

طراحی و شبیه‌سازی عددی فرایند شکلدهی مجدد لوله‌های گرد به لوله‌های مربعی

حسن مسلمی نائینی^{۱*}، مهدی تاجداری^۲، علی صنعتی^۳، سید ابراهیم حسینی مهربان^۴، داود رضایی^۵

۱- دانشیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس و رئیس شورای عالی پژوهش شرکت لوله و تجهیزات سدید

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانشجوی دکتری گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۴-۵- مدیر و کارشناس شرکت لوله و تجهیزات سدید

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

moslemi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اسفند ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: شهریور ۱۳۸۳)

چکیده - در این مقاله، یک شبیه‌سازی عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود ارتجاعی- خمیری دوبعدی با در نظر گرفتن کرنش برشی، برای تحلیل فرایند شکلدهی مجدد لوله های غیرگرد ارائه شده است. تأثیر پارامترهای مختلف مانند قطر لوله گرد اولیه و خواص مکانیکی فلز بر روی ابعاد محصول و کیفیت آن را می‌توان با استفاده از این برنامه مشخص کرد. علاوه بر این، طراحی فرایند شکلدهی مجدد شامل تعیین پروفیل غلتکها، تعداد دروازه‌های لازم، ارتفاع لوله در هر دروازه و مقدار انقباض محیطی لوله، امکان‌پذیر است. با استفاده از این شبیه‌سازی، تعداد سعی و خطاها در طراحی فرایند و هزینه‌های ناشی از آن کاهش یافته و لوله‌های مربعی با دقت ابعادی بالا و کیفیت خوب قابل تولید است. مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی و نتایج سایر محققان تطابق خوبی را بین آنها نشان می‌دهد.

کلید واژگان: لوله‌های با سطح مقطع مربعی؛ تغییر شکل برشی؛ فرایند شکلدهی مجدد؛ شبیه‌سازی عددی.

۱- مقدمه

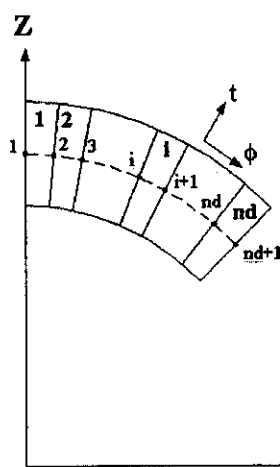
پروفیل‌های خاص به مقطع غیرگرد تغییر شکل می‌یابد. علی‌رغم قدمت و سابقه فرایند شکلدهی مجدد در صنعت، استفاده از روشهای عددی و تئوری برای تحلیل این فرایند - در پی نیاز به پروفیل‌هایی با ابعاد دقیق - فقط در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در حال حاضر، طراحی فرایند، شامل قطر لوله گرد اولیه، پروفیل غلتکها و تعداد دروازه‌های لازم به‌صورت تجربی با صرف زمان و نیروی زیاد انجام می‌شود. از کارهای صورت گرفته در زمینه تحلیل فرایند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

لوله‌های فلزی با سطح مقطع مربعی (قوطی) به‌عنوان یکی از سازه‌های فلزی اصلی در ساختمان‌سازی، صنعت خودرو و لوازم خانگی استفاده می‌شوند. این لوله‌ها را می‌توان از لوله‌های گرد در فرایند شکلدهی مجدد تولید کرد که به‌علت سرعت بالای تولید، بازدهی زیاد و انعطاف‌پذیری کافی نسبت به روشهای دیگر، کاربرد بیشتری دارد. فرایند شکلدهی مجدد لوله‌های گرد به لوله‌های غیرگرد یکی از فرایندهای مهم صنعتی است که در طی آن لوله با عبور از بین جفت غلتکهایی با

با در نظر گرفتن اثر کرنشهای برشی تهیه شده که قابلیت تحلیل رفتار تغییر شکل لوله تحت فرایند شکلدهی مجدد را دارد [5]. در این مقاله، با استفاده از این شبیه‌سازی، تحلیل فرایند شکلدهی مجدد لوله گرد به لوله‌ای با مقطع مربعی انجام شده و بر روی نتایج حاصل از آن بحث شده است.

۲- روال تحلیل

در این تحلیل، ابتدا سطح مقطع لوله گرد در راستای محیطی به nd المان اصلی که با گره‌های $1, \dots, i, \dots, nd+1$ مشخص می‌شوند، تقسیم می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱ تعریف المانهای اصلی [5]

مطابق شکل ۲ هر المان اصلی به ne المان فرعی در راستای ضخامت (شعاعی) تقسیم و با شماره‌های $1, \dots, j, \dots, ne$ نامگذاری می‌شوند. ضخامت هر المان فرعی با $h_{i1}, \dots, h_{ij}, \dots, h_{ine}$ نشان داده می‌شود. برای ساده‌تر شدن تحلیل، انحناهای هر المان در راستای محیطی ثابت فرض شده و با توجه به طول زیاد لوله، شرایط کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود. همچنین از این حقیقت که بر طبق فرضیه توسعه یافته کریشهف-لار، "خطوط شعاعی المان بر سطح خشی سطوح یا پوسته تغییر شکل نیافته عمود است، در حین تغییر شکل این خطوط از حالت عمود خارج شده و زاویه‌ای با سطح خشی صفحه یا پوسته می‌سازند اما در هر حال این

اونودا و همکاران ویژگیهای تغییر شکل لوله‌های فولادی گرد را که به وسیله فرایند شکلدهی اکستروژن به لوله‌های مربعی شکلدهی می‌شوند، مطابق یک برنامه کاهش شدید و با اشاره به اندازه‌گیریهای تجربی و نتایج محاسبه شده به وسیله روش المان محدود صلب-پلاستیک بحث کرده‌اند [۱].

سکیگوچی و همکاران به برخی ویژگیهای فرایند شکلدهی اکستروژن و شکلدهی بدون قالب پرداخته‌اند. آنان در بررسیهای خود به ویژگیهای فرایندهای ذکر شده از نظر ساخت و تولید سطح مقاطع گوناگون و شکل‌های مختلف پرداخته‌اند [۲].

