مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 9-16

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر نرخ کرنش بر الگوی خمیری شابوش

غلامحسین مجذوبی[1]، سمانه پورالعجل[2]، احسان خادمی[3*]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان
*همدان، صندوق پستی 579 -65155، e.khademi@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 فروردین 1393
پذیرش: 26 تیر 1393
ارائه در سایت: 19 مهر 1393

کلید واژگان:
الگوی خمیری شابوش
نرخ کرنش
سخت‌شوندگی جنبشی
شبکه عصبی ساختگی

چکیده

الگوی سخت‌شوندگی جنبشی شابوش عموماً برای بررسی رفتار خمیری مواد در بارگذاری‌های چرخه‌ای و یکنوا با نرخ کرنش ایستاسان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که الگوی شابوش مستقل از نرخ کرنش است و ثابت‌های آن از آزمایش ایستاسان تعیین می‌گردند، این الگو توانایی پیش بینی رفتار ماده در نرخ کرنش‌های بالا را از دست می‌دهد. ازسوی دیگر، رفتار پویای مواد حتی در برخی از بارگذاری های چرخه‌ای عموماً وابسته به نرخ کرنش است. در این تحقیق با انجام آزمایش‌های ایستاسان و پویا در نرخ کرنش‌های گوناگون ثابت‌های الگوی شابوش تعیین و با استفاده از ثابت های به دست آمده اثر نرخ کرنش در الگوی شابوش در نظر گرفته می‌شود. همچنین، با استفاده از شبکه عصبی ساختگی نمودارهای تنش-کرنش برای نرخ کرنش‌های گوناگون پیش بینی و با نتیجه‌های آزمایشی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نتیجه حاصل از الگوی پیشنهادی با نتیجه های آزمایش و شبکه عصبی همخوانی قابل قبولی را نشان می‌دهند. دراین مقاله نشان داده می‌شود که ثابت‌های الگوی خمیری شابوش با نرخ کرنش تغییر می‌کنند و نیز اگر شبکه عصبی به طور صحیح آموزش داده شود از آن می‌توان برای میانیابی داده‌های آزمایشی استفاده نمود.

An investigation into strain rate dependency of Chaboche plasticity model

Gholamhossein Majzoobi[1], Ehsan Khademi[2*], Samaneh Pourolajal[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2- Department of Robotics Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
*P.O.B. 579 -65155 Hamedan, Iran, e.khademi@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 April 2014
Accepted 17 July 2014
Available Online 11 October 2014

Keywords:
Chaboche plasticity model
strain rate
kinematic hardening
artificial neural network

ABSTRACT

The Chaboche kinematic hardening model is generally used for modeling the plastic behaviour of material under quasi-static cyclic and monotonic loadings. This model is independent of strain rate and its constants are normally determined through quasi-static tests. Therefore, it cannot predict material behavior under high strain rate condition. On the other hand, the dynamic behaviour of materials even in some cyclic loadings is usually strain rate sensitive. In this investigation, the constants of Chaboche model are identified at various strain rates through quasi-static and dynamic tests and using these constants the effect of strain rate is incorporated in the Chaboche model. Moreover, the stress-strain diagrams at different strain rates are predicted using artificial neural network (ANN) and the results compared with the experimental data. The results from the strain rate dependent Chaboche model shows reasonable agreement with the experimental data and the prediction from ANN. It is also shown in this work that the constants of Chaboche plasticity model are strain rate dependent and if the neural network is trained properly, it can be used for interpolating between the experimental data.

1- پیشگفتار

امروزه الگوهای عددی در حل بسیاری از مسئله‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. تاکنون الگوهای ریاضی گوناگونی برای پیش بینی رفتار خمیری مواد ارائه شده است (پراگر [2]، آرمسترانگ فریدریک [3]، دافالیاس [4]، شابوش [5]، اوهنو و وانگ [6]، مک داول [7]). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بین تنش، کرنش، نرخ کرنش، دما و سایر عامل‌ها نظیر اندازه‌ی دانه وابستگی دو سویه وجود دارد؛ بنابراین، برای دست‌یابی به شناخت صحیح از رفتار پویای مواد لازم است نحوه‌ی ارتباط این عامل‌ها با یکدیگر بررسی شود [8] . اثر نرخ کرنش‌های ایستایی بر تنش تسلیم مواد توسط تئودور [9] مورد بررسی قرار گرفت، او نشان داد که تنش تسلیم و استحکام نهایی ماده تابعی از نرخ کرنش است. سپس مایدن و گرین [10] رفتار شش ماده گوناگون را در نرخ کرنش‌های ایستایی مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. لی و لین [11] نیز با انجام آزمایش‌هایی ویژگی های مکانیکی فولاد در نرخ کرنش های گوناگون را بررسی نمودند. الیچه [12

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
Gh. Majzoobi, E. Khademi, S. Pourolajal, An investigation into strain rate dependency of Chaboche plasticity model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 9-16, 2015 (In Persian)

Archive of SID
www.SID.ir

]رفتار کشسان و خمیری ماده را در نرخ کرنش‌ها و دماهای گوناگون مورد مطالعه قرار داد. رفتار مبتنی بر نرخ کرنش برای نیترات آلومینیوم توسط موکای و همکارانش [13] ارائه شده است.

مطالعاتی بر روی استفاده از شبکه عصبی ساختگی[1](ANN) در پیش‌بینی رفتار مواد صورت پذیرفته است. برای نمونه لیو و همکاران [14] با استفاده از شبکه عصبی ساختگی رفتار کشسان ورق‌های ناهمسانگرد را مورد بررسی قرار داد. همزمان، تحقیقات بسیاری بر روی استفاده از شبکه عصبی ساختگی به جای مدل خمیری صورت پذیرفته است. در این تحقیقات به جای استفاده از مدل های ریاضی برای پیش بینی رفتار ماده، از شبکه عصبی آموزش داده شده استفاده می‌شود به طوری که می توان رفتار تنش-کرنش ماده را به طور مستقیم از شبکه عصبی گرفت و در شبیه سازی ها از آن استفاده نمود. فوروکاوا و هافمن [15] شبکه عصبی خود را به گونه ای آموزش دادند تا نمو تنش بازگشتی[2] و نمو تنش تسلیم را فراگیرد و از آن در شبیه سازی اجزاء محدود استفاده نمودند و نتایج را با مدل خمیری شابوش مقایسه نمودند. هابر و ساکمیس [16] به وسیله شبکه عصبی ساختگی توانستند ثابت های الگوی سخت‌شوندگی جنبشی آرمسترانگ- فریدریک را برای شبیه‌سازی تعیین نمایند. تیلیوکوفسکی و هوبر [17] نیز کار مشابهی انجام دادند ولی خصوصیات ویسکوخمیری ماده را نیز در نظر گرفتند. یون و همکاران [18]نیز از شبکه عصبی در شبیه‌سازی‌های ماده در حالت بارگذاری چند محوره استفاده نمودند.

