

اثرات اصطکاک بر تعریض و برآمدگی در نورد تخت

سیدرضا یاسینی
دانشجوی کارشناسی ارشد

محمود سلیمی
استادیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این مقاله یک مدل نظری برای شبیه سازی سه بعدی نورد تخت معرفی و توسعه بیشتری یافته است، تا اثر اصطکاک بر پخش عرضی مطالعه شود. برای پیشگویی مقدار برآمدگی در سطوح جانبی، فرآیند 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 تئوری مدل سازگاری خوبی را با مقادیر تجربی ارائه شده توسط دیگر پژوهشگران نشان می دهد.

Frictional Effects on Spread and Bulge in Flat Rolling

M. Salimi
Assistant Professor

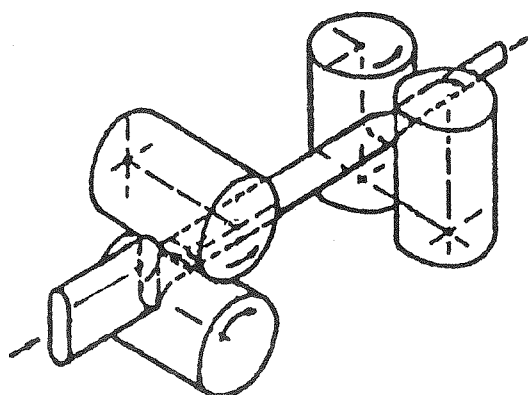
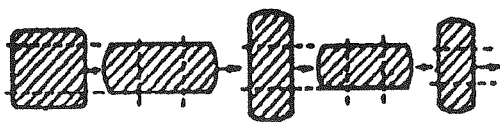
S.R. Yassini
Graduate Student

Department of Mechanical Engineering
Isfahan University of Technology

Abstract

In this paper a theoretical model for simulating three dimensional deformation in rolling of flat product is presented and further developed to study the frictional effect on spread. To predict the magnitude of bulging the rolling process is approximated by successive forging steps. The elongation or the average spread at each step from the previous calculations are used in the model. The theoretical results of the model is in a good agreement with the experimental values given by other investigators.

بیشتر تئوری های نورد به تخمین بار و گشتاور و یا بررسی تنش ها با فرض کرنش صفحه ای محدود می شوند. کومار و همکارانش [۱] به بررسی تغییر شکل های ناحیه تغییر شکل در نورد گرم تختال پرداخته اند و هانگ و همکارانش [۲] با استفاده از روش اجزاء محدود جریان فلز، فشار غلتک و دما را در نورد گرم تختال بررسی کرده اند. بایومی [۳] به بررسی تنش های لبه ای در نورد گرم تختال های پهن پرداخته است. در نورد صفحات علاوه بر موارد بالا تعریض نیز در بیشتر موارد مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال زاهارف و همکارانش [۴] به بررسی تعریض در نورد صفحه پرداخته اند. اما اکثر تئوری هایی که برای تغییر شکل سه بعدی نورد وجود دارد به صورت آزمایشی مورد مطالعه قرار گرفته اند.



شکل (۱) يك مثال از نورد تختال در ایستگاه مقدماتی که بیان کننده نورد به روش مربع یا گوشه های گرد شده می باشد.

مک گرگور و کافین [۵] بر روی میله های مسی آزمایش هایی انجام داده اند که به طور کلی نورد آنها در چندین عبور مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تعریض در نورد چندین رابطه تجربی ارائه نموده اند. چیتکارا و جانسون [۶] آزمایش هایی از نورد میله های سربی انجام داده اند و تعریض به دست آمده را با فرمول های تجربی مقایسه کرده اند. گوکیو و همکارانش [۷] با به کار بردن اصل کار

فرآیند نورد به خاطر قابلیت تغییر، کارایی و نرخ تولید بالا نقش مؤثری در تولید محصولاتی که دارای سطح مقطع یکنواخت هستند دارد. برای افزایش کیفیت محصولات یا تولید محصولاتی با شکل های جدید یا ماده های جدید و یا نورد با سرعت های بالا، طراحی کالیبر و آنالیز فرآیند از راه آزمایش، پر هزینه و وقت گیر می باشد. بنابراین ارائه روش های بررسی تغییر شکل های پیچیده و سه بعدی فلز در نورد تخت باعث افزایش کارایی در طراحی و آنالیز فرآیندهای نورد می شود.

اگر چه میزان تعریض بیشتر به پارامترهای مستقل فرآیند، مانند ابعاد سطح مقطع ورودی، درصد کاهش ارتفاع، نسبت های قطر غلتک به ضخامت و 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 نمی باشد. بنابراین موضوع تعریض همواره یکی از مسائل قابل توجه در نورد مقاطع می باشد.

ایستگاه فشرده، یکی از کاربردهای نورد بدون شیار تخت است که از تکنیک نورد باز^(۱) با نام روش مربع یا گوشه های گرد شده^(۲) استفاده می شود. یک مثال از این روش در شکل (۱) نشان داده شده است که بیان کننده اهمیت پیشگویی میزان تعریض و برآمدگی سطوح جانبی در طراحی اینگونه ایستگاه های نورد است. این روش بشکه ای شدن و برآمدگی سطوح جانبی یک تختال را با سطوح جانبی آزاد به طرف جلو بهبود می بخشد. تجربه ثابت کرده است که این روش از ایجاد عیوب نوردی مانند ترک های سطحی و درزها که باعث کاهش بهره وری ایستگاه می شوند، جلوگیری می کند، عیوبی که می توانند یک مسئله مهم با تغییر شکل از نوع برآمدگی جانبی دوگانه باشند.

بنابراین برای نورد مؤثر محصولات مسطح، توانایی پیش بینی مقدار تعریض و برآمدگی سطوح جانبی یکی از مسائل مهم می باشد و ارائه و بررسی روش های مهندسی کیفی و کمی برای بررسی جریان مواد و طراحی کالیبر لازم و ضروری است.

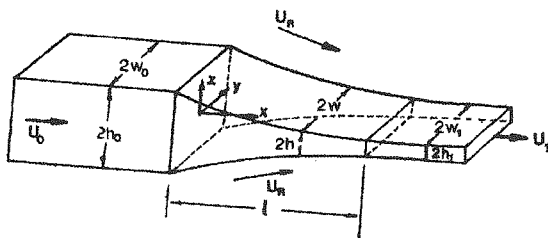
در نورد نوارهای عریض یا صفحات، که نسبت پهنا به ضخامت آنها بیشتر از ۱۰ است، افزایش عرض معمولاً قابل صرف نظر کردن است و مسئله را می توان به صورت کرنش صفحه ای در نظر گرفت. بنابراین

حالت کلی سازگاری خوبی بین تئوری و آزمایش برای نرخ تغذیه بالا وجود دارد. برای نرخ تغذیه کم، نتایج تئوری کمی از نتایج آزمایشی فاصله می‌گیرند و دلیل آن را پیچیدگی تغییر شکل پلاستیکی واقعی نسبت به آنچه در تئوری در نظر گرفته شده است، بیان کرده‌اند.

۲- بررسی هندسه ناحیه تغییر شکل

در فرآیند نورد تخت، یک میله با سطح مقطع مستطیلی بین یک جفت از غلتک‌های استوانه‌ای 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 به وسیله I نشان داده می‌شود.

مانند آنچه در شکل (۲) نشان داده شده است، سیستم مختصات کارتزینی با محورهای x ، 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 کرنش در طول ضخامت صرف نظر شده است. همچنین فرض شده که در هر مقطع از ناحیه تغییر شکل پروفیل قطعه کار به صورت مستطیل باقی می‌ماند.



شکل (۲) هندسه قطعه کار هنگام نورد.

۳- روش عمومی هیل

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

مینیمم برای نورد تخت و ساده‌سازی‌هایی که شامل فرضیه‌های توزیع تنش یکنواخت در سطح تماس قطعه کار - غلتک و فرم درجه دو برای پروفیل تعریض می‌باشد، یک رابطه برای تعریض ارائه کرده‌اند. کوبایشی و اس.ای.اوه [۸]، یک تئوری براساس اصل اکسترمم برای مواد صلب - تماماً خمیری برای بررسی تغییر شکل سه بعدی در نورد ارائه نموده‌اند و تعریض جانبی، گشتاور و نقاط خنثی را به صورت تئوری برای نورد به دست آورده‌اند. کندی [۹] با ارائه یک میدان سرعت یک روش برای بررسی تعریض، افزایش طول و برآمدگی جانبی ارائه کرده است. روش او بر روش حد نهایی استوار است.

