بررسی تحلیلی و عددی طول تغییر شکل در شکلدهی غلتکی لولهی گرد

مهدی سلمانی تهرانی ⁽، مسلم بهرامی ^۲ Tehrani-m@eng.sku.ac.ir

چکیدہ

طول تغییر شکل یکی از پارامترهای مهم فرایند شکلدهی غلتکی سرد است که در تعیین فاصلهی بین ایستگاهها و نیز آهنگ تغییر شکل، نقش اساسی دارد. باتاچاریا برای نخستین بار ضمن معرفی طول تغییر شکل، رابطهی بستهای برای این طول، در شکلدهی کانال متقارن به ست آورد. این مقاله به بررسی و تعیین طول تغییر شکل در شکل دهی غلتکی مقطع لولهی گرد می پردازد. برای این کار از دو روش تحلیلی و شبیه سازی عددی اجزای محدود استفاده شده است. روش تحلیلی ارائه شده در این مقاله، بر اساس الگوی پیشنهادی در روش باتاچاریا استوار است. البته به دلیل پیچیده تر شدن هندسهی تغییر شکل یا ائه شده در این مقاله، بر اساس الگوی انرژی تغییر شکل پیچیده تر و حل تحلیلی مسأله دشوارتر می شود. همچنین با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده، طول تغییر شکل برای یک مثال عددی خاص محاسبه و با نتایج شبیه سازی اجزای محدود نرمافزار ABAQUS مقایسه می شود. سازگاری بین نتایج روش تحلیلی و شبیه سازی اجزای محدود، اعتبار روش ارائه شده را نشان می دهد. در پایان نیز اثر پارامترهای شکل دهی بر طول تغییر شکل، بررسی شده است.

> **کلیدواژہ**: شکلدھی غلتکی سرد- طول تغییر شکل- کمینہسازی انرژی تغییر شکل- شبیہسازی اجزای محدود

۱ – استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، Bahrami.moslem@gmail.com

۱– مقدمه

در فرایند "شکل دهی غلتکی سرد" نوار ورق در حالت سرد، با عبور پیوسته از بین مجموعه غلتک های دوار و بدون تغییر محسوس در ضخامت، به یک پروفیل با مقطع دلخواه شکل داده می شود. شکل دهی در چند مرحله و با ایجاد خمهای طولی در نوار ورق انجام می شود. هر مجموعه غلتک که بخشی از عمل شکل دهی را انجام می دهد شامل یک غلتک بالایی، یک غلتک پایینی، و درصورت نیاز، غلتک های جانبی می شود. به هر مجموعه از این غلت که ایک "ایستگاه غلتکی" یا ایستگاه گفته می شود. هر چه شکل مقطع نهایی پیچیده تر باشد، برای انجام موفقیت آمیز فرایند به تعداد ایستگاه بیشتری نیاز است. شکل (۱) به صورت شماتیک شکل دهی غلتکی کانال متقارن U شکل را در پنج ایستگاه نشان می دهد.



شکل (۱): نمایش شماتیک شکلدهی غلتکی سرد تولید کانال متقارن U شکل در پنج ایستگاه

در شکل دهی غلتکی سرد بر خلاف بسیاری از فرایندهای شکل دهی فلزات، شکل دهی به صورت شدید و ناگهانی نیست. زیرا تغییر شکل شدید می تواند سبب آسیب رساندن به غلتک ها و حتی بروز برخی عیوب اساسی در محصول نهایی شود. به همین دلیل کنترل آهنگ تغییر شکل در انجام موفقیت آمیز فرایند مهم است. "طول تغییر شکل" (Deformation length) یکی از پارامترهای مهم این فرایند است که در تعیین فاصلهی بین ایستگاهها و نیز آهنگ تغییر شکل، نقش اساسی دارد. طول تغییر شکل به فاصلهی بین نقط می شروع تغییر شکل، پیش از ایستگاه، تا ایستگاه گفته می شود. طول تغییر شکل در شکل دهی کانال متقارنه صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. باتاچاریا [۱] برای نخستین بار ضمن معرفی طول تغییر شکل، رابطهی بسته ای برای این طول، در شکل دهی کانال متقارن به دست آورد. اساس کار باتاچاریا بر مبنای محاسبه و کمینه سازی انرژی تغییر شکل استوار است.

از یک دیدگاه کارهای قبلی را میتوان در دو دستهی کلی تقسیمبندی کرد؛ (الف) کارهای تجربی و آزمایشگاهی و (ب)

کارهای تحلیلی و شبیهسازیهای عددی. از میان کارهای تجربی و آزمایشگاهی میتوان به مراجع [۸-۲] اشاره نمود. کارهای تحلیلی و شبیهسازیهای عددی نیز برخی مانند [۱] و [۱۵–۹] بر اساس رهیافت محاسبه و کمینهسازی انرژی تغییر شکل استوار هستند که به روش انرژی مشهور هستند. اما با توجه به محدودیتهای به روشهای انرژی، بیشتر شبیهسازیهای اخیر با استفاده از روش اجزای محدود انجام شدهاند که از میان آنها میتوان به مراجع [۱۰۳–۱۶] را نام برد.



اما بهطور ویژه، دربارهی طول تغییر شکل، اهمیت و روش تعیین آن در فرایند شکل دهی غلتکی، تا کنون یژوهش های اندکی منتشر شده است. همان گونه که اشاره شد، برای نخستین بار باتاچاریا در مقالهی خود [1] طول تغییر شکل را معرفی نمود و رابطهی بستهای برای این طول در شکل دهی کانال متقارن به دست آورد. اساس کار باتاچاریا بر مبنای محاسبه و کمینهسازی انرژی تغییر شکل استوار است. در کار او، ابتدا با تخمین هندسه ی تغییر شکل یافته ی ورق، میدان کرنش کششی طولی تعیین شده است. سـپس بـا اسـتفاده از فرض رفتار صلب-پلاستیک کامل برای نوار ورق و نیز چشم پوشی از خمش طولی در بال، انرژی پلاستیک تلف شدہ ناشے از کشیدگی در بال و خمش در امتداد خط تاخوردگی را محاسبه شده است. آن گاه با کمینه نمودن انرژی پلاستیک تلف شده و اعمال شرایط مرزی، رابطهی بستهای برای طول تغییر شکل کانال متقارن بهدست آمده است. در نهایت با مقایسهی نتایج مدل تحلیلی و نتایج تجربی، اعتبار مدل تحلیلی نـشان داده شـده اسـت. سـلمانی تهرانـی [۳۰] ضمن بررسیهای خود، اهمیت پارامتر طول تغیر شکل را نشان داده است.