یکی از پرکاربردترین الگوهای خمیری، الگوی سخت‌شوندگی جنبشی شابوش است [5]. پژوهشگران بسیاری این الگو و نحوه تعیین ثابت های آن را مطالعه نموده‌اند (باری و حسن [19] ، رحمان و همکاران [20] ،کریشنا و همکاران [21] ، رضایی پژند و سینایی [22]). گرچه در زمینه تأثیر نرخ کرنش بر رفتار ماده نیز مطالعاتی صورت پذیرفته است، ولی تاکنون تغییر ثابت‌های الگوی خمیری شابوش با نرخ کرنش مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله در آغاز مرور مختصری بر الگوی خمیری شابوش و بیان آزمایش‌ها ایستاستان و گویا صورت خواهد پذیرفت. سپس ثابت‌های این الگو با استفاده از نتیجه آزمایش‌ها در نرخ‌های کرنش گوناگون و با استفاده از بهینه سازی تعیین خواهند شد. در ادامه، داده‌های گرفته شده از آزمایش به منظور آموزش شبکه عصبی ساختگی استفاده می‌شوند تا بتوان رفتار ماده را در نرخ کرنش‌های متفاوت پیش بینی نمود. سرانجام، الگوی وابسته به نرخ کرنشی ارائه خواهد شد تا به کمک آن بتوان از الگوی خمیری شابوش در نرخ کرنش‌های متفاوت استفاده نمود. به منظور ارزیابی الگوی خمیری شابوش نیز، مقایسه‌ای بین نتیجه‌ها صورت می‌پذیرد.

2- الگوی سخت شوندگی

در این مقاله نظریه کرنش‌های کوچک برای تجزیه تانسور کرنش به دو بخش کشسان و خمیری در نظر گرفته شده‌است. همچنین، رفتار ماده مستقل از دما بوده و اثرات دمایی تأثیری بر رفتار ماده ندارد و بارگذاری در دمای اتاق صورت پذیرفته‌است. معیار فون میسز[3]برای تسلیم ماده در نظر گرفته شده‌است و قانون جریان وابسته به معیار تسلیم فرض شده است. الگوی ماده مورد بررسی الگوی شابوش است که به منظور ساده‌سازی از عبارت سخت‌شوندگی همسانگرد درآن صرف‌نظر شده و الگوی خمیری در نظر گرفته شده فقط مبتنی بر سختی جنبشی است. الگوی خمیری شابوش، ترکیبی از چندین عبارت سخت‌شوندگی تنش بازگشتی به شکل رابطه آرمسترانگ-فردریک است که هر یک از این عبارت‌ها، بخشی از نمودار تنش-کرنش را شبیه سازی می‌کنند و به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود[5] :

$$X=\sum_{i=1}^{m} X_i dX_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon^p - \gamma_i X_i dp \qquad (1)$$

در رابطه (1)، C_i و γ_i ثابت‌های ماده هستند که γ_i ها بدون بعد و C_iها از جنس تنش هستند و این ثابت‌ها از طریق آزمایش به دست می‌آیند، همچنین dp کرنش تجمعی خمیری[4] است و طبق رابطه (2) محاسبه می‌شود[19] :

$$dp=\frac{2}{3}(d\varepsilon^p : d\varepsilon^p)^{1/2}=d\lambda \qquad (2)$$

در حالت بارگذاری تک محوره با انتگرال‌گیری از رابطه (1) تنش به صورت رابطه (3) نوشته می‌شود [5] :

$$\sigma_x=\sigma_0+\sum_{i=1}^{4}\frac{C_i}{\gamma_i}[1-\exp\{-\gamma_i(\varepsilon_x^p)\}] \qquad (3)$$

که در رابطه فوق، σ_0 تنش تسلیم نخستین و ε_x^p مقدار کرنش خمیری در هر نقطه از نمودار تنش-کرنش است. شابوش به منظور شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند[5] از چهار مؤلفه سختی ($m=4$) استفاده نمود. در این الگو، یک نمودار پسماند پایدار به سه بخش بحرانی تقسیم می‌شود که عبارت است از [5]:

1. ضریب بالای اولیه بلافاصله پس از تسلیم
2. بخش غیرخطی گذرا (بخش زانویی نمودار تنش- کرنش)
3. بخش ضریب ثابت در محدوده کرنش بالا

شابوش پیشنهاد کرد که تنش بازگشتی یکم (X_1) باید سخت شوندگی را با یک ضریب بسیار بالا شروع کرده و بسیار سریع پایدار نماید. عبارت دوم (X_2) و چهارم (X_4) بخش غیرخطی گذرای حلقه پسماند پایدار (بخش زانویی) را شبیه سازی می‌کنند. سرانجام تنش بازگشتی سوم (X_3) باید یک عبارت سخت شوندگی خطی باشد ($\gamma_3=0$) تا بخش خطی نمودار پسماند را در محدوده کرنش بالا الگوسازی کند. در هر مرحله از بارگذاری چهار عبارت تنش بازگشتی با هم جمع می‌شوند و یک تنش بازگشتی کلی (X) را به وجود می‌آورند که نشان‌دهنده‌ی بردار موقعیت مرکز سطح تسلیم در این بارگذاری است. با توجه به مفهوم فیزیکی عنوان‌شده برای هر تنش بازگشتی، رابطه (3) را می توان به صورت رابطه (4) نوشت [19]:

$$\sigma_x=\sigma_0+\frac{C_1}{\gamma_1}[1-\exp\{-\gamma_1(\varepsilon_x^p)\}]+\frac{C_2}{\gamma_2}[1-\exp\{-\gamma_2(\varepsilon_x^p)\}]+$$
$$\frac{C_4}{\gamma_4}[1-\exp\{-\gamma_4(\varepsilon_x^p)\}]+2C_3(\varepsilon_x^p) \qquad (4)$$

در این مقاله، ثابت‌های الگوی شابوش از نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش تعیین می‌شوند. بدین منظور، ثابت‌ها با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک واز طریق بهینه کردن اختلاف نتیجه‌های آزمایشگاهی با رابطه ریاضی الگوی شابوش، محاسبه شده‌اند. در بخش بعدی آزمایش‌های انجام شده و نتیجه حاصل از آن‌ها ارائه شده است.

