



تأثیر پدیده پیامد الاستیک در انباشتگی کرنش ایجاد شده ناشی از پدیده خزش و رفتار پلاستیک

حمید ذبیحی فرزقی¹، محمود شریعتی^{2*}، سعید حدیدی مود³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* مشهد، صندوق پستی 9177948944، mshariati44@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 اردیبهشت 1395

پذیرش: 09 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

پدیده پیامد الاستیک

انباشتگی کرنش

بارگذاری‌های تنش-کنترل و کرنش-کنترل

سفتی

خزش

ارزیابی انباشتگی کرنش‌های ایجاد شده ناشی از رخداد‌های غیرخطی مانند خزش، پلاستیسیته یا پدیده رچتینگ از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد، زیرا موجب افزایش خسارت‌های خزشی-خستگی مواد می‌گردد. عواملی مانند نوع بارگذاری، معادلات حاکم یا ابعاد نواحی الاستیک اطراف رخداد غیرخطی، در انباشتگی کرنش غیرالاستیک ایجاد شده تأثیرگذار می‌باشد. در برخی از سازه‌های مکانیکی که رفتار الاستیک دارند، ممکن است رخداد‌های غیر خطی و به طور موضعی وجود داشته باشند. در چنین شرایطی، مناطق الاستیک که استحکام بیشتری دارند، ممکن است طی مکانیزم‌های بارگذاری به مناطقی که رخداد غیرخطی دارند و استحکام کمتری نیز دارند، نیرو اعمال کنند. بنابراین در مناطقی که رخداد غیرخطی دارند، انباشتگی کرنش موضعی رخ می‌دهد. چنین رفتاری را معمولاً به کمک پدیده پیامد الاستیک توصیف می‌کنند که به عنوان یک دستورالعمل مهم در کدهای ارزیابی سازه‌های مکانیکی مطرح شده است. در این پژوهش تأثیر پدیده پیامد الاستیک در انباشتگی کرنش‌های غیرخطی موضعی ناشی از رفتار الاستیک-پلاستیک و پدیده خزش، طی فرایند رها سازی تنش، بررسی می‌گردد. به این منظور ضریب شاخص پیامد الاستیک به عنوان معیاری برای توصیف تأثیر مناطق الاستیک بر مناطق غیرالاستیک موضعی و برای برخی سازه‌های مکانیکی و مطابق دستورالعمل‌های ارائه شده در کد R5، تعریف می‌گردد. در ادامه تأثیر این ضریب در عملکرد مکانیکی این سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشد که انباشتگی کرنش ایجاد شده ناشی از توزیع مجدد کرنش بین نواحی الاستیک و غیرالاستیک، به ناحیه الاستیک اطراف رخداد غیرخطی بستگی دارد که خود به کمک پدیده پیامد الاستیک توصیف می‌گردد.

The assessment of Elastic Follow-up effects on strain accumulation due to creep and plasticity

Hamid Zabihi Ferezi¹, Mahmoud Shariati^{1*}, Saeid Hadidi Moud²

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

* P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, mshariati44@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 17 May 2016

Accepted 29 June 2016

Available Online 14 August 2016

Keywords:

Elastic Follow-up

Strain Accumulation

Load Control Loading

Displacement Control Loading

Stiffness

creep

ABSTRACT

Assessment of strain accumulation due to nonlinear events like creep, plasticity or ratcheting phenomenon has gained importance, as it causes an increase in creep and fatigue damage of materials. Some factors like the magnitude of loading, constitutive equations or the elastic regions around the nonlinear events have an effect on the rate of strain accumulation. The elastic follow-up can explain the mechanism of strain accumulation. This phenomenon may occur when a mechanical structure with elastic manner is connected to non-linear events and they are subjected to a displacement load. In these cases, the high rigidity portion of elastic region of mechanical structure may enhance the force to the regions with low rigidity. So in the local non-linear portion, the strain is accumulated. This phenomenon is proposed as an important instruction in mechanical assessment codes. In this study, the effects of Elastic Follow-up phenomenon on strain accumulation due to elastic-plastic and local creep are investigated. So the Elastic Follow-up parameter is defined by the methods which are described in high temperature assessment procedures (R5). The results revealed that the strain accumulation depends on the elastic region in structures which is described by the Elastic Follow-up phenomenon.

1- مقدمه

رخدادها می‌توان به پدیده خزش، پلاستیسیته، رچتینگ¹، ایجاد ترک و یا مجموعه‌ای از آنها اشاره نمود. در چنین شرایطی ممکن است طی

در برخی از سازه‌های مکانیکی که رفتار الاستیک داشته باشند، ممکن است رخداد‌های غیرخطی به طور موضعی و محدود وجود داشته باشد. از جمله این

¹ Ratcheting

این موضوع به این معنا است که میزان انباشتگی کرنش ایجاد شده و در نتیجه خسارت‌های خزشی-خستگی را می‌توان به وسیله پدیده پیامد الاستیک کنترل کرد.

2- پدیده پیامد الاستیک

پدیده پیامد الاستیک برای بررسی تأثیر مناطق الاستیک در عملکرد سازه‌ای که دارای رخداد غیرخطی می‌باشد، مطرح شده است که در چنین شرایطی ممکن است در سازه پدیده تمرکز کرنش رخ دهد. این پدیده برای اولین بار توسط رابینسون مطرح شده است [4]. وی در پژوهشی که برای بررسی تأثیر خسارت‌های ناشی از وقوع خزش در عملکرد سازه‌ها انجام داد، به این پدیده اشاره کرد. رابینسون در طی فرایند آزادسازی تنش برای اتصالات پیچی که در دمای کار بالا می‌باشند، دریافت که اگر برای آزمایش از پیچ‌هایی با طول بیشتر استفاده کند؛ ولی اتصال فقط به میزان طول اولیه تحت گرما باشد (به طور موضعی گرم شود)، مقدار تنش آزاد شده کمتر از حالت اولیه خواهد بود. وی بعدها در مقاله‌ای تعداد زیادی از اتصالات پیچی و سیستم‌های لوله کشی را در فرایند آزاد سازی خزشی قرار داد و نشان داد با وجود اینکه بارگذاری بصورت اعمال جابجایی به سیستم می‌باشد؛ ولی به علت تغییر شکل‌های الاستیک که در آن سیستم رخ می‌دهد، در برخی نقاط مانند زانویی‌ها و درز جوش‌ها انباشتگی کرنش ایجاد می‌گردد [5]. وی به طور اتفاقی این رخداد را پدیده پیامد الاستیک نامید؛ ولی تنها به توصیف کیفی این پدیده پرداخت و هیچ روشی برای محاسبه مقدار آن ارائه نداد. از آن زمان به بعد این پدیده در طراحی‌های مهندسی و در شرایطی که امکان وقوع انباشتگی کرنش وجود داشت، مانند سیستم‌های لوله‌کشی [6] و هم چنین اتصالات مختلف این سیستم‌ها وارد شد [7]. پژوهش‌های مختلفی برای بررسی تأثیر شکل و مدل حلقه‌های لوله‌کشی در بارگذاری جابجایی-کنترل انجام شده است تا با بررسی پدیده پیامد الاستیک، شکست ناشی از انباشتگی کرنش در چنین سیستم‌هایی ارزیابی و کنترل شود [8]. از آنجایی که پدیده پیامد الاستیک در دمای بالا می‌تواند تأثیرات بیشتری داشته باشد، مطالعات فراوانی برای تحلیل این پدیده در دمای بالا صورت گرفته است [9].

از طرفی گسترش مفهوم پدیده پیامد الاستیک، اهمیت و محاسبه کمی آن در طراحی‌ها و استفاده از آن به عنوان معیاری برای دسته بندی تنش‌ها⁶ در کدهای تدوین شده به منظور ارزیابی یکپارچگی ساختاری سازه‌های مکانیکی در کشورهای مختلف اروپایی، آمریکایی و نیز در چین و ژاپن به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم مورد توجه واقع گردیده است. بخصوص از تعریف پارامتر مشخصه‌ای به نام ضریب پیامد الاستیک در کد R5 در مقاله حاضر استفاده شده است که یک کد انگلیسی-اروپایی می‌باشد و به عنوان دستورالعملی برای ارزیابی عملکرد سازه‌ها در دمای کار بالا تدوین شده است [10]. تا قبل از شناخته شدن دقیق این پدیده عموماً از تنش‌های حرارتی به عنوان تنش‌های نوع دوم یاد می‌شد که فرضیه دقیقی نبود و همواره خسارت زیادی را در پی داشت. پس از درک کامل‌تر این پدیده مشخص شد در شرایطی که پدیده EFU در سازه اتفاق افتد، دیگر با اطمینان نمی‌توان بیان داشت که تنش‌های حرارتی به عنوان تنش‌های نوع دوم در طراحی‌ها در نظر گرفته شود و درصدی از آن به علت عدم آزادسازی کامل تنش در حضور پدیده EFU باید به عنوان تنش‌های نوع اول در نظر گرفته شود [11]. در این اواخر نیز پژوهش‌هایی مانند مطالعات لی و همکاران [12] و اینتوورث [13]

بارگذاری‌های خزشی-خستگی پدیده انباشتگی کرنش موضعی رخ دهد که خود می‌تواند موجب از کار افتادگی و وقوع شکست شود که در تجهیزات نیروگاهی و صنایع هوا-فضایی و دفاعی می‌توان به مصادیق متعددی از آن اشاره نمود. ضروری است جهت اطمینان از قابلیت دوام چنین سیستم‌هایی در ادامه سرویس دهی، اطمینان مورد نظر حاصل گردد. بنابراین ارزیابی عمر این سیستم‌ها مورد توجه محققین بوده و دستورالعمل‌های مختلفی در هنگام مواجه شدن با چنین شرایطی در کدها و استانداردهای طراحی سازه‌های مکانیکی ارائه شده است [1].

