



## تعیین چقرمگی شکست فولاد عملیات حرارتی شده AISID2 با روش المان محدود و روش نشر آوایی

رضا محمدی<sup>1</sup>، میلاد سعیدی فر<sup>2</sup>، محمد فتوحی<sup>3</sup>، جواد تیموری<sup>4</sup>، مهدی احمدی نجف آبادی<sup>5\*</sup>

1-2 دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3-4 دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

5- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\*تهران، صندوق پستی: 1587-4413، ahmadin@aut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 فروردین 1393

پذیرش: 17 خرداد 1393

ارائه در سایت: 06 مهر 1393

کلید واژگان:

فولاد AISID2

چقرمگی شکست

المان محدود

نشر آوایی

### چکیده

فولاد AISID2 از نوع فولاد ابزار سرد کار پرکربن و پرکرم است. از جمله خواص مکانیکی این فولاد می‌توان به استحکام فشاری بالا و سختی-پذیری خوب آن اشاره نمود. علی‌رغم این مزایا، چقرمگی شکست این فولاد چندان زیاد نیست. هدف از این پژوهش، تعیین چقرمگی شکست فولاد AISID2 با شبیه‌سازی المان محدود و روش نشر آوایی است. به منظور تعیین چقرمگی شکست فولاد، از نمونه‌های استاندارد CT ساخته شده از فولاد AISID2 که در دماهای مختلف بازیخت شده، استفاده شد. با مدل‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس، مقدار چقرمگی شکست با روش المان محدود محاسبه شد. در روش نشر آوایی برای تعیین چقرمگی شکست از پارامترهای مختلفی همچون نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی، نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی و انتگرال تابع سنتری استفاده شد. در انتها، نتایج به دست آمده از روش نشر آوایی، شبیه-سازی المان محدود و روش استاندارد ASTM E399 با یکدیگر مقایسه شدند. مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده از روش‌های نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی و انتگرال تابع سنتری حد پایین چقرمگی شکست را ارائه داده و روش المان محدود حد بالای مقادیر چقرمگی شکست را ارائه می‌دهد. مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده از روش نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی بیشترین تطابق را با مقادیر به دست آمده از روش استاندارد ASTM E399 دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش نشر آوایی می‌تواند به عنوان روشی کارآمد به منظور تعیین چقرمگی شکست مواد مهندسی استفاده شود.

## Determination of fracture toughness of heat treated AISI D2 steel using Finite Element and Acoustic Emission methods

Reza Mohammadi, Milad Saeedifar, Mohammad Fotouhi, Cevat teymuri, Mehdi Ahmadi najafabadi\*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 4413-1587 Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 13 April 2014  
Accepted 07 June 2014  
Available Online 28 September 2014

### Keywords:

AISI D2 Steel  
Fracture Toughness  
Finite Element  
Acoustic Emission

### ABSTRACT

The AISI D2 steel is a high-chromium and high-carbon tool steel which mechanical properties are high compressive strength and good through-hardening. Despite these advantages, fracture toughness of this steel is moderate. In this study, fracture toughness of AISI D2 steel was determined using Finite Element and Acoustic Emission methods. Selected steel (AISI D2 cold-work tool steel) was heat treated and tempered at different conditions. After that Compact testing specimens were prepared according to ASTM E399 standard and fracture toughness of the specimens was specified according to the standard method. The specimens were modeled in the commercial FE software (ABAQUS) and fracture toughness of the specimens was determined using FEM. Determination of fracture toughness using AE technique was carried out according to three methods: Acoustic Emission Energy Rate (AEER), Acoustic Emission Count Rate (AEER) and integral of sentry function. The results obtained from ASTM E399, Finite Element and Acoustic Emission methods were compared with each other. It was found that fracture toughness values which were obtained using AEER and integral of sentry function techniques are lower bound and the results obtained from FEM are upper bound values of the fracture toughness. Furthermore, fracture toughness values obtained using AEER were the most consistent with the results obtained from ASTM E399 standard method. Finally, it could be concluded that Acoustic Emission method can be used as a useful method for determination of fracture toughness of engineering materials.

### 1- مقدمه

مثل مولیبدن و وانادیم است. این فولاد به دلیل سختی زیاد، استحکام فشاری

بالا، مقاومت به سایش زیاد و حفظ سختی در عملیات حرارتی بازیخت،

فولاد AISID2 از نوع فولاد ابزار سردکار پرکربن و پرکرم به همراه عناصری

Please cite this article using:

R. Mohammadi, M. Saeedifar, M. Fotouhi, C. teymuri, M. Ahmadi najafabadi, Determination of fracture toughness of heat treated AISI D2 steel using Finite Element and Acoustic Emission methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 1-8, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نتایج روش نشر آوایی با دو روش دیگر ملاحظه شد. مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده از روش‌های نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی و انترگرال تابع سنتری حد پایین چقرمگی شکست را ارائه داده و روش المان محدود حد بالای مقادیر چقرمگی شکست را ارائه می‌دهد. مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده با روش نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی بیشترین تطابق را با مقادیر به دست آمده از روش استاندارد ASTM E399 دارد. همچنین، با استفاده از نتایج به دست آمده، تاثیر دمای بازپخت بر روی چقرمگی شکست نمونه‌ها نیز بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که روش نشر آوایی توانایی تشخیص لحظه شروع رشد ترک در نمونه‌های استاندارد CT را داشته و می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای تعیین چقرمگی شکست به کار گرفته شود.

## 2- روش تحقیق

### 2-1- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های اولیه از فولاد ابزار سرد کار AISID2 در ابعاد  $50 \times 50 \times 8 \text{ mm}^3$  تهیه شدند. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول 1 نشان داده شده است.

سیس، نمونه‌ها به صورت زیر عملیات حرارتی شدند:

عملیات حرارتی آنیل کردن: ابتدا نمونه‌ها تا دمای  $900^\circ\text{C}$  در داخل کوره گرم شده و به مدت 2 ساعت در این دما نگه داشته شدند. سپس، به آهستگی تا دمای  $775^\circ\text{C}$  سرد شده و در این دما به مدت 6 ساعت نگه داشته شده و در انتها در هوای محیط به آهستگی سرد شدند.

عملیات حرارتی آستنیت‌زدن: نمونه‌ها تا دمای  $1010^\circ\text{C}$  گرم شده و به مدت 15 دقیقه در این دما نگه داشته شده و در انتها در هوای محیط به آهستگی سرد شدند.