3- آزمایش

در این تحقیق از فولاد St-37 به عنوان ماده‌ی آزمایش استفاده شده‌است.

1- Artificial neural network
2- Back stress
3- Von-Mises
4- Comulativeplastic strain
5- Hystersis

Archive of SID
www.SID.ir

آزمایش‌های انجام شده برای به دست آوردن نمودارهای تنش کرنش در نرخ کرنش‌های گوناگون به ترتیب عبارت‌اند از:

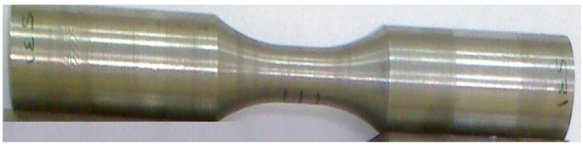
الف- آزمایش چرخه‌ای (فشار-کشش) در نرخ کرنش‌های پایین با دستگاه اینسترون که در آن از نمونه‌های چرخه‌ای (فشار-کشش) ایستاسان طبق استاندارد ASTM E606، [23] استفاده شده‌است. همان طور که در شکل (1) نشان داده شده‌است، نمونه‌ها به صورت دمبلی شکل و با طول مقیاس[1] 12/5میلیمتر، به گونه‌ای که با ازدیادطول‌سنج[2] موجود هماهنگ باشند، ساخته شده‌اند.

ب- آزمایش پویای فشاری با دستگاه میله‌ی هاپکینسون در نرخ کرنش بالا که در آن از نمونه‌ی استوانه‌ای شکل با طول و قطر برابر 15 میلی‌متر یعنی نسبت طول به قطر 1، $(L/D=1)$ استفاده شده‌است. این نمونه در شکل (2) نشان داده شده‌است.

3-1-نتیجه آزمایش‌ها

نمودار تنش-کرنش نشان داده شده در شکل (3) از آزمایش ایستاسان چرخه‌ای فشار-کشش توسط دستگاه اینسترون با نرخ کرنش 0/05 /s به دست آمده است و از این نرخ کرنش برای محاسبه ثابت های الگوی شابوش در حالت ایستاسان استفاده شده است.

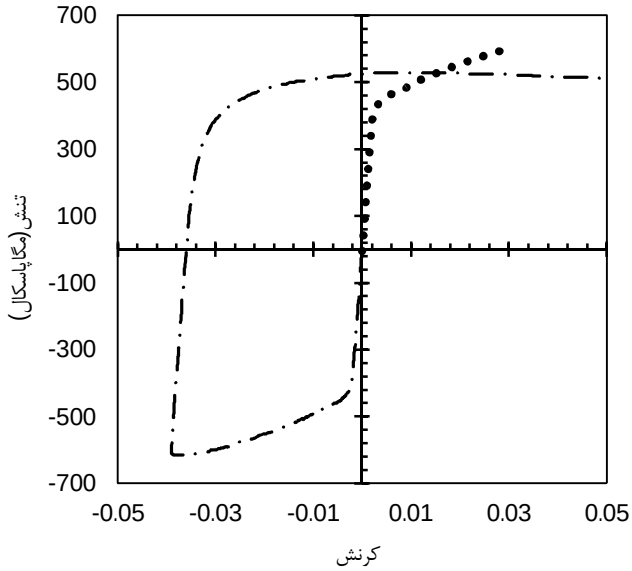
با توجه به این‌که برای استخراج ثابت‌های الگوی شابوش نیاز به نتیجه‌های تست کشش در ناحیه خمیری است، بخش مربوط به فشار از نمودارهای چرخه‌ای جداشده که با قرینه کردن آن نسبت به مبدأ می‌توان نمودارهایی مشابه نیم سیکل کششی به‌دست‌آورد که چنین نموداری در بارگذاری ایستاسان در شکل (3) نشان داده شده‌است. هدف از انجام آزمایش‌های فشاری هاپکینسون، به دست آوردن نمودارهای فشار پویا برای نرخ کرنش‌های گوناگون است؛ بنابراین آزمایش‌ها در دمای اتاق با سرعت‌های گوناگون انجام شده‌است. برای استخراج منحنی تنش-کرنش از آزمایش هاپکینسون باید از نمودار تغییر اختلاف پتانسیل بر حسب زمان برای کرنش سنج های میله ورودی و خروجی استفاده نمود که از شرح جزئیات صرف نظر می‌شود [24] . درشکل (4) نمودارهای تنش کرنش آزمایشی به دست آمده برای پنج نرخ کرنش گوناگون، ارائه شده است.



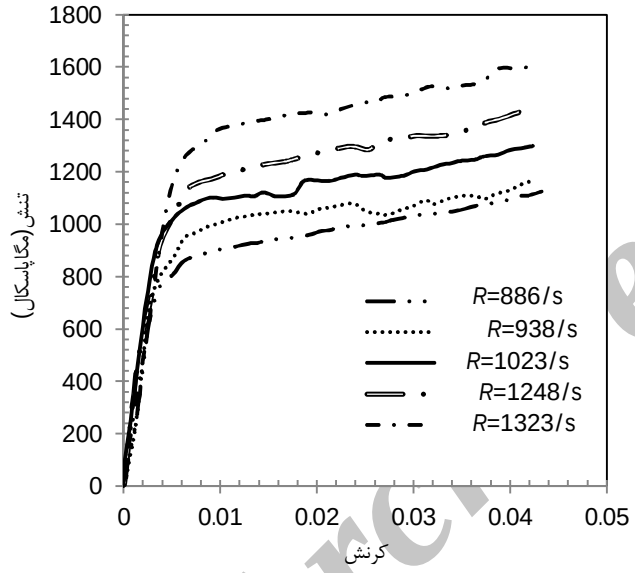
شکل1 نمونه‌ی استفاده شده در آزمایش چرخه‌ای با نرخ کرنش پایین

