

مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی، تئوری و اجزای محدود برای فرایند کشش سیم مسی

محمد احمدپور^۱

دکتر حسن خادمی زاده^{۲*}

*نویسنده مسئول: khademizadeh@iaukhsh.ac.ir

چکیده

فرایند کشش سیم یکی از روش‌های شکل‌دهی در تهیه اجزای مکانیکی از قبیل پرچ، پیچ، سیم جوش است. در این مقاله، تئوری‌های رایج در تحلیل نظری فرایند کشش سیم مورد مقایسه با یکدیگر قرار گرفته است. تعیین نیروی کشش سیم مسی برای دو مرحله کاهش سطح مقطع به روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس از دستاوردهای این مقاله است. در این شبیه‌سازی مدل به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد، نیروهای کششی در هر دو مرحله کاهش سطح مقطع با روش‌های تجربی، نظری و اجزای محدود استخراج شده و مقایسه‌ای بین آنها صورت گرفته که همخوانی مطلوبی بین نتایج قابل مشاهده است.

واژه‌های کلیدی: کشش سیم، نیروی کشش، اجزای محدود، کاهش سطح مقطع، سیم مسی.

۱- کارشناس ارشد، مدرس دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۱- مقدمه

کشش^۱ یکی از فرایندهای شکل دادن است که اهمیت صنعتی فراوانی دارد. به کمک فرایند کشش سرد می توان به محصولاتی با سطح ظاهری و دقت ابعادی خوبی دست یافت. معمولاً در فرایند کشش، قطعه‌ای که ابتدا تحت عملیات نورد یا اکستروژن قرار گرفته، با به کار بردن یک نیروی کشش تک محوری از داخل یک قالب با شکل هندسی مورد نظر کشیده می شود. در این روش شکل دهی تغییر شکل پلاستیکی عمدتاً توسط نیروی فشاری جانبی که از نیروی عکس‌العمل دیواره منفذ قالب به شمش اولیه اعمال می شود، انجام می گیرد. فرایند کشش معمولاً برای تولید مفتول، سیم، لوله، پروفیل و اغلب در حالت سرد انجام می گیرد. در مواردی که میزان تغییر شکل در حد بالایی است، تغییر شکل به صورت گرم انجام پذیر است. در مواردی می توان با یک مرحله عبور از قالب به کاهش سطح مقطع بالایی (حدود ۵۰٪) دست یافت. در مورد سیم‌های با طول زیاد و قطر کم می توان با عبور متوالی سیم از قالب‌هایی که پشت سر هم قرار گرفته‌اند به اندازه نهایی رسید. کاهش سطح مقطع در هر قالب با توجه به کل کاهش سطح مقطع مورد نظر و اندازه منفذ هر یک از قالب‌ها انتخاب می شود. در فرایندهایی از کشش سرد که کاهش سطح مقطع بسیار بالایی مورد نظر می باشد، لازم است به منظور بر طرف نمودن اثر کار سختی، عملیات آنیل کردن برای تنش سیلان و افزایش شکل پذیری انجام شود. فرایند کشش سرد گاهی به منظور بهبود مرغوبیت سطح و دقت ابعادی و کسب خواص مکانیکی مورد نظر در مفتول‌ها، لوله‌ها و سیم‌ها با یک عبور نهایی انجام می گیرد. در فرایند کشش سیم فاکتورهایی از قبیل زاویه قالب، اصطکاک، نیروی کشش، سرعت کشش، نسبت کاهش سطح مقطع، کار سختی، دما تأثیر گذارند.

ساش [۱] نیروی کشش سیم را با در نظر گرفتن اثرات کار مربوط به تغییر شکل همگن و کار نیروی اصطکاک فرمول‌بندی کرد. همچنین سیبل [۱] در فرمول خود اثرات

تغییر شکل همگن و اصطکاک و پیچش غیر مفید را در نظر گرفت. پراگر و هودج [۲] قضیه حد بالا را فرمول‌بندی کردند. دراکر و گرین برگ [۳] در قضیه حد بالا ناپوستگی‌های سرعت را در نظر گرفتند. ولی اصول قضیه فوق قبلاً برای ماده کاملاً پلاستیک توسط هیل [۴] ارائه شده بود. مک لاین [۵] با استفاده از قالب‌های دو تکه‌ای، فشار متوسط قالب را به دست آورد. ویستریج [۱] روی سیم‌های مسی نازک که به راحتی روغنکاری می شوند و کار سختی ایجاد شده در آنها نیز قابل اغماض می باشد، آزمایشهای متعددی انجام داد و توانست محدوده ضریب اصطکاک سیم‌های مسی را از طریق آزمایش به دست آورد.