عملیات حرارتی بازپخت: نمونه‌ها در دماهای  $300^\circ\text{C}$ ،  $450^\circ\text{C}$ ،  $525^\circ\text{C}$  و  $575^\circ\text{C}$  به مدت 1 ساعت نگهداری شده و سپس در دمای محیط به آهستگی سرد شدند. در مرحله دوم، دمای بازپخت هر یک از نمونه‌ها  $50^\circ\text{C}$  پایین‌تر از مرحله اول انتخاب شد. همچنین، یکی از نمونه‌ها بدون عملیات بازپخت مورد آزمایش قرار گرفت. چرخه عملیات حرارتی در شکل 1 نشان داده شده است. به منظور تعیین استحکام تسلیم نمونه‌های عملیات حرارتی شده، نمونه‌های استاندارد آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8-01 به شکل استوانه‌ای، با طول مشخصه  $45 \text{ mm}$  و قطر مشخصه  $9 \text{ mm}$  ساخته شده و با نرخ پیشروی  $0/2 \text{ mm/min}$  تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند [13]. مشخصات نمونه‌ها و استحکام تسلیم آن‌ها در جدول 2 ارائه شده است.

### 2-2- روش انجام آزمایش

پس از عملیات حرارتی، جهت انجام آزمایش چقرمگی شکست، نمونه‌ها در ابعاد  $34 \times 36 \text{ mm}^2$  و ضخامت  $8 \text{ mm}$  مطابق استاندارد ASTM E399 برش داده شدند. سپس، با استفاده از دستگاه آزمون خستگی، با اعمال بار کششی نوسانی با بیشینه  $150 \text{ kg}$  و کمینه  $50 \text{ kg}$ ، با فرکانس  $5 \text{ Hz}$  در طی  $3000-5000$  سیکل، در نوک شیار نمونه‌ها پیش ترک خستگی به طول  $2 \text{ mm}$  ایجاد شد. طول پیش ترک خستگی در حین آزمایش، با استفاده از دوربین دیجیتالی با بیشینه بزرگنمایی  $150 \times$  اندازه‌گیری شد. شکل 2 شماتیکی از آزمایش تعیین چقرمگی شکست، ابعاد نمونه و نحوه داده برداری نشر آوایی را نشان می‌دهد. طول نهایی شیار  $12 \text{ mm}$  بوده، که برابر مجموع طول اولیه

کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا نموده است. امروزه از این فولاد به طور گسترده در ساخت غلتک‌های نورد سرد، قالب‌های شکل‌دهی و کشش عمیق استفاده می‌شود. علی‌رغم مزیت‌های فوق، چقرمگی شکست این فولاد نسبتاً پایین است [2,1].

اصطلاح چقرمگی شکست معمولاً به عنوان مقاومت ماده در برابر رشد ترک بیان می‌شود. چقرمگی شکست به عملیات حرارتی بازپخت و پارامترهای آن بستگی داشته و با کنترل این پارامترها می‌توان به خواص مکانیکی بهینه‌ای دست یافت [3]. اندازه‌گیری دقیق چقرمگی شکست، نقش بسیار مهمی در کارایی روش‌های مبتنی بر مکانیک شکست در تعیین سلامت سازه و تعیین میزان مجاز عیوب در سازه دارد. به همین دلیل، هم‌اکنون تعداد زیادی استاندارد بین‌المللی برای تعیین چقرمگی شکست مواد تدوین شده، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها استاندارد ASTM E399 است [4].

انتشار موج الاستیک در ماده، در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشر آوایی می‌گویند [5]. این انرژی کرنشی می‌تواند ناشی از تشکیل ترک، رشد ترک، تشکیل دوقلوبی و تغییر شکل پلاستیک در داخل ماده باشد. امواج ایجاد شده به وسیله سنسورهای پیزوالکتریک دریافت شده و تحلیل می‌شوند. از مزایای استفاده از روش نشر آوایی در بررسی خرابی فولادها، می‌توان به تعیین لحظه شروع ترک، پایش رشد ترک و تعیین چقرمگی شکست فولاد اشاره نمود [6-8].

تاکنون محققان مختلفی از روش نشر آوایی برای تعیین چقرمگی شکست مواد استفاده نموده‌اند. در برخی از این مطالعات، از روش تغییرات دامنه و افزایش تعداد سیگنال‌های نشر آوایی به منظور تعیین چقرمگی شکست استفاده شده، که نتایج این روش‌ها اختلاف زیادی با استانداردها داشته است [9-11]. فتوحی و همکاران، با استفاده از روش نشر آوایی و دسته‌بندی فازی سی-مینز<sup>1</sup>، سازوکارهای خرابی را در نمونه‌های فولادی CT2 دسته‌بندی نمودند. آن‌ها با به دست آوردن محدوده فرکانسی، دامنه و انرژی سیگنال‌های نشر آوایی مربوط به هر سازوکار خرابی، نوع شکست (ترد و نرم) را در این نمونه‌ها مشخص نمودند. تصاویر گرفته شده از سطوح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش نشر آوایی در تعیین سازوکارهای شکست در این فولاد بود [12].

هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد روش غیرمخرب نشر آوایی در تعیین چقرمگی شکست فولاد AISI D2 است. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های استاندارد CT، از ورق‌های فولاد AISI D2 عملیات حرارتی شده و بازپخت شده در دماهای مختلف، تهیه شده و نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM E399 آماده شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. در ابتدا، چقرمگی شکست نمونه‌ها با روش ارائه شده در استاندارد ASTM E399 تعیین شد. سپس، با شبیه‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس<sup>3</sup>، چقرمگی شکست نمونه‌ها تعیین شد. در ادامه، با استفاده از برخی مشخصه‌های سیگنال‌های نشر آوایی که در حین آزمایش نمونه‌ها با استفاده از تجهیزات نشر آوایی ثبت شده‌اند، از جمله نرخ تولید امواج نشر آوایی<sup>4</sup>، نرخ انرژی امواج نشر آوایی<sup>5</sup> و انترگرال تابع سنتری<sup>6</sup> که ترکیبی از داده‌های مکانیکی و نشر آوایی نمونه‌ها است، چقرمگی شکست این فولاد تعیین شد. سپس، نتایج حاصل از روش نشر آوایی و روش المان محدود با نتایج استاندارد ASTM E399 مقایسه شده و تطابق خوبی بین

1- PhasyC-Means Clustering

2- Compact Tension

3- ABAQUS

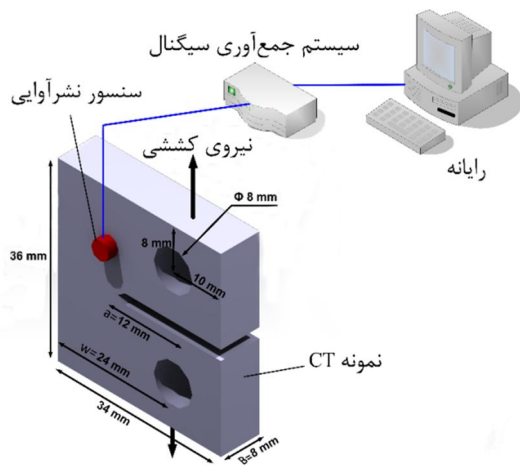
4- Acoustic Emission Count Rate (AECR)

