

تحلیل اجزای محدود فرایند نورد حلقه در حضور غلتکهای راهنما

محمد رضا فروزان*، محمود سلیمی**، محمد سید گادالا***

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیریتیش کلمبیا-ونکوور-کانادا

(دریافت مقاله: ۸۰/۱۱/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۷/۱)

چکیده- در این مقاله روشی جدیدی برای مدلسازی غلتکهای راهنما و بررسی اثر آنها در فرایند نورد حلقه ارائه می‌شود. این روش که میله‌های گرمایی^۱ نامیده می‌شود اولین و تنها روشی است که قادر است ضمن مدلسازی غلتکهای راهنما نیروی عکس‌العمل این غلتکها را با توجه به سختی مکانیزم تطبیق دهنده محاسبه کند. از خصوصیات این روش سازگاری آن با انواع فرمولبندی اجزای محدود، سادگی در به کارگیری و عدم تعریف جمله‌های غیر خطی جدید در مسئله است. این روش با موفقیت در تحلیل اجزای محدود نورد حلقه با مقاطع مستطیلی و T شکل به کار گرفته شده است. نتایج تحلیل اجزای محدود، تحلیل نظری جدیدی که بر مبنای نظریه بازوی هرز به انجام رسیده و نتایج آزمایشها در توافق بسیار خوبی هستند و این نتایج مبین اثر انکارناپذیر غلتکهای راهنما بر فرایند نورد حلقه است.

واژگان کلیدی: نورد حلقه، روش اجزای محدود، غلتک‌های راهنما، میله‌های گرمایی.

Ring Rolling FE Analysis in The Presence of the Guide Rolls

M.R. Forouzan, M.Salimi and M.S. Gadala

Mechanical Engineering Department, IUT, Esfahan, Iran

Mechanical Engineering department, UBC, Vancouver, BC, Canada

Abstract: A new method (thermal spokes) is proposed to simulate the guide rolls in FE analysis of the ring rolling process. So far this method is the only one, capable of calculating guide rolls reaction contact forces related to the stiffness of their adjustment mechanism. The method is simple to use, does not introduce further nonlinearities and could be used in any kind of FE formulations. The method is successfully employed in FE analysis of rectangular and T-section rings. The results of the thermal spokes method, a new analytical method based on lever arm principle with experimental results are in good agreements. This analysis shows that the guide rolls greatly affect the process.

Keywords: ring rolling, finite element method, guide rolls, thermal spokes.

***- استاد

**- دانشیار

*- دانشجوی دکترا

| A: سطح مقطع میله‌ها | | ورود به شکاف بین غلتکها | | شعاع ماندلر | |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|
| a_0 : کل بازوی گشتاور نورد | k_1 : سهم غلتک اصلی از کاهش ضخامت | T : گشتاور نورد | t : زمان | x : طول | y : عرض |
| a_0 : در غیبت غلتکهای راهنما | k_2 : سهم ماندلر از کاهش ضخامت | α : ضریب انبساط خطی میله‌ها | L_1 : نیروی وارده از غلتک اصلی به حلقه | M : گشتاور ایستا | θ : تنش معادل |
| a_1 : جزء فعال a_0 | L_2 : نیروی وارده از ماندلر به حلقه | μ : ضریب اصطکاک | L_3 : نیروی غلتکهای راهنما | P_i : نیرو در i امین میله گرمایی | σ : تنش معادل |
| a_2 : جزء نافع a_0 | L_4 : مزدوج L_3 | σ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| a_3 : بازوی گشتاور L_3 | M : گشتاور ایستا | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| b : عرض شیار ماندلر | P_i : نیرو در i امین میله گرمایی | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| C_1 : طول کمان درگیر بین حلقه و غلتک اصلی | R : شعاع غلتک اصلی | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| C_2 : ناحیه درگیری حلقه و ماندلر | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| E : مدول یانگ میله‌ها | | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| F_i : ضابطه هندسی سطح i ام | | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |
| H : ضخامت شعاعی حلقه هنگام | | δ : تنش معادل | R : شعاع غلتک اصلی | R_m : شعاع متوسط حلقه | δ : دمای میله‌ها |

۱- مقدمه

شعاعی-محوری را نمایش می‌دهد. شیارهای که در ماندلر ایجاد شده باعث می‌شود که با پیشروی فرایند، ماده به داخل شیار جریان یابد و مقطع حلقه خام از حالت مستطیلی به حالت T شکل تغییر کند که باعث استحکام بیشتر محصول در مقابل بارگذاری خمشی می‌شود.

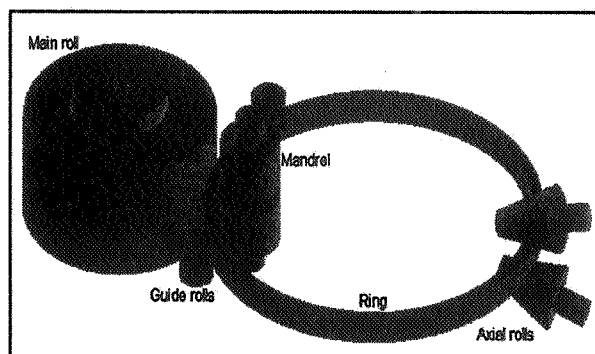
نورد حلقه اولین بار در سال ۱۸۴۲ در انگلستان به منظور تهیه رینگ بانداژ چرخ قطار به کار گرفته شد، اما علی‌رغم قدمت آن، پیچیدگی و تنوع فرایند باعث شده تا هیچ یک از تحلیل‌های نظری گذشته مانند: تحلیل‌های کلاسیک و خطوط لغزش [۲-۶]، روش حد بالایی [۷ و ۸]، روش انرژی [۹] یا معادلات عمومی هیل [۱۰] قادر به تحلیل کلیه جوانب این فرایند نباشد. هر چند مانع نظری در فرمولبندی فرایند نورد حلقه به روش اجزای محدود وجود ندارد اما شبیه‌سازی فرایند بدون اعمال فرضیات خاص حتی با استفاده از رایانه‌های امروزی نیز ماهها به طول خواهد انجامید. اهم دلایل این امر عبارت از: - هندسه پیچیده قطعه کار و ابزار که مستلزم استفاده از المانهای متعدد است.

امروزه نورد حلقه به طور وسیعی در تولید انواع حلقه‌های بدون درز به کار می‌رود. این گستره، قطعاتی کوچک مانند کونس بیرینگها به قطر ۵۰ میلی‌متر و به وزن چند صد گرم، حلقه‌های دقیق برخی راکتها و توربینها و حلقه‌هایی بزرگ تا قطر ۸ متر و وزن ۳۰ تن را در برمی‌گیرد [۱]. در این فرایند یک قرص توخالی و دوار بین دو غلتک شکل داده می‌شود. غلتک داخلی که ماندلر نامیده می‌شود هرزگرد بوده و با سرعت ثابت و به آهستگی به غلتک اصلی نزدیک می‌شود. غلتک اصلی که قطر بیشتری نسبت به ماندلر دارد ساکن است و با سرعت دورانی ثابت حول محور خود می‌چرخد و به واسطه اصطکاک باعث دوران حلقه به دور خود می‌شود، بنابراین ضخامت شعاعی حلقه در هر بار عبور از ناحیه تغییر شکل که همان فضای بین دو غلتک است کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت شعاعی باعث افزایش قطر حلقه و اندکی افزایش در ضخامت محوری آن می‌شود. ضخامت محوری حلقه را می‌توان با استفاده از نورد مسیر بسته^۲ یا به کمک غلتکهای مخروطی اضافی کنترل کرد. شکل (۱) اجزای اصلی یک رینگ ساز

می‌کند، لذا هنگامی که حلی برای یک قطاع از حلقه به دست می‌آید به کل حلقه تعمیم می‌یابد.

هو [۲۰] اولین کسی است که روش ALE را به صورت دوبعدی و با چگالی شبکه ثابت در تحلیل نورد رینگ به کار گرفته است. فرمول‌نویسی ALE اجازه می‌دهد تا حرکت شبکه را مستقل از حرکت ماده کنیم. اگر این استقلال فقط در جهت مماسی لحاظ شود شبکه ظریف همواره در محل خود باقی می‌ماند و نیازی به تعریف شبکه مجزایی به منظور حفظ تاریخچه المانها نیست. مرجع [۲۱] تلفیقی از ایده‌های فوق الذکر و روش محاسباتی SPCGM را در مدلسازی این فرایند به کار برده است. تکنیک‌های جدیدی که در ALE ایجاد شده‌اند [۲۲ و ۲۳] این امکان را فراهم می‌آورد تا اعوجاج المانی را به حداقل رسانند. در تمامی حلهای فوق الذکر اعم از نظری و عددی یک فرض مشترک است و آن صرف نظر کردن از اثر غلتکهای راهنما در شبیه‌سازی فرایند است. شاید علت این امر ناچیز بودن نیروی این غلتکها در مقایسه با نیروی نورد است، از طرفی حذف غلتکهای راهنما ندرتاً موجب ناپایداری فرایند می‌شود در مقابل در نظر گرفتن اثرات آنها مستلزم افزایش چشمگیر هزینه محاسبات به دلیل تعریف نواحی جدید تماس، مجهول بودن موقعیت و نیروی غلتکهای راهنما و هندسه پیچیده مکانیزم تطبیق این غلتکهاست.

تکنیک میله‌های گرمایی جایگزین مناسبی است که نه تنها می‌تواند با کمترین هزینه اثر اصلی غلتکهای راهنما را شبیه‌سازی کند، بلکه امکان در نظر گرفتن اثر سختی مکانیزم تطبیق غلتکها را نیز فراهم می‌کند. این روش یک تکنیک عمومی است و به راحتی قابل استفاده در فرمولبندیهای لاگرانژی یا ALE است. اصلاحاتی که بر نظریه مقدماتی بازوی هرز به انجام رسیده به فهم و توجیه اثر غلتکهای راهنما کمک می‌کند و نتایج آن تایید کننده توانایی این روش در شبیه‌سازی کامل غلتکهای راهنماست. مقایسه نتایج شبیه‌سازیها با نتایج آزمایشها نیز تطبیق بسیار خوبی را نشان می‌دهد و بر نقش غلتکهای راهنما در فرایند تصریح دارد.



شکل ۱- شماتیک نورد حلقه

- هندسه متغییر قطعه کار که وجود یک حل دائم را برای مسئله متفی می‌کند.

- لزوم شبیه‌سازی فرایند برای تعداد زیاد دوران حلقه به دور خود به دلیل نرخ تغذیه^۳ بسیار پایین در هر بار عبور حلقه از شکاف بین غلتکها^۴.

البته کرنشها، اعوجاجها، جابه‌جایی‌ها و چرخشهای بسیار بزرگ حین فرایند نیز مزید بر علت اند که در اغلب فرایندهای شکل‌دهی مشاهده می‌شوند.

