

تدوین نرم‌افزار طراحی غلتکهای شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های گرد

حسن مسلمی نائینی^۱ - مهدی تاجداری^۲ - امیر دانشی^۳ - محمد
حسن سعدالله^۴

تهران، صندوق پستی ۱۴۳/۱۴۱۵

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی

E-mail : moslemi@modares.ac.ir

چکیده

عمدتاً طراحی و ساخت غلتکهای فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد، بصورت تجربی انجام می‌شود که زمان طولانی و هزینه بالایی را می‌طلبد. طراحی این غلتکها با استفاده از رایانه، نیاز صنعت پرمحصول شکل‌دهی غلتکی را به بهترین شکل پاسخ می‌دهد. انجام این تحقیق در زمینه طراحی و ساخت غلتکها و ارائه نتایج آن بصورت نرم‌افزار تجاری، گامی در پاسخ به نیاز این صنعت می‌باشد. این تحقیق، بر اساس تحلیل روش شکل‌دهی ورق به لوله بوده که روش تحلیل آن، برگرفته از روش کیوچی با تابع شکل سینوسی می‌باشد. تحلیل الاستو-پلاستیک فرایند، جهت دستیابی به تنش، کرنش، توان و شکل سه بعدی ورق در بین ایستگاه‌ها، بر اساس روش انرژی انجام شده است. در نرم‌افزار، طراحی غلتک بر اساس دو معیار طراحی کرنش لبه ماکزیمم یکنواخت و توان مصرفی یکنواخت در بین ایستگاه‌ها، صورت می‌گیرد. معیار کرنش لبه ماکزیمم یکنواخت در کارهای قبلی استفاده شده ولی در این تحقیق از معیار توان مصرفی یکنواخت بین ایستگاه‌ها، استفاده می‌شود. در نهایت، با بررسی ابعاد ماشین‌های ساخت لوله و پارامترهای فنی فرایند، فایل SCRIPT نقشه ساخت غلتکها، توسط نرم‌افزار به کاربر ارائه می‌گردد که با اجرای آن در محیط AUTOCAD 2002، نقشه ساخت به همراه نقشه مونتاژی رسم می‌گردد. با توجه به اینکه این نرم‌افزار، به عنوان یک نرم‌افزار صنعتی تدوین شده است و در اختیار صنایع لوله‌سازی قرار می‌گیرد، نیاز به انجام آزمایش‌هایی جهت نشان‌دادن درستی نتایج نرم‌افزار بوده است. بنابراین، تست نقطه برداری، با توجه به اصول CAD/CAM، جهت مقایسه نتایج نرم‌افزار برای شکل سه‌بعدی ورق در بین ایستگاه‌ها، با شرایط عملی، انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی غلتکی سرد، لوله‌های گرد، تحلیل عددی، طراحی و ساخت غلتک.

مقدمه

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، روشی است پیوسته برای ایجاد خم‌های متوالی در نوار فلزی که بدون تغییر در ضخامت ورق و با عبور دادن آن از مجموعه غلتکهای دوار، شکل مقطع

^۱ دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد

^۴ جانشین مدیر کارخانه لوله و تجهیزات سدید

مورد نظر را بوجود می آورد. هر مجموعه غلتک، مقداری از عمل شکل دهی را انجام می دهد تا سرانجام پس از عبور از آخرین مجموعه، شکل مقطع مورد نظر حاصل شود [۱]. نمودار لایه خنثی سطح مقطعی نوار در هر ایستگاه بر روی هم، نمایشی مصور از مراحل خمش است. چنین دیاگرامی، «الگوی گل» نامیده می شود که نقش اساسی در طراحی غلتک دارد.

میهارا (Mihara) [۲] و همکارانش در ارتباط با بکارگیری روشهای جدید در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد تحقیقاتی را انجام داده و پیشنهاد می کنند که غلتکهای شکل دهی متداول با تعدادی از غلتکهای استوانه ای کوچکتر جایگزین شوند.

ق. امیریان [۳]، نرم افزاری جهت ساخت غلتکهای فرایند شکل دهی غلتکی سرد لوله های گرد تدوین نموده است. این نرم افزار از دو بخش CAD و CAM تشکیل شده است. در بخش CAD از نرم افزار Auto Cad جهت رسم اتوماتیک نقشه، استفاده شده است و جهت پارامتریک نمودن آن از فایل DXF یا SCRIPT استفاده شده است. در بخش CAM نیز با توجه به ابعاد هندسی غلتک رسم شده در بخش CAD، ابعاد بلوک ماده خام، ابزار مناسب، حداکثر عمق برش و پارامترهای ماشینکاری، محاسبه شده و برنامه NC مربوطه تولید می شود. وی در نهایت یک نمونه غلتک با استفاده از این نرم افزار، برای روش شکل دهی مدور، ساخت.

م. متین پور [۴]، با استفاده از تابع شکل کیوچی که شامل پارامتری بنام «پارامتر بهینه ساز» است توانست هندسه سه بعدی ورق بین ایستگاهها را پیش بینی کند و با استفاده از معادلات اساسی در ناحیه الاستیک و معادلات «یامادا» در ناحیه پلاستیک، توزیع کرنشها و تنشهای عرضی و طولی در نقاط مختلف ورق را محاسبه نماید. سپس با استفاده از روش انرژی، توانست پارامتر بهینه ساز موجود در تابع شکل را پیدا کند.

هدف این تحقیق، تکمیل مطالعات قبلی مؤلفین و به دست آوردن نتایج عملی و تهیه یک نرم افزار جهت طراحی فرآیند می باشد.

