

## تحلیل تجربی و عددی انباشت کرنش پلاستیک در ورق آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت کم در بارگذاری کم چرخه

الیاس عبداللهی<sup>1</sup>، تاج بخش نوید چاخارلو<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 51666-14766، tnavid@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 شهریور 1395

پذیرش: 18 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

انباشت کرنش

سخت‌شوندگی سینماتیک غیر خطی

بارگذاری کم چرخه

پلاستیسیته

### چکیده

انباشت کرنش پلاستیک در طول بارگذاری سیکلی یکی از دلایل وقوع واماندگی خستگی می‌باشد. به منظور پیش‌بینی عمر خستگی ورق‌ها، ضروری است انباشت کرنش پلاستیک و همچنین عوامل مؤثر بر میزان آن در طول بارگذاری‌های سیکلی به دقت محاسبه شود. در این تحقیق با استفاده از ترکیب معیار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده و افزودن آن به برنامه المان محدود تجاری آباکوس، با استفاده از زیر برنامه نوشته شده در فرترن، میزان انباشت کرنش در نمونه‌های ساخته شده از ورق نازک آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا، با انجام آزمایش‌های سیکلی تجربی با کنترل کرنش و همچنین آزمایش‌های سیکلی با کنترل تنش، ضرایب مورد نیاز برای شبیه‌سازی رفتار سخت‌شوندگی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 بدست آمده و انباشت کرنش پلاستیک برای حالت‌های مختلف بارگذاری تک محوره شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که در صورت تعیین بهینه مؤلفه‌های ترکیب معیار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده، این مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی نتایج تجربی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دامنه تنش و همین‌طور تنش میانگین، باعث افزایش میزان انباشت کرنش می‌شود. بررسی نتایج 4 حالت اعمال بار سیکلی نشان می‌دهد که میزان نسبت تنش، تأثیر مستقیم بر نرخ کرنش دارد و در حالتی که بیشترین مقدار بار اعمالی سیکلی یکسان باشد، افزایش میزان نسبت تنش باعث افزایش انباشت کرنش پلاستیک می‌شود. همچنین نرخ رشد اولیه انباشتگی کرنش زیاد بوده اما با افزایش تعداد سیکل‌ها این مقدار کاهش می‌یابد.

## Experimental and numerical analysis of ratcheting in thin Aluminum alloy 2024-T3 plate in low cycle loading

Elyas Abdollahi, Tajbakhsh Navid Chakherlou\*

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran .

\* P.O.B. 51666-14766 Tabriz, Iran, tnavid@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 September 2016  
Accepted 08 November 2016  
Available Online 18 December 2016

**Keywords:**  
Strain Ratcheting  
Nonlinear kinematic hardening  
Low cycle loading  
Plasticity

### ABSTRACT

Accumulation of plastic strain during cyclic loading is one of the main reasons for fatigue failure. In order to predict the fatigue life of plates, it is necessary to calculate the accumulated plastic strain and the affecting parameters carefully. In this study, a combination of nonlinear isotropic and nonlinear kinematic hardening model (modified Chaboche) was implemented in the commercial finite element code of ABAQUS, by using a FORTRAN subroutine to calculate the accumulation of strain in samples made from thin plates of aluminum. In this regard experimental, strain controlled and stress controlled cyclic tests were carried out, and the required coefficients for simulating the hardening behavior of aluminum alloy 2024-T3 were obtained and the accumulation of plastic strain was simulated at different uniaxial loading condition. The comparison of the experimental and the predicted results shows that, the determination of optimal coefficients for combined nonlinear isotropic and nonlinear kinematic hardening model (modified Chaboche) has an adequate ability to predict the experimental results. The obtained results also show that, increasing stress amplitude and mean stress increase the strain accumulation. The results from 4 types of cyclic loading indicate that the stress ratio has a direct influence on the strain rate when the maximum applied cyclic load is kept the same, and an increase in stress ratio increases the accumulation of plastic strain. Moreover, the rate of strain accumulation at the first cycles is high while it is reduced by increasing the number of cycles.

### 1- مقدمه

پدیده انباشت کرنش پلاستیک به عنوان یکی از عوامل اصلی وقوع واماندگی خستگی در سازه‌ها و اتصالات مکانیکی در معرض بارگذاری سیکلی، در حضور تنش میانگین مطرح است و این پدیده در بارگذاری‌های سیکلی کم

Please cite this article using:

E. Abdollahi, T. Navid Chakherlou, Experimental and numerical analysis of ratcheting in thin Aluminum alloy 2024-T3 plate in low cycle loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 445-454, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

چرخه و پر چرخه رخ می‌دهد، اما میزان کرنش انباشت شده در بارگذاری‌های خستگی کم چرخه به دلیل بالا بودن میزان دامنه بار بر خلاف خستگی پر چرخه بیشتر بوده و قابل توجه‌تر است [2,1]. خستگی کم چرخه عموماً به صورت واماندگی در کمتر از 10000 سیکل تعریف می‌شود و پاسخ مکانیکی پلاستیک معلوم و مشخصی را نشان می‌دهد. این شرایط بارگذاری می‌تواند در سازه‌های هواپیما در حین و یا بعد از یک برخورد پیش‌بینی نشده، فرود سخت، شرایط آب و هوایی بد و خطاهای عملیاتی ایجاد شود. شروع ترک و شکست قطعات بر اثر خستگی کم چرخه یک فرآیند پیچیده می‌باشد که تحت تأثیر عوامل متفاوتی از جمله: تاریخچه تنش (کرنش)، نرخ بارگذاری، اثرات محیطی، دما و زمان کارکرد است [3]. علاوه بر این عوامل خارجی، ویژگی‌های بیشماری از ریز ساختار ماده‌ای که تحت بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرد، بر شروع ترک تأثیر می‌گذارد.

از طرف دیگر خرابی ناشی از خستگی کم چرخه در فلزات نرم معمولاً همراه با تغییر شکل پلاستیک ماکروسکوپی است. اتصالات مکانیکی که در معرض بارگذاری سیکلی نامتقارن دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند، بسته به میزان دامنه بار اعمالی و هندسه سازه، دو پدیده مهم واهلش تنش میانگین<sup>1</sup> و انباشت کرنش پلاستیک و یا ترکیبی از این دو در آنها رخ می‌دهد. اگر که بیشترین و کمترین مقدار کرنش ثابت باشد در نتیجه واهلش تنش میانگین رخ می‌دهد و همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، تنش میانگین غیر صفر اولیه با اعمال بار سیکلی به صفر میل می‌کند. از طرف دیگر اگر که بیشترین و کمترین مقدار تنش اعمالی مطابق شکل 1 ثابت باشد، انباشت کرنش پلاستیک رخ می‌دهد. این پدیده مشابه پدیده خزش، تحت تنش یکنواخت ثابت می‌باشد، اما انباشت کرنش پلاستیک بر اثر بارگذاری سیکلی و در حضور تنش میانگین غیر صفر رخ می‌دهد.

تحت بارگذاری سیکلی، بخش‌های مختلفی از سازه‌ها ممکن است معکوس شدن تنش که از ناحیه الاستیک ماده فراتر می‌رود را تجربه کنند. تحت چنین بارگذاری معکوس شونده غیر الاستیک، واماندگی خستگی می‌تواند شامل انباشت کرنش پیش‌رونده (که به عنوان رچتینگ<sup>2</sup> شناخته می‌شود)، در ناحیه پلاستیک گردد. رچتینگ یا همان انباشت کرنش واماندگی ناشی از رچتینگ در سازه‌ها و اتصالات تحت بارگذاری سیکلی، می‌تواند به موجب رشد ترک خستگی و یا خرابی (شکست) پیش‌رونده رخ دهد. به منظور بدست آوردن روش‌های طراحی منطقی برای این مکانیزم‌های واماندگی، ضروری است تا پاسخ‌های رچتینگ در اتصالات و سازه‌ها تحت بار سیکلی با استفاده از مدل‌های ساختاری پیچیده و قوی شبیه‌سازی شوند. هم‌اکنون برای شبیه‌سازی سازه‌ها تحت بارگذاری سیکلی در برنامه‌های المان محدود تجاری هم چون آباکوس<sup>3</sup> و انسیس<sup>4</sup> مدل‌های ساختاری اولیه همچون پراگر، آرمسترانگ-فردریک و شاپوش موجود می‌باشد که به منظور پیش‌بینی تقریبی و اولیه و پیدا کردن دید اولیه، مناسب می‌باشند. اما تحقیقات انجام شده نشان داده است که مدل‌های ساختاری موجود در این برنامه‌های المان محدود نمی‌تواند رچتینگ رخ داده در سازه‌ها را با دقت و به طور مطلوب پیش‌بینی نماید. اما این امکان وجود دارد تا با افزودن مدل‌های ساختاری جامع‌تر به این برنامه‌ها، توانایی آنها را در پیش‌بینی رچتینگ رخ داده در سازه‌ها ارتقا بخشید. به عنوان مثال حسن و همکاران [12]، هالاما و همکاران [13] و سان و همکاران [14] با افزودن مدل‌های پیشرفته سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی به برنامه‌های انسیس و آباکوس رچتینگ رخ داده در سازه‌های مختلف را به خوبی شبیه‌سازی نمودند.