معمولترین فرضیاتی که در تحلیل اجزای محدود نورد حلقه به کار رفته‌اند عبارتند از: شبیه‌سازی فرایند برای یک لحظه و فقط در مجاورت شکاف بین غلتکها [۱۱-۱۳]، شبیه‌سازی شبیه کرنش صفحه‌ای [۱۴] و فرض فورج متقارن محوری [۱۵].

یکی از ایده‌های موفق به منظور کاهش زمان حل، کاهش چگالی مش‌ها خارج از محدوده شکاف بین غلتکهاست. حلهایی که توسط کیم [۱۶]، هو [۱۷] و یا لیم [۱۸] ارائه شده چنین ایده‌ای را در قالب دو مجموعه مش‌بندی عملی کرده است. در مجموعه اول که محاسبات اجزای محدود را در بردارد مش‌بندی ظریف تنها در حوالی شکاف بین غلتکها انجام می‌شود. حل این سیستم به یک مجموعه دیگر که تمام پیکره قطعه کار را با مش‌های ظریف تقسیم‌بندی کرده منتقل می‌شود سپس با استفاده از تکنیک مش‌بندی مجدد سیستم محاسباتی به نحوی مش‌بندی می‌شود که مش‌های ظریف مجدداً به ناحیه تغییر شکل برگردند. ژو [۱۹] فرضی به تکنیک فوق افزوده است. وی فرایند را در هر بار گردش حلقه به دور خود دائم فرض

تخلیه فشار شکن نسبتاً بالا اختیار می‌شود چرا که گاهی محیط دایره داخلی و خارجی قرص اولیه کاملاً هم مرکز نبوده و حلقه تمایل به خارج شدن از دستگاه را دارد. اما با افزایش قطر و کاهش ضخامت، حلقه صلبیت خود را در مقابل بارهای خمشی از دست می‌دهد، بنابراین حین فرایند، فشار سیستم کنترل به آهستگی کمتر می‌شود تا باعث فروریختگی^۵ حلقه در مراحل پایانی شود [۲۴].

۳- اصلاح نظریه بازوی هرز

۳-۱- نظریه بازوی هرز

شماتیکی از شکل حلقه و اندرکنش آن با ماندول و غلتک اصلی در محدوده تغییر شکل^۶ در شکل (۳-الف) نمایش داده شده است. بردارهای L_1 و L_2 نمایشگر برآیند نیروهای اعمالی از طرف غلتک اصلی و ماندول به حلقه اند. چون ماندول حول محور خود هرز است نمی‌تواند گشتاوری تحمل کند، بنابراین برآیند نیروهای اصطکاک حول محور ماندول (نقطه^۵) صفر است، پس امتداد L_2 با دانستن توزیع فشار در دهانه غلتکها مشخص می‌شود. به علاوه از آنجایی که نیروی وارده از طرف غلتکهای راهنما به حلقه در مقایسه با نیروهای ابرار بسیار کوچک است [۵]، نظریه بازوی هرز، معادله تعادل حلقه را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$\bar{L}_1 = \bar{L}_2 \quad (1)$$

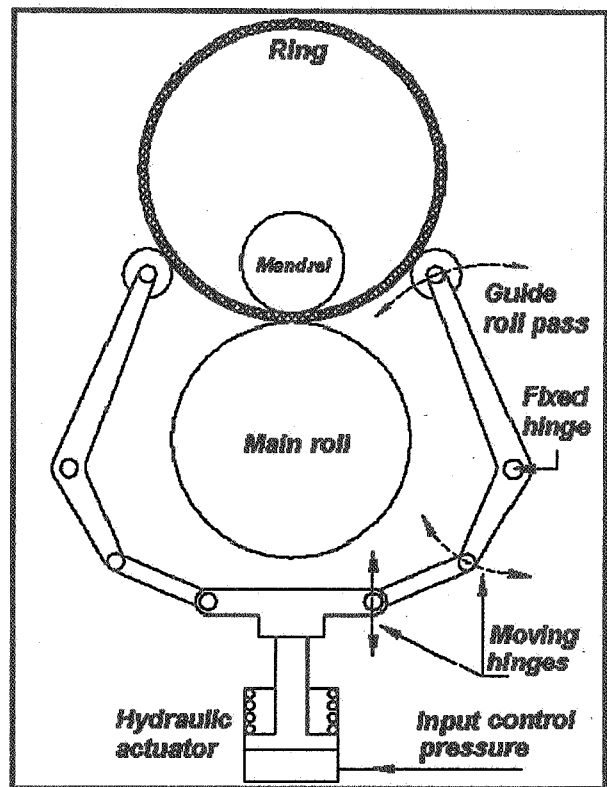
در این صورت برآیند کل تراکنشهای وارده از غلتک اصلی به حلقه (L_1)، مساوی، موازی، معکوس و در یک امتداد با L_2 است. با در نظر گرفتن نمودار آزاد غلتک اصلی، گشتاور لازم برای نورد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T = L_1 a_0 \quad (2)$$

که در آن a_0 بازوی گشتاورگیری است.

۳-۲- اصلاح نظریه بازوی هرز

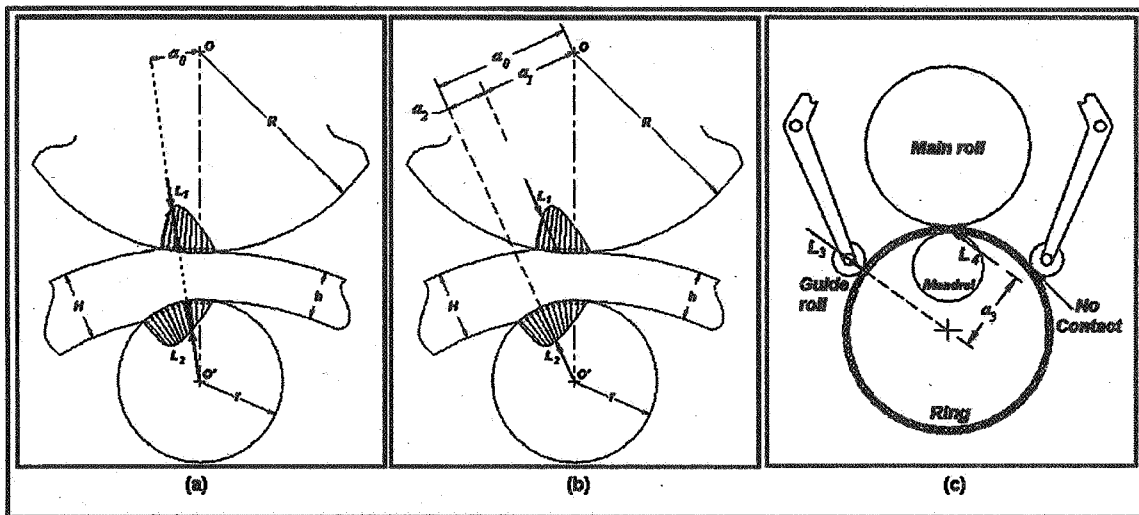
در شکل (۳-ب) نسبت کاهش ضخامت^۷ بالاتر از حد معمول اختیار شده تا تصریح شود که لزوماً امتداد L_2 از مرکز



شکل ۲- مکانیزم تطبیق دهنده غلتکهای راهنما

۲- مکانیزم تطبیق دهنده غلتکهای راهنما

وظیفه مکانیزم تطبیق دهنده غلتکهای راهنما متقارن نگه داشتن این غلتکها نسبت به صفحه تقارن رینگ ساز است. این صفحه توسط محورهای ماندول و غلتک اصلی تعریف می‌شود. در حالت ایدئال محور حلقه نیز می‌بایست در این صفحه قرار گیرد. عموماً یک مکانیزم چهار میله‌ای مشابه آنچه در شکل (۲) نشان داده شده بدین منظور به کار می‌رود. فشار هیدرولیک پشت پیستون عملگر خطی باعث می‌شود تا همیشه غلتکهای راهنما با حلقه در تماس باشند. نیروی تماس بین حلقه و غلتکها تا جایی افزایش می‌یابد که با نیروی هیدرولیک مربوطه در تعادل قرار گیرد. افزایش مداوم قطر حلقه غلتکها را به طور پیوسته به عقب می‌راند و در این صورت روغن از طریق یک شیر کنترل فشار تخلیه می‌شود. در شروع فرایند فشار



شکل ۳- اثر غلتکهای راهنما در اصلاح نظریه بازوی هرز a - تعامل غلتکها و حلقه با توجه به فرضیات نظریه بازوی هرز [۷]
 b- تعامل غلتکها و حلقه با توجه به وجود غلتکهای راهنما (اصلاح فرضیات گذشته) c- چگونگی اعمال نیرو از طرف
 غلتکهای راهنما در شرایط ایده نال

شکاف بین غلتکها تقریباً داریم:

$$L_1 a_2 = L_3 a \quad (4)$$

در معادله بالاخط مرکزین غلتک راهنما و حلقه امتداد L_3 را مشخص می کند و a_3 طول خط عمود از مرکز مقطع خروجی حلقه بر امتداد L_3 است. حال معادله (۱) را به طور دقیقتر می توان نوشت:

$$\bar{L}_1 + \bar{L}_2 + \bar{L}_3 = 0 \quad \text{یا} \quad \bar{L}_1 + \bar{L}_2 = -\bar{L}_3 = \bar{L}_4 \quad (5)$$

یعنی برآیند نیروهای نورد (L_1 و L_2) کاملاً صفر نبوده و مقدار جزئی این برآیند را به عنوان L_4 که مزدوج L_3 می باشد تعریف می کنیم. بنابراین ممان این دو زوج نیرو خنثی کننده ممان زوج نیروهای L_1 و L_2 است. عموماً نیروی عملگر هیدرولیکی دز شکل (۲) بیشتر از حداقل مقدار مورد نیاز تنظیم می شود، لذا در حالت کلی L_3 نمی تواند تعادل مکانیزم تطبیق دهند غلتکهای راهنما را تامین کند. در این صورت با توجه به تقارن مکانیزم تطبیق دهنده و حلقه، نیروی تماسی هر دو غلتک راهنما به طور متقارن نسبت به نیروهای محاسبه شده در حالت ایدئال افزایش می یابد. بدیهی است چنین نیروهایی عمومیت معادله (۴) را

