



## مروری بر روش‌های آزمایش مکانیک شکست بر روی نمونه‌های غیر استاندارد انحنادار جدار نازک

امیررضا شاهانی<sup>1\*</sup>، سید مجید پورحسینی<sup>2</sup>، حمید شوشتار<sup>2</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\*تهران، صندوق پستی 19395-1999، shahani@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 28 خرداد 1393  
پذیرش: 13 مرداد 1393  
ارائه در سایت: 19 مهر 1393  
کلید واژگان:  
قطعات انحنادار جدارنازک  
آزمایش مکانیک شکست  
نمونه غیر استاندارد

### چکیده

قطعات انحنادار جدارنازک در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله صنایع هوایی بطور گسترده به کار می‌روند. بطور خاص در ساخت اجزاء مختلف پره روتور بالگرد از تعداد قابل توجهی از این قطعات استفاده می‌گردد. با گسترش روزافزون کاربرد مکانیک شکست جهت تخمین عمر باقی‌مانده سازه‌ها لازم است که خواص مکانیک شکست این قطعات تعیین شود. به علت ضخامت پایین و انحناء موجود در این اجزاء، استفاده از روش‌های استاندارد آزمایش مکانیک شکست برای آن‌ها میسر نمی‌باشد. بنابراین نیاز به ابداع و توسعه روش‌های جدید آزمایش در این قطعات احساس می‌گردد. تلاش‌های گسترده‌ای از سوی محققین مختلف به منظور غلبه بر این مشکل انجام شده است که منجر به پیدایش تئوری شکست ورق‌های انحنادار، توسعه و طراحی روش‌های جدید برای آزمایش شکست نمونه‌های غیر استاندارد و تکمیل روش‌های تجربی مرسوم مانند روش آزمایش انفجاری گردیده است. در مقاله مروری حاضر، ابتدا تئوری ورق‌های انحنادار به منظور مرتبط ساختن رفتار نمونه‌های انحنادار با نمونه‌های تخت بیان گردیده و بر اساس آن، روش متداول آزمایش انفجاری (BT) که برای آزمایش شکست قطعات انحنادار بسته بکار می‌رود، معرفی می‌شود. سپس مروری بر روش‌های جدید آزمایش با استفاده از نمونه‌های غیراستاندارد شامل آزمایش نمونه فشرده کششی خمیده (CCT)، کشش بارگذاری پینی (PLT)، خمش سه نقطه (TPB)، کشش نمونه حلقوی با دو شیار لبه‌ای (DENT)، آزمایش قالب داخلی مخروطی (ICM) و آزمایش نمونه ایکس شکل انجام شده و در پایان نیز مقایسه‌ای بین روش‌های مذکور صورت می‌گیرد.

## A review on fracture mechanics test methods on non-standard thin-walled curved specimens

Amir Reza Shahani<sup>1\*</sup>, Seyed Majid Pourhosseini<sup>2</sup>, Hamid Shooshtar<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
2- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
\*P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, shahani@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 18 June 2014  
Accepted 04 August 2014  
Available Online 11 October 2014

#### Keywords:

Thin-walled curved structures  
fracture mechanics test  
non-standard specimen

### ABSTRACT

Curved thin-walled structures are extensively used in many industrial applications including aviation industries. These parts have a specific role in the manufacture of helicopter main rotor blade. Fracture mechanics parameters are needed for life estimation and life extension of curved thin-walled structures. Standard methods of fracture mechanics testing are not applicable to these parts because of curvature and thinness of the specimens. So it is necessary for new test methods for these specimens to be investigated and developed. Many attempts have been made by scientists to overcome these problems and some theories and experimental methods such as the theory of fracture of thin-walled curved plates, conventional burst test method and some new non-standard test methods have been initiated and developed. In the present paper, first, the theory of thin-walled curved plates has been briefly presented to link the behavior of curved specimens to the flat ones and the conventional burst test (BT) method has been accordingly introduced. Then, the newly developed non-standard test methods such as compact curved tension (CCT), pin loading tension (PLT), three points bending (TPB), double edge notched tension (DENT), internal conical mandrel (ICM) and X-specimen have been reviewed. Finally, a comparison was made between the mentioned methods to determine the most appropriate one.

### 1- مقدمه

مواد رو به گسترش نهاد. در نیمه دوم قرن بیستم میلادی همگام با گسترش علوم مختلف، بویژه علوم مرتبط با هوافضا، نیاز مبرمی به توسعه روش‌های جدید آزمایش مکانیک شکست بوجود آمد. با پیشرفت بیش از پیش و

با پیدایش و گسترش علم مکانیک شکست پس از جنگ جهانی دوم، توجه به روش‌های مختلف آزمایش به منظور بدست آوردن خواص مکانیک شکست

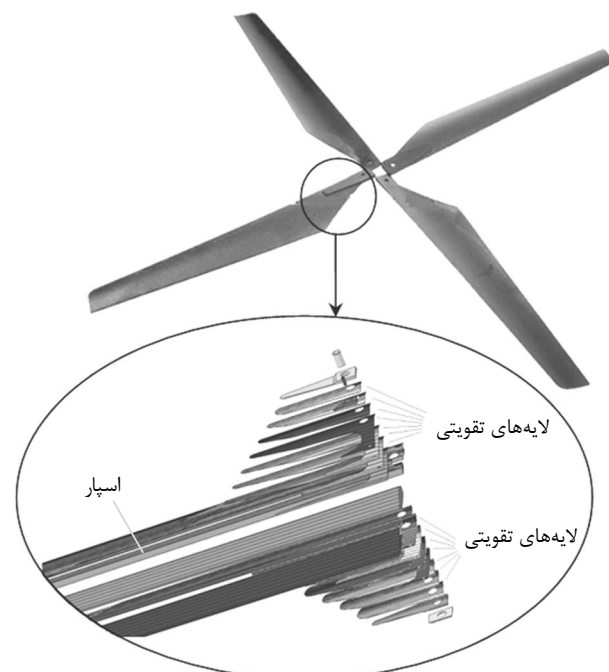
روش، سازه ترک‌دار که به شکل مناسب آب‌بندی گردیده، تحت فشار داخلی تا شکست کامل قرار می‌گیرد. دو روش اخیر بر اساس تئوری ورق‌های انحنادار توسعه یافته‌اند و در آن‌ها به منظور نشان دادن تأثیر انحناء بر روی ضرایب مکانیک شکست، از یک ضریب اصلاح استفاده می‌گردد.

روش سوم، استفاده از روش‌های آزمایش ابداعی مانند آزمایش نمونه فشرده کششی خمیده<sup>3</sup> (CCT)، کشش بارگذاری پینی<sup>4</sup> (PLT)، خمش سه-نقطه<sup>5</sup> (TPB)، کشش نمونه حلقوی با دو شیار لبه‌ای<sup>6</sup> (DENT)، قالب داخلی مخروطی<sup>7</sup> (ICM) و نمونه ایکس‌شکل<sup>8</sup> می‌باشد. در هر یک از روش‌های مذکور، بسته به کاربرد و شرایط هندسی، پارامتر مناسب جهت تعیین خواص مکانیک شکست سازه به کار برده می‌شود که بطور مثال بسته به اندازه ناحیه پلاستیک رأس ترک، می‌تواند ضریب شدت تنش و یا انتگرال  $I$  باشد. به علت ضخامت بسیار کم، معمولاً از انتگرال  $I$  استفاده می‌شود و به این منظور دستیابی به نمودار مقاومت ماده بر حسب رشد ترک بسیار دارای اهمیت می‌باشد.

در ادامه، مروری بر فرضیات، اصول کلی و برخی جزئیات مربوط به هر یک از روش‌های فوق ارائه می‌گردد.

## 2- تئوری ورق‌های انحنادار

همان‌طور که اشاره شد از مدت‌ها قبل محققین به دنبال راهی برای تعیین خواص شکست اجسام انحنادار جدارنازک بوده‌اند. لذا از دهه 70 میلادی محققین بسیاری تلاش کرده‌اند تا به نوعی از خواص بدست آمده از آزمایش ورق‌های تخت به عنوان معیاری برای واماندگی و شکست قطعات انحنادار جدارنازک استفاده نمایند. سعی کلی بر این اصل استوار بوده است که با انجام



شکل 1 نمای انفجاری پره روتور یک بالگرد

روزافزون صنایع مختلف هوایی و فضایی و لزوم کاهش وزن و ابعاد سازه‌های مورد استفاده، کاربرد قطعات با هندسه و ضخامت‌های مختلف در این سازه‌ها گسترش یافت. در این بین، قطعات انحنادار جدارنازک کاربرد گسترده‌ای از جمله در ساخت بدنه هواپیماها، هلیکوپترها و شاتل‌های فضایی، اجزاء پره-های انواع روتورها و همچنین مخازن تحت فشار جدارنازک پیدا کردند.