پدیده پیامد الاستیک¹ مکانیزم‌های انباشتگی کرنش را در یک سیستم مکانیکی که رفتار الاستیک داشته باشد و در نقاط محدودی از آن رخداد‌های غیرخطی وجود داشته باشد، توصیف می‌کند. در این شرایط و طی برخی مکانیزم‌های بارگذاری، مناطق الاستیک که استحکام بالاتری دارند به قسمت‌هایی که استحکام پایین‌تری دارند نیرو اعمال می‌کنند. این پدیده بخصوص در شرایطی مهم جلوه می‌کند که سیستم مکانیکی تحت مکانیزم‌های بارگذاری جابجایی-کنترل² باشد و طی فرایندهای رها سازی تنش، به علت بازیابی کرنش الاستیک در منطقه با استحکام بالا، انباشتگی کرنش در مناطق با استحکام پایین ایجاد شود [2]. این رخداد را پدیده پیامد الاستیک می‌نامند و عموماً در سازه‌هایی اتفاق می‌افتد که در دمای کار بالا باشند و تحت تأثیر توام تنش‌های نوع اول³ و نوع دوم⁴ بوده و در معرض شکست با مکانیزم‌های ترکیبی خزشی و خستگی قرار داشته باشند. از آنجایی که پدیده پیامد الاستیک رابطه مستقیمی با مناطق الاستیک اطراف یک رخداد غیرخطی دارد، می‌تواند در میزان انباشتگی کرنش‌های غیر الاستیک موضعی ایجاد شده در یک سیستم مکانیکی تأثیرگذار باشد. در نتیجه توجه به این پدیده از اهمیت ویژه‌ای در طراحی‌های مهندسی و کدهای ارزیابی یکپارچگی ساختاری سازه‌های مکانیکی برخوردار شده است [3].

در این پژوهش تأثیر پدیده پیامد الاستیک در انباشتگی کرنش‌های موضعی در لوله دارای رخداد غیر خطی شعاعی (مانند لوله‌ای با ترک شعاعی)، لوله دارای رخداد غیرخطی محوری (مانند لوله با ترک محوری) و همچنین صفحه‌ای که یک رخداد غیرخطی در مرکز (صفحه ترکدار) باشد و به کمک روابط تحلیلی، بررسی می‌گردد. در ادامه تأثیر پدیده پیامد الاستیک در عملکرد مکانیکی سیستم میله‌بندی سری که تحت بارگذاری جابجایی-کنترل قرار داشته باشد و عامل ایجاد کننده رفتار موضعی غیر خطی آن شامل رخ دادن پدیده خزش و همچنین وجود رفتار پلاستیک باشد، به کمک روش‌های عددی و توسط نرم افزار آباکوس⁵ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همچنین جهت بررسی صحت روش ارائه شده، در شرایطی که در سیستم میله‌بندی سری تحت بارگذاری جابجایی-کنترل قرار داشته باشد از روش تجربی استفاده شده است. در این شرایط رخداد غیر الاستیک موضعی شامل وجود رفتار پلاستیک در سیستم می‌باشد.

نتایج بیانگر این موضوع می‌باشد که انباشتگی کرنش ایجاد شده ناشی از توزیع مجدد کرنش بین نواحی الاستیک و غیرالاستیک، به ناحیه الاستیک اطراف رخداد غیرخطی بستگی دارد و به عامل ایجاد کننده رخداد غیرخطی وابسته نمی‌باشد که خود به کمک پدیده پیامد الاستیک توصیف می‌گردد.

¹ Elastic Follow-up, EFU

² Displacement Control Loading

³ Primary Stress

⁴ Secondary Stress

⁵ ABAQUS

⁶ Stress Classification

ذکر این نکته مهم می‌باشد که ضریب شاخص پدیده پیامد الاستیک باید برای نقاطی محاسبه گردد که احتمال وقوع تمرکز کرنش وجود داشته باشد. بنابراین تأثیر رخداد غیرخطی در سازه که با ضریب شاخص پیامد الاستیک، q ، توصیف می‌گردد، مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد [3]:

$$q \equiv \frac{(\varepsilon)_{\text{final}} - (\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{el}})_{\text{final}}}{(\varepsilon)_{\text{initial}} - (\varepsilon_{\text{eq}}^{\text{el}})_{\text{final}}} \quad \text{or} \quad q = \frac{Y}{X} = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_{\text{eq}}}{\varepsilon_{\text{el}} - \varepsilon_{\text{eq}}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، ε_f کرنش نهایی یا کرنش سازه با وجود رخداد غیر خطی، ε_{el} کرنش الاستیک یا کرنش بدون در نظر گرفتن رخداد غیر خطی و ε_{eq} کرنش معادل یا کرنش الاستیک سیستم با در نظر گرفتن تنش نهایی در سیستم می‌باشد که در شکل 1 نشان داده شده است. در شکل 1، $q=1$ بیانگر حالتی است که در آن کرنش ثابت می‌ماند و همان شرایطی است که در آن جابجایی ثابت می‌ماند. به بیان دیگر، اگر q به سمت بینهایت میل کند، بیانگر شرایطی است که در آن تنش ثابت می‌ماند.

3- محاسبه ضریب شاخص پیامد الاستیک

در این بخش ضریب شاخص پیامد الاستیک برای برخی سیستم‌های میله‌بندی محاسبه می‌گردد. هر یک از این سیستم‌ها بیانگر مدل گسسته‌ای از یک سازه مکانیکی می‌باشد که رفتار الاستیک دارد و دارای رخداد غیرخطی می‌باشد که در شکل 2 مشخص شده است. برای ارائه محاسبات تحلیلی فرض شده است که رخداد غیرخطی شامل وجود رفتار پلاستیک موضعی براساس رابطه رامبرگ-اوسگود، مطابق معادله 2، و فرایند رهاسازی تنش، خزش

در مورد بررسی رفتارهای تنش‌های نوع اول و دوم در حضور این پدیده انجام شده است. همچنین بویل مطالعات جدیدی در مورد ارزیابی این پدیده در سیستم‌های لوله کشی و در دمای کار بالا انجام داده است [14].

برای توصیف کمی پدیده پیامد الاستیک مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است که در این پژوهش از مدل ارائه شده توسط R5 استفاده شده است. براساس این مدل ضریب q مطابق شکل 1، به صورت شیب خطی تعریف می‌شود که نتایج تحلیل الاستیک، در شرایطی که رخداد غیرخطی در سیستم وجود نداشته باشد، را به تحلیل غیرالاستیک، در شرایطی که رخداد غیرخطی در سیستم وجود داشته باشد، متصل می‌کند. در این شکل تمرکز کرنش ناشی از وجود پدیده پیامد الاستیک نشان داده شده است که رخداد غیرخطی موضعی در شکل 1-الف، به علت وجود رفتار پلاستیک و در شکل 1-ب، ناشی از وقوع خزش و طی فرایند رهاسازی تنش می‌باشد. همانطور که اشاره شد، پدیده پیامد الاستیک به توصیف تأثیر مناطق الاستیک اطراف یک رخداد غیرخطی می‌پردازد. بنابراین در شکل 1، نقطه الاستیک حالتی می‌باشد که در سیستم فرض شود رخداد غیرخطی وجود نداشته باشد و نقطه نهایی، رفتار نهایی سیستم و با وجود رخداد غیرخطی می‌باشد. به عبارت دیگر تعریف ارائه شده در بالا به نوعی تأثیر وجود رخداد غیرخطی را در عملکرد سیستم با شرایطی که این رخداد وجود نداشته باشد، ارزیابی می‌کند. در شکل 2 برخی از سیستم‌های مکانیکی که رفتار الاستیک دارند و دارای رخداد غیرخطی موضعی نیز می‌باشند، به همراه مدل گسسته هر سیستم نشان داده شده است.

