

توسعه یک مدل تماسی برای تحلیل دو بعدی

الاستیک-پلاستیک فرآیند شکل دهی مجدد لوله‌ها

حسن مسلمی نائینی^۱ و غلامحسین لیاقت^۲ مهدی سلمانی تهرانی^۳ سیامک مزدک^۴ و محمد رضا جنگجوی خلجان^۵

بخش مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه تربیت مدرس

گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه شهرکرد

بخش مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۱۰)

چکیده

یکی از مشکلات فرآیند شکل دهی مجدد برای تولید لوله‌هایی با مقاطع غیر گرد پیش‌بینی وضعیت تماس لوله و غلتک در حین تغییر شکل می‌باشد. در این پژوهش، تحلیل الاستیک-پلاستیک با فرض کرنش صفحه‌ای برای فرآیند شکل دهی مجدد لوله تدوین شده است. یکی از مشکلات فرآیند جدا شدن لوله از غلتک‌ها در بعضی از نواحی تغییر شکل در حین فرآیند می‌باشد. مدل تماسی ارائه شده در این پژوهش قابلیت تشخیص جدایش لوله از غلتک‌ها را دارد و در نتیجه پیش‌بینی بهتر عیوب امکان پذیر خواهد شد. در ادامه، برای بررسی صحت مدل ارائه شده، نتایج تحلیلی و تجربی مقایسه شده که تطابق نسبتاً خوبی مشاهده می‌شود.

واژه های کلیدی: شکل دهی مجدد لوله، مدل تماسی، تغییر شکل الاستیک-پلاستیک

Development of a Contact Model for Analyzing a 2-D Elastic-Plastic Reshaping Process of Pipes

H. Moslemi-Naeini and Gh. Liaghat
Mech. Eng. Group
School of Eng.
Tarbiat Modarres Univ.

M. Salmani Tehrani
Mech. Eng. Group
Shahrekord Univ.

S. Mazdak and M. Jangjou Kheljan
Mech. Eng. Dep't.
School of Eng.
Tarbiat Modarres Univ.

ABSTRACT

Predicting the status of contact between the pipe and the roll through deformation is considered as one of the problems of reshaping process in non-circular pipe production. In the present study, the elastic-plastic analysis is investigated assuming plane strain condition for reshaping process. One of the problems of the mentioned process is the separation of pipe from roll in some zones. The proposed model has the capability of predicting the separation of the pipe from roll, which results in better prediction of the defect. To verify the reliability of the present contact model, the result of the analysis was compared to those of experimental ones and showed good agreements.

Key Words: Reshaping Pipe, Contact Model, Elastic-Plastic Deformation

۱-استاد (نویسنده پاسخگو): moslemi@modares.ac.ir

۲-استاد

۳-استادیار

۴-دانشجوی دکتری

۵-دانشجوی کارشناسی ارشد

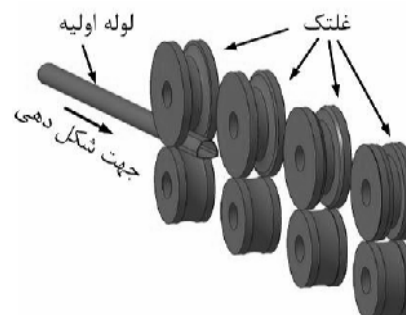
تفاضل محدود، تحلیلی دو بعدی الاستیک-پلاستیک را انجام داد. در این شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل تماسی ساده و الگوریتم پسر و پیشرو روشی برای طراحی غلتک ارائه داد. کیوچی^[۳] و همکارانش با استفاده از الگوریتم پسر و پیشرو، غلتک‌های مقطع کانالی را طراحی کردند.

مسلمی نائینی و همکاران^[۴] غلتک‌های مقطع پنج ضلعی را با استفاده از الگوریتم پسر و پیشرو ابداعی خود، طراحی نمودند. صنعتی^[۵] روش مسلمی را دنبال و تاثیر کرنش‌های برشی در برنامه را در نظر گرفت و شبیه‌سازی را برای تبدیل لوله گرد به مقطع مربع را انجام داد. کیوچی^[۶] و همکارانش با استفاده از توابع شکل، شکل ورق را در فرآیند شکل‌دهی مجدد تبدیل لوله گرد به لوله با مقطع بیضوی را تحلیل کرده‌اند. در این تحلیل، شکل پروفیل، سطح مقطع، ابعاد و شعاع گوشه‌ها، انقباض محیطی، افزایش طول در جهت طولی و افزایش ضخامت دیواره لوله بررسی شد. کیوچی^[۷] فرآیند تغییر شکل مجدد لوله‌های مربعی را با استفاده از چهار صفحه تخت انجام داده است. در این روش لوله گرد اولیه ابتدا گیره‌بندی شده و سپس چهار صفحه تخت به صورت تدریجی باعث تغییر شکل لوله گرد به لوله مربعی تبدیل می‌کند وی با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی پارامترهای موثر بر روی این فرآیند پرداخت و همچنین عیب تورفتگی دیواره‌ها را مورد مطالعه قرار داده است. ابری‌نیا^[۸] و همکارانش فرآیند شکل‌دهی مجدد تبدیل لوله گرد به لوله با مقطع مربع مستطیل را با استفاده از روش کران بالا تحلیل و بررسی کردند. غلتک‌های مورد استفاده در این روش به صورت چهارتایی و به صورت تخت در نظر گرفته شدند. ولیدی^[۹] با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله گرد به مقطع مربع و مستطیل را بررسی کرد. او در این بررسی اثر اصطکاک و سایش غلتک‌ها را در این فرآیند مورد بررسی قرار داد.

در این پژوهش تحلیلی الاستیک-پلاستیک با فرض کرنش صفحه‌ای انجام شد؛ همچنین یک مدل تماسی بر

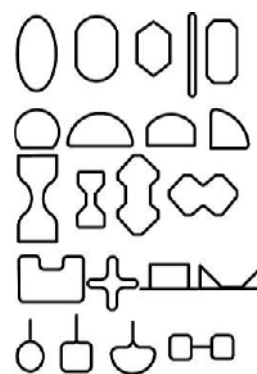
۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی مجدد یکی از روش‌های پر کاربرد برای تولید لوله با مقاطع غیر گرد از قبیل مربعی، چند ضلعی، کانالی شکل و ... می‌باشد.



شکل (۱): فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله [۱].