5- Acoustic Emission Energy Rate (AEER)

6- Integral of Sentry function

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد ابزار AISI D2 (برحسب درصد وزنی)

Mo	Al	Co	Cu	Sn	V	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0/783	0/032	0/022	0/140	0/048	0/798	فلز پایه	1/530	0/320	0/230	0/019	0/007	11/800	0/152



شکل 2 شماتیکی از آزمایش تعیین چقرمگی شکست و ابعاد نمونه

### 3-1- تعیین چقرمگی شکست به روش استاندارد ASTM E399

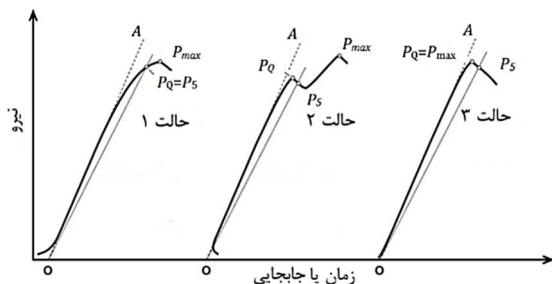
به منظور تعیین چقرمگی شکست، ابتدا باید بار بحرانی نمونه مشخص شود. بار بحرانی به باری اطلاق می‌شود که در آن بار، ترک شروع به رشد می‌نماید. مطابق شکل 3 و براساس دستورالعملی که در استاندارد ASTM E399 آمده است، برای تعیین بار بحرانی، در نمودار بار برحسب جابه‌جایی (یا زمان) نمونه CT، پاره‌خطی مماس بر ناحیه خطی نمودار رسم می‌شود. سپس، خط  $OP_5$  با شیبی برابر  $0/95$  شیب پاره‌خط مماس، رسم شده تا نقطه  $P_5$  به دست آید. حال بار بحرانی  $P_Q$  بدین صورت تعیین می‌شود، که اگر مقدار نیرو در نقاط واقع بر منحنی بار که قبل از نقطه  $P_5$  قرار دارند، از مقدار نیرو در نقطه  $P_5$  کمتر باشد، آنگاه  $P_Q = P_5$  بوده، ولی اگر روی منحنی بار، قبل از نقطه  $P_5$  نقاطی دارای مقدار باری بیشتر از  $P_5$  باشند، آنگاه مقدار بیشینه بار در این نقاط برابر  $P_Q$  خواهد بود.

به منظور تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها، پس از مشخص شدن بار بحرانی ( $P_Q$ ) بایستی محاسبات زیر انجام شود:

الف) نسبت  $\frac{P_{max}}{P_Q}$  محاسبه شده  $P_{max}$  بیشینه باری است که نمونه در طول آزمون قادر به تحمل آن است، چنانچه این نسبت کمتر از مقدار  $1/15$  باشد به مرحله بعد رفته، در غیر این صورت آزمون غیر قابل قبول است.

ب) مقدار  $K_Q$  با رابطه (1) محاسبه می‌شود:

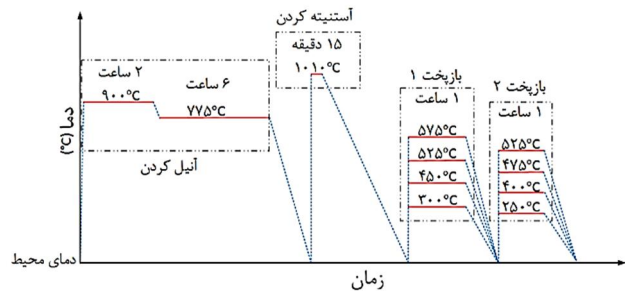
$$K_Q = \left( \frac{P_Q}{BW^{\frac{1}{2}}} \right) \times f \left( \frac{a}{W} \right) \quad (1)$$



شکل 3 نحوه تعیین بار بحرانی در سه حالت مختلف [4]

جدول 2 علامت اختصاری نمونه‌ها

علامت اختصاری نمونه	دمای بازپخت (°C)	استحکام تسلیم (MPa)
A	0	1780
B	300	1770
C	450	1650
D	525	1760
E	575	1230



شکل 1 چرخه عملیات حرارتی نمونه‌ها

شیار و طول پیش ترک خستگی است. با توجه به جنس نمونه‌ها و کوچک بودن ابعاد آن‌ها، پدیده تضعیف و میرایی موج چندان تاثیرگذار نیست. اما با این وجود، به منظور نزدیکی سنسور به موقعیت رشد ترک، سنسور در جلوی نوک ترک و قسمت بالایی نمونه نصب می‌شود.

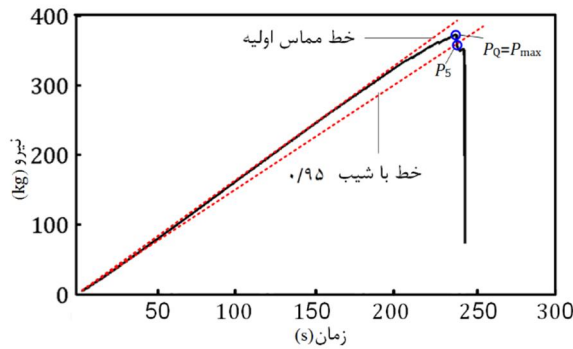
### 3-2- تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا<sup>1</sup>، با ظرفیت 5ton و با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین 0/1-500 mm/min استفاده شد. نمونه‌ها با سرعت 0/2 mm/min در حالت کنترل جابه‌جایی و در دمای 25°C تحت بارگذاری قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های نشر آوایی از نرم‌افزار ای ای وین<sup>2</sup> و سیستم پی‌سی‌ای-2<sup>3</sup>، با نرخ داده برداری 1Ms/s استفاده شد. به منظور دریافت سیگنال‌های نشر آوایی از یک سنسور پیزوالکتریک تک کریستال، با پهنای باند وسیع به نام پیکو<sup>4</sup>، محصول کمپانی پک<sup>5</sup>، مدل آر50دی<sup>6</sup> استفاده شد. فرکانس تشدید سنسور 513/28 kHz و محدوده بهینه کاری آن 100-750 kHz است.

