

طراحی و ساخت غلتک‌های شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های گرد به کمک رایانه

امیر دانشی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهدی تاجداری (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

حسن مسلمی نائینی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

در صنایع لوله‌سازی، طراحی و ساخت غلتک‌های شکل‌دهی غلتکی سرد غالباً به صورت تجربی انجام می‌شود که بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. پژوهش حاضر در زمینه طراحی و ساخت غلتک‌ها صورت گرفته و ارائه نتایج حاصل از آن به صورت نرم‌افزار تجاری، گامی است در پاسخ به نیاز صنعت. این تحقیق براساس تحلیل روش شکل‌دهی ورق به لوله بوده که روش تحلیل آن برگرفته از روش کیوچی با تابع شکل سینوسی است. تحلیل کشسانی - خمیری فرایند، برای دست‌یابی به تنش، کرنش، توان و شکل سه‌بعدی ورق در بین ایستگاه‌ها، براساس روش انرژی انجام شده و در نرم‌افزار، طراحی غلتک براساس معیار توان مصرفی یکنواخت بین ایستگاه‌ها صورت پذیرفته است. در نهایت، با بررسی ابعاد ماشین‌های ساخت لوله و پارامترهای فنی فرایند، فایل SCRIPT نقشه‌ی ساخت غلتک‌ها، توسط نرم‌افزار به کاربر ارائه شده و با اجرای آن در محیط «توکد ۲۰۰۲» (AUTOCAD ۲۰۰۲)، نقشه‌ی ساخت به همراه نقشه‌ی مونتاژی رسم می‌شود. با توجه به این که این نرم‌افزار به عنوان یک نرم‌افزار صنعتی تدوین شده و در اختیار صنایع لوله‌سازی قرار گرفته است، انجام آزمایش‌هایی به منظور نشان دادن درستی نتایج نرم‌افزار ضروری است. بنابراین با توجه به اصول CAD/CAM و نیز به منظور مقایسه‌ی نتایج نرم‌افزار برای شکل سه‌بعدی ورق در بین ایستگاه‌ها با شرایط عملی، آزمایش نقطه‌برداری انجام شد که نتایج قابل قبولی در پی داشت.

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

مقدمه

یکی از روش‌های شکل‌دهی نوار فلزی و ایجاد پروفیل‌های دلخواه، شکل‌دهی غلتکی سرد است که در آن نوار فلز از میان غلتک‌هایی که شکل خود را به ورق تحمیل می‌کنند، مرحله به مرحله عبور کرده تا به شکل نهایی مورد نظر برسد. این فرایند شکل‌دهی گرچه یک روش قدیمی محسوب می‌شود، امروزه به دلایلی همچون تولید پیوسته با حجم زیاد، و برخورداری از قابلیت انعطاف به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققان با انجام تحقیقاتی درخصوص به‌کارگیری روش‌های جدید در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد،^[۱] پیشنهاد داده‌اند تا تعدادی غلتک استوانه‌یی کوچک‌تر جایگزین غلتک‌های شکل‌دهی متداول شوند.

برای ساخت غلتک‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های گرد، نرم‌افزاری تدوین شده^[۱] که از دو بخش CAD و CAM تشکیل شده است. در بخش CAD از نرم‌افزار اتوکد (Auto Cad) برای رسم اتوماتیک نقشه، و از فایل DXF یا SCRIPT به منظور پارامتری کردن^۱ آن استفاده شده است. در بخش CAM نیز یکی از روش‌های شکل‌دهی غلتک رسم شده در بخش CAD، ابعاد بلوک ماده خام، ابزار مناسب، بیشینه‌ی عمق برش و نیز پارامترهای ماشین‌کاری محاسبه و برنامه‌ی NC مربوطه تولید می‌شود. در نهایت با استفاده از این نرم‌افزار یک نمونه غلتک برای روش شکل‌دهی مدور ساخته شده است.

در یکی از تحقیقات انجام شده، با استفاده از تابع شکل کیوچی که شامل پارامتری بنام «پارامتر بهینه‌ساز» است، هندسه‌ی سه‌بعدی ورق بین ایستگاه‌ها پیش‌بینی شده و با استفاده از معادلات اساسی در ناحیه‌ی کشسان و معادلات «یامادا^۲» در ناحیه‌ی خمیری، توزیع کرنش‌ها و تنش‌های عرضی و طولی در نقاط مختلف ورق محاسبه شده است.^[۲] همچنین با استفاده از روش انرژی، پارامتر بهینه‌ساز موجود در تابع شکل پیدا شده است.