از مهم‌ترین مشکلات تولید با این روش می‌توان به پیش‌بینی شکل ورق در حین فرآیند، پیش‌بینی وضعیت تماس لوله و غلتک، طراحی پروفیل غلتک و آرایش غلتک‌ها برای تولید محصول جدید اشاره کرد. ساخت غلتک‌ها در این فرآیند زمان‌بر بوده و هزینه زیادی دارد. در نتیجه ارائه روشی برای طراحی غلتک، حائز اهمیت می‌باشد؛ برای ابداع هر روش طراحی ابتدا باید بتوان وضعیت تماس لوله و غلتک را پیش‌بینی کرد.



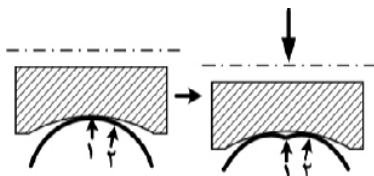
شکل (۲): انواع پروفیل تولیدی به روش شکل‌دهی مجدد^[۲].

پژوهشگران زیادی تلاش کرده‌اند تا این فرآیند را به روش‌های مختلفی تحلیل و شبیه‌سازی کنند. از جمله مسلمی نائینی^[۲] با استفاده از روش تعادل المان‌ها و حل

1-Kiuchi

2-Kwei

درگیر باشد و قسمتی دیگر جدا و در ادامه فرآیند این وضعیت عکس شود. نمونه‌ای از وضعیت متغیر تماس در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): وضعیت متغیر تماس در فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله.

از آنجا که شکل لوله در طول تغییر شکل تابعی از نقاط در تماس می‌باشد؛ ساده‌سازی تماس بین لوله و غلتک منجر به خطای زیادی در شبیه‌سازی می‌شود. از این رو در تحلیل‌های ریاضی که برای تماس، ساده‌سازی فرض کرده‌اند جواب‌های قابل اعتمادی حاصل نمی‌شود. برای پیش‌بینی تماس، لوله را به تعدادی المان تقسیم کرده و با استفاده از روش‌های عددی اجزای محدود یا تفاضل محدود و با بکارگیری الگوریتم مناسب برای تماس، تماس را پیش‌بینی می‌کنند. یکی از مشکلات روش‌های مبتنی بر اساس اجزای محدود زمان بر بودن این روش‌ها می‌باشد همچنین از آنجا که این روش‌های حل برای حالت‌های عمومی نوشته شده‌اند کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی مجدد ندارند.

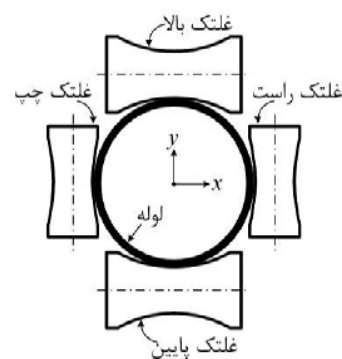
۴- الگوریتم حل مدل تماسی

برای ایجاد مدل تماسی تحلیلی در شبیه‌سازی‌های عددی نیاز است که نیروی تماس بدست آید؛ به همین منظور در شبیه‌سازی‌های عددی اعم از اجزای محدود و روش‌های مبتنی بر روش تعادل المان‌ها، نیروی عمودی باید در نظر گرفته شود. شکل ۵ المان استفاده شده در تحلیل الاستیک پلاستیک در این تحقیق را نشان می‌دهد.

اساس روش مسلمی نائینی [۲] با در نظر گرفتن غلتک‌ها به صورت صلب و در نظر گرفتن لوله به صورت تغییر شکل‌پذیر با قابلیت تشخیص جدایش لوله از غلتک و در نظر گرفتن نیروی جدایش توسعه داده شد. بر اساس روش تحلیل الاستیک پلاستیک و مدل تماسی توسعه داده شده یک نرم‌افزار تحت عنوان BFM^1 به منظور طراحی غلتک‌های فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله تدوین شد لازم به ذکر است مدل تماسی توسعه داده بر خلاف مدل تماسی ارائه شده توسط محققین دیگر از جمله ابری‌نیا [۸] قابلیت تشخیص جدایش لوله از غلتک را برای تحلیل‌های غیر از تحلیل اجزای محدود را دارد.

۲- انواع غلتک در فرآیند شکل‌دهی از لحاظ موقعیت

تشخیص جهت تماس پروفیل لوله و غلتک با توجه به جهت بردار نرمال و جهت حرکت مشخص می‌شود. در این پژوهش هدف ایجاد مدل تماسی برای فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله می‌باشد به همین دلیل با تقسیم‌بندی غلتک به چهار دسته بردار نرمال حذف شده است. در شکل ۳ انواع غلتک‌ها نشان داده شده است.



شکل (۳): انواع غلتک‌ها در مدل تماسی.

۳- تماس غلتک و ورق در فرآیند شکل‌دهی مجدد

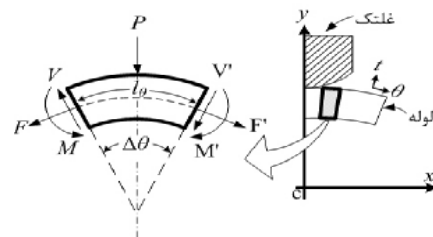
ماهیت فرآیند شکل‌دهی مجدد به صورتی است که تماس بین لوله و غلتک به صورت متغیر می‌باشد به این معنا که جزیی از لوله ممکن است در قسمتی از فرآیند با غلتک

۱- المان‌های تماسی عددی: در المان‌های عددی سطح غلتک به صورت مجموعه نقاط مجزا شده و در معادلات تماس به صورت نقطه نقطه وارد می‌شود و

۲- المان‌های تماسی ریاضی: غلتک به یک سری از توابع ریاضی تفکیک شده و در معادلات تماس این توابع با محدودیهایی که دارند وارد می‌شوند.

در این پژوهش از روش دوم استفاده شده است.

المان‌های تحلیلی استفاده شده در این روش در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۵): المان استفاده شده در تحلیل الاستیک پلاستیک [۲].

تماس از لحاظ عددی دو معنا دارد:

- ۱- تماس نیرویی و
- ۲- تماس هندسی.

