

## بررسی قطعه E شکل جهت تعیین چقرمگی شکست مواد در بارگذاری برشی

علی اسد کرمی و مجید رضا آیت اللهی

**چکیده:** در این مقاله یکی از قطعات متداول برای محاسبه چقرمگی شکست در بارگذاری مود ۲ موسوم به قطعه E شکل مورد بررسی قرار می گیرد. به این منظور قطعه مورد نظر توسط روش اجزاء محدود مدلسازی شده و ضرایب شدت تنش آن محاسبه می شود. در تحقیقات قبلی انجام شده بر روی این نمونه فرض شده است که به هنگام آزمایشهای استاندارد شکست قطعه در حالت بارگذاری مود ۲ خالص قرار دارد. منتها نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر نشان می دهد که در این قطعه علاوه بر تغییر فرمهای ناشی از مود ۲، مقدار قابل ملاحظه ای از اثرات مود ۱ نیز موجود می باشد. برای تخمین میزان خطای ناشی از نتایج تست وقتی که اثر مود ۱ منظور نمی شود، معیار شکست حداکثر تنش مماسی مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج محاسبات مربوطه نشان می دهد که چقرمگی شکست به دست آمده از آزمایش روی قطعه E شکل از خطای قابل توجهی برخوردار خواهد بود مگر آنکه تغییر فرم های ناشی از مود ۱ نیز در نتایج آزمایش منظور گردد. در خاتمه برای تعیین مقدار صحیح چقرمگی شکست مود ۲ اصلاحاتی روی نحوه انجام آزمایش در قطعه E شکل پیشنهاد می شود.

**واژه‌های کلیدی:** قطعه E شکل، چقرمگی شکست مود ۲، روش اجزاء محدود، معیار حداکثر تنش مماسی

### ۱. مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در پیش بینی شکست قطعات ترکدار، چقرمگی شکست می باشد. اگرچه پارامتر مذکور جزوخواص ماده محسوب می شود، تحت مودهای مختلف بارگذاری مقدار استحکام شکست یک ماده تغییر می کند. برای تعیین چقرمگی شکست، لازم است که از قطعات ترکدار استاندارد و آزمایشهای شکست مناسب استفاده کرد [1]. بعنوان مثال برای تخمین حد استحکام ترک هایی که تحت بار برشی خالص قرار می گیرند، مقدار چقرمگی شکست در مود ۲ مورد نیاز می باشد. مروری بر منابع نشان می دهد که بررسی پارامترهای ترک در قطعات استاندارد جهت تعیین چقرمگی شکست، چه بصورت تحلیلی و یا عددی بیشتر بر روی نمونه هایی که تحت بارگذاری مود اول هستند انجام پذیرفته است. با این وجود مطالعات محدودی در خصوص مود ۲ شکست نیز انجام گرفته است. به عنوان مثال می توان از قطعه طراحی شده توسط بانکزسیلز و آرکان [2] نام برد. ایشان قطعه طراحی شده را به همراه

قیدوبند بارگذاری آن به روش اجزاء محدود مدلسازی کردند. سپس رابطه بین ضریب شدت تنش و مقدار بار برشی را محاسبه نموده و از رابطه بدست آمده در این قسمت به اندازه گیری چقرمگی شکست در حالت مود ۲ به روش آزمایشگاهی پرداختند. بانکزسیلز و آرکان [2] همچنین با استفاده از پارامترهای شکست محاسبه شده به روش اجزاء محدود و به کمک تئوری ماکزیمم تنش مماسی<sup>1</sup> [3]، مقدار تنش بحرانی و امتداد شروع شکست را تخمین زده و نهایتاً جوابهای حاصل را با جوابهای آزمایشگاهی مقایسه نمودند.