شکل 1 نمای انفجاری بخشی از پره روتور یک بالگرد را نشان می‌دهد. جزء اصلی تشکیل دهنده پره که نقش اساسی را در تحمل بارهای وارد بر آن ایفا می‌کند اسپار<sup>1</sup> نام دارد که در سرتاسر طول پره امتداد دارد. اما همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پره بالگرد در قسمت ریشه (یعنی ناحیه ای که پره به محور روتور متصل می‌شود) متشکل از اجزاء و لایه‌های متعدد دیگری علاوه بر اسپار نیز هست که بمنظور تقویت استحکام این قسمت طراحی شده و بر روی یکدیگر و مجموعاً بر روی اسپار سوار می‌شوند. اکثر این اجزاء از ورق‌های نازک ساخته شده و هندسه‌ای انحنادار دارند.

روش‌های آزمایش مکانیک شکست برای تعیین خواص شکست مواد نظیر چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای الاستیک خطی، چقرمگی شکست نرم و پارامترهای رشد ترک خستگی در طول دهه‌های گذشته استاندارد شده و بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله شاهانی و همکاران در پژوهش‌های تجربی متعددی، این روش‌های استاندارد را بمنظور تعیین خواص شکست و رشد ترک ورق‌های فولادی و آلومینیومی و بررسی اثر پارامترهای هندسی و بارگذاری بر روی خواص بدست آمده مورد استفاده قرار داده‌اند [5-1]. در این پژوهش‌ها، پارامترهای چقرمگی شکست ماده [2,1] بر اساس استاندارد ASTM E1820 [6] و خواص رشد ترک خستگی [3-5] بر اساس استاندارد ASTM E647 [7] استخراج گردیده‌اند. خواص بدست آمده از این آزمایش‌ها سپس در پیش‌بینی رفتار رشد ترک و تخمین عمر باقی‌مانده سازه‌ها و قطعات صنعتی بکار گرفته شده است [9,8]. با این وجود، استانداردهای تدوین شده برای این آزمایش‌ها الزامات خاصی را برای هندسه نمونه‌های آزمایش در نظر می‌گیرند. بطور خاص الزاماتی برای حداقل ضخامت نمونه در آن‌ها وجود دارد. همچنین روند تغییر پارامترهای مکانیک شکست در ضخامت‌های کم - حتی در صورت امکان استخراج آن‌ها - نامشخص و بحث برانگیز می‌باشد [10,2]. علاوه بر این با کاهش ضخامت نمونه، پیچیدگی‌هایی در روند انجام آزمایش نیز ایجاد می‌شود. از جمله برای جلوگیری از کمانش نمونه گاهی نیاز به نصب تجهیزات ضد کمانش در حین آزمایش وجود دارد [2,1]. وجود انحناء در نمونه‌های آزمایش، پیچیدگی‌های موجود را دوچندان می‌کند. از جمله می‌توان به تأثیر انحناء در پیدایش موده‌های دوم و سوم شکست در اثر خمش ایجاد شده در قطعه اشاره نمود. در مجموع با توجه به وجود هر دو عامل انحناء و ضخامت پایین در قطعات انحنادار جدارنازک که الزامات مربوط به نمونه‌های استاندارد مکانیک شکست نظیر نمونه فشرده کششی و نمونه خمشی را برآورده نمی‌کند، نیاز به روش‌های جدیدتری جهت بدست آوردن خواص شکست آن‌ها احساس می‌گردد. پژوهش‌های انجام شده توسط محققین مختلف به منظور یافتن راه حلی برای این مسأله در سه دسته کلی قابل طبقه‌بندی است.

روش اول مبتنی بر آزمایش نمونه‌های بریده شده و تخت شده از قطعه اصلی و مرتبط ساختن نتایج مربوط به قطعه تخت شده به قطعه انحنادار می‌باشد. روش دوم نیز که مختص قطعات انحنادار بسته (مخازن و لوله‌های مدور) می‌باشد، آزمایش نمونه کامل<sup>2</sup> مخزن با روش انفجاری است. در این

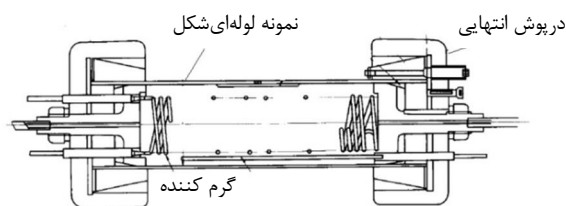
3 - Curved Compact Tension  
4 - Pin Loading Tension  
5 - Three Points Bending  
6 - Double Edge Notched Tension  
7 - Internal Conical Mandrel  
8 - X-Specimen

1 - Spar  
2 - Full scale

تخت کردن ممکن است خواص ماده بخصوص ویژگی‌های ریزساختاری آن را تحت تأثیر قرار دهد. انجام هر گونه کار مکانیکی نظیر برشکاری، ورقکاری و شکل‌دهی فلزات بر روی خواص مکانیکی مواد تأثیر می‌گذارد. همچنین این فرآیند منجر به ایجاد تنش‌های پسماند یا تغییر توزیع قبلی آن‌ها در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک لازم برای شکل‌دهی قطعه می‌گردد. علاوه بر این‌ها در برخی مواد ترد اساساً امکان تخت کردن قطعه وجود ندارد. این موارد، انگیزه توسعه نمونه‌های آزمایش با هندسه غیرمسطح را به وجود آورده است. در مواردی که دقت نتایج بسیار مهم می‌باشد، سعی می‌گردد تا از انجام هر گونه عملیات اضافی در آماده کردن نمونه جهت آزمایش جلوگیری گردد و در صورت امکان قطعه در مقیاس اصلی مورد آزمایش قرار گیرد [17].

از جمله روش‌های آزمایش کل نمونه که البته اختصاص به قطعات اتحادار بسته مانند مخازن و لوله‌ها دارد، روش آزمایش انفجاری می‌باشد که از اواخر دهه شصت میلادی گسترش یافته است [18]. در روش آزمایش انفجاری، مخزن استوانه‌ای تحت فشار داخلی قرار گرفته و از حداکثر فشار قابل تحمل توسط آن بمنظور به دست آوردن خواص مکانیک شکست سازه - استفاده می‌شود. قبل از اعمال فشار، به منظور ایجاد تمرکز تنش و ایجاد جهت مناسب رشد ترک، باید بر روی قطعه با یکی از روش‌های ایجاد شیار، ترک راه به در<sup>1</sup> و ترک قسمتی راه به در، تمرکز تنش یا پیش ترک ایجاد نمود. شیار معمولاً به وسیله تخلیه بار الکتریکی (وایر کات) ایجاد می‌گردد. برای تیز کردن انتهای این شیار و تبدیل آن به ترک، از پدیده تیزشدگی خستگی<sup>2</sup> استفاده می‌شود. در مرحله بعد، این ترک‌ها جهت جلوگیری از نشت مواد موجود در مخزن توسط مواد غیر قابل اشتعال مانند فویل‌های استیل با ضخامت 0/1 میلی‌متر آب‌بندی می‌شود. سپس این استوانه توسط یک پوسته محافظ از پلاستیک‌هایی با ضخامت در حد میلی‌متر همانند شکل 2 پوشانده می‌شود. نقش این پوسته جلوگیری از آسیب به دستگاه و اپراتور می‌باشد [19].

