ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحليل تجربي و عددي انباشت كرنش پلاستيك در ورق آلياژ آلومينيوم T3-2024 با ضخامت کم در بارگذاری کم چرخه

الىاس عبداللهى1، تاج بخش نويد چاخرلو2*

1 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

' تبريز، صندوق پستى 51666-14766، tnavid@tabrizu.ac.ir

چېده	اطلاعات مقالة
انباشت کرنش پلاستیک در طول بارگذاری سیکلی یکی از دلایل وقوع واماندگی خستگی میباشد. به منظور پیش بینی عمر خستگی ورق ها،	مقاله پژوهشی کامل
ضروری است انتاشت کرنش بلاستیک و همچنین عوامل مؤثر بر میزان آن در طول بارگذاری های سیکلی به دقت محاسبه شود. در این تحقیق	دريافت: 20 شهريور 1395
	پذيرش: 18 أبان 1395
با استفاده از ترثیب معیار سختشوندگی ایزوتروپیک غیرخطی و سینمانیک غیرخطی شابوش اصلاح شده و افزودن آن به برنامه المان محدود	ارائه در سایت: 28 آذر 1395
— تجاری آباکوس، با استفاده از زیر برنامه نوشته شده در فرترن، میزان انباشت کرنش در نمونههای ساخته شده از ورق نازک آلومینیومی مورد	کلید واژگان:
بررسی قرار گرفته است. در همین راستا، با انجام آزمایشهای سیکلی تجربی با کنترل کرنش و همچنین آزمایشهای سیکلی با کنترل تنش،	انباشت کرنش
ضرایب مورد نیاز برای برای شبیهسازی رفتار سختشوندگی آلیاژ آلومینیوم T3-2024 بدست آمده و انباشت کرنش پلاستیک برای حالتهای	سختشوندگی سینماتیک غیر خطی
مختلف بارگذاری تک محوره شبیهسازی شده است. مقایسه نتایج تجربی و نتایج پیش.بینی شده نشان میدهد که در صورت تعیین بهینه	بارگذاری کم چرخه
مؤلفههای ترکیب معیار سختشوندگی ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شابوش اصلاح شده، این مدل توانایی خوبی در پیشربینی	پلاستیسیته
نتایج تجربی دارد. همچنین نتایج نشان میدهد که افزایش دامنه تنش و همین طور 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	
اعمالي سيكلي يكسان باشد، افزايش ميزان نسبت تنش باعث افزايش انباشت كرنش پلاستيك مي شود. همچنين نرخ رشد اوليه انباشتگي كرنش	
زیاد بوده اما با افزایش تعداد سیکل ها این مقدار کاهش می یابد.	

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

ABSTRACT

Accepted 08 November 2016 Available Online 18 December 2016

Keywords. Strain Ratcheting Nonlinear kinematic hardening Low cycle loading Plasticity

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 Choboche) 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 Choboche) 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.

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

1- مقدمه

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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



چرخه و پر چرخه رخ می دهد، اما میزان کرنش انباشت شده در بار گذاریهای 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 عموما به صورت واماندگی در کمتر از 10000 سیکل تعریف می شود و پاسخ مکانیکی پلاستیک معلوم و مشخصی را نشان می دهد. این شرایط بار گذاری می تواند در سازههای هواپیما در حین و یا بعد از یک برخورد پیش بینی 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 می باشد که تحت تأثیر عوامل متفاوتی از جمله: تاریخچه تنش (کرنش)، نرخ بار گذاری، اثرات محیطی، دما و زمان کار کرد است [3]. علاوه بر این عوامل خارجی، ویژگی های بیشماری از ریز ساختار مادهای که تحت بار گذاری سیکلی قرار

از طرف دیگر خرابی ناشی از خستگی کم چرخه در فلزات نرم معمولا همراه با تغییر شکل پلاستیک ماکروسکوپیک است. اتصالات مکانیکی که در معرض بارگذاری سیکلی نامتقارن دچار تغییر شکل پلاستیک می شوند، بسته میانگین¹ 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 زخ می دهد و همان طور که در شکل ا نشان داده شده است، طرف دیگر اگر که بیشترین و کمترین مقدار تا سیکلی به صغر میل می کند. از ثابت باشد، انباشت کرنش پلاستیک رخ می دهد. این پدیده مشابه پدیده ثابت باشد، انباشت کرنش پلاستیک رخ می دهد. این پدیده مشابه پدیده خرش، تحت تنش یکنواخت ثابت می باشد، اما انباشت کرنش پلاستیک بر اثر بارگذاری سیکلی و در حضور تنش میانگین غیر صغر رخ می دهد.

