

بررسی فرایند نورد چهار غلتکی به روش تحلیلی و عددی

محسن اشرفی^{۱*}

وحید پورغریب شاهی^۲

* نویسنده مسئول: ashrafi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی موجود، فرایند نورد چهار غلتکی در تولید استوانه‌های جدار نازک و ضخیم مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور ابتدا با استفاده از روابط تحلیلی حاکم بر تغییر شکل ورق و با در نظر گرفتن دو حالت تغییر شکل الاستیک و الاستوپلاستیک ورق، گشتاور خمشی لازم برای انجام فرایند و شعاع خمش ورق پس از برگشت فتری محاسبه شده است. در ادامه با استفاده از روش اجزا محدود، نورد چهار غلتکی ورق آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که کرنش‌های به وجود آمده در ورق از حد بحرانی کمتر بوده و بنابراین ورق در حین فرایند دچار آسیب نخواهد شد. همچنین شعاع خمش ورق پس از برگشت فتری در طول ورق محاسبه و با مقدار تحلیلی آن مقایسه شد. در نهایت و به منظور صحت‌گذاری بر نتایج تحلیلی و عددی به دست آمده در این تحقیق، فرایند نورد چهار غلتکی بر روی نمونه‌هایی از ورق آلومینیومی انجام گرفت و خروجی حاصله با نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی مقایسه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که هر دو روش تحلیلی و عددی ابزاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار ورق در حین فرایند نورد چهار غلتکی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: نورد چهار غلتکی، خمش پلاستیک ورق، برگشت فتری، شعاع خمش.

۱- مربی، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر.

۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تیران.

۱- مقدمه

همکارانش با شبیه‌سازی دینامیکی به کمک روش اجزا محدود به نتایج خوبی در مورد خمکاری لوله‌های مخروطی دست پیدا کردند [۸]. همچنین برون و همکارانش به تحلیل دوبعدی و سه بعدی فرایند خمکاری به روش المان محدود پرداخته‌اند [۹]. لی و همکارانش با تحلیل اجزا محدود سه بعدی، شعاع در فرایند خمکاری نوارهای فلزی را پیش‌بینی کردند [۱۰].

تاکنون تحقیقات زیادی برای ارائه مدل نظری جامعی که بتواند رفتار ورق را در حین نورد چهار غلتکی پیش‌بینی نماید، انجام شده است. با این وجود هنوز هم تمامی ابعاد این فرایند شناخته شده نیست. در این تحقیق سعی بر آن است که با استفاده از روش‌های تحلیلی و روش المان محدود، درک بهتری از رفتار ورق حین فرایند در اختیار قرار گیرد.

در تحقیق حاضر، ابتدا با استفاده از روش‌های تحلیلی، پارامترهای مؤثر بر فرایند، نظیر میزان گشتاور لازم برای انجام فرایند خمکاری و میزان بازگشت فتری ورق محاسبه شده و سپس با استفاده از روش اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS، این فرایند شبیه‌سازی می‌شود. برای اطمینان از صحت نتایج تئوری و اجزا محدود، فرایند نورد چهار غلتکی بر روی نمونه‌هایی از ورق آلومینیومی انجام گرفته و خروجی حاصل با نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی مقایسه می‌شود.

۲- بررسی تحلیلی فرایند نورد چهار غلتکی

با توجه به پیچیدگی‌های فرایند و محدودیت‌های روش‌های تحلیلی، ارائه یک مدل ریاضی واحد که بتواند به طور کامل تمامی عوامل مؤثر در فرایند خمش را بررسی کند، بسیار مشکل است. بنابراین در نظر گرفتن فرضیات برای ساده‌سازی ضروری است.

معمولاً خمش پلاستیک یک ورق و یا تیر با انتقال سطح خشی، NN، به سطح مقعر خمش همراه است، شکل (۱) را ببینید. در عمل اثر باشینگر^۳ در منطقه بازگشت کرنش

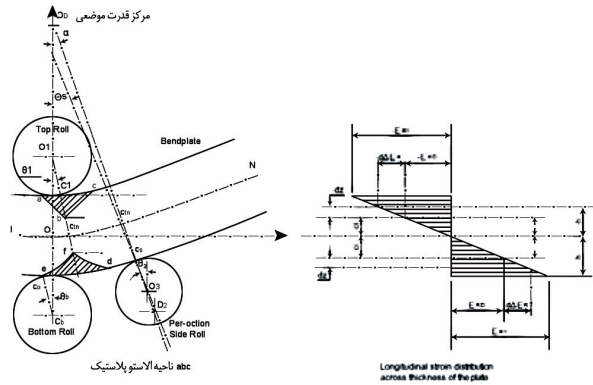
لوله‌های با قطر متوسط و بزرگ و مقاطع دایره‌ای به طور روز افزونی در سازه‌های مهندسی مانند مخازن تحت فشار، مبدل‌های حرارتی، دیگ‌های بخار و غیره به کار برده می‌شوند و از اجزای اصلی تشکیل دهنده مخازن نفت و گاز هستند. صنعت شکل‌دهی فلزات در حال حاضر با استفاده از فرایندهای مختلف، ورق‌ها را به مقاطع استوانه‌ای شکل تبدیل می‌کند و سپس استوانه‌های یکدست و بزرگ به وسیله جوشکاری تولید می‌شوند. در اکثر این فرایندها به خاطر بازگشت الاستیک و ماهیت هندسی دستگاه‌ها، قسمت زیادی از ورق به صورت صاف و خم نشده باقی می‌ماند. این روش‌ها قادر به تولید دامنه کوتاهی از شعاع‌ها در فرایند خمش هستند. برای غلبه بر این مشکلات از روش‌های جدیدی مانند نورد استفاده می‌گردد. مزایای خم کردن ورق با غلتک، باعث ایجاد هندسه‌های مختلف غلتک‌های نوردکاری شده است که به عنوان مثال می‌توان به نوردهای سه‌غلتکی^۱ [۱] و چهارغلتکی^۲ متقارن [۲] و یا غیرمتقارن [۳] اشاره کرد.