بعد از آماده‌سازی نمونه، قطعه باید توسط دستگاه‌های استاندارد آزمایش انفجاری مورد آزمایش قرار گیرد. این دستگاه دارای وسایل کنترلی دقیق به همراه پمپ تأمین فشار می‌باشد. با ایجاد فشار سیال درون مخزن، کرنش توسط کرنش‌سنج‌هایی که بر روی نمونه نصب می‌گردد اندازه‌گیری می‌شود. سیال به کار رفته درون مخزن می‌تواند آب، هوا، انواع روغن و محصولات ارگانیک غیر قابل اشتعال باشد. نوع سیال به کار رفته در مخزن تأثیری بر نتایج آزمایش ندارد و تنها بسته به فشار کاری، دما و جنس مخزن می‌تواند متفاوت باشد. در نهایت نمودار فشار بر حسب کرنش به عنوان خروجی از دستگاه استخراج می‌گردد. رشد ترک بر روی نمونه نیز با استفاده از کرنش-سنج یا به روش افت پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. بعد از انجام آزمایش و بدست آوردن نمودار فشار بر حسب کرنش باید خواص مکانیک شکست ماده



شکل 2 نمونه آزمایش انفجاری در داخل دستگاه [19]

1 - Through crack  
2 - Fatigue crack sharpening

جدول 1 ضرایب اصلاح و معیارهای واماندگی متناظر ارائه شده توسط محققین

محققین	$\phi$	$M$	معیار واماندگی
پیتر و کوهن	---	$\left[1 + 9.2 \frac{a}{R}\right]$	$\sigma_{H}^* = \sigma^* M^{-1}$
فولیاس	---	$\left[1 + 1.61 \frac{a^2 R}{R^2 t}\right]^{\frac{1}{2}}$	$\sigma_{H}^* = \sigma^* M^{-1}$
اندرسون و سالیوان	$\left[1 + \frac{(M\sigma_{H}^*)^2}{2\sigma_Y^2}\right]$	$\left[1 + 1.61 \frac{a^2 R}{R^2 t}\right]^{\frac{1}{2}}$	$\sigma_{H}^* = \frac{K_c}{(\pi a \phi)^{1/2}} M^{-1}$
کیهارا و همکاران	---	$\left[1 + 1.61 \frac{a^2 R}{R^2 t}\right]^{\frac{1}{2}}$	$\sigma_{H}^* = \sigma^* M^{-1}$
کریچلو و ولز	---	$\left[1 + \frac{a^2}{Rt}\right]^{\frac{1}{2}}$	$\sigma_{H}^* = \sigma^* M^{-1}$
دافی و همکاران	$\sec \left[ \frac{\pi \sigma_{H}^*}{\sigma_Y + \sigma_U} \right]$	$\left[1 + 1.61 \frac{a^2 R}{R^2 t}\right]^{\frac{1}{2}}$	$\sigma_{H}^* = \frac{K_c}{(\pi a \phi)^{1/2}} M^{-1}$

آزمایش بر روی ورق تخت و اعمال یک ضریب اصلاح متناسب با هندسه و بارگذاری، به خواص سازه اتحادار جدار نازک دست یابند.

یکی از برجسته‌ترین محققین در این زمینه ای اس فولیاس است که پایه‌گذار روش یاد شده نیز می‌باشد [11,12]. او مدل خود را مشابه گریفیت بر مبنای قانون اول ترمودینامیک بنا نهاد. فرضیه او بدین قرار است که کل انرژی یک سیستم ترک‌دار که تحت بارگذاری معین قرار گرفته است، در طول رشد ترک به اندازه بی‌نهایت کوچک، ثابت باقی می‌ماند.

هدف کلی در این روش، معادل سازی ورق اتحادار با یک ورق تخت می‌باشد [13]. روش کار بدین صورت است که ابتدا آزمایش بر روی نمونه تخت صورت می‌گیرد و چقرمگی شکست نمونه تخت بدست می‌آید. در مرحله بعد سعی می‌شود تنش واقعی در ورق اتحادار با یک تنش متناظر در ورق تخت معادل شود. بدین معنا که با ضرب کردن ضریبی به عنوان ضریب تصحیح (بزرگنمایی)  $M_F$ ، تنش معادل در نمونه تخت بدست می‌آید. تنش معادل به صورت  $\sigma^* = \sigma_{H}^* M_F$  خواهد بود که  $\sigma_{H}^*$  تنش در نمونه اتحادار می‌باشد. در این حالت معیار واماندگی، برابری ضریب شدت تنش محاسبه شده از رابطه (1) با چقرمگی شکست اندازه‌گیری شده برای نمونه تخت می‌باشد:

$$K = \sigma^* \sqrt{\pi a \phi} \quad (1)$$

که در آن  $a$  طول ترک است. با جاگذاری تنش اصلاح شده در رابطه (1)، ضریب شدت تنش معادل ورق اتحادار مطابق رابطه (2) بدست می‌آید [14]:

$$K = M_F \sigma_{H}^* \sqrt{\pi a \phi} \quad (2)$$

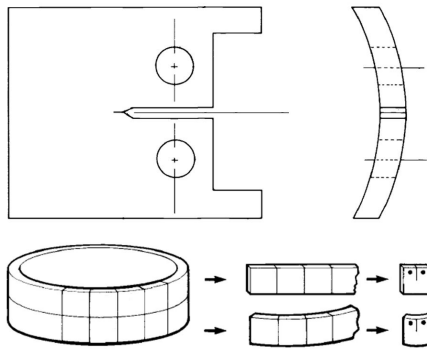
در روابط فوق،  $\phi$  ضریب اصلاح پلاستیک است که به دلیل ضخامت پایین ورق منظور می‌گردد. به عنوان نمونه با استفاده از رابطه داگدیل برای اندازه ناحیه پلاستیک، ضریب شدت تنش بصورت رابطه (3) خواهد بود [15]:

$$K = M_F \sigma_{H}^* \sqrt{\pi a \sec \left( \frac{\pi \sigma_{H}^*}{2 \sigma_{ys}} \right)} \quad (3)$$

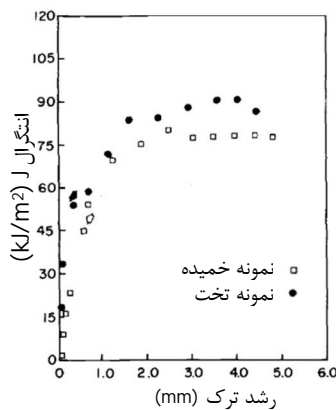
در عبارت فوق  $\sigma_{ys}$  تنش تسلیم ماده است. ضرایب بزرگنمایی و اصلاح پلاستیک پیشنهاد شده توسط محققین مختلف همراه با معیارهای واماندگی متناظر در جدول 1 ارائه شده است [16]. در این روابط  $t$  و  $R$  به ترتیب معرف ضخامت و شعاع انحنا قطعه می‌باشند.

### 3- روش آزمایش انفجاری (BT)

تهیه کردن نمونه تخت از قطعه اتحادار با چالش‌هایی روبرو است. فرآیند



شکل 3 هندسه نمونه خمیده و روند آماده‌سازی آن [23]



شکل 4 تطابق نتایج آزمایش نمونه‌های تخت و خمیده [23]

#### 4-2- روش آزمایش کشش نمونه حلقوی شیاردار

روش آزمایش کشش نمونه حلقوی شیاردار که توسط برچ و هوفنر [24] ارائه شده است، برای آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای کوچک مناسب است. اساس این روش استفاده از وسایل جانبی به منظور تغییر در هندسه نمونه است. هدف از این تغییرات اعمال شرایطی بر روی نمونه می‌باشد تا نمونه در چارچوب استانداردهای متداول صدق نماید.

نمونه آزمایش می‌تواند در اشکال مختلفی نظیر نمونه کششی یا خمشی باشد. نمونه خمشی از نوع تک شیار لبه‌ای<sup>1</sup> می‌باشد. از انواع مختلف نمونه‌های کششی نیز می‌توان به نمونه‌های تک شیاره و دو شیاره<sup>2</sup> و نوع شیار مرکزی<sup>3</sup> اشاره نمود. در شکل 5 برخی از این نمونه‌ها با شکل‌های مختلف شیار نشان داده شده است. در این شکل، قسمت (الف) نمونه کششی با دو شیار لبه‌ای، قسمت (ب) نمونه با حفره مرکزی، قسمت (ج) نمونه با حفره مرکزی بلند و قسمت (د) نمونه با شیار مرکزی کششی را نشان می‌دهد. پیش ترک موجود در این نمونه‌ها از طریق رشد ترک خستگی ایجاد می‌شود. این روش آزمایش از نوع تک نمونه بوده و به یک دستگاه آزمایش کشش احتیاج دارد. طول ترک در طول آزمایش نمونه بصورت نوری و توسط یک دوربین دیجیتال در زمان‌های مشخص ثبت می‌شود.

این آزمایش به یک نوع فیکسچر خاص به منظور مهار و اعمال نیرو به قطعه نیاز دارد. این فیکسچر در شکل 6 نشان داده شده است. انتخاب جنس این فیکسچرها از اهمیت بالایی برخوردار است. جنس این فیکسچرها باید از مواد سختی انتخاب شوند که تا حد ممکن دچار تغییر شکل نشوند و تقریباً

بدست آورده شود.