تحت بارگذاری سیکلی، بخشهای مختلفی از سازهها ممکن است معکوس شدن تنش که از ناحیه الاستیک ماده فراتر می رود را تجربه کنند. تحت چنین بارگذاری معکوس شونده غیر الاستیک، واماندگی خستگی می تواند شامل انباشت کرنش پیش رونده (که به عنوان رچتینگ² شناخته می شود)، 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

به منظور بررسی اثر رچتینگ بر عمر سازهها، مطالعات تجربی و عددی گستردهای صورت گرفته است که از آن جمله می توان به تحقیق تجربی و عددی شریعتی و همکاران [7,6] بر روی رچتینگ رخ داده در پوستههای استوانهای فولادی ضد زنگ، تحت بارگذاری متناوب مرکب و محوری اشاره کرد. آنها در این تحقیق، نشان دادند که با نیروی میانگین ثابت و افزایش نیروی دامنه، میزان رچتینگ افزایش مییابد و پیش بارهای اعمالی در بارگذاری چند مرحلهای باعث مهار رچتینگ می شود. زکوی و همکاران [8] نشان دادند که نرخ رچتینگ به صورت قابل توجهی به اندازه فشار داخلی، ممان خمشی و ثوابت مواد برای مدل سختشوندگی ترکیبی ایزوتروپیک-سينماتيك بستكي دارد. چاخرلو و همكاران [9,2-11] نيز مطالعات تجربي و عددی گستردهای در زمینه انباشت کرنش پلاستیک بر روی اتصالات تقویت شده آلومینیومی انجام دادهاند. آنها در این تحقیقات از مدلهای سختشوندگی پیشرفته همچون، مدل اوهنو وانگ، باری حسن، شابوش برای شبیهسازی نتایج حاصل از آزمایشهای تجربی استفاده نمودهاند و ویژگیهای هر کدام از این مدلهای سختشوندگی را در پیشبینی انباشت کرنش بررسي نمودهاند

واماندگی ناشی از رچتینگ در سازهها و اتصالات تحت بارگذاری سیکلی، میتواند به موجب رشد ترک خستگی و یا خرابی (شکست) پیش رونده رخ دهد. به منظور بدست آوردن روشهای طراحی منطقی برای این مکانیزمهای واماندگی، ضروری است تا پاسخهای رچتینگ در اتصالات و سازه ها تحت بار سیکلی با استفاده از مدلهای ساختاری پیچیده و قوی شبیهسازی شوند. هم اکنون برای شبیهسازی سازهها تحت بارگذاری سیکلی در برنامههای المان محدود تجاری هم چون آباکوس³ و انسیس⁴ مدلهای ساختاری اولیه همچون پراگر، آرمسترانگ-فردریک و شابوش موجود میباشد که به منظور پیشبینی تقریبی و اولیه و پیدا کردن دید اولیه، مناسب میباشند. اما تحقیقات انجام شده نشان داده است که مدل های 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 مدل های 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 سخت شوندگی سینماتیک غیر خطی به برنامه های 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 شابوش [15]، اوهنو-وانگ [16]،

¹ Mean Stress Relaxation

² Ratcheting

پلاستیک که بر اثر بارگذاری سیکلی در حضور تنش میانگین غیر صفر رخ می دهد، یکی از پدیده های اساسی در پلاستیسیته سیکلی می باشد که باید در طراحی سازه ها مورد توجه قرار گیرد. وقوع رچتینگ در حین خستگی می تواند عمر شروع ترک را کاهش داده و در نتیجه عمر خستگی اجزا را نیز کاهش دهد. مکانیزم های واماندگی خستگی رچتینگ هنوز به روشنی شناخته نشده اند و مشخص نیست که چه بخشی از واماندگی های رخ داده بر اثر خستگی قطعات به دلیل تأثیر مکانیزم رچتینگ به وقوع می پیوندد، اما مشخص است که لغزش پلاستیک، حرکت نابجایی ها و شکل گیری شبکه ها در ارتباط با وقوع رچتینگ می باشند [5,4].