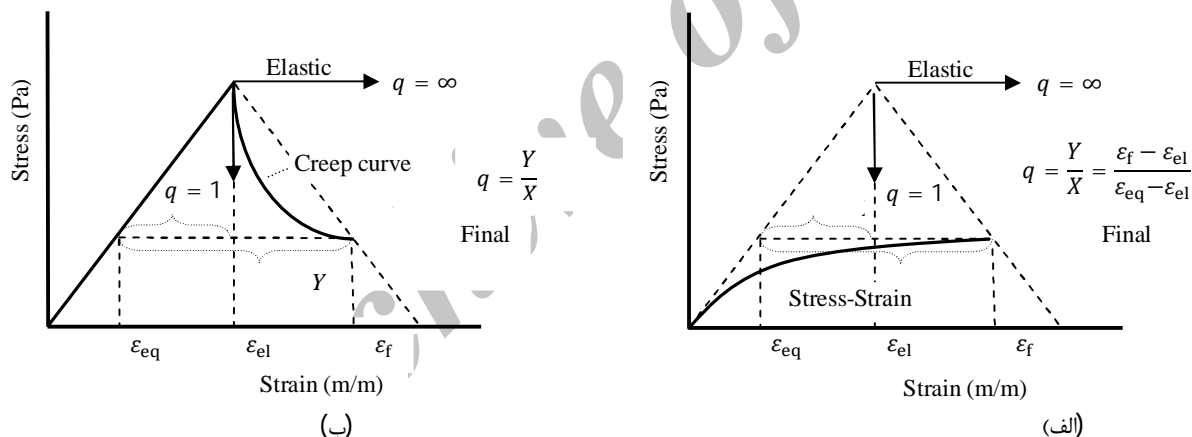


Fig. 1 Strain concentration due to EFU. A, for Elastic-plastic and B, for creep [3]

شکل 1 تمرکز کرنش ناشی از وجود پدیده پیامد الاستیک در مرکز. (الف) برای رفتار الاستیک-پلاستیک و (ب) برای وقوع خزش [3]

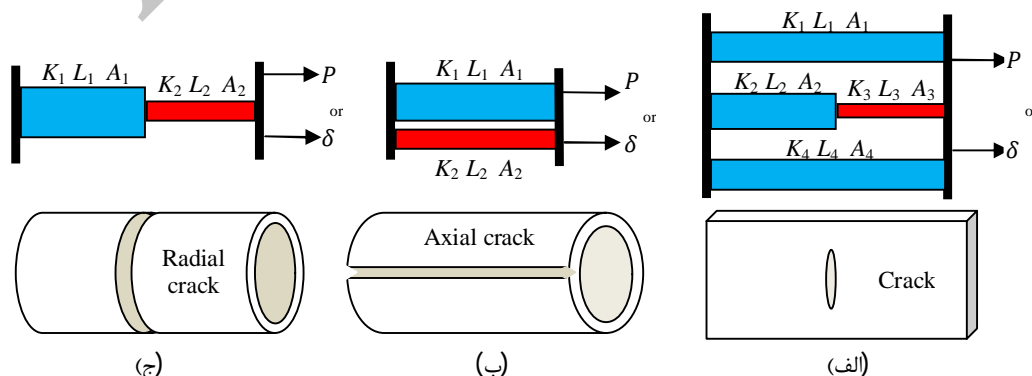


Fig. 2 (a) Series bars (tube with a radial crack), (b) parallel bars (tube with an axial crack) and (c) combined bars (plate with a crack)

شکل 2 (الف) میله بندی سری (مدل لوله با ترک شعاعی)، (ب) میله بندی موازی (مدل لوله با ترک محوری) و (ج) میله بندی ترکیبی (مدل صفحه با ترک در مرکز)

براساس قانون نورتن، و مطابق رابطه 3 باشد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + A\sigma^n \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = B\sigma^m \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \int_0^t B\sigma^m dt \quad (3)$$

که n و m ضرایب توانی تنش و B ضریب ثابت قانون نورتن می‌باشند.

در شکل 2، پارامترهای K ، A و L به ترتیب سفتی، سطح مقطع و طول هر میله می‌باشد. همچنین در شکل 2-ج و 2-ب، میله شماره 2 برای مدلسازی رخداد غیرخطی در نظر گرفته شده است؛ زیرا تمرکز تنش در این میله رخ می‌دهد و میله شماره 1 برای مدلسازی ناحیه الاستیک اطراف آن می‌باشد. در شکل 2-الف، میله شماره 3 برای مدلسازی رخداد غیرخطی و میله‌های 1، 2 و 4 برای مدلسازی نواحی الاستیک سازه می‌باشد.

در ادامه ضریب شاخص پیامد الاستیک در منطقه‌ای که رخداد غیرخطی وجود دارد و برای هر یک از سیستم‌های مختلف مکانیکی با شرایط مختلف بارگذاری و شرایط مختلف ایجاد کننده رفتار غیرالاستیک و براساس جدول 1، محاسبه می‌گردد. قابل ذکر است که کرنش نهایی، ε_f ، مطابق نوع رخداد غیرخطی از رابطه (2) یا رابطه (3) محاسبه گردد و کرنش الاستیک، ε_{el} ، در هر تحلیل با فرض اینکه در سیستم رخداد غیرخطی وجود ندارد محاسبه می‌گردد و کرنش الاستیک معادل نیز با توجه به تنش نهایی محاسبه شده و مطابق رابطه (4) محاسبه می‌گردد.

$$\varepsilon_{eq} = \frac{(\sigma)_{final}}{E} = \frac{\sigma_f}{E} \quad (4)$$

3-1- تحلیل اول

در این حالت مطابق شکل 2-ج، به سیستم جابجایی δ اعمال می‌شود و سپس تحت فرایند رهاسازی تنش و به مدت زمان t قرار می‌گیرد. جابجایی کل اعمال شده برابر با جابجایی هر یک از میله‌های شماره 1 و 2 می‌باشد، بنابراین:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{P}{K_1} + \frac{P}{K_2} \rightarrow P = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \delta \quad (5)$$

در رابطه فوق δ_1 و δ_2 به ترتیب جابجایی میله‌های 1 و 2 و P نیروی معادل هر میله است. کرنش الاستیک در میله 2 پس از اعمال جابجایی و کرنش نهایی پس از فرایند آزاد شدن تنش براساس رابطه (3) عبارت است از:

$$\varepsilon_2^{el} = \frac{\delta_2}{L_2} = \frac{P}{EA_2} = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \frac{\delta}{EA_2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_2^f = \frac{\sigma_2}{E} + \int_0^t B\sigma_2^m dt = \frac{P}{EA_2} + \int_0^t B\sigma_2^m dt, \quad \varepsilon_2^{eq} = \frac{\sigma_2}{E} \quad (7)$$

جدول 1 شرایط مختلف بارگذاری و رخداد غیرخطی

Table 1 Loading conditions and non-linear events

شماره	سیستم مکانیکی	بارگذاری	رخداد غیرخطی
تحلیل اول	میله بندی سری (لوله با ترک شعاعی)-شکل (2-الف)	جابجایی δ	وجود پدیده خزش (قانون نورتن)
تحلیل دوم	میله بندی موازی (لوله با ترک محوری)-شکل (2-ب)	نیروی P	رفتار پلاستیک (رامبرگ-اوسگود)
تحلیل سوم	میله بندی موازی (لوله با ترک محوری)-شکل (2-ب)	جابجایی δ	وجود پدیده خزش (قانون نورتن)
تحلیل چهارم	میله بندی ترکیبی (صفحه با ترک در مرکز)-شکل (2-ج)	جابجایی δ	رفتار پلاستیک (رامبرگ-اوسگود)

از طرفی در حالت نهایی می‌توان نوشت:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \rightarrow \frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2} EA_2 \varepsilon_2^{el} = \frac{\sigma_1}{E} L_1 + \frac{\sigma_2}{E} L_2 + L_2 \int_0^t B\sigma_2^m dt \quad (8)$$

در رابطه فوق σ_2 مقدار تنش نهایی می‌باشد. با توجه به تعریف ارائه شده برای ضریب شاخص پیامد الاستیک از رابطه (1) داریم:

$$Y = (\varepsilon_2^f - \varepsilon_2^{eq}) = \int_0^t B\sigma_2^m dt, X = (\varepsilon_2^{el} - \varepsilon_2^{eq}) = \frac{\int_0^t B\sigma_2^m dt}{\left(\frac{K_1 + K_2}{K_1}\right)} \quad (9)$$

بنابراین ضریب شاخص پیامد الاستیک در این تحلیل برابر با $q = 1 + \frac{K_2}{K_1}$ می‌شود. قابل ذکر است اگر رخداد غیرخطی در این تحلیل وجود رفتار پلاستیک و براساس رابطه (2) در نظر گرفته شود، رابطه (6) صادق بوده و کرنش الاستیک نیز مطابق رابطه (7) می‌باشد و کرنش نهایی و معادل مطابق رابطه (10) می‌باشد:

$$\varepsilon_2^f = \frac{\sigma_2}{E} + A\sigma_2^n = \frac{P}{EA_2} + A\sigma_2^n, \quad \varepsilon_2^{eq} = \frac{\sigma_2}{E} \quad (10)$$

بنابراین روابط (8) و (9) مطابق زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \rightarrow \frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2} EA_2 \varepsilon_2^{el} = \frac{\sigma_1}{E} L_1 + \frac{\sigma_2}{E} L_2 + L_2 A\sigma_2^n \quad (11)$$

$$Y = (\varepsilon_2^f - \varepsilon_2^{eq}) = A\sigma_2^n, X = (\varepsilon_2^{el} - \varepsilon_2^{eq}) = \frac{A\sigma_2^n}{\left(\frac{K_1 + K_2}{K_1}\right)} \quad (12)$$

