

تحلیل کرانه بالایی فرآیند نورد نامتقارن ورق

هنگامه رضایی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، rezaie.hengameh94@gmail.com

حشمت اله حقیقت*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، hhaghighat@razi.ac.ir

چکیده

در این مقاله فرآیند نورد نامتقارن ورق‌های فلزی به روش کرانه بالایی تحلیل شده است. در تحلیل، قوس‌های تماس غلتک‌های بالا و پایین با ورق، با وترهای نظیر آن‌ها جایگزین شده‌اند. در مدل تغییرشکل پیشنهادی، که نسبت به مدل‌های ارایه شده توسط سایر محققان از پیچیدگی ریاضی کمتری برخوردار است، ماده در حال تغییرشکل به دو قسمت بالایی و پایینی که توسط یک خط موازی با خط میانی ورق تغییرشکل یافته از هم جدا شده اند، تقسیم شده است. محل‌های تقاطع امتداد وترهای غلتک‌ها با خط مذکور، به عنوان مراکز دستگاه‌های مختصات استوانه‌ای تعیین شده‌اند. هر قسمت به سه ناحیه تغییرشکل تقسیم و بر اساس میدان سرعت ارایه شده توان‌های برشی، اصطکاکی، تغییرشکل داخلی و توان کل محاسبه شده‌اند. توان کل نسبت به موقعیت مرز مشترک بین دو قسمت بالایی و پایینی و موقعیت مکان‌های نقطه‌های خنثی روی غلتک‌ها بهینه شده است. نتایج تحلیل شامل گشتاور لازم، نیروی نورد و شعاع انحنای ورق خروجی، با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی سایر محققان و همچنین با نتایج شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار دیفرم مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ها نشان داده شد که در پایان نیز اثر عوامل نامتقارنی فرآیند بر گشتاور لازم، نیروی نورد و شعاع انحنای ورق تغییرشکل یافته بررسی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نورد نامتقارن ورق، کرنش صفحه‌ای، کرانه بالایی، گشتاور نورد، شعاع انحنای، شبیه سازی.

Upper Bound Analysis of Asymmetric Sheet Rolling Process

H. Rezaie

Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

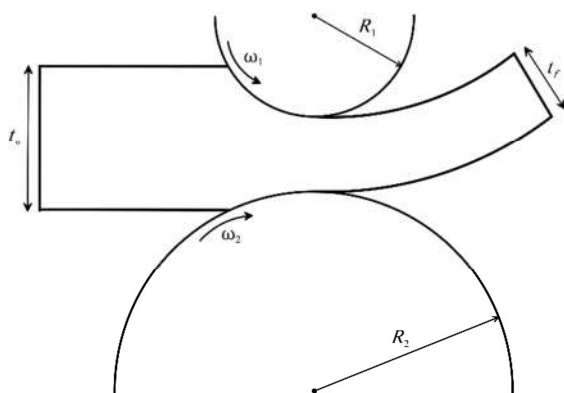
H. Haghighat

Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Abstract

In this paper, asymmetric rolling process of metal sheets is investigated by method of upper bound. In analyses, the contact arches of the rolls are replaced by their chords. The material under deformation is divided into upper and lower regions separated by a line parallel to the midline of the sheet at exit. The intersection points of the chords with the mentioned line, boundary of the upper and lower regions, are selected as the origins of the cylindrical coordinate systems. Each region is divided into three deformation zones and based on the proposed velocity field presented, shear, friction, internal deformation and the total power terms are calculated. The total power is optimized with respect to the positions of the origins of the cylindrical coordinates systems and the positions of the neutral points. The results of the analysis including the required torque, rolling force and the curvature of the sheet at the exit, are compared with the analytical and experimental results of other researchers, as well as numerical simulation results obtained from Deform software. Finally, the effects of the asymmetric factors of the process, on the required torque, the rolling force and the curvature of the deformed sheet have been investigated.

Keywords : Asymmetric sheet rolling, Plane strain, Upper bound, Rolling torque, Curvature radius, Simulation.



شکل ۱- فرآیند نورد نامتقارن ورق

۱- مقدمه

طی فرآیند نورد، ضخامت ورق فلز با عبور از فضای بین دو غلتک، کاهش می‌یابد. محورهای غلتک‌ها با هم موازی بوده و در خلاف جهت هم دوران می‌نمایند. در فرآیند نورد نامتقارن (نشان داده شده در شکل ۱) شعاع‌های غلتک‌ها، سرعت محیطی آن‌ها یا شرایط اصطکاکی بین غلتک‌های بالایی و پایینی با ورق فلز، ممکن است یکسان نباشند. مهم‌ترین مزیت‌های این فرآیند نسبت به حالت متقارن، کاهش گشتاور لازم و همچنین کاهش نیروی عمودی بین غلتک‌ها و قطعه و ریز دانه شدن ورق خروجی می‌باشد. در این فرآیند اطلاع از میزان گشتاور لازم، نیروی جدا کننده غلتک‌ها و شعاع انحنای ورق تغییرشکل داده شده دارای اهمیت است. تا کنون تحقیقات زیادی درباره این فرآیند توسط محققان مختلف انجام شده است. دوه‌رست و همکاران [۱] فرآیند نورد نامتقارن را به روش تحلیلی و تجربی بررسی کردند.

هوانگ و همکاران [۲] با ارایه یک مدل ریاضی برای نورد نامتقارن ورق با استفاده از تابع جریان و روش کرانه بالایی، رفتار تغییرشکل پلاستیک ورق را بررسی کردند.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hhaghighat@razi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۶

گائو و همکاران [۳] تاثیر ضریب اصطکاک و تغییر شکل برشی را در نورد نامتقارن بررسی کردند. سلیمی و کدخدایی [۴] غیریکنواختی تنش‌های برشی و تنش‌های قائم را در مدل خود در نظر گرفتند. کاوالک [۵] نقش شرایط متفاوت عدم تقارن را بر فشار وارد بر غلتک‌ها با انجام آزمایش بررسی کرد. اکبری موسوی و همکاران [۶] اثر نسبت سرعت غلتک‌ها را بر توزیع تنش و انحنای ورق بررسی کردند. گودور و همکاران [۷] یک مدل برای تخمین ضریب اصطکاک در نورد نامتقارن ارائه کردند. ژانگ و همکاران [۸] یک راه حل تحلیلی بر اساس روش تعادل نیروها به منظور محاسبه نیرو و گشتاور لازم برای تغییر شکل ورق، در فرآیند نورد نامتقارن ارائه دادند. قوامی زاده و همکاران [۹] به تحلیل نورد نامتقارن ورق پرداختند و انحنای ورق خروجی را بررسی کردند. قوامی زاده و همکاران [۱۰، ۱۱] توزیع تنش‌های برشی و قائم را غیریکنواخت فرض کردند و مدل اصطکاک را ترکیبی از اصطکاک چسبنده و کولمب در نظر گرفتند. پارک [۱۲] با مدل المان محدود صلب پلاستیک، حد بالای نسبت سرعت غلتک‌ها را به دست آورد. با توجه به تنش برشی غیریکنواخت و تنش قائم یکنواخت، پرویزی و افروز [۱۳، ۱۴] دو مدل را برای نورد ورق‌های پوشش دار جدا از هم و متصل به هم ارائه دادند. ابوترابی و همکاران [۱۵] اثر جابه جایی افقی غلتک‌ها را بررسی کردند. آن‌ها ناحیه تغییر شکل را به چهار قسمت تقسیم و نیروی وارد به غلتک‌ها، گشتاور و انحنای ورق خروجی را محاسبه کردند. سان و همکاران [۱۶] یک مدل ریاضی براساس روش تعادل نیروها برای تحلیل نورد نامتقارن میله ارائه کردند که در آن تنش غیریکنواخت، کرنش‌های برشی و قائم غیریکنواخت در تحلیل در نظر گرفته شده بود. رازانی و همکاران [۱۷] با در نظر گرفتن تنش برشی و کارسختی ورق و با استفاده از یک مدل ویسکو-پلاستیک فرآیند نورد نامتقارن را تحلیل کردند. ونگ و همکاران [۱۸] یک مدل تحلیلی بر اساس روش تعادل نیروها برای نورد سرد نامتقارن پیشنهاد دادند و اثرات شرایط مختلف نورد نامتقارن را بر فشار وارد بر غلتک‌ها، نیروی وارد به غلتک‌ها و گشتاور مورد نیاز فرآیند بررسی کردند. وانگ و همکاران به مقایسه هندسه ناحیه تغییر شکل در فرآیند نورد نامتقارن ورق و تحلیل این فرآیند به روش تعادل نیروها پرداختند [۱۹].