بر اساس نتایج او، هرچه طول تغییر شکل کمتر باشد، آهنگ شکلدهی بیشتر و در نتیجه کرنش طولی بیشینه نیز بزرگتر خواهد شد. افزایش کرنش طولی بیشینه میتواند سبب بروز کمانش محلی

لبه و معیوب شدن محصول شود. همچنین برای جلوگیری از بروز تغییر شـکلهـای ناخواسـته در حـین فراینـد، بایـد فاصـلهی بـین ايستگاهها از طول تغير شكل فرايند بزرگتر باشد. مسلمي ناييني و سلمانی تهرانی همچنین در کار دیگری [۱۵] به بررسی اهمیت انرژی خمش طولی در ناحیهی بال، در شکلدهی غلتکی سرد کانال متقارن، که در مدل باتاچاریا [۱] از آن چشمپوشی شده است، پرداختهاند. آنها ضمن ارائهی روش محاسبهی انرژی خمش طولی، نشان دادهاند که با افزایش ضخامت اثر این انرژی افزایش مییابد. آن گاه نتیجه گرفتهاند که برای فرایندهایی که در آنها ضخامت ورق زیاد است، خطای رابطهی پیشنهادی باتاچاریا [۱] می تواند زیاد شود. یادآوری می شود که باتاچاریا در کارهای تجربی خود از ورق با ضخامت (mm) استفاده کرده است که ورق نازکی بهشمار میرود. این مقاله به بررسی و تعیین طول تغییر شکل در شکل دهی غلتکی مقطع لولهی گرد می پردازد. برای این کار از دو روش تحلیلی و شبیهسازی عددی اجزای محدود استفاده شده است. روش تحلیلی ارائه شده در این مقاله، بر اساس الگوی روش باتاچاریا استوار است. در مقایسه با کار باتاچاریا، هندسهی تغییرشکلیافتهی نوار ورق بهمراتب پیچیدهتر است. این امر سبب پیچیدهتر شدن روابط مربوط به کرنش و انرژی تغییر شکل میشود. در نهایت با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده، طول تغییر شکل برای یک مثال عددی خاص محاسبه و با نتایج شبیه سازی اجزای محدود نرمافزار ABAQUS مقایسه میشود. سازگاری خوب بین نتایج روش تحلیلی و شبیهسازی اجزای محدود، اعتبار روش ارائه شده را نشان میدهد.

۲- مدل تحلیلی ارائه شده برای محاسبهی طول تغییر شکل

مدل تحلیلی که برای محاسبهی طول تغییر شکل مقطع لولهی گرد ارائه میشود، بر اساس الگوی روش باتاچاریا استوار است. با این تفاوت مهم که در اینجا هندسهی تغییر شکل یافتهی نوار ورق و در نتیجه روابط مربوط به میدان کرنش و انرژی تغییر شکل، بهطور قابل توجهی پیچیدهتر میشوند. به گونهای که حل آنها دیگر با روش پیشنهادی باتاچاریا [۱] امکان پذیر نیست. مراحل مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله را میتوان بهطور خلاصه بهصورت زیر برشمرد.

- ۱ تخمین هندسهی تغییرشکلیافتهی نوار ورق. ۲- محاسبهی میدان کرنش. ۳- محاسبهی انرژی اتلافی کار پلاستیک در اثر تغییر شکل.
- ۴- کمینه سازی انرژی اتلافی پلاستیک، و ارضای شرایط مرزی.

۲-۱- تخمین هندسهی تغییرشکلیافته نیوار ورق و محاسبهی میدان کرنش

برای بیان الگوی تغییر شکل، مانند آنچه در شکل (۳-الف) نـشان داده شده، هندسهی نوار ورق پیش از ایستگاه اول در نظر گرفته می شود. همچنان که پیشتر اشاره شد، تغییر شکل در فاصلهای معین که در شکل (۳) با L نـشان داده شـده، یـیش از ایـستگاه اول شروع می شود. مبدأ دستگاه مختصات در شکل (۳) نـشان دهندهی محل شروع تغییر شکل است. ناحیهی پس از این نقطه را می توان ناحیهی تغییر شکل نامید. پروفیل غلتک در ایستگاه اول به صورت کمان دایرهای در نظر گرفته می شود [۲۷]. بر اساس الگوی مـدل باتاچاریا [۱]، فرض می شود باریکههای عرضی در ناحیهی تغییر شکل، که ابتدا به صورت پاره خط های مستقیم و موازی محور X در شکل (۳) هستند، پس از تغییر شکل به صورت یک کمان دایرهای با زاویهی ۲۵ تبدیل شوند. بدون آن که طول باریکه تغییر کند. شکل (۳-ب) به صورت شماتیک تغییر شکل یک باریکهی دلخواه را نـشان می دهد. بر اساس آن چه در شکل (۳) نشان داده شده، زاویه یheta که می تواند معیاری از میزان تغییر شکل باشد، بر حسب مختصه یZ در امتداد جهت شکل دهی متغیر است. به گونه ای که از مقدار در نقطهی شروع تغییر شکل به مقدار $\theta(Z=L)=\theta_P$ در $\theta(Z=L)=0$ محل ایستگاه اول، افزایش می یابد. زاویه ی $heta_{
m P}$ ، زاویه ی پروفیل در ایستگاه اول نامیده میشود.