در طول دو دهه گذشته به منظور در نظر گرفتن پدیده رچتینگ در پلاستیسیته سیکلی، روابط ساختاری بسیاری ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های سخت‌شوندگی شاپوش [15]، اوهنو-وانگ [16]،

از طرف دیگر خرابی ناشی از خستگی کم چرخه در فلزات نرم معمولاً همراه با تغییر شکل پلاستیک ماکروسکوپی است. اتصالات مکانیکی که در معرض بارگذاری سیکلی نامتقارن دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند، بسته به میزان دامنه بار اعمالی و هندسه سازه، دو پدیده مهم واهلش تنش میانگین<sup>1</sup> و انباشت کرنش پلاستیک و یا ترکیبی از این دو در آنها رخ می‌دهد. اگر که بیشترین و کمترین مقدار کرنش ثابت باشد در نتیجه واهلش تنش میانگین رخ می‌دهد و همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، تنش میانگین غیر صفر اولیه با اعمال بار سیکلی به صفر میل می‌کند. از طرف دیگر اگر که بیشترین و کمترین مقدار تنش اعمالی مطابق شکل 1 ثابت باشد، انباشت کرنش پلاستیک رخ می‌دهد. این پدیده مشابه پدیده خزش، تحت تنش یکنواخت ثابت می‌باشد، اما انباشت کرنش پلاستیک بر اثر بارگذاری سیکلی و در حضور تنش میانگین غیر صفر رخ می‌دهد.

تحت بارگذاری سیکلی، بخش‌های مختلفی از سازه‌ها ممکن است معکوس شدن تنش که از ناحیه الاستیک ماده فراتر می‌رود را تجربه کنند. تحت چنین بارگذاری معکوس شونده غیر الاستیک، واماندگی خستگی می‌تواند شامل انباشت کرنش پیش‌رونده (که به عنوان رچتینگ<sup>2</sup> شناخته می‌شود)، در ناحیه پلاستیک گردد. رچتینگ یا همان انباشت کرنش

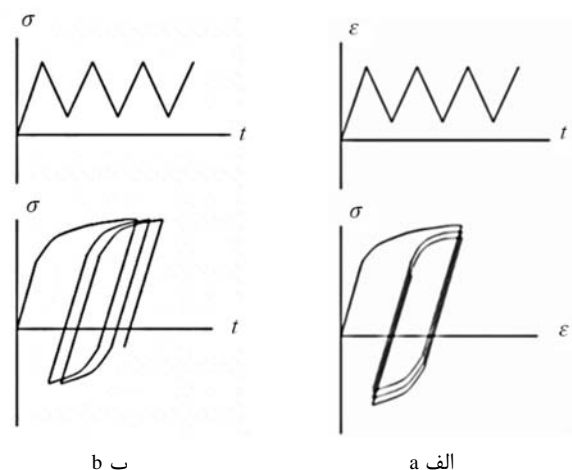


Fig. 1 Elastic plastic deformation behavior subjected to (a) constant cyclic strain (b) constant cyclic stress

شکل 1 رفتار تغییر شکل الاستیک-پلاستیک در معرض الف) کرنش سیکلی با دامنه ثابت ب) تنش سیکلی با دامنه ثابت

<sup>3</sup> Abaqus

<sup>4</sup> Ansys

<sup>1</sup> Mean Stress Relaxation

<sup>2</sup> Ratcheting

حسب تعداد سیکل، بر اساس مفاهیم فیزیکی این مؤلفه‌ها و با استفاده از یک الگوی مناسب چند مرحله‌ای تعیین می‌شوند.

در بخش تجربی مطالعه، ابتدا به منظور استخراج ضرایب مورد نیاز برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک مواد، نمونه‌ها تحت بارگذاری با کنترل کرنش قرار می‌گیرند و حلقه هیستریزس پایدار در دو بازه متفاوت دامنه کرنش بدست می‌آید. در ادامه، آزمایشات سیکلی کم چرخه با کنترل تنش، برای 4 حالت متفاوت انجام می‌شود. پس از آن با استفاده از ضرایب بدست آمده توانایی معیارهای سخت‌شوندگی استفاده شده در پیش‌بینی انباشت کرنش نمونه‌های آزمایش شده مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت اثر دامنه تنش، تنش میانگین اعمالی و همچنین نسبت تنش، بر انباشت کرنش نمونه‌ها مقایسه می‌شود.

## 2- روابط ساختاری سخت‌شوندگی سینماتیک و ایزوتروپیک

برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار پلاستیک سیکلی ماده، مدل سخت‌شوندگی مورد استفاده باید قابلیت پوشش دادن ویژگی‌های مهمی از جمله: اثر بوشینگر<sup>2</sup>، سخت‌شوندگی سیکلی، رچتینگ و آزادسازی تنش میانگین را داشته باشد.

اگرچه بسیاری از موادی که تحت بارگذاری سیکلی رفتار سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی نشان می‌دهند، پس از تعداد مشخصی سیکل پایدار می‌شوند، با این وجود کرنش‌های رچتینگ حتی پس از پایدار شدن مواد ایجاد می‌شوند. سخت‌شوندگی سینماتیک (انتقال سطح تسلیم در فضای تنش)، به عنوان اصلی‌ترین علت رچتینگ شناخته می‌شود. بنابراین برای توسعه و تایید یک مدل ساده برای شبیه‌سازی رچتینگ، بررسی پاسخ‌های رچتینگ مواد پایدار شده امری ضروری است. همچنین می‌توان پس از بدست آوردن یک مدل قوی برای پاسخ‌های رچتینگ موادی که به صورت سیکلی پایدار شده‌اند، این مدل را برای موادی که به صورت سیکلی سخت و یا نرم می‌شوند، نیز بسط داد. یک مدل پلاستیسیته کامل شامل سه بخش اصلی می‌شود:

- 1) تابع تسلیم که ترکیب مؤلفه‌های تنش که منجر به جریان پلاستیک می‌شود را بیان می‌کند.
  - 2) قانون جریان که رابطه بین تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک را بیان می‌کند.
  - 3) قانون سخت‌شوندگی که نحوه تغییر معیار تسلیم با کرنش‌های پلاستیک را تعیین می‌کند.
- همه‌ی مدل‌های سخت‌شوندگی بر اساس معیار تسلیم ون مایسز و الگوی سخت‌شوندگی سینماتیک بنا نهاده شده‌اند. معیار تسلیم ون مایسز به صورت رابطه‌ی (1) تعریف می‌شود:

$$f = (\bar{\sigma} - \bar{\alpha}) = \left[ \frac{3}{2} (\bar{S} - \bar{\alpha}) \cdot (\bar{S} - \bar{\alpha}) \right]^{1/2} = \sigma_0 \quad (1)$$

در این رابطه  $\bar{\sigma}$  تانسور تنش انحرافی،  $\bar{\alpha}$  تانسور پیش تنش<sup>3</sup> (بک استرس) انحرافی و  $\sigma_0$  اندازه سطح تسلیم می‌باشد.

معروف‌ترین مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی توسط آرمسترانگ و فردریک، با اضافه کردن یک مؤلفه بازخوانی، به مدل پراگر ارائه شده است که مورد استفاده بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و به صورت رابطه (2) می‌باشد.

$$d\bar{\alpha} = \frac{2}{3} C d\bar{\epsilon}^p - \gamma \bar{\alpha} dp \quad (2)$$

عبدالکریم و اوونو [17] و باری حسن [12] اشاره کرد. مدل‌های ساختاری اولیه ارائه شده همچون پراگر [18] و مدل چندخطی بسلینگ [19] به دلیل تولید حلقه هیستریزس تنش-کرنش بسته، توانایی پیش‌بینی رچتینگ را ندارند. اگرچه مدل آرمسترانگ-فردریک [20] با معرفی یک مؤلفه "بازخوانی" که باعث ایجاد حلقه هیستریزس باز می‌شود، جهش بزرگی در روابط ساختاری پلاستیسیته سیکلی ایجاد نمود، اما نتایج مطالعات تجربی نشان داد که این مدل، مقدار رچتینگ رخ داده را بیش از اندازه واقعی، پیش‌بینی می‌نماید. مطالعات گسترده دیگر نیز بر اساس مدل سخت‌شوندگی شاپوش که ترکیبی از چندین مدل آرمسترانگ-فردریک می‌باشد صورت گرفته است. مجذوبی و همکاران [21] نشان دادند که ثابت‌های الگوی پلاستیک شاپوش با نرخ کرنش تغییر می‌کنند و نیز می‌توان از روش شبکه عصبی برای محاسبه ثابت‌های این الگو استفاده کرد.

نتایج مطالعه عددی و تجربی چاخرو و اجری [10] که از معیار سخت‌شوندگی سینماتیک اوونو-وانگ استفاده نموده بودند، نشان داد که این معیار پاسخ‌های هماهنگی با نتایج تجربی ارائه می‌دهد. از جمله مطالعات دیگر در این زمینه می‌توان به مقاله مروری شاپوش [22] اشاره کرد که تمامی مدل‌های ساختاری پلاستیسیته سیکلی موجود را به صورت مفصل مورد بررسی قرار داده و مزایا و معایب هر کدام را بیان نموده است. به منظور آشنایی دقیق‌تر با مدل‌های سخت‌شوندگی پیشرفته می‌توان به مقاله مروری شاپوش مراجعه کرد.

اگرچه ویژگی‌های مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا و همچنین رفتار این مواد در حالت پلاستیک در بارگذاری سیکلی کم چرخه مورد بررسی و توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است، اما این بررسی‌ها به صفحات ضخیم محدود شده‌اند و صفحات با ضخامت کم، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، در حالیکه این صفحات کاربرد فراوانی در عمل دارند. به همین دلیل در این مقاله، انباشت کرنش پلاستیک صفحات آلومینیومی تخت، از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت کم تحت بارگذاری سیکلی کم چرخه به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود.