سطح فشار وارده بر حلقه از طرف غلتک اصلی نمی گذرد. مجدداً از بسیار کوچک بودن نیروی تماس غلتکهای راهنما، معادله (۱) را صادق فرض می کنیم. با این تفاوت که این بار L_1 و L_2 مساوی و موازی ولی ناهمراستا هستند. در این صورت ممان M به واسطه وجود فاصله a_2 بین راستای این دو نیرو و به صورت زیر تعریف می شود:

$$M = \Delta L_1 a_2 \quad (3)$$

اگر چه در حالت واقعی فاصله a_2 بسیار کوچک است اما ممان M مقدار قابل توجهی دارد چرا که L_1 نیروی بزرگی است. در شکل (۳-ب) این ممان تمایل به چرخاندن ساعتگرد حلقه را دارد. بدیهی است تعادل ممانها با وجود غلتکهای راهنما برقرار می شود. ابتدا حالت ایدئال تماس غلتکهای راهنما را در نظر می گیریم. در چنین حالتی غلتکهای راهنما حداقل نیروی لازم برای ایجاد تعادل در سیستم را اعمال می کنند. همان طور که در شکل (۳-ج) نمایش داده شده غلتک راهنمای سمت چپ با اعمال نیروی L_3 از چرخش حلقه به واسطه وجود ممان M جلوگیری می کند. از معادله تعادل ممان حول مرکز خروجی

$$C_1 = [R^2 - \left\{ \frac{(R_m + \frac{h}{2} + k_1)^2 - R^2 - (R + \frac{h}{2} + R_m)^2}{2(R + \frac{h}{2} + R_m)} \right\}^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$C_2 = [r^2 - \left\{ \frac{(r + \frac{h}{2} + R_m)^2 + r^2 - (R_m - \frac{h}{2} - k_2)^2}{2(r + \frac{h}{2} - R_m)} \right\}^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

با معلوم بودن نرخ تغذیه پارامتر جدیدی به نام تغذیه به ازای هر دور گردش حلقه را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Delta h \Delta H - h = k_1 + k_2 \quad (12)$$

با توجه به اختلاف ناچیز k_1 و k_2 نسبت به ضخامت حلقه می توان نوشت:

$$k_1 \approx k_2 \approx \frac{\Delta h}{2} \Delta \frac{H-h}{2} \quad (13)$$

مرجع [۲۵] نقطه اثر نیروهای L_1 و L_2 را مرکز کمانهای C_1 و C_2 می داند، لذا فاصله a_2 برحسب پارامترهای مورد قابل محاسبه است:

$$a_2 = \frac{C_2(r+h)}{2r} - \frac{C_1}{2} \quad (14)$$

معمولاً اختلاف C_1 و C_2 نیز قابل اغماض است [۲۵]، در این صورت معادله (۱۴) به فرمی تقلیل می یابد که اثر پارامترهای مختلف در بازوی گشتاور ایستا (a_2) به شکل واضحی قابل تشخیص است:

$$a_2 = \frac{hC}{2r} \quad (15)$$

که در آن C طول تماس بین حلقه و غلتک اصلی یا ماندرل است:

$$C = [R^2 - \left\{ \frac{(R_m + \frac{H}{2})^2 - R^2 - (R + \frac{h}{2} + R_m)^2}{2(R + \frac{h}{2} + R_m)} \right\}^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

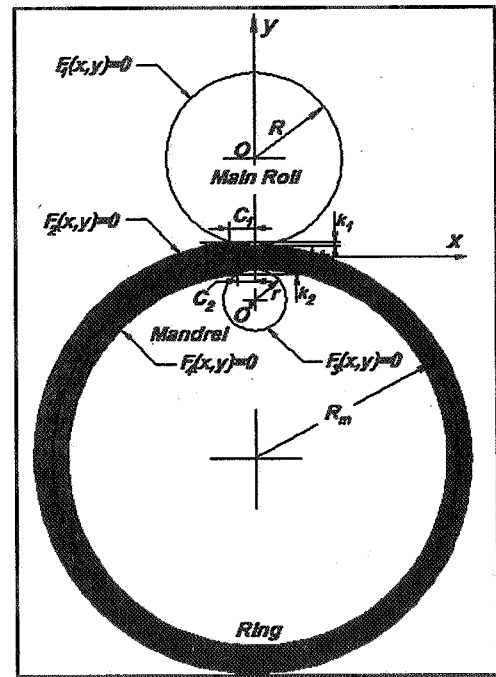
از تلفیق معادله اخیر با معادله (۴) نیروی غلتکهای راهنما محاسبه می شود:

$$L_3 = \frac{hCL}{2ra_3} \quad (17)$$

که در آن L کل نیروی مورد است.

۳-۳-۳- نورد بدون غلتکهای راهنما

در صورتی که نورد بدون کمک غلتکهای راهنما به انجام برسد ممان M تمایل به کج کردن حلقه به سمت ضخیمتر رینگ



شکل ۴- معرفی ظوابط هندسه غلتکهای کار و حلقه

خدشه دار نمی کنند چرا که به واسطه تقارن سهمی در معادله تعادل ممان ندارند. معادلات بالا تا هنگامی کاربرد دارند که توزیع فشار بین ابزار و حلقه معلوم باشد. در ادامه سعی خواهیم کرد معادله صریحی برای نیروی غلتکهای راهنما به دست آوریم. در شکل (۴) سطوح حلقه یا ابزار با توابع F_1 تا F_4 مشخص شده اند:

$$F_1(x,y) = x^2 + (y - R - \frac{h}{2})^2 - R^2 = 0 \quad (6)$$

$$F_2(x,y) = x^2 + (y + R_m)^2 - (R_m + \frac{h}{2} + k_1)^2 = 0 \quad (7)$$

$$F_3(x,y) = x^2 + (y + \frac{h}{2} + r)^2 - r^2 = 0 \quad (8)$$

$$F_4(x,y) = x^2 + (y + R_m)^2 - (R_m - \frac{h}{2} - k_2)^2 = 0 \quad (9)$$

بر اساس معادلات بالا طول تماس بین حلقه و ماندرل یا غلتک اصلی که به ترتیب با C_1 و C_2 نمایش داده می شوند به صورت زیر تعیین می شوند:

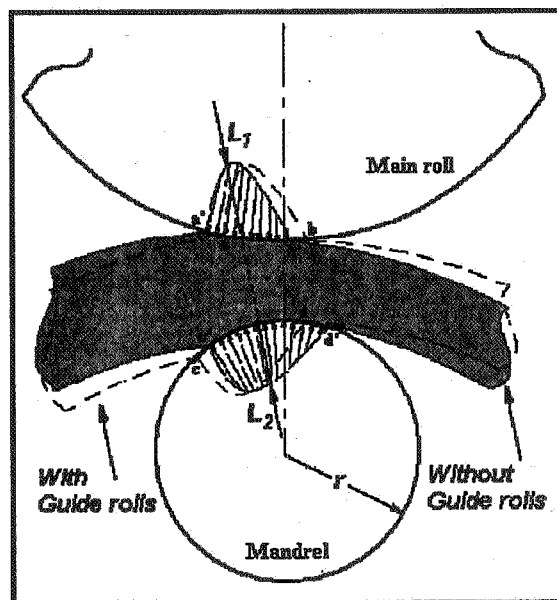
جدول ۱- مشخصات نورد، حلقه‌های آلومینیومی

| | |
|---|--------------------------------|
| Aluminum-alloy HE 30 (0.8 % Mg , 1% Si , 0.7% Mn) | ماده |
| ۳۱(rev/min) | سرعت دورانی غلتک اصلی |
| ۰/۰۱۹(in/rev) | نرخ تغذیه |
| ۹ (in) | قطر غلتک اصلی |
| ۲/۷۵ (in) | قطر ماندرل |
| ۵ (in) | قطر خارجی قرص اولیه |
| ۳ (in) | قطر داخلی قرص اولیه |
| ۱ (in) | ضخامت شعاعی قرص اولیه (ارتفاع) |
| ۱ (in) | ضخامت محوری قرص اولیه (پهنا) |

حول مرکز دهانه خروجی تلقی کرد. بر این مبنا شکل (۵) وضعیت کیفی سطوح تماس را در حضور و در عدم حضور غلتکهای راهنما مقایسه می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که با حذف غلتکهای راهنما سطح تماس حلقه و غلتک اصلی به سمت ورودی دهانه و ناحیه تماس حلقه و ماندرل به سمت خروجی حرکت می‌کند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که:

$$a_0 > a'_0 > a_1 \quad (18)$$

که در آن a_0 و a_1 طبق شکل (۳-ب) تعریف می‌شوند و a'_0 کل بازوی هرز در غیبت غلتکهای راهنماست. به منظور مقایسه نظریه بالا با آزمایش، نمونه‌ای از نتایج آزمایش بین اندازه گیری فشار که توسط مرجع [۵] به انجام رسیده در شکل (۶) منعکس شده، شرح کاملی از روش و دستگاه آزمایش در مرجع [۴] موجود است. خلاصه‌ای از شرایط نورد نیز در جدول (۱) فهرست شده است. بر این مبنا پارامترهای تعریف شده در نظریه اصلاح شده بازوی هرز محاسبه و در جدول (۲) منعکس شده است. از آنجایی که فاصله a_3 یعنی بازوی ممان گیری غلتکهای راهنما تقریباً متناسب با شعاع حلقه افزایش می‌یابد، این بازو معادل شعاع متوسط حلقه فرض شده. این جدول نشان می‌دهد که غلتکهای راهنما برای جلوگیری از کج شدن حلقه



شکل ۵- وضعیت کیفی سطوح تماس هنگام حضور و هنگام غیبت غلتکهای راهنما

را دارد. در این صورت ناحیه درگیری حلقه و ابزار تغییر می‌کند و حلقه تا جایی کج می‌شود که نیروهای L_1 و L_2 هم امتداد شوند. از آنجایی که حلقه بین ماندرل و غلتک اصلی گاز گرفته شده کج شدن حلقه را می‌توان معادل یک دوران صلب