تلاش‌های متعددی برای ارائه روش‌های تحلیلی بهینه برای این فرایند انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مقالات هووا و همکارانش اشاره کرد [۴-۶]. آنها مدل ریاضی خود را بر مبنای فرض تغییرشکل الاستیک-الاستوپلاستیک در ضخامت ورق و جدا کردن کرنش اضافه شده الاستیک و پلاستیک، بنا کردند. همچنین مبانی طراحی و مبانی کارکرد دستگاه نورد چهار غلتکی را با ساخت یک دستگاه نورد چهار غلتکی در دانشگاه استون و به دست آوردن نیروها و گشتاورهای اعمالی به دستگاه مورد بررسی قرار دادند. در زمینه اجزا محدود نیز لی و شیپوری فرایند نورد سه‌غلتکی ورق به صورت مخروطی شکل را توسط نرم‌افزار ANSYS مدل کردند [۷]. ژنگ و

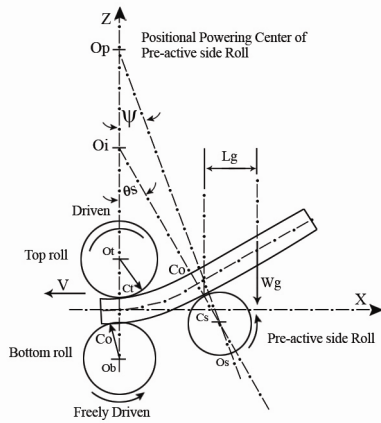
۱- Three rolling rollers

۲- Four rolling rollers

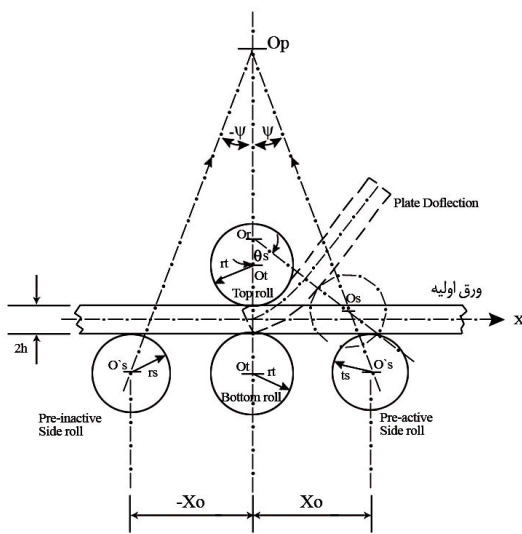
۳- Bauschinger



شکل (۱) توزیع کرنش طولی فرض شده در جهت ضخامت در محل تماس غلتک بالایی.



شکل (۲) تولید گشتاور خمشی.



شکل (۳) مختصات کارترین مورد استفاده در حل تحلیلی.

رخ می‌دهد که با اضافه کردن پارامترهای مجهول اضافی تحلیل را پیچیده‌تر می‌کند [۱۱-۱۲]. بنابراین فرض می‌شود که محور خمشی ورق در این تحلیل جابه‌جا نمی‌شود. همچنین فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

(۱) از تأثیر وزن ورق خارج از غلتک کناری، یعنی W_g در شکل (۲)، که باعث اعمال گشتاور $W_g L_g$ بر منطقه تغییر شکل می‌شود، صرف نظر می‌شود.

(۲) هیچ خمشی در عرض ورق وجود ندارد، بنابراین خمش نهایی باعث شکل‌گیری یک لوله کاملاً استوانه‌ای می‌شود و منطقه تماس بین غلتک و ورق در جهت عرض ورق تغییر نمی‌کند.

(۳) منطقه تماس غلتک و ورق و همچنین منطقه تغییر شکل ورق خمیده شده در خمش ورق نازک را می‌توان دویعدی در نظر گرفت. مبدأ مختصات حاصل تقاطع صفحه عمودی $O_p O_f$ (محور Z) با صفحه مرکزی یا خمشی ورق به عنوان محور X است، شکل (۳) را ببینید.

(۴) از تغییر شکل غلتک در حین نورد صرف نظر می‌شود.

(۵) توزیع گشتاور خمشی ورق در منطقه تغییر شکل مطابق شکل (۴) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین گشتاور خمشی پیشینه در اولین نقطه تماس بین ورق و غلتک بالایی اتفاق می‌افتد.

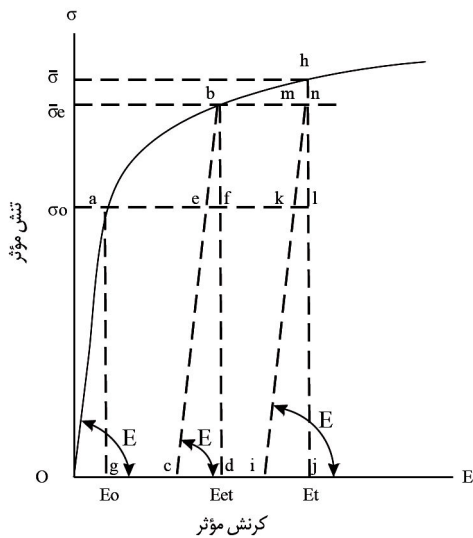
(۶) ورق به اندازه کافی عریض است تا از کرنش در جهت عرض ورق جلوگیری کند. بنابراین کرنش در جهت عرض ورق برابر با صفر است.