³ Abaqus ⁴ Ansys

عبدالکریم و اوهنو [17] و باری حسن [12] اشاره کرد. مدلهای ساختاری اوليه ارائه شده همچون پراگر [18] و مدل چندخطی بسلينگ [19] به دليل تولید حلقه هیسترزیس تنش-کرنش بسته، توانایی پیشبینی رچتینگ را ندارند. اگرچه مدل آرمسترانگ-فردریک [20] با معرفی یک مؤلفه "بازخوانی" که باعث ایجاد حلقه هیسترزیس باز می شود، جهش بزرگی در روابط ساختارى پلاستيسيته سيكلى ايجاد نمود، اما نتايج مطالعات تجربى نشان داد که این مدل، مقدار رچتینگ رخ داده را بیش از اندازه واقعی، پیشبینی مینماید. مطالعات گسترده دیگر نیز بر اساس مدل سختشوندگی شابوش که ترکیبی از چندین مدل آرمسترانگ-فردریک میباشد صورت گرفته است. مجذوبی و همکاران [21] نشان دادند که ثابتهای الگوی پلاستیک شابوش با نرخ کرنش تغییر میکنند و نیز میتوان از روش شبکه عصبی برای محاسبه ثابتهای این الگو استفاده کرد.

نتايج مطالعه عددی و تجربی چاخرلو و اجری [10] که از معيار سخت شوندگی سینماتیک اوهنو -وانگ استفاده نموده بودند، نشان داد که این معیار پاسخهای هماهنگی با نتایج تجربی ارائه میدهد. از جمله مطالعات دیگر در این زمینه می توان به مقاله مروری شابوش [22] اشاره کرد که تمامی مدل های 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 مدل های سخت شوندگی پیشرفته می توان به مقاله مروری شابوش 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 T3-2024 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 نمی تواند 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 شابوش اصلاح شده برای شبیهسازی پاسخهای رچتینگ نمونههای آلومینیومی استفاده خواهد شد. ضمنا به منظور ارائه مزيت مدل سختشوندگي شابوش اصلاح شده نسبت به مدلهای موجود در نرمافزار المان محدود آباکوس، نتایج حاصل با نتایج پیشبینی شده توسط مدل سختشوندگی شابوش نیز مورد مقایسه قرار مي گيرد.

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 زیربرنامه¹ به برنامه آباکوس اضافه می گردد. استفاده از مدل پیشرفته شابوش اصلاح شده نیاز دارد تا مؤلفههای این مدل به صورت بهینه تعیین شوند، به همین جهت مؤلفههای مورد نیاز با استفاده از حلقه هیسترزیس تنش-کرنش پایدار و منحنی انباشت کرنش پلاستیک بر

حسب تعداد سیکل، بر اساس مفاهیم فیزیکی این مؤلفهها و با استفاده از یک الگوى مناسب چند مرحلهاى تعيين مىشوند.

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

2- روابط ساختاری سختشوندگی سینماتیک و ایزوتروپیک

برای شبیهسازی دقیق تر رفتار پلاستیک سیکلی ماده، مدل سخت شوندگی مورد استفاده باید قابلیت پوشش دادن ویژگیهای مهمی از جمله: اثر بوشینگر²، 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. سخت شوندگی سینماتیک (انتقال سطح تسلیم در فضای تنش)، به عنوان اصلی ترین علت رچتینگ شناخته می شود. 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 می شوند، نیز بسط داد. یک مدل پلاستیسیته کامل شامل سه بخش اصلی می شود:

- 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 مي کند.
- 3) قانون سختشوندگی که نحوه تغییر معیار تسلیم با کرنشهای پلاستیک را تعیین میکند.