مسلمی نائینی یک روش طراحی را با استفاده شبیه‌سازی عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود بدون در نظر گرفتن اثر تغییر شکل برشی ارائه کرده است. در این روش، با استفاده از تحلیل تغییر شکل پسرو و پیشرو طراحی فرایند شکلدهی مجدد لوله‌های غیر گرد امکان‌پذیر می‌شود [۳].

کیوچی و همکاران در تحلیل خود از یک برنامه شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی مبتنی بر روش اجزای محدود ارتجاعی-خمیری استفاده کرده‌اند که قابلیت تحلیل برخی از ویژگیهای تغییر شکل لوله تحت فرایند شکلدهی مجدد را دارد [۴].

استفاده از این روشها موجب کاهش سعی و خطاهای مرسوم در روشهای تجربی و هزینه‌های ناشی از آن شده و امکان طراحی غلتکها و تعیین مسیر عبور لوله را فراهم می‌سازد. اما با توجه به اینکه در روشهای فوق از برخی پارامترها نظیر اثر کرنش برشی صرف‌نظر شده است، جوابهای به دست آمده چندان دقیق نیست. از طرف دیگر، برای مدیریت بهتر و کنترل فرایند و نیز بهره‌وری بیشتر، به کسب اطلاعاتی دقیق درباره رفتار تغییر شکل لوله نیاز است.

در پاسخ به این نیازها، یک برنامه شبیه‌سازی عددی دوبعدی مبتنی بر روش تفاضل محدود ارتجاعی-خمیری

در این معادلات، $d(\varepsilon_\phi)_{ij}$ نمو کرنش در جهت محیطی، $d(\varepsilon_x)_{ij}$ نمو کرنش در جهت ضخامت، $d(\varepsilon_y)_{ij}$ نمو کرنش در جهت طولی و $d\gamma_{ij}$ نمو کرنش برشی است. شکل ماتریسی کرنشها به صورت زیر نوشته می شوند [۵]:

$$\{d\varepsilon\}_{ij} = \mathbf{A1}_{ij} \{dX\}_i + \mathbf{A2}_{ij} \{dh\}_i \quad (5)$$

که در آن بردار نمو کرنشها، $\{dX\}_i$ بردار تغییر مکانهای گرہها و $\{dh\}_i$ بردار شامل ضخامت المانهای فرعی بوده و به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\{d\varepsilon\}_{ij} = \{d\varepsilon_{\phi ij}, d\varepsilon_{ij}, d\varepsilon_{xij}, d\gamma_{ij}\}^T \quad (6)$$

$$\{dX\}_i = \{dY_i, dZ_i, d\phi_i, d\psi_i, dY_{i+1}, dZ_{i+1}, d\phi_{i+1}, d\psi_{i+1}\}^T \quad (7)$$

$$\{dh\}_i = \{dh_{i1}, dh_{i2}, \dots, dh_{ine}\}^T \quad (8)$$

۲-۲- محاسبه نمو تنش در المان فرعی

با استفاده از معادلات قسمت قبل می توان مؤلفه های تنش را از مؤلفه های کرنش به دست آورد. شکل ماتریسی رابطه چنین است:

$$\{d\sigma\}_{ij} = \mathbf{D}_{ij} \{d\varepsilon\}_{ij} \quad (9)$$

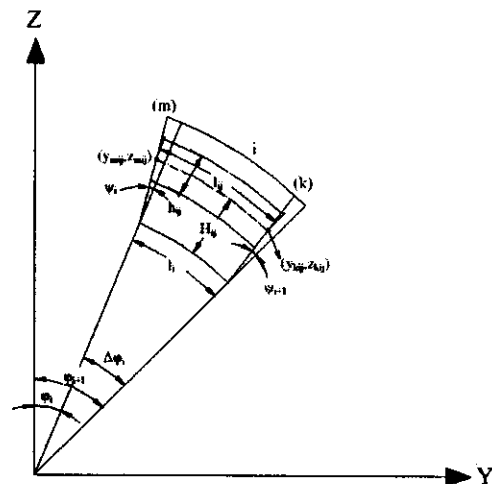
مؤلفه های ماتریس \mathbf{D}_{ij} در حالت تغییر شکل ارتجاعی از قانون هوک و در حالت تغییر شکل خمیری با فرض قانون پرنتل-رس و شرط تسلیم ون میز به دست می آید. ماتریس پلاستیک \mathbf{D}^p متقارن بوده و به صورت زیر نوشته می شود:

$$\mathbf{D}^p = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} 1-\nu & \sigma'_1 & \nu & \sigma'_1 & \nu & \sigma'_1 & -\sigma'_1 \tau \\ 1-2\nu & S & 1-2\nu & S & 1-2\nu & S & -\sigma'_1 \tau \\ \nu & \sigma'_1 & 1-\nu & \sigma'_1 & \nu & \sigma'_1 & -\sigma'_1 \tau \\ 1-2\nu & S & 1-2\nu & S & 1-2\nu & S & -\sigma'_1 \tau \\ \nu & \sigma'_1 & 1-\nu & \sigma'_1 & \nu & \sigma'_1 & -\sigma'_1 \tau \\ 1-2\nu & S & 1-2\nu & S & 1-2\nu & S & -\sigma'_1 \tau \\ -\sigma'_1 \tau & -\sigma'_1 \tau & -\sigma'_1 \tau & -\sigma'_1 \tau & -\sigma'_1 \tau & -\sigma'_1 \tau & \frac{1}{2} \frac{\tau^2}{S} \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن، σ' تنشهای انحرافی، ν ضریب پواسان، E مدول الاستیک بوده و S از رابطه زیر به دست می آید:

$$S = \frac{2}{3} \bar{\sigma}^2 \left(1 + \frac{H'}{3G}\right), \quad H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}^p} \quad (11)$$

خطوط مستقیم باقی می ماند. " استفاده شده است [۵].