این مقاله به تحلیل کرانه بالایی فرآیند نورد نامتقارن ورق فلزی می‌پردازد. یک مدل تغییر شکل جدید که فرمولبندی ریاضی آن نسبت به مدل‌های ارائه شده توسط سایر محققان از پیچیدگی کمتری برخوردار است، ارائه شده و بر اساس آن، میدان سرعت، نرخ کرنش‌ها و توان کل محاسبه و بهینه شده است. صحت نتایج تحلیل شامل گشتاور و نیروی وارد به غلتک‌ها با نتایج تحلیلی و آزمایشی سایر محققان و همچنین با نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی شده‌اند.

۲- تحلیل کرانه بالایی فرآیند نورد نامتقارن

نظریه کرانه بالایی بیان می‌کند که در میان تمامی میدان‌های نرخ کرنش، تنها میدان نرخ کرنشی قابل قبول است که عبارت زیر را حداقل کند [20]:

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \left(\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{1/2} dV + \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta v| dS + \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta v| dS \quad (1)$$

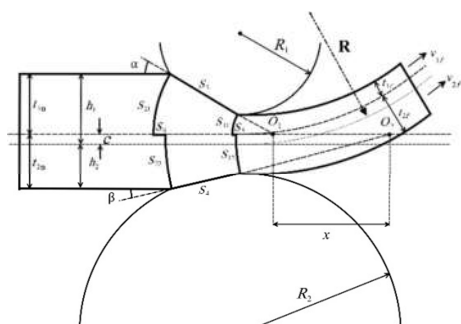
عبارت J^* حد بالایی توان را محاسبه می‌کند. عبارت اول در سمت

راست رابطه (۱) توان داخلی تغییر شکل و عبارت دوم توان سطوح ناپیوستگی سرعت و عبارت سوم، توان اصطکاکی است. σ_0 تنش سیلان متوسط ماده، $\dot{\epsilon}_{ij}$ نرخ کرنش، Δv مقدار سرعت نسبی روی سطوح ناپیوستگی سرعت و سطوح اصطکاکی، m ثابت اصطکاک برشی، V حجم ناحیه تغییر شکل پلاستیک، S_f و S_v به ترتیب مساحت سطوح ناپیوستگی سرعت و اصطکاکی است. در تحلیل کرانه بالایی فرآیند نورد نامتقارن، فرض‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- ۱- فرآیند کرنش صفحه ای است.
- ۲- ماده صلب-پلاستیک است.
- ۳- غلتک‌ها صلب هستند.
- ۴- ورق ورودی به صورت افقی وارد فضای بین دو غلتک می‌شود.
- ۵- ثابت اصطکاک و سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها در طول فرآیند ثابت می‌باشند.

۲-۱- ناحیه‌های تغییر شکل

مدل تغییر شکل برای تحلیل فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- ناحیه‌های تغییر شکل در فرآیند نورد نامتقارن ورق

همانگونه که نشان داده شده، ورق ورودی با ضخامت t_0 و به صورت افقی وارد فضای بین دو غلتک شده و پس از تغییر شکل با ضخامت t_f از فضای بین غلتک‌ها خارج می‌شود. شعاع غلتک بالایی R_1 و شعاع غلتک پایین R_2 می‌باشد. ورق ورودی با سرعت v_1 وارد ناحیه تغییر شکل شده و سرعت قسمت‌های بالا و پایین ورق خروجی پس از انجام فرآیند به ترتیب v_{2f} و v_{1f} می‌باشند. به دلیل نامتقارن بودن فرآیند، این دو سرعت با هم متفاوت بوده و ورق فلز پس از خروج از فضای بین دو غلتک به سمت بالا یا پایین انحنای پیدا می‌کند. برای تعیین نواحی تغییر شکل، نقاط ابتدا و انتهای تماس ورق با غلتک‌ها را به یکدیگر متصل و امتداد داده تا خطی را که با فاصله e از خط تقارن ورق در خروجی رسم شده را قطع نمایند. نقاط تقاطع در شکل ۲ با نقطه‌های O_1 و O_2 نشان داده شده‌اند. این خطوط با امتداد افقی، به ترتیب زاویه‌های α و β می‌سازند که به ترتیب از رابطه‌های (۲) و (۳) به دست می‌آیند:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{t_{10} - t_{1f}}{\sqrt{(t_{10} - t_{1f})(2R_1 - t_{10} + t_{1f})}} \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{t_{20} - t_{2f}}{\sqrt{(t_{20} - t_{2f})(2R_2 - t_{20} + t_{2f})}} \quad (3)$$

با رابطه (۱۴) مشخص می‌شود:

$$dQ = \dot{U}_{r1} r d\theta \quad (14)$$

با برابر قرار دادن رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) میدان سرعت شعاعی در قسمت بالایی ورق به دست می‌آید.

$$\dot{U}_{r1} = -v_1 \cos \theta \frac{r_{10}}{r} \quad (15)$$

با نوشتن رابطه‌های مشابه برای قسمت پایین، میدان سرعت شعاعی برای قسمت پایین ورق با رابطه (۱۶) بیان شده است:

$$\dot{U}_{r2} = -v_1 \cos \theta \frac{r_{20}}{r} \quad (16)$$

معادلات نرخ کرنش در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (۱۷)

می‌باشند:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{U}_\theta}{\partial \theta} + \frac{\dot{U}_r}{r} \\ \dot{\epsilon}_{zz} &= \frac{\partial \dot{U}_z}{\partial z} \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{U}_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{U}_r}{\partial \theta} - \frac{\dot{U}_\theta}{r} \right) \\ \dot{\epsilon}_{\theta z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{U}_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{U}_z}{\partial \theta} \right) \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{U}_r}{\partial z} + \frac{\partial \dot{U}_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

با توجه به مولفه شعاعی سرعت، رابطه‌های (۱۰) و (۱۷) و شرایط مرزی می‌توان مولفه محیطی سرعت را محاسبه کرد. مولفه سرعت محیطی و مولفه سرعت در راستای عرضی در ناحیه تغییرشکل به ترتیب با روابط (۱۸) و (۱۹) تعیین می‌شوند:

$$\dot{U}_\theta = 0 \quad (18)$$

$$\dot{U}_z = 0 \quad (19)$$

بنابراین میدان سرعت، در ناحیه‌های تغییرشکل به ترتیب در قسمت‌های بالا و پایین به صورت رابطه (۲۰) می‌باشند.

$$\dot{U}_{r1} = -v_1 \cos \theta \frac{r_{10}}{r}, \dot{U}_{z1} = \dot{U}_{\theta 1} = 0 \quad (20)$$

$$\dot{U}_{r2} = -v_1 \cos \theta \frac{r_{20}}{r}, \dot{U}_{z2} = \dot{U}_{\theta 2} = 0$$

با قرار دادن رابطه‌های میدان سرعت در روابط (۱۷) نرخ کرنش‌ها در قسمت‌های بالا و پایین به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr1} &= -\dot{\epsilon}_{\theta\theta 1} = v_1 \cos \theta \frac{r_{10}}{r^2} \\ \dot{\epsilon}_{r\theta 1} &= v_1 \frac{r_{10}}{2r^2} \sin \theta \\ \dot{\epsilon}_{zz1} &= \dot{\epsilon}_{rz1} = \dot{\epsilon}_{\theta z1} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

۳-۲- محاسبه توان‌ها

توان کلی شکل‌دهی در این فرآیند شامل سه قسمت است:

الف) توان تغییرشکل داخلی

ب) توان مصرفی برشی روی سطوح ناپیوستگی سرعت

ج) توان مصرفی اصطکاکی روی سطوح اصطکاکی

۴-۲- توان تغییرشکل داخلی

توان تغییرشکل داخلی از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV \quad (22)$$

ضخامت‌های قسمت بالایی ورق قبل و پس از تغییرشکل، به

ترتیب t_{10} و t_{1f} و ضخامت‌های قسمت پایینی ورق قبل و پس از فرآیند به ترتیب t_{20} و t_{2f} می‌باشند. مقدار پارامتر c می‌تواند منفی، مثبت بوده و در حالت نورد متقارن مقدار آن صفر و مرکزهای مختصات O_1 و O_2 منطبق بر هم خواهند بود. فاصله شعاعی نقطه O_1 تا نقطه شروع تماس ورق با غلتک بالا r_{10} و تا نقطه پایان تماس r_{1f} و به طور مشابه فاصله شعاعی نقطه O_2 تا نقطه شروع تماس با غلتک پایین r_{20} و تا نقطه پایان تماس r_{2f} نام‌گذاری شده‌اند.

