

استفاده از قانون نمایی جهت مدل سازی منحنی های سیلان تغییر شکل گرم فولاد خط لوله

ایکس شصت و پنج

مسعود رخش خورشید*^۱

چکیده

برای مدل سازی منحنی های سیلان مواد مختلف طی فرآیندهای تغییر شکل گرم از مدل های جامع گوناگونی استفاده می شود. در این مدل ها منحنی سیلان ماده به عنوان تابعی از دما، نرخ کرنش و کرنش بیان می شود. در این تحقیق از مدل قانون نمایی با ثابت های وابسته به کرنش برای مدل سازی منحنی های سیلان فولاد خط لوله ایکس شصت و پنج در شرایط تغییر شکل گرم استفاده شده است. نتایج حاصل از این مدل با نتایج حاصل از مدلی که اخیراً بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زنر-هولومون و یک تابع چند جمله ای درجه سوم از کرنش به توان m (یک ثابت است) توسعه داده شده، مقایسه گردیده است. از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) جهت مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل های مورد مطالعه استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده شد که مدل قانون نمایی با ثابت های وابسته به کرنش عملکرد بهتر یا به عبارت دیگر ریشه میانگین مربعات خطای کمتری دارد. ولی به هر حال تعیین ثابت های مدل قانون نمایی با ثابت های وابسته به کرنش به حجم محاسبات بالاتری نیاز دارد. از نتایج تحقیق حاضر می توان برای شبیه سازی عددی فرآیندهای تغییر شکل گرم فولاد مورد مطالعه استفاده کرد.

واژه های کلیدی: مدل های جامع، فرآیندهای تغییر شکل گرم، معادله نمایی، فولاد API X65.

^۱ - استادیار، مهندسی مکانیک، گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

*-نویسنده مسئول مقاله: rakhshkhorshid@birjandut.ac.ir

پیشگفتار

با توجه به اهمیت مدل سازی و پیش بینی منحنی های سیلان مواد در شرایط تغییر شکل مختلف (دماها و نرخ کرنش های متفاوت)، تاکنون مدل های جامع زیادی جهت مدل سازی تنش سیلان مواد مختلف پیشنهاد شده است [۱-۴]. از نتایج حاصل از این تحقیقات می توان برای شبیه سازی ریاضی فرایندهای تولیدی نظیر آهنگری و نورد بهره گرفت [۴-۶]. لین و چن [۷] مدل های جامع آلیاژهای مختلف را مرور کرده اند [۷]. همان گونه که توسط ایشان شرح داده شده است، مدل های جامع را می توان به سه دسته ی، مدل های جامع پدیداری، مدل های جامع فیزیک مینا و مدل های شبکه عصبی دسته بندی کرد.

مدل های جامع پدیداری، به طور گسترده در شبیه سازی فرایندهای تولید استفاده می شوند. در این مدل ها، تنش سیلان ماده به عنوان تابعی از دمای تغییر شکل، نرخ کرنش و کرنش بیان می گردد. به عبارت دیگر در این مدل ها یک تابع ریاضی با تعدادی ثابت بر نتایج حاصل از آزمون فشار گرم منطبق می شود [۷]. مدل های جانسون-کوک [۱]، معادله آرنیوسی [۸] و مدلی که اخیراً بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زرن-هولومون و یک تابع چند جمله ای درجه سه از کرنش به توان m (m یک ثابت است) توسعه داده شده است [۹]، نمونه هایی از مدل های جامع پدیداری هستند. مدل های جامع فیزیک-مینا مدل هایی هستند که در آنها سازوکار تغییر شکل مورد توجه قرار می گیرد. مدل های زریلی-آرمسترونگ [۱۰]، تبلور مجدد دینامیکی [۱۱] و وویاجیس-آلمسری [۱۲]

نمونه هایی از مدل های جامع فیزیک-مینا هستند. از آنجا که رفتار مواد در دماها و نرخ کرنش های گوناگون غیر خطی و پیچیده است، در تحقیقات متعددی استفاده از شبکه های عصبی نیز برای مدل سازی منحنی سیلان مواد مختلف پیشنهاد شده است [۱۳-۱۵].