در یک مخزن استوانه‌ای جدار نازک، به دلیل دو برابر بودن تنش محیطی نسبت به تنش محوری، وضعیت ترک در راستای طولی بحرانی‌تر است. در این حالت تنش محیطی باعث باز شدن ترک در مود یک می‌شود. در استوانه جدار نازک این تنش به صورت  $\sigma_H = PR/t$  تعریف می‌گردد که در عبارت فوق شعاع استوانه،  $t$  ضخامت استوانه و  $P$  فشار داخلی می‌باشد. با جاگذاری این تنش در روابط تئوری ورق‌های اجنادار (بخش قبل) و استفاده از ضریب تصحیح فولیاس، ضریب شدت تنش برای یک ترک محوری به طول  $2a$  به صورت رابطه 4 بدست می‌آید [20]:

$$K_I = \frac{PR}{t} \left[ 1 + 1.61 \left( \frac{a^2}{Rt} \right) \pi a \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

از آن جا که مخازن حالت خاصی از ورق‌های اجنادار هستند، هر یک از روابط ارائه شده در جدول 1 در کنار روش انفجاری می‌توانند جهت محاسبه چقرمگی شکست بکار گرفته شوند. از میان موارد بیان شده در جدول، مورد آخر یعنی مورد دافی و همکاران بهترین تطابق را با تجربه دارد زیرا هم اثر تئوری فولیاس و هم اثر اصلاح پلاستیک را در بر دارد. همچنین این مورد با آزمایش انفجاری مورد بررسی و صحت آن مورد تایید قرار گرفته است.

با وجود این، باید توجه داشت که تئوری یاد شده در مورد موادی که چقرمگی بالا و یا نسبت شعاع به ضخامت بالایی دارند کارا نبوده و دارای خطا می‌باشد. در این موارد ابعاد نمونه باید بسیار بزرگ باشد که مقدور نیست. یعنی ناحیه پلاستیک نباید بیش از حد بزرگ باشد. مسئله بعدی در ایجاد محدودیت نسبت قطر به ضخامت می‌باشد.

#### 4- روش‌های جدید آزمایش نمونه‌های غیر استاندارد

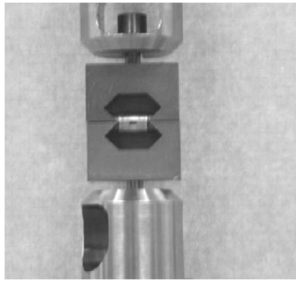
روش آزمایش انفجاری علی‌رغم مزایایی که دارد روشی پرهزینه است، مقدار قابل توجهی از ماده در آن مورد نیاز است و بعلاوه واضح است که در مورد قطعاتی که دچار شکست شده‌اند یا اساساً هندسه بسته‌ای ندارند، قابل استفاده نیست. روش‌های مبتنی بر آزمایش نمونه‌های کوچک در پاسخ به همین کاستی‌ها توسعه یافته‌اند.

#### 4-1- روش آزمایش نمونه فشرده کششی خمیده

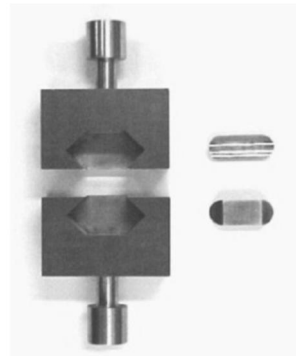
آزمایش چقرمگی شکست بر روی نمونه‌های خمیده توسط محققین مختلفی پیشنهاد شده است [21-23]. هندسه نمونه‌های فشرده کششی خمیده، شکل اصلاح شده‌ای از نمونه CT استاندارد ASTM است که ابعاد درون صفحه آن متناسب با نمونه استاندارد بوده اما انحناى قطعه اصلی را حفظ می‌کند. شکل 3 هندسه این نمونه و نحوه تهیه آن را نشان می‌دهد. روند انجام آزمایش بر اساس استاندارد ASTM E813 بوده و منحنی  $J-R$  با استفاده از روش تک‌نمونه استخراج می‌گردد. در محاسبه پارامتر چقرمگی شکست، محققین روابط ورق تخت را مورد استفاده قرار داده‌اند [23].

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، مقایسه نتایج آزمایش نمونه خمیده با نمونه تخت همخوانی مناسبی دارد. این نشان می‌دهد که استفاده از روابط مربوط به نمونه‌های تخت خطای قابل توجهی در محاسبات وارد نمی‌کند (حداکثر 10%). این نتیجه با توجه به اندازه کوچک و انحناى کم نمونه مورد انتظار است. اما نتایج فوق تنها در ضخامت‌های بالا و انحناى کم کاربرد دارد و نمی‌توان از این روش در ورق‌های نازک استفاده نمود.

1 - Single edge notched  
2 - Double edge notched  
3 - Center notched



شکل 6 نمونه حلقوی شیاردار به همراه گیره و فیکسچر [24]



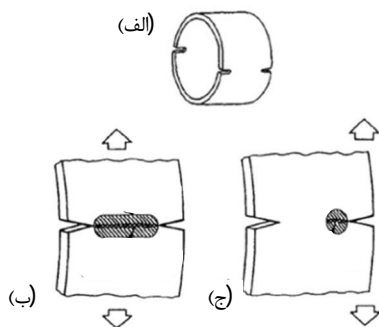
شکل 7 قطعات نیم‌استوانه‌ای برای مهار نمونه [24]

### 3-4- روش آزمایش کشش بارگذاری پینی

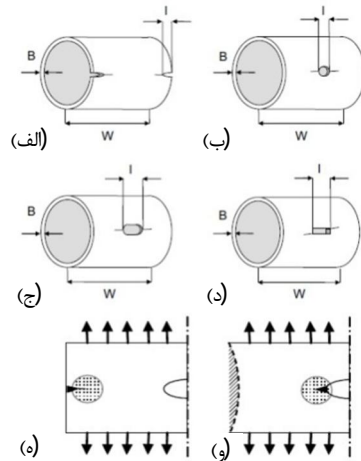
در این روش که اولین بار توسط گریگوری اف و همکاران [25] ارائه گردید، مود بارگذاری شبیه به بارگذاری کششی حول یک پین در نمونه فشرده کششی استاندارد مکانیک شکست می‌باشد. از این رو این روش آزمایش را روش آزمایش کشش بارگذاری پینی می‌نامند.

شکل 8 شماتیک نمونه پیشنهادی این محقق را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست این نمونه دارای دو شیار در ابتدا و انتها است که ابعاد متفاوتی دارند. بارگذاری در یک سمت نمونه انجام می‌گیرد، اما شیار در دو سمت وجود دارد که علت آن را می‌توان ایجاد تقارن در هندسه بیان نمود [26].

روش آزمایش کشش بارگذاری پینی مشکلات ایجاد شده در حالت بارگذاری کشش محیطی را حذف می‌کند. در شکل 8 قسمت (الف) یک استوانه جدار نازک تحت کشش تک‌محوره محیطی قرار گرفته است. همان‌طور که در قسمت (ب) از همین شکل دیده می‌شود، یک نوار نازک میانی از قطعه دچار تغییرشکل پلاستیک گردیده است. تغییرات پلاستیک ذخیره شده در سیستم بارگذاری شده، در مواد با نرمی پایین باعث ایجاد تغییرات لحظه‌ای و شکست



شکل 8 رشد ناحیه پلاستیک در دو حالت بارگذاری [27]

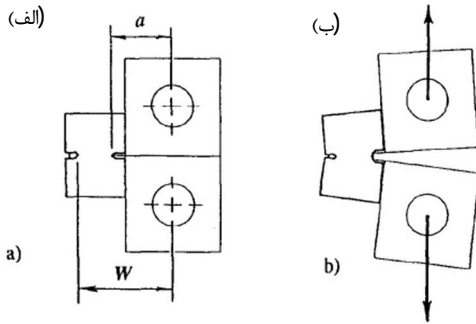


شکل 5 انواع نمونه‌های حلقوی دارای شیار [24]

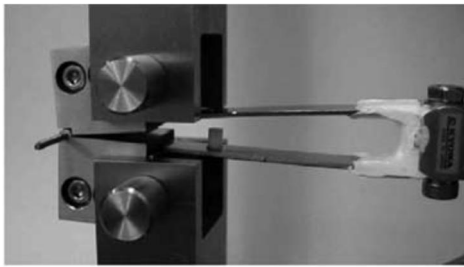
تمام نیرو به قطعه منتقل شود. قرارگیری قطعه در فیکسچر و مهار آن نیز بسیار مهم می‌باشد، زیرا اگر نمونه به صورت محوری و دقیق در فیکسچر قرار نگیرد، این خطا باعث ایجاد نیروی خمشی در نمونه می‌گردد و مودهای دو و سه شکست در قطعه به وجود می‌آید.