در بخش عددی این مطالعه، به دلیل اینکه مدل‌های شبیه‌سازی موجود فعلی، در نرم افزارهای المان محدود به خوبی نمی‌تواند رچتینگ رخ داده در سازه‌ها را شبیه‌سازی نماید، ابتدا به بررسی مدل‌های سخت‌شوندگی سینماتیک پیشرفته موجود و استفاده از آنها در برنامه‌های المان محدود به منظور مقایسه این مدل‌ها با پاسخ‌های رچتینگ سازه‌ها پرداخته خواهد شد. در حالیکه چالش‌های عددی بسیاری در طول فرآیند اعمال این مدل‌ها وجود دارد. در این مطالعه از مدل پلاستیسیته پیشرفته شاپوش اصلاح شده برای شبیه‌سازی پاسخ‌های رچتینگ نمونه‌های آلومینیومی استفاده خواهد شد. ضمناً به منظور ارائه مزیت مدل سخت‌شوندگی شاپوش اصلاح شده نسبت به مدل‌های موجود در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، نتایج حاصل با نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل سخت‌شوندگی شاپوش نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

همچنین از مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیر خطی برای مشخص کردن رفتار سخت‌شوندگی ماده در سیکل‌های اول بارگذاری استفاده می‌شود. این مدل پیشرفته به صورت یک زیربرنامه<sup>1</sup> به برنامه آباکوس اضافه می‌گردد. استفاده از مدل پیشرفته شاپوش اصلاح شده نیاز دارد تا مؤلفه‌های این مدل به صورت بهینه تعیین شوند، به همین جهت مؤلفه‌های مورد نیاز با استفاده از حلقه هیستریزس تنش-کرنش پایدار و منحنی انباشت کرنش پلاستیک بر

<sup>2</sup> Bauschinger effect

<sup>3</sup> Back Stress

<sup>1</sup> Subroutine

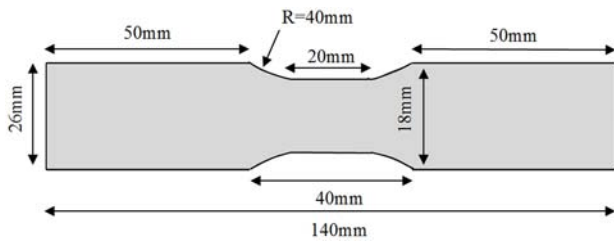


Fig. 2 Dimensions of testing samples

شکل 2 ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

کمانش نمونه‌ها به حداقل برسد. اما با این حال از یک نگهدارنده راهنما به منظور جلوگیری از وقوع کمانش در طرفین نمونه استفاده گردید. این نگهدارنده باعث می‌شود که نمونه به هنگام بارگذاری فشاری در صورت وقوع کمانش به نگهدارنده مماس شود و از کمانش جلوگیری نماید. همچنین به منظور اطمینان یافتن از عدم تأثیر نگهدارنده بر آزادی جابه‌جایی محوری نمونه، از یک ورق تفلونی به ضخامت 0.2 mm بین سطوح نگهدارنده و نمونه آلومینیومی استفاده شد. نگهدارنده‌ها از جنس فولاد st37 و با ضخامت 5mm می‌باشند. نگهدارنده کاملاً به صورت متقارن بوده و به وسیله 4 عدد پیچ M5 در طرفین نمونه بسته شده‌اند. البته باید ذکر شود که این پیچ‌ها به نحوی بسته شده‌اند که هیچ گونه پیش تنش در نمونه ایجاد نشود. نمایی از نگهدارنده بسته شده به نمونه در شکل 3 ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری و ثبت میزان کرنش‌های رخ داده در نمونه‌ها از کرنش سنج‌های مدل FLA-1-23-3LT ساخت شرکت TML در قسمت ضخامت و در راستای طول نمونه استفاده گردید. به دلیل استفاده از نگهدارنده، امکان استفاده از کرنش سنج بر روی سطح نمونه‌ها وجود نداشت و به همین دلیل در راستای ضخامت نمونه‌ها مطابق شکل 4 متصل شدند.

به منظور انجام آزمایشات خستگی کم چرخه از دستگاه تست خستگی کشش فشار مدل اینسترون 8502 استفاده شد. نمایی از این دستگاه و نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایشات سیکلی در شکل 4 ارائه شده است. آزمایشات در دو حالت با کنترل نیرو و کنترل جابجایی صورت گرفتند. بار سیکلی اعمالی در آزمایشات با کنترل نیرو به صورت سینوسی و با فرکانس 0.1 Hz انجام گرفت. دامنه بار اعمالی در آزمایشات با کنترل نیرو در جدول 1 ارائه شده است. آزمایش‌های سیکلی با کنترل جابجایی به صورت کاملاً متقارن (R=-1) و با شکل موج سینوسی و با فرکانس 0.02 Hz انجام شد. علت پایین بودن فرکانس آزمایشات انجام شده، بالاتر بودن کیفیت و دقت بودن منحنی تنش کرنش حاصل است. همچنین تأثیر فرکانس بارگذاری بر میزان رچتینگ ناچیز بوده و می‌توان اثر آن را در مدل‌های پلاستیسیته سیکلی در نظر نگرفت [13].

#### 4- تعیین ضرایب

##### 1-4- معیار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیر خطی

تحت بارگذاری سیکلی، مواد رفتار سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی و یا

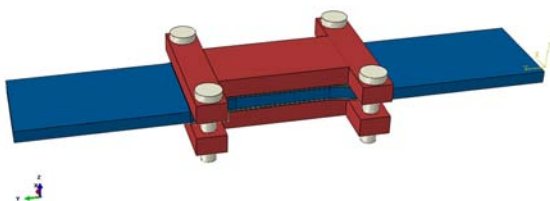


Fig.3 Model of assembled sample with steel guide

شکل 3 مدل نمونه مقید شده بین نگهدارنده فولادی

که  $dp = \left[ \frac{2}{3} d\bar{\epsilon}^p \cdot d\bar{\epsilon}^p \right]^{1/2}$  و  $C$  مدول سخت‌شوندگی سینماتیک اولیه و از جنس تنش است. ضریب  $\gamma$ ، نرخ کاهش سخت‌شوندگی سینماتیک با افزایش تغییر شکل پلاستیک را مشخص می‌کند و بی بعد می‌باشد، همچنین این ضرایب از طریق آزمایش بدست می‌آیند. اگرچه مدل آرمسترانگ-فردریک یک جهش بزرگ در توصیف پاسخ‌های سیکلی مواد بود، اما این مدل به حد کافی در پیش‌بینی پاسخ‌های رچتینگ مواد قوی نبود. چندین مدل بهبود یافته بر اساس مدل آرمسترانگ-فردریک ارائه شده‌اند که یکی از مهم‌ترین آنها مدل شابوش اولیه می‌باشد و به صورت رابطه (3) بیان می‌شود.

$$d\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^M d\bar{\alpha}_i = \sum_{i=1}^M \left( \frac{2}{3} C_i d\bar{\epsilon}^p - \gamma_i \bar{\alpha}_i dp \right) \quad (3)$$

همان‌طور که در رابطه (3) دیده می‌شود، قانون سخت‌شوندگی سینماتیک شابوش از جمع چند قانون سخت‌شوندگی آرمسترانگ و فردریک بدست می‌آید. مدل شابوش اصلاح شده نیز به صورت رابطه (4) ارائه شده است:

$$d\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^4 d\bar{\alpha}_i$$

$$d\bar{\alpha}_i = \frac{2}{3} C_i d\bar{\epsilon}^p - \gamma_i \bar{\alpha}_i dp \quad i = 1, 2, 3$$

$$d\bar{\alpha}_4 = \frac{2}{3} C_4 d\bar{\epsilon}^p - \gamma_4 \alpha_4 \left\langle 1 - \frac{\bar{\alpha}_4}{f(\bar{\alpha}_4)} \right\rangle dp \quad (4)$$

همچنین مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیر خطی نمایی را می‌توان به صورت رابطه (5) نمایش داد.

$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q_{\infty} (1 - e^{-b\epsilon^p}) \quad (5)$$

$\sigma^0$  بیانگر تنش معادل می‌باشد که اندازه سطح تسلیم را مشخص می‌کند و مقدار اولیه آن برابر است با  $\sigma$  که اندازه سطح تسلیم در کرنش پلاستیک صفر را نشان می‌دهد. همچنین  $Q_{\infty}$  بیشترین تغییر در اندازه سطح تسلیم می‌باشد و  $b$  نرخ تغییر اندازه سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک را نمایش می‌دهد.

#### 3- مواد و نمونه‌ها

آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی مناسب و کاربرد فراوان در صنایع هوافضا و به خصوص سازه‌های هواپیمایی و اهمیت موضوع خستگی در این صنایع، به عنوان ماده انتخابی برای جنس ورق در نظر گرفته شده است. این ماده از دسته آلیاژهای با استحکام بالا است و عنصر آلیاژی اصلی آن مس می‌باشد و سخت‌شوندگی آن به وسیله پیرسازی حاصل می‌شود. ابعاد نمونه‌های لازم جهت انجام آزمایشات تجربی سیکلی، تحت بارگذاری با کنترل نیرو و کنترل جابجایی بر اساس استاندارد E466-ASTM انتخاب شده‌اند.

از آنجایی که در تست‌های خستگی وجود هرگونه خراش سطحی بر روی نمونه می‌تواند در نتیجه آزمایش اثر نامطلوب بگذارد، لذا کلیه نمونه‌ها با استفاده از روش وایرکات تهیه شدند و همچنین بعد از اتمام عملیات وایرکات نمونه‌ها، سطوح بالایی و پایینی آنها در 5 مرحله توسط سمباده‌های ضدآب (1000 - 800 - 600 - 400 - 220) سمباده زده شد. ابعاد و نقشه نمونه‌های مورد آزمایش در شکل 2 نشان داده شده است.