به طور مشابه ریچارد [4] قطعه دیگری با عنوان نمونه فشرده برشی<sup>۲</sup> را برای محاسبه چقرمگی شکست در حالت مود ۲ طراحی و معرفی نمود. وی با استفاده از قطعه پیشنهادی خود و قید و بندهای مناسب بارگذاری، نتایج مربوط به ضریب شدت تنش مود ۲ در این نمونه را برای طول ترک های مختلف ارائه کرد. مایلزو گلدوین [5] از قطعه یک ترکه منگنه ای<sup>۳</sup> برای محاسبه چقرمگی شکست مود ۲ با استفاده از روش آزمایشگاهی (تجربی) استفاده نمودند. همچنین گلدوین [6] به طور جداگانه در آزمایشی مشابه به محاسبه

مقاله در تاریخ ۱۳۸۱/۱۰/۸ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۱۸ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر مجید رضا آیت اللهی دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و

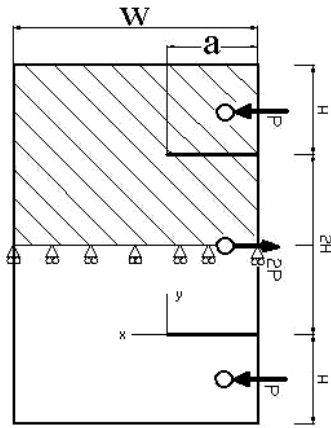
صنعت/ایران، [m.ayat@iust.ac.ir](mailto:m.ayat@iust.ac.ir)

علی اسد کرمی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

<sup>1</sup> Maximum Tangential Stress

<sup>2</sup> Compact Shear Specimen

<sup>3</sup> Single Crack Punch Specimen



شکل ۱. هندسه دوبعدی و بارگذاری قطعه E شکل

متداول ترین روش برای بررسی این موضوع که آیا قطعه مورد نظر می تواند بارگذاری مود ۲ خالص را فراهم آورد یا خیر، استفاده از روش اجزاء محدود می باشد. به این منظور ابتدا مدل مناسبی از نمونه ترکدار در نرم افزار اجزاء محدود ایجاد می شود. سپس مقادیر ضرایب شدت تنش  $K_I, K_{II}$  تحت یک بار دلخواه محاسبه می گردد. چنانچه مقدار  $K_I$  به دست آمده، بسیار کوچکتر از مقدار  $K_{II}$  باشد می توان قطعه را تحت شرایط مود ۲ خالص در نظر گرفت.

در این مقاله برای محاسبه  $K_I, K_{II}$  در قطعه E شکل از روش انتگرال J استفاده شده است. انتگرال J انتگرالی خطی می باشد که روی هر منحنی دلخواه بسته ای که از یک لبه ترک شروع شده و به لبه دیگر آن منتهی می گردد، تعریف می شود و مقدار این انتگرال برای تمامی چنین منحنی هایی ثابت می باشد [12].

در برخی از نرم افزارهای مهم اجزاء محدود مانند نرم افزار ABAQUS [13] (که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است)، مقدار انتگرال J مستقیماً توسط نرم افزار قابل محاسبه می باشد. پس از تعیین مقدار J و با کمک گرفتن از رابطه موجود بین J و ضرایب شدت تنش، می توان مقدار  $K_I, K_{II}$  را از مجموعه روابط زیر تعیین نمود [13]:

$$K_I = \sqrt{\frac{JE'}{1+R_\Delta^2}} \quad (1)$$

$$K_{II} = R_\Delta K_I \quad (2)$$

که در رابطه بالا  $K_I$  ضریب شدت تنش مود اول و  $K_{II}$  ضریب شدت تنش مود دوم بوده و:

$$R_\Delta = \left[ \frac{u_1(x, 0^+) - u_1(x, 0^-)}{u_2(x, 0^+) - u_2(x, 0^-)} \right] \quad (3)$$

تنش صفحه ای:  $E' = E$  و

کرنش صفحه ای:

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (4)$$

چقرمگی شکست در حالت مود ۲ با استفاده از قطعه دو ترک منگنه ای<sup>۱</sup> پرداخت.

نمونه های دیگری نیز جهت تخمین شکست در مود ۲ تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. بعنوان مثال می توان از نمونه های زیر نام برد: ترک تحت بارچهار نقطه ای ضد متقارن [7,8]، ترک زاویه دار مرکزی تحت بار دو محوری [9] و ترک زاویه دار در استوانه جدار نازک تحت پیچش [10].