نمونه شیاردار تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرد تا رشد ترک خستگی شروع شود. مقدار این بارگذاری خستگی باید در محدوده الاستیک (تا 30 درصد تنش تسلیم) باشد. در نمونه‌های دارای شیار مرکزی، رفتار رشد ترک وابستگی شدید به نوع نمونه دارد. اگر نمونه تحت پیش‌بار خستگی قرار داده شود و دامنه بار خستگی در محدوده الاستیک باشد، ترک خستگی مستقل از شیار مرکزی، همیشه از خارجی ترین سطح نمونه شروع به رشد می‌کند (قسمت (ه) از شکل 5). اعمال بار کششی پس از بارگذاری خستگی باعث رشد ترک در کناره‌ها و فروریزش نمونه از این ناحیه (علیرغم وجود شیار در مرکز نمونه می‌شود. اما در صورت عدم اعمال پیش بار خستگی ترک از مکانی که بیشترین تمرکز تنش را دارد (یعنی همان شیار مرکزی) شروع به رشد می‌کند. در حقیقت رژیم افزایش تنش از کناره‌ها به مرکز نمونه شیفت می‌کند. ناحیه بسیار کوچک تسلیم شده در کناره در نمونه شیاردار مرکزی این موضوع را تأیید می‌کند (قسمت (و) از شکل 5). علاوه بر این بطور کلی نمونه دارای شیار مرکزی رفتار متقارنی از خود نشان نمی‌دهد و در نتیجه جهت استفاده در این نوع آزمایش مناسب نمی‌باشد [24]. نتیجه این قسمت را می‌توان در انتخاب نمونه دارای دو شیار لبه‌ای خلاصه نمود.

مونتاز قطعه درون فیکسچر مطابق شکل 7 نیاز به قطعات مخصوص نیم-استوانه‌ای شکل دارد که بین نمونه و فیکسچر قرار می‌گیرد. به علت عدم تقارن‌های احتمالی ناشی از ساخت و بارگذاری، حرکت‌های کوچکی در ناحیه تماس بین این قطعه و فیکسچر ایجاد می‌گردد. این امر باعث هدر رفتن انرژی به صورت اصطکاک می‌شود. از آنجا که در این روش از انتگرال  $I$  استفاده می‌شود و این پارامتر برابر انرژی مورد نیاز در طول رشد ترک و ایجاد سطوح عاری از تنش می‌باشد، این مقدار انرژی اصطکاک باید در محاسبات وارد گردد. بدین منظور نیروی عمود بر سطح و ضریب اصطکاک مورد نیاز می‌باشد. نیروی عمودی توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. ضریب اصطکاک نیز وابستگی شدیدی به صافی سطح و محیط کاربرد قطعه دارد. به عنوان مثال محیط‌های خورنده بشدت بر این ضریب اثر می‌گذارند. روش محاسبه انتگرال  $I$  در این روش در ادامه خواهد آمد.



شکل 11 نمونه مونتاژ شده بر روی فیکسچر [27]



شکل 12 استفاده از کلیپ گیج برای محاسبه طول ترک [28]

اکثر تغییر شکل در محل شیبار جلویی اتفاق می‌افتد. به دست آوردن نمودار مقاومت ماده به رشد ترک از جمله‌ی مهمترین نتایج این آزمایش می‌باشد. به این منظور طول ترک باید در زمان‌های مختلف و در سطوح مختلف نیرو اندازه‌گیری شود. طول ترک با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله با نصب کلیپ گیج در دهانه نمونه (شکل 12)، با استفاده از روش افت پتانسیل و یا با استفاده از دوربین‌های دیجیتال پر سرعت اندازه‌گیری می‌شود. ابتدا باز شدگی دهانه ترک اندازه‌گیری شده و سپس این مقدار از طریق رابطه کالیبراسیون که از شبیه سازی عددی بدست می‌آید، به اندازه ترک مربوط می‌گردد.

#### 4-4- محاسبه انتگرال $J$ در دو روش آزمایش کشش بارگذاری پینی و کشش نمونه شیبار دار دو طرفه

سعی دو روش بیان شده در بالا بر این می‌باشد تا به نوعی بتوانند شرایط را اصلاح نموده و امکان استفاده از استانداردهای موجود را فراهم نمایند. در این روش‌ها از استاندارد ASTM E1820 استفاده می‌گردد. به این صورت که ابتدا انتگرال  $J$  را به صورت رابطه 5 در نظر می‌گیرند:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (5)$$

که در آن  $J_{el}$  انتگرال در حوزه الاستیک و  $J_{pl}$  انتگرال در حوزه پلاستیک می‌باشد. این دو قسمت به صورت گرافیکی از مساحت زیر منحنی بار - جابجایی، مطابق شکل 13 قابل تعیین می‌باشند.

در یک نقطه مشخص از نمودار فوق  $J_{el}$  مطابق رابطه 6 تعریف می‌گردد:

$$J_{el} = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (6)$$

که در آن  $K$  ضریب شدت تنش بوده و از رابطه (7) محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{P}{BW^{0.5}} F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (7)$$

قطعه باوجود جابجایی‌های کم در بارگذاری‌های شدید می‌شود [27]. از جمله راه حل‌های رفع این مشکل، انتقال خط اعمال نیرو به کناره‌های نمونه می‌باشد. در این حالت، تغییرات ماده و شکست تنها به محدوده خاصی از نمونه منحصر می‌شود و بدین ترتیب نیرو و تغییر شکل الاستیک ذخیره شده در سیستم بارگذاری کاهش می‌یابد و لذا از شکست ناگهانی قطعه جلوگیری می‌شود. بنابراین روش آزمایش کشش بارگذاری دارای سه مزیت نسبت به کشش محوری می‌باشد:

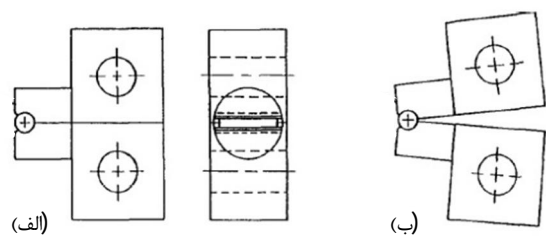
(الف) ناحیه بین دو شیبار در کشش محوری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و در روش آزمایش کشش بارگذاری پینی، به علت شکل نمونه این اتفاق نمی‌افتد و انرژی صرف رشد ترک می‌شود تا ایجاد ناحیه پلاستیک.

(ب) احتیاج به نیروی کمتری جهت رشد ترک می‌باشد.

(ج) از شکست ناگهانی نمونه جلوگیری می‌شود.

به منظور بارگذاری نمونه، فیکسچری مخصوص احتیاج می‌باشد. این فیکسچر باید دارای دو قسمت چنگال شکل باشد که درون قطعه قرار گیرد و حرکت آن را مهار نماید. این قطعه استوانه‌ای شکل باید دارای شعاع مناسبی باشد تا با حداقل لقی درون نمونه قرار بگیرد. شماتیک این فیکسچر را در شکل 9 می‌توان مشاهده نمود. این فیکسچرها از طریق پین‌هایی که در آن قرار داده می‌شود، مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. همچنین همان‌طور که در قسمت (ب) شکل دیده می‌شود، در انتهای فیکسچر نیز باید پینی قرار گیرد تا چرخش نمونه را کنترل نماید.

چرخش نمونه در این روش همانند چرخش نمونه‌های فشرده کششی است. با این تفاوت که در این روش محل و محور چرخش با تغییر بار عوض نمی‌شود. یک نمونه فیکسچر ساخته شده در شکل 10 مشاهده می‌گردد. نمونه و فیکسچر باید مطابق شکل 11 به صورت دقیق و محکم مونتاژ شوند. در این شکل  $W$  فاصله بین خط اعمال نیرو و محور چرخش و  $a$  فاصله محل اعمال نیرو و انتهای شیبار می‌باشد. نکته مهم در هنگام مونتاژ کردن، تماس هر چهار شیبار به صورت محوری با فیکسچر می‌باشد. محور چرخش نیز باید از انتهای شیبار عقب، که بار به آن اعمال نمی‌گردد، عبور نماید. به این ترتیب



شکل 9 تصویر فیکسچر آزمایش کشش بارگذاری پینی [27]



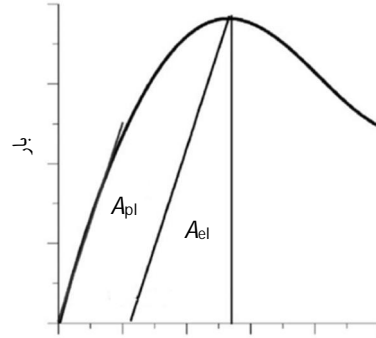
شکل 10 نمونه فیکسچر واقعی [25]



می‌گردد و نمودار بار بر حسب جابجایی نقطه اثر نیرو رسم می‌شود. جابجایی در این روش از طریق دوربین دیجیتال و یافت پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. در این روش آزمایش، نمونه باید به صورت عمودی و از درازا درون فیکسچر مخصوص خود قرار بگیرد. این نمونه باید دارای شیار طولی جهت ایجاد تمرکز تنش و جهت دهی به راستای رشد ترک باشد (شکل 15). همچنین این نمونه باید به صورت نیمه استوانه به صورت دقیق بریده شود تا اثر مودهای دو و سه شکست در آن کاهش یابد [28].