به مرکز O_1 و شعاع‌های r_{10} و r_{1f} دوکمان و به مرکز O_2 و شعاع‌های r_{20} و r_{2f} دو کمان دایره‌ای دیگر رسم شده‌اند. با توجه به شکل ۲ داریم:

$$\eta_{1f} = \frac{t_{1f}}{\sin \alpha} \quad (4)$$

$$\eta_{10} = \frac{t_{10}}{\sin \alpha} \quad (5)$$

$$r_{2f} = \frac{t_{2f}}{\sin \beta} \quad (6)$$

$$r_{20} = \frac{t_{20}}{\sin \beta} \quad (7)$$

$$h_1 = \frac{t_0 R_2 - \frac{t_f}{2} (R_2 - R_1) - \frac{t_0}{2} (t_0 - t_f)}{R_1 + R_2 - t_0 + t_f} \quad (8)$$

$$h_2 = \frac{t_0 R_1 + \frac{t_f}{2} (R_2 - R_1) - \frac{t_0}{2} (t_0 - t_f)}{R_1 + R_2 - t_0 + t_f} \quad (9)$$

۲-۲- میدان سرعت مجاز و نرخ کرنش

در روش کرانه بالایی انتخاب میدان سرعت، اهمیت بسیار زیادی دارد و نتایج نهایی حاصل از تحلیل بسیار وابسته به میدان سرعت می‌باشند. هرچه میدان سرعت به واقعیت نزدیک‌تر باشد، نتایج دقت بالاتری خواهند داشت. مطابق مدل تغییرشکل نشان داده شده در شکل ۲، هر کدام از قسمت‌های بالایی و پایینی دارای سه ناحیه تغییرشکل می‌باشند. سرعت ماده در ناحیه‌های ورودی و خروجی ثابت بوده و تغییرات آن در ناحیه‌های دوم تغییرشکل اتفاق می‌افتد. میدان سرعت در هر ناحیه باید شرط تراکم ناپذیری و نیز شرایط مرزی را برآورد نماید. قانون تراکم ناپذیری در دستگاه مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (۱۰) است:

$$\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{zz} = 0 \quad (10)$$

رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) با توجه به برابری حجم ماده در ورود و

خروج به دست می‌آیند:

$$v_{1f} = v_1 \frac{t_{10}}{t_{1f}} \quad (11)$$

$$v_{2f} = v_1 \frac{t_{20}}{t_{2f}} \quad (12)$$

با برابر قراردادن حجم ماده ورودی به ناحیه تغییرشکل و حجم المانی از ماده در ناحیه تغییرشکل میدان سرعت در ناحیه تغییرشکل به دست می‌آید. رابطه (۱۳) المان دبی ورق ورودی می‌باشد:

$$dQ = -v_1 \cos \theta \eta_{10} d\theta \quad (13)$$

در ناحیه تغییرشکل المانی کوچک در دستگاه مختصات استوانه‌ای

به شعاع r و زاویه $d\theta$ در نظر گرفته و حجم عبور کننده از این سطح

که σ_0 تنش سیلان می‌باشد. با توجه به کرنش صفحه‌ای بودن فرآیند، رابطه (۲۲) به صورت رابطه (۲۳) می‌شود:

$$\dot{W}_i = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{\eta_f}^{\eta_0} \int_0^{\alpha} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\pi}^2 + \dot{\epsilon}_{r0}^2} r d\theta dr \quad (23)$$

با قرار دادن رابطه (۲۱) در رابطه (۲۳)، توان تغییر شکل برای قسمت‌های بالا و پایین مطابق روابط (۲۴) و (۲۵) به دست می‌آیند:

$$\dot{W}_{i1} = \frac{2\sigma_0 \eta_0 v_1}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{\eta_0}{\eta_f}\right) \int_0^{\alpha} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta} d\theta \quad (24)$$

$$\dot{W}_{i2} = \frac{2\sigma_0 r_{20} v_1}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{r_{20}}{r_{2f}}\right) \int_0^{\beta} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta} d\theta \quad (25)$$

۲-۵- توان برشی

مطابق مدل تغییر شکل نشان داده شده در شکل ۲، ششی سطح ناپیوستگی سرعت یعنی سطوح $S_{11}, S_{12}, S_4, S_5, S_{21}, S_{22}$ وجود دارند و توان‌های برشی روی این سطوح با رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_s = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_s |\Delta v| ds \quad (26)$$

توان برشی در سطوح ناپیوستگی مذکور به صورت زیر تعیین می‌شوند:

سطح S_{11} :

$$\dot{W}_{s11} = \frac{\sigma_0 v_{1f} \eta_f}{\sqrt{3}} (1 - \cos \alpha) \quad (27)$$

سطح S_{21} :

$$\dot{W}_{s21} = \frac{\sigma_0 v_1 \eta_0}{\sqrt{3}} (1 - \cos \alpha) \quad (28)$$

سطح S_{12} :

$$\dot{W}_{s12} = \frac{\sigma_0 v_{2f} r_{2f}}{\sqrt{3}} (1 - \cos \beta) \quad (29)$$

سطح S_{22} :

$$\dot{W}_{s22} = \frac{\sigma_0 v_1 r_{20}}{\sqrt{3}} (1 - \cos \beta) \quad (30)$$

سطح S_5 :

$$|\Delta v| = |\dot{U}_{r2} + v_{1f}| = v_1 \left| -\frac{r_{20}}{r} + \frac{t_{10}}{t_{1f}} \right| \quad (31)$$

$$\dot{W}_{s5} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{r_{2f}-X}^{\eta_f} v_1 \left| -\frac{r_{20}}{r} + \frac{t_{10}}{t_{1f}} \right| ds$$

که پارامتر X (نشان داده شده در شکل ۲) فاصله بین دو مرکز مختصات بوده و از رابطه (۳۲) به دست می‌آید:

$$X = r_{2f} \cos \beta - r_{1f} \cos \alpha \quad (32)$$

سطح S_6 :

$$|\Delta v| = |\dot{U}_{r1} + v_1| = v_1 \left| -\frac{\eta_0}{r} + 1 \right| \quad (33)$$

$$\dot{W}_{s6} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{r_{20}}^{\eta_0+X} v_1 \left| -\frac{\eta_0}{r} + 1 \right| ds$$

۲-۶- توان اصطکاکی

روی سطوح مشترک بین غلتک‌ها و ورق، سطوح S_3 و S_4 توان اصطکاکی از رابطه (۳۴) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_f = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} m \int_s |\Delta v| ds \quad (34)$$

سطح اصطکاکی S_3 :

$$|\Delta v| = |\dot{U}_{r1} + R_1 \omega_1| = \left| -v_1 \cos \alpha \frac{\eta_0}{r} + R_1 \omega_1 \right| \quad (35)$$

$$\dot{W}_{s3} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} m_1 v_1 \eta_0 \int_{\eta_f}^{\eta_0} \left| -\cos \alpha \frac{1}{r} + \frac{R_1 \omega_1}{v_1 \eta_0} \right| dr$$