روش طراحی غلتک ها

در این نرم افزار، طراحی غلتک بدین ترتیب صورت می گیرد که ابتدا، زوایایی برای هر ایستگاه در نظر گرفته می شود و سپس طی مراحل، این زوایا بهینه می شوند. بهینه شدن زوایا به معنی تطابق آنها با شرایط دلخواه کاربر می باشد. دو معیار در طراحی غلتک مورد نظر است. یکی معیار یکسان بودن کرنش لبه ای ماکزیمم در بین ایستگاهها و دوم معیار یکسان بودن توان مصرفی جهت شکل دهی در بین هر دو ایستگاه.

اختصاص زوایای اولیه به پروفیل هر ایستگاه، بستگی به معیار طراحی انتخاب شده دارد. بدین معنی که هر گاه معیار یکسان بودن کرنش لبه ای ماکزیمم، مورد نظر باشد این زوایا باید بگونه ای وارد شوند که اختلاف زاویه پروفیل در هر ایستگاه، نسبت به ایستگاه قبل، بطور خطی افزایش یابد. بدین

صورت که اگر $\theta^{#i}$ به عنوان زاویه پروفیل غلتک i ام باشد و $\Delta\theta^{#i}$ بیانگر زاویه شکل دهی به ورق، زمانی که ورق از ایستگاه $(i-1)$ ام به ایستگاه i ام حرکت می‌کند، باشد، یعنی $\Delta\theta^{#i} = \theta^{#i} - \theta^{#(i-1)}$ آنگاه منحنی شکل (۱) باید بصورت خطی افزایش یابد.

ولی زمانی که معیار یکسان بودن توان مصرفی بین هر دو ایستگاه، مورد نظر باشد، بگونه‌ای که در شکل (۲) نشان داده شده است، زوایای اولیه باید طوری تعیین شوند که $\Delta\theta^{#i}$ در هر مرحله از شکل دهی یکسان باشد.

یکسان سازی کرنش در تمام ایستگاه‌ها سبب می‌شود تا خطر موجدار شدن لبه ورق به حداقل برسد. زیرا ϵ_{xm} یعنی کرنش غشائی در جهت محوری، واقع در لبه ورق، سبب موج لبه‌ای و انواع مشکلات دیگر در شکل محصول می‌گردد [۵]. بنابراین جهت رسیدن به محصول با کیفیت بهتر استفاده از چنین معیار طراحی معقول به نظر می‌رسد. از طرفی یکسان سازی توان سبب می‌شود تا فرسایش غلتک‌های ایستگاه‌های مختلف به یک میزان باشد.

یکسان سازی کرنش ماکزیمم در لبه توسط محققین قبلی انجام شده است و به نتایج خوبی هم رسیده‌اند. در این تحقیق معیار یکسان سازی توان به طریق زیر به انجام رسیده است.

یکسان سازی توان تغییر شکل

با تخصیص زوایای اولیه به پروفیل ورق در هر ایستگاه، بگونه‌ای که $\Delta\theta^{#i}$ در تمام مراحل شکل دهی برابر باشد، منحنی مشخصه‌ای که بیانگر رابطه بین مقدار $\Theta^{#i}$ با تعریف زیر، و توان شکل

دهی به ازای واحد زاویه شکل دهی یعنی $\frac{\dot{w}}{\Delta\theta^{#i}}$ می‌باشد، حاصل می‌شود [۵].

$$\Theta^{#i} = \frac{1}{2}(\theta^{#(i-1)} + \theta^{#i}) \quad (1)$$

مشابه چنین رابطه‌ای برای حالت کرنش لبه‌ای یکسان در مرجع [۵] آمده است که از ذکر آن در این تحقیق خودداری می‌شود. این روابط، معمولاً وابسته به مشخصات ابعادی و شکل محصول، در نظر گرفته می‌شود و تقریباً مستقل از مقدار زاویه پروفیل اختصاص یافته می‌باشد. شکل (۳) این منحنی مشخصه را نشان می‌دهد.

تابع J_1 که نشان‌دهنده میزان همگرایی طی محاسبات می‌باشد، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_1 = \sum_i \left[\frac{\left(\dot{w} \right)^{#i}}{\dot{w}} - 1 \right] \quad (2)$$

در حالت ایده‌آل، مقدار این تابع باید صفر باشد تا نشان‌دهنده توان یکنواخت باشد و تابع J_2 که نشان‌دهنده میزان توان ماکزیمم است، باید برابر با توان متوسط \bar{w} شود. ولی در عمل، اختلافات جزئی وجود دارد که قابل اغماض است. بنابراین، در صورتیکه J_1 حداقل مقدار مورد نظر را داشته و J_2 برابر یا نزدیک به مقدار متوسط توان باشد، گل غلتک بهینه بدست می‌آید.

نحوه یکسان‌سازی توان به این صورت است که با تخصیص مقادیر اولیه به زاویه پروفیل در هر ایستگاه، برای هر یک از مراحل شکل‌دهی، توان محاسبه می‌شود. سپس تابع J_1 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگر مقدار این تابع بیش از حداقل مورد نظر باشد، زاویه پروفیل هر ایستگاه با استفاده از فرمول (۳) تغییر کرده و زوایای جدید وارد تحلیل می‌شوند و دوباره توان‌ها محاسبه می‌گردند.

$$\Delta\theta^{#i} = \Delta\theta^{#i} + \delta(\Delta\theta^{#i}) \quad (3)$$

بنابراین، در هر مرحله از این سعی و خطا، مقدار $\delta(\Delta\theta^{#i})$ به زاویه پروفیل مرحله قبل، اضافه می‌شود. این مقدار نمو زاویه پروفیل، از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$\delta(\Delta\theta^{#i}) = \left(\bar{w} - \dot{w}^{#i} \right) / \left[A \left(\theta^{#(i-1)} + \frac{1}{2} \Delta\theta^{#i} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \delta(\Delta\theta^{#j}) \right) + c \right] \quad (4)$$

که در آن، A و C ضرایب منحنی مشخصه بوده و \bar{w} مقدار متوسط توان شکل‌دهی تمام مراحل می‌باشد.