میجر [۶] نیروهای به دست آمده از تئوری‌های سیبل و ساش را با نیروهایی که از آزمایشهای ویستریج به دست آمده بود، مقایسه نمود. آتکینز و کدل [۷] با تحقیقات نشان دادند که در فرایند کشش سیم در محدوده معینی از نسبت کاهش سطح مقطع قالب می توان به طور تقریبی تنش محوری در امتداد ضخامت سیم را یکنواخت فرض نمود. آتکینز و کدل جزئیات کار سختی و کار اضافی در تئوری‌های کشش سیم را با یکدیگر تلفیق نموده و توضیحاتی در تفاوت بین این دو فاکتور ارائه کردند. ساوامی فاکدی و همکارانش [۸] تنش‌های پسماند فرایند کشش سیم را با استفاده از روش المان محدود محاسبه کردند. میچر و داوسون [۹] از روش المان محدود جهت به دست آوردن توزیع تغییر شکل غیر همسانگرد در فرایند کشش سیم استفاده نمودند.

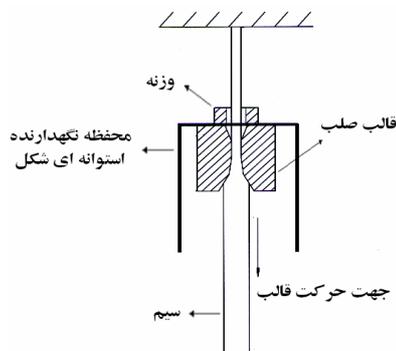
مورا کاوا و جین [۱۰] مزایای استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک^۲ محوری و شعاعی در قالب کشش سیم را مورد مطالعه قرار دادند. هایاشی و مورا کاوا [۱۱] فرایند کشش با ارتعاشات آلتراسونیک را توسط روش المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی نمودند. تیرنان و هیلری [۱۲] فرایند کشش سیم بدون قالب را مورد بررسی قرار دادند. آنها توسط یک مدل ریاضی، نمودار توزیع تنش و دما شرح دادند. ریو و همکارانش [۱۳] فرایندهای اصلی کشش از جمله کشش سیم و کشش ورق را توسط روش‌های مختلف مورد

جدول (۱) نتایج تست کشش تک محوری و خواص سیم مس آنیل شده

قطر سیم مسی	$d(mm)$			
۰/۹۳۱	۱/۰۲۵			
ضریب سختی کرنشی	(n)	۰/۸۷۶۸	۰/۷۹۶۲	
ضریب استحکام	$Pa (K)$	۷۵۱،۰۶۲،۹۲۹	۷۹۲،۳۲۲،۴۱۴	
تنش تسلیم	$kPa (Y)$	۲۹/۱	۴۱	
ضریب الاستیسیته	$GPa (E)$	۱۰۷	۱۰۷	
ضریب پواسون	(ν)	۰/۳۵۵	۰/۳۵۵	
چگالی	$\frac{kg}{m^3} (\rho)$	۸۹۶۰	۸۹۶۰	

۳- نتایج آزمایشگاهی کشش سیم مسی آنیل شده

در این آزمایش ساده، با استفاده از دو قالب کاهش یکی از قطر ۱/۰۲۵ میلیمتر به قطر ۰/۹۳۱ میلیمتر و دیگری از قطر ۰/۹۳۱ میلیمتر به ۰/۸۴۷ میلیمتر استفاده شده است. ابتدا سر سیم مسی، توسط دستگاه تیز کن که به شکل دو غلتک دارای شیارهای نیم دایره‌ای بوده، نازک گردید و از داخل قالب عبور داده شد. سپس با ثابت نگه داشتن سر سیم و قرار دادن محفظه‌ای روی قالب جهت قرار دادن وزنه‌ها روی آن، بتدریج وزنه‌ها افزایش داده شد، که در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۱) شماتیک نحوه انجام آزمایش کشش سیم