هیل [۱۰]، نرمی ماده را با اصول دقیقی ترکیب کرد و یک روش جدید برای بررسی فرآیندهای شکل دهی صنعتی ارائه کرد. او جزئیات روش را طبق اصول معینی دسته‌بندی کرد و با بررسی‌های ابتدایی فشار ناهمگن، کشش میله و آهنگری (فورجینگ) را تشریح کرد.

در حالت ایده‌آل، یک روش تقریبی خوب باید توانایی تجدید کردن (دوباره به وجود آوردن)، پیشگویی فرآیند اصلی و دادن اطلاعات قابل اعتماد درباره بارها و تغییرات ابعاد اصلی را داشته باشد. همچنین باید از قوانین عمومی که به درستی تعریف شده‌اند، پیروی کند. ولی باید به اندازه کافی انعطاف پذیر باشد تا تمام حالت‌های ممکن اعم از خواص دلخواه مواد، انواع مختلف اصطکاک و هر نوع شکل ابزار را پوشش دهد. طبق اظهارات هیل روش او به ایده‌آل خیلی نزدیک است و نشان داد که نتایج آزمایشی انجام شده با تئوری او تطابق خوبی داشته است، اما ارزیابی نهایی احتیاج به زمان بیشتر و تحقیقات گوناگون بعدی دارد.

از آن موقع تاکنون به جز چند مورد استثناء تحقیقات دیگری روی این روش صورت نگرفته است [۱۲، ۱۳، ۱۱]. کوبایاشی و لاهوتی [۱۴] با به کار بردن روش هیل، فشردن رینگ با برآمدگی سطوح جانبی، تعریض در کشش میله و تغییر ضخامت لوله به وسیله کشش از بین قالب را مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با بقیه تئوری‌های موجود مقایسه کردند. آنها اظهار کرده‌اند که نتایج به دست آمده با استفاده از روش هیل برای این سه مورد خاص نسبت به بقیه تئوری‌ها با نتایج آزمایشی سازگاری بهتری دارد. لوگورا و براملی [۱۵] نیز روش هیل را برای بررسی تعریض در نورد رینگ بدون اصطکاک به کار بردند. آنها اظهار کردند که در

باتوجه به عکس اصل کار مجازی [۱۰]، برای یک زیر رسته کافی از حرکت های نرمال شده مجازی V_j ، شرایط استاتیکی کاملاً و به دقت برآورده می شوند، وقتی که:

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial V_j}{\partial x_i} dV = \int_{S_I} \tau_j V_j ds_I - \pi \int_{S_F} n_j V_j ds_F + \int_{S_C} [(n_i \tau_i) n_j + mk t_j] V_j ds_C \quad (1)$$

به طور کلی S شامل سه قسمت مجزا است: $S = S_C + S_I + S_F$ ، که S_C سطح چسبیده (متصل) به ابزار یا نگهدارنده، S_F سطح آزاد یا محدود نشده و S_I سطح محل اتصال به ناحیه صلب، اگر وجود داشته باشند، می باشند. در معادله (۱)، τ_j نشان دهنده کشش یا فشار سطحی محاسبه شده از میدان تقریبی تنش σ_{ij} می باشد. روی سطح S_F یک فشار یکنواخت سیال (π) می تواند وجود داشته باشد. تنش اعمال شده روی سطح S_C به وسیله تنش اصطکاکی ثابت (mk) تنش تسلیم برشی جسم فرض می شود) بیان می شود. 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 می باشد، تنش اصطکاکی ثابت برای سادگی به کار برده شده است. میدان سرعت نرمال شده متعامد V_j انتخاب شده، باید به اندازه کافی گسترده و از یک زیرفضای رسته تقریبی خاص باشد. برای نمونه اگر رسته ای که با معادلات صحیح تعریف شده است، شامل یک تابع دلخواه مکان باشد، زیر رسته نرمال شده متعامد V_j نیز باید دارای یک تابع دلخواه یکتا از مکان باشد. وقتی که خانواده میدان سرعت برای حل معادله (۱) انتخاب شد، از تکنیک تغییرات (2) استفاده می شود و با V_j به صورت یک تغییر، رفتار می شود. در نهایت سیستمی از معادلات تعادل و شرایط مرزی متناسب با رسته تقریبی میدان سرعت انتخاب شده به دست می آید که اجزاء آن به صورت یکتا قابل محاسبه می باشد.

۸- بررسی های ابتدایی

برای به کار بردن اصل اکسترمم یا معیار هیل در فرآیندهای شکل دهی فلزات، شکل هندسی قطعه تغییر شکل یابنده در حالت پلاستیکی باید ارائه شود. بنابراین

در فرآیند نورد، اگر پخش عرض مورد نظر باشد، کاربرد اصل اکسترمم یا روش هیل به صورت ساده و راست نمی باشد.

میدان های سرعت قابل قبول سینماتیکی حالت دائم به صورت زیر معرفی می شود. در بین تمام میدان های سرعت قابل قبول سینماتیکی، میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی حالت دائم میدانی است که شکل موجود جسم را تغییر ندهد. پس براساس یکی از اصول اکسترمم، اگر میدان سرعتی که نرخ کل انرژی را مینیمم کند یا در رابطه هیل صدق کند، یک میدان سرعت حالت دائم برای یک شکل خاص جسم (شکل سطح) می باشد. این شکل جسم را همانند میدان سرعت می توان به عنوان جواب مسئله حالت دائم بدون محدودیت پذیرفت. بنابراین، مسئله به همراه میدان سرعت $V(x)$ یک تابع شکل $S(x)$ دیگر را با شرایط مرزی اضافی زیر شامل می شود:

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

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

شرط 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 (فرمولبندی) میدان سرعت

براساس مفهوم توابع جریان دو گانه، یک میدان سرعت برای جسم تراکم پذیری در یک فضای سه بعدی، به صورت دو تابع جریان قابل بیان است. مؤلفه های سرعت را در جریان تراکم ناپذیر می توان به صورت زیر نوشت:

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

یا:

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \chi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \chi}{\partial y}$$

$$V_y = \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \chi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \chi}{\partial z}$$

$$V_z = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \chi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \chi}{\partial x} \quad (4)$$

۶- محاسبه تابع عرض نوار

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

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{U\eta}{h} \\ U_y &= -U \frac{y}{h} \frac{d\eta}{dx} \\ U_z &= U \frac{z}{h} \frac{dh}{dx} \eta \\ \frac{d\eta}{dx} \Big|_{x=0} &= 0 = \frac{d\eta}{dx} \Big|_{x=1} \end{aligned} \quad (8)$$

که η یک تابع دلخواه از x می‌باشد.

برای حل معادله هیل، روش تغییرات که دارای سطوح پرشی در ورودی و خروجی می‌باشد، را به کار می‌بریم (درستی این موضوع برای وقتی که کار سختی وجود ندارد قابل اثبات است).

اگر برای معیار تسلیم رابطه زیر به کار گرفته شود به اندازه کافی دقیق خواهد بود:

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

که σ'_z مؤلفه تنش کاهش یافته در جهت z و k مقاومت تسلیم ماده در برش خالص می‌باشد. این معیار در سال ۱۹۵۰ توسط هیل [۱۶] ارائه شده است. اگر نرخ کرنش‌ها را با استفاده از رابطه (۷) به دست آوریم، با توجه به رابطه (۹) و قانون لوی میسر داریم:

$$\begin{aligned} \frac{(\sigma'_x - \sigma'_y)}{k} &= 1 + 2 \frac{h}{w} \frac{dw}{dh} \\ \frac{(\sigma'_x - \sigma'_z)}{k} &= 2 \frac{h}{w} \frac{dw}{dh} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{xy}}{k} &= \frac{-1}{2} y w h^2 \frac{d}{dh} \left(\frac{dw/dx}{hw^2} \right) \\ \frac{\tau_{xz}}{k} &= \frac{-1}{2} z w h^2 \frac{d}{dh} \left(\frac{dw/dx}{h^2 w} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

فرض شده که نوار از بین غلتک‌ها به وسیله

که V_x, V_y, V_z مؤلفه‌های بردار سرعت در مختصات کار تزیینی و ψ و χ دو تابع جریان می‌باشند.

مقادیر ثابت توابع ψ و χ ، 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 وسیله انتخاب تابع جریانی که مرز ابزار را به عنوان یک سطح جریان در نظر می‌گیرد، می‌توان ارضا کرد.