هدف این تحقیق، تکمیل مطالعات قبلی مؤلفین و به دست آوردن نتایج عملی و تهیه‌ی نرم‌افزاری به منظور طراحی فرایند و ساخت غلتک‌ها است.

معیارهای طراحی

در این فرایند، دو معیار برای طراحی غلتک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر یک از آن‌ها شرایط خاصی دارند. یکی از این معیارها، یکسان بودن کرنش لبه‌ی پیشینه‌ی تمام ایستگاه‌های شکل‌دهی است و در مواردی استفاده می‌شود که هدف از طراحی، رسیدن به محصول با کیفیت بهتر باشد. زیرا کرنش غشایی (ϵ_{em}) در جهت محوری واقع در لبه‌ی ورق، عامل موج لبه‌ی و انواع مشکلات دیگر در شکل محصول است. معیار دیگر که در راستای اقتصادی‌تر شدن هزینه‌ی تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت است از «یکسان بودن شکل‌دهی تمام ایستگاه‌های شکل‌دهی». در واقع، به دلیل یکسان بودن توان شکل‌دهی در ایستگاه‌های مختلف، میزان سایش غلتک‌های این ایستگاه‌ها به یک اندازه خواهد بود.

مراحل طراحی

برای شروع طراحی غلتک‌ها لازم است ابتدا برای هر یک از ایستگاه‌های شکل‌دهی زوایای اولیه‌ی در نظر گرفته شود تا براساس آن نرم‌افزار شروع به تحلیل و طراحی کند. تخصیص اولیه‌ی این زوایا به معیار طراحی انتخاب شده بستگی دارد؛ بدین معنا که هرگاه «یکسان بودن کرنش لبه‌ی پیشینه» مورد نظر باشد، اختلاف زوایای هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل باید به طور خطی افزایش یابد. به عبارت دیگر، زمانی که ورق از ایستگاه $(i-1)$ ام به ایستگاه i ام حرکت می‌کند، اگر θ^{i-1} به عنوان زاویه‌ی پروفیل غلتک i ام و $\Delta\theta^i$ بیان‌گر زاویه‌ی شکل‌دهی به ورق (یعنی اختلاف بین θ^i و θ^{i-1}) باشد، آنگاه تخصیص اولیه‌ی زاویه‌ی پروفیل به هر ایستگاه باید از رابطه‌های ۱ و ۲ تبعیت کند:

$$\Delta\theta^{i(i+1)} = 2\Delta\theta^i - \Delta\theta^{i(i-1)} \quad (1)$$

$$\theta^i = (1/3)\theta^{i(i+1)} + \theta^{i(i-1)} - (1/3)\theta^{i(i-2)} \quad (2)$$

از سوی دیگر، زمانی که یکسان بودن توان مصرفی بین هر دو ایستگاه مطرح باشد زوایای اولیه باید به گونه‌ی تخصیص داده شوند که θ^{i-1} به طور خطی افزایش یابد. به عبارت دیگر:

$$\Delta\theta^{i(i-1)} = \Delta\theta^i = \Delta\theta^{i(i-1)} \quad (3)$$

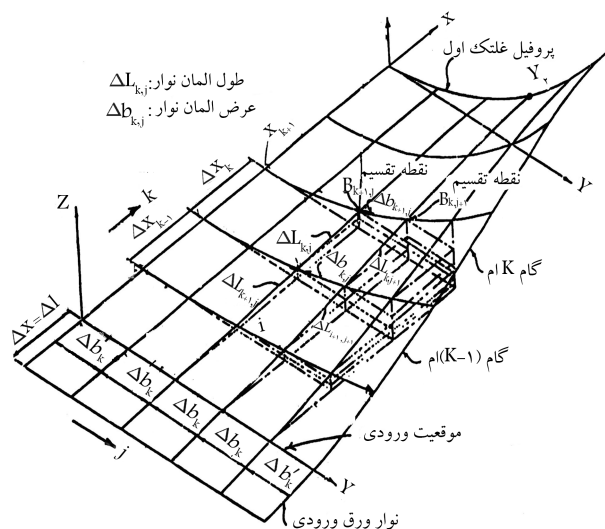
$$\theta^i = (1/2)(\theta^{i(i+1)} + \theta^{i(i-1)}) \quad (4)$$

در یکی از تحقیقات انجام شده، طراحی غلتک‌ها براساس یکسان‌سازی کرنش پیشینه در لبه صورت گرفته است.^[۲] در تحقیق حاضر مراحل طراحی غلتک‌ها بر مبنای معیار یکسان‌سازی توان به طریق زیر به انجام رسیده است.