در این حالت نیز ضریب شاخص پیامد الاستیک $q = 1 + \frac{K_2}{K_1}$ به دست می‌آید که مشابه نتایج مرجع [10] می‌باشد. ذکر این نکته بسیار مهم است که اگر به این سیستم میله بندی (میله بندی سری) نیروی P اعمال گردد و روابط فوق بازنویسی گردد، مقدار ضریب شاخص پیامد الاستیک بینهایت محاسبه می‌گردد. در چنین شرایطی با تغییر منطقه الاستیک اطراف رخداد غیرخطی مقدار انباشتگی کرنش‌های موضعی تغییر نخواهد کرد. به عبارت دیگر انباشتگی کرنش‌های غیر خطی در این شرایط به نواحی الاستیک اطراف رخداد غیر خطی، پدیده پیامد الاستیک، بستگی ندارد و فقط به مقدار نیروی اعمال شده بستگی دارد. در بخش بعدی این رخداد به کمک روش‌های عددی تبیین خواهد شد

3-2- تحلیل دوم

در این حالت به سیستم موازی که دارای رخداد غیرخطی رفتار پلاستیک

است، شکل 2-ب، نیروی P اعمال می‌گردد. مجموع نیروی میله شماره 1 و 2 برابر با نیروی P اعمال شده است. بنابراین جابجایی هر میله عبارت است از:

$$P = P_1 + P_2 \quad (13)$$

$$\delta_1 = \delta_2 \rightarrow \frac{P_1}{K_1} = \frac{P_2}{K_2} \quad (14)$$

که در آن P_1 و P_2 به ترتیب نیروی هریک از میله‌های شماره 1 و 2 می‌باشد و δ_1 و δ_2 نیز به ترتیب جابجایی‌های ایجاد شده در میله شماره 1 و 2 ناشی از اعمال بار می‌باشد. در این تحلیل کرنش الاستیک عبارت است از کرنش میله شماره 2 و در شرایطی که کل سیستم رفتار الاستیک داشته باشند. کرنش معادل، کرنش الاستیک و همچنین کرنش نهایی بر اساس رابطه رامبرگ-اوسگود، مطابق معادله (2)، عبارت است از:

$$\varepsilon_2^{el} = \frac{P_2}{EA_2} = \frac{K_2}{K_1 + K_2} \frac{P}{EA_2} \rightarrow P = \frac{K_1 + K_2}{K_2} EA_2 \varepsilon_2^{el} \quad (15)$$

$$\varepsilon_2^f = \frac{\sigma_2}{E} + A\sigma_2^n, \quad \varepsilon_2^{eq} = \frac{\sigma_2}{E} = \frac{P_2}{EA_2} \quad (16)$$

از طرفی در حالت نهایی می‌توان نوشت:

$$\delta_1 = \delta_2 \rightarrow \frac{P_1}{K_1} = \frac{\sigma_2}{E} L_2 + L_2 A\sigma_2^n \rightarrow \frac{P - P_2}{K_1} = \frac{\sigma_2}{E} L_2 + L_2 A\sigma_2^n \quad (17)$$

با جایگذاری P از رابطه (12) و با توجه به تعریف ارائه شده برای ضریب شاخص پیامد الاستیک از رابطه (1) داریم:

$$Y = (\varepsilon_2^f - \varepsilon_2^{eq}) = A\sigma_2^n, \quad X = (\varepsilon_2^{el} - \varepsilon_2^{eq}) = \frac{A\sigma_2^n}{\left(\frac{K_1 + K_2}{K_1}\right)} \quad (18)$$

بنابراین ضریب شاخص پیامد الاستیک در این تحلیل برابر با $q=1+K_2/K_1$ می‌شود که در این حالت نیز مشابه نتایج مرجع [10] می‌باشد. در این تحلیل نیز اگر رخداد غیرخطی شامل وجود پدیده رهاسازی تنش می‌بود، ضریب شاخص پیامد الاستیک یکسان به دست می‌آمد.

3-3- تحلیل سوم

شرایط تحلیل سوم مشابه تحلیل دوم است؛ ولی با این تفاوت که مکانیزم بارگذاری شامل اعمال جابجایی δ می‌باشد و رخداد غیرخطی نیز وجود پدیده خزش در میله شماره 2 می‌باشد.

در این حالت جابجایی هر میله برابر با جابجایی اعمال شده δ می‌باشد. بنابراین داریم:

$$\delta = \delta_1 = \delta_2 = \frac{P_1}{K_1} = \frac{P_2}{K_2} \rightarrow P_1 = K_1 \delta, \quad P_2 = K_2 \delta \quad (19)$$

که در آن P_1 و P_2 به ترتیب نیروهای میله 1 و میله 2 می‌باشند. بنابراین کرنش الاستیک، کرنش نهایی و کرنش معادل از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$\varepsilon_2^{el} = \frac{P_2}{EA_2} = \frac{K_2}{EA_2} \delta \quad (20)$$

$$\varepsilon_2^f = \frac{\sigma_2}{E} + \int_0^t B\sigma_2^m dt, \quad \varepsilon_2^{eq} = \frac{\sigma_2}{E} \quad (21)$$

از طرفی در حالت نهایی می‌توان نوشت:

$$\delta = \delta_1 \rightarrow \frac{EA_2}{K_2} \varepsilon_2^{el} = \frac{\sigma_2}{E} L_2 + L_2 \int_0^t B\sigma_2^m dt \rightarrow (\varepsilon_2^{el} - \varepsilon_2^{eq}) = \int_0^t B\sigma_2^m dt \quad (22)$$

با توجه به تعریف ارائه شده برای ضریب شاخص پیامد الاستیک از رابطه (1)

داریم:

$$Y = (\varepsilon_2^f - \varepsilon_2^{eq}) = \int_0^t B\sigma_2^m dt, \quad X = (\varepsilon_2^{el} - \varepsilon_2^{eq}) = \int_0^t B\sigma_2^m dt \rightarrow q = 1 \quad (23)$$

در این تحلیل نیز با روابط تحلیلی مشابه فوق و با در نظر گرفتن رفتار پلاستیک به عنوان رخداد غیرخطی، ضریب شاخص پیامد الاستیک برابر یک می‌شود.

3-4- تحلیل چهارم

در این حالت که در شکل 2-الف نشان داده شده است، فرض شده است که میله شماره 1 و 2 رفتار الاستیک و میله شماره 3 رفتار غیرخطی شامل تغییر شکل پلاستیک داشته باشد که در آن تمرکز کرنش رخ می‌دهد. سیستم تحت اعمال جابجایی δ می‌باشد. پس از اعمال جابجایی در سیستم روابط زیر را داریم:

$$\delta = \delta_1 = \delta_{2-3} = \delta_2 + \delta_3 \quad (24)$$

در رابطه فوق δ_1 ، δ_2 و δ_3 به ترتیب جابجایی‌های میله‌های شماره 1، 2 و 3 می‌باشند. کرنش الاستیک، کرنش نهایی و کرنش معادل میله شماره 3 در این تحلیل به ترتیب عبارتند از:

$$\varepsilon_3^{el} = \frac{\delta_3}{L_3} = \frac{K_2 K_3}{(K_2 + K_3) EA_3} \delta \quad (25)$$

$$\varepsilon_3^f = \frac{\sigma_3}{E} + A\sigma_3^n, \quad \varepsilon_3^{eq} = \frac{\sigma_3}{E} = \frac{P_3}{EA_3} \quad (26)$$

از طرفی در حالت نهایی می‌توان نوشت:

$$\delta = \delta_{2-3} = \delta_2 + \delta_3 \rightarrow \frac{(K_2 + K_3)}{K_2 K_3} EA_3 \varepsilon_3^{el} = \frac{P_3}{K_2} + \frac{P_3}{K_3} + L_3 A\sigma_3^n \quad (27)$$

بنابراین با توجه به تعریف ارائه شده برای ضریب شاخص پیامد الاستیک از رابطه (1) داریم:

$$Y = (\varepsilon_3^f - \varepsilon_3^{eq}) = A\sigma_3^n, \quad X = (\varepsilon_3^{el} - \varepsilon_3^{eq}) = \frac{A\sigma_3^n}{\left(\frac{K_2 + K_3}{K_2}\right)} \quad (28)$$

بنابراین ضریب شاخص پیامد الاستیک در این تحلیل برابر با K_2/K_1 می‌شود که با در نظر گرفتن وجود پدیده خزش به عنوان رخداد غیرخطی همین نتیجه حاصل می‌شود.

4- بررسی عملکرد مکانیکی سیستم‌های مختلف دارای رخداد غیرخطی

وجود رخدادهای غیرخطی در سازه‌های مکانیکی و بخصوص در شرایطی که طی مکانیزم‌های بارگذاری خزشی-خستگی قرار داشته باشند، با ایجاد پدیده انباشتگی کرنش غیرالاستیک موضعی، موجب افزایش خسارت‌های ناشی از خزش و خستگی در مواد می‌شوند. بنابراین ضروری است از قابلیت دوام آنها در ادامه سرویس‌دهی، اطمینان مورد نظر حاصل گردد و عواملی که در میزان انباشتگی کرنش ایجاد شده دخالت دارند، مورد بررسی قرار گیرد.