به دلیل احتمال کمانش ورق‌های نازک در بارگذاری فشاری، بررسی رفتار این ورق‌ها در بارگذاری سیکلی با مشکل همراه است. به همین دلیل در این پژوهش ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش با دقت انتخاب گردید تا احتمال

جدول بندی تابع  $\sigma^0 = \sigma^0(\bar{\epsilon}^{pl})$  از شکل های 6 و 7 بر اساس رابطه (7) بدست می آید.

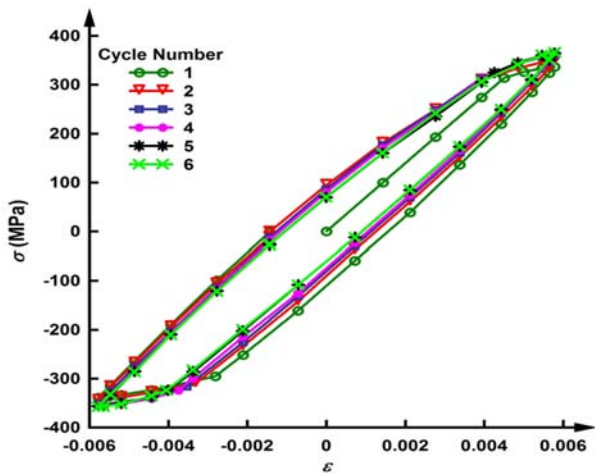
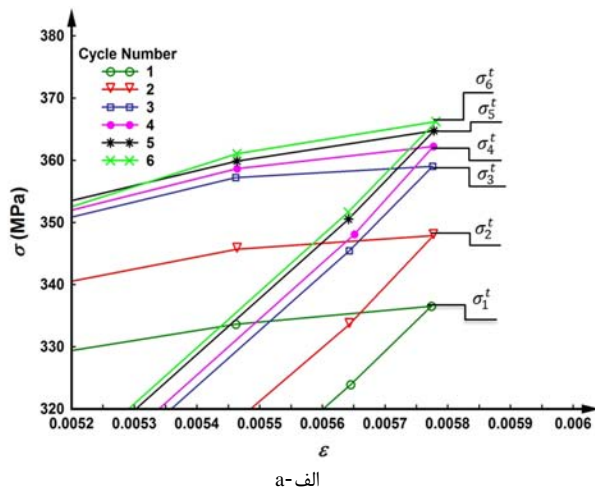
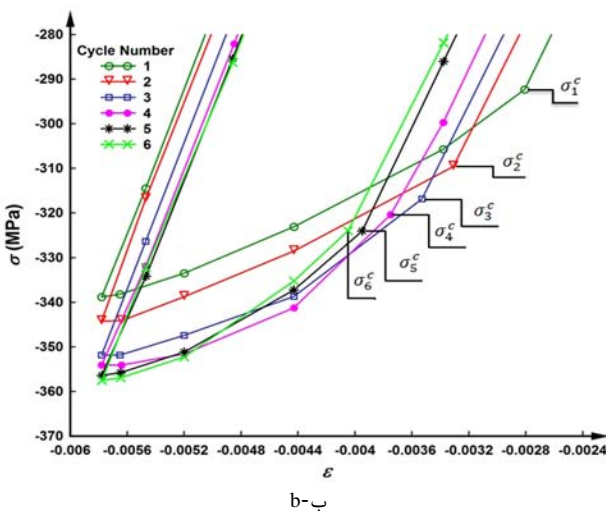


Fig. 5 Stress strain curve from symmetric strain controlled test during 6 cycles

شکل 5 منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش کنترل شده با کرنش متقارن طی 6 سیکل اول



الف-ا



ب-ب

Fig. 6 Stress-strain curve from symmetric strain control test a-in positive state of strain b- in negative state of strain

شکل 6 منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش کنترل شده با کرنش متقارن الف- در ناحیه کرنش مثبت ب- در ناحیه کرنش منفی

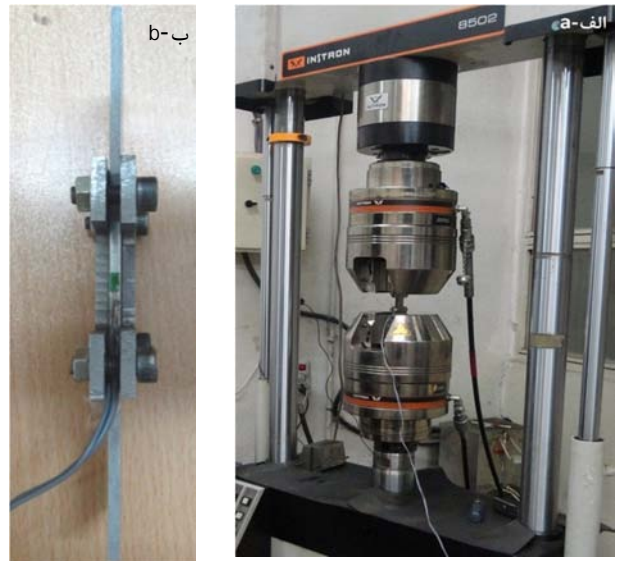


Fig. 4 a- INSTRON 8502 servo hydraulic machine b- schematic of sample position between the guide and the attached strain gauge

شکل 4 الف- دستگاه سروهیدرولیک اینسترون 8502 ب- نمایی از نحوه قرار گرفتن نمونه به همراه نگهدارنده و کرنش سنج

جدول 1 شرایط بارگذاری در آزمایشات با کنترل نیرو

Table 1 States of loading in force control tests

نوع	نیروی اعمالی (kN)		تنش حاصله (MPa)		نسبت بار R
	نیروی میانگین	دامنه نیرو	تنش میانگین	دامنه تنش	
R1	4	18	69.4	312.5	-0.63
R2	5	18	86.8	312.5	-0.56
R3	5	16	86.8	277.7	-0.52
R4	6	16	104.1	277.7	-0.45

ترکیبی از این دو را نشان می دهند. این ویژگی به وسیله قانون سخت شوندهگی ایزوتروپیک نشان داده می شود. نتایج مطالعات تجربی [23,12] نشان داده است که رفتار سخت شوندهگی و با نرم شوندهگی پس از تعداد مشخصی سیکل متوقف می شود و اندازه سطح تسلیم پایدار می شود.

تغییر در اندازه سطح تسلیم با استفاده از قانون سخت شوندهگی ایزوتروپیک بیان می شود. اما حتی پس از پایدار شدن اندازه سطح تسلیم، رچتینگ رخ می دهد. در نتیجه سخت شوندهگی سینماتیک به عنوان دلیل اصلی برای پاسخ رچتینگ در نظر گرفته می شود، در حالیکه سخت شوندهگی ایزوتروپیک بیشتر بر تغییر نرخ رچتینگ در سیکل های اولیه تأثیر می گذارد.

به منظور دست یافتن به منحنی حلقه هیستریزس پایدار، آزمایش سیکلی با کنترل جابجایی برای دو دامنه کرنش 0.006 و 0.008 و طی 30 سیکل انجام شد، اما با توجه به پایدار شدن سریع منحنی تنش کرنش، تنها پاسخ 6 سیکل اول در شکل 5 ارائه شده است و بخش ناحیه کرنش پلاستیک مثبت و منفی منحنی تنش کرنش، در شکل های 6- الف و ب ارائه شده است. در این شکل ها  $\Delta \epsilon^{pl} = \epsilon_t^{pl} - \epsilon_c^{pl}$  است و از آنجایی که مدول یانگ در مقایسه با مدول سخت شوندهگی بزرگ می باشد می توان فرض کرد که دامنه تغییر شکل پلاستیک از رابطه (6) بدست می آید:

$$\Delta \epsilon^{pl} \approx 2\Delta \epsilon - \frac{2\sigma_1^t}{E} \quad (6)$$

که E بیانگر مدول یانگ ماده است و مقدار آن عبارت است از 71.5 GPa. طبق نتایج حاصل از آزمایش کنترل شده با کرنش متقارن مشاهده شد که بعد از 6 سیکل منحنی به صورت پایدار تبدیل می شود.

$$\sigma_i^0 = \sigma_i^t - \alpha_i \quad (7)$$

که در این رابطه  $\alpha_i = \sigma_i^t + \sigma_i^c / 2$  و  $\bar{\varepsilon}_i^{pl} = (4i - 3)\Delta\varepsilon^{pl} / 2$  مقادیر بدست آمده برای این مؤلفه‌ها در جدول 2 ارائه شده است. بر اساس اطلاعات جدول 2، ثابت  $Q, b$  با استفاده از روش حداقل مربعات بدست می‌آیند که عبارتند از:  $Q=135.5 \text{ MPa}$  و  $b=37.32$ .