تماس نیرویی به این معنا که نیرویی که بر اثر تماس به وجود می‌آید (نیروی P) همیشه بزرگتر یا مساوی یک مقدار حدی (P_{min}) است. اگر حالتی به وجود بیاید که نیروی P کمتر از نیروی حدی شود باید تماس بین غلتک و لوله را حذف کرده (ورق از غلتک جدا شده) و نیروی P را برابر مقدار حدی قرار داد در حالتی که بر اثر تماس نیروی P بزرگتر از مقدار حدی است تماس از لحاظ نیرویی برقرار است.

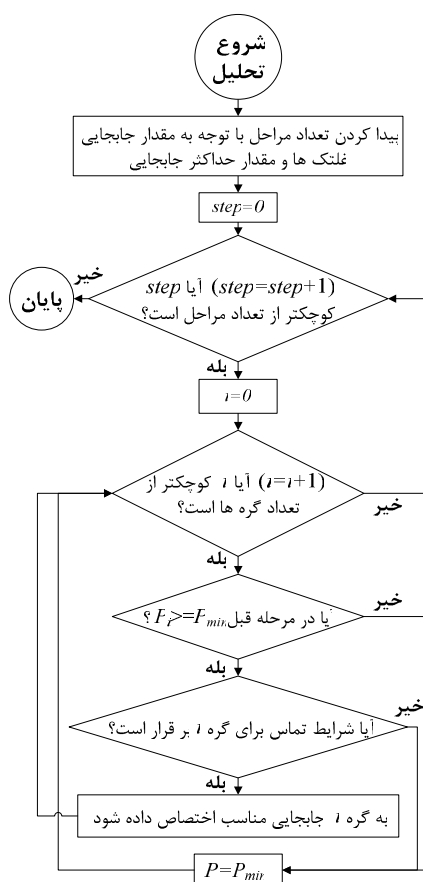
تماس از لحاظ هندسی به این معنا است که گره روی لوله در فاصله تعیین شده‌ای از غلتک قرار بگیرد. در تحلیل‌های عددی به این علت که صفر معنا ندارد یک بازه عددی را به جای صفر تعریف می‌کنند. الگوریتم نشان داده شده در شکل ۶ نحوه اعمال تماس در یک روش حل عددی به صورت نمودی را نشان می‌دهد.

۵- انواع المان‌های تحلیلی بکار رفته در تماس

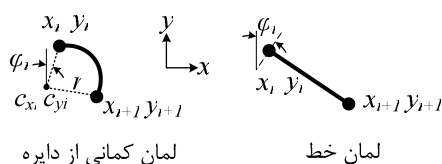
مدل تماسی بیان نحوه تماس غلتک و لوله در حین شبیه‌سازی می‌باشد. در فرآیند شکل‌دهی مجدد از آنجا که تغییر شکل غلتک در مقایسه با تغییر شکل لوله بسیار ناچیز است؛ از این رو غلتک را به صورت صلب در نظر گرفته می‌شود.

المان‌های تماسی به دو صورت کلی بیان می‌شوند که

عبارتند از:



شکل (۶): الگوریتم اعمال مدل تماسی به تحلیل عددی.



شکل (۷): انواع المان‌های تحلیلی به کار رفته در شبیه‌سازی.

مقدار فاصله d نشان داده شده در شکل ۹ از معادله (۳) و (۴) بدست می‌آید.

$$d' = \sqrt{(x_0 - x_c)^2 + (y_0 - y_c)^2} \quad (3)$$

$$d = r - d' \quad (4)$$

با توجه به نوع غلتک، شروط هندسی بدست می‌آیند.

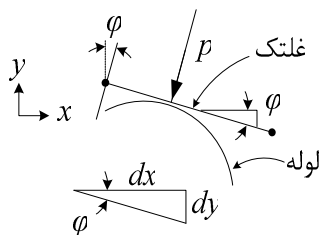
۷- اختصاص جابجایی به گره دارای شرایط تماس

پس از اینکه شرایط تماس برای گره مورد نظر احراز شد باید متناسب با جابجایی غلتک‌ها به گره مورد نظر جابجایی متناسب اعمال کرد که با توجه به نوع المان و غلتک متفاوت است.

نیروی تماس بین غلتک و لوله به صورت عمود بر لوله وارد می‌شود و با استفاده از این قاعده مقادیر جابجایی بدست می‌آید.

۷-۱- اعمال جابجایی به گره در تماس با غلتک بالا و پایین

در این دو غلتک مقدار جابجایی برابر δ که برای غلتک بالا مقدار منفی است و برای غلتک پایین مقداری مثبت است. همانطور که پیشتر بیان شد غلتک می‌تواند به صورت المان خط یا کمانی از دایره باشد. در شکل ۱۰ رابطه هندسی بین جابجایی در جهت x و y در حالتی که المان غلتک از نوع خط است را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): رابطه هندسی بین جابجایی در جهت x و y برای غلتک بالا و پایین به صورت المان خط.

معادلات (۵-۶) جابجایی را در جهت x و y برای غلتک بالا و پایین برای حالتی که المان غلتک از نوع خط است را نشان می‌دهند.

۶- معادلات حاکم بر المان‌های تحلیلی

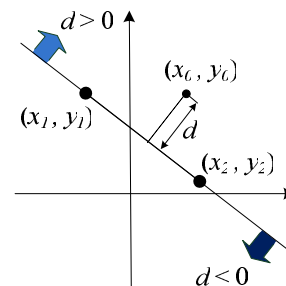
همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است برای تعریف المان خط نیاز به مختصات گره ابتدایی و انتهایی می‌باشد. برای المان کمانی از دایره علاوه بر موارد ذکر شده برای المان خط، به شعاع و مختصات مرکز دایره نیز نیاز است. برای اعمال شرایط هندسی در مدل تماسی نیاز به فاصله گره از غلتک است. فاصله نقطه (x_0, y_0) از خط با معادله‌ای مطابق معادله (۱) به صورت معادله (۲) بیان می‌شود.

$$ax + by + c = 0 \quad (1)$$

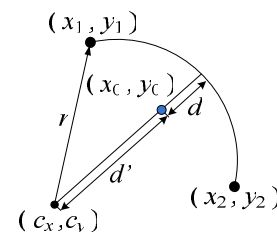
$$d = \frac{ax_0 + by_0 + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است؛ اگر نقطه (x_0, y_0) بالای خط باشد مقدار d مثبت و اگر زیر خط باشد مقدار آن منفی است. با استفاده از این خصوصیت و با توجه به نوع غلتک می‌توان شروط هندسی را تعریف کرد.