شکل (۳): نمایش شماتیک چگونگی تغییر شکل نوار ورق در شکلدهی غلتکی لولهی گرد، (الف) نوار ورق پیش از تغییر شکل در ایستگاه اول و نمایش دو باریکهی عرضی دلخواه ۱ و۲ در ناحیهی تغییر شکل و (ب) نمایش تغییر شکل یک باریکهی عرضی دلخواه به یک کمان دایرهای

به این ترتیب افزایش تدریجی زاویه (Z)، سبب اعمال کشیدگی ورق در راستای طولی و در ناحیه تغییر شکل می شود. بر اساس تغییر شکل توصیف شده در بالا، می توان میدان کرنش کششی ایجاد شده در ورق را محاسبه نمود. برای این کار، دو نقطه مانند M و N واقع بر دو باریکه ی عرضی به فاصله ی Zb از یک دیگر، مانند باریکه های ۱ و ۲ در شکل (۳– الف)، در نظر می گیریم. به گونه ای پیش از تغییر شکل، M و N دارای مختصه ی X یکسان هستند. اگر موقعیت این دو نقطه پس از تغییر شکل را با 'M و 'N نشان دهیم،

بر اساس هندسهی تغییر شکل بیان شده در بالا، بردارهای مکان M، N و 'N با روابط زیر مشخص می شوند.

$$\mathbf{r}_{\mathrm{M}} = \begin{bmatrix} X \\ 0 \\ Z \end{bmatrix}, \ \mathbf{r}_{\mathrm{M}'} = \begin{bmatrix} R_{1} \sin \beta_{1} \\ R_{1} (1 - \cos \beta_{1}) \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w}{\theta_{1}} \sin \left(\frac{X \theta_{1}}{w} \right) \\ \frac{w}{\theta_{1}} \left(1 - \cos \left(\frac{X \theta_{1}}{w} \right) \right) \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{\mathrm{N}} = \begin{bmatrix} X \\ 0 \\ Z + dZ \end{bmatrix}, \ \mathbf{r}_{\mathrm{N}} = \begin{bmatrix} R_{2} \sin \beta_{2} \\ R_{2} (1 - \cos \beta_{2}) \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w}{\theta_{2}} \sin \left(\frac{X \theta_{2}}{w} \right) \\ \frac{w}{\theta_{2}} \left(1 - \cos \left(\frac{X \theta_{2}}{w} \right) \right) \\ Z + dZ \end{bmatrix}$$

$$(1)$$

که r نشان گر بردار مکان، $2\theta_1$ و R_1 بیان گر زاویه و شعاع کمان دایرهای باریکهی ۱ پس از تغییر شکل، $2\theta_2$ و 2π کمیتهای مشابه برای باریکهی ۲ و 2w عرض ورق است. با توجه به فاصلهی بسیار کوچک Z بین باریکههای ۱ و ۲، اختلاف زاویههای θ_1 و θ_2 ، مقدار بسیار کوچک $d\theta$ فرض میشود.

$$\theta_1 - \theta_2 = d\,\theta \tag{(Y)}$$

میدان کرنش کششی را میتوان با استفاده از تغییر طول نسبی جزء خطی MN بهدست آورد.

$$e = \frac{\mathbf{M}'\mathbf{N}' - \mathbf{M}\mathbf{N}}{\mathbf{M}\mathbf{N}} = \frac{\left\|\mathbf{r}_{\mathbf{N}'} - \mathbf{r}_{\mathbf{M}'}\right\| - \left\|\mathbf{r}_{\mathbf{N}} - \mathbf{r}_{\mathbf{M}}\right\|}{\left\|\mathbf{r}_{\mathbf{N}} - \mathbf{r}_{\mathbf{M}}\right\|}$$
(°)

با توجه به معادلات (۱)، اندازهی جزءهای خطی MN و 'M'M را میتوان چنین نوشت.

$$\left\|\mathbf{r}_{\mathrm{N}}-\mathbf{r}_{\mathrm{M}}\right\|=dZ\tag{(f)}$$

$$\frac{\left\|\mathbf{r}_{\mathrm{N}'} - \mathbf{r}_{\mathrm{M}'}\right\|^{2}}{w^{2}} = \left[\left(\frac{\sin\left(\frac{X \theta_{2}}{w}\right)}{\theta_{2}} - \frac{\sin\left(\frac{X \theta_{1}}{w}\right)}{\theta_{1}} \right) \right]^{2} + \left[\left(\frac{\cos\left(\frac{X \theta_{1}}{w}\right)}{\theta_{1}} - \frac{\cos\left(\frac{X \theta_{2}}{w}\right)}{\theta_{2}} \right) + \left(\frac{1}{\theta_{1}} - \frac{1}{\theta_{2}}\right) \right]^{2} + \frac{dZ^{2}}{w^{2}}$$

$$(\Delta)$$

رابطهی (۵) پس از بسط و سادهسازی بهصورت زیر نوشته میشود.

$$\frac{\left\|\mathbf{r}_{N'} - \mathbf{r}_{M'}\right\|^{2}}{w^{2}} = \left[\left(\frac{1}{\theta_{1}}\right)^{2} + \left(\frac{1}{\theta_{2}}\right)^{2} - \frac{2}{\theta_{1}\theta_{2}}\cos\left(\frac{X \, d\theta}{w}\right)\right] + \left(\frac{1}{\theta_{1}} - \frac{1}{\theta_{2}}\right)^{2} + 2\left(\frac{1}{\theta_{1}} - \frac{1}{\theta_{2}}\right)\left[\frac{\cos\left(\frac{X \, \theta_{1}}{w}\right)}{\theta_{1}} - \frac{\cos\left(\frac{X \, \theta_{2}}{w}\right)}{\theta_{2}}\right] + \frac{dZ^{2}}{w^{2}}$$
(7)