همچنین جهت روانکاری در طی این آزمایش، از آب صابون استفاده می‌شود که توسط یک افشانک بطور مداوم در محل ورود سیم به قالب، پاشیده می‌شود. لحظه‌ای که قالب روی سیم شروع به حرکت کرد. نیروی اعمالی توسط وزنه‌ها ثبت شد. این نیرو همان نیروی کشش سیم می‌باشد. همین روند برای هر دو قالب تکرار شد و نیروهای اعمال شده از طرف وزنه‌ها برای دو قالب ثبت شد. این نتایج برای دو مرحله

بررسی قرار دادند. نوراستاسوپون و یوشیدا [۱۴] اثر اندازه و ابعاد ناخالصی را بر روی سیم مسی بررسی نمودند.

بانبویج و همکارانش [۱۵] یک معادله تکرار پذیر برای حل مسئله کشش در فرایند کشش سیم ارائه نموده‌اند. فرشته مجذوبی و صنیعی [۱۶] در مورد بهینه‌سازی انرژی و در نتیجه کاهش هزینه فرایند کشش سیم تحقیق نموده‌اند و صحت موضوع را با مقایسه نمودن نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند.

در این مقاله روش‌های نظری موجود در فرایند کشش سیم و عوامل موثر در این فرایند بیان گردیده است و این فرایند توسط نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده و نیروی کشش برای دو مرحله کاهش سطح مقطع پیش‌بینی شده است. همچنین توسط یک روش آزمایشگاهی نیروی کشش برای دو قالب، استخراج شده و مقایسه‌ای بین این نتایج با نتایج روش‌های نظری مطرح شده و نتایج حاصله از روش المان محدود برای سیم مسی انجام شده است.

۲- خواص مکانیکی مس آنیل شده

متداول‌ترین روش برای تعیین خواص مکانیکی مواد آزمایش کشش تک محوری است. در این تحقیق دو نمونه سیم مسی آنیل شده با قطرهای ۱/۰۲۵ و ۰/۹۳۱ میلی‌متر مورد آزمایش کشش محوری قرار گرفت. نتایج تست کشش بر حسب تنش-کرنش مهندسی می‌باشد، ولی در معادلات ارائه شده و همچنین داده‌های ورودی نرم‌افزار ABAQUS، نیاز به مقادیر تنش-کرنش حقیقی است. بر این اساس ابتدا مقادیر تنش-کرنش حقیقی از روی مقادیر به دست آمده از تست کشش، محاسبه و توسط نرم‌افزار MATLAB بهترین منحنی که از نقاط مذکور می‌گذرد را با معادله POWER LAW یا همان فرم نمایی $Y = K\varepsilon^n$ جهت یافتن ضرایب K و n در معادله هلمن و لودویک، منطبق نموده که مقادیر K و n حاصل از تست کشش محوری، همچنین خصوصیات مورد نیاز برای سیم مسی آنیل شده در جدول (۱) آمده است.

توجه به رابطه کرنش حقیقی، مقدار کار ایدئال از رابطه ذیل قابل محاسبه است:

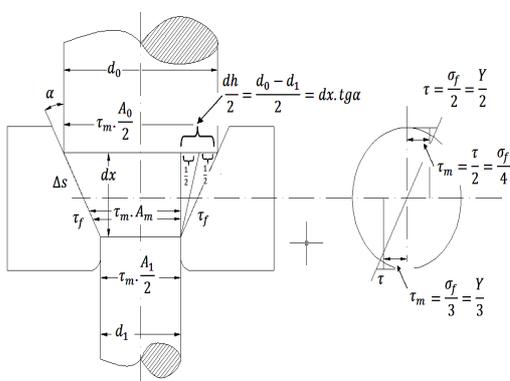
$$W_{id} = V\varepsilon Y_m = VY_m \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \quad (2)$$