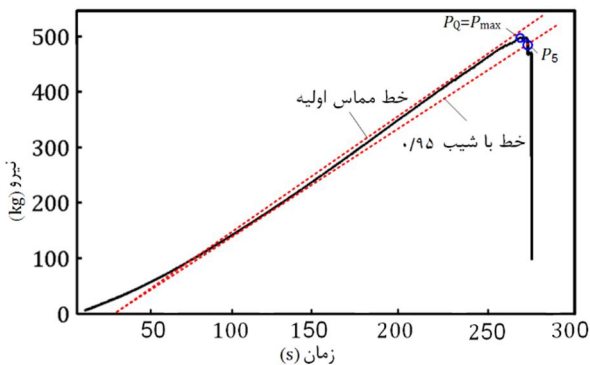
فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش تقویت کننده با ضریب 40 dB تقویت شده و به منظور حذف نویزها، دامنه حد آستانه 20 dB انتخاب شد. به منظور اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه و بهبود عبوردهی سیگنال‌های نشر آوایی بین نمونه و سنسور، از گریس سیلیکون خلاء استفاده شد.

### 3- بحث و نتایج

1- HIWA  
2- AEWIn  
3- PCI-2  
4- PICO  
5- PAC  
6- R50D



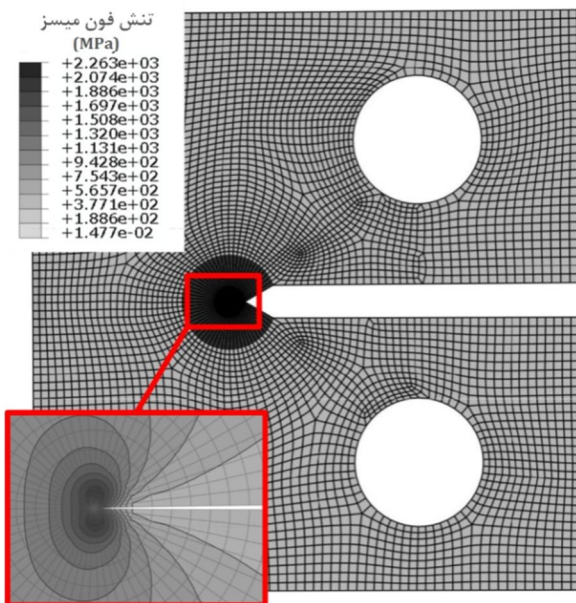
شکل 4 نمودار نیرو-زمان و تعیین بار بحرانی نمونه A



شکل 5 نمودار نیرو-زمان و تعیین بار بحرانی نمونه D

جدول 3 مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده با روش استاندارد برای نمونه‌ها

نمونه	A	B	C	D	E
$K_{Ic}$ (MPa√m)	23/77	29/76	35/80	35/28	46/04



شکل 6 نمونه مدل شده و توزیع تنش فون میسز در نمونه B

بعد نمونه، که ضخامت نمونه است (8 mm)، بسیار ناچیز بوده، بنابراین، فرض رفتار الاستیک خطی برای نمونه درست است.

که در آن  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  از رابطه (2) به دست می‌آید:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left(0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \frac{a^2}{W^2} + 14.72 \frac{a^3}{W^3} - 5.6 \frac{a^4}{W^4}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

که در روابط (1) و (2):

$P_Q$ : مقدار بار بحرانی است که براساس دستورالعمل بیان شده محاسبه شده - است (برحسب KN).

$B$ : ضخامت نمونه آزمون (برحسب cm)

$W$ : عرض نمونه آزمون (برحسب cm)

$a$ : طول ترک (برحسب cm)

پ) مقدار  $2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}}\right)^2$  محاسبه می‌شود ( $\sigma_{ys}$  مقدار تنش تسلیم نمونه است)، اگر عدد به دست آمده، از مقادیر ضخامت نمونه و طول ترک کوچک‌تر باشد، مقدار  $K_Q$  برابر  $K_{Ic}$  خواهد بود؛ در غیر این صورت آزمون غیرقابل قبول است [4].

نمودار نیرو- زمان نمونه A و D در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده - است. همان‌طور که در شکل‌های 4 و 5 مشخص است، با انجام دستورالعمل استاندارد برای هر دو نمونه، مقادیر بار بحرانی ( $P_Q$ ) برابر بار ماکزیمم ( $P_{max}$ ) شده است. با جای‌گذاری مقادیر به دست آمده در رابطه (1)، مقدار  $K_Q$  برای نمونه‌های A و D به ترتیب برابر  $25/12 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  و  $35/28 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  به دست می‌آید. با توجه به اینکه نسبت  $\frac{P_{max}}{P_Q}$  برای این نمونه‌ها برابر 1 (کمتر از 1/15) بوده و مقدار عبارت  $\left(2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}}\right)^2\right)$  کمتر از اندازه ضخامت نمونه و طول ترک است، بنابراین، آزمون مورد تائید بوده و مقدار چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای ( $K_{Ic}$ ) برای نمونه‌های A و D مساوی مقدار  $K_Q$  یعنی  $25/12 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  و  $35/28 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  خواهد بود. جدول 3 مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده با این روش را برای همه نمونه‌های آزمایش نشان می - دهد.

### 3-2- تعیین چقرمگی شکست به روش المان محدود

علاوه بر روش استاندارد، از روش المان محدود نیز به منظور تعیین چقرمگی شکست استفاده شد. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار المان محدود تجاری آباکوس استفاده شد. نمونه‌ها با استفاده از المان‌های دوبعدی کرنش صفحه‌ای مش - بندی شدند. رفتار ماده الاستیک خطی فرض شده و مقادیر ضریب پواسون و مدول یانگ برای نمونه‌ها به ترتیب 0/3 و 207 GPa در نظر گرفته شده است. با تعریف نقاط مرجع در مرکز دوایر محل اعمال بار در نمونه CT، نمونه‌ها در حالت کنترل نیرو، تحت بارگذاری قرار گرفتند. با بررسی اثر اندازه مش بر نتایج تحلیل، اندازه ضلع بزرگ المان‌های نوک ترک 0/02 mm در نظر گرفته شده و تعداد کل المان‌های مدل 19213 است. شکل 6 نمایی از نمونه مدل شده و توزیع تنش فون میسز در آن را نشان می‌دهد. با نزدیک شدن به نوک ترک، تنش به شدت افزایش یافته و موجب تسلیم شدن موضعی و باز شدن دهانه ترک و رشد آن می‌شود.