جدول ۲- بررسی اطلاعات تجربی مرجع [۵] بر مبنای نظریه اصلاح شده بازوی هرز

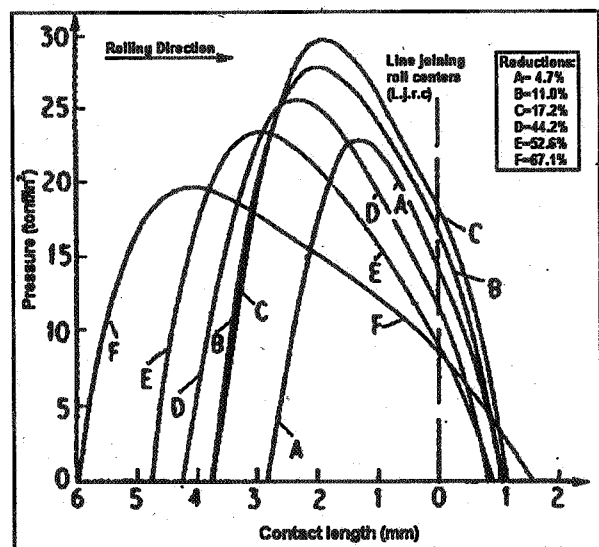
| | | | | | | | |
|----|---|-------|------|-------|------|-------|-------|
| ۱ | نسبت کاهش ضخامت (%) | ۵ | ۱۱ | ۱۷ | ۴۴ | ۵۳ | ۶۷ |
| ۲ | سطح زیر نمودار فشار= نیرو بر واحد پهنای حلقه: $L_1/1$ (KN/m) | ۱۰۳۶ | ۱۴۴۰ | ۱۶۲۹ | ۱۵۵۸ | ۱۷۲۷ | ۱۸۸۸ |
| ۳ | موقعیت نقطه اثر L_2 : (mm) | ۱/۲۶۳ | ۱/۳۱ | ۱/۳۴۵ | ۱/۹۳ | ۲/۱۲ | ۲/۳۴۵ |
| ۴ | موقعیت نقطه اثر L_1 : (mm) | ۲/۱۴ | ۲/۱۶ | ۲/۱۵ | ۲/۷۱ | ۲/۸۵ | ۲/۹۱ |
| ۵ | طول کل بازو (a_0): (mm) | ۶/۲۷ | ۶/۴۵ | ۶/۵۶ | ۹/۰۳ | ۹/۷۹ | ۱۰/۲۰ |
| ۶ | طول بازوی حقیقی (a_1): (mm) | ۵/۱۱ | ۵/۷۸ | ۵/۸۳ | ۸/۱۷ | ۹/۶۲ | ۱۰/۶۶ |
| ۷ | طول بازوی هرز (a_2): (mm) | ۱/۱۶ | ۰/۶۷ | ۰/۷۲ | ۰/۸۶ | ۰/۱۷ | -۰/۴۶ |
| ۸ | شعاع متوسط حلقه (R_m): (mm) | ۵۳/۵ | ۵۶ | ۶۲/۸ | ۸۹/۹ | ۱۰۵/۴ | ۱۴۹/۸ |
| ۹ | نیروی غلتکهای راهنما بر واحد پهنای حلقه: $L_3/1$ (KN/m) | ۲۲/۴ | ۱۶/۹ | ۱۸/۸ | ۱۴/۹ | ۲/۸ | -۵/۸ |
| ۱۰ | نسبت نیروی غلتک راهنما به نیروی نورد (%) | ۲/۲ | ۱/۲ | ۱/۲ | ۱/۰ | ۰/۰۱۶ | -۰/۰۳ |
| ۱۱ | نسبت ممان ایستا به گشتاور کل = نسبت بازوی هرز به بازوی کل (%) | ۱۸/۵ | ۱۰/۴ | ۱۱/۰ | ۹/۵ | -۱/۷ | -۴/۵ |

اعمال می‌کنند، اما اثر این نیروی ناچیز در کاهش ممان لازم برای نورد حتی به ۱۸/۵ درصد نیز می‌رسد.

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود غلتکهای راهنما

نیروی غلتکهای راهنما به قدری کوچک است که اثرات محلی آنها تنها باعث کرنشهای بسیار کوچک الاستیک می‌شود، بنابراین تنها اثر غلتکهای راهنما جلوگیری از کج شدن حلقه است که خود باعث حفظ هندسه دایره‌ای حلقه نیز می‌شود. تکنیک میله‌های گرمایی روشی است ساده، متناسب با فرمولبندی اجزای محدود که قادر است تاثیر غلتکهای راهنما را در جلوگیری از کج شدن حلقه مدل کند. در این روش غلتکهای راهنما با میله‌های مجازی جایگزین می‌شوند. آنچنان که در شکل (۷) نمایش داده شده ملزومات اصلی این روش عبارت اند از:

- تعریف یک گره اضافی در مرکز قرص اولیه.

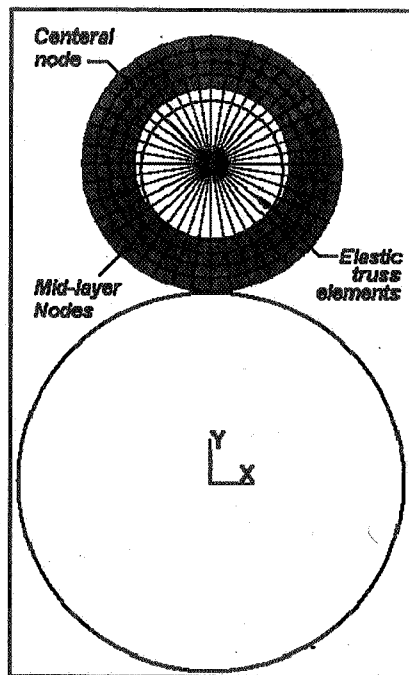


شکل ۶- نمونه ای از نتایج آزمایش بین اندازه گیری فشار (توزیع فشار بین حلقه و غلتک اصلی در صفحه تقارن)

تنها بین ۲/۲ تا ۰/۰۳ درصد نیروی نورد را در هر لحظه

مستطیلی را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند، صفحه‌ها تقارن حلقه نامیده می‌شود. بدیهی است جریان مواد در چنین صفحه‌ای مشمول شرایط کرنش صفحه‌ای است [۲-۱۱ و ۲۰]. چنین شرایطی در شبیه‌سازی دو بعدی نورد حلقه مطابق با مشخصات مندرج در جدول (۱) استفاده شده است. ۲۱۶۰ المان ۸ گره‌ای مستطیلی سطح کل حلقه را پوشش می‌دهند در حالی که محیط به ۳۶۰ قسمت و ضخامت شعاعی به ۶ قسمت تقسیم شده است. این مجموعه دارای ۷۲۰۰ گره و ۱۴۴۰۰ درجه آزادی است. ابزار توسط المانهای هدف^{۱۱} و به شکل دو دایره صلب مدل شده است. دو مجموعه از المانهای تماسی^{۱۲} نیز به منظور شبیه‌سازی دایره داخلی و خارجی قرص اولیه بکار رفته، هر یک از این مجموعه‌ها شامل ۳۶۰ المان است.

ضریب اصطکاک بر سطح غلتک اصلی $\mu=0.15$ در نظر گرفته شده، در صورتی که ماندل را می‌توان بدون اصطکاک فرض کرد [۱۱ و ۱۷].



شکل ۷- ملزومات اصلی روش میله‌های گرمایی (TS-FEM)

شبیه‌سازی مسئله با استفاده از نرم افزار ANSYS [۲۶] انجام شده است و کل کاهش ضخامت اعمالی به حلقه ۲۰ میلیمتر، معادل ۷۸/۷۴ درصد است که با استفاده از ۲۵۰۰۰ کام زمانی^{۱۳} اعمال شده است.

استفاده از المانهای تماس رتبه ۲ و روش تلفیقی پهنالی- لاگرانژ^{۱۴} با ضریب جریمه بالا امکان محاسبه دقیق سطوح در گیر ناشی از برگشت فنری ماده را فراهم می‌کند.

در یک مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای موقعیت تار مرکزی حلقه با توجه به قانون حجم ثابت قابل محاسبه است. از این رو امکان تعیین رابطه‌ای صریح برای تغییرات گرمایی میله‌ها تابع زمان وجود دارد.

به منظور بررسی اثر سختی میله‌ها بر متغیرهای فرایند، چهار مدل متفاوت توسعه یافته است. اولین مدل که نام A0 را به آن منسوب می‌کنیم فاقد میله‌های حرارتی است. در مدل دوم سختی میله‌ها فقط $0.376 N/mm$ انتخاب شده است. سختی این میله‌ها در مدل‌های سوم و چهارم به ترتیب، ۱۰ و ۱۰۰ برابر سختی میله‌ها در مدل دوم انتخاب شده‌اند. بدین سبب مدل‌های

- تعریف المانهای میله‌ای^{۱۱} بین گره مرکزی و گره‌های منطبق بر تار مرکزی حلقه. این المانها ارتجاعی بوده و اثرات مربوط به کماتش در آنها تعریف نمی‌شود. تار مرکزی حلقه عبارت است از تار مرکزی که در لحظه شروع نورد بر قطر متوسط حلقه منطبق است.

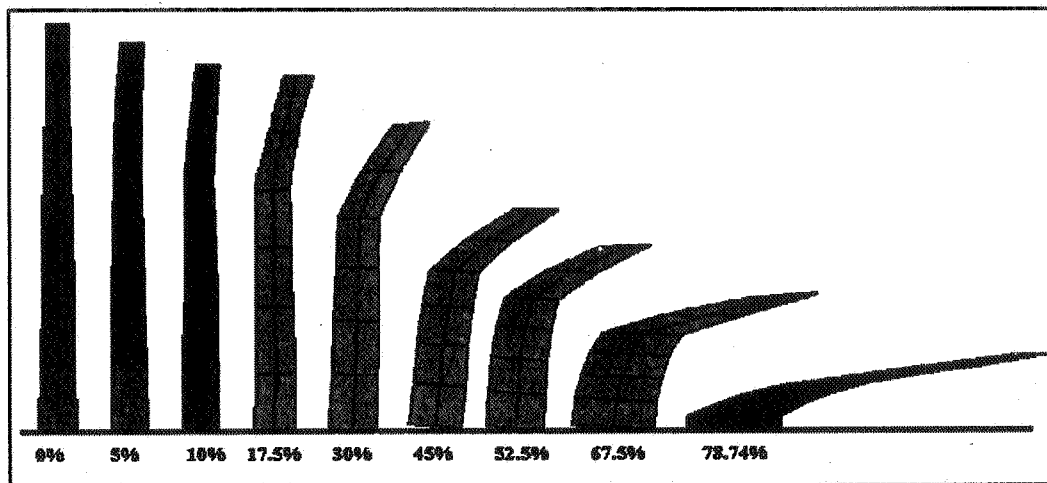
- اعمال گرما به میله‌ها وابسته به زمان به گونه‌ای که انقباض ناشی از آن طول عاری از تنش میله‌ها را همواره مساوی شعاع تار مرکزی حلقه نگه دارد.

- اعمال شرط مرزی مناسب به گره مرکزی به نحوی که مرکز حلقه همواره در صفحه تقارن دستگاه نورد حرکت کند، یعنی: $u_x(N)=0$ که N شماره گره مرکزی حلقه و x امتداد عمود بر صفحه تقارن ماشین نورد است.

