

## بررسی تجربی و عددی تعیین ضریب شدت تنش نوک ترک در صفحه دارای گشودگی دایره‌ای از جنس فولاد Ck45

امین صابر<sup>۱</sup>، محمود شریعتی<sup>۲</sup>، کمال کلاسنگانی<sup>۲</sup>  
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

### چکیده

بررسی میدان تنش در اطراف گشودگی و تأثیر آن بر روی ضریب شدت تنش نوک ترک حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های تجربی در شرایط بارگذاری دینامیکی و با استفاده از کرنش‌سنج به روش DS، به محاسبه ضریب شدت تنش مود I در نوک ترک در ورق دارای گشودگی دایره‌ای پرداختیم. همچنین سعی شد تأثیر قطر گشودگی و موقعیت آن نسبت به نوک ترک را در ضریب شدت تنش نوک بررسی شود. سپس با استفاده از روش اجزای محدود توسعه‌یافته به شبیه‌سازی مسئله و محاسبه ضریب شدت تنش نوک ترک در نرم‌افزار آباکوس پرداختیم. نتایج به‌دست‌آمده برای از آزمایش تجربی و روش اجزای محدود از تطابق خوبی برخوردار بودند که دقت و اعتبار روش اجزای محدود توسعه‌یافته را در محاسبه ضریب شدت تنش نوک ترک تحت اثر گشودگی و بار اعمالی خستگی را تأیید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب شدت تنش - روش DS - بارگذاری خستگی - گشودگی دایره‌ای - روش اجزای محدود توسعه‌یافته - فولاد Ck45

۱- دانشجوی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

۲- استاد، ۰۵۱-۳۸۸۰۵۱۵۹، [mshariati44@um.ac.ir](mailto:mshariati44@um.ac.ir) (نویسنده مخاطب)

۳- دانشجوی دکتری مکانیک گرایش مکانیک جامدات

### مقدمه

در مکانیک شکست تجربی، روش‌هایی بر پایه استفاده از کرنش به‌منظور مشخص نمودن فاکتورهای شدت تنش، دارای کاربرد وسیعی مانند سایر روش‌ها از جمله روش فتوالاستیسیته می‌باشد. تسلیم موضعی، تغییرات زیاد کرنش، تأثیرات سه‌بعدی بودن کرنش در نوک ترک و همچنین موقعیت قرار دادن کرنش‌سنج بر روی نمونه از جمله مشکلات استفاده از کرنش‌سنج برای تعیین ضریب شدت تنش می‌باشند.

دالی (Dally) و سن فورد (Sanford) [۱] یک روش مؤثر و کارآمد با غلبه بر مشکلات پیش روی استفاده از کرنش‌سنج، برای محاسبه ضریب شدت تنش مود I با به‌کارگیری یک عدد کرنش‌سنج معرفی کردند. روش‌های مختلف دیگری برای محاسبه ضریب شدت تنش بر مبنای استفاده از کرنش‌سنج توسط سایر محققان معرفی شده است [۲ و ۳]. مورسی (Murthy) با انجام آزمایش‌های تجربی صحت و دقت روش DS را بررسی نمود و فاصله شعاعی مناسب کرنش‌سنج را نسبت نوک ترک به‌منظور معتبر بودن نتایج به‌دست‌آمده را به دست آورد [۴]. در میان روش‌های موجود برای محاسبه ضریب شدت تنش بر پایه استفاده از کرنش‌سنج، روش DS به دلیل سادگی و دقت بالا، دارای کاربرد وسیع‌تری می‌باشد [۲]

لذا در این پژوهش به‌منظور محاسبه ضریب شدت تنش مود I از روش DS استفاده شده است.