که در این رابطه ε کرنش حقیقی، V حجم ماده کشیده شده، Y_m مقدار متوسط تنش تسلیم و W_{id} کار ایدئال^۲ است. کار یا انرژی اصطکاک^۳ W_f ، مقدار کاری است که در نتیجه وجود اصطکاک خارجی بین سطح تماس قطعه و قالب در منطقه تغییر شکل برای غلبه بر اصطکاک انجام می‌شود. این مقدار کار با توجه به شکل (۲) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$dW_f = \tau_f s \frac{dx}{\cos\alpha} \quad (3)$$

$$W_f = VY \frac{\mu}{\alpha} \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) = VY \frac{\mu}{\alpha} \varepsilon \quad (4)$$

که در آن τ_f تنش برشی ناشی از اصطکاک، Δs سطح مقطع تماس سیم با قالب و جهت ε در راستای کشش می‌باشد.



شکل (۲) نیروی کشش با توجه به اتلاف انرژی برای غلبه بر اصطکاک خارجی و انرژی برشی داخلی [۱۷]

مقدار کاری که حین تغییر شکل به ازای تنش برشی متوسط داخلی^۴ یا W_s در جابه‌جایی ذرات ماده برای تغییر جهت سیلان با زاویه α انجام می‌گیرد را می‌توان با توجه به شکل (۲) به صورت زیر محاسبه نمود:

$$dW_s = F_s dh = 2 \left(\tau_m \frac{A_0}{2} + \tau_m \frac{A_1}{2} \right) \frac{dh}{2} \quad (5)$$

عبور در جدول (۲) آورده شده است. قالب‌های استفاده شده از جنس تنگستن کار باید بوده و دارای زاویه ۲۰ درجه می‌باشند.

جدول (۲) نتایج تست کشش سیم مسی آتیل شده

مرحله عبور سیم	اول	دوم
قطر ورودی سیم (d_0) mm	۱/۰۲۵	۰/۹۳۱
قطر خروجی سیم (d_1) mm	۰/۹۳۱	۰/۸۴۷
نیروی کشش قالب Kgf	۶/۵۰	۶/۰۰
نیروی کشش قالب N	۶۳/۷۶	۵۸/۸۶
درصد کاهش سطح (r)	۱۷/۵٪	۱۷/۲٪

۴- تئوری‌های استفاده شده و نتایج حاصله

نسبت کاهش سطح مقطع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r = 1 - \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{1}{1-r}$$

که در آن A_0 و A_1 به ترتیب سطح مقطع اولیه و سطح مقطع نهایی تغییر شکل یافته می‌باشند.

در صنعت تولید سیم، رابطه فوق یکی از رابطه‌های مهم برای یافتن نسبت قطر سیم ورودی به قطر سیم خروجی است.

۴-۱- تئوری سیبل^۱

این تئوری بر اساس مجموع انرژی یا کار لازم برای تغییر شکل می‌باشد که در آن انرژی لازم جهت تغییر شکل همگن (انرژی ایدئال)، انرژی برای غلبه بر تنش‌های داخلی و انرژی لازم جهت غلبه بر اصطکاک خارجی مورد توجه قرار گرفته است [۱]. در حالتی که تغییر شکل بدون اتلاف انرژی باشد، (توجه به اینکه کار انجام شده در واحد حجم برای کاهش سطح مقطع از A_0 به A_1 تحت بارگذاری کششی با سطح زیر منحنی تنش-کرنش حقیقی در محدوده کرنش‌های مورد نظر برابر است یعنی $w_{id} = \int \sigma d\varepsilon$) با

2- Ideal Work of Energy

3- Frictional Work of Energy

4- Shear Deformation Energy

1- Siebel Method

۴-۳- رابطه لامبرت^۲

لامبرت برای به دست آوردن نیروی کشش در فرایند کشش سیم رابطه زیر را پیشنهاد نمود [۱۸]:

$$F = A_1 Y_m \left\{ 1 + \left(1 - \frac{0.5 \ln \frac{1}{1-r}}{1-r} \right) \mu \cot \alpha \right\} \left\{ 0.5 \sin \alpha + \left(0.91 + 0.12 \sin^2 \alpha \right) \ln \frac{1}{1-r} \right\} \quad (11)$$