یک خاصیت از فرآیندهای حالت دائم، صفر بودن سرعت عمود بر سطح صلب می‌باشد. 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:

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

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

تابع جریان دیگر به گونه‌ای انتخاب می‌شود که میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی استخراج شده از توابع جریان یک میدان سرعت دائم باشد یا اینکه جسم را تغییر ندهد. اجازه دهید تابع جریان χ به صورت زیر در نظر گرفته شود:

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

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

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{U}{wh} \\ V_y &= U \frac{y}{w^2 h} \frac{dw}{dx} \\ V_z &= U \frac{z}{wh^2} \frac{dh}{dx} \end{aligned} \quad (7)$$

با شرایط مرزی:

$$\frac{dw}{dx} \Big|_{x=0} = 0 = \frac{dw}{dx} \Big|_{x=1}$$

$$w(0) = w_0$$

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

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

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

باتوجه 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 (17) از اصطکاک در جهت عرضی صرفنظر می شود. 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 می باشد. باتوجه به اینکه سرعت متوسط فلز در نقطه خنثی برابر با سرعت غلتک می باشد و با استفاده از قانون پیوستگی می توان در هر نقطه از ناحیه تغییر شکل نوشت:

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

که در رابطه کلی هیل اثر داده می شود. 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 می آید:

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

که h_R و w_R نشان دهنده مقادیر نصف ارتفاع و عرض ناحیه تغییر در نقطه خنثی می باشند. با استفاده از روابط (10) و (11) و (13) و (21) و جایگزینی در

کشش های مجازی که به صورت عمودی روی سطوح ورودی و خروجی عمل می کنند، کشیده شود. بنابراین اگر $4T_1$ و $4T_0$ نشان دهنده این کشش های مجازی روی سطوح ورودی و خروجی باشند. به واسطه قضیه اساسی محاسبه تغییرات و باتوجه به اینکه η به طور کلی اختیاری فرض شده است، معیار هیل معادله دیفرانسیل زیر را نتیجه می دهد:

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

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

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

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

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

۷- بررسی اصطکاک در رابطه هیل

در رابطه هیل (1)، اصطکاک به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

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

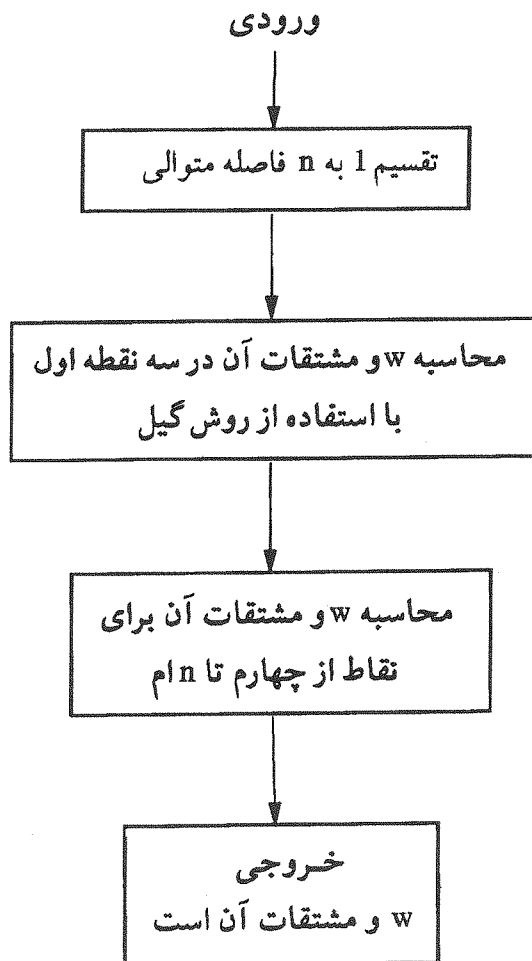
که t_j بردار مماس بر سطح تماس قطعه کار - ابزار در جهت خلاف حرکت نسبی آنهاست. رابطه فوق برای وقتی در نظر گرفته شده است که ابزار ثابت بوده و قطعه کار دارای حرکت می باشد. در نورد چون ابزار (غلتک ها) نیز دارای حرکت هستند، رابطه (14) به رابطه زیر تبدیل می شود:

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

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

نمی‌کند. به دلیل اینکه وقتی اندازه دامنه انتگرال گیری از ۱۹۹۵/ تا ۰/۹۹۱ تغییر می‌کند، تغییری در جواب‌ها مشاهده نمی‌شود.

باتوجه به اینکه معادله (۲۲) نسبت به شرایط مرزی ورودی حساس می‌باشد، از روش گیل برای سه نقطه اول و بعد از روش پیشگو - اصلاح کننده آدامس - بشفورت درجه ۳ - آدامس - ملتون درجه ۴ [۱۷] برای بقیه نقاط استفاده شده است. در شکل (۳) الگوریتم حل مسئله تعریض با استفاده از روش هیل در نورد تخت بدون اصطکاک ارائه شده است.



شکل (۳) فلوچارت داخلی A(x).

در حالتی که اصطکاک در نظر گرفته می‌شود، چون محل قرار گرفتن نقطه خنثی از ابتدا مشخص نمی‌باشد، یک حلقه تکرار برای به دست آوردن محل نقطه خنثی به الگوریتم ارائه شده در شکل (۳) افزوده می‌شود.

رابطه (۲۰) تابع کلی عرض نوار به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 & w'''' w^2 \phi h + 2w''' w^2(1 + \phi'h) - 4w'' w' w(3 + \phi'h) - 8w'' w^2 \phi h + \\
 & w'' w^2 (\phi'' h + \frac{\phi'}{\phi} - \frac{1}{\phi h}) - w'' h (\frac{1}{\phi} + 12\phi) - 2w'' w \phi h + \\
 & 4w^3(2 + \phi'h) - 2w^2 w (\frac{1}{\phi h} + \phi'h + \frac{\phi'}{\phi}) + w w^2 (\frac{1}{h^2 \phi^2} + \frac{\phi'}{h \phi^2}) - \\
 & w' (\frac{\phi' h}{\phi^2} + \frac{5}{\phi^2} + 12\phi' h + 24) + w (\frac{h \phi'^2}{\phi^3} + \frac{\phi'}{\phi^3} - \frac{4}{h \phi^3} - \frac{12}{h \phi} \cdot \frac{h \phi''}{\phi^2}) \\
 & \pm \frac{m}{6} (\frac{w^2}{h_R w_R} - \frac{w}{h} (1 + \frac{1}{\phi^2})^{\frac{1}{2}}) (1 + \frac{1}{\phi^2})^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (22)
 \end{aligned}$$

بنابراین یک معادله دیفرانسیل درجه ۴ به دست می‌آید که شرایط مرزی آن به صورت زیر است:

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

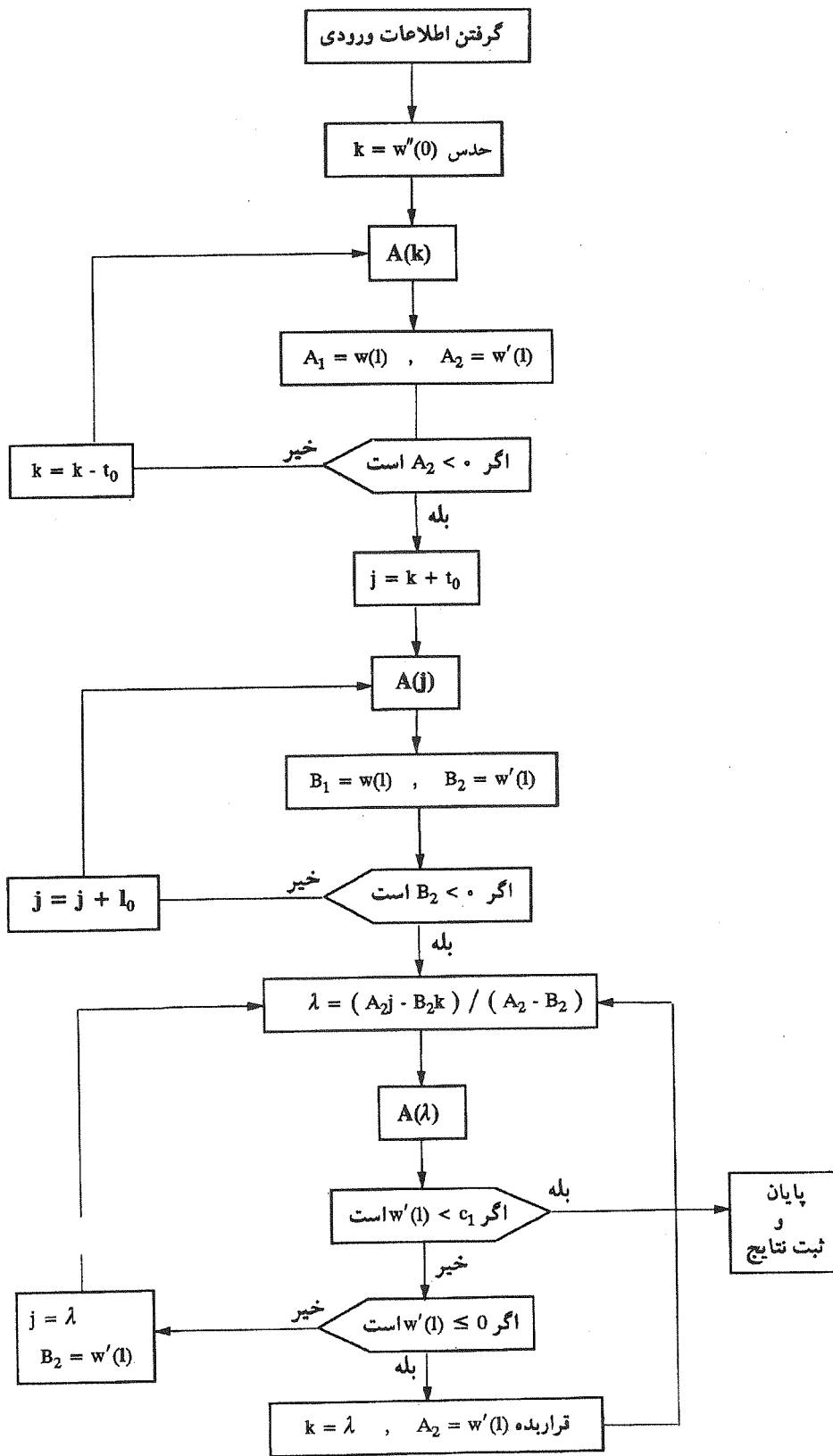
$$w'''(0) = \frac{1}{\phi(0)h(0)} \left[\frac{6}{L w_0} - w''(0)h(0)\phi(0) - w''(0) \right]$$