محاسبه توان تغییر شکل

در مرجع [۴] تحلیل تغییر شکل ورق بصورت المانی انجام شد. در این تحلیل، تغییر شکل نواری که طول اولیه آن Δl_0 می‌باشد و عرضی معادل همان عرض ورق دارد، بررسی می‌شود که این نوار از ایستگاه i در $X=X_1$ تا ایستگاه $i+1$ در $X=X_2$ حرکت می‌کند و طبق مدل تغییر شکلی که توسط کیوچی ارائه شده است، تغییر شکل می‌یابد.

توزیع و تغییرات تنش و کرنش واقع بر نوار وقتی که طبق مدل تغییر شکل یاد شده حرکت می‌کند، مطابق روشهای ریاضی که در مرجع [۴] آمده تحلیل می‌شود. در محاسبه واقعی، نوار ورق و جهت عرضی هم به تعدادی المان تقسیم می‌شود. همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده، با تقسیم ورق به المانهای عرضی و طولی، فرآیند تغییر شکل، به تعدادی گامهای معین تقسیم می‌شود و شماره گام عموماً توسط k نشان داده می‌شود. با استفاده از روابط ریاضی یاد شده، هندسه سه‌بعدی ورق و همچنین تنش و کرنش، در هر گام محاسبه می‌شود.

وقتی تحلیل تغییر شکل نوار ورق از ایستگاه i در $X=X_1$ تا ایستگاه $i+1$ در $X=X_2$ تمام شود، توان کل تغییر شکل ورق \dot{W} بین دو ایستگاه محاسبه می‌شود. \dot{W} می‌تواند با جمع کردن توان تغییر شکل نوار ورق در هر گام وقتی که از ایستگاه i تا $i+1$ حرکت می‌کند محاسبه شود.

توان لازم برای تغییر شکل کل \dot{W} ، که در ورق بین ایستگاه i و $i+1$ و در زمان معین ΔT صرف می‌شود، توسط معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{W} = \frac{1}{\Delta T} \sum_k \sum_j \sum_m \left[\Delta V_{k-1,j,m} \left\{ (dw^p)_{k,j,m} + (dw^e)_{k,j,m} \right\} \right] \quad (5)$$

در اینجا، برای جمع کردن عددی انرژی تغییر شکل، نوار ورق یا المان آن به تعدادی لایه در جهت ضخامت (Z) تقسیم می‌شود. پارامتر m نشانگر لایه m ام از ضخامت می‌باشد و $\Delta V_{k-1,j,m}$ یعنی حجم المان Z در جهت Y و m در جهت ضخامت المان Z . اندیس اول هم گام تغییر شکل است. dw^p و dw^e نشانگر توان تغییر شکل پلاستیک و توان تغییر شکل الاستیک در واحد حجم می‌باشند. این مقادیر از ضرب تنش در کرنش هر المان به صورت زیر بدست می‌آید

$$dw^e = \int (d\sigma_x^e \times d\varepsilon_x^e + d\sigma_y^e \times d\varepsilon_y^e) \quad (6)$$

$$dw^p = \int \bar{\sigma} \times d\bar{\varepsilon}$$

که $d\sigma_x^e$ ، $d\sigma_y^e$ ، $d\varepsilon_x^e$ ، $d\varepsilon_y^e$ ، $d\bar{\varepsilon}$ و $\bar{\sigma}$ در مرجع [۴] محاسبه شده‌اند.

آزمایش نقطه‌برداری

با توجه به اینکه این نرم‌افزار، به عنوان یک نرم‌افزار صنعتی تدوین شده است و در اختیار صنایع لوله‌سازی قرار می‌گیرد، نیاز به انجام آزمایش‌هایی جهت نشان دادن درستی نتایج نرم‌افزار می‌باشد. یکی از این آزمایش‌ها، آزمایش تعیین هندسه سه‌بعدی ورق در بین ایستگاه‌ها بوده است. در این آزمایش، با استفاده از یک دستگاه نقطه بردار، نقاطی از ورق، نقطه‌برداری شده و با اتصال آن به کامپیوتر، می‌توان این نقاط را در یک محیط گرافیکی مانند نرم‌افزار CAD KEY ثبت نمود و سپس با استفاده از نرم‌افزاری مثل MDT^۱، منحنی از این نقاط عبور داد و سپس از منحنی‌های تعیین شده سطحی تشکیل داد. می‌توان با استفاده از این سطح مدل شده، هر مقطع دلخواه از این سطح را انتخاب کرده و مختصات نقاط روی این مقاطع را پیدا کرد.

همانطور که گفته شد، در این آزمایش، پس از تعیین نقاط، باید از آنها منحنی گذرانده شود. با توجه به میزان ملایم بودن منحنی، می‌توان شروط پیوستگی متفاوت، بر نقاط اعمال کرد. درجه پیوستگی وقتی مهمتر می‌شود که یک منحنی پیچیده، از تعدادی قطعه منحنی تشکیل شده باشد. یک منحنی درجه ۳ پایین‌ترین درجه منحنی است که می‌تواند پیوستگی مناسبی تولید کند و در سیستم‌های CAD/CAM منحنی درجات بالاتر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، زیرا اقتصادی نیستند و پیچیده‌ترند.