شکل ۲ تعریف المانهای فرعی [۵]

۲-۱- محاسبه نمو کرنش در المان فرعی

ابتدا، طول هر المان فرعی که خود تابعی از طول المان اصلی است، محاسبه می شود. با تقریب برابری طول کمان و وتر و با کوچک در نظر گرفتن زاویه المانهای اصلی، طول المان اصلی بر روی سطح خشی و المان فرعی به دست می آید:

$$l_i = \sqrt{(Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2} \quad (1)$$

$$l_{ij} = l_i + (\phi_{i+1} - \phi_i - \psi_{i+1} + \psi_i) H_{ij} \quad (2)$$

که در این معادلات Z_i, Y_i موقعیت گرہ i ، ϕ_i زاویه گرہ i و ψ_i زاویه انحراف خطوط شعاعی المان در گرہ i است. H_{ij} فاصله خط مرکز (سطح خشی) المان اصلی از المان فرعی بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$H_{ij} = \frac{1}{2} (h_{i1} + h_{i2} + \dots + h_{i,j-1} - h_{i,j+1} - \dots - h_{ine}) \quad (3)$$

که در آن، h_{ij} ضخامت المان فرعی (ij) است.

با مشخص شدن مقادیر طولها و زوایای المانهای فرعی و مشتق گرفتن از آنها، نمو کرنشهای هر المان فرعی قابل محاسبه است:

$$d(\varepsilon_x)_{ij} = \frac{dh_{ij}}{h_{ij}}, \quad d(\varepsilon_\phi)_{ij} = \frac{dl_{ij}}{l_{ij}} \quad (4)$$

$$d(\varepsilon_y)_{ij} = 0, \quad d\gamma_{ij} = d\psi_i$$

وارد به المان است.

از طرفی $d(\sigma_r)_{ij}$ در واقع سطر دوم بردار نمو تنشها و در نتیجه سطر دوم عبارت طرف دوم رابطه (۱۲) است و می‌توان مقدار $d(\sigma_r)_{ij}$ را از رابطه زیر به دست آورد:

$$d(\sigma_r)_{ij} = G1_{ij}\{dX\}_i + G2_{ij}\{dh\}_i \quad (16)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۳) و ترکیب آن با معادله فوق، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d\sigma_{ij+1}^n + d\sigma_{ij}^n = 2G1_{ij}\{dX\}_i + 2G2_{ij}\{dh\}_i \quad (17)$$

با جایگذاری رابطه فوق در رابطه (۱۶) و سپس حذف عبارت $d\sigma_{ij+1}^n$ رابطه ذیل برای هر المان فرعی به دست می‌آید:

$$d\sigma_{ij}^n = I1_{ij}\{dX\}_i + I2_{ij}\{dh\}_i + I3_{ij}\{d\tau\}_i \quad (18)$$

به طریق مشابه می‌توان رابطه زیر را برای $d\sigma_{ij+1}^n$ به دست آورد:

$$d\sigma_{ij+1}^n = I1_{ij+1}\{dX\}_i + I2_{ij+1}\{dh\}_i + I3_{ij+1}\{d\tau\}_i \quad (19)$$

در هر المان اصلی می‌توان معادله فوق را برای $ne-1$ المان فرعی نوشت (از المان اول تا المان $ne-1$). اما با توجه به این نکته که سطح داخلی لوله یک سطح آزاد بدون تماس است ($\sigma_{ii}^n = const.$)، یک معادله دیگر نیز وجود دارد:

$$d\sigma_{ii}^n = I1_{ii}\{dX\}_i + I2_{ii}\{dh\}_i + I3_{ii}\{d\tau\}_i = 0 \quad (20)$$

مجموع ($ne-1$) معادله به دست آمده به اضافه ۱ معادله (۲۰) تعداد ne معادله تشکیل می‌دهند که می‌توان آنها را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$L_{ij}\{dh\}_i = M_{ij}\{dX\}_i + N_{ij}\{d\tau\}_i \quad (21)$$

ماتریس L_{ij} مربعی $nexne$ بعدی بوده و با ضرب کردن معکوس آن در طرف دوم معادله (۲۱) رابطه زیر به دست می‌آید:

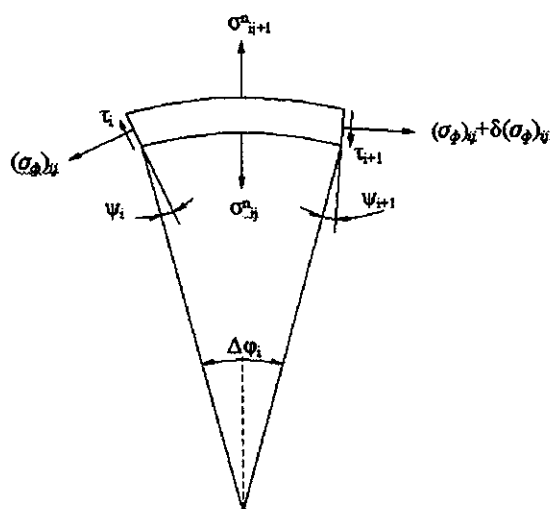
معادله (۱۰) معکوس روابط تنش کرنش پرنتل - رس بوده و به نام رابطه یامادا معروف است [۶]. با داشتن ماتریس محاسبه تنش در هر دو حالت ارتجاعی و خمیری ممکن می‌شود:

$$\{d\sigma\}_{ij} = A3_{ij}\{dX\}_i + A4_{ij}\{dh\}_i \quad (12)$$

که در آن، $A4_{ij} = D_{ij}A2_{ij}$ و $A3_{ij} = D_{ij}A1_{ij}$.

۳-۲- معادله تعادل المان فرعی

با توجه به شکل ۳ تنشهای موجود در یک المان فرعی را می‌توان بررسی و محاسبه کرد.