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

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

۸ - الگوریتم حل مسئله تعریض در نورد به وسیله روش هیل

معادله (۲۲) که یک معادله دیفرانسیل مرتبه ۴ با سه شرط مرزی در سطح مقطع ورودی و یک شرط مرزی در خروجی می‌باشد را می‌توان به عنوان یک مسئله مقدار - اولیه با حدس صحیح از w'' در ورودی در نظر گرفت. به دلیل اینکه $w'(x)$ باید در خروجی صفر باشد، به دست آوردن حدس درست w'' در ورودی به یک مسئله بهینه‌سازی تابع $w(x)$ در $x=1$ تبدیل می‌شود که برای این منظور از روش ریشه مستقیم [۱۶] استفاده شده است. تابع $\phi(x)$ در $x=1$ منفرد می‌باشد. یک تقریب به وسیله تعریف دامنه انتگرال گیری ۰/۹۹۹۱ به جای ۱ انجام شده است. به نظر می‌رسد که این اصلاح در ناحیه تغییر شکل پلاستیکی تغییر محسوسی در جواب‌ها ایجاد

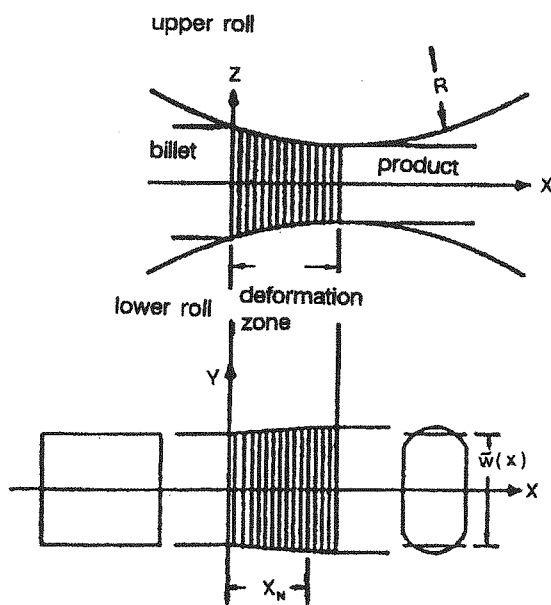


شکل (۳) فلوجارت حل مسئله تعریف در نورد تخت بدون اصطکاک.

هر مرحله لازم می باشد، باتوجه به اینکه از نتایج قسمت قبل پروفیل تعریض و مشتقات آن در دست می باشد، مقدار افزایش طول و یا تعریض در هر مرحله با استفاده از اطلاعات قسمت قبل محاسبه می شود.

سیستم مختصات و تقسیم ناحیه تغییر شکل به مقاطع عمودی که در این بررسی به کار برده شده است در شکل (۵) نشان داده شده است. ارتفاع ناحیه تغییر شکل $h(x)$ در طول مختصات x فقط با x تغییر می کند که مقدار آن از هندسه غلتک ها 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 می آید.

یک میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی که قبلاً به وسیله ناقپال و کلوس [۱۹] ارائه شد، برای پیشگویی برآمدگی به کار برده شده است. سیستم مختصات به کار برده شده برای بررسی مقطع عمودی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵) هندسه ناحیه تغییر شکل در نورد میله با برآمدگی.

تابع $w(z)$ که نشان دهنده پروفیل برآمدگی در محل x از ناحیه تغییر شکل است را می توان به صورت تابع سهموی در نظر گرفت. فرض شده است که غلتک های بالایی و پایینی در هر مرحله با سرعت های مساوی ω و ω_2 به هم نزدیک شوند. میدان سرعت ارائه شده توسط ناقپال و کلوس به صورت زیر خواهد شد:

عرض و ضخامت ورودی، سرعت ورودی، سرعت غلتک، درصد کاهش ارتفاع، قطر غلتک و ضریب اصطکاک اطلاعات ورودی و پروفیل تعریض $w(x)$ و درصد تعریض نهایی خروجی برنامه می باشند.

جعبه $A(x)$ زیر برنامه ای است که $w''(x)$, $w'(x)$, $w(x)$ را در هر مرحله محاسبه می کند که فلوچارت آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

۹- برآمدگی سطوح جانبی آزاد در نورد با غلتک های تخت

در واقع، در نورد میله و شمش، جریان فلز به صورت سه بعدی است. در طول فرآیند فلز در بین غلتک ها در جهت طولی افزایش طول و در جهت عرضی تعریض و سطوح جانبی آزاد در جهت ضخامت برآمده می شوند. مقدار برآمدگی جانبی خیلی زیاد به پارامترهای فرآیند مانند: اصطکاک، کاهش ارتفاع، نسبت های عرض به ارتفاع اولیه و قطر غلتک به ارتفاع اولیه 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 می شود. تنش برشی اصطکاک $\tau = mk = \frac{\sqrt{3}}{3}$ (ضریب اصطکاک) در سطح تماس قطعه کار با غلتک ها به عنوان یک جزء ثابت از تنش ماده در نظر گرفته شده است، در حالی که کرنش ها و نرخ کرنش ها در هر نقطه از ناحیه تغییر شکل محاسبه شده است. تنش جریان ماده را تابعی از کرنش و نرخ کرنش در دمای نورد در نظر گرفته ایم. از محاسبه پارامتر مجهول شدت برآمدگی در هر مقطع و در نهایت در مقطع نهایی به دست می آید.

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

برای بررسی برآمدگی جانبی، فرآیند نورد تخت به وسیله مراحل پی در پی فورجینگ تقریب زده می شود [۱۸]. در این قسمت افزایش طول یا تعریض متوسط در

تغییر شکل یافته و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش مؤثر است که به وسیله رابطه زیر بیان می شود:

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (29)$$

با به کار بردن معادله (22) و محاسبه نرخ کرنش مؤثر و جایگذاری در معادله (27) برای فورجینگ کرنش صفحه ای نرخ انرژی تغییر شکل پلاستیکی به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{E}_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} a_0 \int_0^h g''(x) \{w(z) \sqrt{4 \frac{g'(z)^2}{g''^2(z)} + w(z)^2}$$

$$+ \frac{4g'(z)^2}{g''(z)^2} \ln \left| \frac{w(z) + \sqrt{4 \frac{g'(z)^2}{g''^2(z)} + w(z)^2}}{2 \frac{g'(z)}{g''(z)}} \right| dz \quad (30)$$

یا انتگرال گیری عددی از رابطه فوق به وسیله روش سیمپسون [17]، نرخ انرژی تغییر شکل پلاستیکی برآورد می شود. باتوجه به اینکه ماده را صلب - تماماً پلاستیک در نظر گرفته ایم، نرخ انرژی هدر رفته به وسیله ناپیوستگی سرعت \dot{E}_d صفر در نظر گرفته شده است. نرخ انرژی اصطکاک برابر است با:

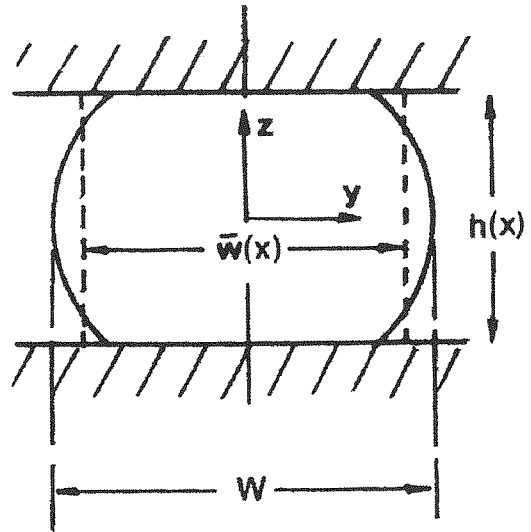
$$\dot{E}_f = \int_{S_c} m k \cdot |\Delta v| \cdot ds \quad (31)$$

که Δv اختلاف سرعت نسبی بین قطعه کار و سرعت محیطی غلتک در سطح تماس می باشد و S_c سطح تماس بین قطعه کار و غلتک می باشد. با جایگزینی برای Δv در معادله فوق داریم:

$$\dot{E}_f = \frac{2}{\sqrt{3}} m \bar{\sigma} \int_0^{w(h)/2} |V_y| dy \quad (32)$$

که مقدار V_y سرعت در سطح تماس با غلتک ($z=1$) و تغییرات عرض در این سطح با $w(1)$ نشان داده شده است. با قرار دادن مقدار V_y از معادله (24) و انتگرال گیری، \dot{E}_f به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{E}_f = \frac{1}{2\sqrt{3}} a_0 \cdot \bar{\sigma} \cdot m w^2(h) g'(h) \quad (33)$$



شکل (۶) هندسه مقطع میله نورد شونده با برآمدگی جانبی.

$$v_x = a_0 y g'(x), \quad v_y = -a_0 g(z) \quad (24)$$

که برایم نشان دهنده مشتق نسبت به z است و

$$g(z) = z \left(1 - \beta \frac{z^2}{h^2}\right) \quad (25)$$

و

$$a_0 = \frac{\dot{u}}{g(h)} \quad (26)$$

\dot{u} تابعی از افزایش طول در هر مرحله یا تعریض می باشد.

معادله (25) شامل یک پارامتر مجهول β است که شدت برآمدگی جانبی را در هر مقطع نشان می دهد. نرخ کل انرژی هدر رفته را به صورت مجموع اجزاء زیر بیان می کنیم: نرخ انرژی هدر رفته تغییر شکل پلاستیکی \dot{E}_p نرخ انرژی هدر رفته به وسیله ناپیوستگی سرعت \dot{E}_d نرخ انرژی هدر رفته بر اثر اصطکاک \dot{E}_f .

$$\dot{E}_t = \dot{E}_p + \dot{E}_d + \dot{E}_f \quad (27)$$

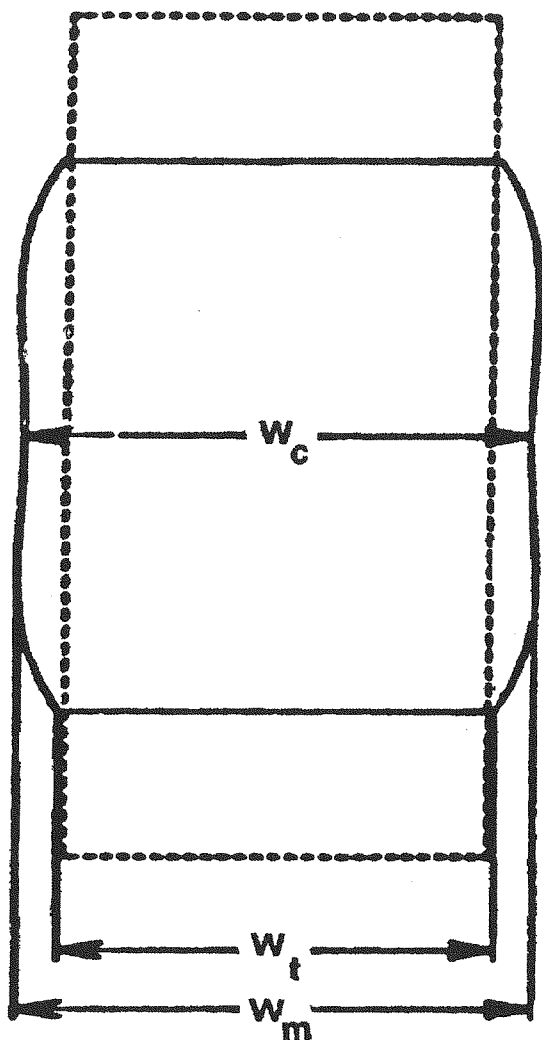
نرخ انرژی تغییر شکل پلاستیکی برابر است با:

$$\dot{E}_p = \int_V \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon} dv \quad (28)$$

که $\bar{\sigma}$ تنش جریان ماده تغییر شکل یافته، v حجم ماده

برای حالتی که عرض خروجی در بالای مقطع نورد شوند w_t کمتر از عرض میانی می باشد، تعریف می شود. بنابراین برآمدگی دوگانه متناسب با حالتی است که $w_m > w_c$ و $w_t < w_c$ باشد.

- یک گروه دیگر از پروفیل های برآمده دوگانه برای حالت پیچیده تری با نام $h - g - b$ (۴) شناخته می شود که در آن حالت عرض در بالای مقطع w_t بیشتر از عرض مرکزی می باشد. بنابراین پروفیل متناسب $h - g - b$ با حالتی است که $w_m > w_c$ و $w_t > w_c$ می باشد.



شکل (۸) نمایش شماتیکی پروفیل برآمدگی دوگانه.

۱ - نتیجه گیری و بحث روی نتایج

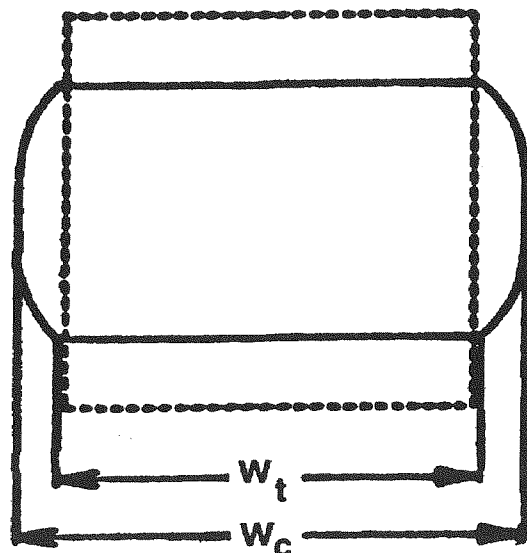
یک برنامه کامپیوتری برای حل مسئله نورد (تعریض و برآمدگی جانبی سطوح آزاد) با استفاده از روش هیل (برای هر دو حالت بدون اصطکاک و با اصطکاک) نوشته

نرخ کل انرژی از دست رفته، \dot{E}_{tot} یک تابع از پارامتر تغییر شکل برآمدگی β ، است که برای هر مقطع از ناحیه تغییر شکل باید محاسبه و نسبت به آن مینیمم شود. یک روش ساده عددی [۱۳] برای مینیمم سازی \dot{E}_{tot} نسبت به β به کار برده شده است. یک برنامه کامپیوتری برای به دست آوردن شدت برآمدگی β برای مقطع نهایی نوشته شده است. ورودی این برنامه خروجی های برنامه قبلی است که پروفیل های $w(x)$ و $h(x)$ و مشتقات آنها را می دهد.

۹-۲- فهرست اصطلاحات مربوط به پروفیل برآمدگی

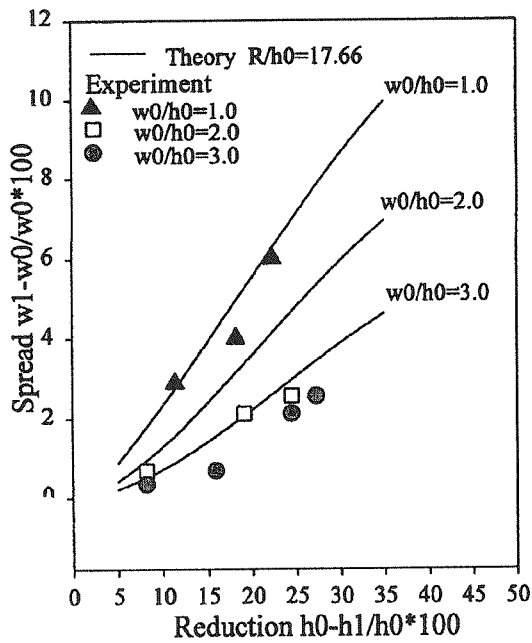
عرض خروجی هرگز به صورت مستقیم نمی باشد و همواره دارای مقداری برآمدگی جانبی می باشد. شکل مخصوص پروفیل برآمدگی پیشگویی شده به شرایط نورد بستگی دارد، بنابراین در بحث روی پروفیل برآمدگی نیاز به تهیه یک فهرست اصطلاحاتی به صورت زیر می باشد.