شکل2 نمونه‌ی استفاده شده در آزمایش پویابا نرخ کرنش بالا

1- Gage length
2- Extensometer



شکل3 نمودار تنش-کرنش چرخه‌ای ایستاسان



شکل4 نمودار تنش-کرنش پویا برای نرخ کرنش‌های گوناگون

4- تعیین ثابت‌های الگوی شابوش در نرخ کرنش‌های گوناگون با استفاده از بهینه سازی

در این بخش ثابت‌های الگوی شابوش برای نرخ کرنش‌های گوناگون به وسیله روش بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. تابع هدف مورد استفاده در این بهینه سازی کمینه نمودن اختلاف مقدار آزمایشگاهی و تئوری تنش است. طبق رابطه (5) داریم:

$$f(x)=(\sigma_x)_{\text{experimental}}-(\sigma_x)_{\text{Chaboche}} \quad (5)$$

که تنش شابوش در هر کرنش خمیری با استفاده از برابری (4) محاسبه می‌شود. قید مورد استفاده در بهینه سازی به صورت غیرخطی است به این صورت که در بیشترین کرنش خمیری، $\varepsilon_x^p(\max)$، مجموع تنش‌های بازگشتی و تنش تسلیم نخستین بایستی با تنش بیشینه آزمایشی برابر باشد. طبق رابطه (6) داریم:

www.SID.ir
Archive of SID

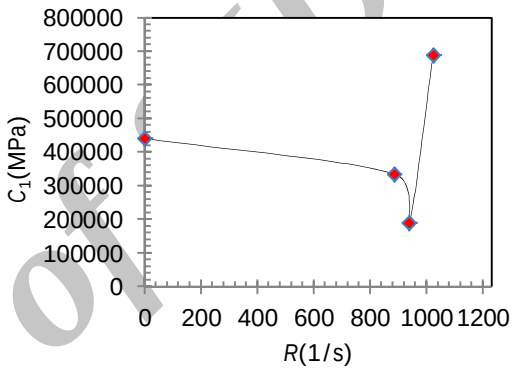
$$\sigma_x(\max)=\sigma_0+\frac{C_1}{\gamma_1}+\frac{C_2}{\gamma_2}+\frac{C_4}{\gamma_4}+2C_3\varepsilon_x^p(\max) \quad (6)$$

در بهینه سازی الگوریتم ژنتیک کرانه‌هایی برای ثابت های الگوی شابوش در نظر گرفته شده است که در جدول (1) آورده شده‌اند.

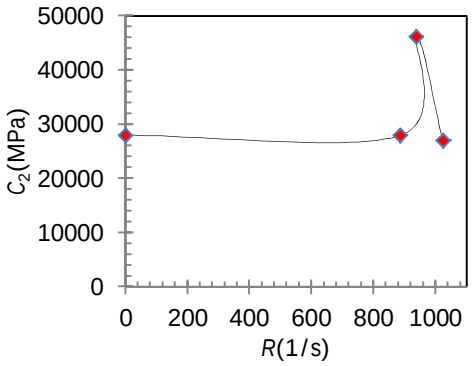
نتیجه حاصل از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک برای 50 حل محاسبه شده و میانگین نتیجه‌ها به عنوان ثابت‌های نهایی الگوی شابوش درنرخ کرنش‌های گوناگون در نظر گرفته شده‌است. روند تغییر ضریب‌های الگوی شابوش با نرخ کرنش در شکل‌های (5) تا (11) نشان داده شده است.

جدول1 تابع هدف و قیدهای بهینه سازی

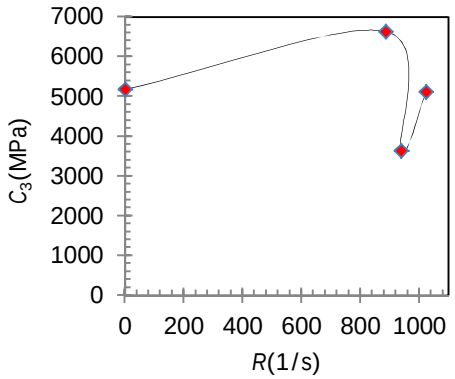
کرانه پایین	کرانه بالا	عامل
C_3	C_1	C_2 و C_4
γ_3	γ_1	γ_2 و γ_4