شکل 7 توزیع تنش فون میسز را در ناحیه جلو نوک ترک در نمونه B نشان می‌دهد. با استفاده از نمودار شکل 7 و با توجه به استحکام تسلیم نمونه B که برابر 1770 MPa است، اندازه ناحیه پلاستیک جلو نوک ترک از رابطه (3) برابر 0/09 mm است. به دلیل اینکه این اندازه در مقایسه با کوچک‌ترین

مقدار نیرو کم است. در این ناحیه تنها سیگنال‌های ضعیف و کم انرژی ظاهر می‌شوند، که اغلب ناشی از تغییر شکل الاستیکی نوک ترک تحت بار و نویزهای فیلتر نشده هستند. داده‌های نشر آوایی در این ناحیه در مقایسه با سایر مناطق از ارزش کمتری برخوردار بوده و معمولاً در تحلیل‌ها وارد نمی‌شوند.

ناحیه ب) وقتی بار به حد معینی رسید، سیگنال‌هایی نسبتاً پرنرژی تولید می‌شوند. این سیگنال‌ها با دامنه نسبتاً بزرگ مربوط به تغییر شکل پلاستیکی و رشد میکروترک‌ها هستند.

ناحیه ج) در این ناحیه سیگنال‌هایی با انرژی بسیار زیاد مشاهده شده، که مربوط به رشد ترک و در نهایت شکست نهایی نمونه است. در این ناحیه به دلیل رشد ناپایدار ترک سیگنال‌هایی با بیشترین انرژی مشاهده می‌شود. به منظور تعیین چقرمگی شکست با روش نشر آوایی، ابتدا با استفاده از نمودار مشخصه‌های سیگنال‌های نشر آوایی، بار بحرانی ( $P_{Q,AE}$ ) تعیین می‌شود. حال با جای‌گذاری بار بحرانی به دست آمده در روابط ارائه شده در استاندارد ASTM E399، مقدار چقرمگی شکست تعیین می‌شود. به منظور یافتن روشی با کارایی و تکرارپذیری بالا برای تعیین بار بحرانی، تحلیل‌های متعددی روی مشخصه‌های مختلف سیگنال‌های نشر آوایی ثبت شده در حین آزمایش، انجام شد. در نهایت در بین مشخصه‌های مختلف سیگنال‌های نشر آوایی، از سه شاخص زیر برای تعیین بار بحرانی استفاده شد:

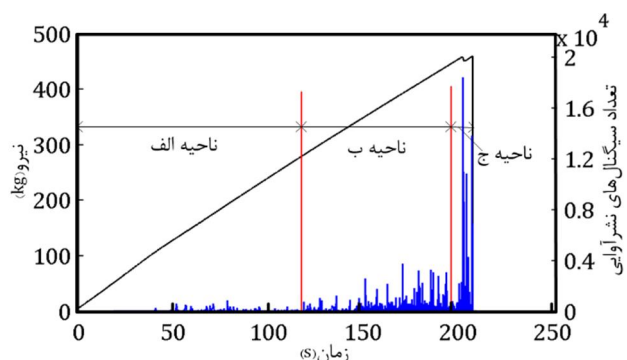
الف) نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی

ب) نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی

ج) انتگرال تابع سنتری

شکل‌های 11 تا 13 نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی در واحد زمان را برای نمونه‌های A، C و E نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های 11 تا 13 مشخص است، نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی در ابتدای آزمایش ناچیز بوده و افزایش جزئی آن در برخی زمان‌ها ناشی از ایجاد تغییر شکل الاستیک در نمونه‌ها است. در نزدیکی‌های بار بیشینه، نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی به‌طور ناگهانی افزایش یافته و تا شکست کامل نمونه، این افزایش ادامه دارد. به‌منظور تعیین بار بحرانی، بار متناظر با اولین افزایش قابل توجه در نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی، به‌عنوان بار بحرانی ( $P_{Q,AE}$ ) آزمایش چقرمگی شکست در نظر گرفته می‌شود. این بار بحرانی در شکل‌های 11 تا 13 نشان داده شده است.

شکل‌های 14 تا 16 نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی را برای نمونه‌های A، C و E نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های 14 تا 16 مشخص است، نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی رفتاری مشابه نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی دارد. به‌منظور تعیین بار بحرانی با این روش، بار متناظر با اولین افزایش قابل



شکل 10 نمودار نیرو-تعداد سیگنال‌های نشر آوایی-زمان برای نمونه B

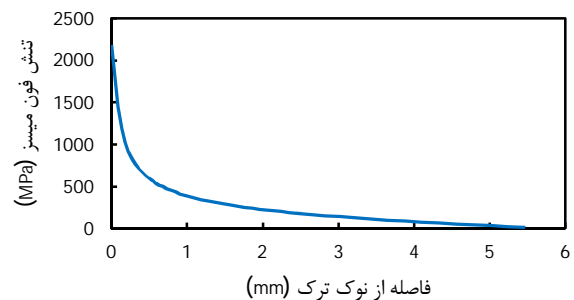
$$r_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $r_p$  برابر شعاع ناحیه پلاستیک جلو نوک ترک است [14].

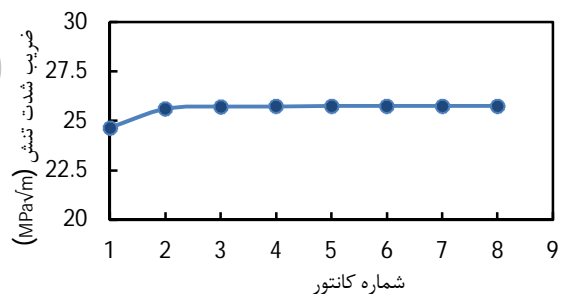
برای محاسبه چقرمگی شکست و بررسی همگرایی نتایج، 8 کانتور در ناحیه نوک ترک در نظر گرفته شد. شکل‌های 8 و 9 چقرمگی شکست به دست آمده با این 8 کانتور را برای نمونه‌های A و D نشان می‌دهد. جدول 4، مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده توسط روش المان محدود را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

### 3-3- تعیین چقرمگی شکست به روش نشر آوایی

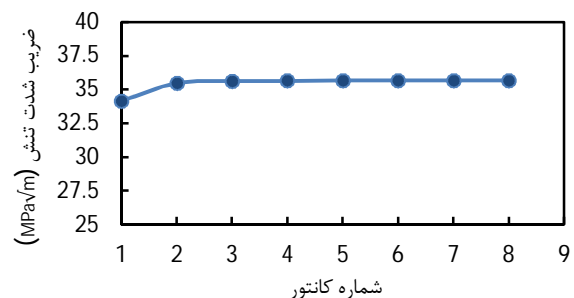
در این پژوهش علاوه بر به دست آوردن چقرمگی شکست با روش استاندارد ASTM E399 و روش المان محدود، از روش نشر آوایی نیز برای به دست ناحیه الف) در این ناحیه، نمونه B هنوز در ناحیه تغییر شکل الاستیک بوده و



