضی، تعریض و سطوح جانبی آزاد در جهت ضخامت برآمده می‌شوند. مقدار برآمدگی جانبی خیلی زیاد به پارامترهای فرایند مانند اصطکاک، کاهش ارتفاع، نسبت‌های عرض به ارتفاع اولیه و قطر غلتک‌ها بستگی دارد. در این قسمت، روش حد بالایی برای پیشگویی برآمدگی جانبی به کار برده شده است. یک میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی که شامل برآمدگی است در نظر گرفته شده است. میدان سرعت به صورت تابعی از یک پروفیل فرضی سهموی با یک ضریب که نشان دهنده شدت برآمدگی در هر مقطع دلخواه در ناحیه تغییر شکل است، تعریف شده است.

نرخ کل انرژی هدر رفته به صورت تابعی از پارامتر مجهول محاسبه و نسبت به آن مینیمم می‌شود. تنش برشی اصطکاک

1- increment

2- central difference



شکل (۴) نمای شماتیکی پروفیل برآمدگی دوگانه

۱۰- بحث روی نتایج حاصل و نمودارها

در این مقاله مدلی برای حل مسئله نورد (تعریض و برآمدگی جانبی سطوح آزاد) با استفاده از روش هیل ایجاد شده است. این مدل برای حالت‌های مختلف نسبت‌های $m, \frac{R}{h_0}, \frac{w_0}{h_0}, \dots$ حل شده است و نتایج به دست آمده به صورت نمودارهایی رسم شده است که در این بخش به بحث بر روی نتایج به دست آمده و مقایسه با کارهای قبلی و نتایج آزمایشی موجود پرداخته می‌شود.

در شکل (۵) درصد تعریض در نورد بدون اصطکاک،

نسبت به درصد کاهش ضخامت برای نسبت‌های ۱، ۲، ۳ و $\frac{w_0}{h_0}$

رسم شده است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، تعریض در نورد با افزایش کاهش در ضخامت، افزایش

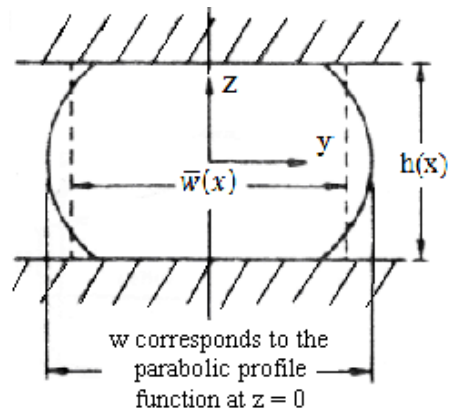
می‌یابد و با افزایش نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ ، کاهش می‌یابد و در حالت

حدی کرنش صفحه ای به سمت صفر میل می‌کند.

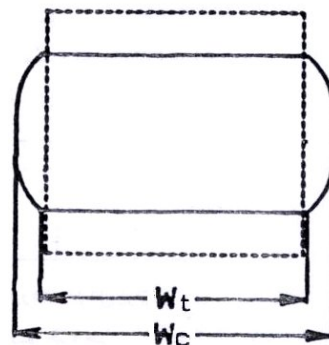
با مقایسه نتایج به دست آمده با استفاده از روش هیل و کارهای دیگر می‌توان گفت مقادیر به دست آمده با استفاده از روش هیل برای نورد نسبت به بقیه تئوری‌ها سازگاری بهتری با نتایج به دست آمده دارد.

برآمدگی دوگانه (شکل ۴) به حالتی گفته می‌شود که در آن عرض ماکزیمم w_m از عرض در مرکز w_c بیشتر باشد و برای حالتی که عرض از خروجی در بالای مقطع نورد شونده w_f کمتر از عرض میانی باشد، تعریف می‌شود. بنابراین برآمدگی دوگانه مربوط به حالتی است که $w_c < w_f$ و $w_c < w_f$ باشد.

گروه دیگری از پروفیل‌های برآمده دوگانه به عنوان حالت پیچیده تری با نام $h-g-b$ شناخته می‌شود که در آن حالت عرض در بالای مقطع w_f بیشتر از عرض مرکزی است. بنابراین پروفیل متناسب $h-g-b$ مربوط به حالتی است که $w_c > w_m$ و $w_c > w_f$ می‌باشد.