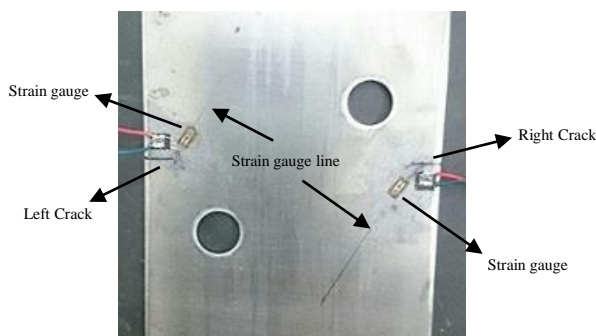
### مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت بررسی اثر وجود گشودگی دایره‌ای با قطر و موقعیت متفاوت نسبت به نوک ترک، بر روی ضریب شدت تنش نوک ترک، از ورق‌های فولادی Ck45 استفاده شده است. هندسه مسئله به‌صورت یک ورق مستطیلی به ترتیب به طول ۳۰۰ میلی‌متر، عرض ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد که ورق‌ها دارای دو ترک لبه‌ای در وسط طول مستطیل و هر کدام به طول ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. درون هر ورق مستطیلی دو گشودگی دایره‌ای با قطر و موقعیت متفاوت نسبت به نوک ترک ایجاد شده است (جدول ۱). مطابق شکل ۱ به‌منظور ثبت کرنش در اطراف نوک ترک از سیستم کرنش‌سنج، شامل کرنش‌سنج TML-2 ساخت کشور ژاپن که قابلیت اندازه‌گیری کرنش در ناحیه پلاستیک و تا حدود ۱۵٪ می‌باشد، استفاده شده است. جهت اعمال بار خستگی، از دستگاه سروهیدرولیک Zwich/roell با ظرفیت ۱۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. خواص مکانیکی Ck45 با استفاده از تست کشش و مطابق بر استاندارد ASTM-E8 به‌دست‌آمده که در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی

h <sub>2</sub> (mm)	h <sub>1</sub> * (mm)	d <sub>2</sub> (mm)	d <sub>1</sub> (mm)	نمونه
۲۵	۲۵	۱۰	۱۵	نمونه ۱
۲۵	۲۰	۱۵	۱۵	نمونه ۲
۲۵	۱۵	۲۰	۱۵	نمونه ۳

\*h<sub>1</sub> فاصله عمودی مرکز گشودگی تا نوک ترک می‌باشد.



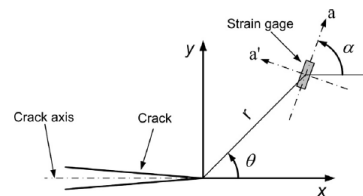
شکل ۱- هندسه نمونه ۲ به همراه کرنش‌سنج نصب‌شده به آن

## جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد Ck45

تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	نسب پواسون
۳۱۳	۶۵۸	۲۰۰	۰,۳

### مبانی نظری

با در نظر گرفتن موقعیت کرنش سنج نسبت به نوک ترک همانند شکل ۲ و با استفاده از روابط وسترگارد (Westergaard) می‌توان نشان داد که کرنش  $\epsilon_{aa}$  در یک نقطه مانند P که با مختصات  $r$  و  $\theta$  مشخص می‌شود، در شرایط تنش صفحه‌ای از فرمول (۱) به دست می‌آید [۵ و ۲]:



شکل ۲- موقعیت کرنش سنج در روش DS

$$2G\epsilon_{aa} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[ \kappa \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \sin 2\alpha \right] \quad (1)$$

که در آن مقادیر  $\theta$ ،  $\alpha$  و  $\kappa$  از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\kappa = \frac{1 - \nu}{1 + \nu} \quad (2)$$

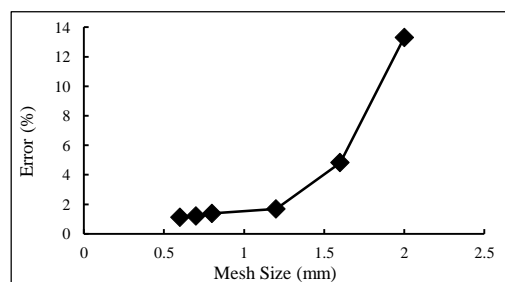
$$\cos 2\alpha = -\kappa \quad (3)$$

$$\tan \frac{\theta}{2} = -\cot 2\alpha \quad (4)$$

با توجه به روابط (۲) تا (۴) مقادیر  $\alpha$  و  $\theta$  به ترتیب برابر با ۶۱,۲۳ درجه و ۶۵,۱۵ درجه به دست می‌آیند.

### حل عددی

برای شبیه‌سازی مسئله و محاسبه ضریب شدت تنش در نرم‌افزار آباکوس از روش اجزای محدود توسعه‌یافته استفاده شده است. در این روش نمونه تحت بار خستگی قرار گرفته و مقدار ضریب شدت تنش تا لحظه آغاز رشد ترک محاسبه شده است. همچنین به منظور بررسی همگرایی مش بندی، میزان نرخ انرژی کرنشی آزاد شده محاسبه شده در لحظه رشد ترک برای نمونه به شکل ورق مستطیلی دارای ترک در مرکز صفحه، در مش بندی با سایزهای متفاوت محاسبه شده و با مقدار به دست آمده از رابطه تحلیلی مقایسه شده و مقدار خطای آن محاسبه شده است. نتیجه بررسی همگرایی مش در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل برای اندازه مش‌های کمتر از ۱ میلی‌متر، همگرایی مش مشاهده می‌شود.