شکل ۳ کردار تعادل المان فرعی

در این المان تنش در راستای شعاعی برحسب تنشهای نرمال با رابطه تقریبی زیر بیان می‌شود [۳]:

$$(\sigma_r)_{ij} = \frac{1}{2}(\sigma_{ij+1}^n + \sigma_{ij}^n) \quad (13)$$

معادله تعادل المان فرعی با فرض طول واحد و با توجه به شکل ۳ چنین است:

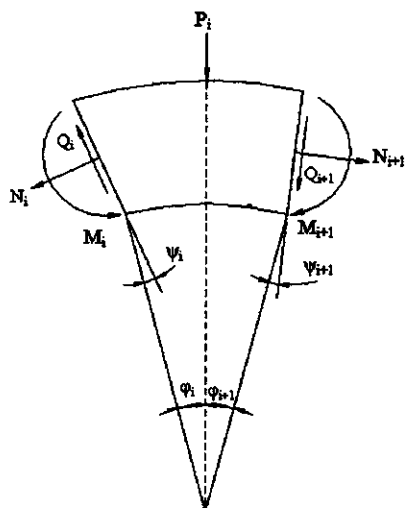
$$(\sigma_{ij+1}^n - \sigma_{ij}^n)l_{ij} = \tau_{ij+1}h_{ij} - \tau_{ij}h_{ij} + (\varphi_{ij})_{ij}h_{ij}(\varphi_{ij+1} - \varphi_{ij} + \varphi + \psi_i) \quad (14)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۴) و با جایگذاری از روابط قبل شکل ماتریسی معادله را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$(d\sigma_{ij+1}^n - d\sigma_{ij}^n)l_{ij} = E_{ij}\{dX\}_i + F_{ij}\{dh\}_i + R_{ij}\{d\tau\}_i \quad (15)$$

که در آن، بردار $\{d\tau\}_i$ بردار مربوط به تنشهای برشی

می شوند.



شکل ۴ نیروهای وارده بر یک المان اصلی

$$\{dh\}_i = K1_{ij}\{dX\}_i + K2_{ij}\{d\tau\}_i \quad (22)$$

معادله (۲۲) یکی از مهمترین روابط این روش عددی است که با استفاده از آن مقادیر نمو ضخامت هر المان فرعی به نمو مختصات و تنش برشی المان اصلی نسبت داده می شود و به این وسیله متغیرها فقط به نمو متغیرهای مربوط به هر گره در المان های اصلی محدود خواهند شد. به این ترتیب ضمن محاسبه کرنش ها از رابطه (۲۳) مقادیر تنش ها نیز از رابطه (۲۴) قابل محاسبه خواهند بود:

$$\{d\varepsilon\}_i = K3_{ij}\{dX\}_i + K4_{ij}\{d\tau\}_i \quad (23)$$

$$\{d\sigma\}_i = K5_{ij}\{dX\}_i + K6_{ij}\{d\tau\}_i \quad (24)$$

از تنش های محاسبه شده در معادلات مربوط به المان اصلی استفاده خواهد شد.

۲-۴-۲- معادلات المان اصلی

با توجه به شکل ۴ برای یک المان اصلی می توان سه معادله تعادل به شرح زیر نوشت:

۲-۴-۲-۱- رابطه تعادل نیروها در راستای شعاعی

$$-N_{i+1} \sin(\varphi_{i+1} - \psi_{i+1}) - N_i \sin(\varphi_i + \psi_i) - Q_{i+1} \cos(\varphi_{i+1} - \psi_{i+1}) + Q_i \cos(\varphi_i + \psi_i) - P_i = 0 \quad (25)$$

۲-۴-۲-۲- رابطه تعادل نیروها در راستای محیطی

$$N_{i+1} \cos(\varphi_{i+1} - \psi_{i+1}) - N_i \cos(\varphi_i + \psi_i) - Q_{i+1} \sin(\varphi_{i+1} - \psi_{i+1}) - Q_i \sin(\varphi_i + \psi_i) = 0 \quad (26)$$

۲-۴-۲-۳- رابطه تعادل گشتاور خمشی

$$(M_{i+1} - M_i) + N_{i+1} \sin(\varphi_{i+1} - \psi_{i+1}) \frac{h_i}{2} - N_i \sin(\varphi_i + \psi_i) \frac{h_i}{2} + Q_{i+1} \cos(\varphi_{i+1} - \psi_{i+1}) \frac{h_i}{2} + Q_i \cos(\varphi_i + \psi_i) \frac{h_i}{2} = 0 \quad (27)$$

علاوه بر سه معادله فوق، سه معادله دیگر نیز برای تعادل تنش محیطی و نیروها و گشتاورهای وارده به المان اصلی می توان نوشت. این معادلات به صورت زیر نوشته

۲-۴-۲-۴- رابطه تعادل نیروی محیطی با برآیند

تنش محیطی

$$\frac{1}{2}(N_i + N_{i+1}) = \sum_{j=1}^{ne} (\sigma_\varphi)_{ij} h_{ij} \quad (28)$$

۲-۴-۲-۵- رابطه تعادل گشتاور خمشی با گشتاور

حاصل از تنش محیطی

$$\frac{1}{2}(M_i + M_{i+1}) = \sum_{j=1}^{ne} (\sigma_\varphi)_{ij} h_{ij} H_{ij} \quad (29)$$

۲-۴-۲-۶- رابطه تعادل نیروی برشی با برآیند تنش

برشی

$$\frac{1}{2}(Q_i + Q_{i+1}) = \sum_{j=1}^{ne} \tau_{ij} h_{ij} \quad (30)$$

۲-۴-۲-۷- معادله سازگاری

هر المان اصلی i برای حفظ شعاع انحنا بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده، شرط زیر را ارضا می کند:

$$\frac{1}{2}(\varphi_{i+1} + \varphi_i) = \tan^{-1} \left(\frac{Z_i - Z_{i+1}}{Y_{i+1} - Y_i} \right) \quad (31)$$

با مشتق گیری از این معادله داریم:

خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

براساس روش تحلیل فوق، برنامه‌ای به روش تفاضل محدود برای شبیه‌سازی رفتار لوله در حین تغییر شکل نوشته شده و نتایج آن با داده‌های تجربی مقایسه شده است. برای انجام محاسبات و تحلیل مورد نظر لازم است داده‌هایی به‌عنوان ورودی به برنامه داده شود. داده‌های ورودی شامل مشخصات فیزیکی و مکانیکی لوله گرد است. در جدول ۱ شرایط کاری برای شکلدهی پروفیل مربعی به ابعاد 140×140 میلی‌متر و شعاع گوشه $(r=2t)$ آورده شده است.