شکل 7 توزیع تنش فون میسز در ناحیه جلو نوک ترک برای نمونه B



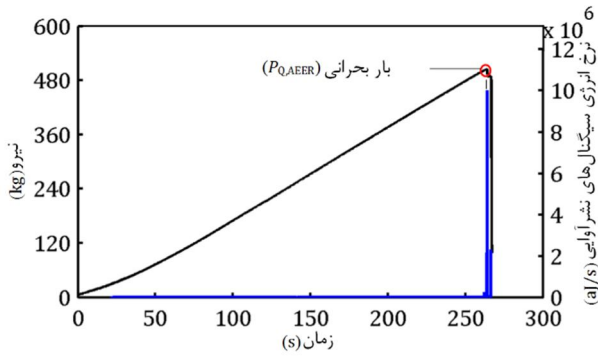
شکل 8 مقادیر به دست آمده برای چقرمگی شکست نمونه A در کانتورهای مختلف



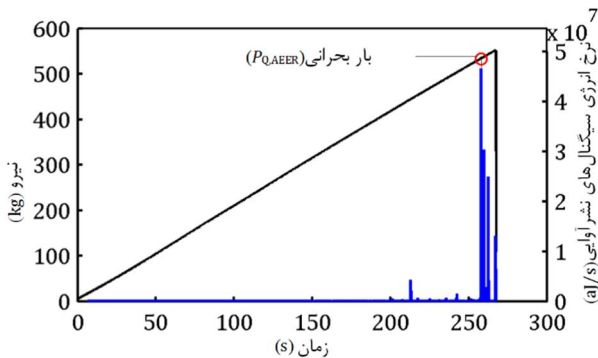
شکل 9 مقادیر به دست آمده برای چقرمگی شکست نمونه D در کانتورهای مختلف

جدول 4 مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌ها با روش المان محدود

نمونه	A	B	C	D	E
$K_{Ic}$ (MPa√m)	25/75	30/64	35/96	35/67	42/00



شکل 15 تعیین بار بحرانی به روش نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه C



شکل 16 تعیین بار بحرانی به روش نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه E

جدول 5 مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده با روش‌های نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی و نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی

نمونه				
E	D	C	B	A
$K_{Ic}$ (MPa√m)				
44/23	33/91	34/73	28/91	22/98
نرخ تولید سیگنال نشر آوایی				
46/00	34/16	35/47	29/20	23/29
نرخ انرژی سیگنال نشر آوایی				

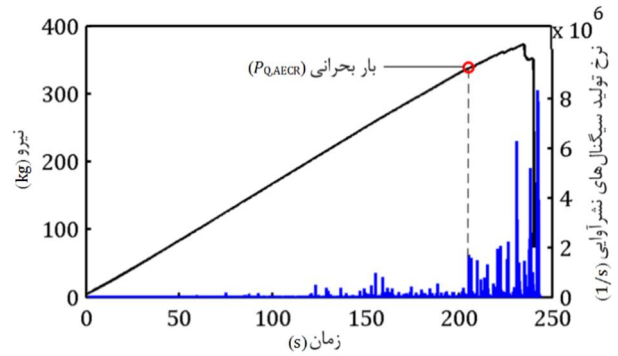
مطابق معادله (4) تابع سنتری به صورت لگاریتم نسبت انرژی مکانیکی به انرژی آکوستیکی بیان می‌شود [14]:

$$f(x) = \ln \left[ \frac{E_s(x)}{E_a(x)} \right] \quad (4)$$

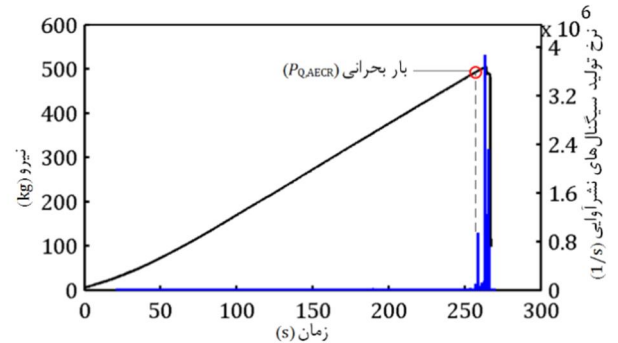
در رابطه (4)،  $E_s(x)$  مجموع انرژی مکانیکی بوده و برابر با سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی تا آن لحظه است.  $E_a(x)$  برابر با مجموع انرژی سیگنال‌های نشر آوایی تا آن لحظه است. بنابراین، این تابع به انرژی کرنشی و انرژی سیگنال‌های نشر آوایی جمع‌آوری شده بستگی داشته و می‌تواند برای مطالعه رفتار ماده مورد استفاده قرار گیرد. در این بخش، از انتگرال تابع سنتری به منظور تعیین چقرمگی شکست استفاده می‌شود. انتگرال تابع سنتری با معادله (5) تعریف می‌شود [16,17]:

$$\text{Int}(f) = \int f(x) dx \quad (5)$$

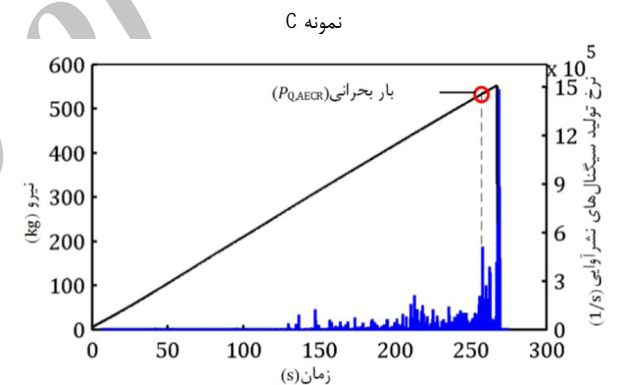
مطابق شکل‌های 17 و 18، با رسم مقادیر چقرمگی شکست تجمعی بر حسب انتگرال تابع سنتری، مشخص است که مقادیر انتگرال تابع سنتری با چقرمگی شکست تجمعی نمونه رابطه‌ای مستقیم دارند. دلیل این امر این است که انتگرال تابع سنتری وابسته به مقدار خرابی در ماده بوده و مقدار چقرمگی



شکل 11 تعیین بار بحرانی به روش نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه A

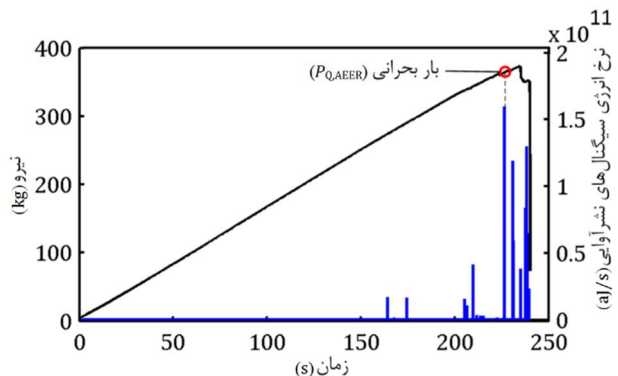


شکل 12 تعیین بار بحرانی به روش نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه C



شکل 13 تعیین بار بحرانی به روش نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه E

توجه در نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی به عنوان بار بحرانی ( $P_{QAEER}$ ) در نظر گرفته می‌شود. بار بحرانی به دست آمده با این روش در شکل‌های 14 تا 16 نشان داده شده است. جدول 5 مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده با این دو روش را نشان می‌دهد.