(۷) ورق به اندازه کافی نازک فرض می‌شود که بتوان از تنش در جهت ضخامت ورق صرف نظر کرد ($\sigma_z = 0$).

(۸) توزیع کرنش طولی ϵ_x در راستای ضخامت ورق، خطی در نظر گرفته می‌شود شکل‌های (۱) و (۵) را ببینید. توزیع تنش طولی σ_x در راستای ضخامت ورق نیز در تغییر شکل الاستیک، خطی و در حالت بالاتر از حد الاستیک به صورت توابع نمایی در نظر گرفته می‌شود، شکل (۵) را ببینید.

از آنجا که مطابق شکل (۵) تغییر شکل ورق در دو ناحیه الاستیک و الاستوپلاستیک رخ می‌دهد، برای استخراج روابط حاکم بر تغییر شکل ورق لازم است مرز این دو ناحیه تعیین شده و رابطه توزیع تنش طولی در هر ناحیه مشخص شود و در نهایت گشتاور خمشی لازم در هر یک از دو ناحیه محاسبه شود.

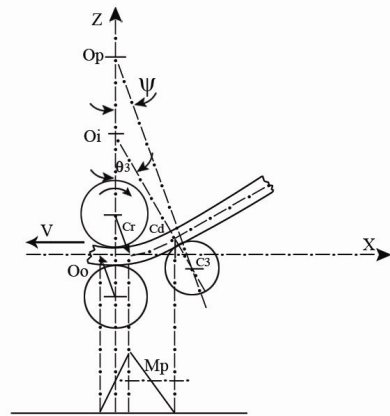
در شکل (۶) اولین دو سیکل کشش تک محوری چند مرحله‌ای بر روی منحنی تنش- کرنش مؤثر نشان داده شده است. در این شکل $oabd$ و $oabc$ به ترتیب حالت بارگذاری و بازگشت فنری را در مرحله‌ی اول خمش و $cbhj$ و $cbhj$ به ترتیب این حالات را برای مرحله دوم خمش نشان می‌دهند. سیکل اول و کرنش مطلق در نقاط h و b می‌باشد. مطابق شکل در مرحله دوم بارگذاری ($cbhi$)، ورق تا رسیدن به نقطه b در منطقه الاستیک باقی می‌ماند.



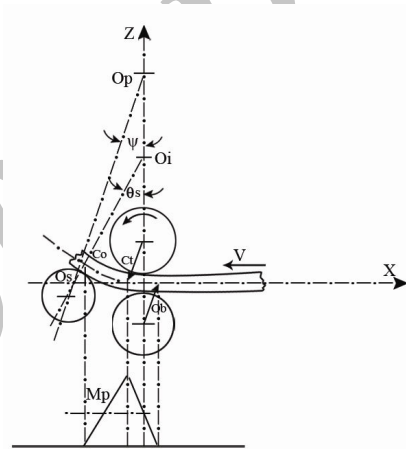
شکل (۶) بیان دو سیکل خمش متوالی بر روی یک منحنی تنش- کرنش [۴].

برای ورقهای نازک، σ_z صفر در نظر گرفته می‌شود. به‌علاوه حالت کرنش صفحه‌ای با شرط $\epsilon_y = 0$ فرض می‌شود. با توجه به روابط تنش و کرنش و رابطه تنش مؤثر فون میز، مقدار کرنش طولی در لحظه شروع تسلیم از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

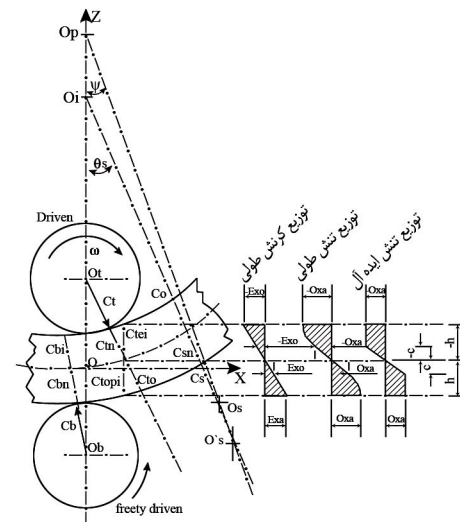
$$\epsilon_{x0} = \frac{(1-\nu^2)\sigma_0}{E\sqrt{1-\nu+\nu^2}} \quad (1)$$



شکل (۴-الف) توزیع گشتاور خمشی مفروض در منطقه تغییر شکل مؤثر.



شکل (۴-ب) توزیع گشتاور خمشی مفروض در منطقه تغییر شکل مؤثر.



شکل (۵) توزیع الاستیک-الاستوپلاستیک تنش و کرنش در جهت ضخامت ورق در محل تماس با غلتک بالایی [۴].

ماورای کرنش تسلیم اولیه ε_0 . همچنین کرنش طولی محلی برای یک لایه در مراحل دوم به بعد در مقداری بیش از حالت اولیه به تسلیم می‌رسد.