جدول ۱ شرایط کاری فرایند شکلدهی مجدد لوله مربعی

جنس مواد لوله	St37 (E=204 Gpa, $\sigma_y=278.6$ Mpa, $\nu=0.29$) $\bar{\sigma} = 6714(0.0394 + \bar{\epsilon}_p)^{0.272}$
ابعاد لوله مربعی	140x140(mm)
ضخامت دیواره لوله	4.0 (mm)
شعاع گوشه لوله	8.0 (mm)

برخی از نتایج حاصل از اجرای برنامه و مقایسه آن با داده‌های تجربی موجود در شرکت لوله و تجهیزات سدید در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۱- تعیین قطر لوله گرد

گام اول در برنامه، تعیین ابعاد و مشخصات لوله گرد با توجه به محصول مورد نظر است. برای این منظور در ابتدا مقداری برای انقباض محیطی لوله (E_r) فرض شده و سپس با استفاده از تحلیل پسرود مشابه روش تدوین شده در مرجع [۷]، قطر خارجی D لوله گرد محاسبه می‌شود. در تغییر شکل پسرود لوله‌های غیرگرد به‌صورت مجازی به صورت لوله‌های گرد شکلدهی شده و هر قسمت از سطح مقطع لوله غیرگرد به‌طور مجازی از داخل به خارج تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد (شکل ۵). جابه‌جایی مجازی هر

$$\frac{1}{2}(d\varphi_{i+1} + d\varphi_i) - \frac{1}{l_i^2}[(dZ_i - dZ_{i+1})(Y_{i+1} - Y_i) - (dY_{i+1} - dY_i)(Z_i - Z_{i+1})] = 0 \quad (32)$$

۲-۴-۸- معادلات تقارن

با در نظر گرفتن شرایط هندسی و بارگذاری مسأله دیده می‌شود که فقط یک هشتم مدل لوله برای انجام تحلیل کفایت می‌کند. بنابراین، معادلات تقارن زیر به دست می‌آیند. در گره اول بر روی قطر عمودی لوله:

$$\left. \begin{aligned} dY_1 &= 0 \\ d\varphi_1 &= 0 \\ d\psi_1 &= 0 \\ dQ_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

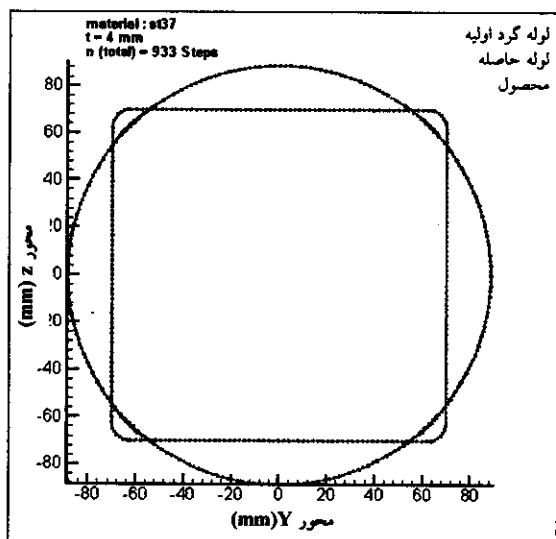
و در گره آخر:

$$\left. \begin{aligned} dZ_{nd+1} &= -\tan \theta_{nd+1} \cdot dY_{nd+1} \\ d\varphi_{nd+1} &= 0 \\ dQ_{nd+1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

۲-۴-۹- مدل تماس

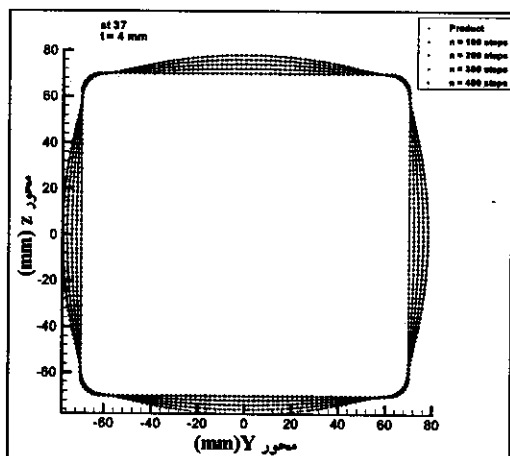
در این تحلیل از دیدگاه شرایط مرزی دو نوع گره وجود دارد. گرهی که با سطح اعمال نیرو در تماس است و گرهی که با سطح اعمال نیرو در تماس نیست. نوع اخیر نیز خود به دو دسته تقسیم می‌شود: گرهی که هنوز با سطح اعمال نیرو تماس نیافته و گرهی که از سطح اعمال نیرو جدا شده است. برای گره‌هایی که با سطح صلب اعمال نیرو در تماس نیستند می‌توان گفت که مقدار نیروی تماسی آنها برابر صفر بوده و نیز تغییری در مقدار نیروی تماسی آنها داده نشده است؛ در نتیجه مقدار نمو نیروی تماسی آن گره صفر است. برای گره‌هایی که با سطح صلب اعمال نیرو در تماس هستند می‌توان گفت که تغییر مکان آنها معلوم بوده و در ناحیه تغییر شکل، لوله بر پروفیل غلتک منطبق می‌شود [۵]. به این ترتیب بسته به شرایط مرزی هر المان، تعداد nd معادله دیگر به دست می‌آیند که با استفاده از آنها تعداد مجهولات و معادلات برابر شده و دستگاه معادلات به دست آمده قابل حل

دروازه‌های مورد نیاز برای انجام فرایند شکلدهی مجدد نیاز است. برای این منظور تحلیل تغییر شکل پسرو از آخرین پروفیل سطح مقطع لوله مربعی تا گام‌های ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ انجام می‌شود. در این فرایند،



شکل ۶ سطح مقطع لوله مربعی و لوله گرد حاصل از تحلیل [۵]

لوله مربعی به وسیله اعمال جابه‌جایی‌های کوچک مجازی هرالمان از سطح مقطع لوله را از داخل به خارج تغییر شکل می‌یابد. شکل ۷ پروفیل سطح مقطع لوله در تحلیل تغییر شکل پسرو از دروازه آخر نشان می‌دهد.