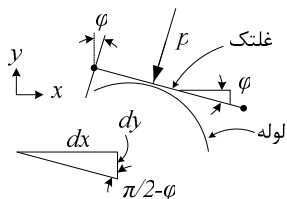
در مورد المان کمانی از دایره فاصله از پروفیل غلتک مطابق شکل ۹ تعریف می‌شود.



شکل (۸): فاصله نقطه (x_0, y_0) از المان خط.



شکل (۹): تعریف فاصله d در المان کمانی از دایره.



شکل (۱۲): رابطه هندسی بین جابجایی در جهت x و y برای غلتک راست و چپ به صورت المان خط.

معادلات (۹-۱۰) مقدار جابجایی در جهت x و y برای غلتک چپ و راست برای حالتی که المان غلتک از نوع خط است را نشان می‌دهند.

$$dx = \delta, \quad (9)$$

$$dx = \tan\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) dy. \quad (10)$$

با توجه به شکل ۱۱ معادلات (۱۱-۱۲) مقدار جابجایی در جهت x و y در حالتی که المان غلتک از نوع کمانی از دایره است را بیان می‌کنند.

$$dx = \delta, \quad (11)$$

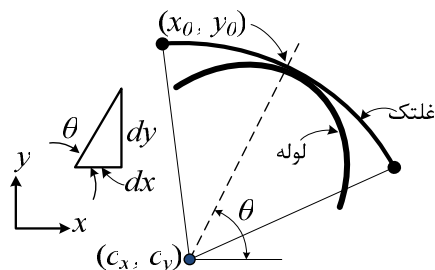
$$dx = \left(\frac{x_0 - c_x}{y_0 - c_y} \right) dy. \quad (12)$$

$$dy = \delta \quad (5)$$

$$dy = \tan(\varphi) dx \quad (6)$$

در شکل ۱۱ رابطه هندسی بین مقدار جابجایی در جهت x و y در حالتی که المان غلتک از نوع کمانی از دایره است را نشان می‌دهد.

تفاوت المان خط و کمانی از دایره در جابجایی، به زاویه تماس است. زاویه تماس در حالتی که المان خط است مقداری ثابت است؛ در حالی که برای المان کمانی از دایره بسته به موقعیت نقطه تماس این زاویه متغیر است. معادلات (۷-۸) جابجایی را در جهت x و y برای غلتک بالا و پایین در حالتی که المان غلتک از نوع کمانی از دایره است را نشان می‌دهند.



شکل (۱۱): رابطه هندسی بین جابجایی در جهت x و y برای غلتک به صورت المان کمانی از دایره.

۸- حل الاستیک - پلاستیک

برای حل الاستیک - پلاستیک در این پژوهش المانی مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شد و معادلات تعادل و سازگاری نوشته شد؛ سپس معادلات به شکل دیفرانسیلی نوشته و بوسیله روش تفاضل محدود حل شد. برای ناحیه پلاستیک با استفاده از روابط پراوتل روس و قانون جریان معادلات استخراج شد. در این روش تحلیلی فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- با توجه به طول زیاد لوله، کرنش طولی در راستای z صفر فرض شده و شرایط کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود،
- ۲- از تغییر مکان برشی بین دو المان مجاور چشم‌پوشی شده است و
- ۳- انحنای هر المان در راستای محیطی ثابت فرض شده است.

$$dy = \delta \quad (7)$$

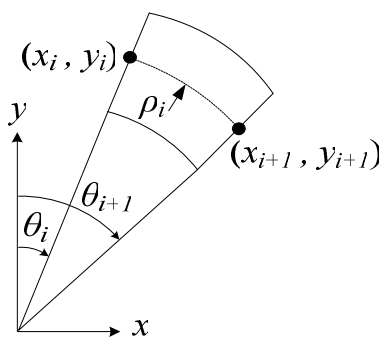
$$dy = \left(\frac{y_0 - c_y}{x_0 - c_x} \right) dx \quad (8)$$

۷-۲- اعمال جابجایی به گره در تماس با غلتک چپ و راست

در این دو نوع غلتک مشابه با غلتک‌های بالا و پایین مقدار جابجایی برابر δ است؛ که بر خلاف غلتک‌های بالا و پایین مقدار جابجایی در راستای x است که برای غلتک راست مقدار آن منفی و برای غلتک چپ مقدار آن مثبت است. در شکل ۱۲ رابطه هندسی بین جابجایی در جهت x و y در حالتی که المان غلتک از نوع خط است را نشان می‌دهد.

$$\frac{1}{2}(\theta_i + \theta_{i+1}) = \tan^{-1} \left(\frac{y_i - y_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (18)$$

در ادامه مدل تماسی به معادلات اضافه شده است. نحوه اعمال به این صورت است که برای گره‌هایی که شرایط تماس را دارند؛ معادلات مربوط به جابجایی به معادلات قبلی اضافه شده است و گره‌هایی که شرایط تماس را ندارند؛ نیروی p برای آن‌ها صفر در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه معادله $dp_i = 0$ به معادلات اضافه می‌شود. برای تکمیل دستگاه معادلات، ۶ معادله مربوط به شرایط مرزی به معادلات اضافه شده است. در نهایت دستگاه معادلات با یک روش عددی مناسب حل شد.



شکل (۱۵): شرایط سازگاری هر المان [۲].

معادله تنش و کرنش با استفاده از معادله (۱۹) تعریف شد که در حالت الاستیک و با توجه به فرض کرنش صفحه‌ای ضریب D به صورت معادله (۲۰) در نظر گرفته شده است. در حالت پلاستیک با استفاده از معادله پراتل‌روس و قانون جریان ضریب D به صورت معادله (۲۱) در نظر گرفته شده است. در معادلات (۲۳-۱۹)، E مدول یانگ، ν ضریب پواسون، G ضریب برشی، $\bar{\sigma}$ تنش موثر، و $\bar{\epsilon}^p$ کرنش پلاستیک موثر می‌باشد.

$$\{d\sigma\} = \mathbf{D}\{d\epsilon\} \quad (19)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}^p = \mathbf{D}^e - \frac{2G}{S} \begin{bmatrix} (\sigma'_x)^2 & (\sigma'_x)(\sigma'_\theta) & (\sigma'_x)(\sigma'_t) \\ (\sigma'_x)(\sigma'_\theta) & (\sigma'_\theta)^2 & (\sigma'_t)(\sigma'_\theta) \\ (\sigma'_x)(\sigma'_t) & (\sigma'_t)(\sigma'_\theta) & (\sigma'_t)^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

