مقایسه تجربی و عددی معادلات ساختاری در رفتار فلز مس در نرخ کرنش متوسط با استفاده از فرایند کشش سیم

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران اشکان محمود اقدمی مهنام داودی.*

چکیدہ

این مقاله به بررسی میزان صحت پیش بینی رفتار مواد با استفاده از دو معادله ساختاری جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ در فرایند کشش سیم مسی پرداخته است. نیروهای کشش در فرایند کشش سیم در شرایط مختلفی از سرعت کشش و درصد کاهش توسط نیروسنج متصل به دستگاه کشش سیم اندازه گیری شدند. شبیه سازی المان محدود فرایند کشش سیم مطابق با شرایط تجربی با استفاده از معادلات جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ انجام شد. کد معادلات ساختاری مذکور در زبان فورترن در قالب زیر برنامه VUHARD نوشته شده و در مسیر حل نرم افزار قرار داده شد. از نیروی کشش سیم اندازه گیری شده در آزمایشهای تجربی به عنوان معیاری برای صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی استفاده شده است. با مقایسه نیروها مشاهده گردید که نتایج حاصل از معادله زرلی- آرمسترانگ نسبت به معادله جانسون- کوک نتایج حاصل از شبیه سازی استفاده شده است. با مقایسه نیروها مشاهده گردید که نتایج شبیه سازی مندور در زبان فورترن در قالب زیر برنامه VUHARD نوشته شده و در مسیر حل نرم افزار قرار داده شد. از نیروی کشش سیم اندازه گیری شده در آزمایشهای تجربی به عنوان معیاری برای صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی استفاده شده است. با مقایسه نیروها مشاهده گردید که نتایج حاصل از معادله زرلی- آرمسترانگ نسبت به معادله جانسون- کوک نتایج نزدیکتری به نتایج تجربی دارد و در برخی موارد نیروهای کشش به دست آمده از شبیه سازی دقیقا منطبق بر نتایج تجربی هستند و این نشان دهنده دقت بالای مدل شبیه سازی ارائه شده و معادلات به کار گرفته شده است.

Experimental and Numerical Comparison of Constitutive Equations Describing Cooper Behavior in Moderate Strain Rate Using Wire Drawing Process

A. Mahmoud AghdamiDepartment of Manufacturing Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of
Tabriz, Tabriz, IranB. DavoodiSchool of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this article the prediction accuracy of Johnson-Cook and Zerilli- Armstrong constitutive equations in describing materials behavior in copper wire drawing process moderate were investigated. Wire drawing force was measured in different combinations of drawing speed and areal reductions using a load cell connected to the drawing die. Simulation of wire drawing process according to experimental test were done using Johnson-Cook and Zerilli- Armstrong constitutive equations. A VUHARD subroutine was developed to introduce the constitutive equations to finite element code. Drawing force was considered as a parameter to compare the simulation with experimental results than Johnson- Cook equation and in some circumstances it completely fits on experimental results. This shows the great accuracy of simulation and constitutive models.

Keywords: Dynamic behavior, Constitutive equation, Johnson-cook, Zerilli-Armstrong, Wire drawing.

۱– مقدمه

کشش سیم یکی از رایجترین فرآیندها برای تولید مواد مختلف با شکلهای متفاوت از قبیل: سیمجوش، میخ پرچ، سیم و ... میباشد [۱] در این فرآیند سطح مقطع سیم با عبور از قالبهای مخروطی شکل و اعمال نیروی فشاری کاهش مییابد (شکل۱).

پیش بینی جریان ماده در طول فرآیند بهمنظور بهینه نمودن توزیع کرنش و همچنین ساخت نمونه با خواص مکانیکی مطلوب از موارد مهم و قابل توجه است. به منظور مطالعه رفتار مواد در تغییر شکلهای با نرخکرنش مختلف و همچنین تشریح دقیق رفتار ترمو-

ویسکوپلاستیک^۱ فلزات از معادلههای ساختاری استفاده میگردد. این معادلهها رابطه بین تنش سیلان با متغیرهایی نظیر کرنش، نرخ کرنش و دما را توصیف میکنند. $\sigma_{vield} = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, history)$ (۱)

¹Thermo-Viscoplastic

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: bdavoodi@tabrizu.ac.ir تاریخ دیافت: ۹۷/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۰



امروزه چندین نوع معادلهی ساختاری توسعه یافتهاند که عمدتاً شامل دو گروه میشوند:

مدلهای پدیدارشناختی^۱ : در این مدلها تنش سیلان ماده بر اساس مشاهدههای تجربی تعریف میشود که شامل توابع ریاضی با عدم پیش زمینه فیزیکی برای تطبیق با مشاهدههای تجربی میباشد. مدل-های پدیدارشناختی توسط تعداد ثوابت کم ماده و آسانی کالیبراسیون توصيف مى گردند. با اين حال از مشخصه هاى اين مدل ها، زمينه هاى کاربردی محدود و انعطافپذیری پایین میباشد. یکی از معروفترین و پرکاربردترین مدل های ساختاری در این گروه، معادله جانسون- کوک [۲] میباشد. مطالعات چندی برای تکمیل و یا رفع نواقص این مدل انجام شده است. برای مثال مهم ترین ایراد وارده بر معادله جانسون-کوک مجزا بودن پارامترهای مربوط به کرنش سختی، نرخ کرنش و گرما نرمی در این مدل می باشد [۳ و ۴]. لین [۵] با افزایش تعداد ضرایب معادله جانسون- کوک و برقراری ارتباط ریاضی بین عبارات مربوط به نرخ کرنش و دما سعی کرد این نقیصه را تا حدودی برطرف کند. تان^۳ [۶] تغییراتی را در نمای عبارات مربوط به کرنش سختی اعمال کرد و آن را تابعی از نرخ کرنش قرار داد. یکی دیگر از مدلهای نسبتا جدید در این گروه از معادلات ساختاری، مدل خان [۷] میباشد. این مدل مانند مدل جانسون- کوک دارای ضرایب کم میباشد. در این مدل سعی شده است تا یکی دیگر از نقایص معادله جانسون- کوک برطرف شود. نرخ کرنش سختی در معادله جانسون-کوک رابطه مستقیمی با نرخ کرنش دارد. یعنی با افزایش نرخ کرنش، نرخ کرنش سختی نیز با تابع ضرب افزایش مییابد. در حالی در برخی از مواد مانند تانتالیم این اثر برعکس بوده و با افزایش نرخ کرنش، نرخ کرنش سختی کاهش مییابد [۸]. خان در اولین تغییر معادله خود نرخ کرنش مرجع را به معادله اضافه کرد[۹]. سپس با اضافه کردن ضرایب مربوط به اندازه دانه سعى كرد مدل خود را بهبود بخشد [١٠].

مدل های بر اساس ریز ساختار: این مدل ها بر اساس جنبه فیزیکی رفتار مواد است، بطوری که اغلب بر اساس نظریه ترمودینامیک و

سینتیک لغزش توسعه یافتهاند. در مقایسه با مدلهای پدیدارشناختی دارای تعداد ثوابت بیشتری هستند، بنابراین کاربرد این معادلهها پرهزینه است. در مقابل، رفتار ماده را با صحت بالا پیش بینی میکنند و در محدوده گستردهای از شرایط بارگذاری کاربرد دارند. یکی از معادلات اولیه و اصلی در این گروه، مدل زرلی- آرمسترانگ^۵ ZA میباشد [۱۱]. در این مدل تنش سیلان مواد بر اساس ساختار شبکه میباشد آا]. در این مدل تنش سیلان مواد بر اساس ساختار سیلان ماده به دو بخش گرمایی^۷ و غیر گرمایی^۸ تقسیم شد. بخش گرمایی تنش سیلان مربوط به نابهجاییهایی است که با افزایش دما میباشد که گرما تاثیری در مقدار این تنش ندارد. همین رویکرد در میباشد که گرما تاثیری در مقدار این تنش ندارد. همین رویکرد در میباشد که گرما تاثیری در مقدار این تنش ندارد. همین رویکرد در میباشد که گرما تاثیری در مقدار این تنش ندارد. همین رویکرد در میباشد که گرما تاثیری در مقدار این تنش ندارد. همین رویکرد در میباشد که گرما تاثیری دارتی و غیر گرمایی آن دارای ضرایبی نیز از دو بخش حرارتی و غیر گرمایی تشکیل شده که بخش غیر است که نشان دهنده میزان نابهجایی با افزایش میزان کرنش پلاستیک است.

دو عامل تعیین کننده بسیار سخت برای انتخاب بین هر دو گروه، سادگی در تعیین ثوابت و صحت در توصیف رفتار ماده است.

مطالعات دیگری نیز به مقایسه و بررسی صحت معادلات ارائه شده در هر دو گروه از معادلات پرداختهاند. به طور مثال هانگ^{۱۱} [۱۵] مدلهای جانسون- کوک و آرینیوس^{۱۲}را در تغییر شکل گرم فولاد بررسی کردهاند. در این بررسی، نتایج حاصل از معادله جانسون- کوک تطابق چندانی با نتایج تجربی نداشته و تنها در نقطه مرجع نتایج معادله جانسون- کوک به یافتههای تجربی نزدیکتر بوده است. در حالي كه معادله آرينيوس نتايج نزديكتري ارائه داده است. تحقيق مشابهی نیز توسط تانیمورا^{۱۳} [۱۶] انجام گرفته است. در این مقاله مروری نشان داده شده که در برخی از موارد معادلات معروف و مرسوم مانند جانسون-کوک، زرلی-آرمسترانگ از نتایج تجربی دور میشوند. بونورا^{۱۴} و همکاران [۱۷] مدلهای جانسون-کوک و ام آر کی^{۱۵} را در آزمون اکستروژن کشش دینامیکی مس بررسی کردند. در این تحقیق مشاهده شد که با استفاده از مدل ام آر کی که بر اساس ریز ساختار ماده توسعه داده شده است رفتار دینامیک فلز مس را میتوان با دقت بسیار بالایی مدلسازی کرد. هی^{۱۶} و همکارانش [۱۸] از معادلات جانسون-کوک، جانسون-کوک بهبود یافته و آرینیوس برای شبیه سازی پرس گرم فولاد 20CrMo استفاده کردند که نتایج به دست

⁸ A thermal

¹² Arrehehius

¹Phenomenological

² Lin

³ Tan

⁴ Khan

⁵ Zerilli- Armstrong

⁶ Bonder Parton

⁷ Thermal

⁹ Nemat- Naser Li

¹⁰ Voyiadjis, Abed

¹¹ Hang

¹³ Tanimura

¹⁴ Bonora

¹⁵ MRK

¹⁶ He

آمده نشان داده است که در این فولاد آلیاژی نیز معادله جانسون-کوک قادر به پیش بینی دقیق رفتار ماده نیست. هو^۱ [۱۹] چندین معادله ساختاری برای بررسی رفتار فلز مس خالص مورد بررسی قرار داد. او به این نتیجه دست یافت که برای به دست آوردن نتایج دقیق از معادلات ساختاری، باید معادلات را بر اساس نقاط ضعف و قوتشان در فرایندهای مختلف استفاده کرد.