شکل 14 تعیین بار بحرانی به روش نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی در نمونه A

جدول 6 مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده برای فولاد AISI D2 با روش های

مختلف					نمونه	چقرمگی شکست (K <sub>IC</sub> (MPa√m))
E	D	C	B	A		
46/04	35/28	35/80	29/76	23/77	استاندارد ASTM E399	
46/00	34/16	35/47	29/20	23/29	نرخ انرژی سیگنال های نشرآوایی	
44/23	33/91	34/73	28/91	22/98	نرخ تولید سیگنال های نشرآوایی	
45/07	34/13	35/50	29/04	23/25	انتگرال تابع سنتری	
42/00	35/67	35/96	30/64	25/75	المان محدود	

جدول 7 درصد اختلاف نتایج چقرمگی شکست حاصل از روش های ارائه شده با

روش استاندارد ASTM					نمونه	روش استاندارد ASTM
E	D	C	B	A		
-0/09	-3/17	-0/92	-1/88	-2/02	نرخ انرژی سیگنال های نشرآوایی	
-3/93	-3/88	-2/99	-2/86	-3/32	نرخ تولید سیگنال های نشرآوایی	
-2/11	-3/26	-0/84	-2/42	-2/19	انتگرال تابع سنتری	
-8/77	1/10	0/45	2/96	8/32	المان محدود	

همان طور که در جدول های 6 و 7 مشخص است، روش های نرخ تولید سیگنال های نشرآوایی و تابع سنتری حد پایین چقرمگی شکست را ارائه داده و محتاطانه تر عمل می کنند. نتایج روش نرخ انرژی سیگنال های نشرآوایی بیشترین تطابق را با نتایج استاندارد ASTM E399 دارد. دلیل این امر ایجاد سیگنال های با انرژی بسیار زیاد در لحظه شروع رشد ترک است. در نتیجه نرخ انرژی سیگنال های نشرآوایی در لحظه شروع ترک دارای یک افزایش ناگهانی است. نتایج حاصل از روش المان محدود حد بالای چقرمگی شکست را ارائه می دهد. دلیل این امر این است که در عمل، به دلیل مشکلات ساخت، وجود ناخالصی و عیوب ساختاری در داخل نمونه ها، مقدار چقرمگی شکست نمونه ها پایین تر از مقادیر به دست آمده با روش المان محدود، که در آن ماده به صورت ایده آل و عاری از عیوب در نظر گرفته می شود، قرار می گیرد. داده های جدول 7 بیانگر پایین تر بودن کلیه نتایج به دست آمده از روش نشرآوایی نسبت به روش استاندارد ASTM E399 است. به دلیل حساسیت بالای روش نشرآوایی به میکروخرابی های ایجاد شده در نمونه، به نظر می رسد که روش های مبتنی بر نشرآوایی با قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش استاندارد، ایجاد خرابی و رشد جدایش بین لایه های را در نمونه ها تشخیص می دهد.

همچنین، با توجه به داده های جدول های 2 و 6، با افزایش دمای بازپخت، نمونه نرم تر شده، استحکام کششی آن کاهش یافته و چقرمگی شکست نمونه بیشتر می شود. ولی در دمای 525°C کاهش جزئی چقرمگی شکست مشاهده می شود. این رفتار متفاوت به علت پدیده تشکیل فازهای سخت ثانویه در این نوع فولاد بوده، که این فازهای ثانویه در اثر تبدیل آستنیت باقیمانده در دمای بالا به وجود می آید [19].

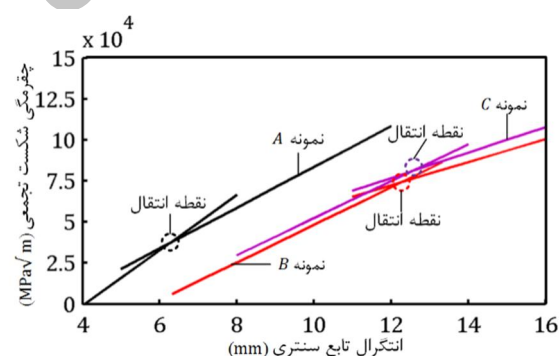
#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش، نمونه های استاندارد CT ساخته شده از ورق های فولاد AISI D2 پس از عملیات حرارتی و بازپخت در دماهای مختلف، براساس استاندارد ASTM E399 آماده سازی شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. چقرمگی شکست

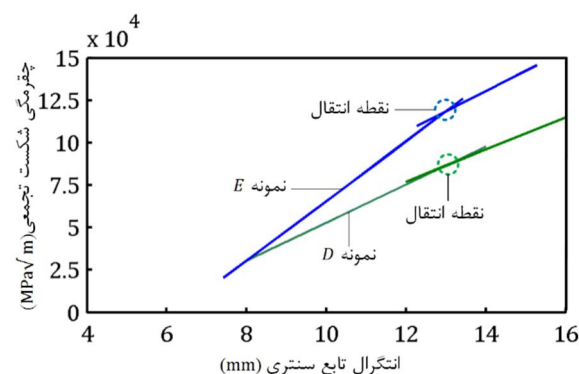
شکست تجمعی بیانگر میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک و ایجاد خرابی های جدید در نمونه است. بنابراین، هر دو مقدار وابسته به خرابی های اتفاق افتاده در نمونه هستند. همان طور که در شکل های 17 و 18 مشخص است، می توان یک رابطه دو خطی بین مقادیر انتگرال تابع سنتری و چقرمگی شکست تجمعی برقرار نمود، به گونه ای که این دو خط همدیگر را در نقطه ای قطع می نمایند. بنابراین، این نقطه بیانگر یک تغییر ناگهانی در رفتار نمونه تحت بارگذاری است. براساس تحقیقات قبلی محققین [18]، این نقطه بیانگر لحظه شروع رشد ترک در نمونه است. برای تمامی نمونه ها شیب دو خط قبل و بعد از نقطه انتقال با یکدیگر تفاوت دارند. مقدار تغییر شیب به مقاومت ماده در برابر رشد ترک بستگی دارد. با توجه به شکل های 17 و 18، مقاومت در برابر رشد ترک برای نمونه های مختلف بعد از نقطه انتقال کاهش می یابد. با توجه به این نتایج، با استفاده از نمودار چقرمگی شکست تجمعی-انتگرال تابع سنتری، می توان مقدار چقرمگی شکست نمونه ها (K<sub>IC</sub>) را تعیین نمود.