تحلیل تغییر شکل ورق و محاسبه‌ی توان

تحلیل تغییر شکل ورق با استفاده از نرم‌افزار، به صورت المانی انجام می‌گیرد.^[۴] در این روش، ورق به المان‌های عرضی و طولی، و فرایند تغییر شکل به تعدادی گام‌های معین (k) تقسیم می‌شود (شکل ۱). نوار ورق، از ایستگاه i ام به ایستگاه $(i+1)$ ام حرکت می‌کند و طبق مدل تغییر شکل سینوسی زیر که توسط «کیوچی» ارائه شده،^[۵] تغییر شکل می‌یابد:

$$S(X) = \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{X}{L} \right)^n \right\}, \quad L = X_2 - X_1 \quad (5)$$



شکل ۱. نمودار شماتیک تغییر شکل نوار در گام k ورودی به غلتک اول.^[۵]

که در آن، L فاصله‌ی بین دو ایستگاه مجاور و n پارامتری است که با استفاده از اصل انرژی به گونه‌ی محاسبه می‌شود که توان کل تغییر شکل بین دو ایستگاه، به ازای آن کمینه شود. توزیع تغییرات تنش و کرنش واقع بر نوار، وقتی که طبق مدل تغییر شکل یاد شده حرکت می‌کند، مطابق روش‌های ریاضی تحلیل می‌شود.^[۲] در نتیجه هندسه‌ی سه بعدی ورق، و تنش و کرنش در هر گام محاسبه خواهد شد. در این تحلیل، مدل تغییر شکل در ناحیه‌ی خمیری به صورت خطی در نظر گرفته شده است.

تغییر شکل ورق در دو ناحیه‌ی کشسانی و خمیری صورت می‌گیرد لذا برای محاسبه‌ی توان تغییر شکل، باید توان مربوط به هر دو ناحیه‌ی کشسانی و خمیری در هر گام با هم جمع شوند. توان تغییر شکل (\dot{W}) وقتی ورق از ایستگاه i ام به ایستگاه $(i+1)$ ام در زمان معین ΔT می‌رسد، با استفاده از رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$\dot{W} = \frac{1}{\Delta T} \sum_k \sum_j \sum_m \left[\Delta V_{k-1,j,m} \left\{ \left(\int d\sigma_x^e \times d\epsilon_x^e + d\sigma_y^e \times d\epsilon_y^e \right)_{k,j,m} + \left(\int \bar{\sigma} \times d\bar{\epsilon} \right)_{k,j,m} \right\} \right] \quad (6)$$

پارامتر m نشان‌گر لایه‌ی m ام از ضخامت ورق، و $\Delta V_{k-1,j,m}$ به معنی حجم المان j در جهت Y و المان m در جهت ضخامت المان (Z) است. اندیس اول هم گام تغییر شکل است. $d\sigma_x^e$ ، $d\sigma_y^e$ ، $d\epsilon_x^e$ ، $d\epsilon_y^e$ ، $\bar{\sigma}$ و $d\bar{\epsilon}$ توسط محققین ایرانی محاسبه شده است.^[۳]

طراحی غلتک

به منظور طراحی غلتک، در این نرم‌افزار علاوه بر مشخص کردن ابعاد و خواص محصول مورد نظر، کاربرد زوایای اولیه را برای هر ایستگاه وارد می‌کند تا از لحاظ یکسان بودن توان هر ایستگاه، این زوایا توسط نرم‌افزار به حالت بهینه برسند. زاویه‌ی پروفیل در ایستگاه نیز به گونه‌ی خواهد بود که $\Delta\theta^i$ در تمام مراحل شکل‌دهی برابر باشند. ماتریس پروفیل هر یک از ایستگاه‌ها (Q^i) ابتدا توسط روش المانی که ذکر شد، تشکیل می‌شود (شکل ۲) و سپس با استفاده از روابط یاد شده در برخی مراجع،^[۲]

دو تابع J_1 و J_2 با تعریف زیر تشکیل می شوند:

$$J_1 = \sum_i \left[\frac{(\dot{w}^{\#i})}{\bar{w}} - 1 \right] \quad (8)$$

$$J_2 = \sum_i \left[\left(\dot{w}^{\#i} \right)_{MAX} - \bar{w} \right] \quad (9)$$

در حالت ایده آل، باید دو شرط زیر در مورد این دو تابع برقرار شود تا محاسبات یکسان سازی توان به پایان برسد، و نهایتاً پروفیل بهینه به عنوان خروجی به کار بر اعلام شود.