#### 2-4- معیار سخت‌شوندگی سینماتیک غیر خطی شاپوش

یکی از متداول‌ترین مدل‌های سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی که برای پیش‌بینی میزان رچتینگ رخ داده در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد معیار شاپوش می‌باشد. نتایج تحقیقات تجربی و عددی انجام شده [24,12,11] نشان داده است که نتایج ارائه شده توسط این مدل، صرف نظر از تعداد ضرایب کم مورد نیاز آن که موجب سهولت در استفاده از آن می‌شود، به خوبی نمی‌تواند نتایج تجربی را پیش‌بینی نماید اما به منظور مقایسه نتایج مدل سخت‌شوندگی شاپوش و مدل سخت‌شوندگی شاپوش اصلاح شده، نتایج حاصل از این دو مدل با نتایج تجربی مقایسه خواهد شد. در این تحقیق از مدل شاپوش که دارای دو مؤلفه سختی است ( $M=2$ ) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه روند محاسبه ضرایب مدل شاپوش در بسیاری از مقالات ارائه شده است، از تکرار آن در این بخش خودداری می‌شود. ضرایب تعیین شده برای مدل شاپوش عبارتند از:  $C_1 = 60.5 \text{ GPa}, C_2 = 7 \text{ GPa}, \gamma_1 = 18900, \gamma_2 = 0$  [80]

#### 3-4- معیار سخت‌شوندگی سینماتیک غیر خطی شاپوش اصلاح شده

هر کدام از مدل‌های پلاستیسیته پیشرفته مؤلفه‌های بسیاری دارند که این مؤلفه‌ها از نتایج سه آزمایش تجربی متفاوت به دست می‌آیند:

- 1) حلقه هیستریزس پایدار حاصل از آزمایش کنترل شونده با کرنش
- 2) منحنی انباشت کرنش تک محوره بر حسب سیکل
- 3) منحنی انباشت کرنش دو محوره بر حسب سیکل

باید دقت شود که اگر مؤلفه‌های مدل‌های پلاستیسیته پیشرفته به صورت بهینه انتخاب نشوند، توانایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی دقیق رچتینگ مواد نادیده گرفته می‌شود. انتخاب و بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های پلاستیسیته پیشرفته، با استفاده همزمان از شبیه‌سازی سه منحنی تجربی ذکر شده، کاری خسته کننده و پیچیده می‌باشد و نیازمند آگاهی کامل و تجربه کار بسیار زیاد با این مدل‌ها را دارد. به همین دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌تواند یک جایگزین مناسب در بهینه‌سازی و انتخاب این پارامترها باشد. در این مطالعه با استفاده از یک الگوی ابداعی و ضمن بهره‌گیری از مفاهیم فیزیکی این پارامترها، در یک زمان کوتاه، پارامترهای بهینه به منظور شبیه‌سازی رفتار رچتینگ استخراج گردید.

باری و حسن [12] در سال 2002 یک روش طبقه بندی شده و گام به

جدول 2 مقادیر تعیین شده برای محاسبه  $b, Q$

Table 2 Data determined for calculation of  $Q$  and  $b$

$\bar{\varepsilon}_i^{pl}$	$\sigma_i^0$	$\alpha_i$	$\sigma_i^c$	$\sigma_i^t$	$i$
0	310	-	-	-	0
0.00106	314.40	22.10	-292.29	336.5	1
0.00530	328.69	19.11	-309.58	347.8	2
0.00954	337.90	21.10	-316.79	359.0	3
0.01378	341.28	20.92	-320.35	362.2	4
0.01802	344.38	20.32	-324.05	364.7	5
0.02226	345.13	21.07	-324.05	366.2	6

گام برای تعیین مؤلفه‌های مدل شاپوش اصلاح شده ارائه نمودند. در این دیدگاه مؤلفه‌های  $C_1, C_2, C_3, C_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_4, \bar{\alpha}_4$  به وسیله شبیه‌سازی نیمه بالایی و یا نیمه پایینی منحنی هیستریزس، مطابق شکل 7 تعیین می‌شوند. مؤلفه  $\gamma_3$  نیز با شبیه‌سازی پاسخ رچتینگ تک محوره محاسبه می‌شود که این منحنی با رسم بیشترین کرنش در هر سیکل از پاسخ رچتینگ تک محوره به صورت تابعی از تعداد سیکل‌ها به دست می‌آید. این پاسخ نرخ رچتینگ، همزمان برای بهینه‌سازی پارامتر  $\bar{\alpha}_4$  نیز استفاده می‌شود. از پاسخ رچتینگ دو محوره برای تعیین مؤلفه‌های برخی از مدل‌های پیشرفته همچون مدل باری حسن و مدل اوهنو وانگ استفاده می‌شود که این منحنی از طریق رسم بیشترین کرنش محیطی در هر سیکل، از پاسخ رچتینگ دو محوره به صورت تابعی از تعداد سیکل به دست می‌آید. برای بخش بارگذاری منحنی هیستریزس متقارن پایدار شده، هر کدام از قانون‌های سخت‌شوندگی تفکیک شده به جز قانون سوم از  $C_i/\gamma_i -$  در کرنش پلاستیک آغازین  $\varepsilon_i^p -$  شروع می‌شوند و به مقدار  $C_i/\gamma_i$  در محدوده کرنش پلاستیک نهایی  $\varepsilon_i^p$  می‌رسند. زمانی که  $\gamma_3 = 0$  است، قانون سخت‌شوندگی سوم از مبدا می‌گذرد. برخی از نکاتی که به تعیین پارامترها کمک می‌کنند عبارتند از: مقدار  $C_1$  باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا با مدول پلاستیک در ناحیه تسلیم مطابقت داشته باشد و  $\gamma_1$  مربوطه باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بلافاصله قانون سخت‌شوندگی اول را پایدار کند. مؤلفه  $\gamma_3$  از شیب بخش خطی منحنی هیستریزس در ناحیه کرنش بالا تعیین می‌شود و در نهایت  $C_2, C_4, \gamma_2$  و  $\gamma_4$  به وسیله روش سعی و خطا تعیین می‌شوند تا ناحیه زانویی منحنی هیستریزس پایدار تجربی را به خوبی پوشش دهد.

در زمان تعیین مؤلفه‌های منحنی هیستریزس  $C_1, C_2, C_3, C_4, \gamma_1, \gamma_2$  و  $\bar{\alpha}_4, \gamma_4$  مقدار  $\gamma_3$  که اساساً بر پاسخ رچتینگ تک محوره تأثیر دارد، صفر در نظر گرفته می‌شود. در زمان تعیین  $\gamma_3$  در مرحله بعدی، تمامی مؤلفه‌های حلقه هیستریزس به جز  $\bar{\alpha}_4$  ثابت در نظر گرفته می‌شوند، زیرا که این مؤلفه بر پاسخ رچتینگ تک محوره نیز اثر می‌گذارد. البته هر تغییری در  $\bar{\alpha}_4$  می‌تواند شبیه‌سازی منحنی هیستریزس را بر هم بزند که باعث می‌شود، محاسبه مؤلفه‌های منحنی هیستریزس مجدداً تکرار شود. بنابراین در زمان تعیین  $\gamma_3$  دفعات بشمارای از سعی و خطا بین منحنی هیستریزس و پاسخ رچتینگ تک محوره نیاز است که باعث می‌شود این کار امری زمان بر و خسته کننده گردد. تعیین مؤلفه چند محوره در مدل‌های باری حسن و اوهنو وانگ ساده و مشخص است، زیرا این مؤلفه تأثیری بر پاسخ‌های رچتینگ تک محوره ندارد و فقط بر پاسخ رچتینگ دو محوره تأثیر دارد [25].

همان‌طور که اشاره شد قانون سخت‌شوندگی سینماتیک شاپوش اصلاح شده از جمع چهار قانون تفکیک شده به دست می‌آید. برای یک منحنی هیستریزس متقارن پایدار در کرنش پلاستیک و فضای تنش کلی، این چهار قانون جمع می‌شوند تا یک استرس کلی  $\alpha_x$  را تشکیل دهند. هر کدام از قوانین سخت‌شوندگی سینماتیک تفکیک شده، به جز قانون سوم با یک شیب مشخص ( $C_i$ ) آغاز می‌شوند و این شیب به تدریج با افزایش کرنش پلاستیک به صفر میل می‌کند. قانون سوم خطی است و در حالت  $\gamma_3 = 0$  از صفر عبور می‌کند و در حالیکه  $\gamma_3$  غیر صفر است، کمی غیر خطی می‌گردد. بنابراین منحنی هیستریزس را می‌توان به چهار بخش تفکیک کرد ( $\Delta\varepsilon_1^p, \Delta\varepsilon_2^p, \Delta\varepsilon_3^p, \Delta\varepsilon_4^p$ ) که هر کدام از این چهار بخش توسط یکی از قوانین سخت‌شوندگی بیان می‌شوند. قانون سخت‌شوندگی سینماتیک اول اساساً بخش اول منحنی را بیان می‌کند که با یک شیب بسیار زیاد شروع شده و به سرعت نیز پایدار می‌شود. بخش چهارم که تقریباً خطی است، با یک شیب

جدول 3 مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی شاپوش اصلاح شده

$\bar{\alpha}_4$	$\gamma_4$	$\gamma_3$	$\gamma_2$	$\gamma_1$	$C_4$ (GPa)	$C_3$ (GPa)	$C_2$ (GPa)	$C_1$ (GPa)
35	375	3.3	7880	12670	6	1.8	90	120

### 5- مدل سازی المان محدود

به منظور شبیه‌سازی پدیده انباشت کرنش طی بارگذاری سیکلی در نمونه‌های ساخته شده از ورق نازک آلومینیومی با در نظر گرفتن معیار سخت‌شوندگی غیرخطی، یک مدل المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار آباکوس ارائه شده است. با توجه به اینکه هندسه و همچنین بار اعمالی نسبت به صفحات  $X-Z$  و  $Y-Z$  و  $X-Y$  متقارن می‌باشد، به منظور کاهش زمان محاسبات تنها یک هشتم از ورق و قید نگهدارنده مدل‌سازی شده است و در سطوح تقارن، از شرایط مرزی متقارن استفاده گردیده است. مطابق شکل 9، المان‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی پین و ورق از نوع C3D8R می‌باشند. تعداد المان‌های استفاده شده برای شبکه‌بندی نمونه و قید نگهدارنده و پیچ نگارنده به ترتیب عبارتند از 3264، 1745 و 447. برای در نظر گرفتن اثر تماس سطوح، در سطح بیرونی ورق و سطح داخلی قید نگهدارنده، از قید تماسی سطح به سطح با ضریب اصطکاک 0.1 استفاده شده است. باید اشاره شود که به منظور کاهش زمان انجام محاسبات، با توجه به ضخامت کم ورق تفلونی از تحلیل آن در مدل صرف نظر شده است و تنها اثر آن که کاهش اصطکاک بین نگهدارنده و نمونه آلومینیومی می‌باشد در قید تماسی اعمال شده است.