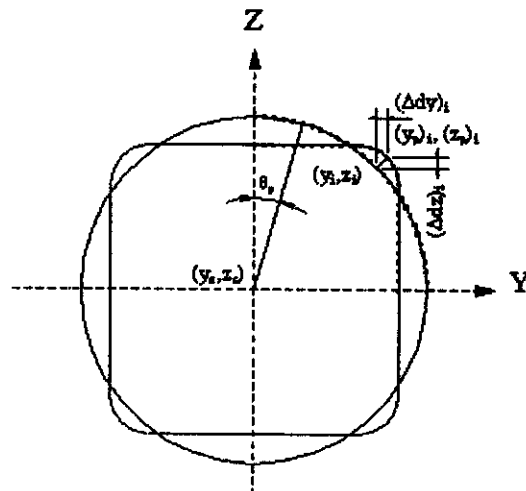
شکل ۷ مقایسه سطح مقطع لوله مربعی با سطح مقطع لوله در تغییر

شکل پسرو برای گام‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ [۵]

بعد از تحلیل تغییر شکل پسرو برای هر گام مشخص،

نقطه گرهی از لوله محصول نسبت به لوله گرد در جهات Z و Y را که برای تحلیل تغییر شکل پسرو به دست می‌آید می‌توان محاسبه کرد [۵].

با انجام تحلیل پسرو برای پروفیل مربعی 140×140 میلیمتر با ضخامت ورق ۴ میلیمتر، قطر لوله گرد لازم



شکل ۸ رابطه بین لوله گرد و لوله مقطع مربعی در تحلیل پسرو [۵]

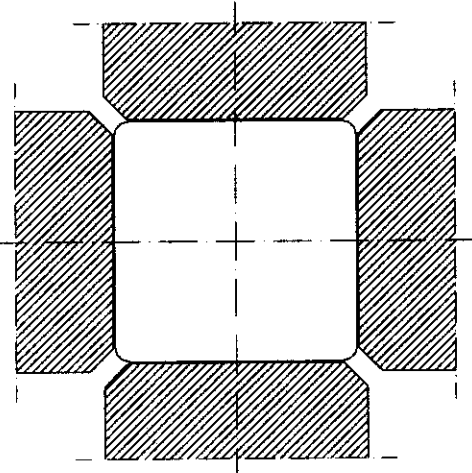
برای فرایند $177/21$ میلیمتر و مقدار انقباض محیطی $2/2\%$ به دست آمد که این مقدار به عنوان پایه‌ای برای تحلیل پیشرو [۵] استفاده می‌شود. در شرکت لوله و تجهیزات سدید برای لوله مربعی با ابعاد مورد نظر، از لوله گردی به قطر $178/9$ میلیمتر استفاده می‌شود که نزدیکی نسبتاً خوبی با مقدار تحلیلی دارد (خطا $0/9\%$).

با توجه به اینکه در این تحلیل، مقدار جابه‌جایی در هر مرحله $0/2\%$ میلیمتر فرض شده، تعداد مراحل کلی برای رسیدن به لوله گرد بوسیله تحلیل پسرو ۹۳۳ مرحله به دست آمد. به این معنی که پس از ۹۳۳ مرحله تغییر شکل می‌توان لوله گرد به قطر $177/21$ میلیمتر را به لوله مربعی 140×140 میلیمتر شکلدهی کرد. در شکل ۶ سطح مقطع پروفیل مربعی و لوله گرد به دست آمده از تحلیل پسرو نشان داده شده است.

۳-۲- تعداد دروازه‌های لازم

پس از تعیین قطر لوله گرد اولیه، به تعیین تعداد

قسمتهای راست و چپ سطح مقطع لوله به دست آمده از تغییر شکل پرسو فشار داده شده و به سطح مقطع لوله مربعی شکلدهی مجدد می‌شود. به همین ترتیب تعداد مراحل مجاز تغییر شکل برای دروازه‌های دیگر و تعداد دروازه‌های مورد نیاز برای فرایند مشخص می‌شوند.



شکل ۹ تنظیم غلتکها در ایستگاه آخر شکلدهی مجدد

همان گونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود تعداد مراحل تغییر شکل در دروازه دوم و سوم تغییر شکل پرسو (دروازه‌های دوم و اول تغییر شکل پرسو) به ترتیب ۳۵۰ و ۲۸۳ گام است. نتایج حاصل از سایر کارهای تحلیلی [۴] و اطلاعات شرکت نیز نشان داده که می‌توان در طی سه دروازه، فرایند شکلدهی مجدد فوق را به اتمام رساند.