سطح اصطکاکی S_4 :

$$|\Delta v| = |\dot{U}_{r2} + R_2 \omega_2| = \left| -v_1 \cos \beta \frac{r_{20}}{r} + R_2 \omega_2 \right| \quad (36)$$

$$\dot{W}_{s4} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} m_2 v_1 r_{20} \int_{r_{2f}}^{r_{20}} \left| -\cos \beta \frac{1}{r} + \frac{R_2 \omega_2}{v_1 r_{20}} \right| dr$$

در نقطه خنثی، سرعت ورق و غلتک با هم مساوی می‌شوند. بنابراین در این نقطه، اختلاف سرعت بین ورق و غلتک صفر می‌باشد. با صفر قرار دادن رابطه اختلاف سرعت‌ها، موقعیت شعاعی نقاط خنثی بالا و پایین را به ترتیب مطابق رابطه (۳۷) می‌توان تعیین کرد:

$$|\dot{U}_{r1}|_{\theta=\alpha} + R_1 \omega_1 = \left| -v_1 \cos \alpha \frac{\eta_0}{r_{1n}} + R_1 \omega_1 \right| = 0 \quad (37)$$

$$\eta_{1n} = v_1 \cos \alpha \frac{\eta_0}{R_1 \omega_1}$$

$$r_{2n} = v_1 \cos \beta \frac{r_{20}}{R_2 \omega_2}$$

۲-۷- گشتاور و نیروی عمودی وارد به غلتک‌ها

حد بالایی توان، از جمع توان‌های داخلی، برشی و اصطکاکی تعیین می‌شود:

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (38)$$

توان کل نسبت به پارامتر e و مکان‌های نقطه‌های خنثی بالایی و پایینی باید بهینه شود. گشتاور مورد نیاز فرآیند برابر است با:

$$T = \frac{J^*}{\omega} \quad (39)$$

در فرآیند نورد نامتقارن به دلیل مساوی نبودن گشتاور اعمالی به دو غلتک و همچنین تفاوت در طول‌های تماس غلتک و ورق در قسمت‌های بالایی و پایینی، L_1 و L_2 نشان داده شده در شکل ۳، نیروهای وارد به غلتک‌های بالا و پایین متفاوت است. با رابطه (۴۰)، پس از محاسبه گشتاور، مقدار نیروهای وارد به غلتک‌ها تعیین می‌شوند:

$$F_1 = \frac{T_1}{L_1}, F_2 = \frac{T_2}{L_2} \quad (40)$$

که F_1 و F_2 به ترتیب نیروهای عمودی وارد شده به غلتک‌های بالا و پایین می‌باشند. طول‌های تماس L_1 و L_2 و درصد کاهش ضخامت ورق در قسمت‌های بالا و پایین r_1 ، r_2 مطابق روابط (۴۱) و (۴۲) می‌باشند:

$$\eta = 1 - \frac{t_{1f}}{t_{10}}, r_2 = 1 - \frac{t_{2f}}{t_{20}} \quad (41)$$

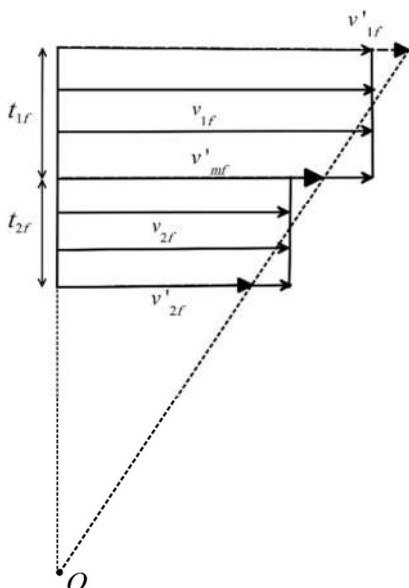
$$L_1 = \sqrt{2R_1 t_{10} \eta}, L_2 = \sqrt{2R_2 t_{20} r_2} \quad (42)$$

در تحلیل، میانگین گشتاور و طول تماس قسمت‌های بالا و پایین در نظر گرفته شده و از این مقادیر برای محاسبه نیروی عمودی وارد به غلتک‌ها استفاده شده است:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}, L = \frac{L_1 + L_2}{2}, F = \frac{T}{L} \quad (43)$$

۲-۸- محاسبه فاصله افقی نقاط خنثی

فاصله افقی نقاط خنثی بالایی و پایینی، به ترتیب X_{2n} و X_{1n}



شکل ۴- توزیع سرعت خطی معادل برای ورق تغییر شکل یافته

با نوشتن نسبت سرعت ورق در قسمت بالایی و پایینی، شعاع انحنای ورق در قسمت پایینی با توجه به شکل ۵ برابر است با:

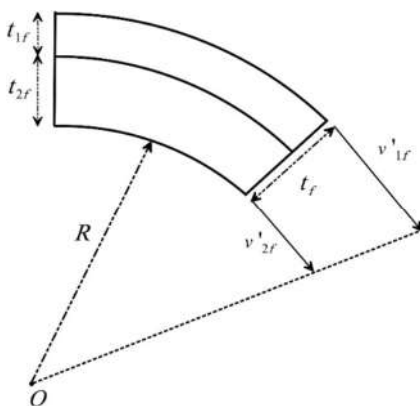
$$\frac{2v_{2f} - v_{mf}'}{2v_{1f} - v_{mf}'} = \frac{R}{R + t_f} \quad (46)$$

که v_{mf}' از رابطه (۴۷) به دست می‌آید:

$$v_{mf}' = v_{1f} + v_{2f} - \left(\frac{v_{1f}t_{1f} + v_{2f}t_{2f}}{t_f} \right) \quad (47)$$

بعد از انجام محاسبات مشابه برای حالتی که ورق به سمت بالا انحنای می‌یابد، رابطه (۴۸) برای محاسبه شعاع انحنای ورق به دست می‌آید:

$$\frac{2v_{1f} - v_{mf}'}{2v_{2f} - v_{mf}'} = \frac{R}{R + t_f} \quad (48)$$



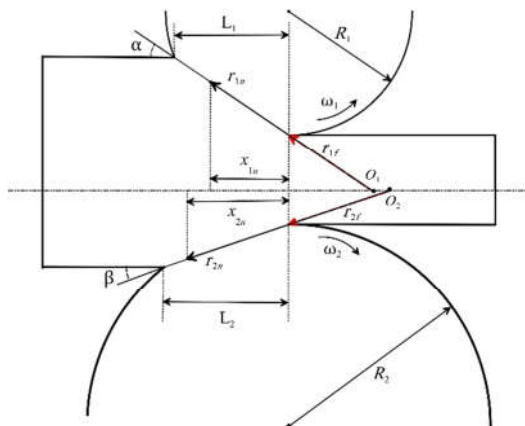
شکل ۵- شعاع انحنای ورق خروجی

۴- شبیه سازی اجزا محدود

نرم افزار Deform، نرم افزاری بر پایه روش المان محدود است که به منظور شبیه سازی فرآیندهای مختلف شکل دهی طراحی گردیده است.

بوده و با توجه به شکل ۳ از رابطه (۴۴) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_{1n} &= (r_{1n} - r_{1f}) \cos \alpha \\ x_{2n} &= (r_{2n} - r_{2f}) \cos \beta \end{aligned} \quad (44)$$