^۱Mechanical Desktop

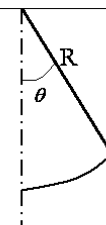
از بین تمام انواع منحنی‌های موجود، تنها منحنی مکعبی^۱ اسپلاین است که از نقاط معین عبور می‌کند و یا به عبارتی، درونیابی^۲ در رسم منحنی صورت می‌گیرد و منحنی‌های بزییر و B-Spline از نقاط عبور نمی‌کنند. منحنی مکعبی با داشتن نقاط و بردارهای ورودی و خروجی، و اعمال شرط پیوستگی تعریف می‌شود و با تغییر هر یک از چهار پارامتر یاد شده، منحنی‌های مختلف به دست می‌آید. با توجه به اینکه در این آزمایش، نقاط ثبت شده، نقاطی واقعی می‌باشند، بنابراین، جهت عبور دادن منحنی از نقاط ثبت شده، از منحنی مکعبی استفاده شده است. مجموعه منحنی‌های گذرانده شده از نقاط ثبت شده برای هر مقطع، تشکیل یک مدل قاب سیمی^۳ می‌دهند که به کمک تعریف سطح، روی این قاب سیمی، می‌توان مدل سطوح را ایجاد کرد. این مدل، توسط یک سیستم CAD، مانند نرم‌افزار MDT که توانایی توصیف سطح یک جسم فیزیکی را دارد، ساخته می‌شود.

نتایج و بحث

در این تحقیق، غلتکهای محصول لوله، با مشخصات $\phi 53.1_{mm} \times t 4.5_{mm}$ با ورودیهای جدول (۱) با استفاده از معیار یکنواخت بودن توان تغییر شکل، طراحی شده است و با نتایج کیوچی مقایسه شده است.

جدول ۱: ورودیهای نرم‌افزار برای طراحی بر اساس معیار توان یکنواخت برای تولید محصول $\phi 53.1_{mm} \times t 4.5_{mm}$

Mechanical properties	E=21000 kg/mm^2 H=80 kg/mm^2							
	$\nu=0.3$ Yield Stress $\sigma_s=31.5$ kg/mm^2							
Forming conditions	Number of Rolls = 8							
	Inter-stand Distance = 800 mm Speed = 40 m/min							
Number of Stands	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Profile Angle	30°	60°	90°	120°	150°	160°	170°	175°



توجه شود سه ایستگاه آخر، یعنی ایستگاه ۶، ۷ و ۸ مربوط به غلتکهای پره ای می‌باشند و به همین دلیل از ایستگاه اول تا ایستگاه ششم، $\Delta\theta^{#i}$ با هم مساوی می‌باشند ولی ایستگاه ۶، ۷ و

^۱Cubic-Spline

^۲Interpolation

^۳Wire Frame

۸ چنین وضعیتی ندارند. با توجه به اهمیت کیفیت محصولات و توصیه‌ای که برای غلتکهای پره‌ای شده است، ترجیح داده شده است تا زوایای مربوط به این ایستگاه‌ها تغییر نکنند. بنابراین معیار یکسان بودن توان تغییر شکل در مورد $\Delta\theta^{#1}$ تا $\Delta\theta^{#6}$ اعمال می‌شود.

به دلیل طولانی بودن زمان اجرای برنامه برای حالتی که توان دقیقاً مانند شکل (۷)، یکسان شود یعنی حالتی که پارامتر J_1 ، شرط همگرایی، برابر صفر شود، برنامه بگونه‌ای اجرا شده است که زمانی که پارامتر J_1 حداکثر برابر ۰/۱ شود، برنامه متوقف می‌شود. بنابراین تفاوت‌هایی در شکل‌های (۶) و (۷) به چشم می‌خورد. ولی روند یکنواخت شدن توان، منطقی به نظر می‌رسد. تغییر زاویه پروفیل در ایستگاه جهت رسیدن به $J_1 \leq 0.1$ ، پنج بار تکرار شد و نتایج توان در هر بار تکرار شد و پس از پنج بار تکرار تحلیل، شرط فوق برقرار شد. نتایج توان در هر بار تکرار در شکل (۵) نشان داده شده است. تکرار اول، مربوط به حالتی است که $\Delta\theta^{#i}$ در تمام ایستگاه‌ها برابر است و تکرار پنجم زمانی است که شرط $J_1 \leq 0.1$ برقرار شده است.

شکل (۶) نتایج حاصل از نرم افزار را برای این محصول نشان می‌دهد و شکل (۷) نتایج کیوچی را برای همین محصول نشان داده است.

همانگونه که در شکل‌های (۶) و (۷) دیده می‌شود، $\Delta\theta^{#1}$ در مقایسه با دیگر مراحل شکل‌دهی بزرگتر است و این به دلیل آن است که وقتی ورق از حالت تخت وارد ایستگاه اول می‌شود، نسبت تغییر شکل الاستیک به پلاستیک آن زیاد است.

ولی از ایستگاه دوم تا پنجم، این تفاوت کمتر است و به تدریج کم می‌شود زیرا در این مراحل، کرنش سختی اتفاق می‌افتد.

در ایستگاه ششم نسبت $\frac{\Delta\theta^{#i}}{\dot{w}^{#i}}$ نسبت به ایستگاه پنجم بیشتر است، زیرا در این ایستگاه، با توجه به شعاع و زاویه پروفیل، با وجود بیشتر بودن $\Delta\theta$ ، کرنش کمتری نسبت به ایستگاه پنجم اتفاق می‌افتد.