$$J_2 = 0 \quad \& \quad J_1 = 0 \quad (10)$$

در عمل به خاطر طولانی شدن زمان برقراری شروط ایده آل، هرگاه دو تابع J_1 و J_2 به مقدار صفر نزدیک شوند، اختلافات جزئی پیش آمده قابل چشم پوشی است و نرم افزار به محاسبات پایان می دهد. اگر مقدار این دو تابع از کمینه مورد نظر کوچک تر نباشند، آنگاه به مقادیر قبلی زاویه ی پروفیل هر ایستگاه، مقداری افزوده می شود. این مقدار - یعنی نمو زاویه ی هر ایستگاه - با توجه به صورت تابع J_1 ، یعنی اختلاف توان هر ایستگاه نسبت به توان متوسط، و نیز توان شکل دهی به ازای واحد زاویه ی شکل دهی همان ایستگاه، طبق رابطه ی ۱۱ معین می شود:

$$\delta(\Delta\theta^{\#i}) = \left(\bar{w} - \dot{w}^{\#i} \right) / \left(\frac{\dot{w}^{\#i}}{\Delta\theta^{\#i}} \right) \quad (11)$$

با توجه به فرمول ۷ و با توجه به این که قبل از اعمال نمو $\delta(\Delta\theta^{\#i})$ به ایستگاه $\#i$ ، این مقادیر به ایستگاه های قبلی اعمال شده اند، بنابراین فرمول ۷ را برای $\Theta^{\#i}$ جدید می توان به صورت رابطه ی ۱۲ نوشت:

$$\Theta_{new}^{\#i} = \frac{1}{\gamma} \left(\theta^{\#(i-1)} + \theta^{\#i} + \sum_{j=1}^{i-1} \delta(\Delta\theta^{\#j}) \right) \quad (12)$$

با استفاده از رابطه ی منحنی مشخصه (طبق شکل ۴) و با توجه به فرمول ۱۲، رابطه ی ۱۳ حاصل می شود:

$$\frac{\dot{w}^{\#i}}{\Delta\theta^{\#i}} = A\Theta_{new}^{\#i} + C \quad (13)$$

که در آن، A, C ضرایب منحنی مشخصه اند. بنابراین از روابط ۱۱ و ۱۳ نمو زاویه ی پروفیل هر ایستگاه با استفاده از فرمول ۱۴ محاسبه می شود:

$$\delta(\Delta\theta^{\#i}) = \frac{\bar{w} - \dot{w}^{\#i}}{A\Theta_{new}^{\#i} + C} \quad (14)$$

نمودار جریان مراحل تعیین اتوماتیک گل غلتک بهینه در شکل ۵ نشان داده شده است.

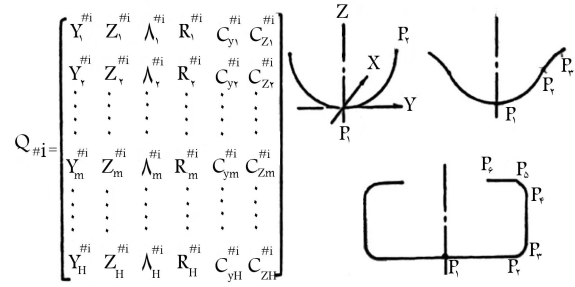
نتایج و بحث

با توجه به این که نرم افزار در انجام محاسبات اساساً از روش کیوچی بهره می گیرد، نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج کیوچی مقایسه شده اند. ورودی های جدول ۱ برای محصول لوله، با مشخصات $14/5mm \times t4/5mm$ که با ورودی های کیوچی

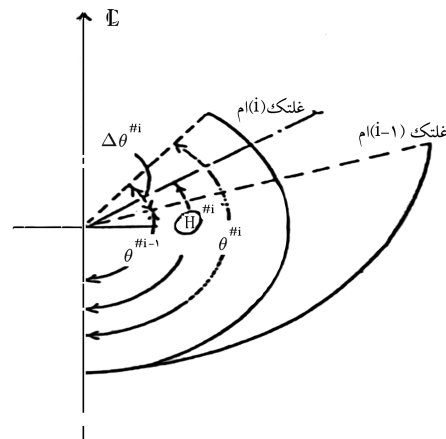
تنش و کرنش تحلیل می شود و نهایتاً محاسبه ی توان صورت می گیرد. زوایای پروفیل نیز در هر ایستگاه مطابق شکل ۳ تعریف می شوند. به این ترتیب منحنی مشخصه یی که بیانگر رابطه بین مقدار $\Theta^{\#i}$ و توان شکل دهی به ازای واحد زاویه ی شکل دهی $\left(\frac{\dot{w}^{\#i}}{\Delta\theta^{\#i}} \right)$ است به دست می آید. [۵]

$$\Theta^{\#i} = \frac{1}{\gamma} \left(\theta^{\#(i-1)} + \theta^{\#i} \right) \quad (7)$$