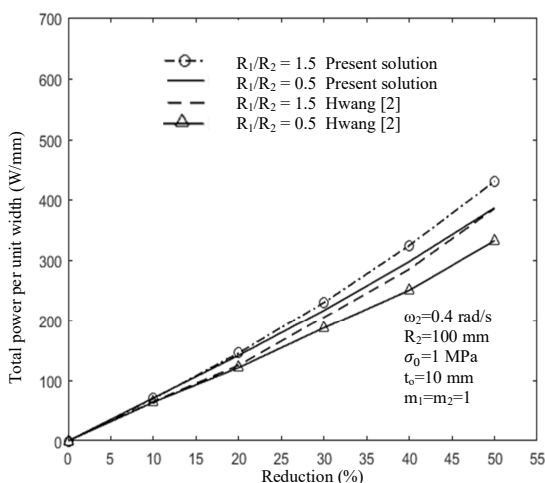


شکل ۳- موقعیت افقی نقطه خنثی غلتک بالایی و پایینی

۳- محاسبه شعاع انحنای ورق خروجی

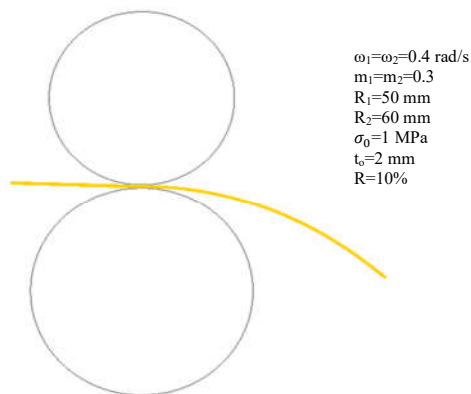
برای محاسبه انحنای ورق علاوه بر فرض کرنش صفحه‌ای، فرض شده که سرعت ورق خروجی در امتداد ضخامت ورق به صورت خطی تغییر می‌کند. تا بتوان شعاع مذکور را بر مبنای یک حرکت دورانی ساده تعیین کرد. همچنین اگر فرض شود ورق خروجی به صورت یک جسم صلب دارای حرکت دورانی با مرکز دوران منطبق بر مرکز انحنای باشد، حرکت دورانی آن را می‌توان با دوران یک رینگ حول مرکز انحنای مدل کرد و سرعت هر نقطه از ورق وابسته به موقعیت شعاعی آن، با سرعت زاویه‌ای ثابت در نظر گرفت. در این صورت شعاع خط مرکزی ورق خروجی را می‌توان به عنوان شعاع انحنای ورق تغییر شکل یافته در نظر گرفت. در چنین شرایطی، سرعت محیطی ورق خروجی در امتداد ضخامت دارای تغییرات خطی است. مطابق شکل ۴ برای حالتی که انحنای ورق به سمت پایین باشد، برای تعیین توزیع سرعت خطی معادل، از مساوی بودن دبی ماده خروجی استفاده شده است. در حالت توزیع خطی، سرعت لبه بالایی v_{1f}' و لایه‌ای که با فاصله e از خط تقارن ورق در خروجی مشخص شده v_{mf}' و سرعت لبه پایینی ورق، v_{2f}' نام گذاری شده‌اند. قابل ذکر است که با عمل خطی سازی سرعت ورق در خروجی، v_{mf}' سرعت مرز بین دو نیمه بالایی و پایینی ورق می‌باشد. رابطه (۴۵) با توجه به معادل بودن دبی ماده خروجی برای دو حالت، نوشته شده است:

$$\begin{aligned} v_{1f}t_{1f} &= \frac{v_{1f}' + v_{mf}'}{2} t_{1f} \\ v_{2f}t_{2f} &= \frac{v_{2f}' + v_{mf}'}{2} t_{2f} \\ v_{1f}t_{1f} + v_{2f}t_{2f} &= \frac{v_{1f}' + v_{2f}'}{2} t_f \end{aligned} \quad (45)$$



شکل ۶- توان کل بر حسب درصد کاهش ضخامت و مقایسه آن با نتایج مدل هوانگ [۲]

به کمک نرم افزار المان محدود Deform، فرآیند نورد نامتقارن برای هر سه حالت عدم تقارن شامل یکسان نبودن شعاع‌های غلتک‌های بالا و پایین، تفاوت در سرعت‌های زاویه‌ای غلتک‌ها و یکسان نبودن شرایط اصطکاکی، شبیه‌سازی شده است. شکل ۷ ورق بعد از انجام فرآیند برای حالتی که شعاع‌های غلتک‌های بالا و پایین برابر نیستند نشان داده شده است. شعاع غلتک پایین بزرگتر از شعاع غلتک بالا بوده و سایر شرایط فرآیند در بالا و پایین یکسان است. مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که ورق به سمت پایین انحنا یافته است.



شکل ۷- ورق در حال تغییر شکل

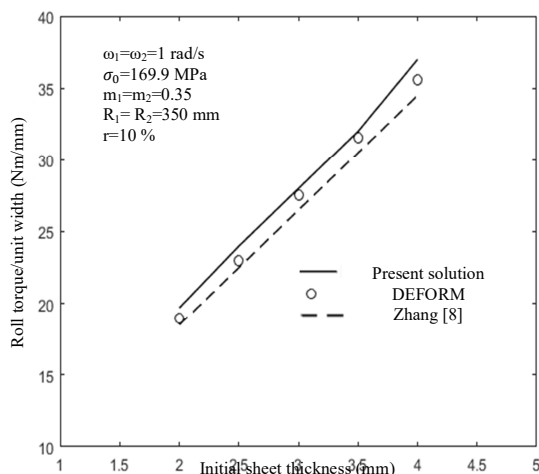
در جدول ۱ نتایج تحلیل حاضر برای مقدار سرعت ورق در ورود و فاصله‌های افقی نقاط خنثی (نشان داده شده در شکل ۳) با نتایج تحلیل هوانگ [۲] مقایسه شده‌اند. مقادیر سرعت و فاصله افقی نقاط خنثی بالا و پایین در هر دو تحلیل انطباق بسیار مناسبی دارند. درصد اختلاف نتایج در جدول ۱ ذکر شده‌اند. در این مقایسه شرایط ورودی مسأله با مقاله هوانگ یکسان بوده است. (سرعت اولیه ورق جز ورودی های مسأله نیست).

برخلاف نرم‌افزارهای المان محدود که تحلیل‌های مختلفی را انجام می‌دهند، Deform برای مدل کردن تغییر شکل پلاستیک مناسب بوده و محیط گرافیکی کاربرپسند این نرم‌افزار و سهولت آماده‌سازی اطلاعات آن به محققان کمک می‌کند که بیشتر روی مسئله شکل‌دهی متمرکز شوند و خود را درگیر روندهای طاقت‌فرسای رایانه‌ای نکنند. در محیط پیش پردازش در مرحله اول باید فرض کرنش صفحه‌ای را در نرم‌افزار اعمال کرد. در ادامه باید نوع هندسه و سیستم واحدها را تعیین کرد. فرآیند می‌تواند به صورت شکل‌دهی سرد، شکل‌دهی گرم و انتقال گرما باشد. در این شبیه‌سازی، فرآیند به صورت شکل‌دهی سرد در نظر گرفته شده است. رفتار تنش کرنش ماده نیز به صورت صلب پلاستیک مدل شده است. در مرحله هندسه با توجه به نامتقارن بودن مسئله؛ ورق فلز و غلتک‌های بالا و پایین هر سه ترسیم می‌شوند. در مرحله Mesh، مش‌بندی بر روی ورق انجام می‌گیرد. اندازه مش، هر چه ریزتر انتخاب شود باعث می‌شود نتایج خروجی دقیق‌تر بوده و شرایط به حالت واقعی نزدیک‌تر شوند. مقدار نیروی نورد از تعداد مش ۱۵۰۰ به بالاتر تغییر زیادی نکرده و بنابراین از این تعداد در مش‌بندی استفاده شده است. در ادامه رفتار اصطکاکی جسم تعیین و در مرحله بعدی باید شرایط مرزی مشخص شوند. غلتک‌های بالا و پایین تنها حرکت زاویه‌ای دارند که با انتخاب مرکز غلتک، سرعت زاویه‌ای ثابت به آن اعمال می‌شود.

۵- نتایج و بحث

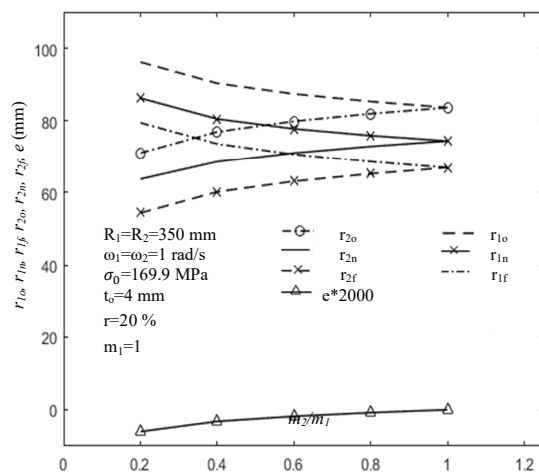
کلید رابطه‌های بیان شده در قسمت‌های قبلی به یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB تبدیل شده است. بر اساس شرایط هندسی فرآیند، سرعت‌های زاویه‌ای و ثابت‌های اصطکاک بین غلتک‌های بالا و پایین با ورق فلز، توان کل، تابعی از موقعیت شعاعی نقاط خنثی بالا و پایین و پارامتر c بوده که نسبت به این سه متغیر بهینه شده است.