مرور مقالات انجام شده نشان می دهد که گرچه تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مدل سازی رفتار مواد مختلف توسط مدل های جامع انجام شده است [۱۰-۱۹]؛ اما تا کنون از قانون نمایی با ثابت های وابسته به کرنش برای مدل سازی منحنی های سیلان فولاد API X65 استفاده نشده است. در مطالعه حاضر از قانون توانی با ثابت های وابسته به کرنش برای مدل سازی منحنی های تغییر شکل گرم فولاد API X65 (با حداقل استحکام تسلیم ۴۴۸ مگاپاسکال) استفاده می شود. نتایج حاصل از این مدل، با نتایج حاصل از مدلی که اخیراً بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زرن-هولومون و یک تابع چند جمله ای درجه سه از کرنش به توان m توسعه داده شده است [۹]، مقایسه می گردد. فولاد مورد مطالعه، یک فولاد پر استحکام کم آلیاژ است که به طور گسترده در ساخت لوله های پر فشار انتقال گاز ایران به کار می رود [۲۰-۲۲].

مواد و روش ها

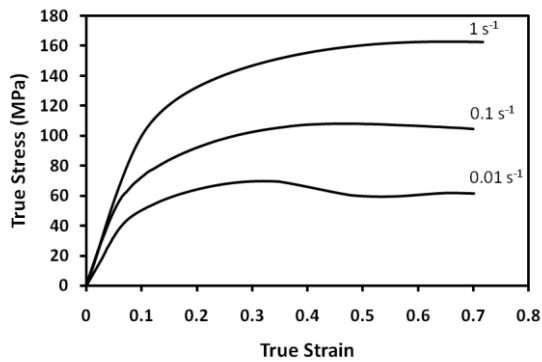
نمونه های استوانه ای آزمون فشار به قطر ۱۰ و طول ۱۵ میلی متر از لوله ساخته شده در مقیاس صنعتی موازی با جهت نورد تهیه شدند. ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه که به روش کوانتومتری تعیین شده در جدول ۱ ارائه شده است [۲۳].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ایکس ۶۵ [۲۳]

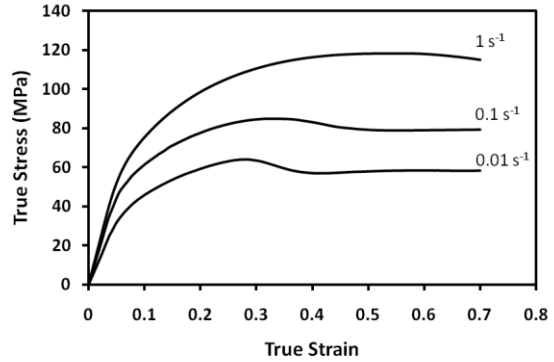
Nb	Si	Ti	S	P	Mn	C
۰/۰۴۷	۰/۲۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۸	۱/۴۵	۰/۰۷۲
-	Al	Cu	Ni	V	Mo	Cr
-	۰/۰۲۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	۰/۲۴	۰/۱۷۴

دمای نمونه، به مدت ۵ دقیقه در این دما نگهداری شدند. پس از آن آزمون‌های فشار گرم با نرخ کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۱ و 1 s^{-1} تا رسیدن به کرنش حقیقی حدود ۰/۷ بر روی آن‌ها انجام شد. باید یادآوری کرد که نمونه‌ها پس از اعمال تغییر شکل به سرعت تا دمای محیط سرد شدند. منحنی‌های سیلان بدست آمده در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت در شکل ۱ نشان داده شده است.

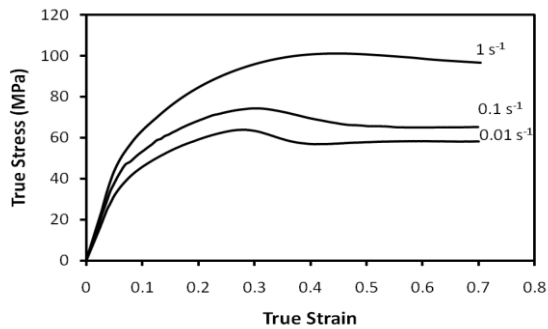
آزمون فشار گرم بر روی یک ماشین آزمون کشش/ فشار ۲۵۰ کیلو نیوتونی زوئیک مجهز به یک کوره تابشی با دقت $\pm 5^\circ\text{C}$ انجام شد. قبل از انجام آزمون نمونه‌ها تا دمای 1200°C درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه آستینته شدند. سپس با سرعت سرد کردن 10°C/s تا دماهای انجام آزمون ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و 1150°C درجه سانتی گراد سرد شدند. سپس به منظور یکنواخت شدن