قطعه E شکل از دیگر قطعات مرسوم است که برای محاسبه چقرمگی شکست برشی مورد استفاده قرار می گیرد. قطعه مذکور در تحقیقات قبلی توسط جونز و چیشلم [11] بررسی شده است. ایشان با پیش فرض اولیه که این قطعه، مود ۲ خالص را فراهم می آورد، ضریب شدت تنش مود ۲ ( $K_{II}$ ) را در این قطعه از روش تجمع مرزی<sup>۲</sup> محاسبه نمودند. سپس با استفاده از رابطه بدست آمده بین  $K_{II}$  و نیروی برشی سعی در تعیین چقرمگی شکست در چند ماده از طریق آزمایش نمودند. در این مقاله از روش اجزاء محدود، تحلیل جامع تری روی قطعه E شکل انجام گرفته و هر دو ضریب شدت تنش  $K_I, K_{II}$  محاسبه می شوند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که برخلاف فرض اولیه جونز و چیشلم [11] مقدار قابل ملاحظه ای از اثرات مود I در این قطعه موجود است. تاثیرات ناشی از در نظر نگرفتن  $K_I$  روی رفتار شکست ترد در قطعه E شکل نیز مطالعه خواهد شد.

## ۲. قطعه E شکل

### ۲-۱. معرفی قطعه

قطعه E شکل از هندسه ای مستطیلی شکل برخوردار بوده و روی یکی از لبه های آن، دو ترک لبه ای موازی موجود می باشد. تصویر ساده شده ای از قطعه در شکل (۱) مشاهده می شود. با توجه به اینکه بعد سوم قطعه (ضخامت آن) در مقایسه با طول و عرض آن کوچک می باشد و اینکه بارگذاری در قطعه E شکل بطور کلی داخل صفحه آن انجام می گیرد، به طور معمول استفاده از یک مدل دو بعدی برای تحلیل تنش آن قابل قبول می باشد.

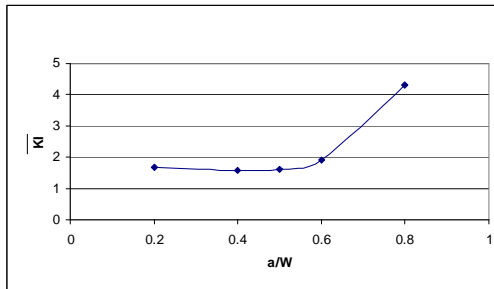
مطابق شکل ۱ برای بارگذاری روی قطعه، سه سوراخ تعبیه شده است. سوراخ میانی به یکی از فک های دستگاه تست کشش متصل می شود و دو سوراخ طرفینی از طریق یک فیکسچر U شکل به فک دیگر دستگاه بسته می شود. با افزایش بار نهایتاً شکست در قطعه حاصل شده و از روی آن چقرمگی شکست ماده مورد آزمایش تحت بارگذاری برشی محاسبه می شود.

<sup>1</sup> Double Crack Punch Specimen

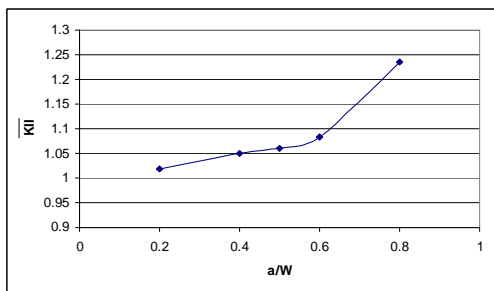
<sup>2</sup> Boundary Collocation Method

$$\bar{K}_i = \frac{K_i}{\sigma_f \sqrt{a}} \quad i = I, II \quad (6)$$

در هر یک از مسائل حل شده توسط نرم افزار، انتگرال  $J$  روی منحنی های بسته اطراف ترک مورد مطالعه قرار گرفت تا پاسخ های به دست آمده برای  $J$  ثابت بوده، مستقل از منحنی انتخابی باشد. شکل های ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات  $\bar{K}_I, \bar{K}_{II}$  را با نسبت طول ترک  $a/W$  نشان می دهند.



شکل ۳. نمودار تغییرات ضریب بی بعد  $\bar{K}_I$  بر حسب طول ترک های مختلف برای قطعه E شکل.



شکل ۴. نمودار تغییرات ضریب بی بعد  $\bar{K}_{II}$  بر حسب طول ترک های مختلف برای قطعه E شکل.