اما با توجه به کوچک بودن اختلاف زاویه ی $d \theta$ و نیز اینکه نسبت (X/w) کوچکتر از یک است، میتوان از تقریب

$$\cos\left(\frac{X\,d\,\boldsymbol{\theta}}{w}\right) \cong 1$$

استفاده کرد و در نتیجه، رابطهی (۶) به صورت زیر ساده تر خواهد شد.

$$\frac{\left\|\mathbf{r}_{N}-\mathbf{r}_{M}\right\|^{2}}{w^{2}} = 2\left(\frac{1}{\boldsymbol{\theta}}-\frac{1}{\boldsymbol{\theta}_{2}}\right)^{2} + 2\left(\frac{1}{\boldsymbol{\theta}}-\frac{1}{\boldsymbol{\theta}_{2}}\right)\left(\frac{\cos\left(\frac{X\boldsymbol{\theta}}{w}\right)}{\boldsymbol{\theta}}-\frac{\cos\left(\frac{X\boldsymbol{\theta}_{2}}{w}\right)}{\boldsymbol{\theta}_{2}}\right) + \frac{dZ^{2}}{w^{2}}$$
(A)

یادآوری می شود که در روابط بالا، θ_1 و θ_2 به تر تیب اشاره به زاویه ی کمان دایره ای نشان داده شده در شکل (۲–ب) برای دو باریکه ی عرضی مجاور است که در شکل (۲–الف) با ۱ و ۲ نام گذاری شده اند. به عبارت دیگر

$$\boldsymbol{\theta}_{1} = \boldsymbol{\theta}(Z)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{2} = \boldsymbol{\theta}(Z + dZ)$$
(9)

۲۸

اکنون با فرض در اختیار داشتن تابع (Ζ)θ، از جایگذاری روابط (۴) و (۸) در معادلهی (۳)، میدان کرنش بهصورت تابع دو متغیرهای به شکل:

$$e = e(X, Z) \tag{(1)}$$

نتیجه خواهد شد. تعیین تابع *(C)* خود یکی از هدفهای حل این مسأله است که در بخش بعد مورد اشاره قرار خواهد گرفت.

۲-۲- انرژی پلاستیک تلف شده ناشی از کشش طولی ورق بر اساس مدل باتاچاریا [۱]، پس از تعیین میدان کرنش، لازم است کار پلاستیک تلف شده ناشی از تغییر شکل اعمالی در ورق، محاسبه شود. در اینجا نیز مانند آنچه در مدل باتاچاریا [۱] پیشنهاد شده، از کار خمش طولی صرفنظر شده و تنها کار پلاستیک ناشی از کشش طولی ایجاد شده در ورق در نظر گرفته می شود. کار پلاستیک ناشی از کشش طولی، با فرض رفتار صلب-پلاستیک کامل، از رابطهی زیر محاسبه می شود.

$$W_{\text{Tension}} = Ye = tY \int_{0}^{L_w} e(X, Z) dZ dX$$
(11)

در رابطهی بالا Y تنش تسلیم ماده، t ضخامت ورق، w ضخامت ورق و L و L طول تغییر شکل است.

در مدل پیشنهادی باتاچاریا [۱]، تابع مجهول (Z) با کمینهسازی کارتلف شدهی پلاستیک تعیین میشود. اما به دلیل پیچیدگی میدان کرنش، به دست آوردن رابطهی بسته ای برای تابع (Z) در اینجا امکان پذیر نیست. برای حل این مسأله، یک تابع حدس چند جمله ای برای تابع (Z) فرض میشود. با توجه به وجود چهار شرط مرزی، تابع (Z) به صورت درجه یسوم و شامل چهار ضریب مجهول در نظر گرفته می شود.

$$\boldsymbol{\theta}(Z) = A Z^{3} + B Z^{2} + C Z + D \tag{11}$$

چهار شرط مرزی که بهوسیلهی تابع (Z) باید ارضا شوند عبارتند از پیوستگی تابع و شیب آن، در ابتدا و انتهای بازهی تغییر شکل، که بهصورت زیر بیان میشوند.

$$\boldsymbol{\theta}(Z=0) = \boldsymbol{\theta}_0 = 0$$

$$\boldsymbol{\theta}(Z=L) = \boldsymbol{\theta}_p$$

$$\frac{d \boldsymbol{\theta}}{dZ}(Z=0) = 0$$

$$\frac{d \boldsymbol{\theta}}{dZ}(Z=L) = 0$$

(17)

با استفاده از این چهار شرط مرزی، چهار ضریب ثابت تعیین و تابع $\theta(Z)$ بهصورت زیر بهدست میآید.

$$\frac{\boldsymbol{\theta}(Z)}{\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{P}}} = -2\left(\frac{Z}{L}\right)^{3} + 3\left(\frac{Z}{L}\right)^{2} \tag{14}$$

 $\theta(Z)$ لازم است یادآوری شود که میتوان چند جملهای حدس تابع (Z) را از مرتبهی بالاتر و با تعداد ضرایب مجهول بیشتر در نظر گرفت. در اینصورت با اعمال شرایط مرزی، چهارتا از تعداد ضرایب مجهول کم خواهد شد. آنگاه ضرایب باقیماندهی مجهول بههمراه مجهول طول تغییر شکل، L، باید با استفاده از کمینهسازی کار تلف شدهی پلاستیک تعیین شوند.

اکنون پس از جایگذاری تابع (Z) از رابطهی (۱۴) در معادلهی (۱۱)، کار تلف شدهی پلاستیک برای یک مثال عددی مشخص، تنها شامل مجهول طول تغییر شکل، L، می شود. با رسم نمودار کار تلف شدهی پلاستیک بر حسب L، طول تغییر شکل فرایند متناظر با مقدار کمینهی کار پلاستیک، تعیین خواهد شد. در این مقاله برای محاسبهی طول تغییر شکل، از یک برنامهی Matlab برای محاسبهی انتگرال کار پلاستیک و تعیین طول تغییر شکل، L، استفاده شده است.