در شکل ۶ نتایج تحلیل حاضر برای توان کل بر واحد عرض ورق، با نتایج تحلیل کرانه بالایی هوانگ [۲] برای دو نسبت شعاع‌های غلتک‌ها مقایسه شده‌اند $R_1/R_2 = 1.5$ و $R_1/R_2 = 0.5$. در این شکل تغییر توان کل بر حسب درصد کاهش ضخامت برای دو نسبت شعاع غلتک ترسیم شده است. همانگونه که شکل ۶ نشان می‌دهد، حد بالایی توان خارجی لازم با افزایش درصد کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت شعاع غلتک‌ها، توان خارجی افزایش می‌یابد. در درصد کاهش ضخامت‌های پایین (تا مقدار درصد کاهش ضخامت حدود ۲۰٪) نتایج تحلیل حاضر بر نتایج تحلیل هوانگ در هر دو نسبت شعاع غلتک بر هم منطبق بوده و در درصد کاهش ضخامت‌های بالاتر اختلاف کمی با هم دارند.



شکل ۹- گشتاور مورد نیاز محاسبه شده بر حسب ضخامت ورق ورودی در تحلیل حاضر و نتایج Deform و حل ژانگ [۸]

در شکل ۱۰، با روش تحلیلی اثر نسبت ثابت اصطکاک بر موقعیت‌های شعاعی نقطه‌های خنثی بالا و پایین، شعاع اولین نقطه تماس ورق با غلتک‌ها و همچنین موقعیت شعاعی نقطه پایان تماس ورق با غلتک‌ها نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰- نتایج تحلیلی تأثیر ثابت اصطکاک بر مکان e و شعاع نقاط خنثی

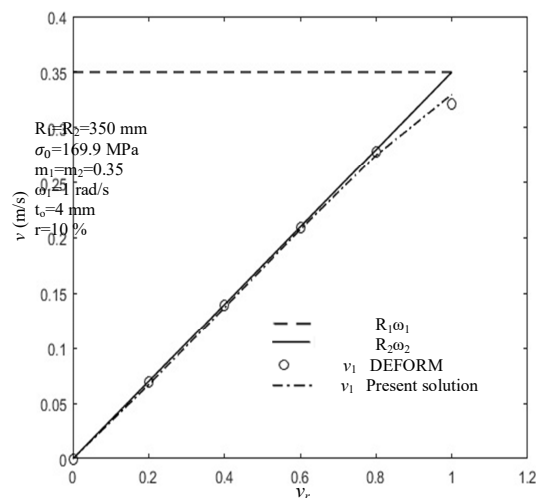
مطابق شکل ۱۰ در حالت نورد متقارن که شرایط هندسی و فیزیکی فرآیند در غلتک‌های بالا و پایین یکسان می‌باشند (نسبت ثابت اصطکاک ۱)، مقدار پارامتر e صفر به دست می‌آید و مقادیر موقعیت‌های شعاعی نقاط خنثی غلتک بالا و پایین با هم برابر هستند. یعنی در حالت نورد متقارن، فاصله افقی بین نقطه‌های خنثی صفر می‌شود. علاوه بر این در حالت نورد متقارن، شعاع‌های نقاط ابتدا و انتهای تماس ورق با غلتک‌های بالا و پایین با هم برابرند. با کاهش نسبت ثابت اصطکاک (کاهش ثابت اصطکاک غلتک پایین)، مقدار پارامتر e افزایش و ورق به سمت بالا یعنی به سمت غلتک با ثابت اصطکاک بیشتر، انحنا می‌یابد. علاوه بر این با کاهش نسبت ثابت اصطکاک، در قسمت بالا موقعیت‌های شعاعی نقطه‌های خنثی،

جدول ۱- نتایج تحلیل حاضر و نتایج هوانگ [۲]

نتایج	مدل هوانگ	روش تحلیل حاضر
سرعت ورق در ورود (mm/s)	۲۴،۴۵	۲۷،۵
فاصله افقی نقطه خنثی بالا (mm)	۹،۲۸	۸،۵۶
فاصله افقی نقطه خنثی پایین (mm)	۴،۹۳	۴،۶۶

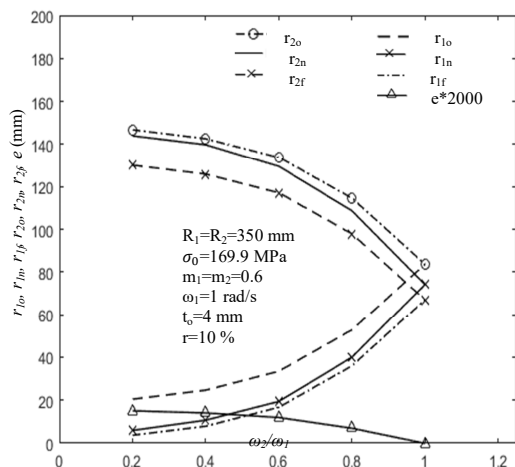
در شکل ۸ نتایج سرعت ورق در ورود به دست آمده از تحلیل حاضر با نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار Deform مقایسه شده‌اند. و سرعت زاویه‌ای غلتک بالا ثابت و برابر ۰/۳۵ rad/s است. مطابق شکل ۸ با افزایش سرعت زاویه‌ای غلتک پایین (افزایش سرعت محیطی غلتک پایین) سرعت ورق در ورود افزایش یافته است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که سرعت ورق در ورود نزدیک به مقدار سرعت محیطی غلتک پایین (غلطکی که با سرعت زاویه‌ای کوچکتر دوران می‌کند) می‌باشد. به همین دلیل نقطه خنثی غلتک با سرعت محیطی کمتر زودتر از نقطه خنثی غلتک با سرعت محیطی بیشتر ایجاد شده و با نزدیک شدن فرآیند به حالت تقارن، اندازه ناحیه‌های تغییر شکل بالا و پایین به هم نزدیک می‌شوند. نتایج نرم‌افزار Deform نیز بر نتایج تحلیل منطبق می‌باشند.



شکل ۸- نتایج تحلیل حاضر برای سرعت ورق در ورود و نتایج نرم افزار Deform

در شکل ۹ نتایج گشتاور لازم به دست آمده از تحلیل با نتایج تحلیل ژانگ [۸] و شبیه‌سازی با Deform نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ با افزایش ضخامت اولیه ورق، گشتاور لازم برای انجام فرآیند افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از تحلیل حاضر به دلیل طبیعت روش کرانه بالایی، نسبت به نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار Deform تحلیل ژانگ که بر اساس روش تعادل نیروها بوده، بیشتر است. اختلاف گشتاور لازم با نتایج نرم‌افزار Deform کمتر از ۳/۵ درصد می‌باشد.