معادلات تعادل عبارتند از [۲]:

۱- معادله تعادل نیروها در راستای شعاعی

$$-(F' + F)\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) - (V' - V)\cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) - P = 0. \quad (13)$$

۲- معادله تعادل نیروها در راستای محیطی

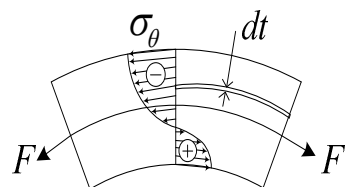
$$(F' - F)\cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) - (V' + V)\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = 0. \quad (14)$$

۳- معادله تعادل گشتاور خمشی،

$$(M' - M) + \{(F' - F)\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) + (V' + V)\cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)\} \left(\frac{l_\theta}{2}\right) = 0 \quad (15)$$

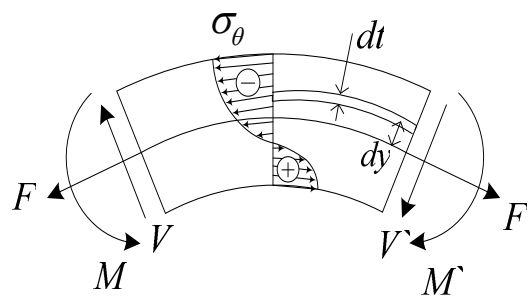
۴- معادله تعادل نیروی محیطی با برآیند تنش محیطی،

$$\frac{1}{2}(F' + F) = \int \sigma_\theta \times 1 \times dt \quad (16)$$



شکل (۱۳): تعادل نیروی محیطی با برآیند تنش‌های محیطی [۲].

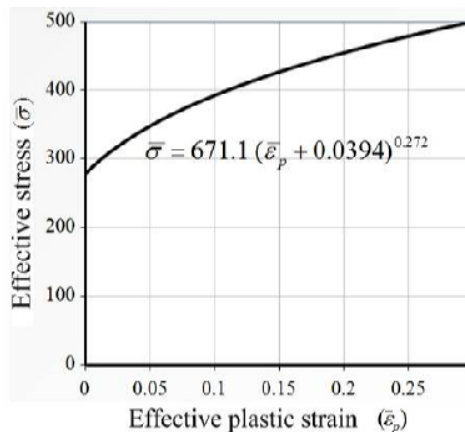
۵- معادله تعادل گشتاور خمشی با گشتاور حاصل از تنش محیطی و



شکل (۱۴): تعادل گشتاور خمشی با برآیند حاصل از گشتاور تنش‌های محیطی [۲].

$$\frac{1}{2}(M' + M) = \iint \sigma_\theta \times 1 \times dt dy \quad (17)$$

۶- معادله سازگاری که بر اساس حفظ شعاع انحنا المان این معادله نوشته شده است.

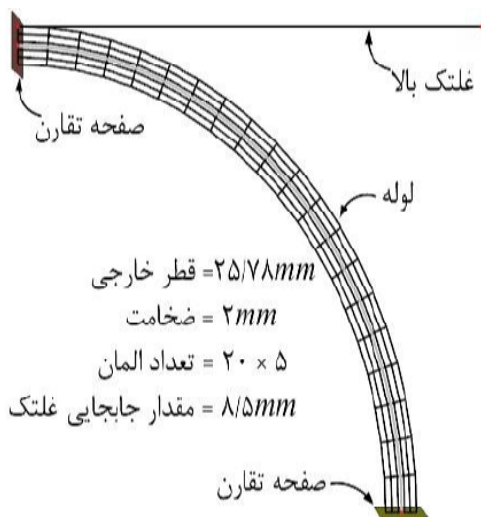


شکل (۱۶): نمودار حاصله از آزمایش کشش.

جدول (۲): خصوصیات مواد لوله‌های مورد آزمایش

۲۰۴ Gpa	مدول الاستیسیته
۲۷۸/۶ Mpa	تنش تسلیم
۰/۲۹	ضریب پواسن

شکل‌های ۱۷-۲۴ مدل‌های ایجاد شده را نشان می‌دهند. با توجه به این که معادلات برای غلتک بالا و پایین مشابه به هم و برای غلتک راست و چپ هم به همین صورت، مدل‌های در نظر گرفته شده تنها برای غلتک بالا و برای غلتک چپ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۷): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۱.

$$S = \frac{2}{3} \bar{\sigma}^2 \left\{ 1 + \frac{H'}{3G} \right\} \quad (22)$$

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}^p} \quad (23)$$

لازم به ذکر است به علت غیر خطی بودن مسئله کرنش‌ها و تنش‌ها به صورت نمودی در نظر گرفته شده است؛ که در طول حل به صورت افزایشی محاسبه شده‌اند.

۹- کار تجربی

به منظور صحت سنجی مدل ارایه شده آزمایش‌هایی انجام شد. در این آزمایش‌ها سه لوله گرد اولیه با مشخصات مطابق جدول ۱ بوسیله دو غلتک تخت له شد.

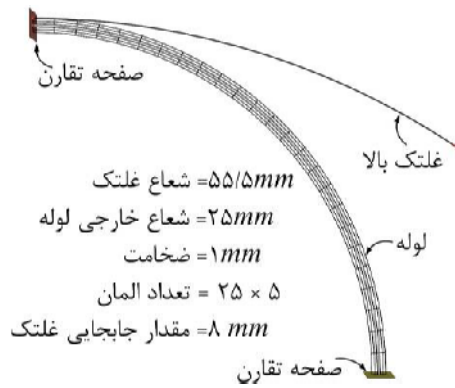
جدول (۱): مشخصات لوله‌های آزمایش شده.