۳- محاسبه ی طول تغییر شکل با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود

در این بخش، جزییات مدلسازی فرایند شکلدهی غلتکی لولهی گرد و چگونگی تعیین طول تغییر شکل با استفاده از نتایج شبیهسازی اجزای محدود ارائه خواهد شد. شبیهسازیهای اجزای محدود در این مقاله با استفاده از نسخهی ۶/۷ نرمافزار ABAQUS انجام شدهاند. سعی شده است جزییات مدلسازی متناسب با ساختار نرمافزار ABAQUS ارائه شود.

۳–۱– هندسهی مدل

با توجه به تقارن مسأله، مقطع، تنها نیمی از مقطع در هندسهی مدل در نظر گرفته میشود. مدل شامل غلتکهای بالایی و پایینی ایستگاه صفر، غلتکهای بالایی و پایینی ایستگاه اول و نوار ورق میشود. غلتکهای بالایی و پایینی ایستگاه صفر، استوانهای شکل هستند. اما دو غلتک ایستگاه اول دارای پروفیل کمان دایرهای، با زاویهی پروفیل مشخص ρ هستند. غلتکها به صورت صلب تحلیلی (Analytical Rigid) مدل شدهاند. نوار ورق نیز به صورت یک رویه ی مسطح مستطیلی تغییر شکل پذیر، با طولی به اندازه ی دو برابر

فاصلهی بین ایستگاهها و عرض نصف عرض نوار ورق واقعی، مدل شده است. بر اساس تجربهی بهدست آمده از شبیهسازیهای انجام شده، حداقل طول مستطیل مدل، دو برابر فاصلهی ایستگاهها پیشنهاد می شود.

۲-۳- رفتار مادی

در شرح مدل تحلیلی اشاره شد که رفتار ورق بهصورت صلب-پلاستیک کامل فرض شده است. اما با توجه به وارون اپذیری تا نسور نرمی (Compliance tensor) در مدل صلب- پلاستیک کامل [۳۱]، استفاده از این مدل در تحلیل اجزای محدود امکان پذیر نیست. از این و رفتار مادی ورق در شبیه سازی ها به صورت الاستیک-پلاستیک منظور شده است. پژوهش های پیشین [۳۰] نیز نشان داده است که مدل با تاچاریا که برای ورق با رفتار صلب-پلاستیک کامل ارائه شده، برای ورق با رفتار الاستیک-پلاستیک نیز با تقریب خوبی معتبر است. با توجه به مشخصات فرایند انتخابی به عنوان مثال عددی، که در بخش چهارم به آن اشاره خواهد شد، مشخصات رفتار مکانیکی فولاد 1020 SAE برای ورق به کار گرفته شده است. شکل (۴) نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک حقیقی را به همراه



شکل (۴): نمودار تنش-کرنش و مشخصات مکانیکی فولاد SAE 1020 که بهعنوان رفتار مکانیکی ورق در شبیهسازیهای اجزای محدود به کار رفته است

۳-۳- آرایش اولیه در مدل سوار شده

در این مقاله شبیهسازی فرایند از ابتدای فرایند مورد توجه قرار گرفته است. در آرایش اولیه، سر نوار ورق در ایستگاه اول قرار دارد. غلتکهای بالایی و پایینی ایستگاه صفر که استوانهای شکل هستند، بهترتیب با سطوح بالایی و پایینی ورق در تماس هستند. غلتک بالایی ایستگاه اول نیز مماس بر سطح بالایی نوار ورق مستقر

می شود. غلتک بالایی ایستگاه دوم، همتراز افقی غلتک بالایی ایستگاه اول مستقر می شوند. غلتک های پایینی ایستگاه اول باید در ارتفاع مناسب زیر نوار ورق مستقر شوند. ارتفاع مناسب برای غلتک پایینی ایستگاه اول به آسانی قابل محاسبه است. به گونه ای که در آرایش ابتدایی، غلتک پایینی بر سطح زیرین نوار ورق مماس باشد. شکل (۵) آرایش اولیه ی مدل سوار شده ی اجزای محدود را در یکی از شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد.



شکل (۵): نمایش آرایش اولیهی مدل سوار شده و شبکهبندی مدل اجزای محدود در یکی از شبیهسازیهای انجام شده

۳-۴- تماسهای تعریف شده

با توجه به استفاده از مدل صلب تحلیلی در شبیهسازیها غلتکها و بر اساس راهنمای نرمافزار ABAQUS [۳۳]، برای تعریف تماس بین غلتکها با ورق از الگوریتم زوج تماسی (Contact pair) استفاده شده است. برای اعمال قیدهای تماسی روش سینماتیکی و نیز فرمولبندی لغزشی محدود (Finite slip) انتخاب شده است. در شیهسازیهای این مقاله دو رفتار در جهت مماسی در نظر گرفته شده است. برای نحوهی کنش سطوح بر هم در جهت عمودی تماس سخت (Hard contact) بهکار گرفته شده است. برای جهت مماسی نظر گرفته شده است. غلتکهای ایستگاه صفر، رفتار بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. غلتکهای ایستگاه صفر کاملاً در جای خود ثابت هستند و فقط وظیفهی نگهداری ورق را دارند. اما برای غلتکهای ایستگاههای اول به بعد، رفتار اصطکاکی با مدل کولمب و ضریب اصطکاک همگن و ثابت ۲۰–*۳* منظور شده است.

۳–۵– قدمهای تحلیل

شبیه سازی های اجزای محدود شامل دو قدم از نوع دینامیک صریح (Explicit Dynamics) می شوند. قدم اول بسته شدن غلتک های ایستگاه اول و قدم دوم دوران غلتک های ایستگاه اول. به گونه ای که در انتهای قدم دوم، سر جلویی نوار ورق به اندازهی فاصله ییک ایستگاه به جلو حرکت داده شده باشد.