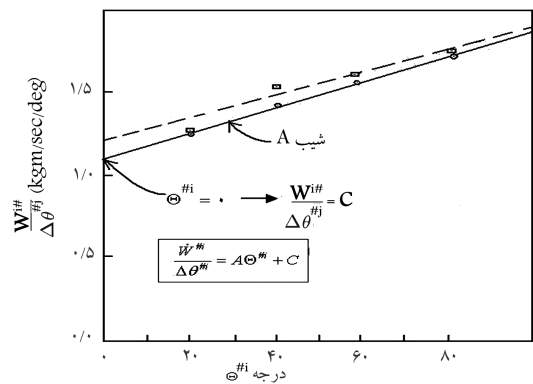
این روابط، معمولاً با توجه به مشخصات ابعادی و شکل محصول در نظر گرفته می شوند و تقریباً مستقل از مقدار زاویه ی پروفیل اختصاص یافته اند. در شکل ۴ این منحنی مشخصه نشان داده شده است. در این نرم افزار، در هر مرحله از محاسبات



شکل ۲. تعریف ماتریس پروفیل. [۵]



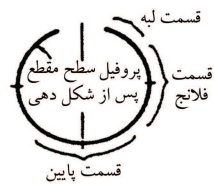
شکل ۳. تعریف زاویه ی پروفیل. [۵]



شکل ۴. منحنی مشخصه که بیانگر رابطه ی بین $\Theta^{\#i}$ و $\frac{\dot{W}^{\#i}}{\Delta\theta^{\#i}}$ است. [۵]

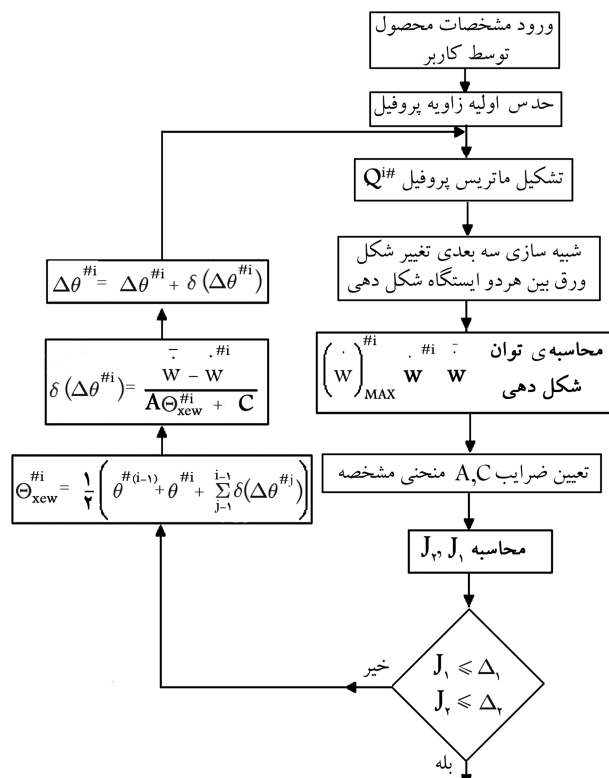
جدول ۲. ارزیابی پروفیل سطح مقطع نوار شکل داده شده. [۶]

حالت	سطح مقطع				
	برنامه ریزی عبور	زاویه پره	قسمت پایین	قسمت فلانج	قسمت لبه
حالت ۱	FR - ۱st	۳۰°	◆	◆	■
	FR - ۲st	۱۰°	◆	■	■
	FR - ۳st	۵°	◆	■	■
حالت ۲	FR - ۱st	۳۰°	◆	■	■
	FR - ۲st	۱۰°	■	■	■
	FR - ۳st	۵°	◆	■	■
حالت ۳	FR - ۱st	۳۰°	◆	■	■
	FR - ۲st	۱۰°	■	■	■
	FR - ۳st	۵°	■	■	■
حالت ۴	FR - ۱st	۲۰°	◆	◆	■
	FR - ۲st	۱۰°	◆	■	■
	FR - ۳st	۵°	◆	■	■
حالت ۵	FR - ۱st	۲۰°	■	■	■
	FR - ۲st	۱۰°	■	■	■
	FR - ۳st	۵°	■	■	■
حالت ۶	FR - ۱st	۲۰°	■	■	■
	FR - ۲st	۱۰°	■	■	■
	FR - ۳st	۵°	■	■	■
حالت ۷	FR - ۱st	۱۰°	◆	◆	★
	FR - ۲st	۵°	■	■	■
حالت ۸	FR - ۱st	۱۰°	■	■	★
	FR - ۲st	۵°	■	■	■
حالت ۹	FR - ۱st	۱۰°	■	■	■
	FR - ۲st	۵°	■	■	■
حالت ۱۰	FR - ۱st	۵°	◆	◆	★
حالت ۱۱	FR - ۱st	۵°	◆	◆	★
حالت ۱۲	FR - ۱st	۵°	■	◆	★



- : پروفیل سطح مقطع پس از شکل‌دهی خوب است؛
- ◆: خمش موضعی است؛
- ★: خمش ناکافی است.