آزمایش هندسه سه‌بعدی ورق در بین ایستگاه‌ها

دستگاه ۶ اینچ با محصول لوله‌ای به قطر خارجی اسمی ۶ اینچ در کارخانه سدید مورد آزمایش نقطه‌برداری قرار گرفت. این آزمایش توسط دستگاه نقطه‌بردار Rev Pro که دقت آن حداکثر ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد، انجام شده است. دقت ۰/۲ میلی‌متر این دستگاه به این معنی است که نقطه‌ای که توسط نوک دستگاه حس می‌شود، ممکن است تا کره‌ای به شعاع حداکثر ۰/۲ میلی‌متر خطا داشته باشد. با ثبت نقاط و تهیه فایل نقاط، جهت پردازش و تهیه منحنی‌های گذرنده از نقاط، از نرم‌افزار MDT استفاده گردیده است. این نقاط با فرمت DXF از محیط نرم‌افزار CAD KEY به نرم‌افزار MDT منتقل شده‌اند. در محیط نرم‌افزار MDT ابتدا مجموعه نقاط هر ایستگاه با توجه به سطوح مبنا که از غلتکها تهیه گردیده بود در موقعیت واقعی خود قرار گرفتند. سپس از منحنی Cubic-Spline به عنوان مناسبترین منحنی گذرنده از نقاط استفاده گردیده است که در آن، پیوستگی از

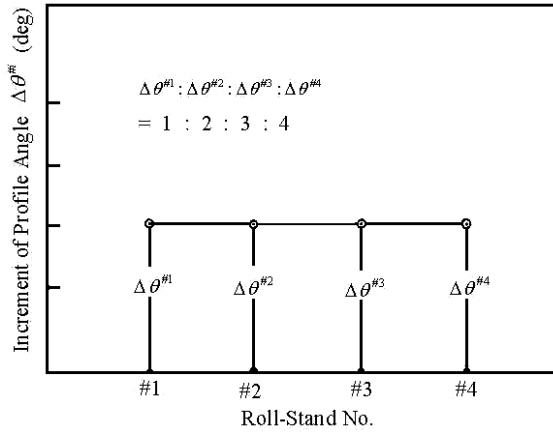
نوع C^2 بوده و منحنی درجه ۳ با دقت ۰/۰۵ می‌باشد. دلیل استفاده از منحنی Cubic-Spline این بوده است که نقاط ثبت‌شده، نقاط واقعی بوده و منحنی باید از این نقاط عبور کند. به دلیل عدم امکان تماس نوک دستگاه نقطه‌بردار با نقاطی که به فاصله بسیار کمی از غلتکها قرار داشتند به ناچار از ثبت این نقاط صرف‌نظر شده است و سطحی از این نواحی عبور داده نشده است. در مواردی به دلیل عدم دقت سطوحی که مورد نیاز بودند مثل سطح کناری غلتکها و یا شیارهای غلتکها، از ضخامت غلتکها و یا فاصله ایستگاه‌های موجود در نقشه‌های سدید استفاده شده است. در نهایت، در تمام ایستگاه‌های خط تولید لوله ۶ اینچ شرکت سدید، ورق مدل شده و تطابق خوبی بین تحلیل و آزمایش وجود داشته است. همچنین اطلاعات مربوط به این خط تولید وارد نرم‌افزار شده و نرم‌افزار مختصات هر نقطه دلخواه از ورق در بین ایستگاه‌ها را محاسبه نمود. مقایسه بین خروجی نرم‌افزار و نتایج آزمایش نقطه‌برداری انجام گردید. نتایج حاصل از این آزمایش به همراه نتایج نرم‌افزار برای محصول ۶ اینچ در شکل (۸) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنیهای مربوط به آزمایش، متقارن نیستند. دلیل این امر عدم دقت در ساخت غلتکها و همچنین فرسودگی آنها می‌باشد. همین نکته سبب می‌شود، منحنی آزمایش و تحلیل اختلافات جزئی داشته باشند. دلیل دیگر این اختلاف می‌تواند این باشد که در مواردی به دلیل عدم دقت سطوح مورد نیاز، ناگزیر از اندازه‌ی مربوط به ضخامت غلتک یا فاصله ایستگاه قید شده در نقشه‌های سدید، استفاده شده است که اختلافی بین اندازه واقعی این ضخامت و اندازه‌های موجود در نقشه وجود دارد که این موجب خطا می‌شود.

خروجی نرم‌افزار

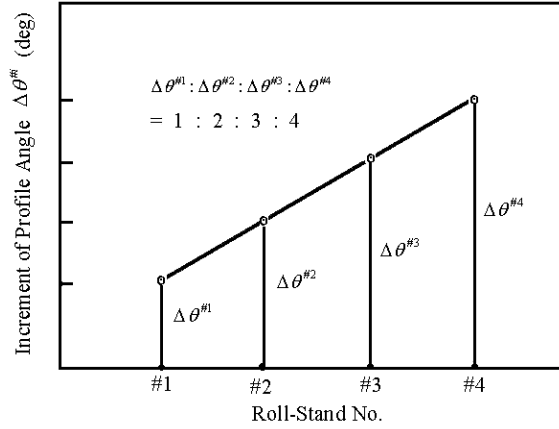
این نرم‌افزار قادر است تمام اطلاعات محاسبه شده مانند توزیع تنش و کرنش، شکل ورق در بین ایستگاه‌ها، مقدار تنش و کرنش اعمال شده به هر المان، توان مصرفی برای هر ایستگاه و شکل پروفیل ورق در هر ایستگاه که به پروفیل غلتکها دیکته می‌شوند، را به کاربر نشان دهد. در شکل (۹) یک نمونه از خروجی نرم‌افزار که توزیع تنش را نشان می‌دهد مشاهده می‌شود. همچنین در انتها، نرم‌افزار قادر است همانند شکل (۱۰) نقشه ساخت و مونتاژ غلتکها و بوشها را در هر ایستگاه در محیط Autocad 2002 رسم نماید.