برای تعیین چقرمگی شکست با این روش، بدین صورت عمل می شود که با مشخص نمودن نقطه انتقال در نمودار چقرمگی شکست تجمعی-انتگرال تابع سنتری، مقدار انتگرال تابع سنتری مشخص شده، سپس با استفاده از انتگرال تابع سنتری، مقدار جابه جایی به دست آمده و با استفاده از این جابه جایی، در نمودار بار-جابه جایی مقدار بار بحرانی تعیین می شود. یا قرار دادن بار بحرانی در رابطه (1) چقرمگی شکست مشخص می شود.

جدول 6، مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده برای فولاد AISI D2 با روش های مختلف را نشان می دهد. با در نظر گرفتن روش استاندارد ASTM به عنوان مبنا، درصد اختلاف سایر روش ها با این روش، در جدول 7 نشان داده شده است.



شکل 17 رابطه بین انتگرال تابع سنتری و چقرمگی شکست تجمعی نمونه های A، B و C



شکل 18 رابطه بین انتگرال تابع سنتری و چقرمگی شکست تجمعی نمونه های D و E

- [4] ASTM E399, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K<sub>IC</sub> of Metallic Materials, ASTM Standards, New York, 2001.
- [5] R. K. Miller, *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing*, 5 ed., American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [6] M. Arii, H. Kashiwaya, T. Yanuki, Slow crack growth and acoustic emission characteristics in COD test, *Engineering Fracture Mechanics Journal*, Vol. 7, pp. 551-552, 1975.
- [7] M. N. Bassim, S. S. Lawrence, C. D. Liu, Detection of the onset of fatigue crack growth in rail steels using acoustic emission, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 47, pp. 207-214, 1994.
- [8] M. N. Bassim, Detection of fatigue crack propagation with acoustic emission, *NDT & E International Journal*, Vol. 25, pp. 287-289, 1992.
- [9] C. K. Mukhopadhyay, K. V. Kasiviswanathan, T. Jayakumar, B. Raj, Acoustic emission during tensile deformation of annealed and cold worked AISI type 304 austenitic stainless steel, *Journal of Materials Science*, Vol. 28, pp. 145-154, 1993.
- [10] H. Roy, N. Parida, S. Sivaprasad, S. Tarafder, K. K. Ray, Acoustic emissions during fracture toughness tests of steels exhibiting varying ductility, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 486, pp. 562-571, 2008.
- [11] T. Ohira, Y. H. Pao, Microcrack initiation and acoustic emission during fracture toughness tests of A533B steel, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 17, pp. 843-852, 1986.
- [12] M. Fotouhi, C. Teymuri, M. Ahmadi, F. Pashmforoush, Fracture characteristics of AISI D2 tool steel at different tempering temperatures using acoustic emission and fuzzy c-means clustering, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 38, pp. 2205-2217, 2013.
- [13] ASTM E8-01, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, New York, Vol. 03.01, 2001.
- [14] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, USA: Taylor & Francis, pp. 61-62, 2005.
- [15] J. Yousefi, M. Hajikhani, M. Ahmadi, M. Nazmdar, H. Omidvar, A. Sharifi, Investigation of progressive damage and residual strength of the sandwich panels under loading in the center using Acoustic Emission, *1st Conference of Iranian Aircraft Structural Integrity Program*, Tehran, 2011. (In Persian)
- [16] A. Refahi Oskouei, A. Zucchelli, M. Ahmadi, G. Minak, An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode II in composite laminate, *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 1444-1455, 2010.
- [17] M. Fotouhi, *Investigation of delamination in composite materials during drilling using acoustic emission*, MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2011. (In Persian)
- [18] A. Refahi Oskouei, *Investigation of Delamination in Glass/Polyester composites using Acoustic Emission*, Ph.D Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2010. (In Persian)
- [19] M. A. Golozar, *Principles and Applications of Heat Treatment of Steels*, Isfahan: Isfahan university of technology, pp. 370-387, 2009. (In Persian)

نمونه‌ها با استفاده از روش‌های استاندارد ASTM E399، المان محدود و نشر آوایی تعیین شد. سپس، نتایج حاصل از روش نشر آوایی با روش المان محدود و روش ارائه شده در استاندارد ASTM E399 مقایسه شد و تطابق خوبی بین نتایج روش نشر آوایی با دو روش دیگر ملاحظه شد. با توجه به نتایج به دست آمده برای چقرمگی شکست نمونه‌ها، در بین پارامترهای مختلف سیگنال‌های نشر آوایی، نتایج حاصل از روش نرخ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی، نزدیک‌ترین نتایج را به روش استاندارد ارائه می‌دهد. روش‌های نرخ تولید سیگنال‌های نشر آوایی و تابع سنتزی حد پایین مقادیر چقرمگی شکست را نتیجه داده و روش المان محدود حد بالای چقرمگی شکست را ارائه می‌دهد. همچنین، با بررسی مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده برای نمونه‌ها با دماهای بازپخت مختلف، مشخص شد که با افزایش دمای بازپخت، چقرمگی شکست در فولاد ابزار AISI D2 بیشتر می‌شود. ولی، در دمای 525°C، به علت تشکیل فازهای سخت ثانویه در ساختار فولاد، کاهش جزئی در چقرمگی شکست مشاهده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش نشر آوایی می‌تواند، به‌عنوان روشی مناسب، برای تعیین چقرمگی شکست استفاده شود.

#### 5- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به‌خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

#### 6- مراجع

- [1] L. Bourithis, G. D. Papadimitriou, J. Sideris, Comparison of wear properties of tool steels AISI, D2 and O1 with the same hardness, *Tribology International Journal*, Vol. 39, pp. 479-489, 2006.
- [2] D. Dasa, A. K. Dutt, K. K. Ray, Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI, D2 Steel, *Wear Journal*, Vol. 266, pp. 297-309, 2009.
- [3] X. Ma, R. Liu, D. Y. Li, Abrasive wear behaviour of D2 tool steel with respect to load and sliding speed under dry sand/rubberwheel abrasion condition, *Wear Journal*, Vol. 241, pp. 79-85, 2000.