ضرایب شدت تنش تا  $a/W=0.6$  دارای تغییرات چندانی نیستند ولی در  $a/W=0.8$  یک افزایش ناگهانی در هر دو مشاهده می شود. از شکل ۳ معلوم می شود که مقدار  $\bar{K}_I$  در قطعه E شکل همواره از مقدار قابل ملاحظه ای برخوردار است. این نکته را می توان به کمک پارامتر  $R_I$  که نسبت ضریب شدت تنش مود ۲ به ضریب شدت تنش مود ۱ را بیان می کند، به صورت واضح تری نمایش داد. شکل ۵ تغییرات  $R_I$  را با  $a/W$  نشان می دهد. مطابق با این شکل مقدار  $R_I$  برای کلیه طول ترک های بررسی شده کوچکتر از ۱ می باشد. بطور خاص در  $a/W=0.8$  کاهش چشمگیری در مقدار  $R_I$  مشاهده می شود.

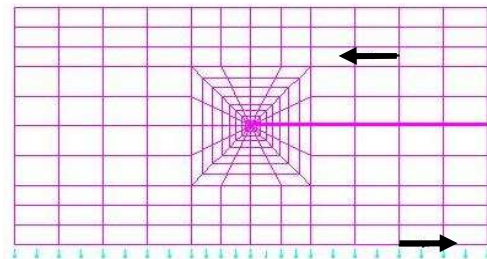
### ۳. بررسی شکست ترد در قطعه E شکل

نتایج ارائه شده در قسمت قبل نشان داد که مقدار ضریب شدت تنش مود ۱ در قطعه E شکل قابل اغماض نمی باشد. لذا وجود

E مدول الاستیسیته و  $\nu$  ضریب پواسون است.  $u_2, u_1$  جابجایی لبه های ترک به موازات وعمود بر امتداد ترک بوده و علائم  $0^+, 0^-$  به ترتیب لبه بالایی و لبه پایینی ترک را مشخص می نمایند. طبق توصیه مرجع [13]،  $R_I$  در نقاطی محاسبه می شود که به اندازه کافی به نوک ترک نزدیک بوده و در عین حال مقدار تقریباً ثابتی را نسبت به  $x$  داشته باشد. شایان ذکر است که مساله با فرض کرنش صفحه ای بررسی شده است.

### ۲-۲. مدلسازی اجزاء محدود

جنس نمونه انتخاب شده، فولاد با مدول الاستیسیته  $E=200\text{GPa}$  و ضریب پواسون  $\nu=0.3$  می باشد. همچنین نیروی متمرکز اعمال شده بر نمونه  $P=2000\text{N}$  است. از شکل ۱ می توان تشخیص داد که هندسه و بارگذاری نمونه نسبت به خط گذرا از وسط دو ترک کاملاً متقارن می باشد. بنابراین برای تحلیل اجزاء محدود قطعه کافی است که نصف آن را در نرم افزار مدلسازی نمود. شکل (۲) تصویری از مش بندی نیمی از قطعه E شکل را نشان می دهد.



شکل ۲. نمایی از المان بندی نیمی از قطعه E شکل و بار اعمالی

برای مدل کردن قطعه از ۲۶۴ المان ۸ گرهی کرنش صفحه ای و ۸۸۱ گره استفاده شده است. به منظور افزایش دقت نتایج اجزاء محدود در اطراف ترک از المان های تکین<sup>۱</sup> استفاده شده است. ابعاد نمونه به صورت  $W=45\text{mm}$  و  $H=25/4\text{mm}$  انتخاب گردید. با توجه به نیروی متمرکز اعمالی و ابعاد نمونه و با فرض ضخامت واحد برای آن، تنش مرجع

$$\sigma_f = \frac{P}{2H} = 39.4 \text{ MPa} \quad (5)$$

برای بی بعد کردن ضرایب شدت تنش به کار گرفته می شود. به منظور بررسی اثرات طول ترک  $a$  روی ضرایب شدت تنش، تحلیل اجزاء محدود برای مقادیر مختلف نسبت طول ترک به عرض قطعه  $a/W = 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$  انجام پذیرفت. برای هر یک از تحلیل های فوق الذکر مقادیر  $K_I, K_{II}$  به کمک روابط (۱) الی (۴) محاسبه شده سپس با استفاده از رابطه زیر بی بعد گردیدند:

<sup>1</sup> Singular elements

بعد  $(P_f)_{II}/(P_f)_{I,II}$  و  $(\theta_0)_{II}/(\theta_0)_{I,II}$  برحسب تغییرات طول ترک در نمونه E شکل بررسی می شوند.