مقادیر نیروی کششی این تئوری‌ها برای ضرایب مختلف اصطکاک را با نتایج آزمایشگاهی در دو حالت عبور اول و دوم مقایسه نموده و مقدار خطا محاسبه شده است. از مقایسه این نتایج، برای سیال روانکار آب-صابون ضریب اصطکاک برابر ۰/۱۵ انتخاب می‌شود. در جدول (۳) نتایج عددی مربوط به نیروی کششی تئوری‌های ارائه شده برای مراحل عبور اول و دوم، آمده است.

جدول (۳) مقادیر نیروی کشش از تئوری‌های ارائه شده برحسب نیوتن

پیو		سبیل		لامبرت		تئوری
دوم	اول	دوم	اول	دوم	اول	مرحله عبور
۳۹/۱	۳۹/۶	۴۴	۴۸/۷	۴۰	۴۴/۲	$\mu = 0.05$
۴۸/۵	۴۹/۲	۵۰/۷	۵۶/۱	۴۸/۱	۵۳/۲	$\mu = 0.10$
۵۷/۸	۵۸/۷	۵۷/۳	۶۳/۴	۵۶/۳	۶۲/۲	$\mu = 0.15$
۶۷/۲	۶۸/۲	۶۴	۷۰/۸	۶۴/۵	۷۱/۲	$\mu = 0.20$
۷۶/۶	۷۷/۷	۷۰/۶	۷۸/۲	۷۲/۶	۸۰/۲	$\mu = 0.25$

۵- روش المان محدود و نتایج حاصل

در شبیه‌سازی فرایند کشش سیم مسی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. جهت کاهش زمان حل، شبیه‌سازی انجام شده به صورت متقارن محوری و حالت Explicit می‌باشد و طبق پیشنهاد نرم‌افزار، المان CAX4R که یک المان چهارگره با مرتبه هندسی خطی و قابلیت انتگرال کاهش یافته^۳، انتخاب شده است. ضریب اصطکاک ۰/۱۵ از نوع رفتار تماس، پنالتی^۴ و قالب به صورت کاملاً صلب^۵ در نظر گرفته شده است.

$$W_s = \frac{2}{3} W_{id} \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (6)$$

که τ_m حد متوسط تنش برشی و F_s نیروی برشی است. بنابراین مجموع کار یا انرژی به کار برده شده در عملیات کشش طبق رابطه زیر که معروف به رابطه سیبل است برابر است با [۱۷]:

$$W = W_{id} + W_f + W_s = V_m \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\varepsilon} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \quad (7)$$

نیروی کشش از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = A_1 Y_m \left(\ln \frac{1}{1-r} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{1}{1-r} + \frac{2}{3} \alpha \right) \quad (8)$$

۴-۲- رابطه پیو^۱

این رابطه بیشتر به اثر زاویه قالب در به دست آوردن نیروی کششی در فرایند کشش سیم پرداخته است و به صورت ذیل می‌باشد:

$$P_{R_1} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} Y d\varepsilon, \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right)$$

$$P_H = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} Y d\varepsilon, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \ln R, \quad R = \frac{A_0}{A_1}$$

$$P_{R_2} = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_3} Y d\varepsilon, \quad \varepsilon_3 = 2\varepsilon_1 + \ln R$$

$$P = P_{R_1} + P_H + P_{R_2} = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_3} Y d\varepsilon \quad (9)$$

که در رابطه فوق P همان تنش کششی است یعنی:

$$\frac{W}{V} = \int_0^{\varepsilon} Y d\varepsilon, W = FL_1, V = A_1 L_1$$

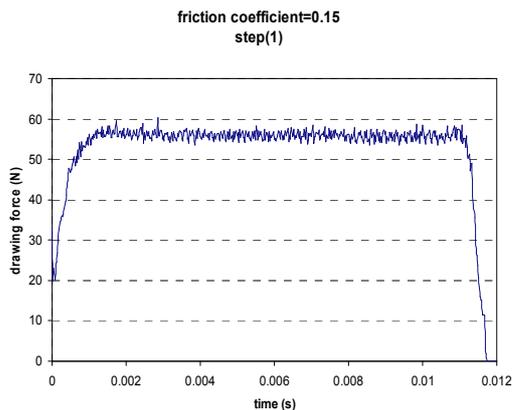
$$\frac{FL_1}{A_1 L_1} = \int_0^{\varepsilon} Y d\varepsilon, \quad P = \int_0^{\varepsilon} Y d\varepsilon$$