در شکل (۶) ε_{cd} در مرحله دوم را می‌توان به عنوان حاصل جمع کرنش الاستیک اضافه شده $\Delta\varepsilon_e^e$ ، و کرنش پلاستیک اضافه شده، $\Delta\varepsilon_e^p$ ، در نظر گرفت که می‌توان آنها را به ترتیب با کرنش الاستیک طولی $\Delta\varepsilon_x^e$ و کرنش پلاستیک طولی $\Delta\varepsilon_x^p$ به صورت زیر مرتب ساخت:

$$\Delta\varepsilon_x^e = \frac{3(1-\nu)\Delta\varepsilon_e^e}{2\sqrt{1-\nu+\nu^2}} \quad (۴)$$

و

$$\Delta\varepsilon_x^p = \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta\varepsilon_e^p \quad (۵)$$

معادلات (۴) و (۵) را با در نظر گرفتن تعاریف زیر برای کرنش اضافه شده مؤثر می‌توان استخراج کرد.

$$\Delta\varepsilon_e^e = \frac{\sqrt{3}}{3}\sqrt{(\Delta\varepsilon_x^e - \Delta\varepsilon_y^e)^2 + (\Delta\varepsilon_y^e - \Delta\varepsilon_z^e)^2 + (\Delta\varepsilon_z^e - \Delta\varepsilon_x^e)^2} \quad (۶)$$

$$\Delta\varepsilon_e^p = \frac{\sqrt{3}}{3}\sqrt{(\Delta\varepsilon_x^p - \Delta\varepsilon_y^p)^2 + (\Delta\varepsilon_y^p - \Delta\varepsilon_z^p)^2 + (\Delta\varepsilon_z^p - \Delta\varepsilon_x^p)^2} \quad (۷)$$

در این مسأله $\Delta\varepsilon_y^e$ و $\Delta\varepsilon_y^p$ برابر با صفرند.

گشتاور خمشی کل ورق را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$M_i = 2b \int_0^h \sigma_x z dz \quad (۸)$$

در ناحیه الاستیک با جایگذاری $\varepsilon_x = \frac{z}{a_0}$ ، $\sigma_x = \frac{E\varepsilon_x}{1-\nu^2}$

$$h = \frac{a_0(1-\nu^2)\sigma_0}{E\sqrt{1-\nu+\nu^2}}$$

نوشت:

$$M_i = \frac{2ba_0^2(1-\nu^2)^2\sigma_0^3}{3E^2(1-\nu+\nu^2)^{3/2}} \quad (۹)$$

در این رابطه M_i مقاومت خمشی ورق در لحظه شروع تسلیم است. برای مرحله دوم خمش و ادامه مراحل خمش باید σ_0 را با مقادیر متناظر آن (مثلاً با $\bar{\sigma}_e$ برای مرحله دوم) جایگزین کرد.

در این رابطه σ_0 تنش تسلیم اولیه ورق است. شعاع خمش در لحظه تسلیم اولیه a_0 ، که برابر با شعاع خمش محلی قبل از بازگشت فرتی^۱ نیز می‌باشد در خارجی‌ترین لایه که با صفحه خنثی به اندازه‌ی h فاصله دارد و با غلتک بالایی در تماس است، برابر است با:

$$\frac{1}{a_0} = \frac{(1-\nu^2)\sigma_0}{Eh\sqrt{1-\nu+\nu^2}} = \frac{\varepsilon_{x0}}{h} \quad (۲)$$

اگر شعاع خمش محلی صفحه خنثی در جهت طولی باشد، کرنش طولی کل ε_x برای لایه‌ای به فاصله z از صفحه خنثی ورق برابر است با $\varepsilon_x = z/R$. بنابراین برای اولین سیکل خمش اندازه منطقه الاستیک C_i در حالت الاستیک-الاستوپلاستیک برابر است با:

$$C_i = \frac{hR}{a_0} = \frac{(1-\nu^2)R\sigma_0}{E\sqrt{1-\nu+\nu^2}} \quad (۳)$$

به علت آنکه در مراحل بعدی خمش C_{i0} همواره از C_i بزرگتر است، این روابط برای مراحل بعدی خمش در هسته مرکزی الاستیک $-C_i \leq Z \leq C_i$ نیز معتبر هستند.

بر اساس پدیده کار سختی، لایه‌های ماورای تنش تسلیم اولیه، یعنی $C_i \leq Z \leq C_{i0}$ یا $-C_{i0} \leq Z \leq -C_i$ در مراحل بعدی دارای خمش مقادیر متفاوت تنش تسلیم $\bar{\sigma}_e$ خواهند بود. اگر بر اساس پدیده کار سختی برای هر لایه تنش تسلیم واقعی را در مراحل بعدی خمش متفاوت در نظر بگیریم، تحلیل مسأله بسیار مشکل می‌شود. بنابراین برای ساده‌سازی، تنش تسلیم مؤثر برای تمام لایه‌های ورق بر اساس مرحله (تعداد) خمش آن $\bar{\sigma}_e$ در نظر گرفته می‌شود (شکل (۶)). بنابراین معادلات (۱) و (۲) را می‌توان برای حالت الاستیک مراحل بعدی خمش به کار برد با این شرط که در تمامی آنها $\bar{\sigma}_e$ جایگزین σ_0 شود [۴].

هر کرنش طولی اضافه شده $\Delta\varepsilon$ که به صورت $\varepsilon - \varepsilon_0$ تعریف می‌شود برابر با کل کرنش اضافه‌ی منطقه تسلیم است. در اینجا، همانگونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، ε برابر است با کرنش مؤثر آنی به عنوان مقداری

۱- Spring Back

که در آن

$$K = \frac{H}{E} \left[\frac{3(1-\nu)}{2\sqrt{1-\nu+\nu^2}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (15)$$

$$g_0 = \frac{(1-\nu^2)\sigma_0}{E\sqrt{1-\nu+\nu^2}}$$

در این روابط $\Delta\varepsilon_i$ ماکزیمم کرنش طولی است که از

معادله (۱۲) برای R معلوم به دست می آید. در نهایت M_i

به صورت زیر محاسبه می شود:

$$M_i = b(A+B) \quad (16)$$

سپس با استفاده از رابطه زیر می توان میزان شعاع خمش

ورق پس از برگشت فنی را محاسبه کرد [۴]:

$$\frac{1}{r_f} + \frac{M_i}{EI} - \frac{1}{R} = 0 \quad (17)$$

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر فرایند

خمش چهارغلتکی، برنامه ای در نرم افزار MATLAB

آماده شد که بر اساس روابط تحلیلی استخراج شده، توانایی

پیش بینی رفتار ورق در این فرایند را داراست. دستگاه نورد

مورد استفاده در این تحلیل دارای طول مفید ۲۵۶۰ میلی متر

بوده و قطر غلتک فوقانی آن ۳۵۰ میلی متر است. قطر

غلتکای جانبی دستگاه نیز ۲۶۰ میلی متر است.