شکل ۳- درصد خطای مقدار محاسبه شده نرخ انرژی آزاد شده در لحظه شروع ترک برای مش با اندازه‌های مختلف در مقایسه با مقدار تحلیلی

### نتایج و بحث

با توجه به مقادیر ضریب شدت تنش به دست آمده از نتایج تجربی و عددی که در جدول ۳ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که حل عددی با استفاده از روش اجزای محدود توسعه‌یافته به خوبی قادر به پیش‌بینی ضریب شدت تنش برای هندسه مورد نظر می‌باشد. همچنین وجود گشودگی دایره‌ای با قطر و موقعیت متفاوت نسبت به نوک ترک با ایجاد یک میدان تنش در اطراف خود، بر روی میدان تنش نوک ترک تأثیر گذاشته باعث افزایش مقدار ضریب شدت تنش در نوک ترک شده که این پدیده می‌تواند موجب رشد ترک در تعداد سیکل‌های پایین‌تر و همچنین تغییر مسیر رشد ترک شود. همچنین با توجه به جدول ۱ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت در شرایط برابر تأثیر اندازه گشودگی بر روی ضریب شدت تنش، بیشتر از تأثیر موقعیت گشودگی بر روی مقدار ضریب شدت تنش می‌باشد.

### جدول ۳- مقادیر ضریب شدت تنش به دست آمده از نتایج تجربی و عددی

ضریب شدت تنش مود I	بر حسب MPa					
	نمونه ۱		نمونه ۲		نمونه ۳	
تجربی	ترک	ترک	ترک	ترک	ترک	ترک
عددی	ترک	ترک	ترک	ترک	ترک	ترک
درصد خطا	سمت راست	چپ	سمت راست	چپ	سمت راست	چپ
	۳۴,۷۴	۳۴,۲۵	۳۶,۶۴	۳۷,۴۵	۳۹,۵۷	۳۸,۵۴
	۳۴,۳۱	۳۳,۷۲	۳۷,۲۹	۳۸,۳۱	۴۰,۹۸	۳۶,۶۸
	۱,۲۳	۱,۵۴	۱,۷۷	۲,۲۹	۳,۵	۴,۸

### نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های تجربی جهت به دست آوردن ضریب شدت تنش نوک ترک در ورق دارای گشودگی دایره‌ای، توسط کرنش سنج و به روش DS و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از روش شبیه اجزای محدود توسعه‌یافته می‌توان نتیجه گرفت که روش اجزای محدود توسعه‌یافته به خوبی قادر به پیش‌بینی ضریب شدت تنش و همچنین مسیر رشد ترک می‌باشد. مشاهده شد که وجود گشودگی دایره‌ای باعث ایجاد یک میدان تنش شده، که بر میدان تنش نوک ترک اثر می‌گذارد و موجب افزایش ضریب شدت تنش در نوک ترک می‌شود.

### مراجع منتخب

- [1] Dally, J. W., and R. J. Sanford. "Strain-gage methods for measuring the opening-mode stress-intensity factor, K I." *Experimental Mechanics* 27.4 (1987): 381-388.
- [2] Kuang, J. H., and L. S. Chen. "A single strain gage method for K I measurement." *Engineering fracture mechanics* 51.5 (1995): 871-878.
- [3] Dorogoy, A., and D. Rittel. "Optimum location of a three strain gauge rosette for measuring mixed mode stress intensity factors." *Engineering Fracture Mechanics* 75.14 (2008): 4127-4139.
- [4] Sarangi, H., K. S. R. K. Murthy, and D. Chakraborty. "Experimental verification of optimal strain gage locations for the accurate determination of mode I stress intensity factors." *Engineering Fracture Mechanics* 110 (2013): 189-200.
- [5] Sarangi, H., K. S. R. K. Murthy, and D. Chakraborty. "Optimum strain gage location for evaluating stress intensity factors in single and double ended cracked configurations." *Engineering Fracture Mechanics* 77.16 (2010): 3190-3203.