مدل جانسون-کوک و زرلی- آرمسترانگ در تشریح جریان و رفتار کرنش سختی ماده در نرخهای کرنش پایین و دمای نزدیک به محیط عملکرد خوبی دارند [۲۰]. بنابراین، برای پوشش دادن هر دو گروه معادلههای تجربی و فیزیکی و همچنین با ملاحظهی محدوده بارگذاری در فرآیند کشش سیم (دمای محیط و نرخ کرنش پایینتر از ^{۲۰} s⁻¹) این دو مدل برای پیشبینی جریان فلز مسی در این فرآیند انتخاب شدهاند.

در مقاله حاضر فرایند کشش سیم فلز مس در نرخ کرنشهای متوسط [۲۱] و درصد کاهش مختلف مقاطع انجام و نیروی کشش در هر آزمایش توسط نیروسنج در طول فرایند کشش اندازه گیری و ثبت شد. فرایند کشش سیم با همان شرایط انجام شده در آزمایشهای تجربی در نرم افزار المان محدود شبیه سازی شد. در شبیه سازیها از معادلات ساختاری جانسون-کوک، زرلی- آرمسترانگ و خان برای بیان رفتار ماده استفاده شده و ضرایب این معادلات برای فلز مس از منابع موجود استخراج شدند. برای معرفی این معادلات برای فلز مس از منابع نویسی ویوهارد^۲ استفاده و برای هر معادلا ساختاری کد مخصوص به آن توسعه داده شده است. در نهایت نیروهای کشش به دست آمده از آزمایشهای تجربی و شبیه سازی با هر معادله ساختاری با یکدیگر مقایسه شده و میزان انحراف آنها با نتایج تجربی محاسبه شده است. از مقایسه نتایج، معادله ساختاری که نتایج نزدیک تری نسبت به یافتههای تجربی داشته باشد مشخص شده و دلایل نزدیکی و دوری نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

دستگاه کشش مورد استفاده در این تحقیق، در شکل ۲ نشان داده شده است.



¹ Xu

² VUHARD

این دستگاه دارای الکتروموتور سه فاز ۲۲۷ کیلووات بوده که توسط یک عدد تسمه و یک جفت پولی چهار سرعته نیرو را از الکتروموتور به جعبه دنده انتقال میدهد. خروجی جعبه دنده توسط چرخ زنجیر به درام کشش سیم متصل شده است و درام با چرخش خود سیم را از داخل قالب کشیده و به دور خود می پیچد. محیط درام پیچش ۱ متر میباشد. دستگاه مجهز به اینورتر میباشد که میتوان سرعت دوران الکتروموتور و سرعت کشش را به صورت پیوسته تغییر داد. قالب های مورد استفاده از جنس تنگستن کارباید با زاویه مخروطی قالب ۹ درجه میباشد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- قالبهای کشش سیم

برای اندازه گیری مقدار نیرو حین فرایند کشش، قالب به طور کامل از دستگاه مجزا شده و از یک طرف به نیرو سنج با برند ZEMIC کلاس C3 متصل شده است. نحوه اتصال نیرو سنج به محفظه روغن و قالب در شکل ۴ نشان داده شده است.



شكل ۴- نحوه اتصال نيرو سنج به محفظه روغن و قالب

برای اینکه تمام نیروهای وارده به قالب از طریق نیروسنج حس گردند، قالب بایستی در تمام جهات آزادانه حرکت کند و فقط در راستای کشش سیم توسط نیرو سنج مهار شود. اتصال نیرو سنج به دستگاه به صورت تکیهگاه لولایی در نظر گرفته شده است که در صورت انحراف قالب حین فرایند، نیرو سنج نیز همراه قالب منحرف شده و در هر حال در راستای کشش سیم قرار گیرد. ارتفاع قالب و همچنین غلطکهای زیر قالب طوری قرار داده شدهاند که سیم همیشه در حالت افقی قرار گیرد و حین کشش نیرویی در جهت عمودی به قالب وارد نشود و قالب از غلطکها جدا نشده و یا به آنها فشرده نشود. فلز استفاده شده در این تحقیق، آلیاژ مس C10100 می،اشد که

کاربرد فراوانی در صنایع سیم و کابل دارد. آنالیز شیمیایی سیم های مسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیم مسی

			-	-			
Cu	Р	Si	Sb	S	Ti	v	عنصر
99.99	0.003	0.001	0.001	0.001	< 0.002	0.012	درصد

برای از بین بردن آثار کار سرد قبلی، کلیه سیمها در کورهای با دمایی C° ۶۰۰ به مدت یک ساعت آنیل شدند [۱]. تمامی سیمها قبل از ورود به قالب برای تغییر شکل پلاستیک، در محفظه تعبیه شده روانکار بهخوبی با روغن CM201 آغشته میشوند. آزمایشهای کشش سیم مسی با قطر اولیه ۳۸۳ ۲ از طریق عبور از قالبهای با قطر خروجی و همچنین سرعتهای کشش متفاوت انجام شد که در جدول ۲ شرایط آزمایشهای کشش نشان داده شده است. مقدار نرخ کرنش در فرایند کشش سیم از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود [۱].

 $2\ln(d_0/d_1)$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{l \cdot (0 - u_1)}{l / v} \tag{(7)}$$

که در این رابطه _d0 قطر سیم ورودی به قالب، d₁ قطر سیم خروجی از قالب، *l* طول تماس سیم با قالب و *v* سرعت کشش سیم میباشد.