در این بخش تلاش شده است تأثیر وجود پدیده پیامد الاستیک بر میزان انباشتگی کرنش ناشی از رخدادهای غیرخطی و بر اساس روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی، به کمک نرم افزار آباکوس، مطالعه گردد. با توجه به روابط بخش قبل، از آنجایی که ضریب شاخص پیامد الاستیک

در این پژوهش برای بررسی تأثیر پدیده پیامد الاستیک در انباشتگی کرنش‌های موضعی ناشی از فرایند رهاسازی تنش، خزش براساس قانون نورتن، از سیستم دو میله‌ای که از جنس فولاد آلیاژی Cr-Mo تشکیل شده است، استفاده شده که پارامترهای مختلف آن برای تحلیل المان محدود مطابق جدول 5 می‌باشد.

فرایند رهاسازی تنش در دمای 520°C برای میله شماره 2 و به مدت 10^5 ساعت صورت می‌گیرد. همچنین برای حالت رفتار الاستیک-پلاستیک موضعی از فولاد کم کربن با مدول الاستیسیته $E=187.7\text{MPa}$ ، تنش تسلیم $\sigma_Y = 212\text{MPa}$ و ضریب پواسون $\nu=0.3$ استفاده شده است و رابطه تنش-کرنش آن در منطقه پلاستیک مطابق مرجع [15] می‌باشد. مقادیر مختلف ضریب شاخص پیامد الاستیک در تحلیل المان محدود با تغییر مقادیر عرض ناحیه الاستیک، H_1 ، حاصل می‌شود.

در انتهای این بخش ضروری است این نکته ذکر گردد که برای شرایطی که بارگذاری از نوع جابجایی-کنترل باشد، مطابق جدول 3، ضریب شاخص پیامد الاستیک از رابطه $q = 1 + K_2/K_1$ به دست می‌آید. واضح است که با افزایش عرض میله 1، چون استحکام آن، K_1 ، افزایش می‌یابد، این ضریب کاهش پیدا می‌کند و در شرایطی که بارگذاری نیرو-کنترل باشد، این ضریب در هر شرایطی بینهایت می‌گردد.

مقادیر ضریب شاخص پیامد الاستیک در حالت وجود رفتار الاستیک-پلاستیک مطابق رابطه (33) و در حالت وجود پدیده خزش مطابق رابطه (34) در نظر گرفته می‌شود.

$$q = 1.17, 1.43, 1.5, 1.65 \quad (33)$$

$$q = 1.2, 1.4, 1.7, 2, 3 \quad (34)$$

جدول 3 حالت‌های الاستیک-پلاستیک و خزش همراه با بارگذاری نیرو-کنترل و جابجایی-کنترل و ضرایب پیامد الاستیک مربوطه

Table 3 Elastic-plastic and creep cases with load-control and displacement-control loading and their EFU parameters

ضریب q	نوع بارگذاری	رفتار غیر خطی موضعی
$q = 1 + \frac{k_2}{k_1}$	جابجایی 0.4 mm	الاستیک-پلاستیک
بینهایت	نیروی 15 kN	الاستیک-پلاستیک
$q = 1 + \frac{k_2}{k_1}$	جابجایی 1 mm	خزش موضعی
بینهایت	نیروی 9 kN	خزش موضعی

جدول 4 ابعاد نمونه در حالت‌های رفتار الاستیک-پلاستیک و خزش موضعی

Table 4 Dimension of specimen in local elastic-plastic and creep cases

L_1	L_2	H_1	H_2	t	رفتار غیر خطی موضعی
5cm	5cm	2cm	1cm	3mm	الاستیک-پلاستیک
40cm	20cm	15cm	5cm	3mm	خزشی

جدول 5 خواص فولاد Cr-Mo [3]

Table 5 Material properties of Cr-Mo steel [3]

$T(^{\circ}\text{C})$	$E(\text{MPa})$	ν	n	$A \left(\text{MPa} \frac{-n}{h} \right)$
730	124000	0.3	3	5×10^{-12}
590	144000	0.3	7	1.9×10^{-19}
425	170000	0.3	9.9	7.04×10^{-25}

در سیستم‌های میله بندی به ناحیه الاستیک اطراف رخداد غیرخطی بستگی دارد، برای استخراج روابط تحلیلی فرض شده است که در 4 تحلیل انجام شده در بخش قبلی، رخداد غیرخطی شامل وجود رفتار پلاستیک مطابق مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک باشد. در چنین شرایطی مقادیر کرنش الاستیک و نهایی میله شماره 2 برای تحلیل 1 مطابق رابطه زیر می‌باشد:

$$\varepsilon_2^{\text{el}} = \frac{\delta_2}{L_2}, \quad \varepsilon_2^{\text{f}} = \frac{\sigma_Y}{E} + \varepsilon_2^{\text{p}} \quad (29)$$

در رابطه فوق، σ_Y/E مقدار الاستیک کرنش نهایی و ε_2^{p} مقدار پلاستیک کرنش نهایی و با توجه به مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک می‌باشد. در چنین مدلی برای رفتار غیرخطی، تنش غیرالاستیک در میله شماره 2، σ_Y می‌باشد. مقدار ε_2^{p} پس از ساده سازی و با در نظر گرفتن ضریب شاخص پیامد الاستیک از تحلیل اول، مطابق رابطه (30) می‌باشد:

$$\varepsilon_2^{\text{p}} = \frac{\delta}{L_2} - \left(\frac{K_2}{K_1} + 1 \right) \frac{\sigma_Y}{E} = \frac{\delta}{L_2} - q \frac{\sigma_Y}{E} \quad (30)$$

بنابراین مقدار کرنش‌های نهایی و الاستیک پس از ساده سازی و با توجه به روابط (29) و (30) مطابق زیر می‌باشد:

$$\varepsilon_2^{\text{f}} = \frac{\delta}{L_2} - (q-1) \frac{\sigma_Y}{E}, \quad \varepsilon_2^{\text{el}} = \frac{\delta}{qL_2} \quad (31)$$

مقدار نیرویی که به ازای آن شرایط پلاستیک در میله شماره 2 ایجاد گردد، $(\sigma_2 = \sigma_Y)$ ، و با توجه به رابطه (31) عبارت است از:

$$\delta_Y = \frac{qL_2\sigma_Y}{E} \quad (32)$$

بنابراین برای اینکه پدیده پیامد الاستیک در سیستم رخ دهد، باید میله شماره 2 وارد منطقه پلاستیک گردد و یا مقدار جابجایی اعمال شده بیشتر از δ_Y باشد. به عبارت دیگر، $\delta = x\delta_Y$ که در آن $x > 1$ می‌باشد. با انجام دادن روش مشابهی با آنچه در بالا اشاره شد، ضریب تمرکز کرنش موضعی و کرنش نهایی غیرالاستیک برای تحلیل‌های دوم، سوم و چهارم مطابق جدول (2) می‌شود.

در ادامه تأثیر وجود پدیده پیامد الاستیک بر میزان انباشتگی کرنش غیرخطی به کمک نرم افزار آباکوس، مطالعه می‌گردد. به این منظور سیستم میله‌بندی سری نشان داده شده در شکل 2 در نظر گرفته می‌شود. در چنین شرایطی رخداد غیر خطی موضعی در میله شماره 2 عبارت است از رفتار پلاستیک و همچنین وجود پدیده خزش.

شرایط بارگذاری شامل اعمال نیروی خارجی و همچنین اعمال جابجایی می‌باشد که در جدول 3 مشخص شده است. ابعاد سازه در حالت‌های رفتار الاستیک-پلاستیک و رفتار خزشی در جدول 4 مشخص شده است که در این جدول L ، H و t به ترتیب بیانگر طول، عرض و ضخامت سازه و زیرنویس‌های 1 و 2 مربوط به شماره میله می‌باشد.

جدول 2 ضریب تمرکز کرنش موضعی و کرنش معادل غیرخطی برای تحلیل‌های دوم، سوم و چهارم

Table 2 Strain concentration factor and non-linear strain for second, third and fourth analyses

شماره	کرنش معادل غیرخطی
تحلیل دوم	$\varepsilon_2^{\text{f}} = \frac{\delta}{L_2} - (q-1) \frac{\sigma_Y}{E}$
تحلیل سوم	$\varepsilon_2^{\text{f}} = x \frac{\sigma_Y}{E}$
تحلیل چهارم	$\varepsilon_2^{\text{f}} = \frac{\delta}{L_2} - (q-1) \frac{\sigma_Y}{E}$