- با توجه به ابعاد شکل مقطع های خروجی نشان داده شده در شکل های (۷ و ۸)، پروفیل برآمدگی تکی برای وقتی که عرض در مرکز یا نصف ضخامت مقطع نورد شده w_c (شکل ۷)، برابر عرض ماکزیمم مقطع خروجی باشد، تعریف شده است.

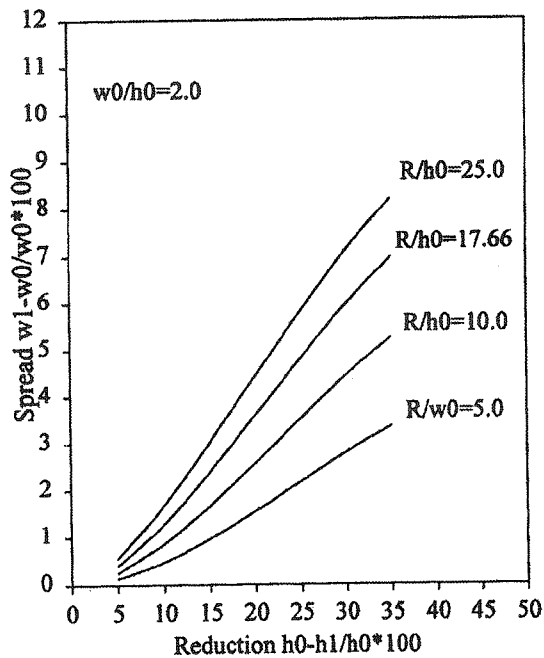


شکل (۷) نمایش شماتیکی پروفیل برآمدگی تکی.

- برآمدگی دوگانه (شکل ۸) به عنوان حالتی که در آن عرض ماکزیمم w_m از عرض در مرکز w_c بیشتر باشد و



شکل (۹) تأثیر نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ روی تعریض در نورد تخت بدون اصطکاک.



شکل (۱۰) تأثیر نسبت $\frac{R}{h_0}$ روی تعریض در نورد تخت بدون اصطکاک.

باتوجه به نتایج به دست آمده و نتایج آزمایشی می توان مشاهده کرد، رفتار تعریض محاسبه شده با مقادیر آزمایشی مطابقت دارد. همچنین این نتایج با نتایج آزمایشی به دست آمده برای نورد گرم فولاد AISI 101B

شده است. این برنامه برای حالت های مختلف نسبت های $\frac{R}{h_0}$ ، $\frac{w_0}{h_0}$ و m ... اجراء 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 می شود. در شکل (۹) درصد تعریض در نورد بدون اصطکاک

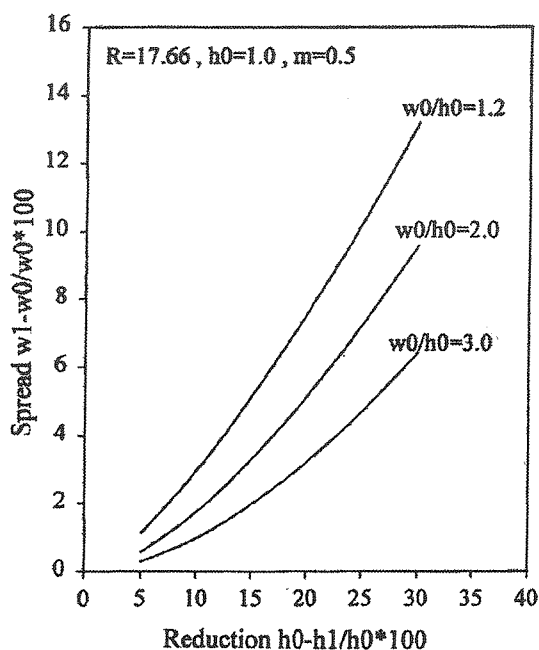
را نسبت به درصد کاهش ضخامت برای نسبت های $\frac{w_0}{h_0} = 1, 2, 3$ و $\frac{R}{h_0} = 17.66$ رسم شده است. همچنین در کنار نمودارها نتایج آزمایشی که در مرجع [۱۴] برای نورد AL 1100-F استفاده شده است به صورت نقاط توپر در شکل مشخص شده است، همانطور که از نتایج آزمایشی مشاهده می شود، تعریض در نورد با افزایش کاهش در ضخامت افزایش می یابد و با افزایش نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ کاهش می یابد و در حالت حدی کرنش صفحه ای به سمت صفر میل می کند. پیشگویی های تئوری تعریض را کمی بزرگتر از مقادیر آزمایشی نشان می دهند، ولی رفتار تعریض محاسبه شده با نتایج آزمایشی مطابقت دارد.

دلیل عدم تطابق کاملاً رضایت بخش نتایج را می توان به ساده سازی زیاد الگوی تغییر شکل واقعی نسبت داد، مخصوصاً، فرض $w'(0) = 0$ یکی از این دلایل است، در حالی که این فرض به صورت تقریب صحیح است و جواب معادله دیفرانسیل به شرط اولیه آن در $x = 0$ خیلی حساس است. با مقایسه نتایج به دست آمده با استفاده از روش هیل و کارهای دیگر می توان گفت مقادیر به دست آمده با استفاده از روش هیل برای نورد نسبت به بقیه تئوری ها سازگاری بهتری با نتایج آزمایشی دارد.

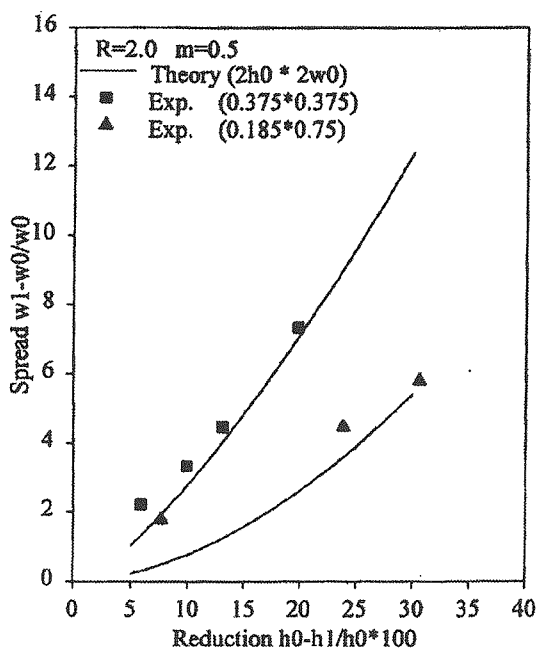
تحقیقات آزمایشی انجام شده توسط چیتکار و جانسون [۶] بر روی نورد نشان می دهد که با افزایش نسبت $\frac{R}{h_0}$ تعریض در نورد افزایش می یابد. این رفتار برای نورد با استفاده از روش هیل نیز پیشگویی می شود، شکل (۱۰) نشان دهنده تغییرات درصد تعریض برای نسبت های $\frac{R}{h_0}$ مختلف می باشد.

همچنین با بکار بردن ضرایب اصطکاک متفاوت حل های تئوری برای نورد تک کالیبره به صورت درصد تعریض برحسب درصد کاهش ضخامت به دست آمده است. این نتایج برای نسبت های $\frac{w_0}{h_0}$ های متفاوت رسم شده است. همچنین از نتایج آزمایشی که در مراجع [۸] و [۹] برای نورد سرب و فولاد AISI 101B (نورد گرم) ارائه شده برای مقایسه نتایج استفاده شده است. شکل های (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) این نتایج را نشان می دهند.

همچنین تئوری نشان می‌دهند که با افزایش کاهش ارتفاع و افزایش ضریب اصطکاک میزان برآمدگی افزایش می‌یابد.