درصد تغییر شکل (./)	نرخ کرنش (s ⁻¹)	سرعت کشش (mm/s)	قطر سیم خروجی (mm)	قطر سیم ورو ^د ی (mm)	شماره آزمون
	۳۷	۲۰۰		٣/۵٢	١
	۲۵ ۱۲	4	٣/٣		٢
11		۶			٣
	۱۵۰	٨٠٠			۴
	۳۸	۲۰۰	۳/۱		۵
۲۲/۴	۷۷	4			۶
	۱۱۳	۶			٧

جدول ۲- شرایط کشش سیمهای مسی در دستگاه کشش سیم

۳- مدلسازی فرایند کشش سیم

۳-۱- معادلات حاکم

این مدل توسط جانسون و کوک در سال ۱۹۸۳ ارائه شد. از میان مدلهای تجربی توسعه یافته بر مبنای نظریه پدیدارشناختی، مدل جانسون-کوک به دلیل سادگی و توانایی پیشبینی با دقت بالای تنش سیلان در بسیاری از موقعیتهای عملی، کاربرد زیادی پیدا کرده و تنش سیلان را به عنوان یک تابع از کرنش، نرخ کرنش و دما تعریف نموده است. در این مدل، تنش سیلان وان مایسز با رابطهی زیر محاسبه می شود:

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n\right) \left(1 + C\ln\varepsilon^*\right) \left(1 - T^{*m}\right) \tag{(7)}$$

B تنش تسلیم شبه-استاتیک در دما و نرخ کرنش مرجع، B ضریب کرنش سختی، n نمای کرنش سختی، C و m به ترتیب ثوابت مادهاند که متناظر با ضریب نرخ کرنش سختی و نمای نرم شوندگی گرمایی هستند. sکرنش پلاستیک موثر و $\dot{\varepsilon}^{i} = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_{i}$ نرخ کرنش

بدون بُعد است که در آن 6^غ نرخ کرنش مرجع میباشد و معمولا برابر با ¹-1s در نظر گرفته میشود. همچنین ^{*}T نرم شوندگی حرارتی ماده است و از رابطهی زیر محاسبه میشود:

در این رابطه T دمای ماده، T_r دمای مرجع و T_m دمای نقطه

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \tag{(f)}$$

ذوب ماده است.

دینامیک نابجایی^۱ در معادلههای بنیادی از سال 1960 به کار گرفته شد. زرلی و آرمسترانگ [۱۱] یک معادله بنیادی با استفاده از تحلیل فعالسازی گرمایی ارائه دادند. آنها دریافتند فلزات با ساختار کریستالی متفاوت، دارای مکانیزم نابجایی متفاوت هستند. برای فلزات مکعبی با اتم در مرکز سطوح^۲، نابجاییها باید از بیشه موانع^۲ عبور کنند و ناحیه فعالسازی گرمایی با کرنش پلاستیک به دلیل افزایش در چگالی نابجایی کاهش مییابد. درصورتیکه، برای فلزات مکعبی با اتم در مرکز (BCC)، نابجاییها باید بر موانع پیرلز-نابارو[†] غلبه کنند (یعنی تنش داخلی پیرلز)، پس ناحیه فعالسازی گرمایی به کرنش وابسته نیست. بنابراین، تنش تسلیم فلزات FCC عمدتاً توسط کرنش سختی، ولی در فلزات DCC اساساً توسط نرخ کرنش سختی و نرم شوندگی گرمایی تعیین میشود.

با توجه به این ملاحظات، زرلی و آرمسترانگ دو معادله بنیادی متفاوت برای فلزات با ساختار FCC و BCC بر اساس حرکت نابجایی ها ارائه دادند. ادعا بر این است که مدل زرلی-آرمسترانگ میتواند رفتار فلزات با ساختار کریستالی شش ضلعی منتظم (HCP) را نیز تشریح کند. زیرا بخشی از HCP ویژگی های ساختاری FCC و BCC را دارا می باشد. برای فلزات FCC، مدل ZA به صورت رابطه ی زیر بیان می شود:

$$\sigma = C_1 + C_2 \varepsilon^{1/2} \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\varepsilon}\right) \tag{a}$$

و برای فلزات با ساختار BCC ، مدلZA بهصورت رابطهی زیر خواهد بود:

$$\sigma = C_1 + C_2 \exp\left(-C_3 T + C_4 \operatorname{Tln} \dot{\varepsilon}\right) + C_5 \varepsilon^n \tag{9}$$

که $\Delta \sigma'_G = \Delta \sigma'_G + k \ell^{-1/2}$ بوده که $\Delta \sigma'_G$ نشان دهنده تنش سیلان ماده بر اساس چگالی اولیه نابهجاییها میباشد. k شدت تنش ریزساختار و *l* میانگین اندازه قطر دانه است. در این معادله *C*₂ ، *C*₁ ریزساختار و *C*₂ ، *C*₁ میادله ۲].