برای شبیه‌سازی رفتار قید نگهدارنده که از جنس فولاد st37 است، از رفتار الاستیک و برای شبیه‌سازی رفتار ورق از رفتار الاستیک-پلاستیک استفاده شده است. مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون به کار رفته در شبیه‌سازی رفتار قید نگهدارنده به ترتیب 240 و 0.3 می‌باشد. همچنین مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون آلومینیوم 2024 مورد استفاده عبارتند از: 71.5 و 0.33. سایر ویژگی‌های مکانیکی ماده و همچنین ضرایب سخت‌شوندگی به کار رفته در شبیه‌سازی در جدول 3 ارائه شده است. به منظور بررسی اثر بار خارجی بر میزان انباشت کرنش حالت‌های مختلف بارگذاری در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، نمونه در چهار حالت مختلف تحت بار سیکلی سینوسی قرار می‌گیرد. بار اعمالی توسط دامنه بار و میانگین بار کنترل شده و مطابق مقادیر ارائه شده در جدول 2 اعمال می‌گردد. این بارگذاری به نحوی انتخاب شده است تا تنش به وجود آمده در نمونه کمتر از استحکام نهایی ماده و بیشتر از استحکام تسلیم ماده باشد تا شرایط به وجود آمدن انباشت کرنش برقرار گردد.

همان‌طور که اشاره شد مدل اصلاح شده شاپوش به صورت یک زیربرنامه به برنامه المان محدود آباکوس اضافه گردید. در محاسبات المان محدود، زیربرنامه پلاستیسیته، نمو تنش را برای نمو کرنش مشخص شده تعیین می‌کند. تحلیل‌های سازه‌ها تحت بارگذاری سیکلی معمولاً با نمونه‌های بار بزرگ انجام می‌شوند، در حالی که مدل پلاستیسیته نیاز دارد که تا حد امکان نمو کرنش کوچک باشد. زمانی که نمو بار بزرگ باشد، مدل پلاستیسیته نیاز دارد تا تنش‌ها را برای نمو کرنش‌های بزرگ به روز رسانی نماید، که در این حالت احتمال عدم پایداری به دلیل طبیعت غیر خطی مدل پیش می‌آید. از طرفی کاهش اندازه نمو برای غلبه بر این مشکل باعث افزایش زمان حل و محاسبات می‌شود. مدل‌های پیشرفته پلاستیسیته را می‌توان با استفاده از الگوی عددی صریح، ضمنی و نیمه ضمنی به کار برد. نوع ضمنی الگوریتم

کم و توسط قانون سوم بیان می‌شود. بخش انتقالی زانویی منحنی هیستریزس به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش دوم منحنی اساساً توسط قانون سخت‌شوندگی چهارم بیان می‌شود و بخش سوم توسط قانون سخت‌شوندگی دوم بیان می‌شود. بنابراین شیب اولیه بخش اول، یک تقریب مناسب برای  $C_1$  و شیب ناحیه دوم برای  $C_4$  و شیب قسمت سوم برای  $C_2$  و شیب قسمت چهارم برای  $C_3$  مناسب است. بازه ناحیه کرنش پلاستیک برای هر کدام از چهار بخش که بر اساس مطالعات گسترده محققان [12,24,25] پیشنهاد شده است، بر روی شکل 7 ارائه شده است. پیشنهاد می‌شود که مقدار  $\gamma_3$  بین صفر تا سی و مقدار  $\bar{\alpha}_4$  در ناحیه 1/4 تا 1/2 تنش تسلیم باشد. صحت و کارکرد مقادیر پیشنهاد شده توسط رحمان و همکاران [24] برای مواد متفاوت بررسی شده و مورد تایید قرار گرفته است. بر اساس نکات ارائه شده و طبق الگوی ارائه شده، مؤلفه‌های قانون سخت‌شوندگی شاپوش اصلاح شده، بر اساس منحنی حلقه هیستریزس پایدار حاصل از آزمایش سیکلی با کنترل کرنش با دامنه 0.008 که در شکل 8 ارائه شده است و منحنی انباشت کرنش بر حسب تعداد سیکل برای حالت بارگذاری R1 که در شکل 12 ارائه شده است، محاسبه گشته و در جدول 3 ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی بر اساس ناحیه پلاستیک بزرگتری محاسبه شوند، این مؤلفه‌ها بر اساس منحنی هیستریزس با دامنه کرنش 0.008 محاسبه شدند.

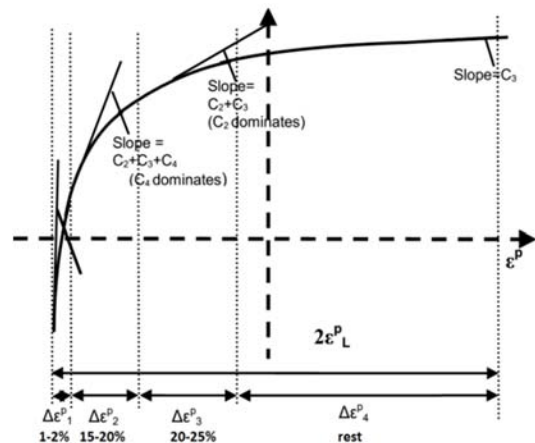


Fig. 7 Four parts of stabilized hysteresis curve [26]

شکل 7 چهار بخش منحنی هیستریزس پایدار [26]

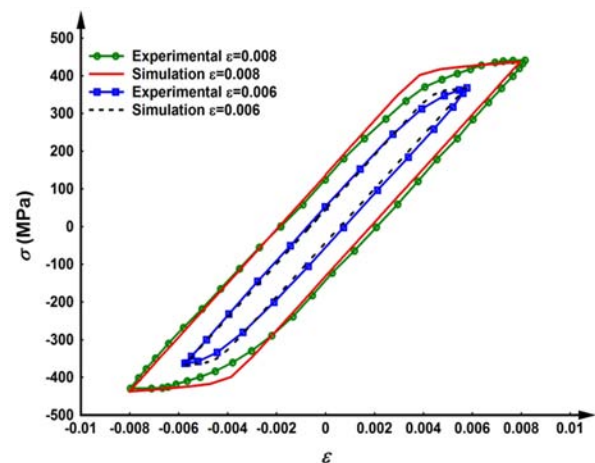


Fig. 8 Stabilized stress-strain hysteresis curve

شکل 8 منحنی هیستریزس تنش کرنش پایدار

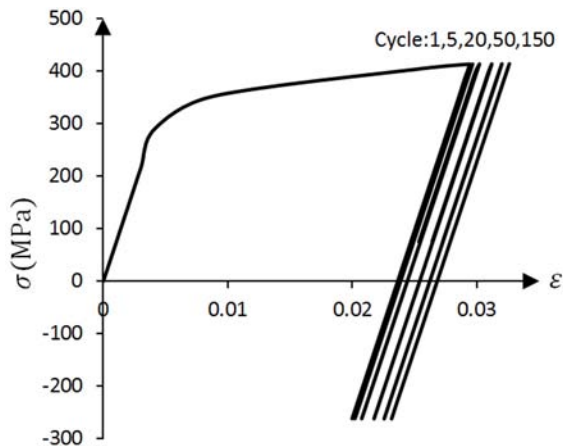


Fig. 11 Predicted stress strain curve during 150 cycles in R1 loading state

شکل 11 منحنی تنش-کرنش حاصل از نتایج شبیه‌سازی در طول 150 سیکل در طی بارگذاری حالت R1

تنش میانگین و همچنین دامنه تنش را بر میزان رچتینگ رخ داده مورد ارزیابی قرار داد.

در حالت‌های مختلف بارگذاری R1 تا R4 میزان نسبت تنش R به تدریج افزایش می‌یابد. همچنین دو حالت R1 و R2 دارای دامنه تنش یکسان و دو حالت R2 و R3 دارای تنش میانگین یکسان و دو حالت R3 و R4 دارای دامنه تنش یکسان هستند. پاسخ‌های رچتینگ بدست آمده به ازای حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌های 12 ارائه شده‌اند. در این شکل‌ها مقادیر کرنش رچتینگ پیش‌بینی شده توسط مدل سخت‌شوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده (MCH+NLISO) و مدل سخت‌شوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و مدل شاپوش (CH2) نیز ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر 4 حالت بارگذاری نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل غیرخطی شاپوش اصلاح شده نسبت به مدل شاپوش، مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد که بیانگر توانایی خوب این مدل در پیش‌بینی نتایج تجربی است. همان‌طور که انتظار می‌رفت مدل شاپوش میزان انباشت کرنش را در سیکل‌های اول بارگذاری با نرخ بیشتری پیش‌بینی می‌نماید و سریعاً به حالت پایدار می‌رسد که نشان دهنده ضعف این مدل می‌باشد. مقادیر کرنش رچتینگ اشاره شده در شکل‌ها بیشترین مقدار کرنش پلاستیک رخ داده در هر سیکل بارگذاری می‌باشد. در هر 4 حالت بارگذاری مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌ها مقدار رچتینگ رخ داده کاهش می‌یابد و مقدار انباشت کرنش پلاستیک در یک مقدار خاص اشباع می‌شود و تعدیل پلاستیک<sup>1</sup> رخ می‌دهد.