شکل (۵) هندسه مقطع میله نورد شونده با برآمدگی جانبی



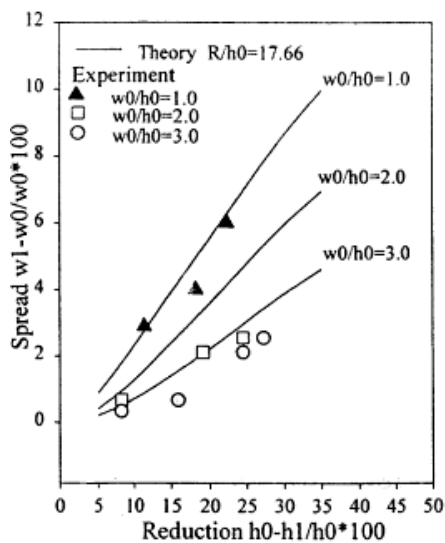
شکل (۶) نمای شماتیکی پروفیل برآمدگی تکی

سرعت دیگر به دست آورده بود [۳]. می توان گفت که تئوری به کار برده شده برای نسبت های $\frac{w_0}{h_0}$ بزرگتر از ۰/۴ قابل قبول است.

مدل ارائه شده برای پیشگویی برآمدگی در سطوح جانبی آزاد در نورد، با استفاده از شبیه سازی نورد به وسیله مراحل پی در پی فورجینگ و روش حد نهایی مقدار شدت برآمدگی در مقطع خروجی رامحاسبه می کند.

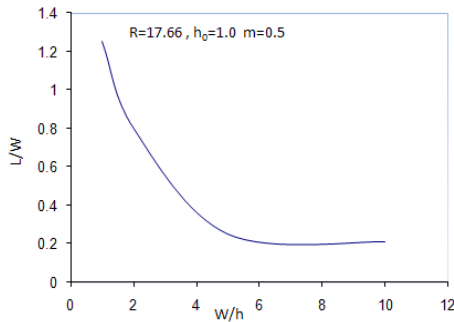
نتایج مدل برای مقادیر مختلف پارامترهای مستقل فرایند، نتایج نشان داده شده در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که از نتایج آزمایشی مشاهده می شود شدت برآمدگی جانبی، با افزایش $\frac{w_0}{h_0}$ کاهش می یابد. این رفتار توسط نتایج به دست آمده از تئوری به کار برده شده نیز تأیید می گردد.

در نورد ورق تخت، عرض ورق خارج شده از زیر غلتک ها در ابتدا کم بوده که این عرض بعد از قسمت ابتدایی ورق به مقدار معینی می رسد و ثابت می ماند. به طول متغیر ابتدایی ورق طول ناپایدار گویند. نتایج حاصل از شبیه سازی این مطلب را نشان می دهد که با افزایش عرض ورق نسبت به ضخامت آن، مقدار طول ناپایدار ورق کاهش می یابد (شکل ۹). این امر باعث کاهش ورق دور ریز حاصل از طول ناپایدار می باشد.



همچنین با به کار بردن ضرایب اصطکاک متفاوت حل های تئوری برای نورد تک کالیبره به صورت درصد تعریض بر حسب درصد کاهش ضخامت به دست آمده است. این نتایج برای نسبت های $\frac{w_0}{h_0}$ های متفاوت رسم شده است. شکل های (۶) و (۷) این نتایج را نشان می دهند. با توجه به نتایج به دست آمده و نتایج آزمایشی می توان مشاهده کرد، رفتار تعریض محاسبه شده با مقادیر آزمایشی مطابقت دارد. با مقایسه نتایج تئوری و آزمایشی می توان دریافت که با افزایش نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ اختلاف بین مقادیر تئوری و آزمایشی کاهش می یابد و این اختلاف برای نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ کوچکتر از یک نسبتاً زیاد می شود (مخصوصاً در کاهش های زیاد). بنابراین می توان گفت نتایج به دست آمده برای نسبت های $\frac{w_0}{h_0}$ بزرگتر از ۰/۷ قابل قبول است. همچنین اختلاف بین نتایج تئوری و آزمایشی را می توان به ساده سازی تأثیر اصطکاک در رابطه هیل ربط داد.