و ε کرنش حقیقی در راستای کشش سیم است. در ادامه برای نیروی کششی سیم در خروجی قالب و با در نظر گرفتن کارسختی $Y = K\varepsilon^n$ و انتگرال گیری خواهیم داشت:

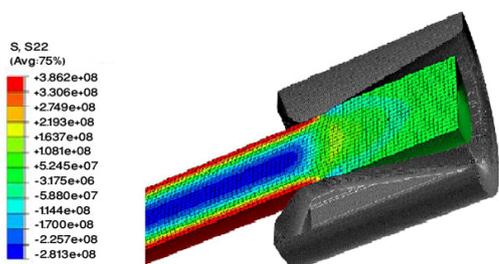
$$F = A_1 \left(1 + \frac{\mu R \ln R}{\sin \alpha (R-1)} \right) \frac{K \varepsilon_3^{n+1}}{n+1} \quad (10)$$

2- Lambert
3- Reduced Integration
4- Penalty
5- Rigid

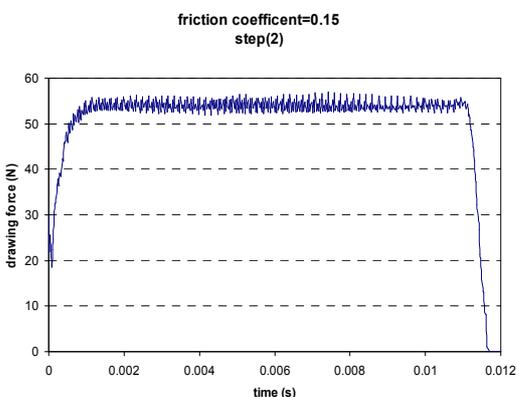
1- Pugh Method



شکل (۶) منحنی نیروی کشش سیم در طی فرایند کشش در مرحله عبور اول با $\mu=0.15$



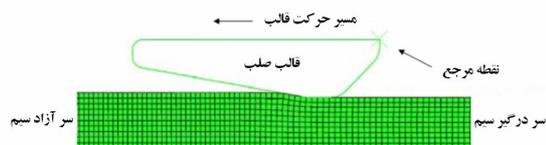
شکل (۷) نمودار توزیع تنش کششی در مرحله عبور دوم با $\mu=0.15$



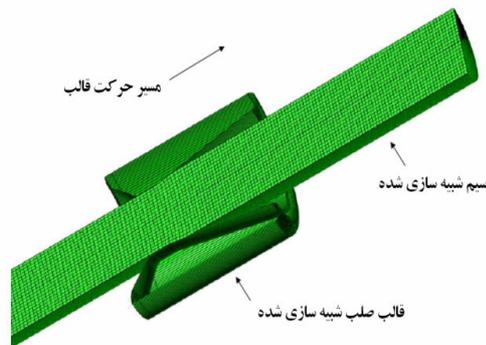
شکل (۸) منحنی نیروی کشش سیم در طی فرایند کشش در مرحله عبور دوم با $\mu=0.15$

۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود با نتایج روش‌های نظری و تأیید صحت شبیه‌سازی

با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش‌های آزمایشگاهی و المان محدود در مقایسه با نتایج نظری دارای خطای کمتر از ۱۰٪ می‌باشد که این نتایج قابل قبول بوده، لذا با این مقایسه



شکل ۳: مدل‌سازی فرایند کشش سیم



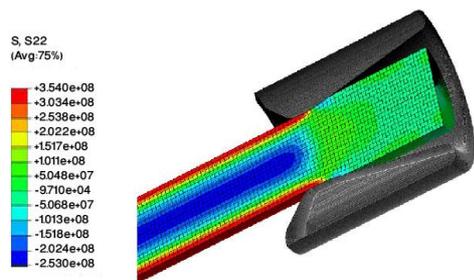
شکل (۴) شماتیک سه‌بعدی برش خورده فرایند کشش سیم

نتایج به‌دست آمده از روش المان محدود به‌صورت کانتور تنش کششی و نمودار نیروی کششی به‌دست می‌آید. همچنین نیروهای کششی برای مراحل عبور اول و دوم در جدول (۴) برای ضرایب اصطکاک مختلف آورده شده است.