ماده مورد استفاده برای ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ است. برای

تعیین خواص مکانیکی این آلومینیوم چندین نمونه از این ورق

آماده شد و تحت آزمون کشش ساده قرار گرفت. شکل (۷)

نمودار تنش بر حسب کرنش را برای یکی از نمونه ها نشان می -

دهد. تست های کشش انجام شده بر روی آلومینیوم ۵۰۸۳ نشان

داد که استحکام تسلیم و استحکام نهایی این فلز به ترتیب ۲۳۱

و ۳۴۰ مگاپاسکال است. همچنین درصد ازدیاد طول این نوع

آلومینیوم ۲۳/۴٪ است.

در حالت گذار از آغاز تسلیم، مقاومت خمشی

ورق، M_i ، در مرحله تماس ورق با غلتک بالایی از رابطه

زیر به دست می آید:

$$M_i = b \left[\int_{elastic} \sigma_x z dz + \int_{elastoplastic} \sigma_x z dz \right] \quad (10)$$

برای منطقه الاستیک ورق، تنش طولی σ_x توسط رابطه

$$\sigma_x = \frac{E \varepsilon_x}{1-\nu^2}$$

نظر گرفتن فرضیات شرایط کرنش صفحه ای و رابطه

تنش - کرنش تجربی $\sigma = \sigma_0 + H\Delta\varepsilon^n$ برای حالت پس

از تسلیم، تنش طولی σ_x توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$\sigma_x = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} + \frac{2H\Delta\varepsilon^n}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

با در نظر گرفتن کل کرنش طولی اضافه شده در منطقه

الاستوپلاستیک $\Delta\varepsilon_x$ ، برای لایه هایی با $Z > C_i$ ، به عنوان

ترکیبی از کرنش الاستیک اضافه شده $\Delta\varepsilon_x^e$ و کرنش

پلاستیک اضافه شده $\Delta\varepsilon_x^p$ ، خواهیم داشت:

$$\frac{z}{R} = \frac{\sqrt{3}\Delta\varepsilon}{2} + \frac{H}{E} \left[\frac{3(1-\nu)}{2\sqrt{1-\nu+\nu^2}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \Delta\varepsilon^n \quad (12)$$

$$+ \frac{(1-\nu)^2 \sigma_0}{E\sqrt{1-\nu+\nu^2}}$$

با فرض اینکه $A = \int_{elastic} \sigma_x z dz$ و $B = \int_{elastoplastic} \sigma_x z dz$

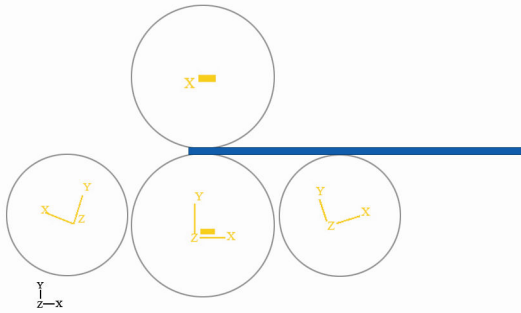
خواهیم داشت:

$$A = \frac{2R^2(1-\nu^2)^2 \sigma_0^3}{3E^2(1-\nu+\nu^2)^{3/2}} \quad (13)$$

و

$$B = 2R^2 \left[\frac{2HK^2 \Delta\varepsilon_1^{2n}}{3\sqrt{3}} + \frac{HK(n+1)\Delta\varepsilon_1^{2n+1}}{2n+1} + \frac{K}{\sqrt{3}} (K\sigma_0 + Hg_0)\Delta\varepsilon_1^{2n} + \frac{\sqrt{3}H\Delta\varepsilon_1^{n+2}}{2(n+2)} + \left(K\sigma_0 + \frac{Hg_0}{n+1} \right) \Delta\varepsilon_1^{n+1} + \frac{2K\sigma_0 g_0 \Delta\varepsilon_1^n}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}\sigma_0 \Delta\varepsilon_1^2}{4} + g_0 \sigma_0 \Delta\varepsilon_1 \right] \quad (14)$$

با توجه به عرض نسبتاً زیاد ورق، فرایند به صورت دوبعدی و کرنش صفحه‌ای مدل شد. غلتکهای شکل دهی نیز به صورت اجسام صلب دوبعدی مدل‌سازی شدند. دستگاه نورد چهار غلتکی دارای چهار غلتک‌های شکل دهی می‌باشد که در مدل در نظر گرفته شده دو عدد از این چهار غلتک در کناره‌ها قرار گرفته و عملاً هرزگرد می‌باشند. غلتکهای جانبی توانایی حرکتی مورب با زاویه ۷۰ و ۱۱۰ درجه نسبت به افق را دارند. شکل (۸) نمای کلی دستگاه نورد چهار غلتکی را نشان می‌دهد.

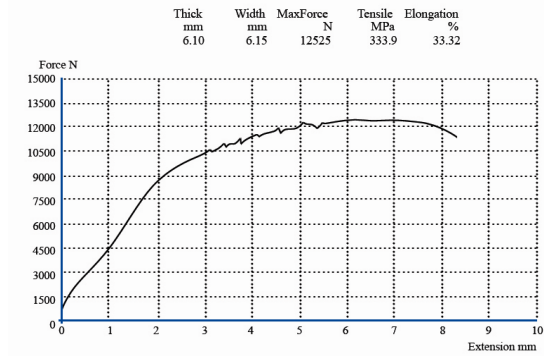


شکل (۸) نمای کلی دستگاه نورد چهار غلتکی.