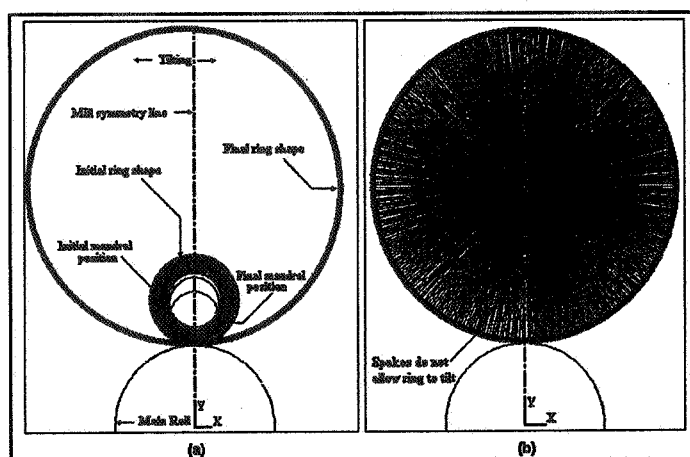
۵- مدل اجزای محدود نورد حلقه

۵-۱- مشخصات مدل دوبعدی

صفحه‌ای عمود بر محور غلتکهای کار که مقطع حلقه



شکل ۸- تغییر شکل المانها وابسته بر حسب کاهش ضخامت



شکل ۹- موقعیت نهایی حلقه: a - مجموعه A0 b - مجموعه A10

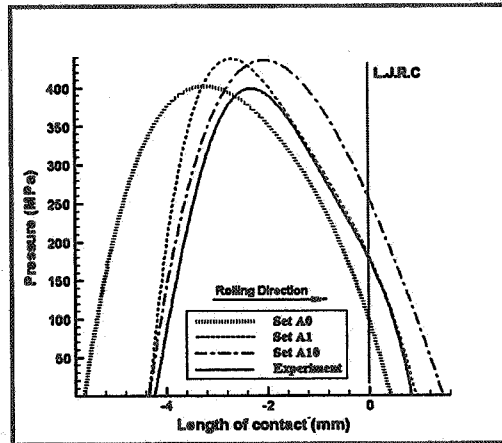
اعوجاجهای شدید در برخی المانها لزوم استفاده از المانهای ۸ گرهی را پدید می آورد تا با به کار گیری چنین المانهایی امکانات بالنسبه بهتری برای محاسبه اعوججاها فراهم شود [۲۶]. همچنین این شکل نشان می دهد که مکانیزم تغییر شکل المانها در لایه های مختلف می تواند متفاوت باشند. مشابه تمامی فرایندهای شکل دهی هندسه ابزار در فرایند نورد حلقه نقش بزرگی در تعیین پارامترهای نورد ایفا می کند. واضح است که در این فرایند ناحیه تماس حلقه با غلتکهای کار را باید به عنوان بخش در گیر و موثر ابزار شکل دهی تفسیر کرد. شکل (۹) موقعیت نهایی حلقه برای مجموعه های A0 و A10 را نشان

دوم تا چهارم به ترتیب A1، A10 و A100 نامگذاری می شوند. هر یک از مدلها شامل ۳۶۰ میله حرارتی هستند که با اتصال گره های واقع در تقاطع اضلاع المانهای تار میانی حلقه به گره مرکزی تعریف می شوند.

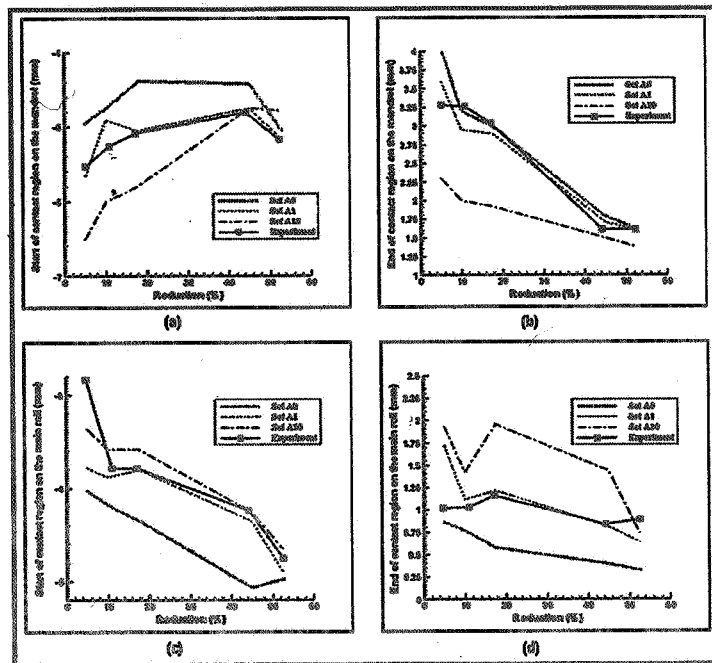
۲-۵- بررسی نتایج مدل دوبعدی و نظریه اصلاح شده

بازوی هرز

شکل (۸) نحوه تغییر شکل المانها بر حسب نسبت کاهش ضخامت اعمال شده را نشان می دهد. امکان پیدایش



شکل ۱۰ - توزیع فشار بین حلقه و غلتک اصلی (Reduction=45%)

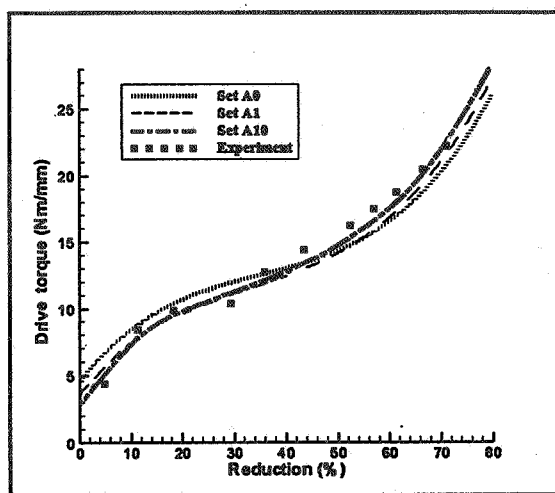


شکل ۱۱ - نقاط دیدار و وداع بین حلقه و غلتکهای کار

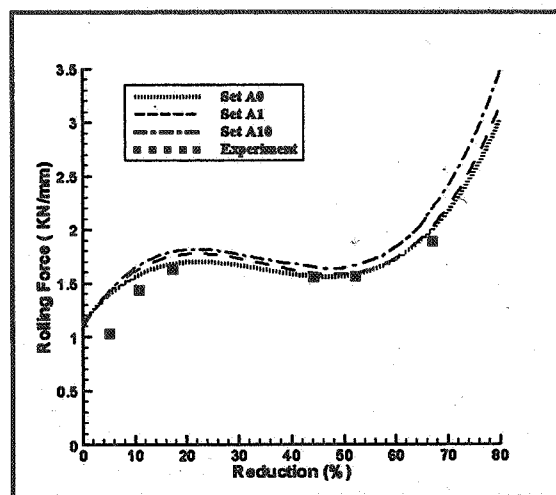
- a) نقطه شروع تماس بین حلقه و ماندل
- b) نقطه اتمام تماس بین حلقه و ماندل
- c) نقطه شروع تماس بین حلقه و غلتک اصلی
- d) نقطه اتمام تماس بین حلقه و غلتک اصلی

حلقه با این غلتکها در شکل (۱۱) تصویر شده، همان طور که با استفاده از شکل (۵) استدلال شد مشاهده می شود که با افزایش سختی میله‌ها که به معنی کاهش میزان کج شدن حلقه است، ناحیه تماس بین ماندل و حلقه هم‌سو با جهت نورد (به سمت خروجی) و ناحیه تماس بین غلتک اصلی و حلقه برخلاف

می‌دهد، مشاهده می‌شود که عدم وجود غلتکهای راهنما در مجموعه A0 باعث کج شدن حلقه شده است. بنابراین باید انتظار داشت که این کج شدن ناحیه درگیری حلقه و ابزار را تغییر دهد. شکل (۱۰) نمونه‌ای از منحنیهای توزیع فشار بین غلتکهای کار و حلقه را تصویر می‌کند. نقاط دیدار و وداع



شکل ۱۳- گشتاور نورد

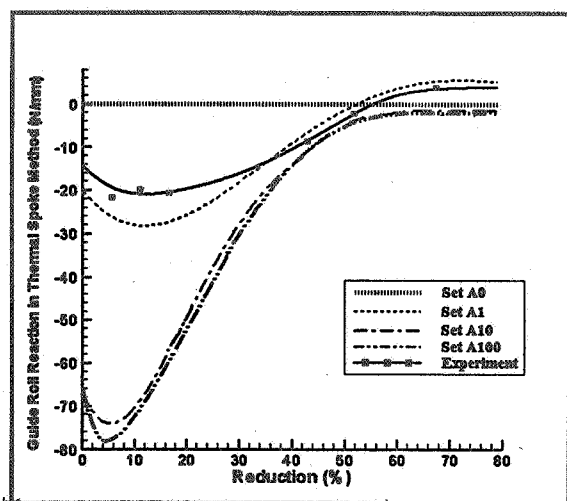


شکل ۱۲- نیروی نورد

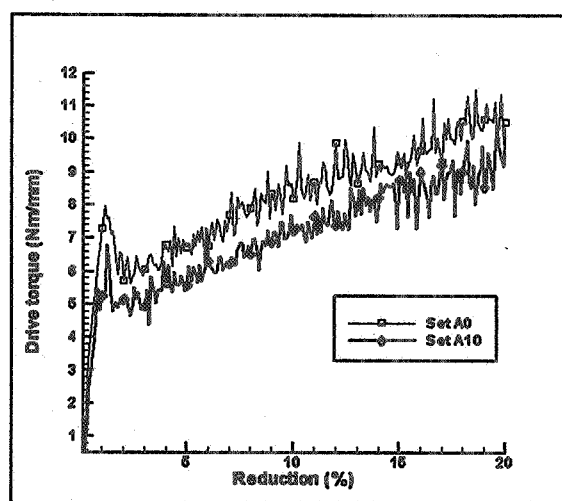
می شود این امر نشان می دهد که استفاده از غلتکهای راهنما منجر به کاهش مصرف انرژی می شود. بر اساس نظریه اصلاح شده بازوی هرز کاهش این گشتاور متناسب با کاهش بازوی فعال گشتاورگیری یعنی a_1 است که خود در ارتباط با میزان ممان ایستای M است. از طرفی مشخص شد که با کاهش ضخامت شعاعی حلقه اثر ممان ایستا کمتر می شود، لذا باید انتظار داشت که با پیشروی فرایند، کج شدن حلقه در تعیین بازوی گشتاور فعال نقش چندانی بازی نکند. به همین سبب در شکل (۱۳) مشاهده می شود که هر چند گشتاور نورد تا حدود ۳۰ درصد نسبت کاهش ضخامت، حداقل مقدار بین سه مجموعه ی مورد مطالعه را داراست اما مقدار این گشتاور در حدود ۵۰ درصد نسبت کاهش ضخامت از هر دو مورد دیگر بیشتر است که البته همان طور که انتظار می رود این میزان متناسب با افزایش مشاهده شده در نیروی نورد است. به دلیل استفاده از المانهای تماسی، نوساناتی در نیرو و گشتاور نورد قرائت می شوند. شکل (۱۴) گشتاور نورد را برای شروع فرایند و فقط برای دو مجموعه حدی A0 و A10 نشان می دهد تا ضمن نمایش درجه این نوسانات بر کاهش گشتاور نورد حین استفاده از غلتکهای راهنما تاکید شده باشد.

جهت نورد (به سمت ورودی) جابجا می شوند. از طرف دیگر می توان ملاحظه کرد که با بالا رفتن نسبت کاهش ضخامت نواحی درگیری برای مجموعه های مختلف به یکدیگر نزدیکتر می شوند که این امر آنچنان که معادله (۱۷) پیش بینی می کند حاکی از کاهش تمایل حلقه به کج شدن است.