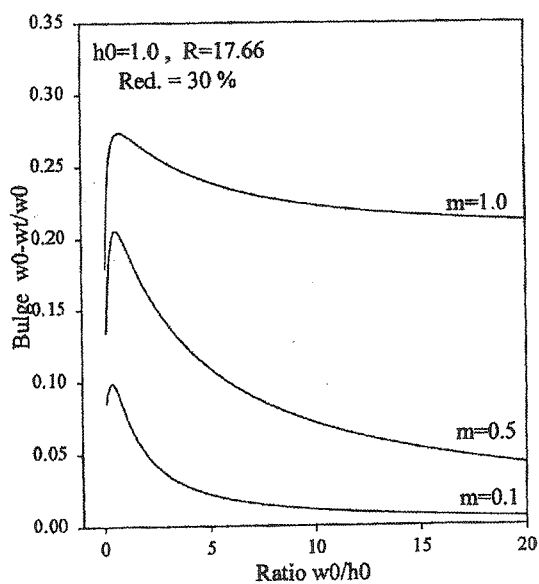
شکل (۱۱) تأثیر نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ روی تعریض در نورد تخت با ضریب اصطکاک $m = 0.5$.



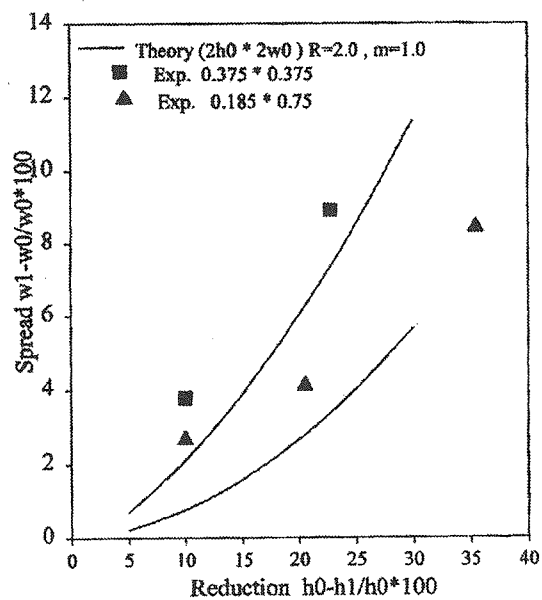
شکل (۱۲) مقایسه نتایج با نتایج آزمایشی برای نورد سرب با ضریب اصطکاک $m = 0.5$.

[۹] سازگاری بیشتری را نسبت به نورد سرب [۸] نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج تئوری و آزمایشی می‌توان دریافت که با افزایش نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ اختلاف بین مقادیر تئوری و آزمایشی کاهش می‌یابد و این اختلاف برای نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ کوچکتر از یک نسبتاً زیاد می‌شود (مخصوصاً در کاهش‌های زیاد) بنابراین می‌توان گفت نتایج به دست آمده برای نسبت‌های $\frac{w_0}{h_0}$ بزرگتر از 0.7 قابل قبول می‌باشد. همچنین اختلاف بین نتایج تئوری و آزمایشی را می‌توان به ساده‌سازی تأثیر اصطکاک در رابطه هیل ربط داد.

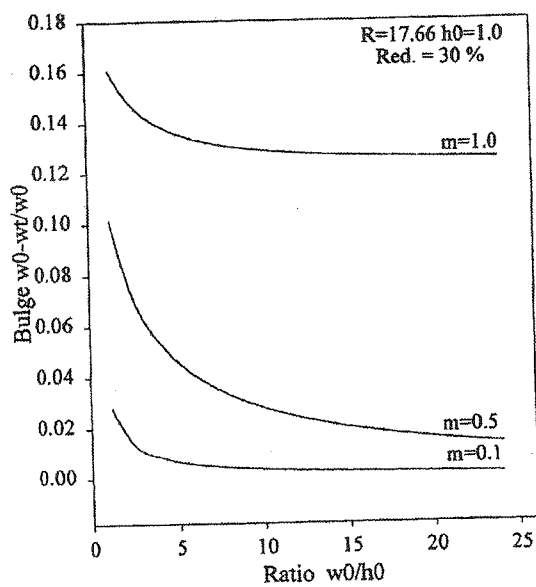
یک برنامه کامپیوتری نیز برای پیشگویی برآمدگی سطوح جانبی برای فورجینگ یک مقطع مستطیلی نسبت به ضریب اصطکاک و نسبت $\frac{w_0}{h_0}$ نوشته شده است و برای مقادیر مختلف این پارامتر اجرا شده است. شکل (۱۵) نشان دهنده شدت برآمدگی جانبی سطوح در فورجینگ (یا در هر مرحله از مراحل مختلف نورد که به صورت مراحل پی در پی فورجینگ شبیه‌سازی شده است می‌باشد). با توجه به نتایج به دست آمده شدت برآمدگی (بسته به ضریب اصطکاک) تقریباً تا نسبت $\frac{w_0}{h_0} \equiv 0.4$ افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌یابد. با توجه به پروفیل انتخاب شده برای $w(z)$ می‌توان گفت که $\frac{w_0}{h_0} \equiv 0.4$ مرز بین برآمدگی دوگانه و یگانه است. به دلیل اینکه پروفیل انتخاب شده نمی‌تواند بیان‌کننده برآمدگی دوگانه باشد با شکستگی در نمودار (نقطه $\frac{w_0}{h_0} \equiv 0.4$) این موضوع نشان داده شده است و این همان نتیجه‌ای است که کندی با یک میدان سرعت دیگر به دست آورده بود می‌توان گفت که تئوری به کار برده شده برای نسبت‌های $\frac{w_0}{h_0}$ بزرگتر از 0.4 قابل قبول می‌باشد. برنامه کامپیوتری ارائه شده برای پیشگویی برآمدگی سطوح جانبی آزاد در نورد ابتدا مقدار متوسط تعریض را در هر مرحله از برنامه کامپیوتری حل تعریض می‌گیرد و با استفاده از شبیه‌سازی نورد به وسیله مراحل پی در پی فورجینگ و روش حد نهایی مقدار شدت برآمدگی را مقطع خروجی محاسبه می‌کند. با اجراء این برنامه برای مقادیر مختلف پارامترهای مستقل فرآیند نتایجی به دست آمده که در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. نتایج آزمایشی که در مرجع [۱۸] ارائه شده برای مقایسه نتایج است. همانطور که از نتایج آزمایشی مشاهده می‌شود شدت برآمدگی با افزایش $\frac{w_0}{h_0}$ کاهش می‌یابد. این رفتار توسط نتایج به دست آمده از تئوری به کار برده شده نیز تأیید می‌شود.



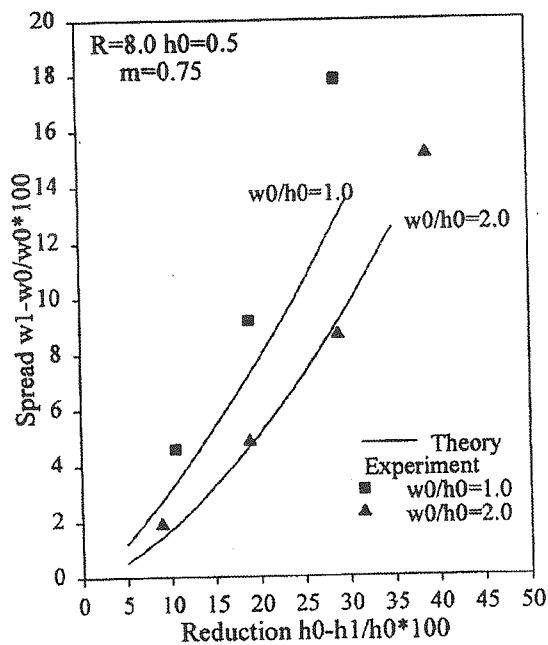
شکل (۱۵) پیشگویی شدت برآمدگی سطح جانبی در فورجینگ.



شکل (۱۳) مقایسه نتایج با نتایج آزمایشی برای نورد سرب با ضریب اصطکاک $m = 0.5$.



شکل (۱۶) بررسی اثر اصطکاک روی برآمدگی سطوح جانبی.



شکل (۱۴) مقایسه نتایج با نتایج آزمایشی برای نورد گرم فولاد AISI 1013.