المان مورد استفاده در این فرایند، المان CPE8 بوده که یک المان پیوسته کرنش صفحه‌ای است. به دلیل آنکه رتبه توابع شکل در این المان درجه دو بوده و این المان از نوع انتگرال‌گیری کامل است، پدیده ساعت شنی^۱ و قفل‌شدگی برشی^۲ رخ نمی‌دهد. برای تعیین اندازه شبکه‌بندی، آزمون همگرایی مش انجام و سائز بهینه المان در این فرایند تعیین شد. برای مدل‌سازی ورق نیز از یک جسم دو بعدی تغییر شکل‌پذیر استفاده شد. ضخامت ورق ۲۰ میلی‌متر بوده و عرض آن دو متر است (محاسبات بر اساس عرض ورق واحد انجام شده است). طول ورق نیز به صورتی در نظر گرفته شد که پس از فرایند خمش، قطر داخلی ورق به مقدار مورد نظر برسد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شکل (۹) نشان داده شده است. این شکل کانتور تنش فون مایز را بعد از خمش اولیه و قبل از نورد نشان می‌دهد.

۱- Hour-glassing

۲- Shear-locking



شکل (۷) نمودار تنش بر حسب کرنش برای یکی از نمونه‌های تست شده.

با توجه به نتایج این آزمایش‌ها، معادله (۱۱) بر روی این نمودار پردازش شد. n و H به شرح زیر به دست آمد:

$$H = 192.1 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$n = 0.3851$$

پس از تعیین پارامترهای ماده مورد استفاده، با استفاده از روش‌های تکرار می‌توان معادله (۱۲) را حل نمود و مقدار $\Delta \varepsilon$ را به دست آورد.

$$\Delta \varepsilon = 0.391 \quad (19)$$

پس از محاسبه $\Delta \varepsilon$ و با محاسبه پارامترهای معادلات (۱۳) تا (۱۵)، گشتاور مورد نیاز فرایند و میزان شعاع خمش پس از برگشت فنری از معادلات (۱۶) و (۱۷) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

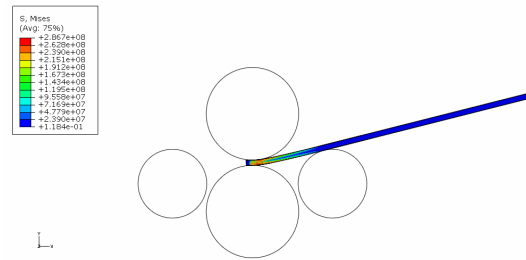
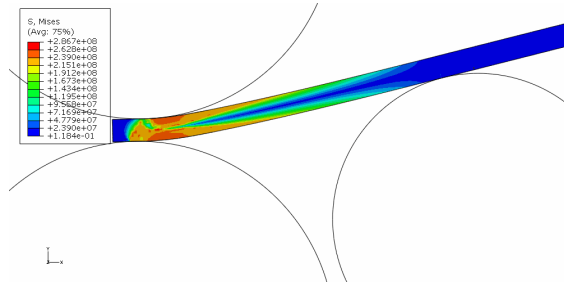
$$M = 59.18 \text{ kN.m} \quad (20)$$

$$r_f = 323/4410 \text{ mm} \quad (21)$$

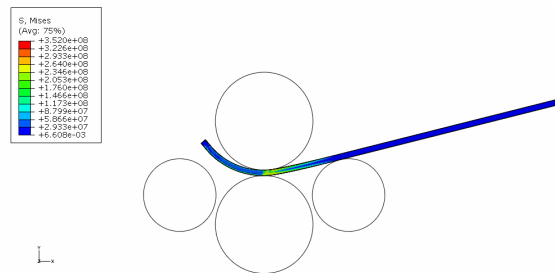
این محاسبات برای ورقی با عرض ۲ متر انجام گرفته است.

۳- شبیه‌سازی فرایند نورد چهار غلتکی

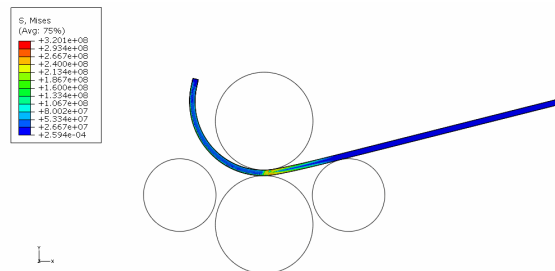
برای بررسی رفتار ورق در حین فرایند نورد چهار غلتکی، شبیه‌سازی‌هایی به روش اجزا محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. به دلیل وجود پدیده برگشت فنری در این فرایند و ضعف روش صریح در مدل‌سازی این پدیده، در این شبیه‌سازی از حل گر ضمنی استفاده شد. روش ضمنی از پایداری نسبتاً مناسبی برای مسائلی که دارای سطوح تماس ساده می‌باشند برخوردار است.



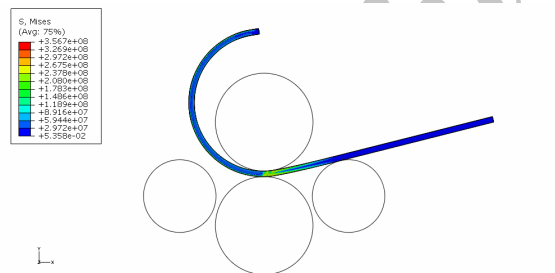
شکل (۹) کانتور تنش فون مایزس بعد از خمش اولیه و قبل از نورد (Pa).