جدول(۴)مقادیر نیروی کششی از روش المان محدود

مرحله عبور	اول	دوم
ضریب اصطکاک μ	نیرو (N)	نیرو (N)
۰/۰۵	۴۰/۱۷	۳۸/۹۴
۰/۱۰	۵۰/۱۰	۴۷/۸۸
۰/۱۵	۵۷/۶۵	۵۴/۸۶
۰/۲۰	۶۹/۱۳	۶۵/۲۱
۰/۲۵	۷۹/۲۰	۷۲/۹۱

تنش کششی برای ضریب اصطکاک $\mu=0.15$ به صورت کانتور و نمودار نیروی کششی برای مراحل عبور اول و دوم در شکل‌های (۵) الی (۸) آورده شده است.



شکل (۵) نمودار توزیع کششی در مرحله عبور اول با $\mu=0.15$

۱. از مقایسه نتایج روش‌های نظری موجود با نتایج آزمایشگاهی، می‌توان دریافت که روش‌های نظری پیو، سیبل و لامبرت از مقدار خطای کمتری نسبت به سایر روش‌های نظری برخوردار می‌باشند.

۲. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج روش‌های نظری پیو، سیبل و لامبرت، همچنین برای سیال روانکار آب - صابون می‌توان مشاهده نمود، کمترین خطا مربوط به $\mu=0/15$ نسبت به دیگر ضرایب اصطکاک است. پس برای تحلیل به روش المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS، و ضریب اصطکاک $\mu=0/15$ در نظر گرفته می‌شود.

۳. می‌توان از مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش المان محدود با نتایج آزمایشگاهی و روش‌های نظری صحت نتایج را در $\mu=0/15$ به‌دست آورد. با تأیید صحت این نتایج می‌توان به نتایج به‌دست آمده از روش المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS اعتماد نمود.

علائم و نمادها

A_0	مساحت مقطع ورودی mm^2
A_1	مساحت مقطع خروجی mm^2
E	ضریب الاستیسیته Pa
F_S	نیروی برشی N
K	ضریب استحکام Pa
n	توان نمایی سختی کرنشی
P	تنش کششی Pa
r	نسبت کاهش سطح مقطع
Δs	سطح مقطع تماس سیم با قالب mm^2
V	حجم ماده کشیده شده mm^3
Y	تنش سیلان Pa
Y_m	تنش سیلان میانگین Pa
W	مقدار کل کار $N.m$
W_f	مقدار کار اصطکاک $N.m$
W_{id}	مقدار کار ایدنال $N.m$
W_s	مقدار کار نیروی داخلی $N.m$
ν	ضریب پواسون

می‌توان به نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار ABAQUS در دیگر تحلیل‌های این فرایند اعتماد نمود. نتایج مقایسه انجام شده برای عبور اول و دوم در جداول (۵) و (۶) آمده است.

جدول (۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی، تئوری و المان محدود برای $\mu=0/15$ در مرحله عبور اول

روش	نیروی کشش N (۴)	المان محدود با روش‌های نظری	
		درصد خطای بین روش‌های نظری	درصد خطای بین روش‌های نظری
آزمایشگاهی	۶۳/۷۶		
المان محدود	۵۷/۶۵		
پیو	۵۸/۷۰	۱/۸۲	۷/۹۳
سیبل	۶۳/۴۰	۹/۹۰	۰/۵۶
لامبرت	۶۲/۲۰	۷/۹۰	۲/۴۹

جدول ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی، تئوری و المان محدود برای $\mu=0/15$ در مرحله عبور دوم