همهی مدل های سخت شوندگی بر اساس معیار تسلیم ون مایسز و الگوی سخت شوندگی سینماتیک بنا نهاده شدهاند. معیار تسلیم ون مایسز به صورت رابطهی (1) تعریف میشود:

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

سترس) انحرافی و
$$\sigma_0$$
 اندازه سطح تسلیم میباشد.
فقی می از کی منابع می انتقاد می انتقاد می انتقاد می انتقاد از می انتقاد ا

معروفترين مدل سختشوندگي سينماتيک غيرخطي 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) مى باشد.

$$d\bar{\alpha} = \frac{2}{3}Cd\bar{\varepsilon}^p - \gamma\bar{\alpha}dp \tag{2}$$

2018

9th

¹ Subroutine

² Bauschinger effect

³ Back Stress

که $dp = \left[\frac{2}{3} d\bar{\epsilon}^p \cdot d\bar{\epsilon}^p\right]^{1/2}$ و dr مدول سختشوندگی سینماتیک اولیه و از جنس تنش است. ضریب γ ، 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 پیش بینی 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.

$$d\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^{M} d\bar{\alpha}_i = \sum_{i=1}^{M} \mathbf{\zeta}_i^2 C_i d\bar{\varepsilon}^p - \gamma_i \bar{\alpha}_i dp$$
(3)

همان طور که در رابطه (3) دیده می شود، قانون سخت شوندگی سینماتیک شابوش از جمع چند قانون سخت شوندگی آرمسترانگ و فردریک بدست می آید. مدل شابوش اصلاح شده نیز به صورت رابطه (4) ارائه شده است:

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

$$d\bar{\alpha}_{i} = \frac{2}{3}C_{i}d\bar{\varepsilon}^{p} - \gamma_{i}\bar{\alpha}_{i}dp \quad i = 1,2,3$$

$$d\bar{\alpha}_{4} = \frac{2}{3}C_{4}d\bar{\varepsilon}^{p} - \gamma_{4}\alpha_{4}\langle 1 - \frac{\overline{\alpha_{4}}}{f(\overline{\alpha_{4}})}\rangle dp \qquad (4)$$

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

$$\sigma^{0} = \sigma_{0} + Q_{\infty} (\mathbf{1} - e^{-b\varepsilon^{pl}})$$
(5)

میانگر تنش معادل میباشد که اندازه سطح تسلیم را مشخص میکند و مقدار اولیه آن برابر است با σ که اندازه سطح تسلیم در کرنش پلاستیک مفر را نشان میدهد. همچنین σ 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 T3-2024 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، E466 انتخاب شده اند.

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 - 200) 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



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 mm 0.2 بین سطوح نگهدارنده و نمونه آلومینیومی استفاده شد. نگهدارندهها از جنس فولاد st37 و با ضخامت M5 میباشند. نگهدارنده کاملا 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 تنشی 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 1 ارائه شده است. آزمایشهای سیکلی با کنترل جابجایی به صورت کاملاً متقارن (1-R) و با شکل موج سینوسی و با فرکانس UD2 انجام شد. علت پایین بودن فرکانس آزمایشات انجام شده، بالاتر بودن کیفیت و دقیقتر 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- تعيين ضرايب

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 شكل 3 مدل نمونه مقيد شده بين نگهدارنده فولادى



Fig. 4 a- INSTRON 8502 servo hydraulic machine b-schematic of sample position between the guide and the attached strain gauge شكل 4 الف- دستگاه سروهيدروليک اينسترون 8502 ب- نمايي از نحوه قرار گرفتن نمونه به همراه نگهدارنده و كرنش سنج

جدول 1 شرايط بارگذاری در آزمايشات با کنترل نيرو Table 1 States of loading in force control tests

Table 1 States of folding in force control tests					
تنش حاصله (MPa)			نیروی اعمالی (kN)		
نسبت بار <i>R</i>	دامنه تنش	تنش میانگین	دامنه نيرو	نیروی میانگین	نوع
-0.63	312.5	69.4	18	4	R1
-0.56	312.5	86.8	18	5	R2
-0.52	277.7	86.8	16	5	R3
-0.45	277.7	104.1	16	6	R4

ترکیبی از این دو را نشان میدهند. این ویژگی به وسیله قانون سختشوندگی ایزوتروپیک نشان داده میشود. نتایج مطالعات تجربی [23,12] نشان داده است که رفتار سختشوندگی و یا نرمشوندگی پس از تعداد مشخصی سیکل متوقف میشود و اندازه سطح تسلیم پایدار میشود.