مدل	قطر متوسط خارجی (mm)	ضخامت متوسط (mm)	مقدار کاهش (mm)
۱	۵۱/۵۶	۲	۸/۵
۲	۴۸/۴	۲	۷
۳	۴۸/۶	۳	۱۳/۹

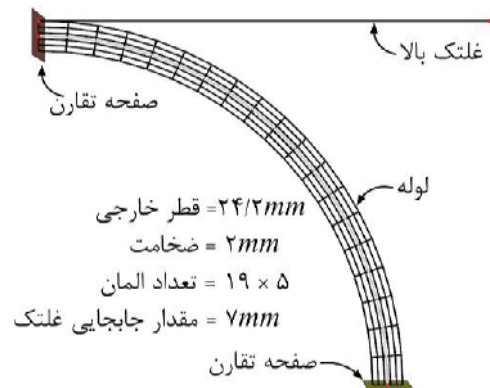
برای تعیین خصوصیات لوله‌ها، آزمایش کشش انجام شد و از آنجا که در تحلیلی عددی خصوصیات مواد به صورت قانون توانی استفاده می‌شود؛ پس از تبدیل نمودار جابجایی-نیرو به نمودار تنش کرنش برآزشی به صورت معادله توانی انجام شد. نمودار تنش کرنش حاصله در شکل ۱۶ نشان داده شده است و دیگر خصوصیات ماده طبق جدول ۲ تعریف شد.

۱۰- مدل سازی

برای بررسی مدل تماسی ارائه شده با استفاده از کد الاستیک پلاستیک نوشته شده، ۸ مدل برای بررسی معادلات تماسی در حالتی که غلتک یک تکه، تشکیل شده از خط یا دایره ایجاد شد و همچنین مدلی در حالتی که غلتک چند تکه است ایجاد شد (مدل ۸).



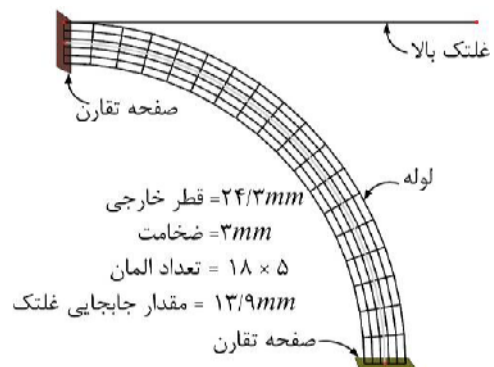
شکل (۲۱): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۵



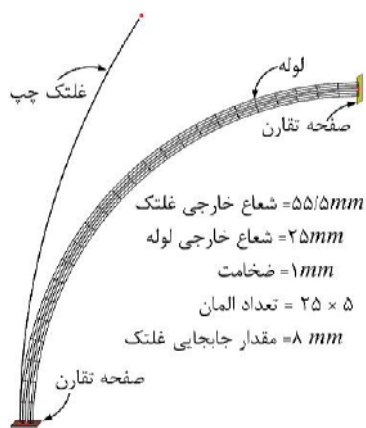
شکل (۱۸): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۲



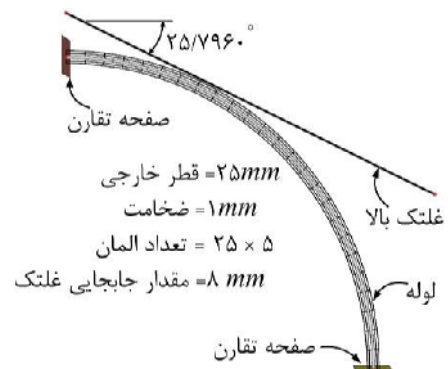
شکل (۲۲): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۶



شکل (۱۹): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۳



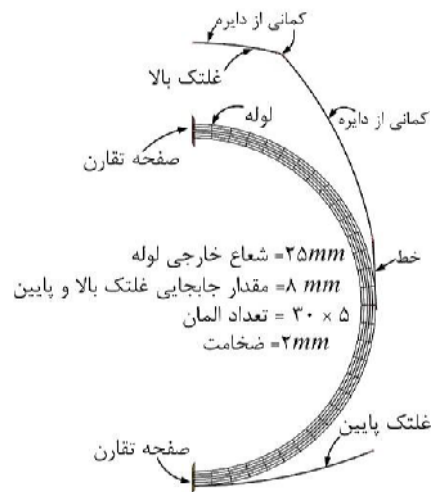
شکل (۲۳): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۷



شکل (۲۰): نمای شبکه‌بندی شده مدل ۴

- ۲- عدم در نظر گرفتن برش و
 ۳- عدم در نظر گرفتن اصطکاک.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده مقدار درصد خطا برای سه مدل متفاوت است؛ به علت اینکه در شرط هندسی تماس، فاصله گره روی لوله با غلتک معیار است و در تحلیل‌های عددی مقدار صفر معنا ندارد به ناچار یک بازه در نظر گرفته می‌شود؛ که مقدار این بازه در این تحلیل‌ها $0/005 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. در مدل ۱ مقدار جدادگی کوچک است و مقدار خطایی که با واقعیت دارد برابر $0/01$ است که بخشی از این خطا مربوط به شرط هندسی است در صورتی که در مدل ۳ به علت اینکه مقدار جدادگی بزرگتر است سهم شرط هندسی کم‌رنگ‌تر شده است.



شکل (۲۴): نمای شبکه بندی شده مدل ۸.

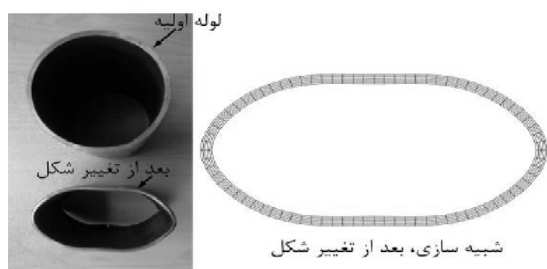
۱۱- نتایج و بحث

شکل‌های ۲۵-۲۷ نتایج حاصل از کار تجربی را نشان می‌دهند. شکل‌های ۲۸-۳۵ نتایج حاصل از تحلیل الاستیک پلاستیک دو بعدی را با در نظر گرفتن مدل تماسی بیان شده، نشان می‌دهند. همانطور که پیشتر بیان شد مدل ۱ تا ۳ مطابق با کار تجربی در نظر گرفته شده است. معیاری که به عنوان مقایسه نتایج حاصله با نتایج تجربی در نظر گرفته شده است؛ بیشترین مقدار جدادگی لوله از غلتک است. برای اندازه‌گیری مقادیر جدادگی نمونه تجربی بوسیله میکرومتر ارتفاع نمونه در بیشینه و کمینه لوله له شده اندازه‌گیری کرده و تفاضل این دو ارتفاع دو برابر مقدار جدادگی را نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقادیر بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی با در نظر گرفتن مدل تماسی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق نسبتاً خوبی بین تجربه و تحلیل وجود دارد.