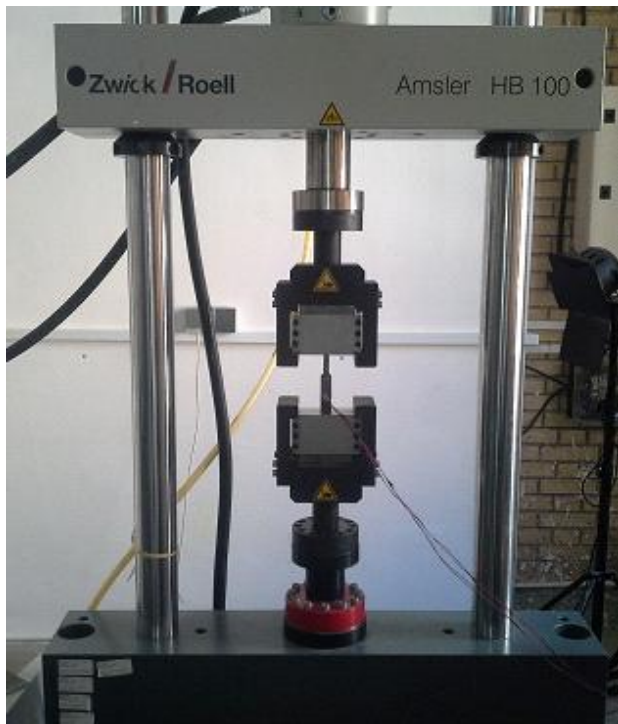


Fig. 4 Zwick-Roell machine for experimental test

شکل 4 دستگاه ژونیک-رول استفاده شده برای آزمایش تجربی

جدول 6 مشخصات کرنش سنج

Table 6 Strain gauge specifications

نوع کرنش سنج	حد کرنش	شرکت	مقاومت الکتریکی
YEFLA-2	(10-15)%	سازنده	کرنش سنج
		TML (ژاپن)	120 اهم

لازم به ذکر است که با انجام هر آزمایش اطلاعات مربوط به شرایط بارگذاری، جابجایی یا نیروهای اعمال شده، توسط دستگاه محاسبه می‌گردد و کرنش‌های مناطق الاستیک و غیرالاستیک در هر مرحله به کمک کرنش سنج‌های چسبیده شده به نمونه و توسط سیستم ثبت داده³ محاسبه و ذخیره می‌گردد.

6- نتایج و بحث

همانطور که اشاره شد، در سیستم‌های مکانیکی که رفتار الاستیک داشته باشند و رخدادهای غیرخطی به طور موضعی وجود داشته باشد، امکان وقوع تمرکز کرنش موضعی وجود دارد. محققین انباشتگی و تمرکز کرنش‌های غیرالاستیک در چنین سازه‌هایی را به وسیله ضریب شاخص پیامد الاستیک توصیف می‌کنند. تمرکز کرنش موضعی در سیستم‌های معرفی شده در این پژوهش رابطه مستقیمی با ناحیه الاستیک اطراف رخداد غیرخطی و در نتیجه پدیده پیامد الاستیک دارد. بنابراین در چنین سیستم‌هایی با تغییر ضریب شاخص پیامد الاستیک، انباشتگی کرنش تغییر می‌کند.

فرمول‌های 30 و 31 بیانگر این حقیقت است که با فرض ثابت بودن جابجایی خارجی اعمال شده و افزایش ضریب شاخص پیامد الاستیک، q ، مقدار کرنش غیر الاستیک در سیستم میله بندی سری که تحت بارگذاری جابجایی قرار دارد، کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج حاصل شده از

5- نتایج تجربی

برای بررسی صحت روش ارائه شده، در شرایطی که سیستم میله‌بندی سری رفتار الاستیک و پلاستیک موضعی داشته باشد و تحت بارگذاری جابجایی- کنترل باشد، از روش تجربی استفاده شده است.

برای رسیدن به این منظور، سیستم میله‌بندی سری با مقادیر مختلف ضریب پیامد الاستیک انتخاب شده است. قابل توجه اینکه در این حالت تأثیر پدیده پیامد الاستیک در سیستم با تغییر در عرض ناحیه الاستیک نمونه‌ها لحاظ گردیده که در شکل 3 نشان داده شده است. ابعاد نمونه‌ها مطابق جدول 4 در نظر گرفته شده است و رفتار الاستیک-پلاستیک آن مطابق مرجع [15] می‌باشد. مقادیر مختلف ضریب شاخص پیامد الاستیک برای این آزمایش و مطابق روابط ارائه شده در بخش 3، به صورت زیر می‌باشد.

$$q = 1.17, 1.43, 1.5 \quad (35)$$

باید توجه داشت که برای انجام آزمایش تجربی در چنین شرایطی، باید کرنش‌های منطقه الاستیک و پلاستیک را جداگانه و به کمک کرنش سنج‌هایی¹ که به نمونه می‌چسبند، محاسبه کرد. از آنجایی که در این سیستم میله‌بندی، مناطقی با رفتار پلاستیک ایجاد می‌گردد، باید کرنش سنج‌هایی را به کاربرد که قابلیت استفاده و داده برداری در منطقه پلاستیک را دارا باشند. در جدول 6 مشخصات کرنش‌سنج مناسب خریداری شده از کشور ژاپن برای آزمایش‌های تجربی طراحی شده در این بخش نشان داده شده است. نکته مهم دیگر این است که برای رخ دادن پدیده پیامد الاستیک در سیستم، باید مقدار جابجایی اعمال شده به نحوی باشد که میله 2 وارد منطقه پلاستیک گردد و میله 1 در منطقه الاستیک باقی بماند. بنابراین مقدار جابجایی اعمال شده از 0.3mm تا 1.6mm در نظر گرفته شده است و نرخ بارگذاری 0.01mm/s انتخاب شده است. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه ژونیک-رول² انجام گردید که قابلیت اعمال بار تا 100kN با دقت $\pm 1N$ را دارا می‌باشد که در شکل 4 نشان داده شده است.

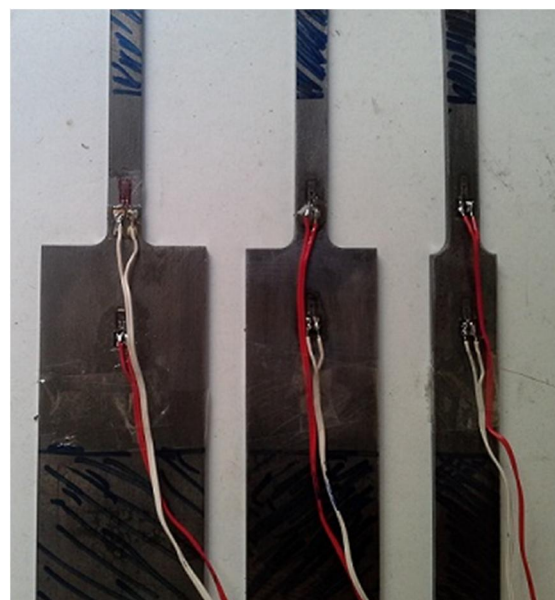


Fig. 3 Two bar with various EFU parameter

شکل 3 مدل دومیله‌ای با مقادیر مختلف پدیده پیامد الاستیک

¹ Strain gauge

² Zwick-Roell

³ Data Logger

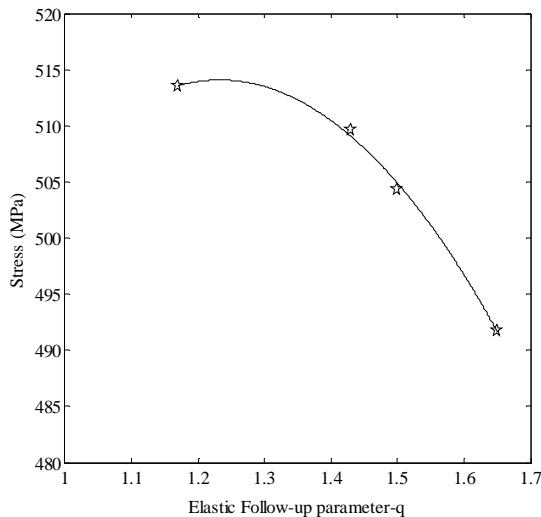


Fig. 6 Variation of stress to EFU parameter

شکل 6 تغییرات تنش نسبت به ضریب شاخص پیامد الاستیک

در شکل 7 نتایج استخراج شده از روش تحلیلی با نتایج تجربی و عددی مقایسه شده است. شکل 7، مقادیر مختلف کرنش‌های غیرخطی میله شماره 2 را نسبت به جابجایی‌های اعمال شده نشان می‌دهد. همانطور که در بخش 4 اشاره شد جهت ارائه روش تحلیلی رفتار غیرالاستیک میله شماره 2 بصورت الاستیک-کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده است. بنابراین شکل منحنی کرنش-جابجایی برای روش تحلیلی و مطابق رابطه 31، بصورت خطی می‌باشد که اندکی با نتایج تجربی و عددی اختلاف دارد. قابل ذکر است این نتایج برای یک سیستم میله‌بندی سری و با مقدار ضریب شاخص $q=1.43$ ، محاسبه شده است. با توجه به شکل 7 مطابقت قابل قبولی بین نتایج روش های تحلیلی، تجربی و عددی وجود دارد. در شکل 8 کرنش‌های غیرالاستیک میله شماره 2 به ازای جابجایی‌های اعمال شده و برای مقادیر مختلف ضریب شاخص پیامد الاستیک و براساس نتایج تجربی، نشان داده شده است. مطابق شکل 8، با کاهش ضریب شاخص پیامد الاستیک و به ازای یک مقدار جابجایی یکسان اعمال شده، مقدار کرنش غیر الاستیک در سیستم میله‌بندی افزایش می‌یابد.