مدلی نیز برای پیشگویی برآمدگی سطوح جانبی برای فورجینگ یک مقطع مستطیلی نسبت به ضریب اصطکاک و نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ ایجاد شده است و برای مقادیر مختلف حل شده است. شکل (۸) نشان دهنده شدت برآمدگی جانبی سطوح در فورجینگ (یا در هر مرحله از مراحل مختلف نورد که به صورت مراحل پی در پی فورجینگ شبیه سازی شده است) می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، شدت برآمدگی (بسته به ضریب اصطکاک) تقریباً تا نسبت $\frac{w_0}{h_0} = ۰/۴$ افزایش می یابد و بعد از آن کاهش می یابد. با توجه به پروفیل انتخاب شده برای $w(z)$ می توان گفت که $\frac{w_0}{h_0} = ۰/۴$ مرز بین برآمدگی یگانه و دوگانه است. به دلیل اینکه پروفیل انتخاب شده نمی تواند بیان کننده برآمدگی دوگانه باشد با شکستگی در نمودار (نقطه $\frac{w_0}{h_0} = ۰/۴$) این موضوع نشان داده شده است و این همان نتیجه ای است که کندی با یک میدان



شکل (۹) بررسی اثر ضخامت روی طول ناپایدار ورق

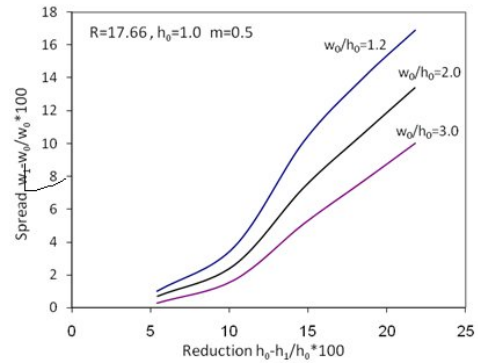
۱۱- نتیجه گیری

روش هیل برای نورد تخت، در حالت بدون اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت و به صورت مدل سه بعدی کامپیوتری، میزان تعریض و برآمدگی جانبی برای مقادیر مختلف پارامترهای مستقل سیستم محاسبه شد. بین نتایج حاصل از دو روش اندکی اختلاف وجود دارد که بیشتر به حالت بدون اصطکاک مربوط است. که بیشتر به هر حال بررسی‌ها، رفتار اصلی و ترکیب اصلی فرایندی که در آزمایش‌ها مشاهده می‌شود را پیشگویی می‌کنند.

با مقایسه نتایج به دست آمده با سایر تئوری‌ها، مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده سازگاری بهتری با نتایج تجربی دارد. این سازگاری هنگامی که اصطکاک در محدوده کاری در نظر گرفته شده باشد به شدت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در نورد گرم فولاد AISI 1018 با فاکتور اصطکاک ۰/۷۵ نتایج تئوری تطابق خوبی با نتایج آزمایشی دارند.

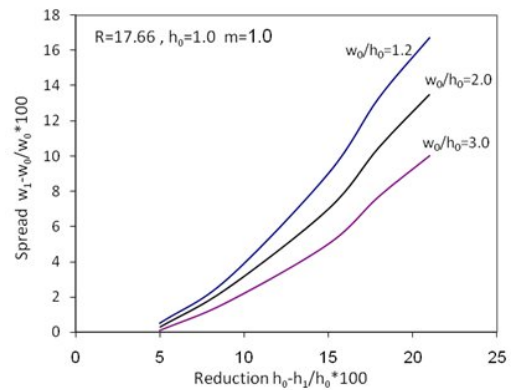
با شبیه سازی نورد به صورت فورجینگ‌های پی در پی میزان شدت برآمدگی سطوح به دست آمده و با مقادیر آزمایشی موجود مقایسه شده است. نتایج آزمایشی خیلی محدودی در دسترس می‌باشد. با وجود این، ارزیابی‌های ابتدایی نشان می‌دهند که شبیه سازی موجود را می‌توان برای پیشگویی برآمدگی سطوح جانبی در نورد به صورت نسبتاً دقیق به کار برد. همچنین می‌توان طول ناپایدار ابتدایی ورق را به کمک تغییر پارامترهای نورد در شبیه سازی بهینه ساخت و مقدار دور ریز حاصل از این طول ناپایدار را به حداقل رساند.