نتیجه‌گیری نهائی

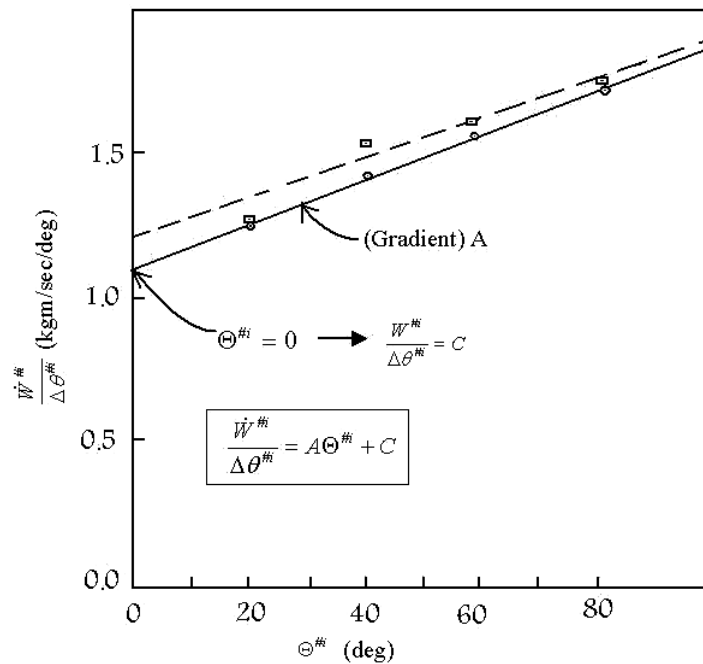
در تحقیق حاضر، علاوه بر اینکه از کارهای قبلی استفاده شده به تکمیل آنها در مباحث فوق‌الذکر پرداخته است و به شکل یک نرم‌افزار قابل استفاده برای صنایع ارائه شده است.



شکل ۲: حدس اولیه اختلاف زاویه پروفیل برای معیار توان یکنواخت [۵].



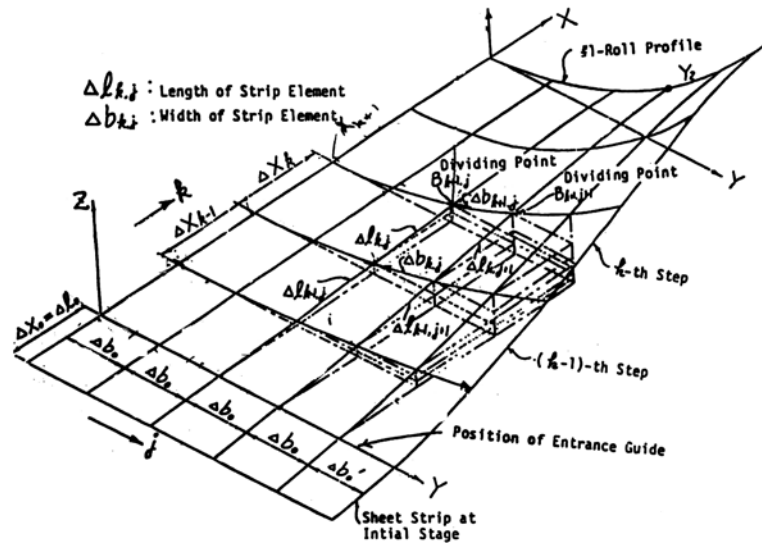
شکل ۱: حدس اولیه اختلاف زاویه پروفیل $\Delta\theta^{#i}$ [۵].



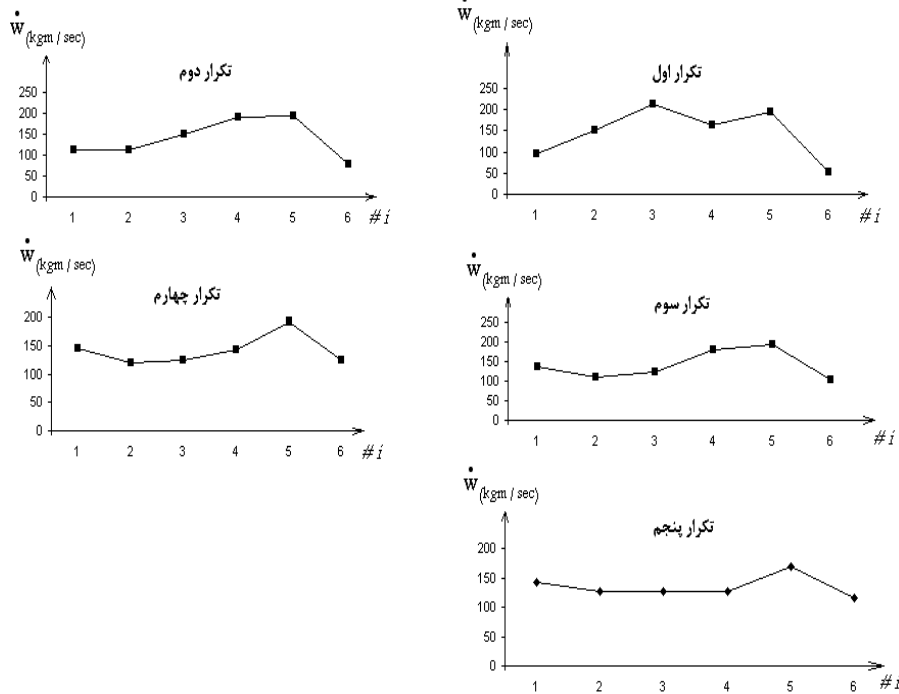
$$\delta(\Delta\theta^{#i}) = (\bar{W} - \dot{W}^{#i}) / \left(A(\theta^{#(i-1)}) + \frac{\Delta\theta^{#i}}{2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \delta(\Delta\theta^{#j}) \right) + C$$

$(i = 1, 2, 3, \dots, N)$

شکل ۳: منحنی مشخصه که بیانگر رابطه بین $\Theta^{#i}$ و $\frac{\dot{W}^{#i}}{\Delta\theta^{#i}}$ می باشد [۵].