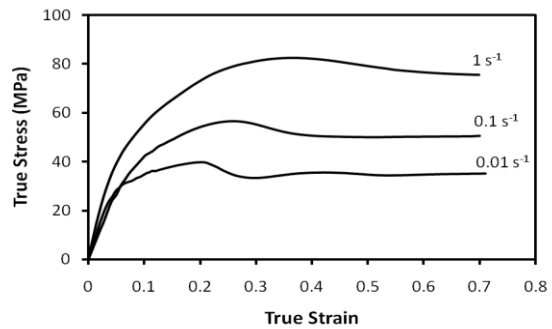
950 °C



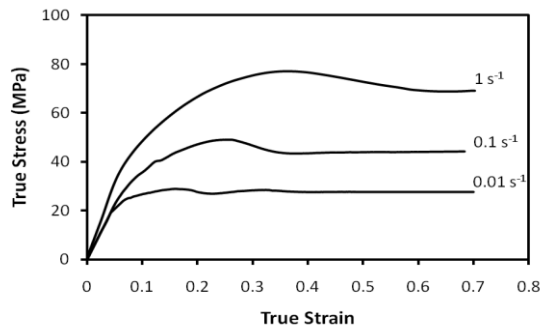
1000 °C



1050 °C



1100 °C



1150 °C

شکل ۱- منحنی‌های سیلان تغییر شکل گرم فولاد ایکس شصت و پنج در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت [۲۳]

که در رابطه فوق A'' و β ثابت‌های ماده هستند. بیان تنش سیلان با معادلات فوق کامل نیست و باید برای یک تنش مشخصه یا تنش مربوط به یک کرنش معین (به طور مثال تنش مربوطه به کرنش ۰/۳) بازنویسی شود. معمولاً این معادلات برای تنش اوج نوشته می‌شوند [۲۳، ۲۴]. البته، برای مدل سازی منحنی‌های سیلان پیشنهاد شده است که ثابت‌های معادلات جامع را می‌توان بر حسب توابعی چند جمله‌ای از کرنش نوشت [۴، ۱۱ و ۲۳].

در مطالعه حاضر، ابتدا، معادله قانون نمایی برای تنش‌های مربوط به کرنش‌های در بازه ۰/۱ تا ۰/۷ و با عدد افزایشی ۰/۰۵ بازنویسی شد؛ سپس، از تحلیل رگرسیون برای منطبق کردن تابع چند جمله‌ای بر ثابت‌های بدست آمده به ازای کرنش‌های مختلف استفاده شد. با جایگذاری $f(\sigma)$ از رابطه ۲ در رابطه ۱ و گرفتن لگاریتم طبیعی خواهیم داشت:

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} \right) = \ln A'' + \beta \sigma \quad (3)$$

مشق جزئی معادله فوق به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\partial \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{R} \partial \left(\frac{1}{T} \right) = \beta \partial \sigma \quad (4)$$

در شرایط دما ثابت رابطه ۴ را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\beta = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \right|_T \quad (5)$$

با نوشتن رابطه ۴ برای شرایط نرخ کرنش ثابت:

$$Q = R\beta \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right|_{\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

با توجه به روابط ۵ و ۶ مقادیر β و Q را می‌توان به ترتیب از روی نمودارهای $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ و $\sigma - 1/T$ (بطور میانگین) تعیین کرد. نمودارهای $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ و $\sigma - 1/T$ ترسیم شده برای تنش مربوط به کرنش ۰/۳ به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

همان گونه که مشاهده می‌شود در اکثر شرایط تغییر شکل تنش سیلان تا رسیدن به نقطه اوج افزایش می‌یابد و سپس به تدریج تا رسیدن به یک حالت پایدار افت پیدا می‌کند که نشانه وقوع تبلور مجدد دینامیکی (DRX)^۲ است [۲۳]. علاوه بر این افزایش تنش سیلان با افزایش نرخ کرنش و کاهش دما قابل مشاهده است. البته، در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش $1s^{-1}$ منحنی حاصل نشان دهنده وقوع بازیابی دینامیکی است [۲۳].

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از معادله قانون نمایی با ثابت‌های وابسته به کرنش برای مدل سازی منحنی‌های تغییر شکل گرم فولاد API X65 ارائه و با نتایج حاصل از مدلی که اخیراً بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زهر-هولومون و یک تابع چند جمله‌ای درجه سه از کرنش به توان m توسعه داده شده است، مقایسه می‌گردد. به منظور مقایسه از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۳ استفاده می‌شود.