در این پارامترها،  $(P_f)_{II}$  بار بحرانی شکست با فرض مود ۲ خالص و  $(P_f)_{I,II}$  بار بحرانی شکست با فرض موده‌های مخلوط می باشد. همچنین  $(\theta_0)_{II}$  زاویه شروع شکست با فرض مود ۲ خالص و  $(\theta_0)_{I,II}$ ، زاویه شکست با فرض موده‌های مخلوط می باشد. پارامترهای  $(P_f)_{I,II}$  و  $(\theta_0)_{I,II}$  برای شرایط واقعی مساله و با احتساب ضرایب شدت تنش  $K_I, K_{II}$ ، محاسبه می شوند.  $(\theta_0)_{II}$  و  $(P_f)_{II}$  در روابط (۹) و (۱۰) برای حالتی محاسبه می شود که طبق تحقیقات دیگر محققین [مثلاً ۱۱] فرض می شود قطعه تحت مود ۲ خالص بوده و مقدار  $K_I$  صفر است. به عنوان مثال در رابطه (۹) وقتی  $K_I$  برابر صفر فرض می شود، زاویه  $(\theta_0)_{II}$  معادل با  $(\theta_0)_{I,II} = \cos^{-1}(\frac{1}{3}) = 70.5^\circ$  به دست می آید. نتایج حاصله از تغییرات  $(P_f)_{II}/(P_f)_{I,II}$  و  $(\theta_0)_{II}/(\theta_0)_{I,II}$  با طول ترک بدون بعد  $a/W$  در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. از این دو شکل مشاهده می شود که هر دو بار بحرانی و زاویه شروع شکست به میزان قابل ملاحظه ای بستگی به مقدار  $K_I$  داشته و اغماض نمودن از  $K_I$  می تواند به محاسبات غیر دقیقی در نتایج شکست ترد در قطعه E شکل منتهی شود.

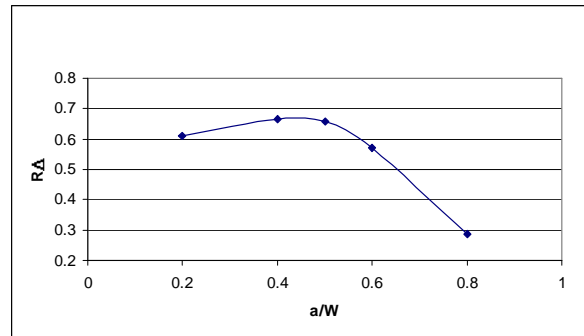
#### ۴. بحث روی نتایج

قطعه E شکل اولین بار توسط جونز و چیشلم [11] طراحی شده و مورد بررسی قرار گرفت. در آن تحقیق برداشت اولیه آن بوده است که با توجه به نوع بارگذاری روی قطعه، در امتداد هر یک از ترک‌ها فقط برش خالص وجود داشته و در نتیجه قطعه برای ایجاد کردن مود ۲ خالص مناسب می باشد.

با همین فرض اولیه، جونز و چیشلم قطعه را از روش تقریبی تجمع مرزی تحلیل نموده و فقط ضریب شدت تنش مود ۲ را در آن محاسبه نمودند. اگرچه ایشان به بررسی وجود ضریب شدت تنش مود ۱ و مقدار احتمالی آن نپرداختند، مقایسه ای بین نتایج بدست آمده در این جا برای  $\overline{K_{II}}$  و نتایج ارائه شده توسط جونز و چیشلم [11] مطابقت بسیار خوبی را بین این دو دسته نتایج نشان می دهد (جدول (۱)). مطابقت خوب بین نتایج می تواند مؤید صحت و دقت تحلیل های اجزاء محدود در تحقیق حاضر نیز باشد.