تغییر در اندازه سطح تسلیم با استفاده از قانون سختشوندگی ایزوتروپیک بیان میشود. اما حتی پس از پایدار شدن اندازه سطح تسلیم، رچتینگ رخ میدهد. در نتیجه سختشوندگی سینماتیک به عنوان دلیل اصلی برای پاسخ رچتینگ در نظر گرفته میشود، در حالیکه سختشوندگی ایزوتروپیک بیشتر بر تغییر نرخ رچتینگ در سیکلهای اولیه تأثیر میگذارد.

به منظور دست یافتن به منحنی حلقه هیسترزیس پایدار، آزمایش سیکلی با کنترل جابجایی برای دو دامنه کرنش 0.006 و 80.00 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 شکلهای 6- الف و ب ارائه شده است. در این شکلها $\Delta \varepsilon^{pl} = \varepsilon_t^{pl} - \varepsilon_c^{pl}$ است و از آنجایی که مدول یانگ در مقایسه با مدول سختشوندگی بزرگ میباشد میتوان فرض کرد که دامنه تغییر شکل پلاستیک از رابطه (6) بدست میآید:

$$\Delta \varepsilon^{pl} \approx \mathbf{2} \Delta \varepsilon - \frac{\mathbf{2} \sigma_{\mathbf{1}}^{t}}{E} \tag{6}$$

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 میشود.

جدول بندی تابع $\sigma^0(arepsilon^{pl})=\sigma^0$ از شکلهای 6 و 7 بر اساس رابطه (7) بدست میآید.



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 بر بریا



-370 -0.006 -0.0056 -0.0052 -0.0048 -0.0044 -0.004 -0.0036 -0.0032 -0.0028 -0.0024 &

Fig. 6 Stress–strain curve from symmetric strain control test a-in positive state of strain b- in negative state of strain راید منعنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش کنترل شده با کرنش متقارن الف- در ناحیه کرنش مثبت ب- در ناحیه کرنش منفی

 $\sigma_i^0 = \sigma_i^t - \alpha_i$

(7)

 $\bar{\varepsilon}_{i}^{pl} = (4i - 3)\Delta\varepsilon^{pl}/2 \, _{2} \, _{2} \, \alpha_{i} = \sigma_{i}^{t} + \sigma_{i}^{c}/2 \, _{2} \, _{2}$ مقادیر بدست آمده برای این مؤلفهها در جدول 2 ارائه شده است. بر اساس اطلاعات جدول 2، ثوابت Q, با استفاده از روش حداقل مربعات بدست میآیند که عبارتند از: $b = 37.32 \, _{2}$

2-4- معيار سخت شوندگی سينماتيک غير خطی شابوش

یکی از متداول ترین مدل های سختشوندگی سینماتیک غیرخطی که برای پیش بینی میزان رچتینگ رخ داده در سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد معیار شابوش می باشد. 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 می شود، به خوبی نمی تواند نتایج تجربی را پیش بینی نماید و مقدار رچتینگ را بیشتر از مقادیر تجربی پیش بینی می نماید. اما به منظور مقایسه نتایج مدل سخت شوندگی شابوش و مدل سخت شوندگی شابوش اصلاح شده، نتایج حاصل از که دارای دو مؤلفه سختی است (M=2) استفاده می شود. با توجه به اینکه روند محاسبه ضرایب مدل شابوش در بسیاری از مقالات ارائه شده است، از که دارای دو مؤلفه سختی است (M=2) استفاده می شود. با توجه به اینکه روند محاسبه ضرایب مدل شابوش در بسیاری از مقالات ارائه شده است، از C_1 = 60.5GPa, C_2 = 7 GPa, γ_1 = 18900, γ_2 = C_2 = 80