از نرم‌افزار و نتایج کیوچی با هم مقایسه شده‌اند. اختلافات مشاهده شده در دو نتیجه به این دلیل است که در این تحقیق به خاطر طولانی شدن زمان محاسبه، هنگامی که پارامتر J_1 کوچک‌تر از 0.1 شود، برنامه متوقف می‌شود. بنابراین نتایج با حالت ایده‌آل تفاوت‌هایی دارند، ولی روند یکنواخت شدن توان منطقی به نظر می‌رسد. در ایستگاه اول، نسبت تغییر شکل کشسانی به خمیری نسبتاً زیاد است. بنابراین مقدار $\Delta\theta^{\#1}$ بزرگ‌تر از بقیه‌ی مراحل شکل‌دهی است (شکل ۶)، ولی از ایستگاه دوم تا پنجم به دلیل کرنش سختی، این تفاوت کم‌تر است. در ایستگاه ششم نیز توان شکل‌دهی به‌ازای واحد زاویه‌ی شکل‌دهی، نسبت به ایستگاه قبل کم‌تر است. زیرا در این ایستگاه علی‌رغم وجود شکل‌دهی بیشتر، کرنش کم‌تری نسبت به ایستگاه قبل اتفاق می‌افتد.



شکل ۵. نمودار جریان تحلیل و طراحی نرم‌افزار.

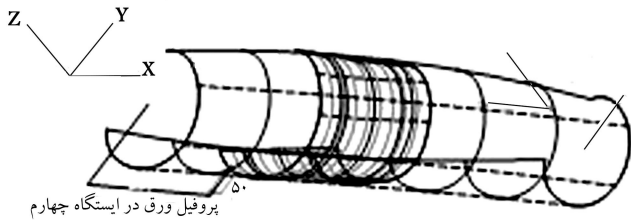
جدول ۱. ورودی‌های نرم‌افزار برای طراحی براساس معیار توان یکنواخت برای تولید محصول $\phi 53/1_{mm} \times t 4/5_{mm}$.

خواص مکانیکی	$E=21000 \text{ kg/mm}^2$ $H=80 \text{ kg/mm}^2$							
	$\nu=0.3$	تنش تسلیم $\sigma_s=315 \text{ kg/mm}^2$						
شرایط تغییر شکل	۸ = تعداد ایستگاه‌ها ۸۰۰ mm = فاصله بین ایستگاه‌ها ۴۰ m/min = سرعت							
شماره ایستگاه‌ها	#۱	#۲	#۳	#۴	#۵	#۶	#۷	#۸
زاویه پروفیل	۳۰°	۶۰°	۹۰°	۱۲۰°	۱۵۰°	۱۶۰°	۱۷۰°	۱۷۵°

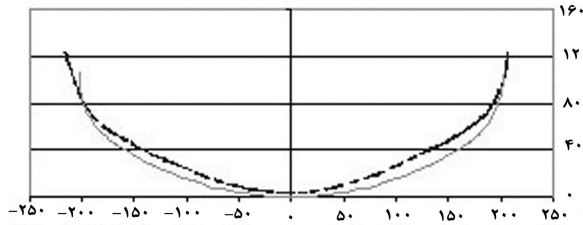
مطابقت دارند، به نرم‌افزار وارد شده‌اند تا با معیار یکنواخت بودن توان تغییر شکل، گل‌گلتک بهینه طراحی شود.

نوارهایی که به‌وسیله‌ی غلتک‌ها شکل داده می‌شوند هندسه‌ی نامنظم یا عیوبی هندسی دارند، و پروفیل‌های سطح مقطع‌شان دایره‌ی یکنواخت نیستند. خمیدگی بعضی از قسمت‌های سطح مقطع آن‌ها به‌اندازه‌ی کافی است، اما برخی قسمت‌های دیگر زیاد خم شده‌اند یا توزیع ضخامت دیواره در آن‌ها یکنواخت نیست. در نتیجه، در ایستگاه‌های آخر از غلتک‌های پره‌ی استفاده می‌شود تا بی‌نظمی پروفیل‌های سطح مقطع تغییر شکل داده شده، به‌طور قابل توجهی تصحیح شوند. [۶]