با این وجود مطالعات دقیقتر انجام گرفته در تحقیق حاضر نشان داد که قطعه E شکل تحت بارگذاری تعریف شده در شکل (۱) دارای اثرات زیادی از مود I نیز می باشد. این نکته به خوبی از نتایج ارائه شده در شکل های ۳ و ۵ مشهود می باشد. براساس منحنی موجود در شکل ۳ مقدار  $\overline{K_I}$  در کلیه مقادیر  $0.2 < a/W < 0.8$  از  $\overline{K_{II}}$  بزرگتر می باشد. لازم به ذکر است که علت وجود میزان قابل ملاحظه مود ۱ در قطعه E شکل می تواند مربوط به اثرات خمشی

$K_I$  در این قطعه می تواند روی رفتار شکست ترد آن تاثیر گذار باشد.



شکل ۵. نمودار تغییرات  $R_A$  بر حسب طول ترک های مختلف برای قطعه E شکل.

در این قسمت یکی از معیارهای مهم موجود برای تخمین شکست ترد در بارگذاری مرکب، موسوم به معیار حداکثر تنش مماسی [3] به کار گرفته شده و میزان خطای ناشی از حذف اثر  $K_I$  در قطعه E شکل مورد مطالعه قرار می گیرد. دو فرضیه موجود در معیار حداکثر تنش مماسی عبارتند از:

الف- گسترش ترک به صورت شعاعی بوده و در امتداد حداکثر تنش مماسی اطراف نوک ترک رخ می دهد.

$$\left. \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0 \quad (7)$$

که  $\theta_0$  امتداد حداکثر تنش مماسی می باشد.

ب- گسترش ترک هنگامی آغاز می شود که مقدار تنش مماسی  $\sigma_{\theta\theta}$  در جهت فوق الذکر به حد بحرانی خود یعنی  $\sigma_{\theta\theta c}$  که بستگی به جنس قطعه دارد برسد:

$$\sigma_{\theta\theta_{max}} = \sigma_{\theta\theta c} \quad (8)$$

با توجه به توزیع تنش اطراف نوک ترک [14]، روابط ۷ و ۸ برحسب ضرایب شدت تنش  $K_I, K_{II}$  به صورت زیر نوشته می شود [3]:

$$\frac{(1 - 3 \cos \theta_0)}{\sin \theta_0} = \frac{K_I}{K_{II}} \quad (9)$$

$$\cos \frac{\theta_0}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] = K_{If} \quad (10)$$

که در رابطه اخیر،  $K_{If}$  چقرمگی شکست ماده در مود ۱ می باشد. حال با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ و پارامترهای  $K_I, K_{II}$  که قبلا محاسبه شده اند می توان به بررسی شکست ترد در قطعه E شکل پرداخت. همانگونه که قبلا اشاره شد، تحقیقات قبلی [11] با فرض قرار داشتن قطعه E شکل در شرایط بارگذاری مود ۲ خالص انجام گرفته است. از این رو در این قسمت اثرات ناشی از فرض فوق بر زاویه شکست و بار بحرانی شکست در قطعه E شکل مورد مطالعه قرار می گیرد. برای حصول هدف مذکور، تغییرات دو پارامتر بدون

نسبت به هم بدون بعد شده و در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شد، نشان می‌دهد که  $K_I$  موجود در قطعه E شکل، اثر کاملاً مشهودی روی رفتار شکست ترد در قطعه مورد بحث می‌گذارد.

بعنوان مثال از شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که برای حالت  $a/W = 0.6$  بار بحرانی شکست با فرض غیر واقعی مود ۲ خالص تقریباً دو برابر بار بحرانی ای است که براساس معیار حداکثر تنش مماسی در عمل می‌توان از قطعه انتظار داشت. اختلاف موجود بین این دو بار بحرانی، برای ترک‌های طولانی تر (مثلاً  $a/W = 0.8$ ) زیادتر می‌شود.

بر مبنای توضیحات فوق، مشخص می‌گردد که قطعه E شکل با شرایط بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱ برای محاسبه چقرمگی شکست در مود ۲ مناسب نمی‌باشد. با این وجود چنانچه بتوان با انجام اصلاحاتی در قطعه، به صورتی اثرات مود ۱ را خنثی نمود می‌توان انتظار داشت که از نتایج آزمایش روی قطعه اصلاح شده، چقرمگی شکست مود ۲ قابل محاسبه گردد. یک روش مناسب برای اصلاح قطعه به این صورت است که بارهای اعمالی روی دو بازوی