شکلهای (۱۲) و (۱۳) نیروی نورد و گشتاور مجموعه های اجزای محدودی A0 تا A10 را مقایسه می کنند. در این شکلها بهترین چند جمله ای ممکن از نقاط محاسبه شده گذرانده شده تا نمایش بهتری میسر شود. اطلاعات مربوط به آزمایشها نیز از جدول (۲) اخذ شده تا امکان مقایسه آن با حل دوبعدی فراهم شود. از بررسی نتایج ملاحظه می شود که وجود غلتکهای راهنما تا ۱۴ درصد مقادیر محاسبه شده نیروی نورد را افزایش داده است. همچنین انطباق بسیار خوبی که بین نتایج آزمایشها و شبیه سازیها تا مراحل پایانی مشاهده می شود حاکی از عدم تاثیر افزایش احتمالی خطسا در اثر اعوجاجهای شدید المانی است که در مراحل پایانی مشاهده می شود. در عوض، علی رغم افزایش نیروی نورد گشتاور غلتک اصلی در شروع فرایند حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است از آنجایی که انرژی مصرفی در این فرایند از طریق گشتاور غلتک اصلی تامین



شکل ۱۵- نیرو در غلتکهای راهنما



شکل ۱۶- گشتاور نورد در مراحل ابتدایی

پاسنخهای مجموعه A10 منطبق اند. طبیعی که در معادله (۱۷) مشاهده شد در هر سه این منحیها مشاهده می شود. بدین معنی که نیروی غلتکهای راهنما با پیشروی فرایند کاهش می یابد. نکته حائز اهمیت انطباق بسیار خوب نتایج مجموعه A1 و نتایج آزمایشها است و این نشان می دهد که سختی مکانیزم تطبیق دهنده غلتکهای راهنما برای دستگاه آزمایش [5] بسیار نزدیک به سختی میله های حرارتی در مجموعه A1 بوده است. حتی نتایج اجزای محدود پیش بینی کرده که جهت گشتاور ایستا در حدود ۵۰ درصد نسبت کاهش ضخامت تغییر می کند که منطبق با نتایج آزمایشها است. تغییر جهت این گشتاور با توجه به معادله (۱۵) که امکان منفی شدن بازوی گشتاور ایستا را پیش بینی می کند قابل توضیح است. چرا که هر چه فرایند نورد پیشرفت کند طول ناحیه تماس با ماندلر کاهش یافته و بر عکس طول ناحیه تماس حلقه با غلتک اصلی افزایش می یابد.

مقایسه شکل های (۱۲) و (۱۵) نشان می دهد که نیروی غلتکهای راهنما در مقایسه با نیروی نورد بسیار کوچک است به طوری که کل عکس العمل ۳۶۰ میله گرمایی در گره مرکزی در حالت A100 یعنی حالتی که سختی میله ها ۱۰ برابر حداکثر مقدار مورد نیاز انتخاب شده اند فقط یک بیستم نیروی نورد است. این

هنگامی که از روش میله های گرمایی در مدلسازی غلتکهای راهنما استفاده کنیم خواهیم دید که فاصله عمودی نیروی عکس العمل گره مرکزی تا مرکز دهانه خروجی همواره معادل شعاع متوسط حلقه است. بنابراین نیروی غلتکهای راهنما محاسبه شده در سطر نهم جدول (۲) قابل مقایسه با نیروی عکس العمل گره مرکزی در روش میله های گرمایی است. این نیروها در شکل (۱۵) تصویر شده اند. هنگامی که میله ای تعریف نشده، عکس العمل در گره مرکزی صفر است، بنابراین برای مجموعه A0 حداکثر کج شدن حلقه اتفاق می افتد. عکس العمل گره مرکزی در مجموعه A1 نشان می دهد که حدوداً ۲۸ نیوتن به ازای واحد عرض حلقه نیرو در گره مرکزی ایجاد شده، این نیرو تا حد زیادی از کج شدن حلقه جلوگیری می کند. هنگامی که سختی میله ها را ۱۰ برابر می کنیم تقریباً کج شدن به صفر می رسد و نیروی ایجاد شده در این حالت ۲/۶ برابر حالت قبل است. حال اگر سختی میله ها را ۱۰۰ برابر کنیم به طور مطلق تغییر خاصی در میزان کج شدن حلقه اتفاق نمی افتد و آنچه که انتظار می رود نیروی گره مرکزی، محاسبه شده از مجموعه های A10 و A100 تقریباً یکسان اند. اختلاف ناچیز مجموعه A10 و A100 فقط در شکل اخیر قابل تشخیص است به طوری که در کلیه شکل های قبلی پاسنخهای مجموعه A100 تقریباً بر

جدول ۳- مشخصات نورد - حلقه‌های سریبی

| شکل T | مستطیلی | شکل مقطع محصول نهایی | |
|----------------|----------------|---|------------------------|
| مشابه جدول (۱) | مشابه جدول (۱) | مشخصات هندسی قرص اولیه و غلتک اصلی | |
| ۲/۷۵ | ۲/۷۵ | قطر (in) | مشخصات هندسی ماندل |
| ۰/۲۵ | | نسبت پهنای شیار به پهنای کل (b/H ₀) | |
| ۳۱ | ۳۱ | سرعت دورانی غلتک اصلی (rpm) | مشخصات تحریک |
| ۰/۱ | ۰/۱ | نرخ تغذیه (in/rev) | |
| ۵۵ | ۷۵ | کل نسبت کاهش ضخامت (%) | |
| ۴۴۴۰ | ۳۶۰۰ | تعداد المانهای آجری | مشخصات مدل اجزای محدود |
| ۶۰۰ | ۳۶۰ | تعداد المانهای تماس | |
| ۱۲۰ | ۱۲۰ | تعداد المانهای میله‌ای | |
| ۲ | ۲ | تعداد المانهای هدف | |
| ۵۱۶۲ | ۴۰۸۲ | تعداد کل المانها | |
| ۵۸۸۳ | ۵۲۸۳ | تعداد کل گره‌ها | |

در دمای محیط به شدت تابع نرخ کرنش است و در سر جمع [۱۶] به صورت زیر بیان شده است:

$$\bar{\sigma} = 34.72(1.0 + 16.5\dot{\epsilon})^{0.0512} + 15.5\dot{\epsilon}^{0.221} \text{ (MPa)} \quad (19)$$

قانون بالا به شکل مدل پیرس^{۱۷} با تقریب خوبی قابل بیان است:

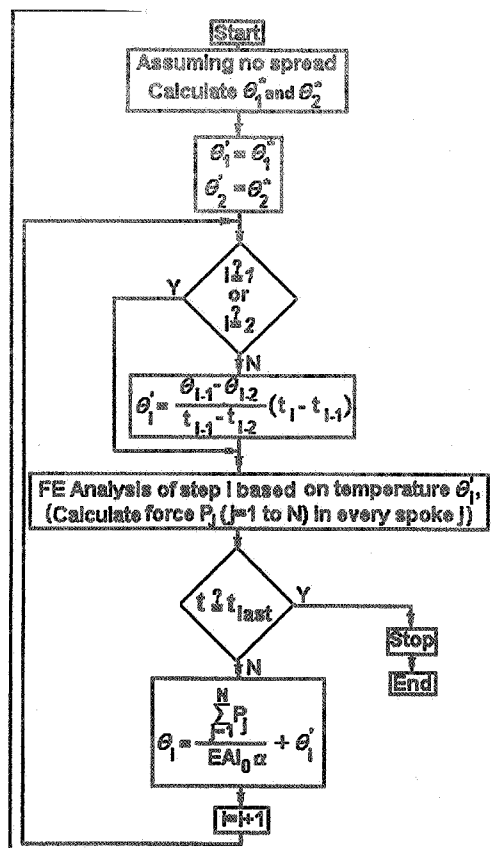
$$\bar{\sigma} = (1.0 + 16.5\dot{\epsilon})^{0.0512} * (34.72 + 14.1\dot{\epsilon}^{0.221}) \text{ (MPa)} \quad (20)$$

معادله بالا به عنوان متشکله برای دو نمونه حلقه با مقاطع مستطیلی و T شکل تعریف شده است. در هر دو مورد ضریب اصطکاک غلتکها با حلقه $\mu = 0.5$ اختیار شده است [۱۶]. همچنین به دلیل وجود صفحه تقارن نیمی از قطعه‌کار شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی تقارن بر صفحه مذکور اعمال شده است. مشخصات هندسی قطعه و مدل اجزای محدود به تفکیک در جدول (۳) منعکس شده اند. شکل (۱۶) نحوه المان

موضوع نشان می‌دهد که سختی مورد نیاز برای میله‌های گرمایی بسیار جزئی است و این میله‌ها ظریفتر از آن هستند که از انبساط حلقه جلوگیری کرده یا تاثیری بر بیضی‌گون^{۱۵} شدن آن بگذارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اگر سختی میله‌ها به حدی باشد که از کج شدن حلقه جلوگیری کند افزایش سختی میله‌ها تاثیری بر پاسخ ندارد اما انتخاب میله‌های بسیار سخت مستلزم تعیین درجه حرارت بسیار دقیق وابسته به لحظه خروج گره متصل به میله از ناحیه تغییر شکل خواهد بود.

۳-۵- مدل اجزای محدود سه‌بعدی

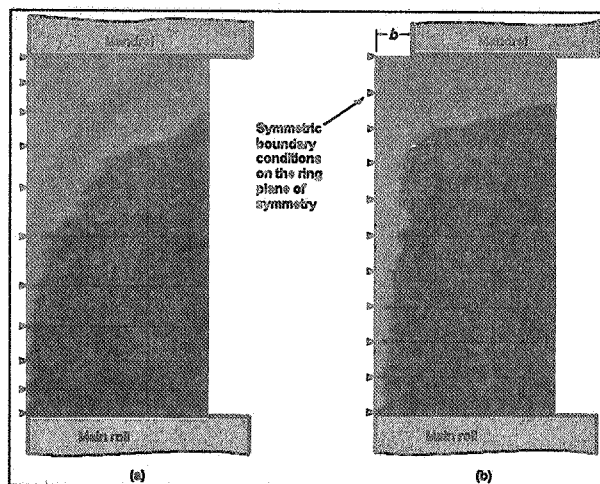
به منظور شبیه‌سازی نورد حلقه‌های فولادی در حالت داغ، [۱۶] آزمایش‌های متعددی بر روی آلیاژ سرب و تلوریم^{۱۶} در دمای محیط به انجام رسانده است. مشابه فولاد داغ، متشکله این ماده



شکل ۱۷- الگوریتم شبیه سازی پارامتری در محاسبه دمای میله ای گرمایی

نورد مشخص شد. چون آزمایشهای مینا در این بخش که از مرجع [۶] اقتباس شده‌اند نیز با همان ماشین به انجام رسیده‌اند، لذا سختی کل میله‌ها بر اساس تعداد آنها و عرض قرص اولیه به نحوی انتخاب شده که مطابق با سختی مجموعه A1 باشد. در مدل‌های سه‌بعدی تعریف^{۱۸} و جریان مسود به داخل شیار غلتکها^{۱۹} محاسبه یک رابطه صریح برای بیان شعاع تار مرکزی حلقه را غیرممکن می‌سازد، لذا در این مورد شبیه‌سازی به صورت پارامتری به انجام رسیده. مبنای شبیه‌سازی پارامتری^{۲۰} استفاده از خروجیهای هر گام برای تعریف گام بعدی است. الگوریتم ارائه شده در شکل (۱۷) جزئیات استفاده از این روش در تعریف و محاسبه دمای میله‌های گرمایی را نشان می‌دهد.