معادله قانون نمایی

همان گونه که در جای دیگر بحث شده است [۲۳]، می‌توان از معادلاتی که در آن‌ها از پارامتر زهر-هولومون به عنوان تابعی از تنش در نظر گرفته می‌شود برای بیان اثر دما و نرخ کرنش بر منحنی های سیلان استفاده کرد:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) = f(\sigma) \quad (1)$$

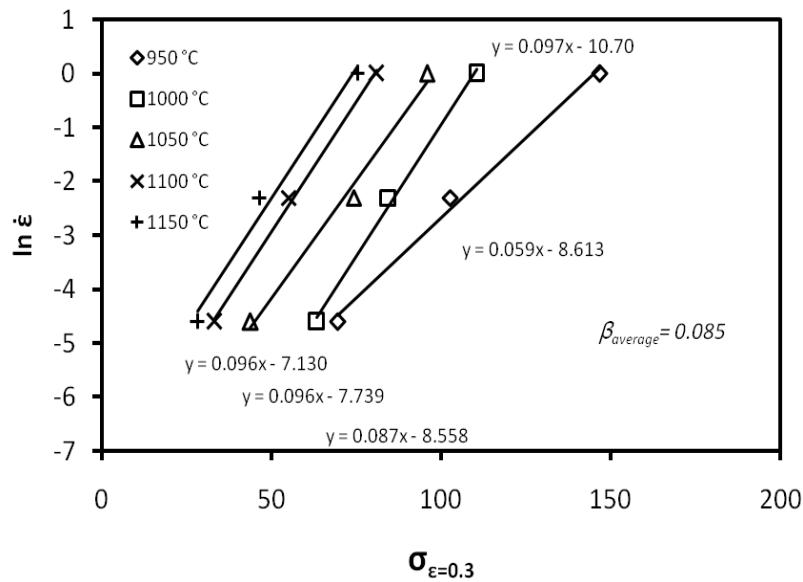
که در رابطه فوق Q انرژی فعال سازی^۴ (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازها، و T دمای مطلق است. قانون توانی، قانون نمایی و قانون آرنیوسی نمونه‌هایی از $f(\sigma)$ می‌باشند. اگر از قانون نمایی به عنوان $f(\sigma)$ استفاده شود، خواهیم داشت:

$$Z = f(\sigma) = A'' \exp(\beta \sigma) \quad (2)$$

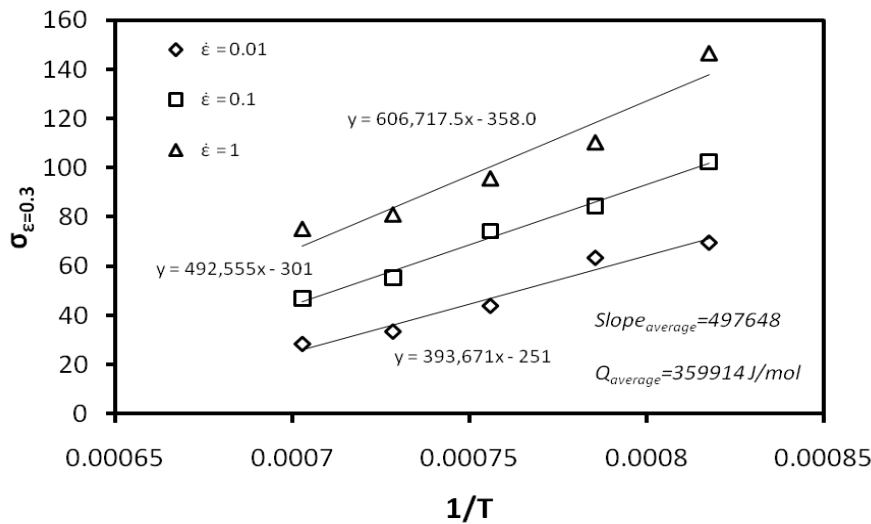
^۲ - Dynamic recrystallization

^۳ - Root Mean Square Error

^۴ - Activation



شکل ۲- نمودار $\ln \dot{\epsilon}$ - σ جهت تعیین مقدار β



شکل ۳- نمودار σ - $1/T$ جهت تعیین مقدار Q

عدد افزایشی ۰/۰۵ بدست آمد. نتایج حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است.