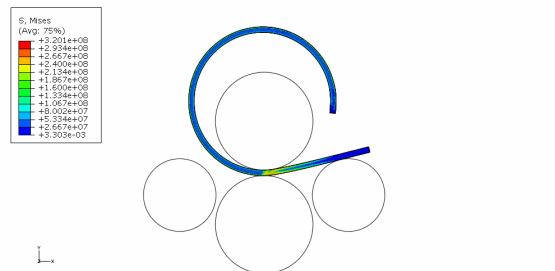
شکل های (۱۰) و (۱۱) نیز به ترتیب کانتور تنش فون مایزس و کرنش ماکزیمم را در مراحل مختلف نورد نشان می دهند.



در محاسبات تحلیلی میزان شعاع نورد نهایی برای ورقی به عرض ۲ متر پس از رخ دادن پدیده برگشت فنری برابر ۳۲۳/۴۴ میلی متر محاسبه شد. با تعریف کردن دو مسیر در روی گره های لبه داخلی و خارجی ورق نورد شده، محاسبه جابه جایی و استفاده از مشتقات این جابه جایی می توان شعاع انحنای تار خشی را محاسبه نمود که برابر با ۳۰۳/۶ میلی متر به دست آمد. در مقایسه با میزان شعاع حاصل از نتایج تست عملی که برابر با ۲۹۲/۴ mm می باشد، این خطا ناچیز است.



میزان گشتاور لازم جهت نورد کردن ورق در محاسبات تحلیلی مقدار ۵۹/۱۸ kN.m به دست آمد. با محاسبه نیروی وارد بر غلتک های جانبی توسط سلول اندازه گیری نیرو و ضرب نمودن در فاصله بازویی در آزمون عملی انجام شده، مقدار گشتاور ۶۵/۸ kN.m اندازه گیری شد که در حدود ۱۱ درصد بیشتر از مقدار گشتاور حاصل از مقادیر تحلیلی است.



میزان کرنش محاسبه شده با استفاده از نتایج تحلیلی برابر ۰/۰۳۹۱ است. با بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی بر روی قطعه، همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده میزان ماکزیمم کرنش محاسبه شده تقریباً برابر با ۵ درصد می باشد که این میزان کرنش با توجه به شکل شماره (۷) که در آن میزان کرنش در ناحیه تسلیم ۳۲ درصد می باشد، ناچیز است، بنابراین ترکی در روی قطعه کار رخ نمی دهد.

شکل (۱۰) کانتور تنش فون مایزس در مراحل مختلف نورد (Pa).



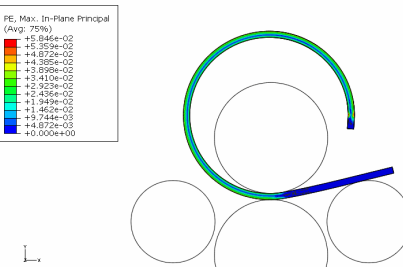
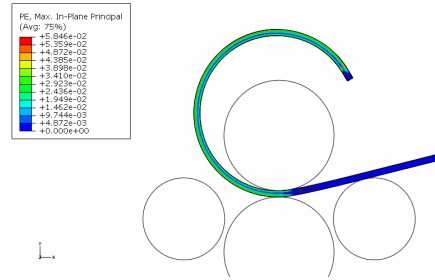
شکل (۱۲) نمونه‌های نورد شده در حین نورد و پس از آن.

آزمایشات انجام شده بر روی این نمونه‌ها نشان می‌دهد که ضخامت حدود ۰/۶ میلی‌متر تغییر پیدا کرده است. این کاهش ضخامت باعث اندکی افزایش طول در نمونه‌ها می‌شود که انتظار می‌رود در نمونه‌های با عرض ۲ متر این افزایش طول کاهش یابد.

برای بررسی آسیب‌های احتمالی به وجود آمده در ورق، آزمون‌های کنترل کیفی UT^۱ و PT^۲ نیز بر روی نمونه‌ها انجام شد و صحت کامل ورق تأیید شد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با محاسبه میزان برگشت فبری، مقدار گشاور مورد نیاز برای انجام فرایند نورد چهار غلتکی محاسبه شد و امکان ایجاد ترک در قطعه در حین کار مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا روابط تحلیلی حاکم بر تغییر شکل ورق در حین فرایند نورد چهار غلتکی استخراج شد. با در نظر گرفتن دو حالت تغییر شکل الاستیک و الاستوپلاستیک ورق، گشاور خمشی لازم برای انجام فرایند محاسبه شد. با استفاده از توزیع گشاور خمشی در طول ورق، شعاع خمش ورق پس از برگشت فبری نیز محاسبه شد. در ادامه با استفاده از روش اجزا محدود، فرایند نورد چهار غلتکی ورق آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که کرنش‌های به وجود آمده در ورق از حد بحرانی کمتر بوده و بنابراین ورق در حین فرایند دچار آسیب نخواهد شد. همچنین، این نتایج نشان



شکل (۱۱) کانتور کرنش ماکزیمم در مراحل مختلف نورد (Pa).

۴- آزمون عملی

چهار نمونه مجزا برای انجام آزمون‌های عملی مورد استفاده قرار گرفت. قطر خارجی نهایی قطعه پس از ماشین کاری باید ۵۳۳/۴ میلی‌متر باشد. با توجه به اضافه ماشین کاری سه میلی‌متری در هر دو طرف تار خنتی، قطر خارجی قطعه قبل از ماشین کاری باید ۵۳۹/۴ میلی‌متر باشد. برای محاسبه طول اولیه ورق‌ها بایستی طول تار خنتی را محاسبه کرد. قطر تار خنتی برابر است با:

$$D_{Nat} = 539/4 - 20 = 519/4 \text{ (mm)} \quad (22)$$

طول ورق اولیه جهت رسیدن به قطر مطلوب برابر است با:

$$L = 519/4 \pi = 1631/7 \text{ (mm)} \quad (23)$$

با توجه به طول محاسبه شده، چهار نمونه با عرض‌های متفاوت آماده شد و تحت فرایند نورد چهار غلتکی به شکل استوانه درآمد. شکل (۱۲) این نمونه‌ها را در حین فرایند و پس از آن نشان می‌دهد.