شکل (۵) تأثیر نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ روی تعریض در نورد بدون اصطکاک [3]



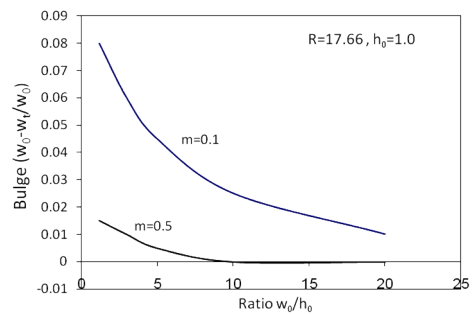
شکل (۶) تأثیر نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ روی تعریض در نورد تخت با فاکتور

$$m = 0.5 \text{ اصطکاک}$$



شکل (۷) تأثیر نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ روی تعریض در نورد تخت با فاکتور

$$m = 1 \text{ اصطکاک}$$



شکل (۸) بررسی اثر اصطکاک روی برآمدگی سطوح جانبی

۱۲- فهرست علائم

نرخ انرژی هدر رفته کلی، بر اثر تغییر شکل داخلی،

ناپوستگی سرعت و اصطکاک $\dot{E}_{tot}, \dot{E}_p, \dot{E}_d, \dot{E}_f$

ضخامت قطعه h

تنش تسلیم k

طول ناحیه تغییر شکل l

فاکتور اصطکاک m

بردار عمود بر سطح ناحیه تغییر شکل n_i

شعاع غلتک R

سطح چسبیده به ابزار S_c

سطح آزاد(جانبی) S_f

سطح داخلی(ورودی و خروجی) S_i

تابع شکل قطعه کار $S(X)$

بردار یکه مماس بر سطح قطعه t_i

دبی حجمی U

سرعت ورودی U_o

مؤلفه‌های میدان سرعت متعامد نرمال شده U_x, U_y, U_z

مؤلفه‌های میدان سرعت V_x, V_y, V_z

عرض قطعه W

محورهای مختصات x, y, z

شدت برآمدگی جانبی β

یک تابع دلخواه η

مؤلفه‌های میدان نرخ کرنش ε_i

تنش سطحی T_i

مؤلفه‌های میدان تنش $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$

تنش جریان $\bar{\sigma}$

توابع جریان ψ و X

کشش‌های فرضی در سطوح ورودی و خروجی T_o, T_i

سرعت نزدیک شدن غلتک‌ها به یکدیگر \dot{u}

مراجع

[2] Kobayashi, S. and Oh, S. I., An Approximate Method for a Three Dimensional Analysis of Rolling, *International Journal of Mechanics Science*, Vol. 17, 1975, pp. 293-305.

[3] Kennedy, K.F., A Method for Analyzing Spread, Elongation and Bulge in Flat Rolling, *Transaction ASME Journal of Engineering Industry*, Vol.11, 1987, pp. 305.

[4] Hill, R, A general method of analysis for metal-working processes, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.11, September 1963, pp. 306-326.

[5] Min WANG, He YANG, Zhi-chao SUN, Liang-gang GUO and Xin-zhe OU, Research on the influence of material properties on cold ring rolling processes by 3D-FE numerical simulation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol 16, December 2006, pp. 1274-1280

[6] Lanyun Li, He Yang, Lianggang Guo and Zhichao Sun, A control method of guide rolls in 3D-FE simulation of ring rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol205, Issues 1-3, 26 August 2008, pp. 99-110.

[7] Kobayashi, S. and Oh,S. I., An Approximate Method for a Three Dimensional Analysis of Rolling, *International Journal of Mechanics Science* , Vol. 17, 1975, pp. 293-305.

[۸] فضیله، الف، شبیه سازی اثر اصطکاک بر تعریض و برآمدگی جانبی در نورد تخت بوسیله نرم افزار ABAQUS، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد خمینی شهر، ۱۳۸۷.

[۹] سلیمی، م، صنیعی، م، بررسی فرایند نورد سرد همراه با روغنکاری تحت رژیم روانکاری مخلوط، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

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

[1] Gokyu, I., Kihara, J. and Mae, Y., Lubrication in steel strip rolling, *Technology of plasticity Society of Japan* ,Vol. 20, December 1987, pp. 316-321.