کناری قطعه، به صورت زاویه دار به آن وارد شود (مشابه شکل ۸). مؤلفه عمود بر ترک در بار زاویه دار، عملاً سبب می‌شود که تمایل به باز شدن دهانه ترک که در حالت قبلی اتفاق می‌افتاد خنثی شده و لبه‌های ترک نسبت به یکدیگر فقط لغزش داشته باشند. طبیعی است که زاویه مناسب برای فراهم آوردن چنین شرایطی بستگی به طول ترک خواهد داشت. تعیین زاویه  $\alpha$  برای هر طول ترک مشخص بصورت سعی و خطا انجام می‌گیرد. به این منظور یک زاویه دلخواه اولیه در نظر گرفته شده و پس از تحلیل اجزاء محدود، نسبت  $K_I$  به  $K_{II}$  محاسبه می‌شود. با تغییر تدریجی زاویه  $\alpha$ ، مقدار مطلوب زاویه که در ازای آن مقدار  $K_I$  در مقایسه با  $K_{II}$  بسیار ناچیز است تعیین می‌گردد. مقدار مناسب زاویه  $\alpha$  برای هر نسبت  $a/W$  در جدول (۲) مشاهده می‌شود. مقادیر  $K_I$  و  $K_{II}$  و نسبت  $K_I / K_{II}$  در هر مورد نیز در این جدول درج شده است.

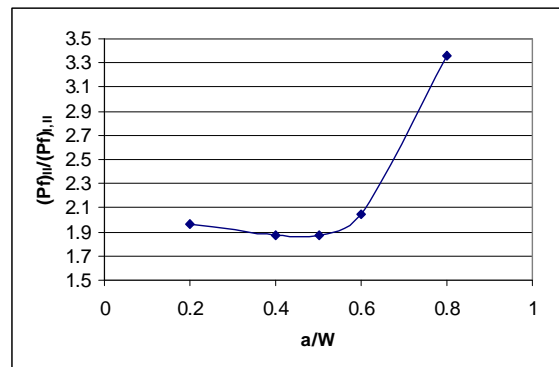
چنانچه فیکسچر بارگذاری روی قطعه بگونه‌ای طراحی شود که بار روی بازوهای جانبی تحت زاویه  $\alpha$  (مطابق جدول (۲)) به آن وارد شود، چقرمگی شکست مود ۲ خالص را می‌توان به کمک قطعه E شکل بدست آورد.

### ۵. نتیجه گیری

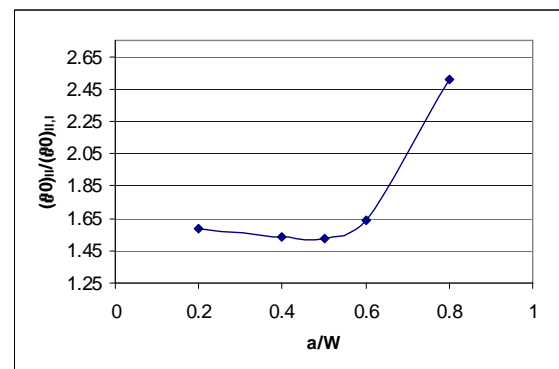
- ۱- مطالعه دقیق روی قطعه E شکل نشان داد که بارگذاری پیشنهاد شده در مرجع [11] مقدار قابل توجهی اثرات مود ۱ را در اطراف ترک به وجود می‌آورد. لذا چنین قطعه‌ای برای آزمایش شکست ترد در بارگذاری تحت مود ۲ خالص مناسب نمی‌باشد.
- ۲- میزان خطای ناشی از صرف نظر کردن از اثرات مود ۱ در قطعه E شکل در محاسبه چقرمگی شکست قطعه غیر قابل اغماض است.

### بررسی قطعه E شکل جهت تعیین چقرمگی شکست مواد در بارگذاری برشی

ای باشد که در دو بازوی کناری قطعه ظاهر شده، سبب باز شدن دهانه ترک‌ها می‌شود. این اثرات خمشی در شکل تغییر فرم یافته قطعه در نرم افزار نیز به وضوح مشاهده گردید.