۱- Ultrasonic Test

۲- Liquid Penetrant Test

$\Delta \varepsilon_x^p$	گام کرنش پلاستیک طولی	می دهند که انجام این فرایند در یک مرحله امکان پذیر بوده و به
σ_x	تنش طولی در ورق	آنبیل کردن ورق در خلال فرایند نیاز نیست. همچنین شعاع
M_i	مقاومت خمشی ورق	خمش ورق پس از برگشت فنی در طول ورق محاسبه و با
r_f	شعاع خمش	مقدار تحلیلی آن مقایسه شد. در نهایت به منظور صحت گذاری بر
ε	کرنش مؤثر	نتایج تحلیلی و عددی به دست آمده در این تحقیق، فرایند نورد
ε_0	کرنش تسلیم اولیه	چهار غلتکی بر روی نمونه هایی از ورق آلومینیومی انجام گرفت
$\Delta \varepsilon_y^e$	گام کرنش الاستیک عرضی	و خروجی حاصله با نتایج تحلیلی و شبیه سازی مقایسه شد. نتایج
$\Delta \varepsilon_y^e$	گام کرنش پلاستیک عرضی	تست های UT و PT نشان می دهند که هیچگونه ترکی در حین
		فرایند در نمونه ها ایجاد نشده است که با نتایج تحلیلی و عددی
		به دست آمده مطابقت دارد.

تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه یک طرح پژوهشی است که با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر به انجام رسیده است. لذا از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر تشکر می شود.

مراجع

- [1] Gandhi A.H., Raval H.K., Analytical and empirical modeling of top roller position for three-roller cylindrical bending of plates and its experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, (1-3), 2008, pp. 268-278.
- [2] Gu X., Franzke M., Bambach M., Hirt G., Experimental and numerical investigation of grid sheet bending behavior in four-roll bending, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, (1), 2010, pp 303-306.
- [3] Feng Z., Champlaud H., Three-stage process for improving roll bending quality, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, (2), 2011, pp. 887-898.
- [4] Hua M., Sansome D.H., Baines K., Mathematical modeling of the internal bending moment at the top roll contact in multi-pass four-roll thin-plate bending, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, 1995, pp. 425-459.

نکته دیگر افزایش اندک طول نمونه در حین فرایند بود که علت آن نرم بودن آلومینیوم و کاهش ضخامت ورق در اثر نورد سرد است. با افزایش عرض ورق انتظار می رود که این افزایش طول کاهش یابد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهند که هر دو روش تحلیلی و عددی ابزاری مناسب برای پیش بینی رفتار ورق در حین فرایند نورد چهار غلتکی هستند و فرضیات ساده کننده مورد استفاده از دقت خوبی برخوردارند.

فهرست علائم

b	عرض ورق
ε_0	کرنش تسلیم اولیه در سیکل اول
ε_{et}	کرنش مطلق در سیکل اول
ε_t	کرنش مطلق در سیکل دوم
σ_z	تنش در جهت ضخامت ورق
a_0	شعاع خمش در لحظه تسلیم اولیه
R	شعاع خمش محلی صفحه خنثی در جهت طولی
ε_x	کرنش طولی کل
C_i	اندازه منطقه الاستیک در اولین سیکل خمش
C_{i0}	اندازه منطقه الاستیک در سیکل دوم خمش
$\bar{\sigma}_e$	تنش تسلیم
$\Delta \varepsilon_e^e$	گام کرنش الاستیک
$\Delta \varepsilon_e^p$	گام کرنش پلاستیک
$\Delta \varepsilon_x^e$	گام کرنش الاستیک طولی

- [5] Hua M. , Cole I.M., Baines K., A formulation for determining the single-pass mechanics of the continuous four-roll thin plate bending process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 67, 1997, pp. 189-194.
- [6] Hua M., Baines K., Cole I.M., Continuous four-roll plate bending: a production process for the manufacture of single seamed tubes of large and medium diameters, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, Issue 6, 1999, pp. 905-935.
- [7] Lee S. M., Shivpuri R., Investigation of two square-to-round multipass rolling sequences by the slab-finite-element method, *Int. J. Mach. Tools Mf.*, Vol. 32, 1992, pp. 315-327.
- [8] Zeng J., Liu Zh., Champlaud H., FEM dynamic simulation and analysis of the roll-bending process for forming a conical tube, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, Issue 1-3, 2008, pp. 330-343.
- [9] Brunet M., Mguil S., Pol P., Modeling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80, 1998, pp. 213-219
- [10] Li Zh., Yang H., Li H., Xu J., An accurate 3D-FE based radius prediction model for in-plane roll-bending of strip considering spread effects, *Computational Materials Science*, Vol. 50, Issue 2, 2010, pp. 666-677.
- [11] Weinmann K.J., Rosenberger A.H., Sanchez L.R., Turkovich B.F., The Bauschinger Effect of Sheet Metal Under Cyclic Reverse Pure Bending, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 37, Issue 1, 1988, pp. 289-293
- [12] Hemmerich E., Rolfe B., Hodgson P.D., Weiss M., The effect of pre-strain on the material behaviour and the Bauschinger effect in the bending of hot rolled and aged steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, Issue 9, 2011, pp. 3302-3309.