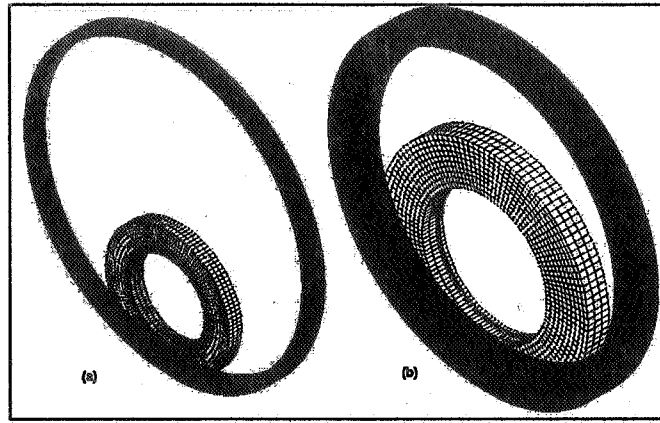
تعریف گامهای بارگذاری جدید می‌تواند در هر گام یا در پیوندهای مشخص انجام گیرد. از آنجایی که هزینه



شکل ۱۶- نحوه المان بندی مقطع حلقه
a - مقطع مستطیلی b - مقطع T شکل

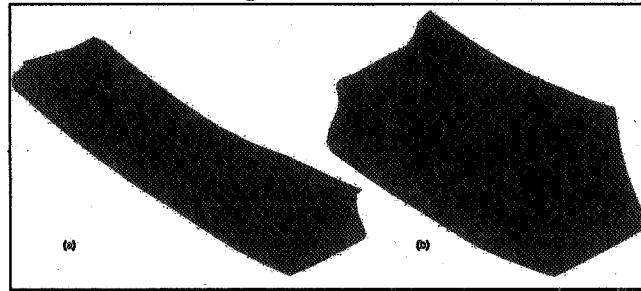
بندی در مقاطع حلقه‌ها را نشان می‌دهد. المانهای ۸ گرهی آجری و یا ۶ گرهی منشوری از دوران این مقاطع حول محور اولیه حلقه و در کمانهایی به اندازه ۳ درجه حاصل می‌شوند. کلیه مشخصات این المانها را می‌توان در [۲۶] تحت عنوان المان Solid 185 یافت. ضمن اینکه در این المان به منظور کاهش احتمال بروز قفل‌بندی حجمی از نوعی روش انتگرال گیری کاهش یافته انتخابی تحت عنوان روش \bar{B} استفاده شده است [۲۸]. ابزار نیز به صورت استوانه‌های صلب توسط المانهای هدف مدل شده است. در مورد حلقه با مقطع T شکل، استوانه‌ای مربوط به ماندرل به میزان نصف عرض شیار از صفحه تقارن دورتر است تا ماده امکان جریان یافتن به داخل شیار را بیابد. مشابه با مدل دوبعدی بر سطوح داخلی و خارجی حلقه المانهای تماس تعریف شده‌اند. البته سطوحی که مطمئناً به داخل شیار نفوذ می‌کنند از این قاعده مستثنی هستند تا در هزینه محاسبات صرفه‌جویی شود. همچنین دانسیته المانهای تماس در حوالی شیار بالاتر در نظر گرفته شده تا نفوذ المانها دقیقتر محاسبه شود.

۵-۶- تعیین دمای میله‌های گرمایی در مدل‌های سه‌بعدی در بخش قبل حدود سختی غلتکهای راهنما برای ماشین



شکل ۱۸- تصویر نهایی حلقه‌ها

a - مقطع مستطیلی (Reduction=75%) b- مقطع T شکل (Reduction=55%)



شکل ۱۹- تغییر شکل و تمریض المانها حین گذر از شکاف بین غلتکها

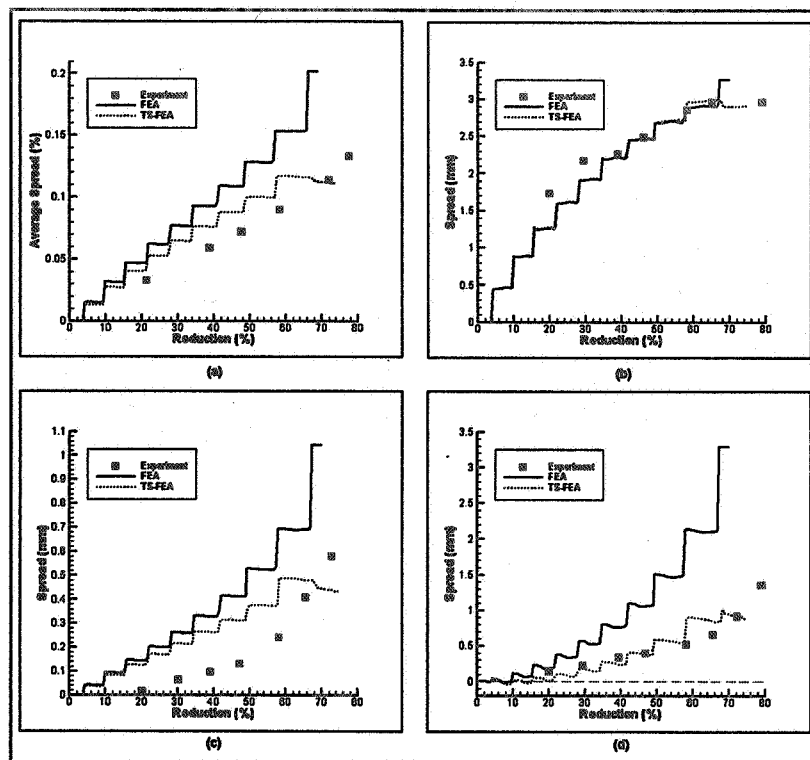
a - مقطع مستطیلی (Reduction=75%) b- مقطع T شکل (Reduction=55%)

۵-۵- بررسی نتایج بخش سه بعدی

شکل (۱۸) تصویر نهایی حلقه‌ها را نمایش می‌دهد. شکل (۱۹) با وضوح بیشتر نشان می‌دهد که چگونه المانهایی که تا حد زیادی تغییر شکل یافته‌اند حین گذر از شکاف بین غلتکها تغییر شکل می‌یابند. پدیده دم ماهی شدن در هر دو تصویر به وضوح مشهود است تحلیلهای نظری موجود بر روی نورد نامتقارن نشان می‌دهد که علت این امر به وجود آمدن تنشهای فشاری در لایه‌های داخلی و خارجی و تنشهای کششی در لایه میانی قطعه کار است [۲۷]. در مورد حلقه با مقطع مستطیلی شبیه‌سازی بدون وجود میله‌های گرمایی نیز میسر است اما برای مقاطع

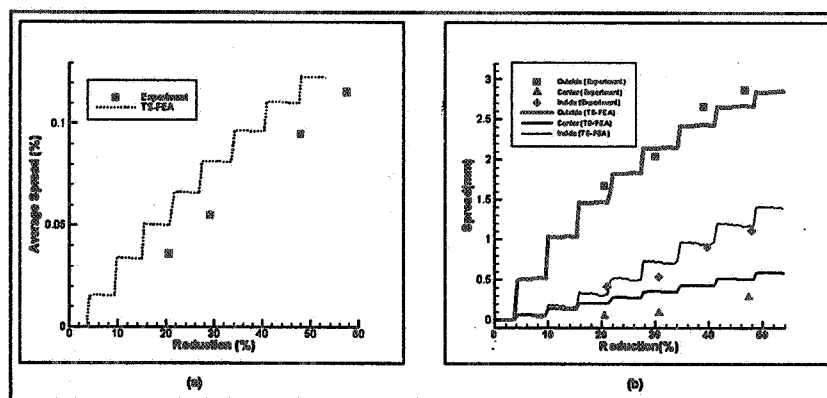
راه اندازی مجدد مسئله برای هر گام بسیار زیاد است، تعیین پیرودهای مناسب اهمیت زیادی دارد. در مورد مدل‌های مورد مطالعه سختی میله‌ها به قدری اندک است که حتی در صورت ۱ میلیمتر خطا در پیش بینی دمای میله‌ها تنها 0.2 Mpa تنش شعاعی در حلقه ایجاد می‌شود. لذا کل حل به 30 گام بارگذاری تقسیم شده است. چون نرخ افزایش قطر حلقه در ابتدای فرایند کمتر است اولین گام برحسب زمان حقیقی حل $1/2$ ثانیه و آخرین گام 0.2 ثانیه در نظر گرفته شده است*.

* به طور مثال زمان حقیقی، یعنی زمان انجام فرایند حین آزمایش برای اعمال 54 درصد نسبت کاهش ضخامت به مقطع T شکل $10/4$ ثانیه است. که هر بار شبیه‌سازی آن توسط یک رایانه با مشخصات کلی (PentiumIII, 1GHZ)، 44 روز به طول می‌انجامد. بنابراین ملاحظه می‌شود که به طور متوسط هر 2 روز یک مرتبه یک گام بارگذاری جدید برای مساله تعریف شده. متذکر می‌گردد که امکاناتی وجود دارد تا این کار به طور خود کسلر انجام پذیرد.