۳-۶- شرایط مرزی و بارگذاری

در شبیه سازی های این پایان نامه، اعمال تغییر شکل از طریق اعمال تغییر مکان مناسب به غلتک ها انجام شده است. در ABAQUS نیز مانند دیگر نرمافزارها، برای تعریف و کنترل درجه های آزادی اجسام صلب، یک نقطه به عنوان نقطهی مرجع (Reference point) به جسم صلب منتسب می شود. آن گاه با تعیین هر یک از شش درجهی آزادی نقطهی مرجع، حرکت جسم صلب تعریف می شود.

شرایط مرزی						
هندسه	قدم دوم اول					
لبەي تقارن نوار ورق	(تقارن نسبت به صفحهی ۲-۳) U ₁ ,UR ₂ ,UR ₃ =0					
T ₀ (نقطهی مرجع غلتک بالاب ایر تگاه مف)	(همهی درجات آزادی مقید) U: U: U					
نقطهی مرجع غلتگ \mathbf{B}_0	(همهی درجات آزادی مقید)					
پایینی ایستگاه صفر)	$U_1, U_2, U_3, UR_1, UR_2, UR_3 = 0$					
T ₁ (نقطهی مرجع غلتک	(همهی درجات آزادی	(دیگر درجات آزادی				
بالایی ایستگاه اول)	مقيد)	$UR_1= heta_{ ext{TOP}}$ (مقيد				
نقطهی مرجع غلتک ${ m B}_1$	(دیگر درجات آزادی	(دیگر درجات آزادی				
پايينى ايستگاه اول)	مقيد) U ₂ =d	$U\!R_1\!\!=\!\! heta_{ m BOT}$ (مقيد				

جدول (۱): شرایط مرزی برای مدل اجزای محدود نشان داده شده در شکل (۵)

۳-۷- المان انتخابی و شبکهبندی

در مدلهای اجزای محدود در این مقاله، غلتکها بهصورت صلب تحلیلی مدل شدهاند. بههمین دلیل تنها نوار ورق است که باید شبکهبندی شود. برای شبکهبندی نوار ورق از المان پوستهی متداول (Conventional Shell) با نام S4R استفاده شده است. در شبکه بندی ورق از یک شبکهی منظم با ۱۵۰ المان در جهت طولی و ۲۰ المان در جهت عرضی استفاده شده است. مدل شبکهبندی شدهی یکی از شبیهسازیهای انجام شده در شکل (۵) نشان داده شده است.

۳-۸- چگونگی تعیین طول تغییر شکل با استفاده از نتایج شبیهسازی اجزای محدود

برای تعیین طول تغییر شکل، چگونگی تغییر شکل باریکههای عرضی نوار ورق، در فاصلهی بین ایستگاه صفر تا ایستگاه اول، بهعنوان معیار اصلی، انتخاب شده است. برای این کار، پس از پایان شبیهسازی و در "واحد مشاهدهی نتایج" (Visualization module). تعدادی مسیر عرضی از گرههای المانی، با فاصلههای مساوی، بین ایستگاه صفر و ایستگاه اول تعریف شد. آنگاه با رسم تغییر مکان در راستای محور ۷، منحنیهای حاصل از تغییر شکل مسیرهای عرضی،

www.SID.ir

رسم شد. محور *y* در شکلهای (۳) و (۵) نشان داده شده است. به این ترتیب با مقایسهی این منحنیها میتوان مسیری را پیدا کرد که تغییر مکان *y* در امتداد آن به صورت قابل توجهی با مسیرهای عرضی پیش از آن تفاوت میکند. فاصلهی این مسیر عرضی تا ایستگاه اول، طول تغییر شکل در نظر گرفته شده است. شکل (۶) منحنیهای حاصل از تغییر شکل مسیرهای عرضی بین ایستگاه صفر تا ایستگاه اول را برای یکی از شبیه سازی های انجام شده را نشان می دهد.



۴- بررسی و مقایسهی نتایج بهدست آمده از حل عددی

و تحليلي

هدف اصلی در این قسمت، بررسی اعتبار مدل تحلیلی ارائه شده است. بر اساس جستجوی نگارندگان، هیچگونه پژوهش قبلی در زمینهی طول تغییر شکل در شکل دهی غلتکی لولهی گرد، در میان منابع منتشر شدهی پیشین یافت نشد. از طرفی در یک پژوهش قبلی [۳۰] نتایج شبیهسازی اجزای محدود برای طول تغییر شکل در شکل دهی غلتکی کانال متقارن با نتایج تحلیلی و تجربی باتاچاریا [۷] مقایسه و اعتبار آن نشان داده شده است. بر این اساس، برای اعتبارسنجی مدل تحلیلی ارائه شده، نتایج مدل تحلیلی با نتایج مشابه از شبیهسازی اجزای محدود ABAQUS مقایسه می شود.

برای این منظور یک مثال عددی خاص انتخاب شده است. مشخصات فرایند نمونهی انتخابی، بر اساس آزمایش باتاچاریا در شکل دهی کانال متقارن [۷] انتخاب شدهاند. به این معنی که مشخصات هندسی و مکانیکی فرایند، همانند آزمایش باتاچاریا [۷] انتخاب شدهاند. با این تفاوت که پروفیل غلتک در ایستگاه اول، به صورت کمان دایرهای در نظر گرفته شده است. جدول (۲) مشخصات آزمایش باتاچاریا [۷] را نشان می دهد.