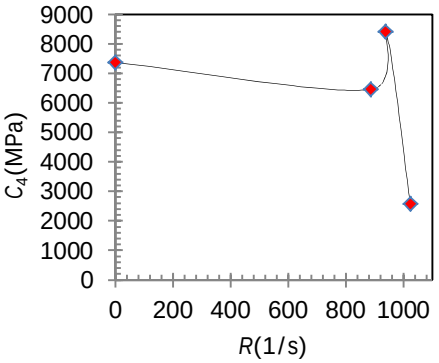
شکل5 تغییر ثابت C_1 بر حسب نرخ کرنش



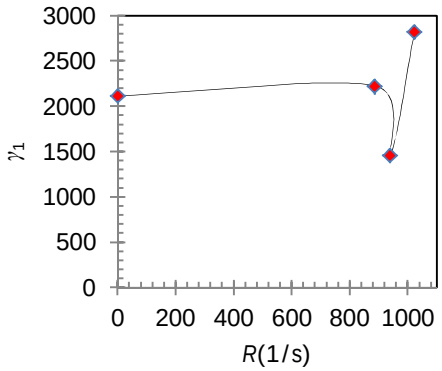
شکل6 تغییر ثابت C_2 بر حسب نرخ کرنش



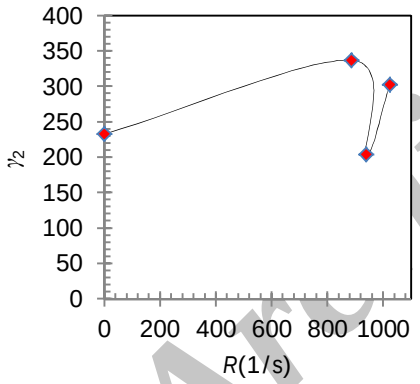
شکل7 تغییر ثابت C_3 بر حسب نرخ کرنش



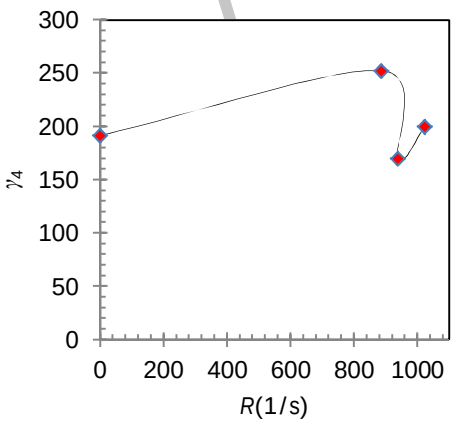
شکل8 تغییر ثابت C_4 بر حسب نرخ کرنش



شکل9 تغییر ثابت γ_1 بر حسب نرخ کرنش



شکل10 تغییر ثابت γ_2 بر حسب نرخ کرنش



شکل11 تغییر ثابت γ_4 بر حسب نرخ کرنش

Archive of SID

www.SID.ir

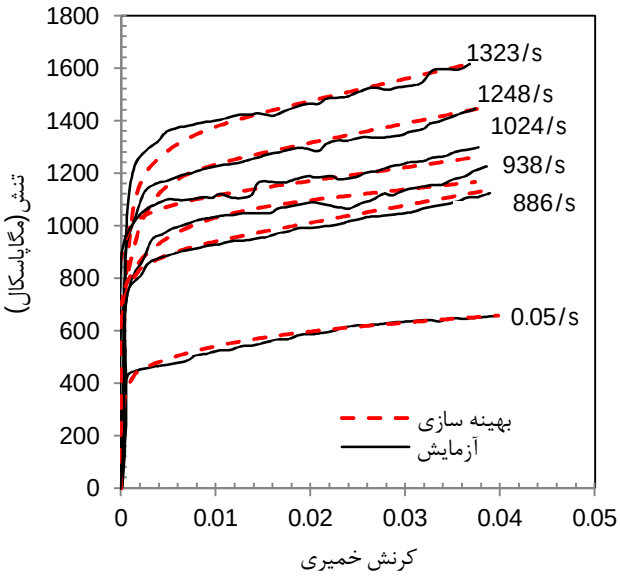
در شکل (12) نیز نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش با نمودارهای الگوی شابوش،که ضریب‌های آن از طریق بهینه سازی محاسبه شده، مقایسه شده است.

5- پیش‌بینی نمودار تنش-کرنش نرخ‌های گوناگون با استفاده از شبکه عصبی ساختگی

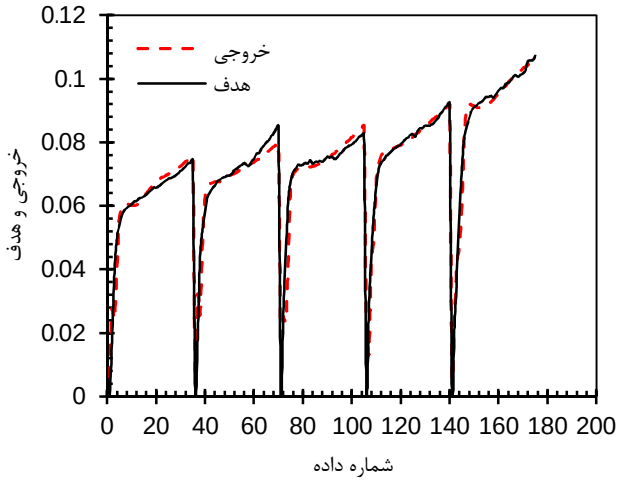
برای پیش‌بینی نمودارهای تنش-کرنش به وسیله شبکه عصبی ساختگی، از نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش در نرخ کرنش‌های گوناگون در مرحله آموزش شبکه استفاده شده‌است. برای آموزش، نرخ کرنش و کرنش خمیری به عنوان ورودی شبکه و تنش به عنوان خروجی آن در نظرگرفته شده‌است. شبکه عصبی ساختگی که در این مقاله استفاده شده است دارای سه لایه پنهان است که در لایه‌ی یکم 8 نرون[1]، در لایه‌ی دوم 9 نرون و در لایه‌ی آخر 9 نرون در نظر گرفته شده‌است. برای لایه‌های پنهان یکم، دوم و سوم به ترتیب از توابع خطی[2]، تانژانتی[3] و تانژانتی استفاده شده‌است. شبکه عصبی ساختگی در هر مرحله از آموزش، ورودی و خروجی‌ها را گرفته و بعد از آموزش اولیه مقدار خروجی خود، y^{ANN} را با خروجی مسئله y^{R} مقایسه می‌کند و این کار را آن قدر ادامه می‌دهد تا اختلاف نتیجه‌ها به میزان مطلوب برسد.

در شکل (13) داده‌های خروجی به دست آمده از شبکه عصبی ساختگی به ازای مقادیر ورودی، با مقادیر خروجی واقعی مسئله مقایسه شده‌است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، مطابقت خوبی بین داده‌های خروجی از شبکه عصبی ساختگی و نتیجه‌های حاصل از آزمایش به دست آمده است.

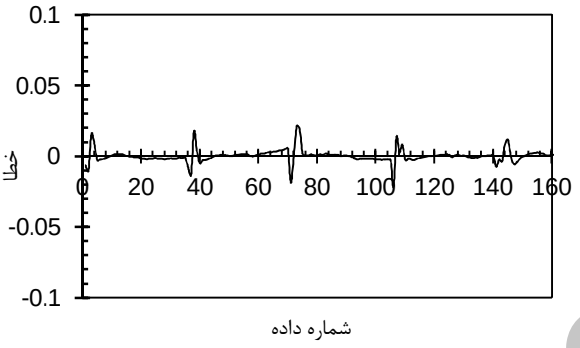
در شکل (14) درصد خطای داده‌های خروجی به دست آمده از شبکه عصبی ساختگی نشان داده شده‌است. با توجه به این شکل، میزان خطاها در بازه $\pm 2\times10^{-2}$ است و تمرکز خطای شبکه عصبی ساختگی در نواحی نزدیک به صفر است.