3-4- معیار سختشوندگی سینماتیک غیر خطی شابوش 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 هیسترزیس پایدار حاصل از آزمایش کنترل شونده با کرنش

2) منحنی انباشت کرنش تک محورہ 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 پارمترها باشد. در این مطالعه با استفاده از یک الگوی ابداعی و ضمن بهره گیری 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

b ,Q مقادیر تعیین شده برای محاسبه D , d

Table 2 Data determined for calculation of Q and b					
$\bar{\varepsilon_i}^{pl}$	σ_i^0	α_i	σ_i^c	σ_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 شابوش اصلاح شده ارائه نمودند. در این دیدگاه مؤلفههای \overline{a}_4 دیدگاه مؤلفههای $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_4, \overline{a}_4$ به وسیله شبیهسازی نیمه بالایی و یا نیمه پایینی منحنی هیسترزیس، مطابق شکل 7 تعیین می شوند. مؤلفه γ_3 نیز با شبیه سازی پاسخ رچتینگ تک محوره محاسبه می شود 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 بهینه سازی پارامتر \overline{a}_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 هیسترزیس متقارن پایدار شده، هر کدام از قانونهای سختشوندگی تفکیک شده به جز قانون سوم از $C_i/\gamma_i - c_L$ در کرنش پلاستیک آغازین $-\varepsilon_L^p$ شروع می می می معدار \mathcal{E}^p_L می محدوده کرنش پلاستیک نهایی \mathcal{E}^p_L می سند. زمانی که $\mathbf{0} = \gamma_3$ است، قانون سختشوندگی سوم از مبدا می گذرد. 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 γ_1 مربوطه باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بلافاصله قانون سختشوندگی اول را پایدار کند. مؤلفه C_3 از شیب بخش خطی منحنی γ_4 هیسترزیس در ناحیه کرنش بالا تعیین می شود و در نهایت $C_{21}C_{41}\gamma_2$ و به وسیله روش سعی و خطا تعیین می شوند تا ناحیه زانویی منحنی هیسترزیس پایدار تجربی را به خوبی پوشش دهد.

در زمان تعیین مؤلفههای منحنی هیسترزیس $C_1, C_2, C_3, C_4, \gamma_1, \gamma_2$ مقدار $C_1, C_2, C_3, C_4, \gamma_1, \gamma_2$ معروه تأثیر دارد، صفر در \overline{a}_4 مقدار γ_4 مقدار γ_4 که اساسا بر پاسخ رچتینگ تک محوره تأثیر دارد، صفر در نظر گرفته می شوند، زیرا که این مؤلفه مای مولفه هیسترزیس به جز \overline{a}_4 ثابت در نظر گرفته می شوند، زیرا که این مؤلفه بر پاسخ رچتینگ تک محوره نیز اثر میگذارد. البته هر تغییری در \overline{a}_4 می تواند شبیه سازی منحنی هیسترزیس را بر هم بزند که باعث می شود، می موانه می مود، می تواند شبیه سازی منحنی هیسترزیس را بر هم بزند که باعث می شود، محاسبه مؤلفههای منحنی هیسترزیس مجددا تکرار شود. بنابراین در زمان تعیین γ_4 در زمان محصوره نیز اثر میگذارد. البته هر تغییری در زمان محاسبه مؤلفههای منحنی هیسترزیس مجددا تکرار شود. بنابراین در زمان خسین γ_4 دفعات بیشماری از سعی و خطا بین منحنی هیسترزیس و پاسخ 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 است مؤلفه تأثیر در بر دارد از 20 می در وانگ حسته وانگ ماده و مؤلفه تأثیری بر پارد [25].

2018

کم و توسط قانون سوم بیان میشود. بخش انتقالی زانویی منحنی هیسترزیس به دو بخش تقسیم میشود. بخش دوم منحنی اساسا 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 كدام از چهار بخش كه بر اساس مطالعات گسترده محققان [25,24,12] پیشنهاد شده است، بر روی شکل 7 ارائه شده است. پیشنهاد می شود که مقدار γ_3 بین صفر تا سی و مقدار \overline{a}_4 در ناحیه 1/4 تا 1/2 تنش تسلیم γ_3 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 شابوش اصلاح شده، بر اساس منحنی حلقه هیستزیس پایدار حاصل از آزمایش سيكلى با كنترل كرنش با دامنه 0.008 كه در شكل 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 هیسترزیس با دامنه کرنش 0.008 محاسبه شدند.