۲-۲- شبیهسازی اجزاء محدود

برای شبیه سازی تغییرشکل نمونه در فرآیند کشش، از کُد تجاری اجزاء محدود ABAQUS استفاده شد. جهت کاهش زمان حل و افزایش دقت، سیم و قالب به صورت دوبعدی و در حالت متقارن محوری⁶تعریف شدند. برای محاسبه ضریب اصطکاک از رابطه آویتزور و

¹Dislocation

² FCC

³ Dislocation jungle

⁴Peierls-Nabarro

⁵Axisymetric

اوانس [۲۳ و ۲۴] طبق رابطه (۷) استفاده شده است.

$$\mu = \frac{2}{\left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} - \ln\frac{R_0}{R_f}\right) \ln\frac{R_0}{R_f}} \begin{cases} \sin\alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12}\sin^2\alpha} - \\ (\cos\alpha)f(\alpha)\ln\frac{R_0}{R_f} \\ + \frac{1}{\sqrt{3}}\left(1 - \frac{\alpha\cos\alpha}{\sin\alpha}\right) \end{cases}$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2\alpha} 1 - (\cos\alpha)\sqrt{1 - \frac{11}{12}\sin^2\alpha}$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{11.12}} \ln\frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}\cos\alpha} + \sqrt{1 - \frac{11}{12}\sin^2\alpha}}$$
(Y)

، در این رابطه lpha نیم زاویه قالب، σ_{xb} تنش پشتی وارد بر سیم، lphaتنش سیلان سیم، R_0 قطر سیم ورودی و R_f قطر سیم σ_0 خروجی از قالب میباشد. طبق این رابطه ضریب اصطکاک برای سیم مسی با قطر ورودی۳/۸ mm و قطر خروجی۳/۳ mm و ۳/۲ mm به ترتیب برابر با ۱/۱۴ و ۰/۰۹ خواهد بود. در شبیه سازی از نوع رفتار تماس پنالتی برای تمامی شبیهسازیها استفاده شده است. با توجه به اینکه دمای سیم در طول فرایند چندان افزایش نمییابد [۲۵ و ۲۶]. فرض می شود ضریب اصطکاک در طول فرآیند ثابت بماند. در آزمایش تجربی انتهای سیم توسط گیرهای مهار شده و با سرعت ثابتی کشیده می شود. در شبیه سازی نیز به لبه سیم در راستای محور سیم سرعت ثابت اعمال شد. با توجه به ماهیت فرآیند کشش سیم از تحلیل جابجایی-دما بهصورت صریح استفاده شد. دمای اولیه سیم و قالب برای تمامی نمونهها ۲۹۸ K انتخاب شد که در طول فرآیند تغییر می یابد. در تحلیل مسایل ترمومکانیکی باید از المانی استفاده شود که با تغییر مکان، درجه آزادی دما را نیز داشته باشد تا بتوان در طول فرآیند تغییرشکل و دما را بررسی نمود. بنابراین، برای مشبندی سیم و قالب از المان تغییرمکان-دما CPE4RT استفاده شد. با توجه به تأثیر اندازه مش بر نتایج، چندین مشبندی مختلف انجام و اندازه مشی انتخاب شد که نتایج همگرا تولید نماید. مدل اجزاء محدود سیم و قالب مشبندی شده با شرایط مرزی استفاده شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل مشبندی اجزاء محدود سیم و قالب با شرایط مرزی

¹ Back tension ²Explicit

به منظور معرفی معادله های بنیادی به این نرمافزار از زیربرنامه ^۲ استفاده شد. برای تعریف رفتار پلاستیسیته مواد از زیربرنامه های کُد یوهارد^۴ برای حالت استاندارد و کُد ویوهارد^۵ برای حالت صریح استفاده میشود [۲۷]. در این زیربرنامه تنش تسلیم به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک مؤثر، نرخ کرنش پلاستیک مؤثر و دما تعریف شده و ثوابت ماده برای معادله توسط کاربر به زیربرنامه ارسال می گردد. زیربرنامه در هر نمو² اطلاعات مربوط به کمیتهای نامبرده را دریافت و سپس با انجام تجزیه و تحلیل تنش تسلیم را محاسبه می کند. بنابراین، مدلهای جانسون - کوک و زرلی-آرمسترانگ در زبان فرترن^۷ پیاده-سازی شده و برای شبیه سازی فرآیند کشش در محیط کُد اجزاء مصدود SAR فراخوانی گردید. خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ مس در جدول ۳، همچنین ثوابت معادله های جانسون -کوک و زرلی-

[78]	ہم مس ا	گرمایی سی	و	مكانيكى	خواص	-٣	جدول
------	---------	-----------	---	---------	------	----	------

٨٩۶٠	چگالیKg/m ³
١١۵	مدول یانگ GPa
• /٣١	ضريب پواسون
۳۸۵	گرمای ویژهJ/Kg K
۳۸۳	رسانایی گرمایی1/K
Δ×١٠-۵	ضریب انبساط گرمایی1/K
۲۹۸	دمای مرجعK
۱۳۵۶	دمای ذوبK

کوک برای مس [۲]	معادله جانسون	جدول ۴- ضرایب
-----------------	---------------	---------------

۹۰ MPa	А
т ۹т МРа	В
۰/۳۱	n
۰/۰۲۵	С
۱/• ٩	m

۲١.	برای مس	آرمسترانگ	معادله زرلي	۵- ضرایب	جدول
-----	---------	-----------	-------------	----------	------

۶۵ MPa	C1
∧۹∙ MPa	C2
$\cdot / \cdot \cdot \tau \lambda K^{-1}$	C3
$\cdot/\cdot\cdot\cdot$	C4

نمونهای از کانتورهای تنش وون مایسز بدست آمده از شبیهسازی کشش سیم توسط معادلههای جانسون-کوک و زرلی- آرمسترانگ

³Subroutine ⁴UHARD ⁵VUHARD ⁶Increament ⁷Fortran

مربوط به آزمون شماره ۱ ذکر شده در جدول ۲، در شکلهای ۶و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- کانتور تنش شبیهسازی توسط مدل JC (آزمایش ۱)