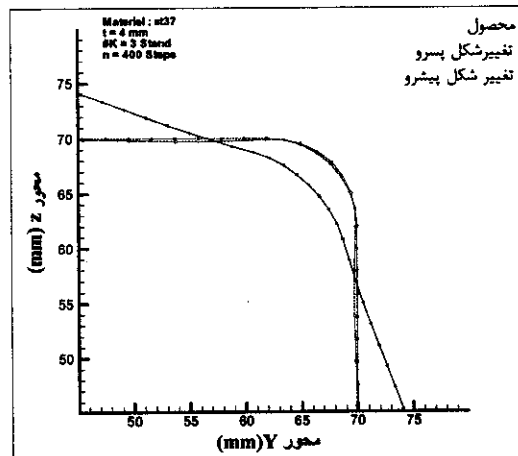
۳-۳- پروفیل غلتکها

از نکات مهم در فرایند شکلدهی مجدد، تعیین ابعاد و پروفیل غلتک در هر دروازه است. در حال حاضر این کار بر اساس تجربه و دانش شخصی صورت گرفته و به علت جنس خاص غلتکها، هزینه مالی بسیاری را به شرکتهای پروفیل‌سازی تحمیل می‌کند. با استفاده از تحلیل صورت گرفته در این مقاله می‌توان شعاع غلتکها را در هر دروازه براحتی محاسبه کرد. برای آزمایش صورت گرفته، شعاع غلتکها که همان شعاع پروفیل لوله حاصل از طراحی

تحلیل تغییر شکل پرسو برای همان گام انجام می‌شود. سپس پروفیل سطح مقطع به دست آمده بعد از تحلیل تغییر شکل پرسو، از لحاظ انطباق آن با پروفیل سطح مقطع قبل از تحلیل تغییر شکل پرسو (لوله مربعی) بررسی می‌شود. در صورتی که انطباق خوبی بین دو پروفیل مزبور ملاحظه شود تعداد گامهای آن تغییر شکل پرسو برای انجام شکلدهی مجدد انتخاب می‌شود.

برای محصول مورد آزمایش با اعمال ۴۰۰ گام در اولین دروازه، پس از تغییر شکل پرسو ملاحظه شد که لوله مربعی مورد نظر حاصل نشده و عیوبی به شکل تو رفتگی در دیواره‌های لوله ایجاد می‌شود. شکل ۸ نمایی از این عیوب را که بیشتر نزدیک گوشه‌ها اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد.

از میان سه مورد دیگر، در هر سه گام ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ لوله به حالت مربعی باز می‌گردد. اما از آنجا که باید تعداد دروازه‌ها نیز حداقل باشد بیشترین تغییر شکلی را که در طی آن لوله بدون عیب شکلدهی می‌شود انتخاب می‌نماییم و لذا برای اولین دروازه تغییر شکل پرسو تعداد گام ۳۰۰ برای شکلدهی انتخاب می‌شود.



شکل ۸ نمایی از عیوب به وجود آمده در لوله در دروازه آخر برای

۴۰۰ مرحله شکلدهی [۵]

شکل ۹ غلتکهای لازم را برای تغییر شکل پرسو در این دروازه - که دارای پروفیل تخت است - نشان می‌دهد. به وسیله این غلتکها قسمت‌های فوقانی و تحتانی و نیز

۴۸۴/۶۴ و بی نهایت به دست می آید که تطابق نسبتاً خوبی را با نتایج عملی در شرکت لوله و تجهیزات سدید دارد. در این شرکت، برای تولید لوله‌های با مشخصات و ابعاد ذکر شده، به ترتیب در دروازه‌های سه‌گانه از غلتک‌هایی با شعاع پروفیل ۲۳۸/۵، ۵۵۲/۵ و بی نهایت استفاده می‌شود. به این ترتیب ملاحظه می‌شود پروفیل مورد نظر را می‌توان در سه دروازه با غلتک‌هایی با ابعاد ذکر شده شکلهی و محصولی با کیفیت مناسب تولید کرد.

۳-۴- ارتفاع لوله در هر دروازه

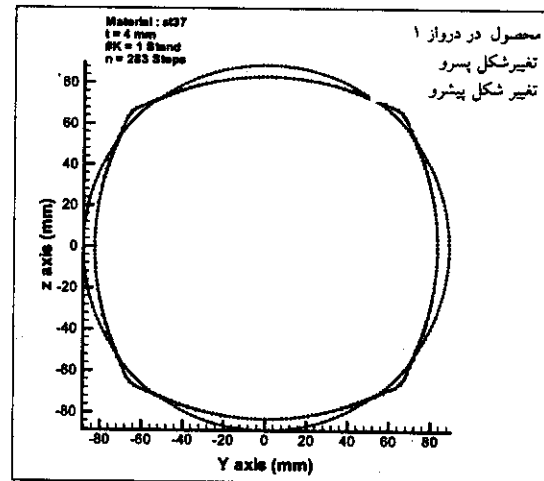
یکی از پارامترهای مهم در فرایند شکلهی مجدد لوله‌های با مقطع مربعی، تعیین مقدار کاهش ارتفاع یا به بیان دیگر، تعیین میزان شکلهی در هر دروازه است. در تحلیل عددی صورت گرفته، از روی تعداد مراحل شکلهی در هر دروازه، مقدار شکلهی را می‌توان محاسبه کرد. به منظور بیان درصد تغییر شکل لوله، پارامتر کاهش r^* به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r^* = \frac{D-d}{D} \times 100(\%) \quad (35)$$

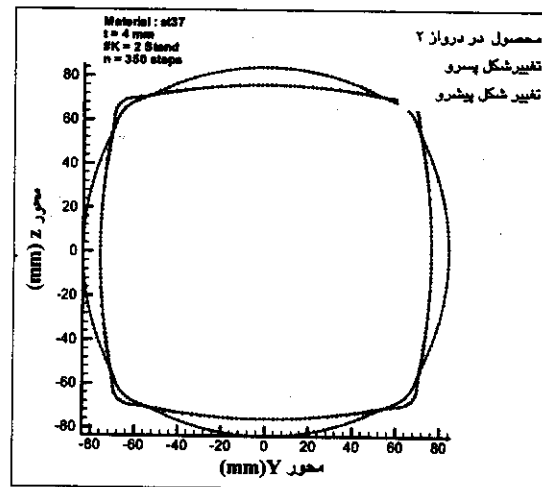
که در آن D قطر لوله گرد و d فاصله بین غلتکها است.