جدول (۲): مشخصات آزمایش باتاچاریا [۷]

	مکانیکی			
عرض ورق	ضخامت	فاصلەي	شعاع پايەي	جنس
	ورق	ایستگاهها	غلتكها	ورق
۴۰(mm)	۰/۶(mm)	۱۴۵(mm)	۵۳(mm)	فولاد نرم

در مقالهی باتاچاریا [۷]، نوار ورقی از جنس فولاد نرم (Mild steel) برای انجام آزمایش ها انتخاب شده است. اما در این گزارش، نام دقیق یا خصوصیات مادی فولاد تصریح نشده است. بهعنوان نمایندهای از خصوصیات مادی فولاد نرم، بر اساس پیشنهاد مرجع (۱۸]، دادههای مادی فولاد 1020 SAE انتخاب شده است. مشخصههای مکانیکی فولاد 1020 SAE که از مرجع (۱۸] برگرفته شده است، در شکل (۴) آمده است.

در بررسی اعتبار نتایج مدل تحلیلی، همزمان یک مطالعه ی پارامتری نیز بر روی طول تغییر شکل انجام شده است. به ایـن معنی کـه یـا تغییر دو پارامتر "عرض ورق"، w 2، و " زاویه ی پروفیل"، θ ، مطابق جدول (۳)، طول تغییر شکل برای ۱۶ حالت از دو روش تحلیلی و شبیه سازی اجزای محدود تعیین و مقایسه شـده است. یادآوری می شود که در هریک از ایـن ۱۶ حالت، بـهجز پارامترهای w و θ ، پارامترهای دیگر به همان صورتی که در بالا شرح داده شد، بر اساس آزمایش باتاچاریا انتخاب شده است.

,heta جدول (۳): مقدارهای انتخابی برای دو پارامتر w و

در بررسی پارامتری طول تغییر شکل								
نيمعرض ورق	<i>w</i> (mm)	۱۵	۲.	۲۵	۳.			
زاويەي پروفيل	θ (°)	٢۵	٣٠	۴.	۴۵			

نتایج این بررسی ها درنمودارهای شکل های (۲) و (۸) نشان داده شده است. نمودارهای شکل (۲)، اثر افزایش عرض ورق بر روی طول تغییر شکل را بهازای زاویهی پروفیل ثابت نشان می دهد. نمودارها نزدیکی خوبی بین نتایج مدل تحلیلی و نتایج شبیه شازی اجزای محدود نشان می دهند. این موضوع نشان گر اعتبار مدل تحلیلی ارائه شده است. به علاوه مشاهده می شود که با افزایش عرض ورق و بهازای زاویهی پروفیل ثابت، طول تغییر شکل افزایش می یابد. این نتیجه با آن چه از فرایند انتظار می رود، مطابقت دارد. زیرا بهازای زاویهی پروفیل ثابت، هر چه عرض ورق افزایش یابد. فاصلهی بیشتری برای ورق نیاز است تا از حالت تخت ابتدایی به کمان دایره ای مورد نظر در ایستگاه، تغییر شکل دهد.

در نمودارهای شکل (۸)، اثر افزایش زاویهی پروفیل بر روی طول تغییر شکل و بهازای عرض ورق ثابت، نمایش داده شده است. آنگونه که این نمودارها نشان میدهند، اثر افزایش زاویهی پروفیل

بر روی طول تغییر شکل به مراتب کمتر از اثر افرایش عرض ورق است. به عبارت دیگر با افزایش زاویه ی پروفیل و به ازای عرض ورق ثابت، طول تغییر شکل کمی افزایش می یابد. در مدل تحلیلی باتاچاریا [۱] برای کانال متقارن، طول تغییر شکل با عرض به توان ۱/۵ و با زاویه ی پروفیل به توان ۵/۰متناسب است. در نتیجه روند تغییرات در نمودارهای شکل های (۷) و (۸)، با مدل تحلیلی باتاچاریا برای کانال متقارن [۱] نیز هم خوانی دارند.

۵- نتیجهگیری

طول تغییر شکل یکی از پارامترهای مهم در فرایند شکل دهی غلتکی سرد است. زیرا فاصلهی بین ایستگاهها و نیز آهنگ تغییر شکل، بر اساس آن تعیین میشوند. باتاچاریا [۱] برای نخستین بار ضمن معرفی طول تغییر شکل، رابطهی بستهای برای این طول، در شکل دهی کانال متقارن به دست آورد. در این مقاله یک مدل تحلیلی برای محاسبهی طول تغییر شکل در شکلدهی غلتکی لولهی گرد ارائه شد. بر اساس جستجوی نگارندگان، ارائهی مدل تحلیلی برای تعیین طول تغییر شکل در شکلدهی لوله ی گرد، تازگی دارد. مقایسهی نتایج مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج مشابه شبیهسازی اجزای محدود، اعتبار مدل تحلیلی ارائه شده را نشان میدهد. بهعلاوه نتايج بررسي پارامتري نشان ميدهند افزايش عرض ورق و زاویهی پروفیل، سبب افزایش طول تغییر شکل میشود. اما اثر افزایش عرض ورق به مراتب بیشتر از اثر افزایش زاویهی پروفیل است. همچنین در بیشتر موارد، طول تغییر شکل بهدست آمده از شبیه سازی اجزای محدود، بیشتر از نتیجه ی مشابه از مدل تحلیلی است. این موضوع می تواند ناشی از چـشم پوشی از تغییر شکل الاستیک در مدل تحلیلی باشد.