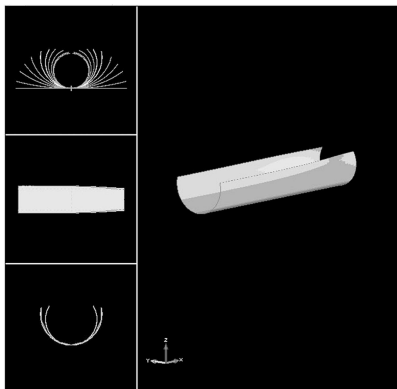
طبق بررسی‌های عملی انجام‌شده توسط کیوچی و با توجه به جدول ۲، بهترین حالت همان حالت ششم - با برنامه‌ریزی عبور توسط سه غلتک پره‌ی و زاویه‌ی پره ۲۰°، ۱۰° و ۵° درجه - است. به همین دلیل، در این نرم‌افزار مقدار $\theta^{\#i}$ در ایستگاه‌های ۶، ۷ و ۸ همواره ثابت بوده و تغییری نخواهند داشت. بنابراین، معیار یکسان بودن توان تغییر شکل در مورد $\Delta\theta^{\#1}$ تا $\Delta\theta^{\#6}$ اعمال شده است. در شکل ۶ نتایج حاصل



شکل ۷. مقاطع مدل شده پس از آزمون نقطه برداری و نمایش آن در محیط نرم افزار MDT برای ایستگاه چهارم محصول لوله‌ی ۱۴ اینچ شرکت سدید.



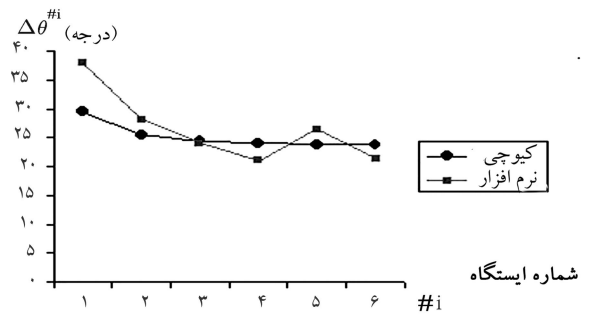
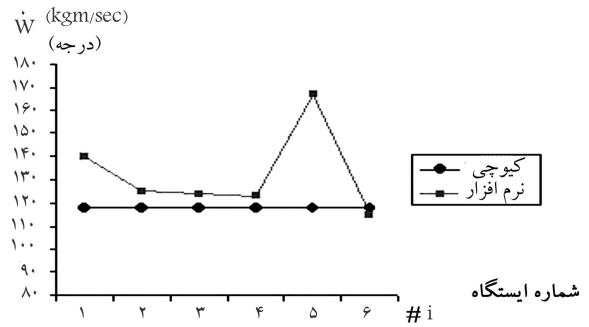
شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج تحلیل و آزمایش بین ایستگاه دوم و سوم، ۵۳۸ میلی‌متر بعد از ایستگاه دوم برای محصول لوله‌ی به قطر ۶ اینچ (واحدها برحسب میلی‌متر هستند).



شکل ۹. نمایش گل پروفیل به همراه شکل ورق بین دو ایستگاه معین توسط نرم افزار.

کاربرد عملی نرم افزار در صنعت

این نرم افزار، با استفاده از تحلیل کشسانی - خمیری و با قابلیت طراحی طبق معیار یکسان بودن توان تغییر شکل در بین ایستگاه‌ها، قادر به طراحی غلتک خط تولید لوله گرد است. علاوه بر موارد فوق، این نرم افزار قادر است با توجه به مشخصات ماشین که توسط کاربر وارد می‌شود، امکان یا عدم امکان تولید محصول مورد نظر توسط این ماشین را به کاربر اعلام کند. پس از طراحی غلتک‌های مورد نیاز نرم افزار قادر است نقشه‌ی ساخت غلتک‌ها، بوش‌ها و همچنین نقشه‌ی مونتاژی هر ایستگاه را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. تمامی مقادیر محاسبه شده توسط نرم افزار - مانند تنش و کرنش هر نقطه از ورق، شکل ورق در محل‌های دلخواه، میزان برگشت فزری، توان مصرفی در هر مرحله از شکل‌دهی، توان مصرفی کل و سرعت خط تولید - را نیز می‌توان به کاربر اعلام کرد. یک نمونه از خروجی نرم افزار در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج مقایر $\Delta\theta^{\#i}$ و توزیع $w^{\#i}$ بهینه شده حاصل از نرم افزار و کیوچی، با معیار یکنواخت بودن توان تغییر شکل برای محصول $537.1mm \times \phi$ (درمورد نرم افزار، با شرط $J_1 \leq 0.1$).