با توجه به اینکه مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی شاپوش اصلاح شده بر اساس منحنی حلقه هیستریزس پایدار و همچنین منحنی انباشت کرنش تک محوره در حالت بارگذاری R1 بدست آمده‌اند مشاهده می‌شود که نتایج کرنش انباشته شده در حالت بارگذاری R1 کاملاً با نتایج تجربی هماهنگی دارد و در حالت‌های بارگذاری بعدی مقدار بسیاری کمی اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل سخت‌شوندگی به وجود می‌آید که بیانگر این مطلب است که با تغییر نوع بارگذاری، توانایی مدل استفاده شده با مؤلفه‌های تعیین شده در یک حالت خاص برای سایر حالت‌های بارگذاری کاهش می‌یابد.

نتایج تحقیقات تجربی انجام شده توسط داس و لیم [5,4] به روشنی

<sup>1</sup> Plastic Shakedown

بازگشت شعاعی به عنوان یک روش دقیق و پایدار به عنوان روش اجرای عددی مدل پلاستیسیته شاپوش اصلاح شده در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از الگوی بازگشت شعاعی امکان استفاده از نمو بار بزرگ بدون از دست دادن ویژگی نموی مدل‌های پلاستیسیته سیکلی فراهم می‌شود.

## 6- نتایج و بحث

رفتار سخت‌شوندگی نمونه‌های آلومینیومی با استفاده از ترکیب معیار ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده طی آزمایشات سیکلی با کنترل کرنش برای دو دامنه متفاوت در شکل 8 ارائه شده‌اند. همان‌طور که به روشنی مشخص است مدل استفاده شده در این تحقیق به خوبی می‌تواند منحنی تنش-کرنش پایدار را پیش‌بینی نماید.

بر اثر بارگذاری سیکلی در حضور تنش میانگین غیر صفر، باعث باز ماندن حلقه هیستریزس تنش-کرنش در هر سیکل و جابجایی حلقه هیستریزس در هر سیکل می‌شود. در شکل 10 حلقه‌های هیستریزس در سیکل‌های 1، 5، 20، 50 و 150 سیکل بر اثر بارگذاری نوع R1 ارائه شده است. همین‌طور منحنی پیش‌بینی شده با استفاده از روش المان محدود برای این حالت بارگذاری در شکل 11 ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی شده کاملاً منطبق بر نتایج تجربی است. به منظور بررسی توانایی مدل سخت‌شوندگی در پیش‌بینی پاسخ رچتینگ، نمونه‌های آلومینیومی تحت 4 نوع مختلف بارگذاری قرار گرفتند. این 4 نوع بارگذاری به نحوی انتخاب شده‌اند که بتوان علاوه بر بررسی تأثیر نسبت تنش R، تأثیر

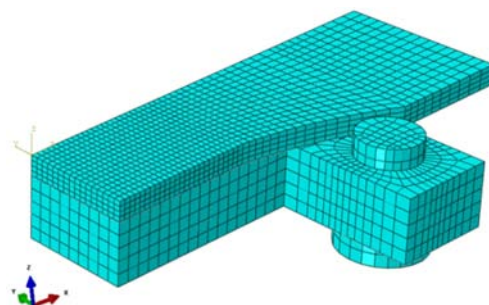


Fig. 9 Finite element model

شکل 9 مدل المان محدود

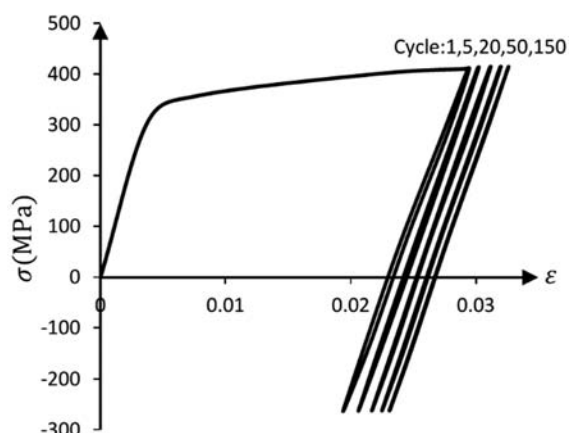


Fig. 10 Experimental stress strain curve during 150 cycles in R1 loading state

شکل 10 منحنی تنش-کرنش تجربی در طول 150 سیکل در طی بارگذاری حالت R1



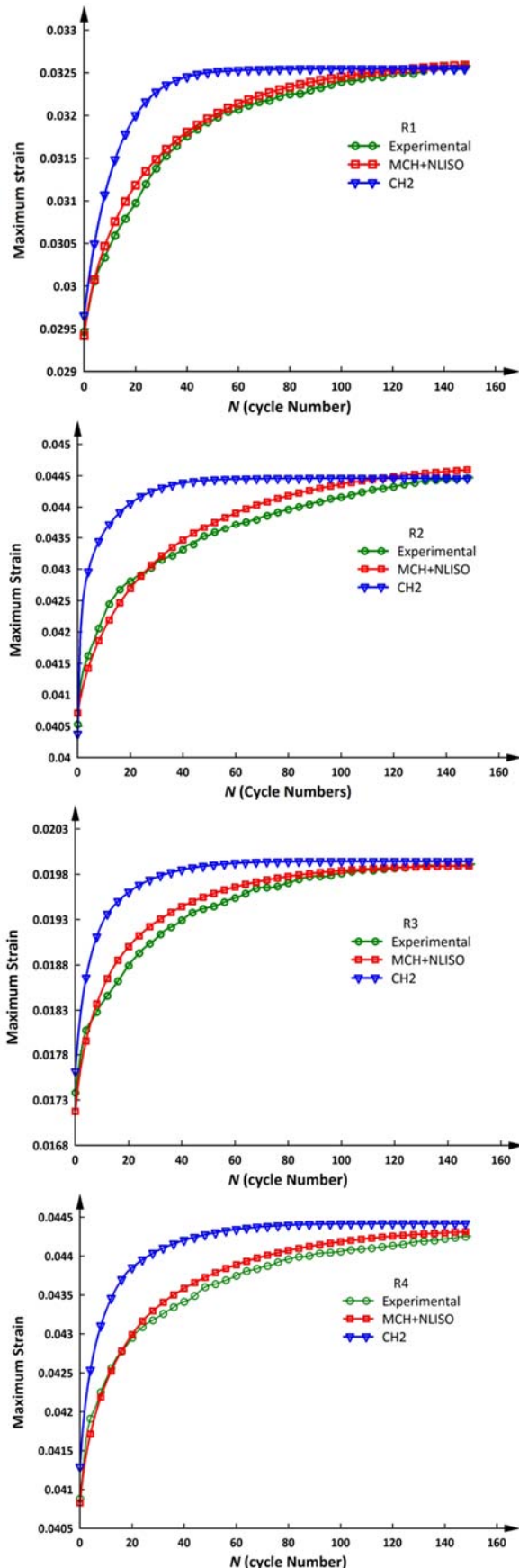


Fig.12 Uniaxial ratcheting curve at different loading states: R1, R2, R3, R4  
 شکل 12 منحنی انباشت کرنش تک محوره، تحت حالت‌های مختلف بارگذاری: R1, R2, R3, R4

نشان داده است که منحنی انباشت کرنش پلاستیک در آزمایش بارگذاری سیکلی نامتقارن تحت تنش بر حسب تعداد سیکل، دارای سه ناحیه متفاوت است. در ناحیه اول، انباشت کرنش پلاستیک به شدت افزایش می‌یابد و سپس نرخ انباشت کرنش کاهش می‌یابد که علت آن کاهش تعداد نابجایی‌های فعال و وقوع کار سرد می‌باشد. کاهش نرخ رچتینگ تا زمانیکه نرخ انباشت کرنش به یک حالت پایدار می‌رسد ادامه می‌یابد. در این ناحیه تقریباً نابجایی‌ها پایدار شده‌اند که این مرحله 80 تا 90 درصد عمر خستگی مواد می‌باشد. در مرحله سوم که نسبت به دو مرحله قبل بازه کمتری را شامل می‌شود، نرخ انباشت کرنش بسیار افزایش می‌یابد و انباشت کرنش پلاستیک در این حالت به صورت غیر قابل کنترلی افزایش می‌یابد و منجر به کاهش سطح مقطع نمونه و گلوبی شدن و شکست ماده می‌شود [4,1]. آزمایشات صورت گرفته در این تحقیق به دلیل محدودیت دستگاه انجام آزمایش در تعداد سیکل‌های بارگذاری در فرکانس پایین، در 150 سیکل بارگذاری انجام گرفته است و منحنی‌های بدست آمده از پاسخ انباشت کرنش پلاستیک فقط دو محدوده اول اشاره شده را پوشش می‌دهند. در شکل‌های 12 مشخص است که نتایج پیش‌بینی در ناحیه اول، کمتر از نتایج تجربی می‌باشند و نرخ انباشت کرنش پلاستیک تجربی بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل سخت‌شوندگی استفاده شده است. اما در ناحیه دوم که ناحیه کاهش نرخ انباشت کرنش می‌باشد نتایج تجربی کمتر از نتایج پیش‌بینی شده می‌باشد و نتایج تجربی زودتر به سمت اشباع شدن میل می‌کنند. مقایسه نتایج کرنش انباشت شده در طول 150 سیکل بارگذاری بین حالت‌های R1 و R2 نشان می‌دهد که با ثابت بودن دامنه تنش اعمالی، افزایش تنش میانگین باعث افزایش میزان کرنش انباشته شده می‌شود. در صورتی که اختلاف مقدار بیشترین کرنش پلاستیک رخ داده در انتهای سیکل 150 ام با مقدار کرنش پلاستیک رخ داده پس از سیکل اول، در 4 حالت مختلف بارگذاری به صورت یک نمودار رسم شود، شکل 13 حاصل می‌شود. اطلاعات ارائه شده در این شکل مقایسه میزان رچتینگ رخ داده در هر چهار حالت بارگذاری را روشن و مشخص نموده است. مقایسه دو حالت بارگذاری R2 و R3 بیانگر این مطلب است که با داشتن تنش میانگین ثابت، افزایش دامنه تنش اعمالی باعث افزایش میزان انباشت کرنش می‌شود. به همین ترتیب، مشابه مقایسه دو حالت R1 و R2، بررسی دو حالت R3 و R4 نیز نشان می‌دهد که با داشتن دامنه تنش یکسان، بالاتر بودن تنش میانگین اعمالی باعث بیشتر بودن میزان انباشت کرنش پلاستیک می‌شود. نکته جالب توجهی که در نتایج ارائه شده در شکل 13 وجود دارد، از مقایسه دو حالت بارگذاری R1 و R4 حاصل می‌شود. در این دو نوع بارگذاری بیشترین مقدار تنش اعمالی به نمونه در هر دو حالت یکسان است، اما مقدار نسبت تنش (R) در حالت R4، بیشتر از مقدار نسبت تنش در حالت R1 است و این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم نسبت تنش بر میزان انباشت کرنش است. در نتیجه افزایش نسبت تنش با داشتن بیشترین تنش اعمالی یکسان، منجر به افزایش انباشت کرنش پلاستیک می‌شود.