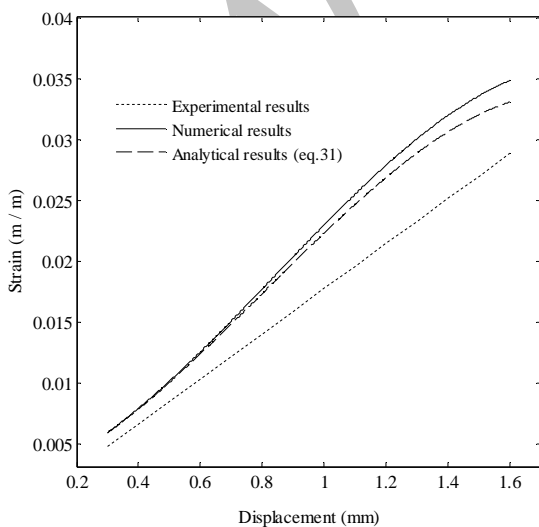


Fig. 7 Variation of non-linear strain to displacement, $q=1.43$

شکل 7 تغییرات کرنش غیرالاستیک نسبت به جابجایی اعمال شده، $q=1.43$

جدول 2، مقدار کرنش غیر الاستیک در سیستم میله‌بندی موازی که تحت بار P قرار داشته باشد و سیستم میله‌بندی ترکیبی که تحت جابجایی δ باشد، به مقدار ضریب شاخص پیامد الاستیک و یا همان نواحی الاستیک اطراف رخداد غیر خطی بستگی دارد. به عبارت دیگر مطابق جدول 2، در این سیستم‌های میله‌بندی در شرایطی که نیرو یا جابجایی خارجی اعمال شده ثابت باشد، با افزایش مقدار ضریب شاخص پیامد الاستیک، مقدار کرنش غیر خطی کاهش پیدا می‌کند. نتیجه مهم دیگر اینکه در سیستم میله‌بندی موازی که تحت بارگذاری جابجایی قرار دارد، تحلیل سوم، ضریب شاخص پیامد الاستیک $q=1$ ، محاسبه گردید و مطابق جدول 2 مقدار کرنش غیرالاستیک به این ضریب وابسته نیست و بنابراین با تغییر ناحیه الاستیک اطراف رخداد غیر خطی در این سیستم میله‌بندی، مقدار کرنش غیرالاستیک موضعی تغییر نمی‌کند. در ادامه این بخش نتایج تحلیل المان محدود توسط نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 5 تغییرات کرنش غیرالاستیک میله شماره 2 نسبت به تغییرات ضریب شاخص پیامد الاستیک و برای حالتی که این میله رفتار الاستیک-پلاستیک داشته باشد و بارگذاری بصورت جابجایی-کنترل باشد، نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش عرض میله 1، که موجب کاهش یافتن ضریب شاخص پیامد الاستیک می‌شود، مقدار کرنش غیرالاستیک در میله شماره 2 افزایش پیدا می‌کند. این رفتار به این دلیل است که با افزایش عرض میله 1 نسبت به میله 2 (که در این میله رفتار غیر الاستیک موضعی وجود دارد)، استحکام میله شماره 2 نسبت به میله 1 کاهش پیدا می‌کند و میله شماره 1 همچون فنری به میله 2 نیرویی اعمال می‌کند که موجب انباشتگی کرنش در این میله می‌گردد. در شکل 6 تغییرات تنش در میله 2 (میله‌ای که رفتار غیر خطی دارد)، نسبت به ضریب شاخص پیامد الاستیک نشان داده شده است. اگر در این حالت بارگذاری بصورت نیرو-کنترل باشد، مقدار ضریب شاخص پیامد الاستیک بینهایت می‌گردد و بنابراین به ازای تغییرات ناحیه الاستیک نسبت به ناحیه پلاستیک، تغییر عرض میله 2، ضریب شاخص پیامد الاستیک تغییری نمی‌کند و با وجود تغییر استحکام ناحیه الاستیک در میله 1 نسبت به استحکام ناحیه غیرالاستیک در میله 2 هیچ گونه تغییری در مقدار تنش و کرنش غیرالاستیک در میله 2 رخ نمی‌دهد.

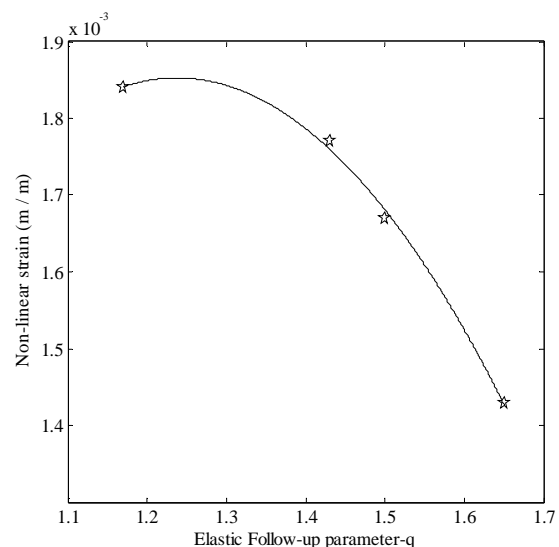


Fig. 5 Variation of non-linear strain to EFU parameter

شکل 5 تغییرات کرنش غیرالاستیک نسبت به ضریب شاخص پیامد الاستیک

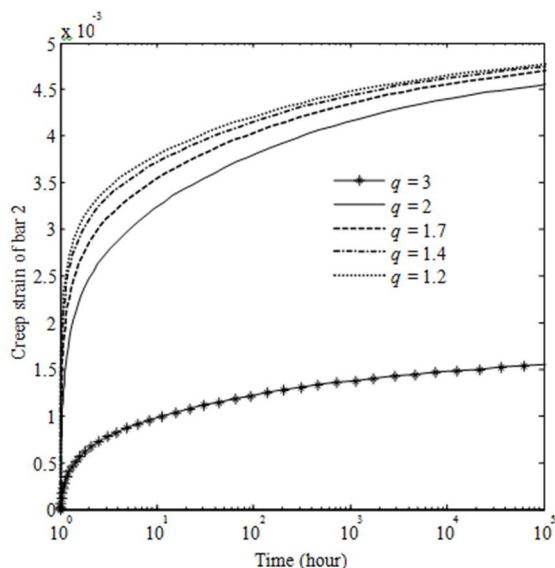


Fig. 9 Variation of creep strain to EFU parameter

شکل 9 تغییرات انباشتگی کرنش خزشی نسبت به ضریب شاخص پیامد الاستیک

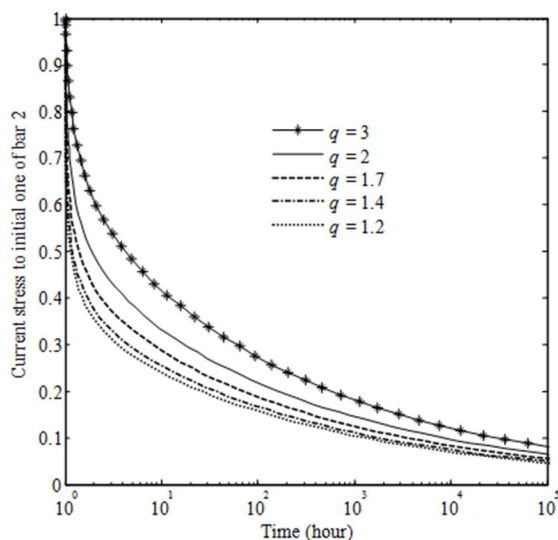


Fig. 10 Relaxation of stress with time

شکل 10 تنش رها سازی شده نسبت به زمان

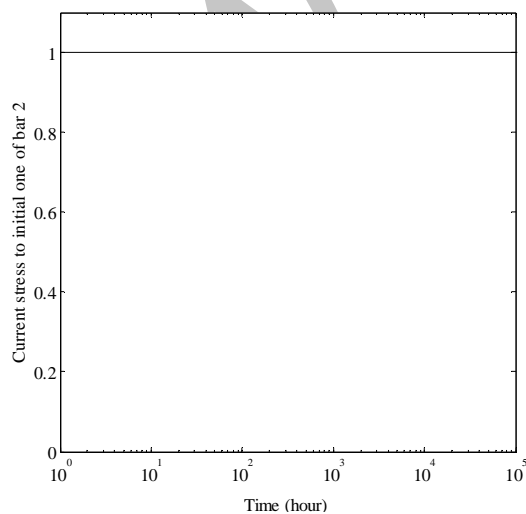


Fig. 11 Relaxation of stress with time

شکل 11 تنش رها سازی شده نسبت به زمان

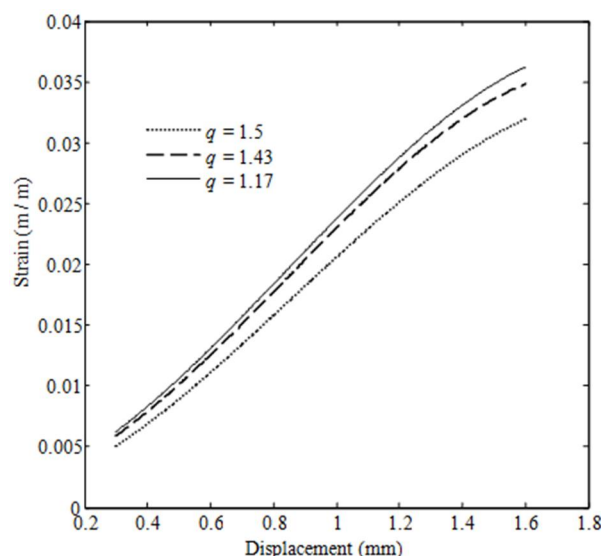


Fig. 8 Variation of stress to displacement and EFU parameter

شکل 8 تغییرات کرنش غیرالاستیک نسبت به جابجایی اعمال شده و ضریب شاخص پیامد الاستیک

در شکل 9 تأثیر ضریب شاخص پیامد الاستیک در کرنش‌های خزشی ایجاد شده ناشی از رها سازی تنش و برای مدت 10^5 ساعت و برای شرایطی که بارگذاری جابجایی-کنترل باشد، نشان داده شده است و در شکل 10 نیز تأثیر ضریب شاخص پیامد الاستیک بر تنش‌های آزاد شده در میله 2 نشان داده شده است.