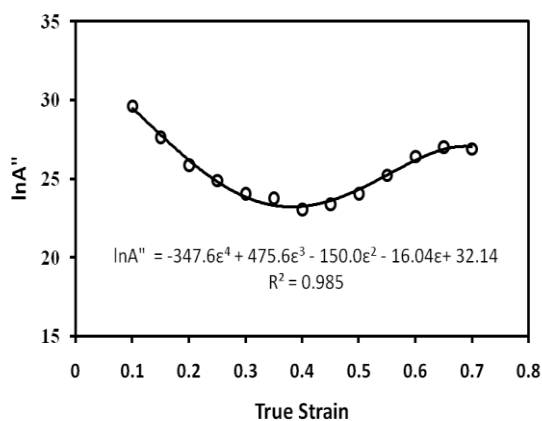
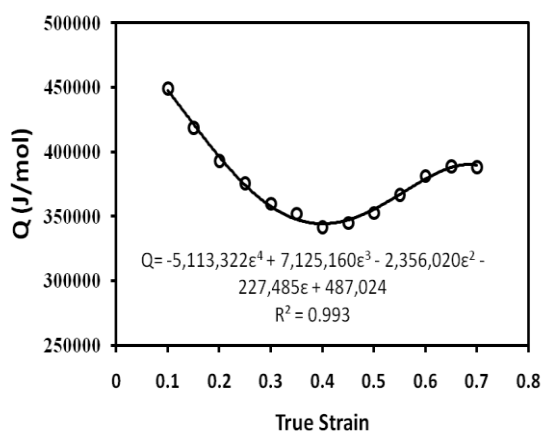
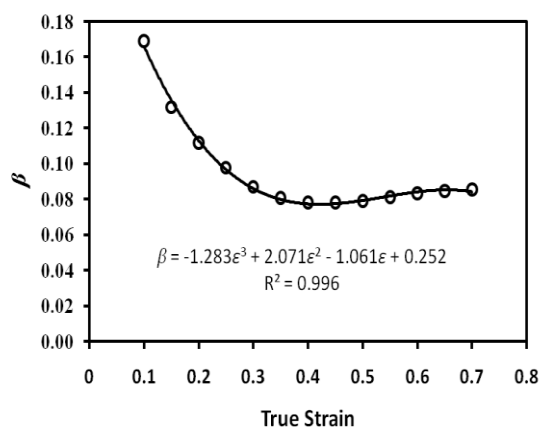
همان گونه که مشاهده می‌شود از تحلیل رگرسیون برای بیان ثابت‌های بدست آمده به عنوان توابعی چند جمله ای از کرنش استفاده شده است. نتایج بدست آمده به شکل زیر خلاصه شده است:

همان گونه که مشاهده می‌شود مقادیر β و Q به ترتیب برابر ۰/۰۸۵ و ۳۵۹۹۱۴ ژول بر مول بدست آمده است. با جایگذاری مقادیر مقادیر β و Q در رابطه ۳ و بازنویسی این رابطه برای شرایط تغییر شکل مختلف (دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت)، مقدار $\ln A''$ با استفاده از روش بهینه یابی نیوتونی برابر ۲۴/۰۷ محاسبه شد. به طریق مشابه، مقادیر ثابت‌های β ، Q و $\ln A''$ برای تنش‌های مرتبط به کرنش‌های مختلف از ۰/۱ تا ۰/۷ با

$$\beta = -1.283\varepsilon^3 + 2.071\varepsilon^2 - 1.061\varepsilon + 0.252 \quad (۷)$$

$$Q = -5,113,322\varepsilon^4 + 7,125,160\varepsilon^3 - 2,356,020\varepsilon^2 - 227,485\varepsilon + 487,024 \quad (۸)$$

$$\ln A'' = -347.6\varepsilon^4 + 475.6\varepsilon^3 - 150.0\varepsilon^2 - 16.04\varepsilon + 32.14 \quad (۹)$$



شکل ۴- مقادیر محاسبه شده ثابتهای β ، Q و $\ln A''$ برای تنش های مربوط به کرنش های مختلف از ۰/۱ تا ۰/۷.

بر همین مبنا، معادله جامع جدیدی پیشنهاد شده است که در آن یک تابع توانی از پارامتر زنر-هولومون جهت جبران اثر حرارت و نرخ کرنش، از یک تابع چند جمله‌ای درجه سوم کرنش به توان m جهت جبران اثر کرنش بر تنش سیلان استفاده می‌شود [۹]:

$$\sigma = Z^q \times (a + b\varepsilon^m + c\varepsilon^{2m} + d\varepsilon^{3m}) \quad (12)$$

در رابطه فوق a, b, c, d و q ثابت‌های مواد هستند. با جایگذاری رابطه ۱ در رابطه ۱۲ خواهیم داشت:

$$\sigma = \varepsilon^q \exp\left(\frac{qQ}{RT}\right) \times (a + b\varepsilon^m + c\varepsilon^{2m} + d\varepsilon^{3m}) \quad (13)$$