شکل12 مقایسه نمودار تنش-کرنش حاصل از بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و نتیجه‌های آزمایشگاهی

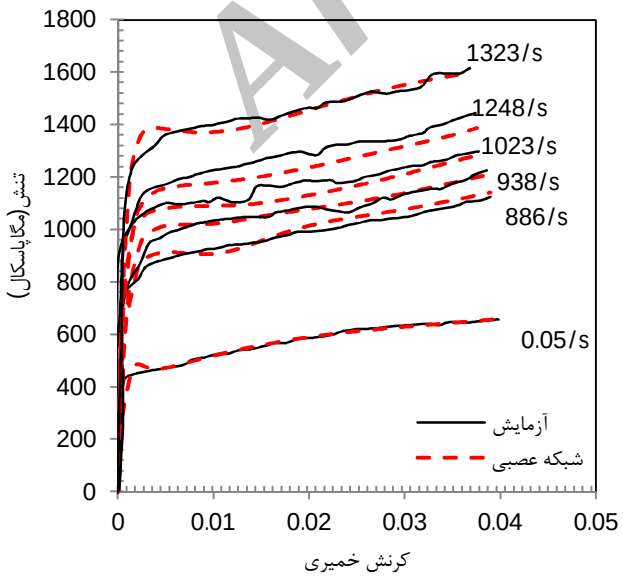


شکل13 نمودار مقایسه خروجی‌های شبکه عصبی ساختگی و مقادیر واقعی



شکل14 نمودار خطاهای شبکه عصبی ساختگی

در شکل (15) نیز نمودارهای تنش-کرنش برای نرخ کرنش‌های 0/05، 886، 938، 1024، 1248، 1323رسم شده است و می‌توان میزان همخوانی نمودارهای به دست آمده از آزمایش و پیش‌بینی شبکه عصبی ساختگی را مشاهده نمود.



شکل15 مقایسه پیش بینی نمودار تنش-کرنش با شبکه عصبی ساختگی و آزمایش

1- neron
2- purelin
3- tansig

Archive of SID
www.SID.ir

6- تعمیم الگوی خمیری برای نرخ کرنش‌های گوناگون

همان‌گونه که پیشتر آمد، ثابت‌های الگوی خمیری شابوش در هر نرخ کرنش با استفاده از نتیجه‌های حاصل از آزمایش محاسبه می‌گردند. به منظور ارائه روند پویا برای الگوی شابوش که بتواند رفتار ماده را در هر نرخ کرنش پیش‌بینی نماید، از مجموعه رابطه‌هایی که همگی تابعی از نرخ کرنش و کرنش پلاستیک هستند، استفاده شده است. رابطه تعمیم یافته پیشنهادی به صورت زیر است. طبق روابط (7-11) داریم:

$$\sigma_x = (\sigma_s)(\sigma_m)(\sigma_d) + K \quad (7)$$

$$\sigma_s = \sigma_0 + \sum_{i=1}^{4} \frac{C_i}{\gamma_i}[1 - \exp\{-\gamma_i(\varepsilon_x^p)\}] \quad (8)$$

$$\sigma_m = \sum_{i=1}^{2} a_i \exp(b_i(\varepsilon_x^p)) \quad (9)$$

$$\sigma_d = s_0 + \sum_{n=1}^{2}[s_n \sin(n\pi/2 + w_s \dot{\varepsilon}_p)] \quad (10)$$

$$K = f \exp(d(\dot{\varepsilon}_p)) \quad (11)$$

که $\dot{\varepsilon}_p$ نرخ‌کرنش است و ثابت‌های a_i، b_i، s_n، s_0، w_s، d، f از پوش کردن رابطه‌های ارائه شده بر نمودارهای تنش-کرنش آزمایشی تعیین می‌شوند.

در الگوی پیشنهادی، رابطه (9) تبدیل‌کننده نمودارهای ایستایی به حالت پویا است و به عنوان ضریبی برای رابطه ایستاسان شابوش که در رابطه (9) آورده شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد و رابطه (10) و رابطه (11) که تابعی از نرخ‌کرنش هستند، تعمیم دهنده رابطه پویا برای نرخ‌کرنش‌های گوناگون می‌باشند.

ثابت‌های c_i، γ_i نیز مطابق الگوی ایستاسان شابوش در نظر گرفته شده‌اند و با بهینه سازی از نمودار تنش-کرنش آزمایشی ایستاسان محاسبه می‌شوند که مقدار آن‌ها در جدول (2) آورده شده است. سایر ثابت‌های الگوی پیشنهادی ارائه شده نیز در جدول (3) ارائه شده است.

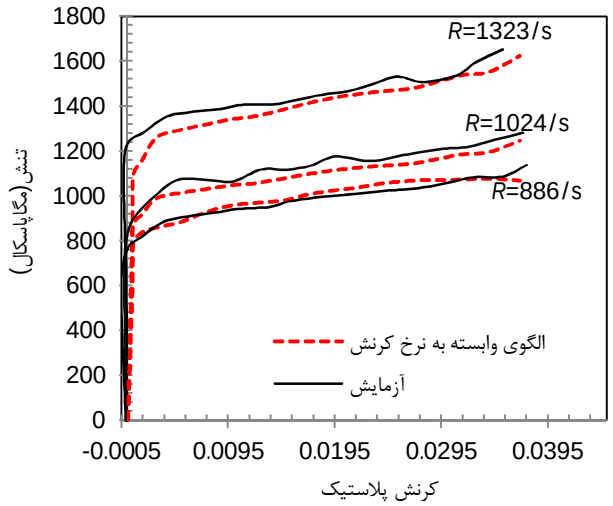
در شکل‌های (16) و (17) نمودارهای حاصل از الگوی پیشنهادی وابسته به نرخ کرنش و نمودارهای تنش-کرنش آزمایشی برای پنج نرخ کرنش گوناگون نمایش داده‌شده‌اند. همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، الگوی ارائه شده می‌تواند رفتار ماده را در نرخ کرنش‌های گوناگون ایستایی و حتی پویا پیش‌بینی نماید.