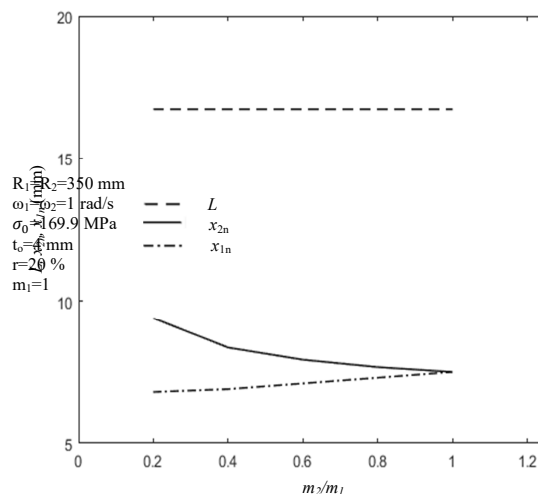
شکل ۱۲- تأثیر سرعت زاویه‌ای بر پارامتر e و موقعیت شعاعی نقاط خنثی

در حالت نورد متقارن (نسبت سرعت زاویه ای ۱) مقدار پارامتر e صفر به دست می‌آید و مقادیر شعاع‌های نقاط خنثی غلتک بالا و پایین و شعاع‌های نقاط ابتدا و انتهای تماس ورق با غلتک‌های بالا و پایین با هم برابر است. با کاهش نسبت سرعت زاویه‌ای (کاهش سرعت زاویه‌ای غلتک پایین)، مقدار e افزایش می‌یابد. بنابراین شعاع‌های نقطه خنثی، نقطه اولیه تماس و همچنین شعاع نقطه پایان تماس غلتک با ورق در قسمت بالا کاهش یافته در صورتی که مقدار شعاع نقطه خنثی به شعاع نقطه اولیه تماس نزدیک می‌شود. در قسمت پایین با کاهش نسبت سرعت زاویه‌ای مقادیر شعاع نقطه خنثی، شعاع نقطه اولیه تماس و همچنین شعاع نقطه پایان تماس غلتک بالا با ورق افزایش یافته و مقدار شعاع نقطه خنثی به شعاع نقطه پایان تماس نزدیک می‌شود. بنابراین با کاهش نسبت سرعت زاویه‌ای نقاط خنثی از هم فاصله گرفته و مقدار بهینه توان به ازای مقدار e مثبت به دست می‌آید.

در شکل ۱۳ تأثیر سرعت زاویه‌ای بر فاصله افقی نقاط خنثی نشان داده شده است. در این نمونه شرایط هندسی قسمت بالا و پایین ورق برابر در نظر گرفته شده است. بنابراین طول افقی ناحیه تماس ورق با غلتک‌های بالا و پایین (L_1 و L_2) نشان داده شده در شکل ۳ برابر بوده و با پارامتر L در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در حالت متقارن (نسبت سرعت زاویه‌ای ۱) طول فاصله افقی نقاط خنثی بالا و پایین با هم برابر است. با افزایش اختلاف سرعت زاویه‌ای غلتک بالا و پایین (کاهش سرعت زاویه‌ای غلتک پایین) اندازه فاصله افقی نقطه خنثی غلتک بالا کاهش می‌یابد به عبارتی نقطه خنثی بالا به سمت خروجی حرکت می‌کند. فاصله افقی نقطه خنثی پایین افزایش یافته و نقطه خنثی پایین به سمت ناحیه ورودی حرکت می‌کند. مقایسه شکل ۱۱ و شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تأثیر نسبت سرعت زاویه‌ای بر مکان نقاط خنثی بیشتر از نسبت ثابت اصطکاک می‌باشد. دلیل آن هم متفاوت بودن سرعت خطی غلتک‌ها می‌باشد که نقش مهمی در تعیین نقطه خنثی دارد.

نقطه‌های اولیه و پایان تماس غلتک بالا با ورق افزایش یافته است. این در حالی است که نقطه خنثی به نقطه اولیه تماس نزدیک می‌شود. در قسمت پایین با کاهش نسبت ثابت اصطکاک، موقعیت‌های شعاعی نقطه خنثی، نقطه اولیه تماس و نقطه پایان تماس غلتک پایین با ورق کاهش و نقطه خنثی به نقطه پایان تماس نزدیک می‌شود. بنابراین با کاهش نسبت ثابت اصطکاک، فاصله نقاط خنثی از هم افزایش می‌یابد و ورق به سمت بالا انحنا می‌یابد.

در شکل ۱۱ تأثیر نسبت ثابت اصطکاک بر فاصله افقی نقاط خنثی (پارامتر x در شکل ۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تأثیر نسبت ثابت اصطکاک بر فاصله افقی نقاط خنثی

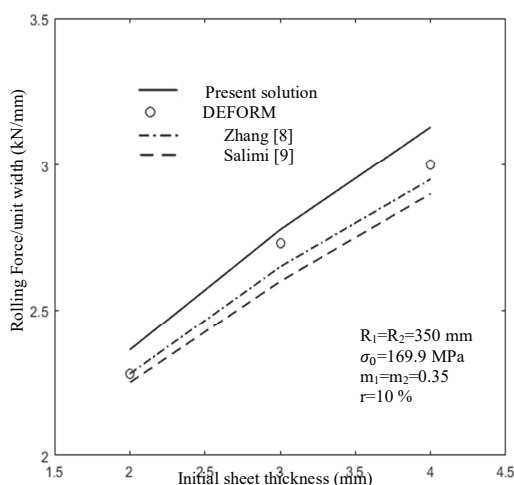
در این نمونه شرایط هندسی بالا و پایین ورق برابر در نظر گرفته شده است. بنابراین طول افقی ناحیه تماس ورق با غلتک‌های بالا و پایین (L_1 و L_2) نشان داده شده در شکل ۳ برابر بوده و با پارامتر L در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در حالت نورد متقارن و نسبت ثابت اصطکاک ۱، اندازه فاصله افقی نقاط خنثی بالا و پایین با هم برابر است. با افزایش اختلاف ثابت اصطکاک غلتک بالا و پایین با ورق، مکان نقطه خنثی بالا، به سمت خروجی حرکت و مکان نقطه خنثی پایین در جهت مخالف و در حال دور شدن از نقطه خنثی بالا می‌باشد.

اختلاف بین فاصله افقی نقاط خنثی غلتک بالا و پایین، بیانگر طول ناحیه برشی بین قسمت‌های بالا و پایین ناحیه تغییر شکل، نشان داده شده در شکل ۳ بوده که با کاهش نسبت ثابت اصطکاک، طول ناحیه برشی افزایش می‌یابد. ناحیه برشی نقش مهمی در مقدار شعاع انحنا ورق خروجی دارد و هرچه طول ناحیه برشی بیشتر باشد شعاع انحنا ورق خروجی بیشتر است. بنابراین با کاهش نسبت ثابت اصطکاک شعاع انحنا ورق افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲ تأثیر نسبت سرعت زاویه‌ای غلتک‌های بالا و پایین بر موقعیت شعاعی نقطه خنثی، شعاع اولین نقطه تماس ورق با غلتک و همچنین موقعیت شعاعی نقطه پایان تماس ورق با غلتک بالا نشان داده شده‌اند. در این شرایط مقدار پارامتر e مثبت تغییر می‌کند و حالت بهینه فرآیند در قسمت بالایی رخ خواهد داد.

بیشتری دارد. بنابراین حل حاضر نسبت به نتایج تحلیل کرانه بالایی هوانگ [۲] شعاع انحنای ورق خروجی را با دقت بیشتری پیش بینی می‌کند.

در شکل ۱۵ نتایج تحلیل حاضر و نتایج تحلیل ژانگ [۸] و سلیمی [۹] که به روش تعادل نیروها انجام شده و نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار دیفرم نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۵ با افزایش ضخامت ورق اولیه، مقدار نیروی وارد بر غلتک‌ها افزایش یافته است. تحلیل حاضر از نتایج تحلیل ژانگ و سلیمی و همچنین مقادیر نرم‌افزار دیفرم بیشتر به دست آمده است و توجه این است که روش حل حاضر، کرانه بالایی است.