فیکسچر مناسب برای این روش در شکل 16 مشاهده می‌شود. در این روش از دو پوسته غلاف شکل که دارای شیار نیم استوانه‌ای می‌باشد، جهت تعبیه نمونه استفاده می‌گردد. همچنین این فیکسچر دارای دو عدد پیچ به منظور سفت کردن و اعمال پیش بار بر روی نمونه است. اما کارکرد اصلی این پیچ‌ها هم‌محور کردن دو قسمت مجزا می‌باشد. همچنین دو قسمت آسترگونه جهت اعمال بار به قطعه وجود دارد که نباید با هم در تماس باشند، زیرا لازم است کل نیرو صرف تغییر شکل نمونه (و نه فیکسچرها) گردد. این دو قسمت باید کاملاً متقارن بوده و نیرو در مرکز آن به وسط نمونه وارد گردد. علت این امر در انتخاب مکان مناسب جهت اندازه‌گیری جابجایی می‌باشد و باید دقیقاً جابجایی زیر نقطه اثر نیرو بدست آید.

محاسبه پارامترهای مکانیک شکست در این روش آزمایش بر اساس استانداردهای موجود برای نمونه‌های خمشی سه نقطه صورت می‌گیرد. به علت ضخامت پایین نمونه نمی‌توان ضریب شدت تنش را برای آن محاسبه نمود و باید انتگرال  $J$  محاسبه گردد. هدف نهایی در این آزمایش محاسبه نمودار مقاومت ماده به رشد ترک و انتگرال  $J$  می‌باشد که بر اساس استاندارد ASTM E813 صورت می‌پذیرد. محاسبات و نحوه استخراج ضرایب مکانیک



شکل 13 مساحت الاستیک و پلاستیک در نمودار بار - جابجایی [18]

در معادلات فوق  $\nu$  نسبت پواسون،  $E$  مدول یانگ،  $B$  ضخامت ماده،  $W$  عرض نمونه و  $a$  طول ترک اولیه می‌باشد.  $a_{pl}$  نیز از رابطه 8 تعیین می‌شود:

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B b_0} \quad (8)$$

که در آن  $A_{pl}$  مساحت ناحیه پلاستیک در نمودار بار جابجایی (شکل 13) و  $b_0$  طول لیگامنت بدون ترک می‌باشند. ضریب  $\eta$  نیز از رابطه 9 محاسبه می‌گردد:

$$\eta = 2 + 0.522 \frac{b}{W} \quad (9)$$

معادلات فوق بر مبنای طول ترک اولیه می‌باشند و تغییرات  $J$  با افزایش طول ترک در آن‌ها لحاظ نشده است. در محاسبه انتگرال  $J$  به صورت گام به گام و مرحله‌ای، روابط فوق به صورت معادلات 10 و 11 بیان می‌گردند:

$$J_i = \frac{K_i^2 (1 - \nu^2)}{E} + J_{pl,i} \quad (10)$$

$$K_i = \frac{P_i}{B W^{0.5}} F \left( \frac{a_i}{W} \right) \quad (11)$$

که در این حالت انتگرال  $J$  پلاستیک از رابطه 12 بدست می‌آید:

$$J_{pl,i} = J_{pl,i-1} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) + \frac{A_i}{B b_{i-1}} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \quad (12)$$

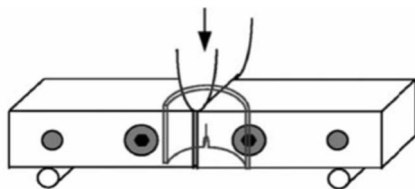
منحنی مقاومت ماده در برابر رشد ترک (منحنی  $J-R$ ) بر اساس استاندارد ASTM E1820 ترسیم می‌گردد. از این نمودار پارامتر  $J_{0.2}$  (خطی که محور افقی را در  $0.2$  قطع می‌نماید) به عنوان ملاکی جهت آغاز رشد ترک به کار می‌رود. شیب یک نقطه روی نمودار فوق به مدول پارگی ماده  $T$  مربوط می‌باشد. مقدار بدون بعد این پارامتر از رابطه 13 به دست می‌آید:

$$T = \left( \frac{dJ}{da} \right) / \left( \frac{E}{\sigma_y^2} \right) \quad (13)$$

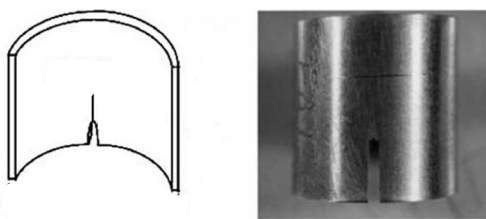
در مجموع از روی نمودار، سه مقدار  $J_{0.2}$ ،  $T$  و  $J_{max}$  به عنوان خروجی استخراج می‌گردد.

#### 4-5- روش آزمایش خمشی سه نقطه

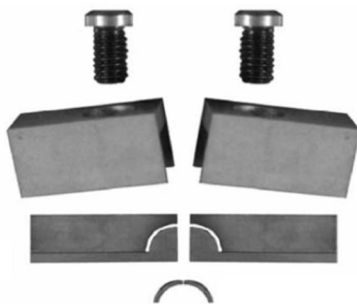
روش آزمایش خمشی سه نقطه توسط ادزینگر و همکاران [29] پیشنهاد شده است. در این روش همانطور که در شکل 14 نیز پیداست از بارگذاری خمشی جهت استخراج خواص مکانیک شکست استفاده می‌شود [29]. به این منظور یک میله مرکزی از بالا دقیقاً در مرکز نمونه نیرو را وارد کرده و خمشی اعمال



شکل 14 روش آزمایش خمشی سه نقطه [29]



شکل 15 نمونه آماده آزمایش [29]



شکل 16 فیکسچر و نمونه آزمایش خمشی سه نقطه [29]

نمونه آماده شده در راستای شعاعی مورد بارگذاری قرار می‌گیرد و ترک در راستای محوری شروع به رشد می‌کند، در نتیجه یک پیش ترک تحت بار گذاری خستگی سینوسی، در راستای طولی نمونه ایجاد می‌شود.

دیواره قطعات جدار نازک به علت ضخامت بسیار پایینی که دارند، الزامات شرایط کرنش صفحه‌ای را برآورده نمی‌کنند. همچنین به علت نازک بودن نمونه، در طول آزمایش، خمش ایجاد می‌گردد و باعث تغییر در انحنای نمونه مخصوصاً در نوک ترک می‌شود. در این روش، با افزایش ضخامت نمونه از طریق چسباندن دو قطعه به هم و همچنین از بین بردن خمش و اثرات ناشی از آن بوسیله تقارن نمونه و اپوکسی به کار رفته در نمونه، اشکالات فوق مرتفع شده و امکان استفاده از استاندارد ASTM E1820 فراهم می‌گردد.

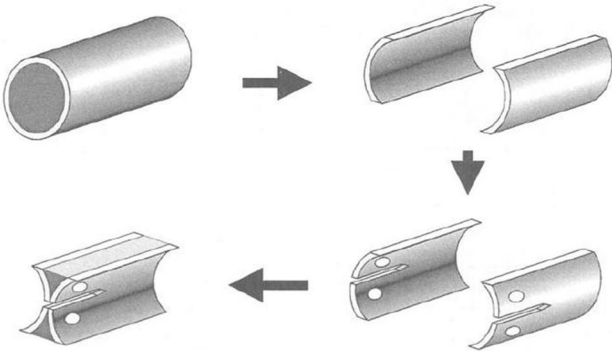
در این روش به منظور بدست آوردن رابطه‌ای بین رشد ترک و ضریب شدت تنش، شبیه‌سازی اجزاء محدود الزامی می‌باشد. به این منظور از دستگاه هیدرولیک آزمایش کشش استفاده می‌گردد و سپس از روی نمودار بار برحسب جابجایی خط اثر نیرو و همچنین طول ترک، انتگرال  $J$  به یک روش نگاشت معکوس<sup>2</sup> محاسبه می‌شود [31]. اندازه گیری طول ترک با استفاده از کلیپ گیج و تکنیک نرمی صورت می‌گیرد.