Fig. 7 Four parts of stabilized hysteresis curve [26] شکل7 چهار بخش منحنی هیسترزیس پایدار [26]



ig. 8 Stabilized stress -strain hysteresis curve **شکل 8** منحنی هیسترزیس تنش کرنش پایدار

جدول 3 مؤلفههای مدل سختشوندگی شابوش اصلاح شده

Table 3 Parameters of modified Choboche hardening model								
\bar{a}_4	γ_4	γ_3	γ_2	γ_1	$C_4({\rm GPa})$	$C_{3}(\mathrm{GPa})$	C_2 (GPa)	C_l (GPa
35	375	3.3	7880	12670	6	1.8	90	120

5- مدلسازی 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 Z-X و Y-Y 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 نگدارنده 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 GPa و 0.3 میباشد. همچنین مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون آلومینیوم 2024 مورد استفاده عبارتند از: GPA و 71.5 GP3 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.

همان طور که اشاره شد مدل اصلاح شده شابوش 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 می کند. تحلیلهای سازهها تحت بارگذاری سیکلی معمولا با نموهای بار بزرگ انجام می شوند، 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 می آید. از طرفی کاهش اندازه نمو برای غلبه بر این مشکل باعث افزایش زمان حل و محاسبات می شود. مدل های پیشرفته پلاستیسیته را می توان با استفاده از

2018

500 400 300 200 100 -100 -200 -100 -200

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 13:50 IRDT on Wednesday May 9th 2018

-300 J 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 می یابد. 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 شابوش اصلاح شده (MCH+NLISO) و مدل سختشوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و مدل شابوش (CH2) نیز ارائه شدهاند. همان طور که مشاهده می شود در هر 4 حالت بارگذاری نتایج پیشبینی شده توسط مدل غیرخطی شابوش اصلاح شده نسبت به مدل شابوش، مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد که بیانگر توانایی خوب این مدل در پیشبینی نتایج تجربی است. همان طور که انتظار می فت مدل شابوش میزان انباشت کرنش را در سیکل های اول بار گذاری با نرخ بیشتری پیشبینی مینماید و سریعا به حالت پایدار میرسد که نشان دهنده ضعف این مدل می باشد. مقادیر کرنش رچتینگ اشاره شده در شکلها بیشترین مقدار کرنش پلاستیک رخ داده در هر سیکل بارگذاری میباشد. در هر 4 حالت بارگذاری مشاهده می شود که با افزایش تعداد سیکل ها مقدار رچتینگ رخ داده کاهش مییابد و مقدار انباشت کرنش پلاستیک در یک مقدار خاص اشباع میشود و تعدیل پلاستیک¹ رخ میدهد.

با توجه به اینکه مؤلفههای مدل سختشونگی شابوش اصلاح شده بر اساس منحنی حلقه هیسترزیس پایدار و همچنینی منحنی انباشت کرنش تک محوره در حالت بارگذاری R1 بدست آمدهاند مشاهده میشود که نتایج کرنش انباشته شده در حالت بارگذاری R1 کاملا 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.

نتايج تحقيقات تجربى انجام شده توسط داس و ليم [5,4] به روشنى

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

6- نتايج و بحث

رفتار سختشوندگی نمونههای آلومینیومی با استفاده از ترکیب معیار ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شابوش 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 هیسترزیس تنش-کرنش در هر سیکل و جابجایی حلقه هیسترزیس در هر سیکل میشود. در شکل 10 حلقههای هیسترزیس در سیکلهای 1، 5، 20، 50 و سیکل 150 بر اثر بارگذاری نوع R1 ارائه شده است. همین طور منحنی پیشبینی شده با استفاده از روش المان محدود برای این حالت بارگذاری در شکل 11 ارائه شده است. مشاهده میشود که نتایج شبیه سازی شده کاملا منطبق بر نتایج تجربی است. به منظور بررسی توانایی مدل سخت شوندگی در پیش بینی پاسخ رچتینگ، نمونه های آلومینیومی تحت 4 نوع مختلف بارگذاری قرار گرفتند. این 4 نوع بارگذاری به نحوی انتخاب شده اند که بتوان علاوه بر بررسی تأثیر نسبت تنش R، تأثیر