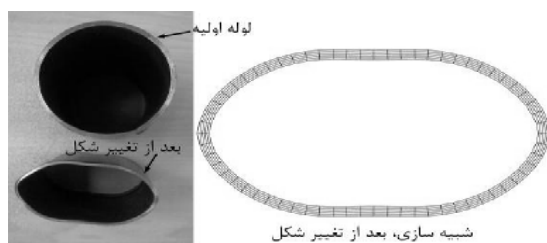
همانطور که در نتایج نشان داده شده مشاهده می‌شود؛ با افزایش مقدار جابجایی غلتک‌ها مقدار جدا شدگی بیشتر می‌شود که در آزمایش عملی و نتایج حاصل از تحلیل قابل مشاهده است.

در جدول ۳ بین نتایج تجربی و تحلیل عددی خطایی وجود دارد که از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

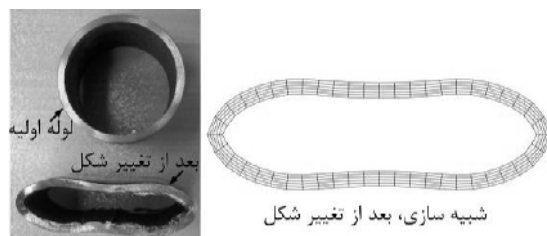
- ۱- در نظر گرفتن تحلیل به صورت دوبعدی،



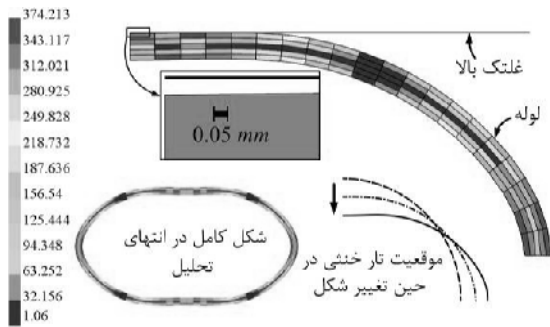
شکل (۲۵): نمونه آزمایش شده مطابق با مدل ۱.



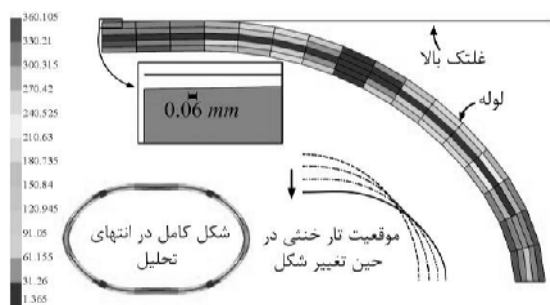
شکل (۲۶): نمونه آزمایش شده مطابق با مدل ۲.



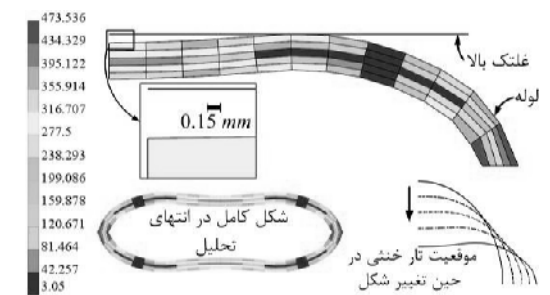
شکل (۲۷): نمونه آزمایش شده مطابق با مدل ۳.



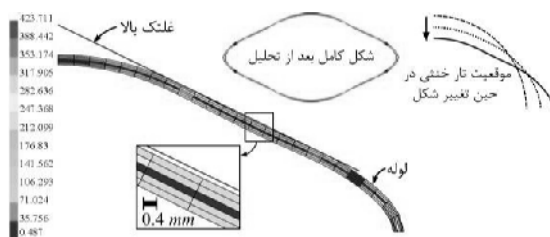
شکل (۲۸): توزیع تنش فون میسز برای مدل ۱ بر حسب مگا پاسکال.



شکل (۲۹): توزیع تنش فون میسز برای مدل ۲ بر حسب مگا پاسکال.



شکل (۳۰): توزیع تنش فون میسز برای مدل ۳ بر حسب مگا پاسکال.



شکل (۳۱): توزیع تنش فون میسز برای مدل ۴ بر حسب مگا پاسکال.

جدول (۳): مقایسه مقدار جداشدگی لوله از غلتک بین تجربه و تحلیل عددی.

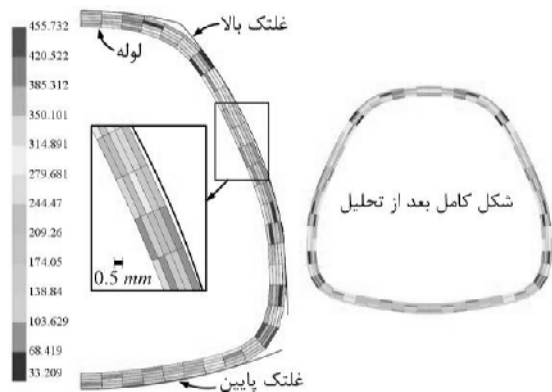
مدل	آزمایش	تحلیل عددی	خطا
۱	۰/۰۵۲	۰/۰۶۲	٪۱۹
۲	۰/۱	۰/۰۹۸۹	٪۱۰/۶
۳	۰/۷۳	۰/۷۳۸	٪۱/۰۹

برای بررسی مدل تماسی در حالت پیچیده تر مدل های ۴ تا ۸ ایجاد شد همانطور که مشاهده می شود شرایط مدل ۴ و ۶ شبیه به هم و به همین صورت مدل های ۵ و ۷ شبیه به هم هستند.

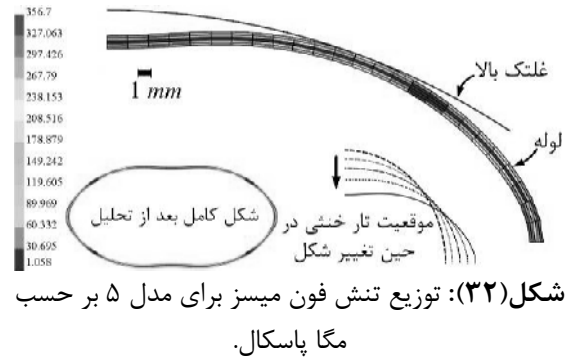
از مقایسه شکل ۱۳ و شکل ۳۳ و به همین صورت شکل ۲۳ و شکل ۴۳ همانطور که انتظار می رود نتایج تحلیل، شبیه به هم می باشد و جدا شدگی لوله از غلتک به طور واضح مشخص است.