شکل ۷- کانتور تنش شبیهسازی توسط مدل ZA (آزمایش ۱)

۴- نتایج و بحث

هدف اصلی از این مقاله بررسی میزان نزدیکی نتایج تجربی با پیش بینی حاصل از معادلات بنیادی جانسون- کوک و زرلی-آرمسترانگ میباشد. معادله جانسون- کوک مربوط به گروه معادلات پدیدار شناختی میباشد که بر اساس مشاهدات تجربی توسعه یافته است که به دلیل راحتی در تعیین ضرایب در اغلب مسائل کاربردی و نرم افزارهای المان محدود بکار برده میشود. در مقابل معادله زرلی-آرمسترانگ بر اساس ریز ساختار ماده بنا شده است ولی به دلیل بیشتر بودن و سختی تعیین ضرایب به ندرت و در مسائل حساس از این معادله استفاده میشود. ولی آنچه مهم است دقت این معادلات در پیش بینی رفتار ماده است.

از نیروی کشش به عنوان معیاری برای بررسی رفتار ماده در نرخ کرنشهای مختلف استفاده شده است. نیروی کشش در آزمایشهای تجربی اشاره شده در جدول ۲ از طریق نیروسنج متصل به قالب اندازه گرفته شده و به صورت نمودار نیرو- زمان رسم شده است. نیروی کشش بار دیگر از طریق شبیه سازی المان محدود محاسبه و استخراج شده است با این تفاوت که یک بار از معادله جانسون- کوک و بار دیگر از معادله زرلی- آرمسترانگ برای بیان رفتار پلاستیک ماده استفاده شده است. شکل ۸ مقدار نیروی کشش به دست آمده از آزمایشهای تجربی، شبیهسازی با معادله جانسون- کوک و شبیهسازی با معادله

زرلی- آرمسترانگ را نشان میدهد. اینورتور دستگاه طوری تنظیم شد که بعد از ۲ ثانیه سرعت کشش سیم به سرعت نهایی برسد. همین شتاب در شبیه سازی نیز لحاظ گردید. بنابراین نیروی کشش بعد از ۲ ثانیه به حالت پایا رسیده و نمودارها نیز بعد از طی این زمان رسم شده اند.





شکل ۸- منحنیهای نیروی کشش و زمان آزمایشهای تجربی و شبیهسازیهای کشش سیم با معادلات ساختاری جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ و شماره آزمون الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳، د) ۴، ه) ۵، ر) ۶ و ز) ۷ بیان شده در جدول ۲.

همانطور که از نمودارها دیده میشود نمودارهای حاصل از بکار گیری معادله زرلی- آرمسترانگ در تمام شرایط آزمایش تطابق بهتری با نمودارهای تجربی داشته و نتایج بهتری نسبت به معادله جانسون-کوک ارائه کرده است. در شکلهای ۹ و ۱۰ میزان خطا بین میانگین نتایج تجربی با میانگین نتایج شبیهسازی به هنگام استفاده از معادلات جانسون-کوک و زرلی- آرمسترانگ نشان داده شده است.



شکل ۹- خطای بین نیروهای کشش حاصل از شبیه سازی با معادلات جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ و نتایج تجربی با درصد کاهش



شکل ۱۰- خطای بین نیروهای کشش حاصل از شبیه سازی با معادلات جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ با نتایج تجربی با درصد کاهش ۲۲٫۴٪

در شکل ۱۱ و ۱۲ میانگین نیروهای کشش در فرایند کشش سیم مسی با کاهش سطح مقطع ۱۲٪ و ٪۲۲/۴٪ در نرخ کرنش های مختلف نشان داد شده است.



شکل ۱۲- میانگین نیروی کشش سیم مسی در نرخ کرنشهای مختلف با کاهش قطر %22.4

ضرایب معادلات جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ بکار گرفته شده در این تحقیق، در محدوده نرخ کرنش شبه استاتیک محاسبه شدهاند [۲۱]. با توجه به نمودارهای شکلهای ۹ و ۱۰ دیده می شود که با افزایش نرخ کرنش در فرایند کشش سیم و دور شدن از شرایط شبه استاتیک، میزان خطا در مدل جانسون- کوک افزایش یافته است. به عبارت دیگر استفاده از مدل جانسون- کوک با ضرایبی که از طریق یک فرایند شبه استاتیک به دست آمدهاند، در فرایند کشش سیم که دارای نرخ کرنش بالاتری است، همراه با خطا بوده و این خطا با بیشتر شدن نرخ کرنش افزایش خواهد یافت. این پدیده را می توان به عنوان نقطه ضعف دیگری برای مدل جانسون- کوک در نظر گرفت زیرا در پیش بینی رفتار ماده در نرخ کرنش بالاتر از نرخ کرنشی که ضرایب در آن محاسبه شدهاند ایجاد خطا میکند. به همین دلیل است که در معادلات جانسون- کوک بهینه شده، ضرایب n،C و m تابعی از نرخ کرنش در نظر گرفته شدهاند [۵ و ۶] تا با تغییر نرخ کرنش ضرایب نیز تغییر یابند. در حالی که این اتفاق به هنگام استفاده از معادله زرلی-آرمسترانگ با توجه به شکلهای ۹ و ۱۰ مشاهده نگردید. یعنی با وجود اینکه ضرایب معادله زرلی- آرمسترانگ نیز همانند معادله جانسون- کوک در محدوده نرخ کرنش شبه استاتیک محاسبه شده بودند، ولى با افزايش نرخ كرنش خطاى بين نتايج تجربي و شبيه سازى

افزایش پیدا نکرد. میتوان نتیجه گرفت معادله زرلی- آرمسترانگ نسبت به معادله جانسون- کوک در محدوده وسیعتری از نرخ کرنش معتبر و قابل استفاده میباشد.