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل، مقدار کاهش ارتفاع و درصد تغییر شکل لوله در دروازه‌های سه‌گانه به ترتیب به دست می‌آیند: دروازه اول ۵/۶۶ میلی‌متر و ۶/۳۹٪، دروازه دوم ۷ میلی‌متر و ۸/۴۴٪ و دروازه سوم ۶ میلی‌متر و ۷/۹٪. و فاصله بین غلتک بالایی و پایینی در دروازه‌های اول تا سوم به ترتیب ۱۶۵/۸۹، ۱۵۱/۸۹ و ۱۴۰ میلی‌متر [۵].

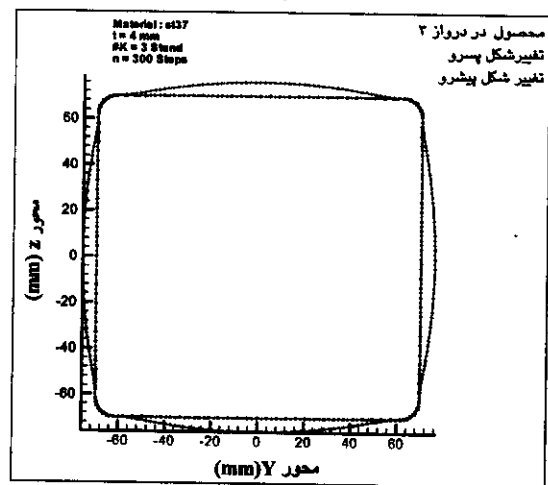
در مرجع [۸] رابطه‌ای برای محاسبه و تخمین ارتفاع لوله در هر دروازه ارائه شده است. با استفاده از این رابطه، ارتفاعهای لوله در سه دروازه با شرایط کاری مشابه استفاده شده در این طراحی، به ترتیب ۱۶۳/۸۲، ۱۵۱/۴۵ و ۱۴۰ به دست می‌آیند. با مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج حاصل از به‌کارگیری رابطه فوق، تطابق نسبتاً خوبی بین ارتفاعهای حاصل برای لوله در سه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ تعداد دروازه‌های لازم برای شکلهی لوله گرد به لوله با سطح مقطع مربعی است، در دروازه‌های اول تا سوم به ترتیب ۱۹۰/۹۶،

دروازه مشاهده می‌شود.

۵- منابع

- [1] Onoda, Y., Nagamachi, T.; Sugiyama, T.; "Finite Element Simulation of Deformation Features of Round Welded Steel Pipes Reshaped into Square Shape by Extrusion-Forming"; Journal of the JSTP, Vol.36, No.409, (1995-2), pp. 149-154.
- [2] Sekiguchi, H.; Kobatake, K.; Kimura, S.; Kitawaki, T.; "New Methods for Manufacturing Various Cross-Section and Special Shapes on Steel Pipes"; Advanced Technology of Plasticity; Vol. III, 1999; pp.2445-2458.
- [3] Moslemi Naeini, H.; "Study on Design Method of Rolls for Reshaping of Non-Circular Pipes"; PhD Thesis, Tokyo University, Japan, 2000 (Japanese).
- [4] Kiuchi, M.; Wang, F.; "Reshaping of Round Pipes into Square and Rectangular Pipes"; Journal of Tube and Pipe Technology, November/December 1999; pp. 72-75.
- [5] صنعتی، علی؛ "تحلیل تجربی و عددی فرایند شکلدهی مجدد لوله‌های با مقطع مربعی و مستطیلی به کمک رایانه؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.
- [6] Yamada, Y.; Yoshimura, N.; "Plastic Stress-Strain Matrix and its Application for the Solution of Elastic-Plastic Problems by the Finite Element Method"; International Journal of Mechanical Sciences; Vol. 10, 1968; pp.343-354.
- [7] Kiuchi, M.; Moslemi Naeini, H.; Shintani, K.; "Computer Aided Design of Rolls for Reshaping Process from Round Pipes to Channel-Type Pipes"; Proceedings of AFDM99, Haeundae, Pusan, Korea; 1999; pp.629-634.
- [8] Wen, B.; "Using Advanced Tooling Designs to Reshape Round Tube into Square and Rectangular Tubes"; Roll-Kraft; Inc. Ohio, U.S.A, pp. 1-6.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روال تحلیل و طراحی و برخی از نتایج حاصل از آن برای فرایند شکلدهی مجدد لوله‌های گرد به مقاطع مربعی شرح داده شد. از آنجاییکه در حال حاضر تعیین پارامترها و مشخصات این فرایند بر اساس تجارب و اندوخته‌های فردی صورت گرفته و هزینه مالی و زمانی سنگینی را به شرکتهای پروفیل‌سازی تحمیل می‌کند، لذا برنامه‌ای دوبعدی تهیه شده که می‌تواند فرایند را بخوبی و با دقت بالایی شبیه‌سازی کند و می‌تواند نقش بسزایی را در پیشرفت این صنعت در کشور ایفا کند. با استفاده از این برنامه، طراحی فرایند شکلدهی مجدد لوله‌ای با مقطع مربعی - که شامل تعیین قطر لوله گرد اولیه، مقدار انقباض محیطی، تعداد دروازه‌های مورد نیاز و مقدار کاهش ارتفاع لوله در هر دروازه است - صورت گرفته و نتایج حاصل نزدیکی خوبی را با داده‌های تجربی و نتایج سایر تحلیل‌ها نشان داد. تغییر در هر یک از پارامترهای ورودی برنامه نظیر ابعاد پروفیل موردنظر، ضخامت لوله و جنس فلز بر نتایج به دست آمده فوق و در نهایت بر ابعاد و کیفیت محصول نهایی اثرگذار است.

با در دست داشتن نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به مقدار قابل ملاحظه‌ای از تعداد سعی و خطاهای مرسوم در طراحی و به‌کارگیری فرایند شکلدهی مجدد کاسته شده و محصولی با کیفیت مطلوب و ابعاد دقیق تولید شده است.