برای بررسی مدل تماسی در حالتی که غلتک ها ترکیبی از خط و دایره هستند؛ مدل ۸ ایجاد شد که شکل ۳۵ نتایج حاصل از تحلیل عددی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تماس در تحلیل تشخیص داده شده همچنین در این حالت هم مثل حالت های قبل جدا شدگی لوله از غلتک برای نواحی مشخص شده بدست آمده است.

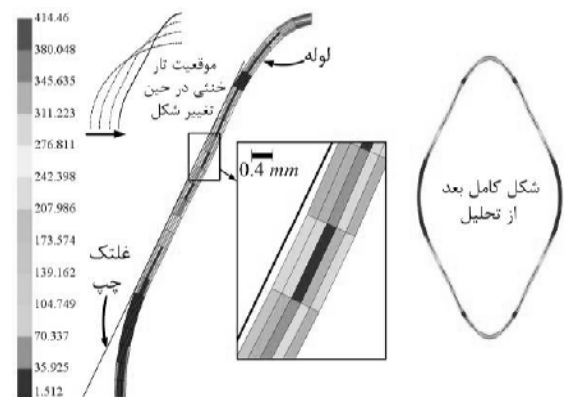
با بررسی شکل های ۲۸-۳۰ همانطور که مشاهده می شود قسمتی از لوله که در زیر غلتک قرار ندارد شکلی مشابه نمونه آزمایش شده دارد. همچنین با بررسی شکل ۳۱ و شکل ۳۳ همانطور که انتظار می رود به علت یکسان بودن شرایط تغییر شکل، نتایج یکسانی از توزیع تنش و جداشدگی دارند که تاییدی برای مدل تماسی ارائه شده است. همین استدلال را می توان برای شکل ۳۲ و شکل ۳۴ در نظر گرفت. با بررسی شکل ۳۵ مدل تماسی برای حالتی که غلتک ها ترکیبی از المان های خط و کمان هستند نیز قابلیت پیش بینی دارد.



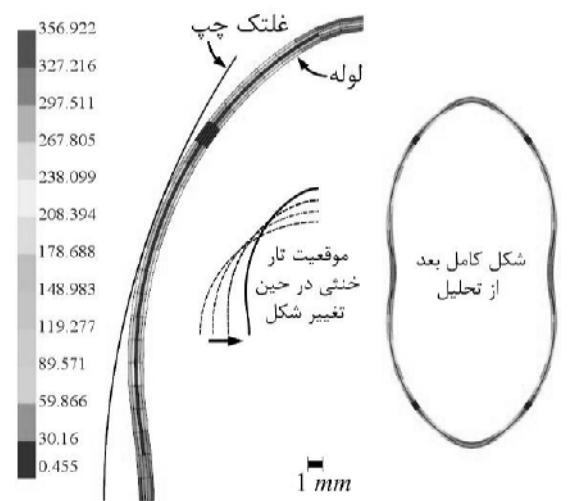
شکل (۳۵): توزیع تنش فون میسر برای مدل ۸ بر حسب مگا پاسکال.



شکل (۳۲): توزیع تنش فون میسر برای مدل ۵ بر حسب مگا پاسکال.



شکل (۳۳): توزیع تنش فون میسر برای مدل ۶ بر حسب مگا پاسکال.



شکل (۳۴): توزیع تنش فون میسر برای مدل ۷ بر حسب مگا پاسکال.

۱۲- نتیجه گیری

در این تحقیق، با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف گلنگ‌ها در فرآیند شکل‌دهی مجدد و تفکیک گلنگ به اجزای خط و کمان دایره‌ای، یک مدل تماسی برای فرآیند شکل‌دهی مجدد توسعه داده شد. در این مدل تماسی، با استفاده از دو شرط هندسی و نیرویی، جداسازی لوله از گلنگ به خوبی مدل شد. همچنین، نشان داده شد که این مدل توانایی پیش‌بینی تماس در حالت‌هایی که گلنگ دارای شکل پیچیده‌ای می‌باشد را دارد. در شبیه‌سازی‌ها و آزمایش تجربی مشاهده شد که با افزایش مقدار جابجایی گلنگ‌ها مقدار جداسازی افزایش می‌یابد. وجه تمایزی که در این مدل در نظر گرفته شده است، اعمال یک نیروی جدایش است که اعمال این نیرو باعث دقیق‌تر شدن مدل تماسی معرفی شده می‌شود.

۱۳- مراجع

۱. ولیدی، ح. "تحلیل عددی و تجربی فرآیند شکل‌دهی لوله‌های با مقطع مربعی و مستطیلی به کمک رایانه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲

2. Moslemi-Naeni, H., "Study on Design Method of Rolls for Reshaping of Non-Circular Pipes", Ph.D Dissertation, Mech. Eng. Dep't., Tokyo Univ., Japan, 2000

3. Kiuchi, M., Moslemi-Naeini, H., and Shintani, K., "Computer Aided Design of Rolls for Reshaping Processes from Round Pipes to Channel-type Pipes", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 32, No. 1, pp. 193-197, 2001.
4. Moslemi-Naeini, H., Kiuchi, M., Kitawaki, T., and Kuromatsu, R., "Design Method of Rolls for Reshaping Processes of Pipes with Pentagonal Cross-sections", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 36, No. 1, pp. 5-8, 2005.
۵. صنعتی، ع. "تحلیل عددی و تجربی فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله‌های با مقطع مربعی و مستطیلی به کمک رایانه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲
6. Kiuchi, M., Shinatani, K. and Moslemi-Naeini, H., "Numerical Analysis of Round to Oval Reshaping Process of Pipes", *J. Seisan-Kenkyu*, Vol. 50, No. 8, pp. 262-265, 1998.
7. Kwei, L.D., "The Shaping of a Circular Tube into a Symmetric Square-tube by Finite-Element Modeling", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 37, No. 1, pp. 287-296, 2006.
8. Abrinia, K. and Farahmand, H.R., "An Upper Bound Analysis for the Reshaping of Thick Tubes with Experimental Verification", *Int. J. Mech. Sciences*, Vol. 50, No. 1, pp. 342-358, 2007.