جدول2 ثابت‌های رابطه الگوی ایستاسان شابوش

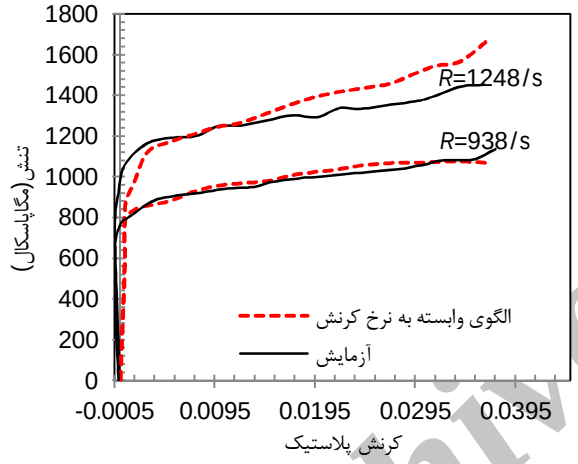
c_1	c_2	c_3	c_4
51/8	0/4592	0/4240	0/5510
γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
0/1551	0/0936	0	0/9404

جدول3 ثابت‌های رابطه تبدیل الگوی شابوش از ایستایی به پویا

a_1	a_2	b_1	b_2	d
1/896	-25/04	-4/013	-0/03407	-0/0002752
s_0	s_1	s_2	w_s	f
1/619	0/1604	-0/7302	0/01461	1125



شکل16 مقایسه نتیجه‌های آزمایش و الگوی وابسته به نرخ کرنش



شکل17 مقایسه آزمایش و الگوی پیشنهادی وابسته به نرخ کرنش

7- مقایسه نتیجه شبکه عصبی ساختگی و الگوی وابسته به نرخ کرنش

به منظور ارزیابی الگوی پیشنهادی وابسته به نرخ کرنش ارائه شده، از شبکه عصبی ساختگی استفاده شده‌است. بدین منظور، با استفاده از شبکه عصبی ساختگی که توسط داده‌های آزمایشی آموزش داده شده است، نمودارهای تنش-کرنش برای نرخ کرنش‌های 870/s، 900/s ، 990/s، 1000 /s، 1250/s و 1330/s میانیابی شده و با نمودارهای حاصل از میانیابی با استفاده از الگوی وابسته به نرخ‌کرنش مقایسه شده‌اند که نتیجه آن در شکل‌های (18) و (19) نشان داده شده است.

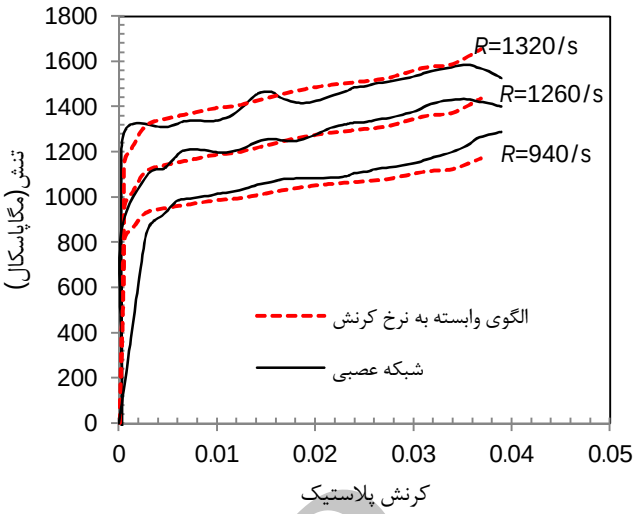
با توجه به این نمودارها، مطابقت قابل قبولی میان نتیجه الگوی پیشنهادی و شبکه عصبی ساختگی وجود دارد که توانایی الگوی پیشنهادی در پیش بینی رفتار ماده در نرخ کرنش‌های گوناگون را نشان می‌دهد.

8- بحث و نتیجه‌گیری

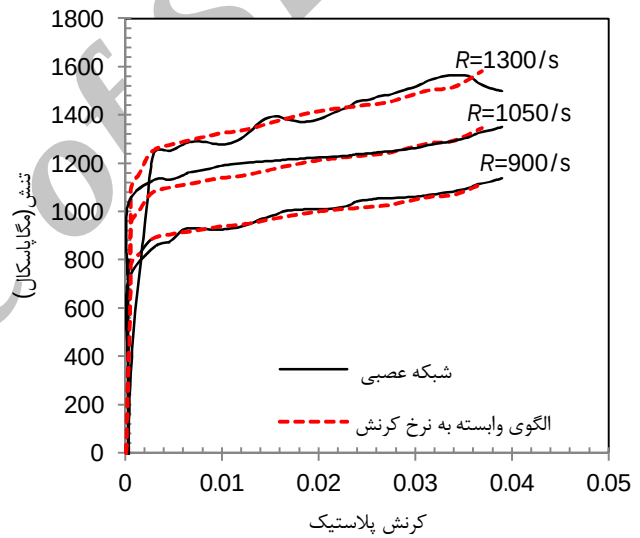
در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده و گوناگونی برای تعیین ثابت‌های الگوی ماده توسط محققین ارائه شده است. اغلب این روش‌ها بر پایه نگره‌های

Archive of SID

www.SID.ir



شکل 18 مقایسه نتیجه شبکه عصبی ساختگی و الگوی وابسته به نرخ کرنش، برای نرخ کرنش 940/s و 1260/s و 1320/s



شکل 19 مقایسه نتیجه شبکه عصبی ساختگی و الگوی وابسته به نرخ کرنش، برای نرخ کرنش 900/s و 1050/s و 1300/s

فیزیکی بنا شده‌اند که در نتیجه با محدودیت‌هایی روبرو هستند؛ بنابراین، استفاده از روش‌هایی نظیر روش شبکه عصبی ساختگی که می‌تواند رفتار ماده را در شرایطی مانند نرخ کرنش‌های گوناگون پیش‌بینی کنند، مورد توجه واقع شده‌است. در این تحقیق نشان داده می‌شود که ثابت‌های الگوی شابوش به نرخ کرنش وابسته هستند و با تغییر نرخ‌کرنش تغییر می‌کنند و الگوی ایستایی شابوش برای پیش بینی رفتار پویا در نرخ کرنش‌های گوناگون گسترش داده شده است؛ بنابراین، به منظور دستیابی به الگوی ماده‌ای که بتواند رفتار ماده را در بارگذاری‌های پویا شبیه سازی کند، عبارتی به الگوی خمیری شابوش اضافه شده است که مقایسه نتیجه آن با آزمایش انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی الگوی جدید پیشنهادی، نمودارهای تنش-کرنش به کمک شبکه عصبی ساختگی و در نرخ کرنش‌های گوناگون میانیابی شده‌اند. مقایسه نمودارهای میانیابی شده توسط شبکه عصبی و الگوی شابوش تعمیم یافته، توانایی الگوی پیشنهادی در پیش بینی رفتار ماده در نرخ کرنش های گوناگون رانشان می‌دهد.