Fig. 9 Finite element model

شكل 9 مدل المان محدود





¹ Plastic Shakedown



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، R4 ،R3 ،R2

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 می یابد 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 تقريبا نابجاییها پايدار شدهاند که اين 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 می یابد و منجر به كاهش سطح مقطع نمونه و گلویی شدن و شكست ماده می شود [4,1]. آزمایشات صورت گرفته در این تحقیق به دلیل محدودیت دستگاه انجام آزمایش در تعداد سیکلهای بارگذاری در فرکاس 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 پیش بینی در ناحیه اول، کمتر از نتایج تجربی مىباشند و نرخ انباشت كرنش پلاستيك تجربى بيشتر از مقادير پيش بينى شده توسط مدل سختشوندگی استفاده شده است. اما در ناحیه دوم که ناحیه کاهش نرخ انباشت کرنش میباشد نتایج تجربی کمتر از نتایج پیش بینی 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 وR2 نشان می دهد که با ثابت بودن دامنه تنش اعمالی، افزایش تنش میانگین باعث افزایش میزان کرنش انباشته شده می شود. در صورتی که اختلاف مقدار بیشترین کرنش پلاستیک رخ داده در انتهای سیکل محالم با مقدار کرنش پلاستیک رخ داده پس از سیکل اول، در 4 حالت مختلف بارگذاری به صورت یک نمودار رسم شود، شکل 13 حاصل می شود. 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 R3 و R2 بیانگر این مطلب است که با داشتن تنش میانگین ثابت، افزایش دامنه تنش اعمالی باعث افزایش میزان انباشت کرنش می شود. به همین ترتیب، مشابه مقایسه دو حالت R1 وR2، بررسی دو حالت R3 و R4 نیز نشان می دهد که با داشتن دامنه تنش یکسان، بالاتر بودن تنش میانگین اعمالی باعث بیشتر بودن میزان انباشت کرنش پلاستیک می شود.

نکته جالب توجهی که در نتایج ارائه شده در شکل 13 وجود دارد، از مقایسه دو حالت بارگذاری R4 وR1 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 T3-2024 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 ratchetting 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 ratchetting behavior, *International Journal of Plasticity*, Vol. 9, No. 3, pp. 375-390, 1993.
- [17] N. Ohno, M. Abdel-Karim, Uniaxial ratchetting 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. Pourolajal, An investigation into strain rate
- [21] G. 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.
- [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.



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

آوردن حلقه هیسترزیس تنش کرنش پایدار در طول 30 سیکل محاسبه شدند. با توجه به ضخامت کم ورق برای جلوگیری از وقوع کمانش از یک نگهدارنده برای انجام آزمایشهای تجربی استفاده شد. همچنین مؤلفههای مدل سختشوندگی سینماتیک غیرخطی شابوش اصلاح شده با استفاده از پاسخ انباشت كرنش پلاستيك ورق آلياژ آلومينيومي T3-2024 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 هیسترزیس تنش کرنش پایدار در طول 30 سیکل محاسبه شدند. با توجه به ضخامت کم ورق برای جلوگیری از وقوع کمانش از یک نگهدارنده برای انجام آزمایشهای تجربی استفاده شد. همچنین مؤلفههای مدل سختشوندگی سینماتیک غیرخطی شابوش اصلاح شده با استفاده از حلقه هیسترزیس 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 پلاستک 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 كرنش پلاستيك مىشود. همين طور مقايسه نتايج حاصل از شبیهسازی و نتایج تجربی توانایی مدل سختشوندگی ترکیب ایزوتروپیک غیرخطی و سینماتیک غیرخطی شابوش اصلاح شده را در مقایسه با مدل شابوش 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 كرنش اشباع مى شود.

8- مراجع

- 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