شکل ۲۰- تعریض در حلقه با مقطع مستطیلی

a- متوسط تعریض b- تعریض در لایه بالایی c- تعریض در لایه میانی d- تعریض در لایه داخلی

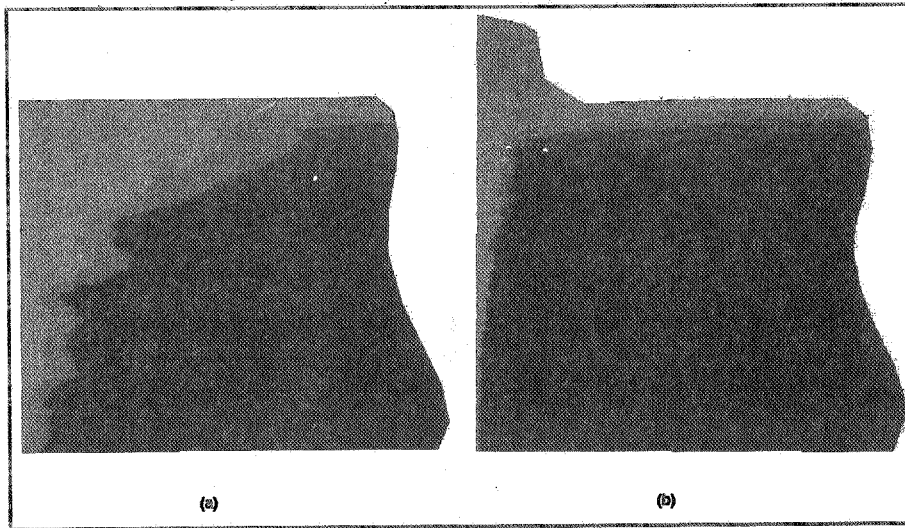


شکل ۲۱- تعریض در حلقه با مقطع T شکل

a- متوسط تعریض b- تعریض در لایه بالایی، میانی و پایینی

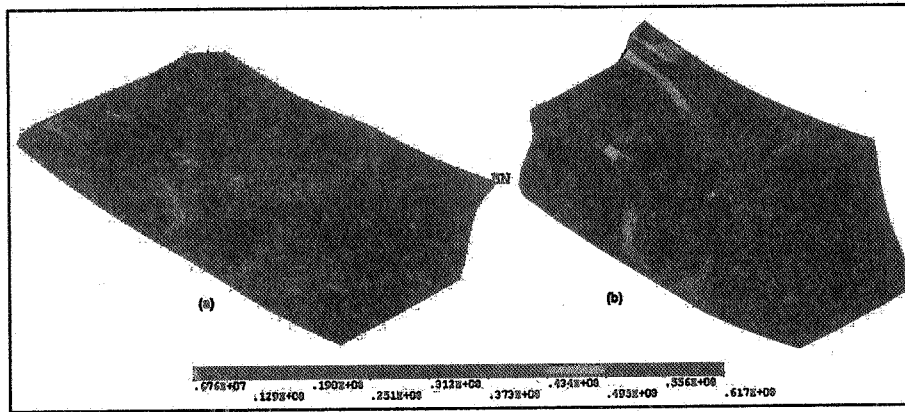
همان طور که ملاحظه می شود علی رغم موفقیت این مدل در تعیین الگوهای جریان و تعریض، چگالی پایین مش در حوالی شیار مانع از محاسبه دقیق نحوه پر شدن شیار شده است. اجتناب از افزایش هزینه های محاسباتی در این خصوص

T شکل کج شدن حلقه و تداخل بیش از حد المانهای تماسی در حوالی شیار اجازه پیشروی فرایند را نمی دهد. اشکال (۲۰) و (۲۱) نتایج تعریض ماده در این شبیه سازیها را نشان می دهند. شکل (۲۲) شکل المانها در مقطع حلقه ها را نشان می دهد.



شکل ۲۲- تغییر شکل المانها در مقطع

a- مقطع مستطیلی (Reduction=55%) b- مقطع T شکل (Reduction=55%)



شکل ۲۳- تنش معادل فون میز در

a- مقطع مستطیلی (Reduction=55%) b- مقطع T شکل (Reduction=55%)

۶- نتیجه گیری

مقایسه نتایج شبیه‌سازیهای اجزای محدود نشان می‌دهد که کج شدن حلقه باعث تغییر در ناحیه درگیری حلقه و ابزار می‌شود و به تبع آن کلیه پارامترهای فرایند منجمه نیرو، گشتاور و تعریض تغییر می‌کنند. روش میله‌های گرمایی به ما کمک می‌کنند تا علیرغم طبیعت غیر خطی مسئله تماس غلتکهای راهنما با حلقه و همچنین پیچیدگی مکانیزم تطبیق دهنده این غلتکها به سادگی و با کمترین هزینه اثر آنها را

مدلهای جدیدی تشکیل شده که ایده اصلی آن کاهش چگالی مش در بدنه حلقه و افزایش آن در حوالی شیار است [۱۶]. شکل (۲۳) توزیع تنش فون میزز در حوالی شکاف بین غلتکها را نمایش می‌دهد. خارج از این ناحیه تنشها به شدت افت کرده و فقط شامل تنشهای خمشی ناشی از گاز گرفتگی حلقه بین غلتکهای کار است.

تخمین نیروی غلتکهای راهنما را فراهم می‌کند که در طراحی رینگسازها حائز اهمیت بسیار است.

قدردانی

این پروژه تحقیقاتی از طریق طرح ملی تحقیقات، شماره ثبت ۱۰۷۷ با حمایت شورای پژوهش‌های علمی کشور انجام یافته است. مجری و همکاران از حمایت کنندگان این پروژه کمال قدردانی را می‌نمایند

شبیه‌سازی کنیم. این روش اولین و تنها روشی است که بدون محدودیت قادر به شبیه‌سازی غلتکهای راهنماست و با توجه به پیچیدگی و زمان حل فوق‌العاده زیاد در شبیه‌سازی فرایند نورد حلقه اهمیت استفاده از این ایسن روش دو چندان می‌شود. به علاوه وجود غلتکهای راهنما (میله‌های گرمایی)، امکان تحلیل فرایند برای نرخ کاهش ضخامت بالا و همچنین پایدار کردن فرایند برای مقاطع پیچیده را میسر می‌گرداند. مقایسه نظریه اصلاح شده بازوی هرز و شبیه‌سازیهای اجزای محدود تایید می‌کند که نیروی اعمالی از طرف غلتکهای کار به حلقه همراستا نبوده و عامل اصلی کج شدن حلقه است. ابداع این نظریه امکان

واژه نامه

- 1- thermal spokes
- 2- closed pass rolling
- 3- feed rate
- 4- roll gap
- 5- collapse
- 6- deformation zone
- 7- reduction
- 8- tilting
- 9- circularity (opposite of ovality)
- 10-bar or truss elements

- 11- target elements
- 12- contact elements
- 13- time steps
- 14- augmented-Lagrange multiplier method
- 15- ovality
- 16- tellurium lead
- 17- Peirce
- 18- spread
- 19- groove
- 20- parametric simulation

مراجع

1. Szabo, Z. J., Dittrich, E., "Manufacturing Systems for the Production Seamless-Rolled Rings," *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 60, pp. 67-72, 1996.
2. Johnson, W., Needham, G., "Experiment on Ring Rolling," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 10, pp. 95-113, 1968.
3. Howkyard, J. B., Johnson, W., Kirikland, J., Appleton, E., "Analysis for roll Force and Torque in Ring Rolling, With Some Supporting Experiments," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 15, pp. 873-893, 1973.
4. Mamalis A. G., Johnson, W., Howkyard, J. B., "On the Pressure Distribution Between Stock and Rolls in Ring Rolling," *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 18, No.4, pp. 184-196, 1976.
5. Mamalis A. G., Johnson, W., Howkyard, J. B., "Pressure Distribution, Roll Force and Torque in Cold Ring Rolling," *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 196-209, 1976.
6. Mamalis, A. G., Howkyard, J. B., Johnson, W., "Spread and Flow Patterns in Ring Rolling," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 18, pp. 11-16, 1976.
7. Yang, D. Y., Ryoo, J. S., Choi, J. C., Johnson, W., "Analysis of Roll Torque in Profile Ring Rolling of L-Sections," *Proceedings of 21st International MTDR Conference*, London, pp. 69-74, 1980.
8. Ryoo, J. S., Yang, D. Y., Johnson, W., "Ring Rolling; the Inclusion of Pressure Roll Speed for Estimating Torque by Using a Velocity Superposition Method," *Proceedings of 24th International MTDR Conference*, Manchester, pp. 69-74, 1983.
9. Hayama, M., "Theoretical Analysis on Ring Rolling of Plain Rings," *Bull. Faculty Engng, Yokohama National University*, Vol. 31, pp. 131-143, 1982.
10. Lugora, C. F., Bramley, A. N., "Analysis of Spread in Ring Rolling," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 29, pp. 132-140, 1989.
11. Yang, D.Y., Kim, K. H., "Rigid Plastic Finite Element Analysis of Plain Strain Ring Rolling," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.

- 30, pp. 571-580, 1988.
12. Xu, S. G., Lian, J. C., Howkyard, J. B., "Simulation of Ring Rolling Using a Rigid Plastic Finite Element Model," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 33, No. 5, 393-401, 1991.
 13. Xu, S. G., Weinmann, K. J., Yang, D. Y., Lian, J. C., "Simulation of the Hot Ring Rolling Process by Using a Thermo-Coupled Three-Dimensional Rigid-Viscoplastic Finite Element Method," *Journal of Manufacturing Science and engineering*, Vol. 119, pp. 542-549, 1997.
 14. Tszeng, T. C., Altan, T., "Investigation of Ring Rolling by Pseudo Plane Strain FEM Analysis," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 27, pp. 151-161, 1991.
 15. Joun, M. S., Chung, J. H., Shivpuri, R., "An Axisymmetric Forging Approach to Perform Design in Ring Rolling Using a Rigid-Viscoplastic Finite Element Method," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 1183-1191, 1998.
 16. Kim, N., Machida, S., Kobayashi, S., "Ring Rolling Process Simulation by the Three Dimensional Finite Element Method," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 30, No. 4, pp. 569-577, 1990.
 17. Hu, Z. M., Pillinger, I., Hartley, P., McKenzie, S., Spence, P. J., "Three Dimensional Finite Element Modeling of Ring Rolling," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp. 143-148, 1994.
 18. Lim, T., Pillinger, I., Hartley, P., "A Finite Element Simulation of Profile Ring Rolling Using a Hybrid Mesh Model," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 199-205, 1998.
 19. Xie, C., Dong, X., Li, S., Huang, S., "Rigid-Viscoplastic Dynamic Explicit FEA of the Ring Rolling Process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 81-93 2000.
 20. Hu, Y. K., Liu, W. k., "ALE Finite Element Formulation for Ring Rolling Analysis," *International Journal for numerical Methods in Engineering*, Vol. 33, pp. 1217-1236, 1992.
 21. Davey, K., Ward, M. J., "An Efficient Solution Method for Finite Element Ring Rolling Simulation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, pp. 1997-2018 2000.
 22. Gadala, M. S, and Wang, J., "ALE Formulation and its Application in Solid Mechanics," *Computer Methods and Application in Engineering*, Vol. 167, pp. 33-55, 1998.
 23. Bayoumi, H. N., Gadala, M. S., and Wang, J., "Numerical Simulation of Metal Forming Process," *Simulation of Materials Processing*, pp. 103-108 Rotterdam, Holland, 1998.
 24. Marczinski, H. J., "Ring Rolling Mills: The State of Development," *Metallurgia and Metal Forming*, Vol. 43, pp. 171-177, 1976.
 25. Lin, H., Zhi, Z. Z., "The extremum parameters in Ring Rolling," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 69, 273-276, 1997.
 26. ANSYS Rev 5.7, ANSYS, Inc, Canonsburg, PA, 2001.
 27. Salimi, M., "Investigation into the Rolling of Thick and Thin Walled Profiled Rings," Ph.D. Thesis, UMIST, 1988.
 28. Hughes, T.J.R., "Generalization of selective integration procedures to anisotropic and nonlinear media" *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp 1413-1418, (1980).