### 7- نتیجه گیری

پاسخ انباشت کرنش پلاستیک ورق آلیاژ آلومینیومی 2024-T3 تحت بارگذاری تک محوره سیکلی با استفاده از مدل سخت‌شوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی محاسبه گردید و با نتایج تجربی مقایسه شد. بدین منظور مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی با انجام آزمایش‌های سیکلی با کنترل کرنش متقارن و بدست

combined isotropic-kinematic hardening law and mortar contact method, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 106, No.1, pp. 297-318, 2016 .

[3] S. Khan, A. Vyshnevskyy, J. Mosler, Low cycle lifetime assessment of Al2024 alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, No. 8, pp. 1270-1277, 2010 .

[4] D. Das, P. C. Chakraborti, Effect of stress parameters on ratcheting deformation stages of polycrystalline OFHC copper, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 34, No. 9, pp. 734-742, 2011 .

[5] C. B. Lim, K. S. Kim, J. B. Seong, Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 3, pp. 501-507, 2009 .

[6] M. Shariati, K. Kolasangiani, H. Chavoshan, An experimental study on ratcheting behavior of stainless steel 304L cylindrical shells under cyclic axial and combined loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 69-76, 2013 .

[7] M. Shariati, H. Mehrabi, Experimental study of ratcheting influence on fatigue life of Ck45 in uniaxial cyclic loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13 No. 10, pp. 75-83, 2013 .

[8] S. J. Zakavi, M. Zehsaz, M. R. Eslami, The ratcheting behavior of pressurized plain pipework subjected to cyclic bending moment with the combined hardening model, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 4, pp. 726-737, 2010 .

[9] E. Abdollahi, T. N. Chakherlou, R. H. Oskouei, Ratcheting Behaviour of Stainless Steel 316L with Interference Fitted Holes in Low-Cycle Fatigue Region, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, pp. 1-10, 2016 .

[10] T. N. Chakherlou, M. Ajri, Strain ratcheting and stress relaxation around interference-fitted single-holed plates under cyclic loading: experimental and numerical investigations, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 36, No. 4, pp. 327-339, 2013 .

[11] T. N. Chakherlou, A. Yaghoobi, Numerical simulation of residual stress relaxation around a cold-expanded fastener hole under longitudinal cyclic loading using different kinematic hardening models, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 33, No. 11, pp. 740-751, 2010 .

[12] S. Bari, T. Hassan, An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 18, No. 7, pp. 873-894, 2002 .

[13] R. Halama, M. Fusek, Z. Poruba, Influence of mean stress and stress amplitude on uniaxial and biaxial ratcheting of ST52 steel and its prediction by the AbdelKarim-Ohno model, *International Journal of Fatigue*, Vol. 91, Part 2, pp. 313-321, 2016 .

[14] Y. Sun, W. Hu, F. Shen, Q. Meng, Y. Xu, Numerical simulations of the fatigue damage evolution at a fastener hole treated by cold expansion or with interference fit pin, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 107, No.1, pp. 188-200, 2016 .

[15] J. L. Chaboche, Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity, *International Journal of Plasticity*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-188, 1986 .

[16] N. Ohno, J. D. Wang, Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part I: formulation and basic features for ratcheting behavior, *International Journal of Plasticity*, Vol. 9, No. 3, pp. 375-390, 1993 .

[17] N. Ohno, M. Abdel-Karim, Uniaxial ratcheting of 316FR steel at room temperature- part II: constitutive modeling and simulation, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 122, No. 1, pp. 35-41, 1998 .

[18] W. Prager, B. U. D. o. A. Mathematics, U. S. O. o. N. Research, U. S. N. D. B. o. Ships, *A New Method of Analyzing Stresses and Strains in Work-hardening Plastic Solids*: Division of Applied Mathematics, Brown University, 1955 .

[19] J. F. Besseling, A Theory of Elastic, Plastic and Creep Deformations of an Initially Isotropic Material Showing Anisotropic Strain-hardening, Creep Recovery, and Secondary Creep: Stanford University, Department of Aeronautical Engineering, 1958 .

[20] P. J. Armstrong, F. C. O., *A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect*, [Berkeley, Gloucestershire?]: Central Electricity Generating Board [and] Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Dept., 1966. English

[21] G. Majzoobi, E. Khademi, S. Pouroulajal, An investigation into strain rate dependency of Chaboche plasticity model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 9-16, 2015 .

[22] J. L. Chaboche, A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories, *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, No. 10, pp. 1642-1693, 2008 .

[23] M. Shariati, K. Kolasangiani, K. Farhangdoost, Experimental and numerical study on accumulation of plastic strain of SS316L cantilevered cylindrical shells under cyclic bending and combined (bending-torsion) loads, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 42-50, 2015

[24] S. M. Rahman, T. Hassan, E. Corona, Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure, *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, No. 10, pp. 1756-1791, 2008 .

[25] S. Bari, T. Hassan, Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, No. 3-4, pp. 381-409, 2000 .

[26] S. M. Rahman, *Finite Element Analysis and Related Numerical Schemes for Ratcheting Simulation*, Doctor Of Philosophy Thesis, Civil engineering, North Carolina State University, 2006.

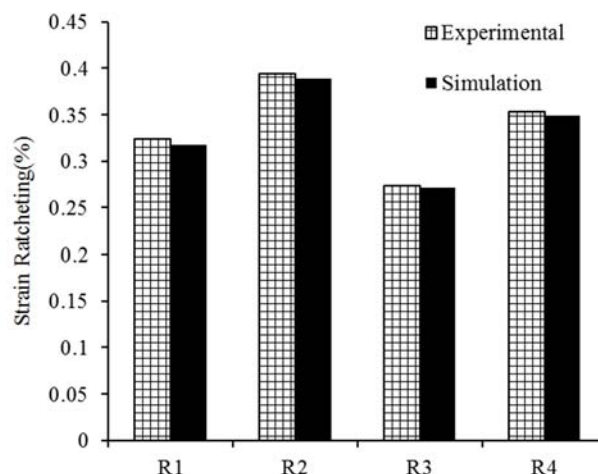


Fig. 13 Ratcheting curve in 150 cycles at different loading states.

شکل 13 نمودار انباشت کرنش در طول 150 سیکل در چهار حالت مختلف بارگذاری

آوردن حلقه هیستریزس تنش کرنش پایدار در طول 30 سیکل محاسبه شدند. با توجه به ضخامت کم ورق برای جلوگیری از وقوع کماتش از یک نگهدارنده برای انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شد. همچنین مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده با استفاده از پاسخ انباشت کرنش پلاستیک ورق آلیاژ آلومینیومی 2024-T3 تحت بارگذاری تک محوره سیکلی با استفاده از مدل سخت‌شوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی محاسبه گردید و با نتایج تجربی مقایسه شد. بدین منظور مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی با انجام آزمایش‌های سیکلی با کنترل کرنش متقارن و بدست آوردن حلقه هیستریزس تنش کرنش پایدار در طول 30 سیکل محاسبه شدند. با توجه به ضخامت کم ورق برای جلوگیری از وقوع کماتش از یک نگهدارنده برای انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شد. همچنین مؤلفه‌های مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده با استفاده از حلقه هیستریزس تنش کرنش پایدار و همچنین منحنی انباشت کرنش تک محوره بر حسب تعداد سیکل بدست آمدند و در ادامه چهار حالت بارگذاری، برای بررسی اثر دامنه تنش و تنش میانگین و همچنین نسبت تنش، بر میزان انباشت کرنش پلاستیک به صورت تجربی و المان محدود مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که با افزایش دامنه تنش و تنش میانگین میزان انباشت کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد. همچنین در حالتی که بیشترین مقدار تنش اعمالی یکسان باشد، افزایش نسبت تنش باعث افزایش میزان انباشت کرنش پلاستیک می‌شود. همین طور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی توانایی مدل سخت‌شوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شاپوش اصلاح شده را در مقایسه با مدل شاپوش را نشان می‌دهد. همچنین در هر چهار حالت اعمال بار، میزان انباشت کرنش در سیکل‌های اول اعمال بار بسیار قابل توجه است. در حالی که با ادامه یافتن بارگذاری سیکلی، از میزان انباشت کرنش کاهش می‌یابد و انباشت کرنش اشباع می‌شود.

## 8- مراجع

[1] G. R. Ahmadzadeh, A. Varvani-Farahani, Ratcheting assessment of steel alloys under uniaxial loading: a parametric model versus hardening rule of Bower, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 36, No. 4, pp. 281-292, 2013 .

[2] A. Mohammadpour, T. N. Chakherlou, Numerical and experimental study of an interference fitted joint using a large deformation Chaboche type