ثابت‌های معادله فوق را می‌توان با کمینه کردن مجموع مربعات خطا بین نقاط نمونه برداری شده از منحنی‌های سیلان واقعی و مدل‌سازی شده بدست آورد. به این منظور، می‌توان از روش بهینه سازی نیوتونی استفاده کرد. به منظور توسعه مدل پیشنهاد شده برای فولاد مورد مطالعه، ابتدا، منحنی‌های بدست آمده در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف در کرنش‌های مختلف از ۰/۱ تا ۰/۷ با عدد افزایشی ۰/۱ نمونه برداری شدند. سپس با کمینه کردن مجموع مربعات خطا بین نقاط نمونه برداری شده و منحنی‌های سیلان واقعی و مدل‌سازی شده، رابطه زیر برای بیان تنش سیلان فولاد مورد مطالعه، بدست آمده است [۹]:

$$\sigma = \varepsilon^{0.169} \exp\left(\frac{0.169 \times 346238}{RT}\right) \times (-0.006 + 2.420\varepsilon^{0.7} - 3.899\varepsilon^{1.4} + 2.046\varepsilon^{2.1}) \quad (14)$$

با جایگذاری ثابت‌های مواد به عنوان تابعی از کرنش، از رابطه زیر (قانون نمایی برحسب σ) برای مدل سازی تنش سیلان استفاده شد:

$$\sigma = (\ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} - \ln A) / \beta \quad (10)$$

رابطه فوق را می‌توان با انجام عملیات جبری از رابطه ۳ بدست آورد.

منحنی‌های سیلان واقعی و مدل‌سازی شده (با استفاده از قانون نمایی) فولاد مورد مطالعه در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰°C و نرخ کرنش‌های گوناگون، به ترتیب در شکل‌های ۵ (الف و ب) نشان داده شده است.

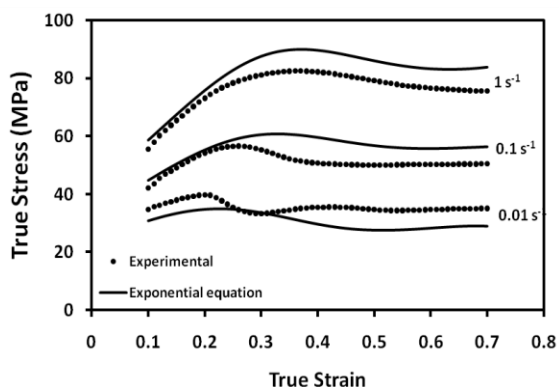
مدل توسعه داده شده اخیر

در این بخش نتایج مدلی که اخیراً بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زنر-هولومون و یک تابع چند جمله‌ای درجه سه از کرنش به توان m ، برای مدل‌سازی منحنی‌های تغییر شکل گرم فولاد API X65 توسعه داده شده است ارائه می‌گردد.

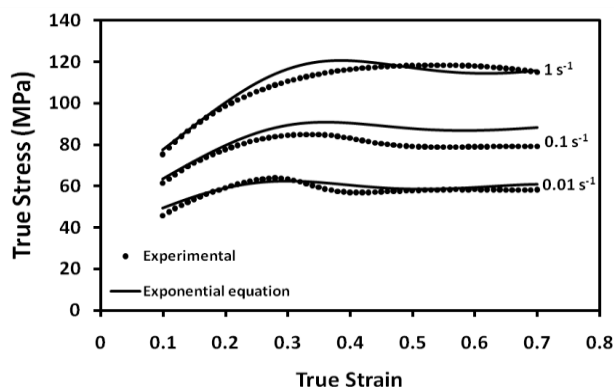
همان گونه که توسط میرزاده و نجفی زاده شرح داده شده است [۴]، تنش سیلان مواد مختلف در شرایط کار گرم را می‌توان با معادلات جامعی به شکل:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = f(\dot{\varepsilon}, T) \times f(\varepsilon) \quad (11)$$

بیان کرد، که در رابطه فوق جمله اول جهت بیان اثر حرارت و نرخ کرنش بر تنش سیلان و جمله دوم نیز برای بیان اثر کرنش بر تنش سیلان به کار می‌رود.



ب



الف

شکل ۵- منحنی های سیلان واقعی و مدل سازی شده (با استفاده از قانون نمایی) فولاد مورد مطالعه در دماهای الف) ۱۰۰۰ و ب) ۱۱۰۰°C

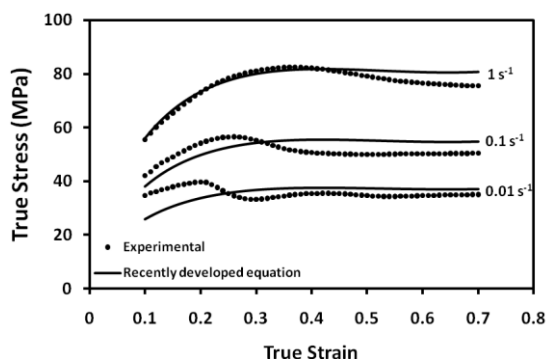
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2} \quad (15)$$

در رابطه فوق t_i خروجی واقعی، y_i خروجی مدل و N تعداد داده ها است. مقادیر RMSE محاسبه شده برای مدل های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، مدل جامع قانون نمایی با ثابت های وابسته به کرنش، از عملکرد بهتری برخوردار است؛ اما با این وجود به حجم محاسبات بالاتری نیاز دارد.