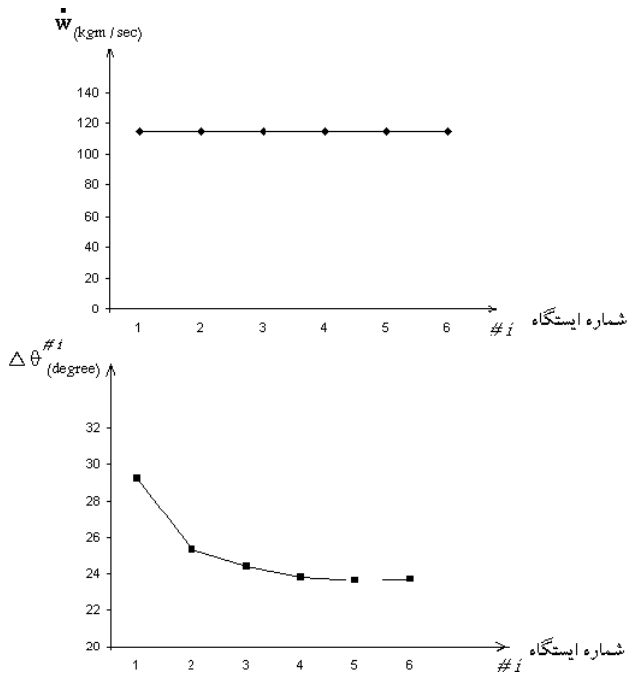


شکل ۴: دیاگرام شماتیک تغییر شکل نوار در گام k ورودی به غلتک اول [۵].

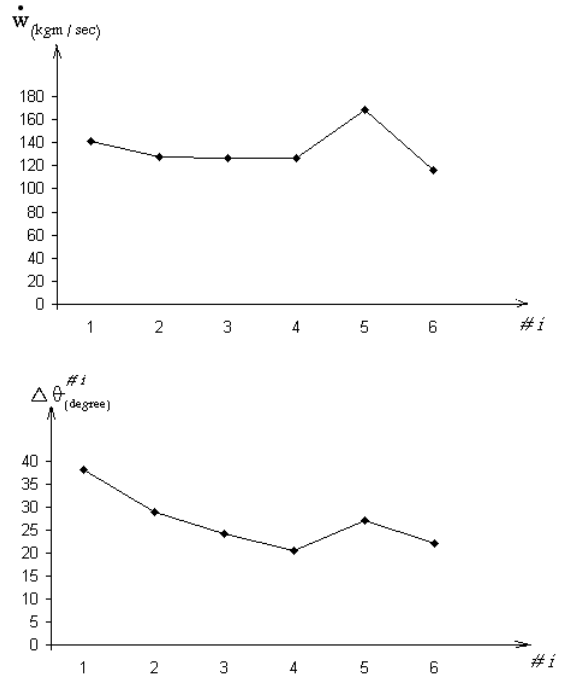


شکل ۵: تکرارهای مختلف توان برای رسیدن به توان یکنواخت محصول $\phi 53.1_{mm} \times t 4.5_{mm}$ (در تکرار پنجم)

جواب مطلوب با شرط $J_1 \leq 0.1$ حاصل شده است.

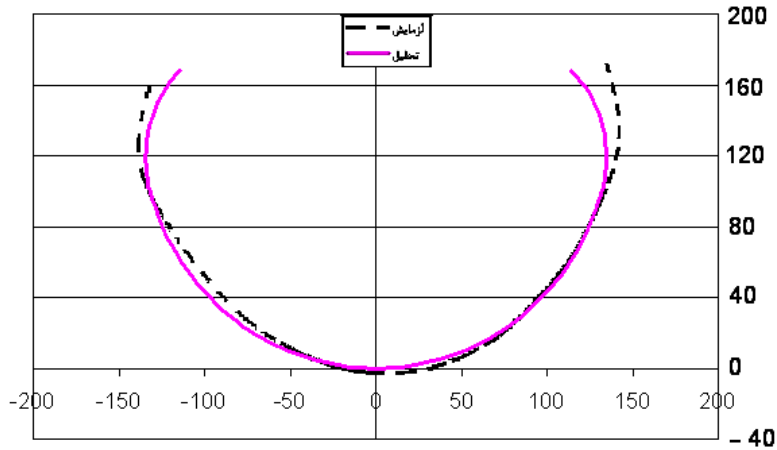


شکل ۷: مقادیر $\Delta\theta^{#i}$ و توزیع $\dot{w}^{#i}$ بهینه شده توسط کیوچی، با معیار یکنواخت بودن توان تغییر شکل برای محصول $\phi 53.1_{mm} \times t 4.5_{mm}$ [۵].