۳۲



ثابت، برای فرایند نمونهی مورد بررسی

www.SID.ir

- [10] Kiuchi, M., Koudabashi, T. and Sato, T., "Automated Design System of Optimal Roll Profiles for Roll Forming of Welded Pipe and Tube", Proceeding of the 3th International Conference of Steel Rolling, Tokyo, 2-6 Sep. 1985, pp. 335-342.
- [11] Panton, S. M., "Computer Aided for Roll Forming Design", Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1987.
- [12] Nefussi, G., and Gilormini, P., "A Simplified Method for the Simulation of Cold Roll Forming", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35, No. 10, 1993, pp. 867-878.
- [13] Nefussi, G., and Gilormini, P., "A kinematical Method for the Simulation of Cold-Roll Forming Process", ECCOMAS, Barcelona, 2000.
- [14] Toyooka, T., "Computer Simulation for Tube- Making by the Cold Roll-Forming Process", Ph.D. Thesis, The University of Aston in Birmingham, 1999.
- [15] Moslemi Naeini, H., Salmani Tehrani, M., and Safdarian, R., "Investigating the Weight of Longitudinal out-of-Plane Bending Energy in Predicting "Deformation Length" in Roll-Forming of Symmetric Channel Section", Proceedings of the 12th MetalForming Conference, 21-24 Sept., 2008, pp. 141-144, Krakow, Poland,.
- [16] Brunet, M., "Numerical Analysis of Cold-Forming Residual Stresses in Thin-Walled Structures", NUMIFORM Conference, Balkema, Rotterdam, 1992.
- [17] Rebelo, N., Nagtegaal, J. C., Taylor, L. M. and Passman, R. "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods in the Simulation of Metal Forming Processes", ABAQUS Users Conf., Newport, RI, 1992.
- [18] McClure, C. K., and Li, H., "Roll Forming Simulation using Finite Element Analysis", Manufacturing Review, Vol. 8, 1995, pp. 114-122.
- [19] B., Wen and R. J., Pick, "Modeling of Skelp Edge Instabilities in the Roll Forming of ERW Pipe", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 41, pp. 425-446, 1994.
- [20] Senanayake, R. S., Cole, I. M., and Thiruvarudchelvan, S., "The Application of Computational and Experimental to Metal Deformation in Cold Roll Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 45, 1994, pp. 155-163.
- [21] Heislitz, F., Livatyali, H., Ahmetoglu, M. A., Kinzel, G. L., and Altan, T., "Simulation of Roll Forming Process With 3-D Code PAM-STAMP", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59, 1996, pp. 59-67.
- [22] Dong, C., Onipede, D., "Deformation Mechanics in Cold-Roll-Formed Wide Profiles", Proceedings of the 5th International LS-DYNA Conference, Southfield, USA, 21-22 Sep 1998.
- [23] Kiuchi, M., Nakata, I., and Wang, F., "FEM Simulation of Roll-Forming Process of ERW Pipe by Flexible Forming Mill", 4th Joint Workshop on Production Technology, Japan, 1998.
- [24] Alsamhan, A., Hartley, P., and Pillinger, I., "The Computer Simulation of Cold-Roll-Forming Using FE Methods and Applied Real Time Re-meshing Techniques", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, 2003, pp. 102-111.
- [25] Alsamhan, A., Pillinger, I., and Hartley, P., "The Development of Real Time Re-meshing Technique for Simulating Cold-Roll-
- [26] Forming Using FE Methods", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, 2004, pp. 1-9.



- 8- مراجع
- Bhattacharyya, D., Smith, P., Yee, C. H., and Collins, I. F., "The Prediction of Deformation Length in Cold Roll Forming", J. of Mech. Working Technol. 9, 1984, pp. 181-191.
- [2] Angel, R. T., "Designing Tools for Cold Roll Forming, The Iron Age", Vol. 16, No. 3, 1949, pp. 83-88.
- [3] Ona, H., Jimma, T., and Fukaya, N., "Experiments on the Forming of Straight Asymmetrical Channels - Research on the High Accuracy Cold Roll Forming Process of Channels Type Cross Section", Journal of JSTP, Vol. 22, Dec. 1981, pp. 1244-1251.
- [4] Ona, H., Jimma, T., Shimada, M., and Morimoto, H., "Research on High Accuracy Col Roll Forming Process. Experiment on the Pocket Wave of Wide Profiles", Journal of JSTP, Vol. 23, Jul. 1982, pp. 664-671.
- [5] Ona, H., Jimma, T., Kozono, H., and Nakako, T., "Development in CAD for Cold Roll Forming", Proceeding of the 26th international M.T.D.R. Conference, Manchester, 1986, pp. 49-54.
- [6] Kiuchi, M., "Overall Study on Roll Forming Process of Square and Rectangular Pipes", Proceeding of the 2nd international Conference on Rotary Metalworking Processes, 1982, pp.213-226.
- [7] Bhattacharyya, D., Maltby, T. C., Martin, T. A., and Panton, S. M., "Prediction of Strain Development while Roll Forming Fundamentals Sections", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, 1990, pp. 871-876.
- [8] Fewtrell, J., "An Experimental Analysis of Operating Conditions in Cold Roll Forming", Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1990.
- Kiuchi, M., Koudabashi, T., "Roll Forming of Circular Tube-Automated Design System of Optimal Roll Profiles",
- [9] International Conference 'Tubes and Energy', Eurogress-Aachen, West Germany, Oct. 1983, pp. 1/4/1-1/4/15, 11-12.

forming of circular tube section", Journal of Materials [27] Processing Technology, Vol. 177, 2006, pp. 617-620.

- [32] Chen, W. F. and Han, D. J., "Plasticity for Structural Engineers", Springer-Verlag, 1988.
- [33] Hibbitt, D., Karlsson, B., and Sorensen, P., "Getting Started with ABAQUS/Explicit – Interactive Version", Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Rhode Island, 2002.

Bui., Q. V., Papeleux, L., Boman, R., Ponthot, J. P., Wouters, P., Kergen, R. and Daolio, G. "Numerical Simulation of Cold Roll Forming Process", Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming, 27-29 Apr. 2005, pp. 141-144, Cluj, Romania.

- [28] Salmani Tehrani, M., Hartley, P., Moslemi Naeini, H. and Farzin. M., "Localised Bending Defect in Circular Tube Roll-Forming", Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming, Cluj, Romania, 2005, pp. 313-316.
- [29] Salmani Tehrani, M. Hartley, P., Moslemi Naeini, H. and Khademizadeh, H., "Localized edge buckling in cold rollforming of symmetric channel section", Thin-Walled Structures, No. 44, 2006, pp.184–196.
- [30] Salmani Tehrani, M. Moslemi Naeini, H. Hartley, P. and Khademizadeh, H. "Localized edge buckling in cold roll-