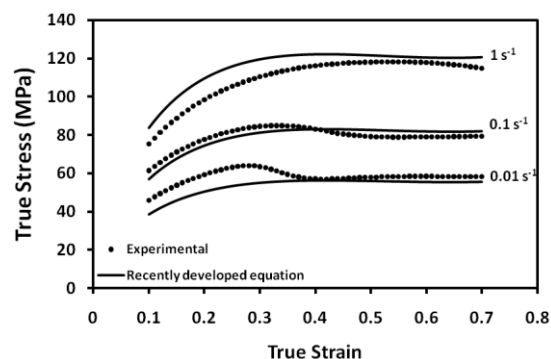
منحنی های سیلان واقعی و مدل سازی شده (با استفاده از مدل توسعه داده شده اخیر) فولاد مورد مطالعه در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰°C و نرخ کرنش های مختلف، به ترتیب در شکل های ۶ (الف و ب) نشان داده شده است.

مقایسه نتایج حاصل از مدل های مورد مطالعه

در اینجا به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل های مورد مطالعه جهت مدل سازی تنش سیلان فولاد API X65، از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد:



ب



الف

شکل ۶- منحنی های سیلان واقعی و مدل سازی شده (با استفاده از مدل توسعه داده شده اخیر) در دماهای الف) ۱۰۰۰ و ب) ۱۱۰۰°C

جدول ۲- مقادیر RMSE محاسبه شده برای مدل‌های مورد مطالعه

مدل مورد مطالعه	RMSE (MPa)
مدل قانون نمایی با ثابت‌های وابسته به کرنش	۴/۵۳
مدلی توسعه داده شده اخیر (بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زنر-هولومون و یک تابع چند جمله‌ای درجه سه از کرنش به توان m)	۴/۷۴

نتیجه گیری

۱- از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد مطالعه استفاده شد. معین گردید که مدل نمایی با ثابت‌های وابسته به کرنش، خطای کم‌تر یا به عبارت دیگر، عملکرد بهتری دارد.

۲- در صورت استفاده از مدل جامع توسعه داده شده بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زنر-هولومون و یک تابع چند جمله‌ای درجه سوم از کرنش به توان m، تنش سیلان فولاد API X65 در شرایط تغییر شکل گرم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma = \dot{\epsilon}^{0.122} \exp\left(\frac{0.122 \times 144998}{RT}\right) \times (-3.333 + 41.335\epsilon^{0.4} - 74.551\epsilon^{0.8} + 41.322\epsilon^{1.2})$$

در این پژوهش از قانون نمایی با ثابت‌های وابسته به کرنش، جهت مدل‌سازی منحنی‌های تغییر شکل گرم فولاد API X65 استفاده شد. نتایج حاصل از این مدل با نتایج حاصل از مدل جامع توسعه داده شده بر مبنای یک تابع توانی از پارامتر زنر-هولومون و یک تابع چند جمله‌ای درجه سوم از کرنش به توان m (یک ثابت است) مقایسه گردید. نتایج تحقیق را می‌توان به شکل زیر جمع بندی کرد:

که در این رابطه، ثابت‌های وابسته به کرنش از رابطه زیر بدست می‌آیند:

۳- با استفاده از قانون نمایی با ثابت‌های وابسته به کرنش تنش سیلان فولاد API X65 را در شرایط تغییر شکل گرم می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\sigma = (\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} - \ln A'') / \beta$$

$$\beta = -1.283\epsilon^3 + 2.071\epsilon^2 - 1.061\epsilon + 0.252$$

$$Q = -5,113,322\epsilon^4 + 7,125,160\epsilon^3 - 2,356,020\epsilon^2 - 227,485\epsilon + 487,024$$

$$\ln A'' = -347.6\epsilon^4 + 475.6\epsilon^3 - 150.0\epsilon^2 - 16.04\epsilon + 32.14$$

References:

- 1- G.R. Johnson and W.H. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", In: Proceedings of the 7th international symposium on ballistics, pp. 541–543, 1983.
- 2- E. Voce, "The relationship between stress and strain for homogeneous deformation", Journal of the Institute of Metals, Vol. 74, pp. 537–562, 1948.
- 3- A.S. Khan and S. Huang, "Experimental and theoretical study of mechanical behavior of 1100 aluminum in the strain rate range 10⁻⁵–10⁴ s⁻¹", International Journal of Plasticity, Vol. 8, pp. 397–424, 1992.
- 4- H. Mirzadeh and A. Najafizadeh, "Flow stress prediction at hot working conditions", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 1160–1164, 2010.
- 5- K. Peng, H. Zhong, L. Zhao, K. Xue and Y. Ji, "Strip shape modeling and its setup strategy in hot strip mill process", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, pp. 589–605, 2014.
- 6- M.Y. Zhan, Z. Chen, H. Zhang and W. Xia, "Flow stress behavior of porous FVS0812 aluminum alloy during hot-compression", Mechanics Research Communications, Vol. 33, pp. 508–514, 2006.
- 7- Y.C. Lin and X.M. Chen, "A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working", Materials & Design, Vol. 32, pp. 1733–1759, 2011.
- 8- H. Shi, A.J. McLaren, C.M. Sellars, R. Shahani and R. Bolingbroke, "Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminium alloys", Journal of Materials Science and Technology, Vol. 13, pp. 210–216, 1997.
- 9- M. Rakhshkhorshid, "Modeling the hot deformation flow curves of API X65 pipeline steel", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 77, pp. 203–210, 2015.
- 10- P.J. Zerilli and R.W. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations", Journal of Applied Physics, Vol. 61, pp. 1816–1825, 1987.
- 11- Y.C. Lin, M.S. Chen and J. Zhang, "Constitutive modeling for elevated temperature flow behavior of 42CrMo steel", Computational Materials Science, Vol. 424, pp. 470–477, 2008.
- 12- G.Z. Voyiadjis and A.H. Almasri, "A physically based constitutive model for fcc metals with applications to dynamic hardness", Mechanics of Materials, Vol. 40, pp. 549–563, 2008.
- 13- N. Haghdadi, A. Zarei-Hanzaki, A.R. Khalesian and H.R. Abedi, "Artificial neural network modeling to predict the hot deformation behavior of an A356 aluminum alloy", Materials & Design, Vol. 49, pp. 386–391, 2013.
- 14- V. Senthilkumar, A. Balaji and D. Arulkirubakaran, "Application of constitutive and neural network models for prediction of high temperature flow behavior of Al/Mg based nanocomposite", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 23, pp. 1737–1750, 2013.
- 15- Y. Zhu, W. Zeng, Y. Sun, F. Feng and Y. Zhou, "Artificial neural network approach to predict the flow stress in the isothermal compression of as-cast TC21 titanium alloy", Computational Materials Science, Vol. 50, pp. 1785–1790, 2011.
- 16- M.Y. Zhan, Z. Chen, H. Zhang and W. Xia, "Flow stress behavior of porous FVS0812 aluminum alloy during hot-compression", Mechanics Research Communications, Vol. 33, pp. 508–514, 2006.
- 17- J. Cai, F. Li, T. Liu, B. Chen and M. He, "Constitutive equations for elevated temperature flow stress of Ti–6Al–4V alloy considering the effect of strain", Vol. 32, No. 3, pp. 1144–1151, 2011.

18- R. Ebrahimi, S. H. Zahiri, and A. Najafizadeh, Mathematical Modeling of the Stress-Strain Curves of Ti-IF Steel at High Temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, pp. 301-305, 2006.

۱۹- س.غ.ح. حسنی و ر. محمودی، معادله بنیادی تغییرشکل گرم ورق منیزیمی Mg-4Sn-1Ca، مجله مواد نوین، دوره ۵، شماره ۲، ص ۱-۱۰، زمستان ۹۳.

۲۰- س.ح. هاشمی و م. رخش خورشید، "بررسی اثر ترکیب شیمیایی بر خواص مکانیکی فولاد میکروآلیاژی گرید API X65"، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال ۲۳، شماره ۲، ص ۴۷-۶۴، بهار و تابستان ۹۱.

۲۱- م. رخش خورشید و س.ح. هاشمی، "بررسی اثر سرد کردن بر رفتار استحاله تبرید پیوسته در فولاد خط لوله

API X65"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۸، ص ۵۷-۶۷، آبان ۹۲.

۲۲- م. رخش خورشید، س.ح. هاشمی و ح. مناجاتی زاده، "استفاده از آزمون پیچش گرم جهت تعیین تجربی دماهای بحرانی فولاد ایکس شصت و پنج"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱۳، ص ۲۹۱-۲۹۶، فوق العاده، اسفند ۹۳.

23- M. Rakhshkhorshid and S.H. Hashemi, "Experimental study of hot deformation behavior in API X65 steel", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 573, pp 37-44, 2013.

24- M. Shaban and B. Eghbali, "Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 527, pp. 4320-4325, 2010.