یک نمونه بسیار نازک با قطر کم در شکل 19 قابل مشاهده می‌باشد.

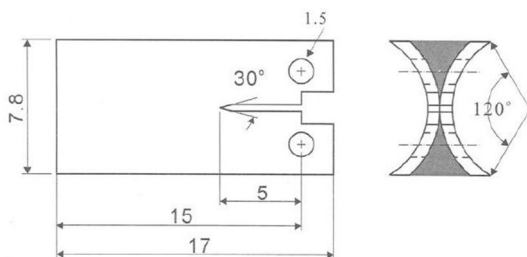
بر مبنای روش آزمایش استاندارد ASTM برای چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای فلزات، ضریب شدت تنش از رابطه 14 اما با استفاده از یک ضریب اصلاح هندسی متفاوت، که از یک روش نگاشت معکوس استخراج می‌گردد، بدست می‌آید:

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (14)$$

که در آن  $P$  نیروی اعمال شده،  $B$  ضخامت نمونه و  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  ضریب اصلاح هندسی مورد اشاره می‌باشد.



شکل 18 آماده‌سازی نمونه ایکس شکل [31]



شکل 19 نمونه کامل ایکس شکل [31]

شکست همانند روش‌های آزمایش کشش بارگذاری پینی و کشش نمونه شیار دار دو طرفه می‌باشد.

نمونه مورد آزمایش باید دارای پیش ترک خستگی باشد. همچنین نسبت طول ترک به پهنای نمونه باید الزامات ذکر شده در استاندارد (یعنی  $\frac{a}{W} \sim 0.35$ ) را برآورده کند.

#### 4-6- روش آزمایش قالب مخروطی داخلی

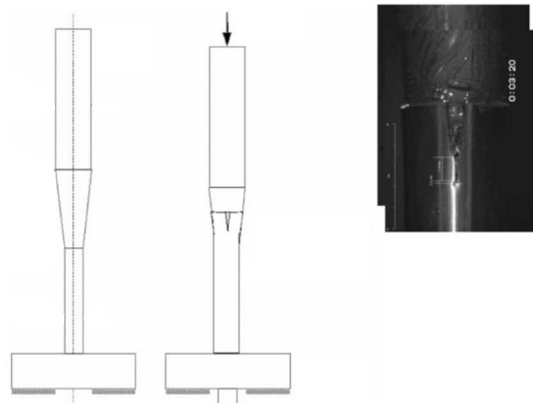
روش آزمایش قالب مخروطی داخلی بر پایه شبیه‌سازی افزایش قطر داخلی یک مخزن بر اثر فشار داخلی و یا تبدیل نیروی محوری و شعاعی به فشار داخلی فرضی طراحی شده است. در این روش که توسط سنت کاترین و همکارانش [30] ارائه گردیده، نمونه دارای ترک محوری راه به در می‌باشد و یک مخروط که در شکل 17 مشاهده می‌گردد با حرکت به سمت داخل سعی در افزایش قطر نمونه با شیار محوری را دارد [28]. بر اساس اثر پواسون با تغییر بعد در یک راستا، در راستای دیگر نیز ابعاد تغییر می‌کند. همچنین شیار ایجاد شده می‌تواند از نوع شیار چورن<sup>1</sup> باشد. یک پیش ترک خستگی نیز تنها بر یک روی نمونه ایجاد شده است [30].

همان‌طور که از تصویر پیداست، قالب باید از سمت شیار دار نمونه وارد گردد. سپس این قالب با نیروی فشاری وارد نمونه می‌شود. در این صورت نمونه، به علت تنش فشاری در انتهای سمت دیگر ممکن است دچار کمانش گردد، در نتیجه باید یک محافظ در قسمت انتهایی نصب گردد.

#### 4-7- روش آزمایش نمونه ایکس شکل

روش آزمایش نمونه ایکس شکل بر مبنای نمونه‌های کششی فشرده استاندارد توسط هو و همکاران [31] به منظور شبیه‌سازی و بدست آوردن میدان تنش در اطراف ترک و ناحیه بارگذاری در روی استوانه‌های جدار نازک طراحی و اجرا شده است.

در این روش دو نمونه‌ی CT اتحادار به منظور ایجاد نمونه ایکس شکل با نوعی چسب به یکدیگر چسبانده می‌شوند. این چسب به عنوان نوعی دمپ کننده انرژی به منظور کاهش اثرات خمش، مورد استفاده قرار می‌گیرد [28]. هندسه نمونه به صورت شکل 18 می‌باشد. به منظور آماده سازی، ابتدا دو قسمت با زاویه 120 از استوانه جدار نازک جدا می‌شود. سپس باید شیارها و حفره‌های جایگذاری پین‌های اعمال نیرو را روی نمونه ایجاد کرد. در مرحله آخر این دو قطعه توسط چسب اپوکسی به یکدیگر چسبانده می‌شوند.



شکل 17 روش آزمایش قالب مخروطی داخلی [28]



جدول 3 جمع‌بندی مزایا و معایب روش‌های مختلف آزمایش مکانیک شکست قطعات

انحدار جدار نازک		روش
معایب	مزایا	
• مهار حرکت نمونه ها • اصطکاک بین نمونه و فیکسچر	• سادگی فیکسچر و استخراج داده ها • آزمایش کل نمونه	کشش نمونه حلقوی با دو شیار لبه‌ای (DENT)
• لزوم استخراج ضریب تصحیح مناسب بسته به نوع هندسه و ماده • دقت پایین	• هزینه کم • سرعت بالا • عدم نیاز به فیکسچر خاص	آزمایش قالب داخلی مخروطی (ICM)
• سختی انجام آزمایش • هزینه بالا	• روش اصلی • آزمایش کل نمونه • دقت بالا • سادگی محاسبات	آزمایش انفجاری (BT)
• دقت ساخت بالا • هزینه ساخت بالا • سنگینی فیکسچر	• امکان استفاده از استاندارد • حل مشکل ضخامت	کشش بارگذاری پینی (PLT)
• لزوم شبیه سازی خواص چسب • عدم دقت نتایج • عدم استفاده از کل نمونه	• عدم ایجاد خمش • افزایش ضخامت • سادگی آزمایش	نمونه ایکس شکل
• لزوم انجام کار مکانیکی جهت تولید نمونه • عدم آزمایش کل قطعه • لزوم ساخت فیکسچر • هزینه بالا • مناسب ابعاد کوچک	• سادگی محاسبات	آزمایش خمش سه نقطه (TPB)

## 6- مراجع

- [1] A. R. Shahani, M. Botshekanan, M. Rastegar, H. Moayeri, Experimental and Numerical Determination of Ductile Fracture Toughness for Thin Steel Plates Using CT Specimen, in *The 17th Annual International Conference of Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2009. (In Persian)
- [2] A. R. Shahani, M. Rastegar, M. Botshekanan, H. Moayeri, Experimental and Numerical Investigation of Thickness Effect on Ductile Fracture Toughness of steel alloy sheets, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 4, pp. 646-659, 2010.
- [3] A. R. Shahani, H. Moayeri, M. Botshekanan, M. Rastegar, Experimental estimation of fatigue crack growth rate in thin steel alloy plates in terms of  $\Delta K$ ,  $\Delta J$ ,  $\Delta CTOD$  and  $\Delta CMOD$ , in *The 7th conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)
- [4] A. R. Shahani, H. Moayeri, M. Rastegar, M. Botshekanan, Experimental estimation of fatigue crack growth rate and study of stress ratio effect in thin aluminum alloy plates, in *12th International Conference on Fracture*, Ottawa, Canada, 2009.
- [5] A. R. Shahani, H. Moayeri, Experimental estimation of threshold of  $\Delta K_{th}$  by K-Decreasing Method for Steel Specimens, in *The 1st National Congress on Aging Aircraft*, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- [6] ASTM E1820-13, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, *Annual Book of ASTM standards, Vol. 03.01*, American Society for Testing and Materials, 2013.
- [7] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, *Annual Book of ASTM standards, Vol. 03.01*, American Society for Testing and Materials, 2013.

قبلاً اشاره شد که نمونه ایکس شکل ابتدا تحت یک بار خستگی سینوسی قرار می‌گیرد تا پیش‌ترک خستگی در آن ایجاد شده و تا یک نسبت  $\frac{a}{W}$  مشخص رشد کند. سپس نمونه تا شکست نهایی تحت کشش ساده قرار می‌گیرد. با داشتن ضریب اصلاح هندسی  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  بر حسب  $\frac{a}{W}$  از روش نگاشت معکوس، برای نتایج آزمایش کشش نمونه ایکس شکل در بار ماکزیمم می‌توان بر اساس نسبت  $\frac{a}{W}$  مقدار ضریب اصلاح هندسی را در این بار بدست آورد. سپس با استفاده از رابطه 14 برای بار ماکزیمم و ضریب اصلاح هندسی محاسبه شده، یک مقدار چقرمگی شکست  $K_{Ic}$  بدست می‌آید.