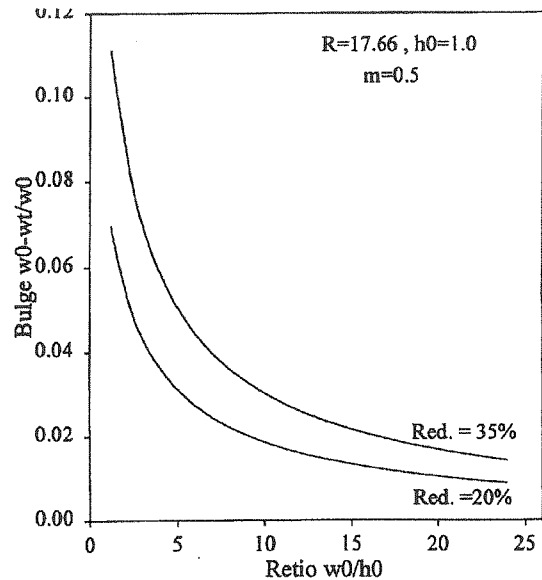
باید خاطر نشان کرد که روش هیل در ابتدا قصد پیشگویی تعریض در نورد را به وسیله اصول صحیح ریاضی داشته است و تحقیقات ما در نورد در عمل نشان می دهد که این روش قادر است تمام حالت های مختلف نورد را پوشش دهد.

با مقایسه نتایج به دست آمده با بقیه تئوری ها (آنهایی که در دسترس می باشند) نتایج به دست آمده سازگاری خیلی بهتری را با نتایج تجربی نشان می دهند این سازگاری هنگامی که اصطکاک در محدوده کاری در نظر گرفته شده باشد به شدت افزایش می یابد. به عنوان مثال در نورد گرم فولاد AIS1013 با ضریب اصطکاک 0.75 نتایج تئوری تطابق خیلی خوبی با نتایج آزمایشی دارند.

با شبیه سازی نورد به صورت فورجینگ های پی در پی میزان شدت برآمدگی سطوح به دست آمده و با مقادیر آزمایشی موجود مقایسه شده است. نتایج آزمایشی خیلی محدودی در دسترس می باشد. با وجود این، ارزیابی های ابتدایی نشان می دهند که برنامه نوشته شده را می توان برای پیشگویی برآمدگی سطوح جانبی در نورد به صورت نسبتاً دقیق به کار برد.

۱۲ - فهرست علائم

a_0	تابعی از تعریض
$\dot{E}_{tot}, \dot{E}_p, \dot{E}_d, \dot{E}_f$	نرخ انرژی هدر رفته کلی، بر اثر تغییر شکل داخلی، ناپیوستگی سرعت و اصطکاک
$g(z)$	تابعی از z
h	ارتفاع قطعه
k	تنش تسلیم برشی
l	طول ناحیه تغییر شکل
m	ضریب اصطکاک
n_i	بررداری که عمود بر سطح در ناحیه تغییر شکل
R	شعاع غلتک
S_c	سطح چسبیده به ابزار
S_f	سطح آزاد (جانبی)
S_I	سطح داخلی (ورودی و خروجی)
$S(X)$	تابع شکل قطعه کار
t_i	بررداری که مماس بر سطح قطعه
T_0, T_1	کشش های فرضی در سطوح ورودی و خروجی
\dot{n}	سرعت نزدیک شدن غلظک ها به یکدیگر
U	دبی حجمی
U_0	سرعت ورودی



شکل (۱۷) بررسی اثر میزان کاهش ارتفاع روی برآمدگی سطوح جانبی

۱۱ - نتیجه گیری کلی

روش هیل برای نورد تخت، در حالت بدون اصطکاک و با اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت و به صورت عددی و کامپیوتری میزان تعریض برای مقادیر مختلف پارامترهای مستقل سیستم محاسبه شد. با وجود اینکه مقدار کمی اختلاف بین نتایج آزمایشی و تئوری، بیشتر برای حالت بدون اصطکاک وجود دارد (که با توجه به ساده سازی هایی که در محاسبات تئوری انجام شده چندان تعجب آور نیست). به هر حال بررسی ها، رفتار اصلی و ترکیب اصلی فرآیندی که در آزمایش های مشاهده می شود را پیشگویی می کنند.

این روش براساس اصول صحیح ریاضی قرار دارد و برای ایجاد فرضیات ساده سازی در بررسی قابل تغییر و انعطاف پذیر می باشد. به هر حال روند روش معمولاً شامل محاسبات عددی زیادی می باشد و گاهی با مشکلات زیادی در به دست آوردن جواب نهایی مواجه می شود. برای مثال در بررسی انجام شده با یک معادله دیفرانسیل درجه چهار و یک فرض تقریبی اولیه $(w'(0) = 0)$ مواجه بودیم به دلیل اینکه این معادله دیفرانسیل به فرض اولیه بسیار حساس می باشد، به وسیله روش های انتگرال گیری معمولی نمی توان به جواب رسید. هنگامی که اصطکاک در نظر گرفته شود مسئله از این هم پیچیده تر می شود زیرا محل نقطه خنثی از ابتدا مشخص نمی باشد و حتی با مشخص بودن محل نقطه خنثی عرض در آن نقطه باز هم مجهول می باشد.

مؤلفه های میدان تنش $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$
 تنش جریان $\bar{\sigma}$
 مؤلفه های میدان تنش کاهش یافته $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$
 توابع جریان ψ, χ

۱۳- زیرنویس

- 1 - Patented rolling
- 2 - Round - edged - rectangle .
- 3 - Variations technique
- 4 - Hour - glass - Bulge

مؤلفه های میدان سرعت متعامد نرمال U_x, U_y, U_z
 شده

مؤلفه های میدان سرعت V_x, V_y, V_z
 عرض قطعه w
 محورهای مختصات x, y, z
 شدت برآمدگی جانبی β
 یک تابع دلخواه η
 مؤلفه های میدان نرخ کرنش ϵ_j
 تنش سطحی T_i

مراجع

- [1] Kumar, A., Samarasekere, V. and Hawbolt, E.B., "Roll _ Bite Deformation During the Hot Rolling of Steel Strip," J. Mat. Proc. Tech., 1992, Vol. 30, PP. 91 - 114.
- [2] Hawang, S.M. Joun, M.S, and Kang, Y. H., "Finite Element Analysis of Temperatures, Metal Flow and Roll Pressure in Hot Strip Rolling," J. Eng. Ind. Trans. ASME, 1993, Vol. 115, PP. 290 - 299.
- [3] Bayoumi, L.S., "Edge Stresses in Wide Strip Hot Rolling," Int. J. Mech. Sci., 1977, Vol. 49, PP. 397 - 408.
- [4] Zoharoff, T. L. Johnson, R.E. and Karabin, M. E., "Spread in Sheet Rolling: A Comparison Using Experiments, Analytical Solution and Numerical Techniques," Int. J. Mech. Sci., 1992, Vol. 34, PP, 435 - 442.
- [5] MacGregor, C. W., and Coffin, L. F., Trans. ASME. J. Appl. Mech. 65, 1943, A - 13.
- [6] Chitkara, N.R. and Johnson, W., Trans. ASME. J. Basic Engrg, 88, 1966, 489.
- [7] Gokyu, I., Kihara, J. and Mae, Y., J. Jap. Soc. Tech. Plasticity II, 1970.
- [8] Kobayashi, S. and Oh, S. I., "An Approximate Method for a Three Dimensional Analysis of Rolling," Int. J. Mech. Sci., 1975, Vol. 17, PP. 293-305.
- [9] Kennedy, K.F., "A Method for Analyzing Spread, Elongation and Bulge in Flat Rolling," Trans. ASME. J. of Eng. Ind., 1987, Vol. 11, P. 305.
- [10] Hill, R., J. Mech. Phys. Solids, 1963, Vol. 11, P. 305.
- [11] Nagamatsu, A., Murota, T. and Jimma, T. Bull. JSME, 1970, Vol. 13, P. 1989.
- [12] Murota, T. jimma, T. and Nagamatsu, A., Proc. Sixteenth Japan National Congr. Appl. Mech., 1966, P. 141.
- [13] Baraya, G. L. and Johnson, W., Proc. Fifth Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., 1964, P. 449.
- [14] Lahoti, G. D. and Kobayashi, S., "On Hill's General Method of Analysis for Metal - Working Processes," Int. J. Mech. Sci. 1974, Vol. 16, PP. 521-540.
- [15] Lugora, C. F. and Bramley, A. N., "Analysis of Spread in Ring Rolling," Int. J. Mech. Sci., 1987, Vol. 29, PP. 149-157.
- [16] Rao, S. S., "Optimization Theory and Applications," Wiley Eastern Limited. 1984.
- [17] Ferziger, J. H., Numerical Method for Engineering Application, A Wiley - interscience publication, 1981.
- [18] Sevenler, K. and Raghupathi, P.S., "Spread and Bulging in Bar and Rod Rolling Using Flat Rolls," Iron and Steel Engineer, 1986, pp. 57-62.
- [19] Nagpal, V. and Clough, W.R., "Plane Strain Forging - A Lower Upper Bound Approach," Trans. ASME J. Eng. Ind., 1975, PP. 119-124.