9- فهرست علائم

C_i	ثابت الگوی ماده شابوش(Pa)
dp	کرنش تجمعی خمیری
R	نرخ کرنش(s^{-1})
X	تنش بازگشتی (Pa)

علایم یونانی

ε_x^p	کرنش خمیری
γ_i	ثابت بدون بعد الگوی شابوش
σ_0	تنش تسلیم نخستین

10- مراجع

[1] A. Ghaei, modeling of nonlinear elastic modulus variation during cyclic loading, *Modares Mechanical Engineering,* Vol.13, No. 7, pp. 10-17,2013. (In Persian)
[2] W. Prager, Recent developments in the mathematical theory of plasticity. *Journal of Applied Physics,* Vol. 20, pp. 235–241, 1949.
[3] P. J. Armstrong, C.O. Frederick, A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, Report RD/B/N731,CEGB, *Central Electricity Generating Board,* Berkeley, UK, 1966.
[4] Y. F. Dafalias, The concept and application of the bounding surface in plasticity theory. In*: IUTAM Symp. on Physical Non-Linearities in Structural Analyses,* Senlis, France. Springer-Verlag, 1980.
[5] J. L. Chaboche, Time-Independent constitutive theories for cyclic plasticity, *International Journal Of Plasticity,* Vol. 2, No. 2, pp. 149-188, 1986.
[6] N. Ohno, J. D. Wang, Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part I: formulation and basic features for ratchetting behavior, *International Journal of Plasticity,* Vol. 9, pp. 375–390, 1993.
[7] D. L. McDowell, A. B. Lamar, Modeling ratcheting and anisotropic deformation with hardening dynamic recovery format models on Plasticity and its Current Applications, *Tsu,* Japan. Pergamon, Oxford, pp. 247–251, 1989.
[8] V. Tvergaard, A. Needleman, K. K. Lo, Flow localization in the plane strain tensile test*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids,* Vol. 29, pp. 115–142, 1981.
[9] N. Theodore, Tensile testing of materials at high rates of strain, *Journal of Experimental Mechanics,* Vol. 21, pp. 177-185, 1981.
[10] C. J. Maiden, S. J. Green, Compressive strain-rate tests on six selected materials at strain rates from 10-3 to 104 in/in/sec, *Journal of Applied Mechanics,* Vol. 33, pp. 496-504, 1981.
[11] W. S. Lee, C. F. Lin, Comparative study of the impact response and microstructure of 304L stainless steel with and without prestrain, *Metallurgical and Materials Transactions A,* Vol. 33, No.9, pp. 2801–2810, 2002.
[12] A. S. M. Eleiche, A literature survey of the combined effects of strain rate and elevated temperature on the mechanical properties of metals, *Air Force Materials Laboratories,* Report AFML–TR–72–125, 1972.
[13] T. Mukai, M. Kawazoe, K. Higashi, Strain-rate dependence of mechanical properties in AA5056 Al–Mg alloy processed by equal-channel-angular-extrusion, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 247, No. 1–2, pp. 270-274, 1998.
[14] G. R. Liu, X. Han, K. Y. Lam, Determination Of Elastic Constants Of Anisotropic Laminated Plates Using Elastic Waves And A Progressive Neural Network, *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 252, No. 2, pp. 239-259, 2002.
[15] T.Furukawa, M. Hoffmanb, Accurate cyclic plastic analysis using a neural network material model, *Engineering Analysis with Boundary Elements,* Vol. 28,pp.195–204, 2004.
[16] N. Huber, Ch. Tsakmakis, Determination of constitutive properties fromspherical indentation data using neural networks. Part i:the case of pure kinematic hardening in plasticity laws, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids,* Vol. 47, pp. 1569–1588, 1999.
[17] E. Tyulyukovskiy,N. Huber, Identification of viscoplastic material parameters from spherical indentation data: Part I. Neural networks, *Journal of Materials Research*,Vol. 21(3), pp. 664-676, 2006.
[18] G. J .Yun, J. Ghaboussi, A.S.Elnashai, A new neural network-based

Archive of SID

www.SID.ir

model for hysteretic behavior of materials, *International Journal Numer. Meth. Engn*, Vol.73, pp.447–469.2008.

[19] S. Bari,T. Hassan, Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation. *International Journal of Plasticity*. Vol.16, pp. 381–409, 2000.

[20] S. M. Rahman, T. Hassan, S. Ranji Ranjithan, Automated Parameter Determination of Advanced Constitutive Models, *Proceedings of the ASME Pressure Vessels Piping Conference,* Denver, Colorado, USA, pp. 261–72, 2005.

[21] S. Krishna, T. Hassan, Macro versus micro-scale constitutive models in simulating proportional and nonproportional cyclic and ratcheting responses of stainless steel 304, *International Journal of Plasticity*. Vol. 25, pp. 1910–49, 2009.

[22] M. Rezaiee-Pajand, S. Sinaie, On the calibration of the Chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction, *International Journal Of Solids Struct,* Vol. 46, pp. 9–17, 2009.

[23] E. Woldesenbet, J. Vinson, Effect of specimen geometry in high-strain-rate testing of graphite/epoxy composites, *Structural Dynamics,* Vol. 2, pp. 927-934, 1997.

[24] S. Lahmi, Gh. Majzoobi, *determination of constants of Material model using Taylor's test, Hopkinson bar and neural networks,* Ms Thesis, Department of Mechanical Engineering, Buali sina University, Hamedan, 2012. (In Persian)

Archive of SID

www.SID.ir