مقایسه‌ی مدل تغییر شکل نرم افزار با مدل واقعی

مدل تغییرشکلی که نرم افزار از ورق در بین ایستگاه‌ها شبیه‌سازی می‌کند، برای محصول لوله‌ی به قطر ۶ اینچ که در شرکت سدید در حال تولید بوده، با مدل واقعی آن مقایسه شده است. برای دست‌یابی به مدل واقعی تغییر شکل درمورد این محصول، در کارخانه‌ی سدید آزمایش نقطه برداری انجام شده است. مشخصات نقاط ورق تغییرشکل یافته بین ایستگاه‌ها با دقت ۰/۲ میلی‌متر و توسط دستگاه نقطه بردار RevPro تعیین شد. این نقاط با فرمت DXF از محیط نرم افزار CAD KEY به نرم افزار MDT منتقل شده‌اند تا در نهایت پس از پردازش، منحنی‌های گذرنده از نقاط ترسیم شوند. به علت واقعی بودن نقاط ثبت شده، از منحنی مکعبی^۳ به عنوان مناسب‌ترین منحنی گذرنده از نقاط استفاده شده است که در آن، پیوستگی از نوع C^2 بوده و منحنی از نوع درجه ۳ با دقت ۰/۵ میلی‌متر است. نمونه‌ی از این مدل در شکل ۷ و درمورد ایستگاه چهارم محصول لوله‌ی ۱۴ اینچ شرکت سدید، مشاهده می‌شود. در نهایت، براساس مقایسه‌ی انجام شده بین مدل واقعی ورق و مدل حاصل از نرم افزار (شکل ۸)، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج واقعی و تحلیل دیده می‌شود. عدم تقارن منحنی‌های آزمایش، به علت عدم دقت در ساخت غلتک‌ها و فرسودگی آن‌ها است. این مورد می‌تواند یکی از دلایل وجود اختلاف جزئی بین مدل تحلیل و آزمایش نیز باشد. از دیگر دلایل این اختلاف می‌توان به این نکته اشاره کرد که در مواردی به دلیل عدم دقت سطوح مورد نیاز، مانند سطوح کناری غلتک‌ها یا شیرهای آن‌ها، به ناچار از اندازه‌ی مربوط به ضخامت غلتک یا فاصله‌ی ایستگاه قید شده در نقشه‌های شرکت سدید استفاده شده است، که با اندازه‌ی واقعی اختلاف اندک داشته‌اند. این موارد خطاهایی در نتیجه ایجاد خواهند کرد.

نتیجه‌گیری

طراحی خط تولید فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، به صورت تجربی و در برخی موارد با تعداد زیادی سعی و خطا انجام می‌گیرد که خود موجب افزایش هزینه‌ی تولید می‌شود.

استفاده از علم مکانیک و تحلیل این فرایند، می‌تواند تعداد سعی و خطاها را کمینه سازد و امکان طراحی خط تولید محصولات جدید و متنوع‌تری را فراهم آورد و در نتیجه هزینه‌ی تولید را کاهش دهد. این تحقیق در زمینه‌ی تولید لوله انجام شده است و ارائه‌ی نتایج آن به صورت نرم‌افزار تجاری، گامی است در جهت پاسخ به نیاز صنایع.

پانویس

1. parametrize
2. Yamada M
3. cubic-spline

منابع

1. Mihara, Y.; Suzuki, K. and Yamanobe, I. "Roll forming of U-shaped ribs by a new rollers die forming process", *Advanced Technology of Plasticity*, **1**, pp. 428-432 (1984).
2. Amirian, Gh. "Design and manufacturing of rolls for pipes in the cold roll forming process", *MS.C. thesis*, Tarbiat Modarres University, (1996).
3. Matinpour, M. "Preparation of design software for circular pipes in cold roll forming process", *MS.C. thesis*, Tarbiat Modarres University, (2002).
4. Moslemi Naeeni, H. "Design of rolls for cold roll forming process of pipes by computer", *MS.C. thesis*, Tabiat Modarres University, (1994).
5. Kiuchi, M. and Koudabashi, T. "Roll forming of circular tube-automated design system of optimal roll profiles", International Conference Tubes and Energy Eurogress-Aachen, West Germany, pp. 1/4/1-1/4/15 (11-12 Oct. 1983).
6. Kiuchi, M. "Optimum design of fin-rolls and fin-pass-schedule of roll-forming of pipes", Tomorrows Tube, International Conference & Exposition, Birmingham England, (10-12 June 1986).