در روش نمونه ایکس شکل به علت ضخامت پایین نمونه باید به جای ضریب شدت تنش، از انتگرال  $J$  استفاده نمود. در این روش محاسبات کمی متفاوت از دیگر روش‌های بیان شده می‌باشد. در این حالت انتگرال  $J$  از رابطه (15) محاسبه می‌شود [32]:

$$J = \frac{\beta A_T}{B b_0} \quad (15)$$

که در آن  $A_T$  کل مساحت زیر نمودار بار بر حسب جابجایی نقطه اثر نیرو،  $B$  ضخامت قطعه و  $b_0$  طول لیگامنت بدون ترک می‌باشد. ضریب  $\beta$  با ساده‌سازی به صورت رابطه 16 بیان می‌گردد:

$$\beta = \frac{2(1 + \alpha)}{(1 + \alpha^2)} \quad (16)$$

که در آن  $\alpha$  به نسبت  $\frac{a}{b}$  وابسته است و از رابطه (17) بدست می‌آید:

$$\alpha = 2 \left[ \left( \frac{a}{b} \right)^2 + \frac{a}{b} + \frac{1}{2} \right]^{0.5} + 2 \left[ \frac{a}{b} + \frac{1}{2} \right] \quad (17)$$

در این فرمول  $a$  طول ترک اولیه و  $b$  طول لیگامنت بدون ترک می‌باشد.

## 5- جمع‌بندی و مقایسه نتایج

جدول 2 نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده با روش‌های مختلف ذکر شده در بخش قبل را که در یک پژوهش جمعی مشترک بر روی یک قطعه یکسان از جنس آلومینیوم 7050 بدست آمده است، نشان می‌دهد [28]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر انتگرال  $J$  بدست آمده از روش‌های مختلف پراکندگی بالایی نشان می‌دهند. از دلایل این امر می‌توان به تفاوت در انجام آزمایش بر روی سازه واقعی و بر روی نمونه‌ی جدا شده از قطعه اصلی بیان نمود.

مزایا و معایب هر یک از روش‌های بحث شده در فوق بصورت کیفی در جدول 3 خلاصه شده است. با مقایسه روش‌های مختلف می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که انجام آزمایش انفجاری و سپس روش بارگذاری پینی مناسب‌ترین روش آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل و روش تخت کردن نیز مناسب‌ترین روش برای آزمایش قطعات اجنادار جدار نازک همانند پوسته پره روتور بالگرد می‌باشد.

جدول 2 نتایج آزمایش شکست آلومینیوم 7050 در دمای اتاق با استفاده از

روش‌های مختلف [28]			
$(dI/da)_{0.2}$ (MNm <sup>-2</sup> )	$J_{0.2}$ (kNm <sup>-1</sup> )	$J_{max}$ (kNm <sup>-1</sup> )	روش آزمایش
3±26	2±21	2±44	PLT
---	---	7±32	TPB
4±62	8±29	10±45	DENT
---	---	4±23	نمونه ایکس
13±31	13±25	---	ICM

- [22] A. C. Wallace, The Development of Curved Fracture Toughness Specimens for Predicting Crack Growth in CANDU Reactor Pressure Tubes, in *Proceedings of the 11th Canadian Fracture Conference*, Ottawa, 1984.
- [23] C. K. Chow, L. A. Simpson, Determination of the Fracture Toughness of Irradiated Reactor Pressure Tubes Using Curved Compact Specimens, *ASTM STP 945, Fracture Mechanics: 18th Symposium*, pp. 419-439, 1988.
- [24] J. Bertsch, W. Hoffelner, Crack resistance curves determination of tube cladding material, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 352, pp. 116-125, 2006.
- [25] V. Grigoriev, R. Jakobsson, Application of the Pin-Loading Tension Test to Measurements of Delayed Hydride Cracking Velocity in Zircaloy Cladding, *Report SKI-R-00/57-SE*, 2000.
- [26] M. K. Samal, G. Sanyal, J. K. Chakravarty, Estimation of fracture behavior of thin walled nuclear reactor fuel pins using Pin-Loading-Tension (PLT) test, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp. 4043-4050, 2010.
- [27] V. Grigoriev, B. Josefsson, A. Lind, B. Rosborg, A pin-loading tension test for evaluation of thin-walled tubular materials, *Scripta Metallurgica et materialia*, Vol. 33, No. 1, pp. 109-114, 1995.
- [28] S. K. Yagnik, N. Ramasubramanian, V. Grigoriev, C. Sainte-Catherine, J. Bertsch, R. Adamson, R. C. Kuo, S. T. Mahmood, T. Fukuda, P. Efsing, B. C. Oberländer, Round-robin testing of fracture toughness characteristics of thin-walled tubing, *Journal of ASTM International*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-21, 2008.
- [29] K. Edsinger, J. H. Davies, R. B. Adamson, Degraded fuel cladding fractography and fracture behavior, *ASTM STP 1354, Zirconium in the Nuclear Industry: 12th International Symposium*, 2000.
- [30] C. Sainte-Catherine, D. L. Boulch, S. Carassou, N. Ramasubramanian, C. Lemaignan, An Internal Conical Mandrel Technique for Fracture Toughness Measurements on Nuclear Fuel Cladding, *Journal of testing and evaluation*, Vol. 34, No. 5, pp. 373-382, 2006.
- [31] H. H. Hsu, K. F. Chien, H. C. Chu, R. C. Kuo, P. K. Liaw, An X-Specimen Test for Determination of Thin-Walled Tube Fracture Toughness, *ASTM STP 1406, Fatigue and Fracture Mechanics: 32nd Volume*, pp. 214-226, 2001.
- [32] H. H. Hsu, An evaluation of hydrided Zircaloy-4 cladding fracture behavior by X-specimen test, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 426, pp. 256-262, 2006.
- [8] A. R. Shahani, H. Moayeri, M. Salari, Fatigue Analysis of a reinforced cylindrical shell under multiaxial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 11, pp. 15-29, 2013. (In Persian)
- [9] M. Salari, A. R. Shahani, H. Moayeri, Fatigue crack growth analysis of a reinforced cylindrical shell under random loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, published online: 29 APR 2014.
- [10] A. R. Shahani, M. Rastegar, H. Moayeri, M. Botshekanan, Experimental and numerical investigation of thickness effect on fatigue behavior of steel alloy sheets, in *The 18th annual international conference of mechanical engineering*, Tehran, Iran, 2010. (In Persian)
- [11] E. S. Folias, An Axial Crack In a Pressurized Cylindrical Shell, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 1, pp. 104-113, 1965.
- [12] E. S. Folias, On the Theory of Fracture of Curved Sheets, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 2, pp. 151-164, 1970.
- [13] E. S. Folias, Failure correlation between cylindrical pressurized vessels and flat plates, *Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 76, pp. 803-811, 1999.
- [14] P. H. Davies, Predicting Crack Instability Behaviour of Burst Tests from Small Specimens for Irradiated Zr-2.5Nb Pressure Tubes, *ASTM STP 1321, Fatigue and Fracture Mechanics: 28th Volume*, pp. 535-561, 1997.
- [15] R. B. Anderson, T. L. Sullivan, Fracture mechanics of through cracked cylindrical pressure vessels, *NASA Report TN D-3252*, 1966.
- [16] G. T. Hahn, M. Sarrate, A. R. Rosenfield, Criteria for Crack Extension in Cylindrical Pressure Vessels, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 187-210, 1969.
- [17] M. D. Pandey, D. D. Radford, A statistical approach to the prediction of pressure tube fracture toughness, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 3218-3226, 2008.
- [18] R. N. Katz, Fracture toughness of D6AC steel shillelagh rocket motor case, *Report AMRA TR 64-19*, 1964.
- [19] S. Honda, Fracture Toughness Of Zr-2.5 wt% Nb Pressure Tubes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 81, pp. 159-167, 1984.
- [20] D. Broek, *Elementary engineering fracture mechanics*, 3rd ed., The Hague, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1984.
- [21] P. H. Davis, C. P. Stearns, Curved Double Torsion Fracture Toughness Tests - Round Robin I on Zr-2 Tube 629-15913 (Circumferential Hydrides), *Report M83-196-1C, Ontario Hydro Research Division*, 1983.