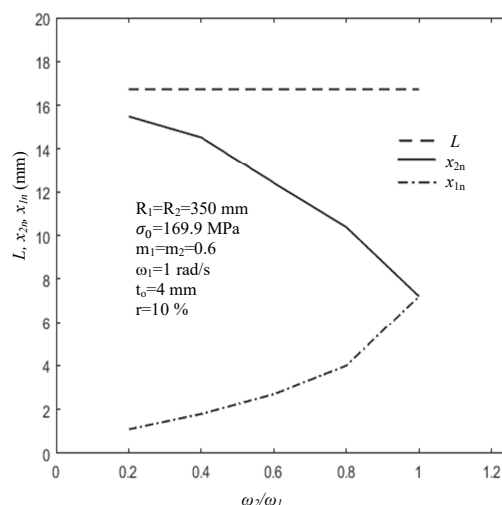


شکل ۱۵- تأثیر ضخامت ورق ورودی بر نیروی جداکننده غلتک‌ها، حل حاضر و نتایج Deform، تحلیل ژانگ [۸] و سلیمی [۹]

۶- نتیجه گیری

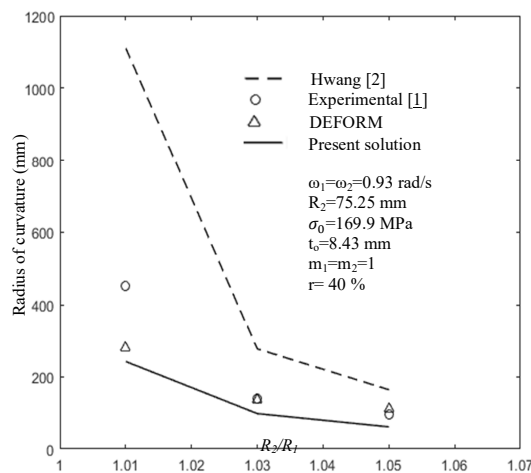
نتایج حل تحلیلی حاضر با نتایج تحلیلی و آزمایش سایر محققان مقایسه و انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده شد. در این مقاله یک مدل تغییرشکل و حل کرانه بالایی فرآیند نورد نامتقارن ورق‌های فلزی ارایه شد. با روش تحلیلی پیشنهادی و برای یک شرایط فرآیند داده شده، مقدار نیرو، گشتاور لازم، شعاع انحنا و سایر پارامترهای فرآیند تعیین شدند. نتایج به دست آمده از تحلیل به شرح زیر می‌باشند:

- موقعیت شعاعی نقطه خنثی روی غلتک با سرعت محیطی کمتر بزرگتر از نقطه خنثی غلتک با سرعت محیطی بیشتر بوده و با نزدیک شدن به حالت متقارن، فاصله افقی نقاط خنثی بالا و پایین، کاهش می‌یابد.
- با کاهش نسبت‌های ثابت اصطکاک و سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها، نقاط خنثی قسمت بالا و پایین از هم دور شده، نقطه خنثی بالا به سمت ناحیه خروجی و نقطه خنثی پایینی به سمت ناحیه ورودی حرکت می‌کند.
- با کاهش نسبت‌های ثابت اصطکاک و سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها، نقاط خنثی قسمت بالا و پایین از هم دور شده، نقطه خنثی بالا به سمت ناحیه خروجی و نقطه خنثی پایینی به سمت ناحیه ورودی حرکت می‌کند.
- تأثیر نسبت سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها بسیار بیشتر از نسبت



شکل ۱۳- تأثیر نسبت سرعت زاویه‌ای بر فاصله افقی نقاط خنثی

در شکل ۱۴ تأثیر نسبت شعاع غلتک‌ها بر انحنای ورق خروجی نشان داده شده است. حل حاضر به روش کرانه بالایی بوده و با نتایج تجربی دوه‌رست [۱]، نتایج تحلیل کرانه بالایی هوانگ [۲] و همچنین نتایج نرم‌افزار Deform مقایسه شده است. شرایط در قسمت بالا و پایین به جز شعاع غلتک‌ها یکسان می‌باشند. مطابق شکل ۱۴، مقدار شعاع انحنای ورق خروجی با افزایش نسبت شعاع غلتک‌ها کاهش و به عبارت دیگر انحنا افزایش یافته است.



شکل ۱۴- نتایج تحلیل کرانه بالا و مقادیر Deform، هوانگ [۲] و تجربی [۱]

در نسبت شعاع غلتک $R_2/R_1=1.05$ نتایج دیفرم و تجربی بر هم منطبق بوده و در نسبت شعاع غلتک $R_2/R_1=1.03$ علاوه بر منطبق بودن مقادیر نرم‌افزار Deform و نتایج تجربی مقدار شعاع انحنای محاسبه شده به کمک حل حاضر نزدیکتر از حل هوانگ است.

در نسبت شعاع غلتک $R_2/R_1=1.01$ اختلاف بین نتایج تحلیل هوانگ و مقادیر آزمایشی ۷۰٪ بوده و در حل حاضر این اختلاف به ۳۷٪ رسیده است و علاوه بر آن حل حاضر با نتایج آزمایش انطباق

ثابت اصطکاک خواهد بود.

- حل حاضر انطباق بهتری نسبت به مقادیر آزمایشی و نتایج نرم افزار دیفرم دارد.

۷- مراجع

- [17] Razani N., Dariani B.M. and Soltanpour M., Analytical Approach of Asymmetrical Thermomechanical Rolling by Slab Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, No. 1-4, pp. 175-189, 2018.
- [18] Wang J., Liu X. and Guo W., Analysis of Mechanical Parameters for Asymmetrical Strip Rolling by Slab Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, No. 9-12, pp. 2297-2309, 2018.
- [19] Wang J., Liu X., Sun X., Study on the relationship between asymmetrical rolling deformation zone configuration and rolling parameters, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 187, 105905, 2020.
- [20] Prager W. and Hodge P.G., *Theory of perfectly plastic solids*. John Wiley & Sons, New York, 1951.
- [1] Dewhurst P., Collins I. F. and Johnson W., A Theoretical and Experimental Investigation into Asymmetrical Hot Rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 16, No. 6, pp. 389-397, 1974.
- [2] Hwang Y.M. and Chen T.H., Analysis of Asymmetrical Sheet Rolling by Stream Function Method. *JSME International Journal*, Vol. 39, No. 4, pp. 598-605, 1996.
- [3] Gao H., Ramalingam S., Barber G. and Chen G., Analysis of Asymmetrical Cold Rolling with Varying Coefficients of Friction. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 124, No. 1-2, pp. 178-182, 2002.
- [4] Salimi M. and Kadkhodaei M., Slab Analysis of Asymmetrical Sheet Rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 150, No. 3, pp. 215-222, 2004.
- [5] Kawalek A., The Theoretical and Experimental Analysis of The Effect of Asymmetrical Rolling on The Value of Unit Pressure. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157, pp. 531-535, 2004.
- [6] Mousavi S.A., Ebrahimi S. and Madoliat R., Three Dimensional Numerical Analyses of Asymmetric Rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, pp. 725-729, 2007.
- [7] Gudur P., Salunkhe M. and Dixit U., A Theoretical Study on The Application of Asymmetric Rolling for The Estimation of Friction. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 2, pp. 315-327, 2008.
- [8] Zhang S., Zhao D., Gao C. and Wang G., Analysis of Asymmetrical Sheet Rolling by Slab Method. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 65, No. 1, pp. 168-176, 2012.
- [9] Qwamizadeh M., Kadkhodaei M. and Salimi M., Asymmetrical Sheet Rolling Analysis and Evaluation of Developed Curvature. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1-4, pp. 227-235, 2012.
- [10] Qwamizadeh M., Kadkhodaei M. and Salimi M., Slab Analysis of Asymmetrical Rolling of Bonded Two-Layer Sheets. *ISIJ international*, Vol. 53, No. 2, pp. 265-273, 2013.
- [11] Qwamizadeh M., Kadkhodaei M. and Salimi M., Asymmetrical Rolling Analysis of Bonded Two-Layer Sheets and Evaluation of Outgoing Curvature. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1-4, pp. 521-533, 2014.
- [12] Park J.J., Finite-Element Analysis of Severe Plastic Deformation in Differential-Speed Rolling. *Computational Materials Science*, Vol. 100, pp. 61-66, 2015.
- [13] Afrouz F. and Parvizi A., An Analytical Model of Asymmetric Rolling of Unbounded Clad Sheets with Shear Effects. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 162-171, 2015.
- [14] Parvizi V. and Afrouz F., Slab Analysis of Asymmetrical Clad Sheet Bonded before Rolling Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No. 1-4, pp. 137-150, 2016.
- [15] Aboutorabi A., Assempour A. and Afrasiab H., Analytical Approach for Calculating the Sheet Output Curvature in Asymmetrical Rolling: In The Case of Roll Axis Displacement as a New Asymmetry Factor. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 105, pp. 11-12, 2016.
- [16] Sun J., Peng Y., Dong Z. and Du X., Study on Asymmetrical Deformation and Curvature of Heavy Cylinder Rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 133, pp. 720-727, 2017.