ایراد اصلی وارد بر معادله جانسون- کوک مجزا بودن عبارات مربوط به کرنش سختی، نرخ کرنش سختی و دما میباشد. به عبارت دیگر اثر هر سه پارامتر روی تنش سیلان مواد به صورت مجزا وبه صورت تابع ضرب در نظر گرفته شده است در حالی که در بسیاری از مواد اثر متقابل بر یکدیگر دارند. در معادله جانسون- کوک ساختار فیزیکی، اندازه دانه و سوابق کارسختی تاثیری در تنش سیلان ماده به وجود نمیآورد و نرخ کار سختی یا همان $d\sigma / dE$ رابطه مستقیمی با نرخ کرنش دارد و با افزایش نرخ کرنش افزایش میبابد در حالی که در بیشتر فلزات این گونه نیست و با افزایش نرخ کرنش، نرخ کرنش سختی ثابت بوده و در برخی فلزات کاهش نیز میباید [۷ و ۸]. در معادله زرلی- آرمسترانگ این نواقص تا حدودی بر طرف شده است و ارتباط بین پارامترهای مربوط به کرنش سختی، نرخ کرنش و دما به صورت توابع نمایی و لگاریتمی بیان شده است.

نتیجه دیگری که دراین تحقیق به دست آمد و انتظار میرفت این بود که با افزایش سرعت کشش، نرخ کرنش افزایش یافته و این امر باعث افزایش تنش سیلان فلز گردید. با افزایش تنش سیلان نیروی کشش لازم برای تغییر شکل فلز افزایش مییابد. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده میشود که با افزایش سه برابری سرعت کشش، نیروی کشش به میزان ۷٪ افزایش یافته است. این پدیده توسط هر دو معادله ساختاری به خوبی پیش بینی شده است.

۵- نتیجهگیری

برای بررسی رفتار فلز مس در نرخ کرنش متوسط از معادلات جانسون- کوک و زرلی- آرمسترانگ و روش کشش سیم استفاده شده است. نتایج حاصل از هر دو معادله نزدیکی خوبی با نتایج تجربی نشان دادند. معادله زرلی- آرمسترانگ در بدترین شرایط حدود ۶٪ و در بهترین حالت کمتر از ۱٪ با نتایج تجربی اختلاف داشت. این اختلاف در معادله جانسون- کوک در بهترین حالت ۶٪ و در بدترین حالت حدود ١٢٪ بود. اين اختلاف بين نتايج حاصل از معادله جانسون- كوك و زرلی- آرمسترانگ به توابع استفاده شده در معادلات بستگی دارد. نکته مهم دیگر نحوه انتخاب ضرایب مدل جانسون- کوک میباشد. زیرا این ضرایب ممکن است به ازای نرخ کرنشهای مختلف تغییر یابند. به عبارت دیگر از یک سری ضرایب ثابت در این مدل نمی توان برای طیف گستردهای از نرخ کرنش استفاده نمود. آزمایشهای کشش سیم نشان داد هرچه از نرخ کرنشی که در آن ضرایب معادله جانسون- کوک به دست آمدهاند فاصله گرفته شود، میزان خطای معادله افزایش خواهد یافت. این پدیده به هنگام استفاده از معادله زرلی- آرمسترانگ مشاهده نگردید و خطای این مدل در شرایط مختلف نرخ کرنش در فرایند کشش سیم مسی در محدوده ۱٪ تا ۶٪ متغیر بود.

نکته حائز اهمیت دیگر افزایش نیروی کشش با افزایش سرعت کشش و نرخ کرنش سیم می باشد. به طوری که با افزایش سه برابری سرعت کشش از ۰/۲ m/s به ۰/۶ m/۶ نیروی کشش به میزان ۷٪ افزایش یافت. قايسه

تجربي و عددي معادلات ساختاري در رفتار فلز

C User subroutine vuhard

C Plastic Properties

۶- پيوست

subroutine vuhard (

- C Read only -
- nblock,
- lAnneal, stepTime, totalTime, dt, nElement, nIntPt, nLayer, nSecPt,

cmmanne, * nstatev, nfieldv, nprops,

fieldNew, * props, tempOld, tempNew, fieldOld,

- stateOld,
- eqps, eqpsRate

C Write only -

yield, dyieldDtemp, dyieldDeqps, stateNew)

0

include 'vaba_param.inc'

0

dimension

- props(nprops),
- fieldOld(nblock,nfieldv), tempOld(nblock),
- stateOld(nblock,nstatev),
- tempNew(nblock),
- fieldNew(nblock,nfieldv),
- eqps(nblock),
- eqpsRate(nblock),
- yield(nblock),
- dyieldDtemp(nblock),
- dyieldDeqps(nblock,2),
- stateNew(nblock,nstatev), jElem(nblock)

0

parameter (zero = 0.d0, eqpsFail = 0.25d0) character*80 cmname parameter (one = 1.0d0, small=1.0e-5)

> $e^{0} = 1$ C = 0.025D = 0.31B = 292000000 A = 90000000 do 100 k = 1,nblock end if temp = tempNew(k) strainrate = eqpsRate(k) strain = eqps(k) if (strain .LE. small) then strain = small

if (strainrate .LE. small) then

strainrate = small

end if

- Yield(k) = (A + (B * (strain ** D)))
- * (1 + C * log (strainrate/e0))
- dyieldDeqps(k,1) = (strain ** (D-1)
- * B * D
- * (1 + C * log (strainrate/e0))

*

- dyieldDeqps(k,2) = (A + (B * (strai
- D)))*
- (C/(strainrate))
- 100 end do

Q

return

end

Extrusion Test of OFHC Copper. Dynamic behavior of material, Vol. 1, No. 2, pp. 136-152, 2015.