مانند شرایطی که رخداد غیرخطی رفتارالاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شده بود، در این شرایط نیز با افزایش ضریب شاخص پیامد الاستیک، میزان انباشتگی کرنش‌های خزشی کاهش پیدا می‌کند. این رخداد به این دلیل است که با افزایش عرض ناحیه الاستیک، میله شماره 1، استحکام این ناحیه افزایش پیدا می‌کند و این ناحیه همچون فنری به ناحیه با استحکام کمتر، میله شماره 2، نیروی اضافه‌تری تحمیل می‌کند و موجب افزایش انباشتگی کرنش‌های خزشی می‌گردد.

همچنین این پدیده را می‌توان به این صورت توضیح داد که طی فرایند رها سازی تنش مقدار کرنش کل سیستم ثابت است؛ زیرا جابجایی ثابت به سیستم اعمال می‌گردد. بنابراین در طی فرایند رها سازی تنش رابطه زیر برای کل سیستم میله بندی صادق می‌باشد:

$$\varepsilon_{el}^1 + \varepsilon_p^2 = cte \quad (36)$$

در این شرایط به علت توزیع مجدد کرنش بین مناطق الاستیک و غیرالاستیک، کرنش الاستیک در میله 1 تبدیل به کرنش غیرالاستیک در میله 2 می‌گردد و موجب رخ دادن پدیده انباشتگی کرنش‌های غیر خطی می‌گردد. میزان کرنش انباشته شده به ضریب شاخص پیامد الاستیک بستگی دارد که با افزایش این ضریب، نرخ انباشتگی کرنش‌های خزشی ناشی از پدیده رها سازی تنش کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر در این شرایط میزان کمتری از تنش‌های اولیه آزاد می‌گردد (شکل 10) به این معنا که مناطق الاستیک که استحکام بالاتری نسبت به مناطق غیرالاستیک دارند، همچون فنری نیرو اعمال می‌کند و موجب می‌گردد که تنش کمتری در مناطق غیرالاستیک آزاد گردد.

در شرایطی که بارگذاری به صورت نیرو-کنترل باشد مقدار ضریب شاخص پیامد الاستیک بینهایت می‌شود. بنابراین هیچ تنشی در مناطق غیر

منطقه پلاستیک کاهش می‌یابد.

- مطابق شکل 10، با افزایش ضریب شاخص پیامد الاستیک و به ازای جابجایی اعمال شده ثابت، مقدار تنش رخا شده در منطقه‌ای که پدیده خزش رخ می‌دهد، کاهش پیدا می‌کند.

8- مراجع

- [1] J. T. Boyle, K. Nakamura, The assessment of elastic follow-up in high temperature piping systems-overall survey and theoretical aspects, *International Journal Pressure Vessels Piping*, Vol. 29, No. 3, pp. 167-194, 1987.
- [2] N. Kasahara, Strain concentration at structural discontinuities and its prediction based on characteristics of compliance change in structure, *JSME International Journal, Series A*, Vol. 44, No. 3, pp.354-361, 2001.
- [3] British Energy, Gloucester, UK, R5, Assessment procedure for the high temperature response of structures, Issue 3, pp. 45-48, *British Energy Generation Limited*, 2003.
- [4] E. L. Robinson, The Resistance to relaxation of materials at high temperature, *Transaction of the ASME*, Vol. 61, No. 1, pp. 543-554, 1939.
- [5] E. L. Robinson, Steam-Piping design to minimize creep concentrations, *Transaction of the ASME*, Vol. 77, No. 1, pp. 1147-1162, 1955.
- [6] D. N. Frey, The general tensional relaxation properties of a bolting steel, *Transaction of the ASME*, Vol. 73, pp. 755-760, 1951.
- [7] R. M. Goldhoff, E. E. Zwicky, H. C. Bahr, The effect of simulated elastic follow-up on the relaxation properties of bolting steels, *American Society of Mechanical Engineers Metals Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 1-8, 1967.
- [8] R. A. Ainsworth, Consideration of EFU in the treatment of combined primary and secondary stresses in fracture assessment, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, No. 1, pp. 558-569, 2012.
- [9] J. T. Boyle, A re-Assessment of EFU in high temperature piping, *International Journal Pressure Vessels and Piping*, Vols. 108-109, No. 1, pp. 7-12, 2013.
- [10] S. Hadidi-Moud, D. J. Smith, The influence of elastic follow-up on the integrity of structures, *Journal of ASTM International*, Vol. 7, No. 10, pp. 1-12, 2010.
- [11] C. J. Arid, S. Hadidi-Moud, C. E. Truman, D. J. Smith, Impact of residual stress and elastic follow-up on fracture, *Journal ASTM International*, Vol. 5, No. 8, pp. 1-14, 2008.
- [12] K. H. Lee, Y. J. Kim, D. W. Jerng, R. A. Ainsworth, D. Dean, Creep EFU factors under combined primary and secondary stresses, *International Journal Pressure Vessels and Piping*, Vol. 101, No. 1 pp. 12-22, 2013.
- [13] R. A. Ainsworth, Consideration of EFU in the treatment of combined primary and secondary stresses in fracture assessment, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, No. 1, pp. 558-569, 2012.
- [14] J. T. Boyle, A re-Assessment of EFU in high temperature piping, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vols. 108-109, No. 1, pp. 7-12, 2013.
- [15] M. Shariati, M. M. Rokhi, Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with elliptical cutout subject to axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, No. 11, pp. 1251-1261, 2008.

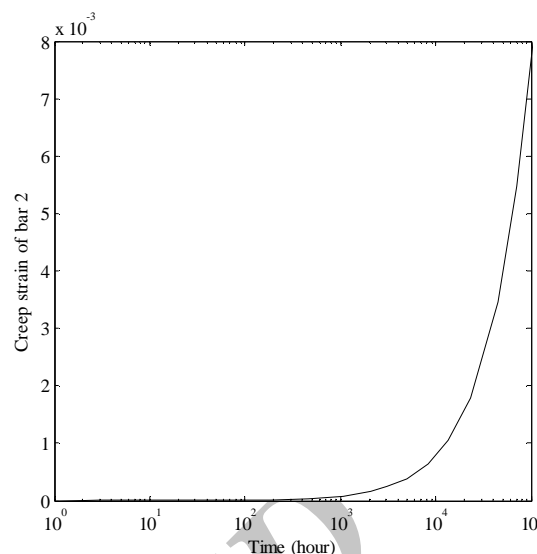


Fig. 12 Variation of creep strain with time

شکل 12 تغییرات انباشتگی کرنش خزشی نسبت به زمان

الاستیک رخا سازی نمی‌گردد. این رخداد در شکل 11 نشان داده شده است. از طرفی چون تغییر مناطق الاستیک تأثیری روی ضریب شاخص پیامد الاستیک ندارد، تغییرات منطقه الاستیک نسبت به منطقه پلاستیک تأثیری روی انباشتگی کرنش خزشی ایجاد شده و تنش رخاسازی و در این مدل بارگذاری، ندارد. (شکل‌های 11 و 12).

7- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایجی که از تحلیل‌های انجام شده در این مقاله به دست آمده است به شرح ذیل می‌باشد.

- معمولاً انباشتگی کرنش‌های غیر الاستیک در مکانیزم‌های بارگذاری تنش-کنترل رخ می‌دهد؛ در صورتی که مطابق رابطه (31)، در شرایطی که پدیده پیامد الاستیک در سیستم وجود داشته باشد، ممکن است در مکانیزم‌های بارگذاری جابجایی-کنترل نیز پدیده انباشتگی کرنش غیرالاستیک وجود داشته باشد.
- مطابق شکل 5 و شکل 8، با افزایش ضریب شاخص پیامد الاستیک و به ازای جابجایی اعمال شده ثابت، کرنش در منطقه پلاستیک کاهش می‌یابد.
- با توجه به شکل 7 مطابقت قابل قبولی بین نتایج روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی وجود دارد
- مطابق شکل 9، با افزایش ضریب شاخص پیامد الاستیک و به ازای جابجایی اعمال شده ثابت، انباشتگی کرنش خزشی در