روش	نیروی کشش N (۴)	المان محدود با روش‌های نظری	
		درصد خطای بین روش‌های نظری	درصد خطای بین روش‌های نظری
آزمایشگاهی	۵۸/۸۶		
المان محدود	۵۴/۸۶		
پیو	۵۷/۸۰	۵/۳۶	۱/۸۰
سیبل	۵۷/۳۰	۴/۴۴	۲/۶۵
لامبرت	۵۶/۳۰	۲/۶۲	۴/۳۵

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نتایج آزمایشگاهی برای به‌دست آوردن نیروی کشش قالب در فرایند کشش سیم با یک آزمایش ساده به‌دست آمده است. همچنین برای شرایط آزمایش، به کمک تئوری‌های موجود و روش المان محدود (شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار ABAQUS)، تنش کششی و در نهایت نیروی کشش قالب محاسبه شده است. با بررسی نمودارها، شکل‌ها و جداول ارائه شده مربوط به این نتایج، و مقایسه آنها با یکدیگر می‌توان به نتایج ذیل اشاره نمود.

- | | | |
|--|---------------|------------------------------------|
| [12] Tiernan P., Hillery M.T., Dieless wire drawing an experimental and numerical analysis, <i>J. Mater. Tech.</i> 155-156, 2004, pp. 1178-1183. | α | نیم زاویه قالب |
| [13] Rubio E.M., Camacho A.M., Calculation of the forward tension in drawing processes, <i>J. Mater. Tech.</i> 162-163, 2005, pp. 551-557. | ε | کرنش حقیقی |
| [14] Norasethasopon S., Yoshida K., Influences of inclusion shape and size in drawing of copper shaped-wire, <i>J. Mater. Tech.</i> 172, 2006, pp. 400-406. | μ | ضریب اصطکاک |
| [15] Bubnovich V.I., Vivancos Calvet J., Gonzalez Rojas H. A., A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process, <i>J. Material Technology, Vol.</i> 198, 2008, pp. 93-98. | σ_x | تنش کششی عمودی Pa |
| [16] Majzoobi G.H., Fereshteh Saniee F., investigations into the effect of redundant shear deformation in bar drawing, <i>J. Mater. Tech.</i> Vol. 201, 2008, pp. 133-137. | τ_f | تنش برشی ناشی از نیروی اصطکاک Pa |
| [17] [۱۷] تویسرکانی ح.، ۱۳۸۱، شکل دهی فلزات، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان. | τ_m | تنش برشی متوسط Pa |

مراجع

- [1] Mellor P.B., Johnson W., Engineering Plasticity, Van Nostrand Reinhold Company, London, 1972.
- [2] Prager W., Hodge P.G., A New Theory of Plastic Solids, Chapman and Hall, London, 1951.
- [3] Draker D.C., Green berg W., 1951, The safety factor of an elastic-plastic body in plane strain, *J. Applied Mechanics, Trans. ASME*, Vol. 73, 1951, pp. 371-378.
- [4] Hill J., 1950, Mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, London
- [5] Mac Lellian, G.D.S., Some friction effects in wire drawing, *T. Inst-Metal*, 1953, Vol. 81, pp.1-13.
- [6] Majors H.J.R., 1955, Studies in cold drawing, *Trans. ASME*, Vol. 78, pp. 79.
- [7] Atkins A.G., Caddell R.M., 1968, The influence of reduction work when drawing rod through conical dies, *J. Int. Mesh. Sci.*, Vol. 10, pp. 15.
- [8] Sawamiphakdi K., Kropp P.K., Lahoti G.D., 1988, Investigation of residual stress in drawn wire by the finite element method, *Trans. ASME.*, Vol. 8, pp. 117-122.
- [9] Mathur K.K., Dawson P.R., 1990, Texture development during wire drawing, *J. Eng. Mater Tech. Trans. ASME.*, Vol. 112, N. 3, pp. 292-297.
- [10] Masao M., Masahiko J., 2001, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies the wire drawing process, *J. Mater. Tech.* 113, pp. 81-86.
- [11] Hayashi M., Masahiko J., Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method (FEM), *J. Mater. Tech.* Vol. 140, 2003, pp. 30-35.