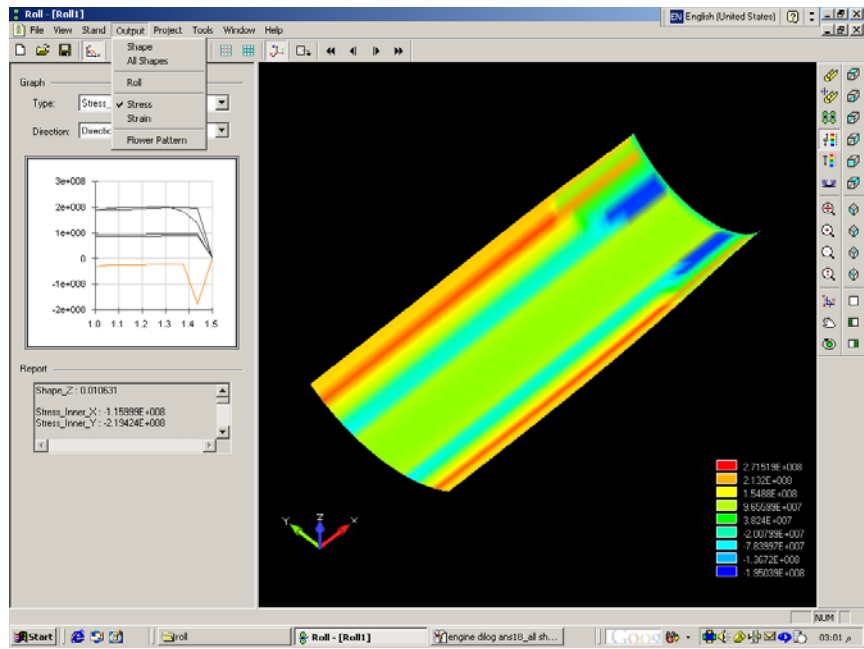


شکل ۶: مقادیر $\Delta\theta^{#i}$ و توزیع $\dot{w}^{#i}$ بهینه شده توسط نرم افزار، با معیار یکنواخت بودن توان تغییر شکل برای محصول $\phi 53.1_{mm} \times t 4.5_{mm}$ (با شرط

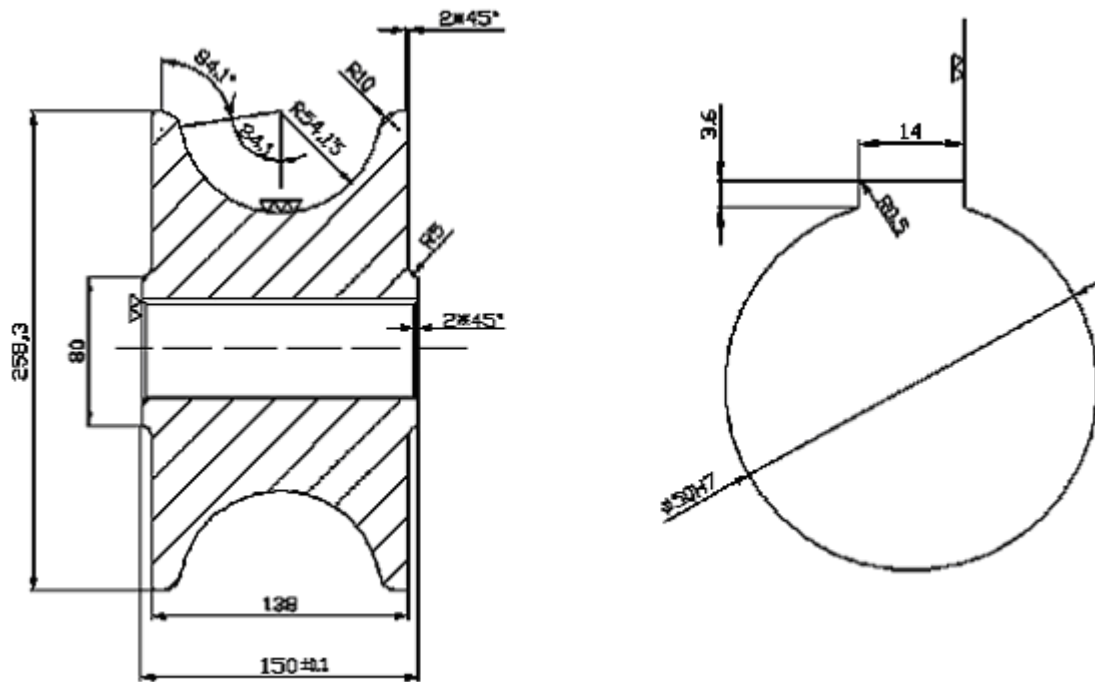
$$(J_1 \leq 0.1)$$



شکل ۸: مقایسه نتایج تحلیل و آزمایش در ۱۰۰۰ میلی متر بعد از ایستگاه سوم خط ۶ اینچ (واحدها بر حسب میلی متر می باشند)



شکل ۹: نمایش توزیع تنش بین ایستگاه دوم و سوم توسط نرم افزار



غلنک پائین

سوراخ غلنک پائین

شکل ۱۰: نقشه ساخت غلنک پائین ایستگاه سوم محصول $\phi 53.1_{mm} \times t 4.5_{mm}$

منابع

- [۱] مسلمی نایینی، ح.، "طراحی غلتک های فرآیند شکل دهی غلتکی سرد لوله به کمک کامپیوتر"، دانشگاه تربیت مدرس، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۲.
- [۲] Mihara, Y., Suzuki, K. and Yamanobe, I., " RollForming of U-Shaped Ribs by a New Rollers Die Forming Process ", Advanced Technology of Plasticity, Vol. I, pp. 428-432, 1984.
- [۳] امیریان، ق.، "طراحی و ساخت غلتک های شکل دهی غلتکی سرد لوله به کمک کامپیوتر"، دانشگاه تربیت مدرس، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۴.
- [۴] متین پور. م. " تدوین نرم افزار طراحی غلتکهای شکل دهی غلتکی سرد لوله های گرد" دانشگاه تربیت مدرس. پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۸۰.
- [۵] Kiuchi, M. and Koudabashi, T., "Roll Forming of Circular Tube-Automated Design System of Optimal Roll Profiles", International Conference 'Tubes and Energy' Euorogress-Aachen, West Germany, 'pp. 1/4/1-1/4/15, 11-12 Oct 1983.