- [18] An He, Ganlin Xie, Hailong Zhang, Xitao Wang. A comparative study on Johnson–Cook, modified Johnson– Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel. *Materials* and Design, Vol 52, pp. 677–685, 2013.
- [19] Zejian Xu, Fenglei Huang. Comparison of constitutive models for FCC metals over wide temperature and strain rate ranges with application to pure copper. *International Journal* of Impact Engineering, Vol. 79, pp.65-74, 2015.
- [20] Preston D.L., Tonks D.L., Wallace D. C.. Model of plastic deformation for extreme loading conditions. *Applied Physics*, Vol. 93, pp. 211, 2003.
- [21] ASM Metals Handbook- Mechanical Testing and Evaluation, ASME International 2000.
- [22] Armstrong R., Zerilli F., Dislocation mechanics based constitutive relations for material dynamics calculations. *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, pp.529-534, 1987.
- [23] evans W., avitzur B., Measurement of Friction in Drawing, Extrusion, and Rolling, *Transections of the ASME*, January, pp 72-80, 1968.
- [24] Avitzur B., Analysis of Wire Drawing and Extrusion, Through Conical Dies of Large Cone Angle, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 85, No. 1, pp. 89-95, 1963.
- [25] G. Vega, A. Haddi, A. Imad. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 3308-3312, 2009.
- [26] Domiaty A. E., Kassab S. Z., Temperature rise in wire-drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, pp. 72–83, 1998.
- [27] ABAQUS User Subroutines Reference Manual, Explicit Subroutine, VUHARD. Version 6.10.
- [28] http://www.matweb.com

تجربي و عددي

معادلات

ساختاری در

فتار

. ا

h

- [1] Wright R. N., Wire Technology: Process engineering and metallurgy. ELSEVIER Inc, 2001.
- [2] Johnson G.R., W.H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *7th int. Symposium on Ballistic, Hague*, pp. 541-547, 1983.
- [3] Vural M., Caro J., Experimental analysis and constitutive modeling for the newly developed 2139-T8 alloy, *Materials Science and Engineering A*, vol. 5, No. 20, pp. 56–65, 2009.
- [4] Chen G., Ren Ch., Ke Z., Li J., Yang X., Modeling of flow behavior for 7050 T7451 aluminum alloy considering microstructural evolution over a wide range of strain rates, *Mechanics of Materials*, Vol. 95, pp. 146–157, 2016.
- [5] Y.C. Lin, X. Chen, G. Liu, A modified Johnson–Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 6980– 6986, 2010.
- [6] Tan J. Q., Zhan M., Liu Sh., Huang T., Guo J., Yang H., A modified Johnson-cook model for tensile flow behaviors of 7050-T7451 aluminum alloy at High strain rates, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 631, pp. 214-219, 2015.
- [7] Khan A. S., Suh Y. S., Kazmi R., Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys. *International Journal of Plastics*, Vol. 20, No. 22, pp. 33-48, 2004.
- [8] Khan A. S., Huang S.. Experimental and theoretical study of mechanical behavior of 1100 aluminum in the strain rate range 10⁻⁵-10⁻⁴. *International Journal of Plasticity*, Vol. 8, pp. 397–424, 1992.
- [9] Liang R., Khan A. S., A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures. *International Journal of Plasticity*, Vol. 15, pp. 963-980, 1999.
- [10] Khan A. S., Zhang H. Y., Takacs L., Mechanical response and modeling of fully compacted nano crystalline iron and copper. *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, No.14, pp. 59–76, 2000.
- [11] Armstrong R., Zerilli F., Dislocation mechanics based analysis of material dynamics behavior. *Journal de Physique Colloquies*, Vol. 49, pp.529-534, 1988.
- [12] Klepaczko J. R., Rusinek A., Rodríguez-Martínez J. A., cherski P. e., Arias A., Modelling of thermo-viscoplastic behavior of DH-36 and Weldox 460-E structural steels at wide ranges of strain rates and temperatures, comparison of constitutive relations for impact problems. *Mechanics of Materials*, Vol. 41, pp. 599-621, 2009.
- [13] Nemat-Nasser S., Li Y., Flow stress of FCC polycrystals with application to OFHC Cu. Acta Material, Vol. 46, No. 2, pp. 65-77, 1998.
- [14] Voyiadjis G. ZAbed., F. H., Microstructural based models for bcc and fcc metals with temperature and strain rate dependency. *Mechanics of Materials*, Vol. 37, No. 3, pp. 55-78, 2005.
- [15] Hong-Ying L., Yang-Hua L., Wang X., Jiao-Jiao L., Wu Y., A comparative study on modified Johnson Cook, modified Zerilli–Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict the hot deformation behavior in 28CrMnMoV steel. *Materials and Design*, Vol. 49, pp. 493– 501, 2013.
- [16] Tanimura S., Tsuda T., Abec A., Hayashi H., Jones N., Comparison of rate-dependent constitutive models with experimental data. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 69, pp. 104-113, 2014.
- [17] Bonora N., Testa G., Ruggiero A., Iannitti G., Mortazavi N., Numerical Simulation of Dynamic Tensile