شکل ۶. نمودار تغییرات بار بحرانی مود ۲ به مدهای مخلوط بر حسب طول ترک‌های مختلف برای قطعه E شکل



شکل ۷. نمودار تغییرات زاویه شروع شکست مود ۲ به مدهای مخلوط بر حسب طول ترک‌های مختلف برای قطعه E شکل

به طور کلی برای محاسبه چقرمگی شکست در قطعات ترک‌دار، ابتدا قطعه تحت بار قرار گرفته و مقدار بار بحرانی شکست از طریق آزمایش تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از روش‌های پیشنهادی در استاندارد و به کمک رابطه موجود بین بار و ضریب شدت تنش، مقدار چقرمگی شکست ماده مورد نظر مشخص می‌شود. فرایند فوق برای شکست ترد در هر یک از مدهای ۱ یا ۲ قابل استفاده می‌باشد. برای بارگذاری مرکب، تعیین چقرمگی شکست توسط معیارهای مناسب موجود در این زمینه انجام می‌شود. یکی از این معیارها که بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است معیار حداکثر تنش مماسی می‌باشد. به منظور بررسی میزان خطایی که به علت منظور نکردن اثر  $K_I$  در قطعه E شکل حاصل می‌شود دو دسته محاسبه انجام پذیرفت. در حالت اول مطابق با مقاله جونز وچیشلم [11] فرض شد که قطعه تحت مود ۲ خالص قرار دارد. در حالت دوم شرایط واقعی مساله مورد توجه قرار گرفته و اثرات  $K_I, K_{II}$  هر دو منظور گردید. نتایج این دو دسته محاسبه که

جدول ۱. نتایج بدست آمده برای  $(\overline{K_{II}})$  در مقایسه با نتایج مرجع [11].

a/W	نتایج جونز و چیشلم $(\overline{K_{II}})$	نتایج تحقیق حاضر $(\overline{K_{II}})$
0.2	1.02	1.03
0.4	1.03	1.05
0.5	1.05	1.06
0.6	1.07	1.08
0.8	1.19	1.23

جدول ۲. پارامترهای شکست محاسبه شده برای قطعه E شکل در طول ترکهای مختلف در حالت بارگذاری زاویه دار.

a/W	$\alpha$	$K_I (MPa\sqrt{mm})$	$K_{II} (MPa\sqrt{mm})$	$K_{II}/K_I$
0.2	78.1	0.577	273.5	474
0.4	79.7	0.148	428.4	2894.6
0.5	80.45	0.348	470.1	1350.8
0.6	80.7	0.832	520	625
0.8	80.55	0.694	832	1198.84

[3] Erdogan, F. and Sih, G.C. "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear" Journal of Basic Engineering, Transaction of ASME, Vol. 85, 1963, PP. 525-527.

[4] Richard, H.A. "A new compact shear specimen" International Journal of Fracture, Vol. 17, 1981, PP. 105-107.

[5] Miles, L. and Gladwin, N. "Evaluation of mode II fracture toughness using single punch specimen" Research Report, CEGB, TD/SIP/121691, 1991.

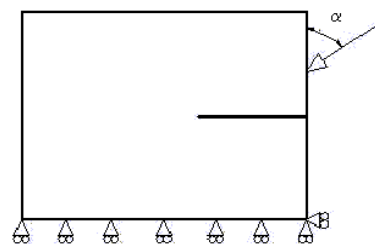
[6] Miles, L. "Development of a mode II fracture toughness testing procedure for an elastic-plastic material", Scientific Service Department, Research Report, CEGB, SSD/SW/R395, 1982.

[7] Maccagno, T.M. and Knott, J.F. "The fracture behavior of PMMA in mixed mode I and II" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 34, No.1, 1989, PP. 65-86.

[8] He, M.Y. and Hutchinson, J.W. "Asymmetric four-point crack specimen," Journal of Applied Mechanics, Vol. 67, 2000, PP. 207-209.

[9] Ueda, Y., Ikeda, K., Yao T. and Aoki, M. "Characteristics of brittle fracture under general combined modes including those under bi-axial tensile loads", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 6, 1983, PP. 1131-1158.

[10] Ewing, P.D. and Williams, J.G. "The fracture of spherical shells under pressure and circular tubes with angled cracks in torsion" International Journal of Fracture, Vol. 10, No. 4, 1974, PP. 537-544.



شکل ۸. اصلاح شرایط بارگذاری جهت ایجاد مود ۲ خالص

بهمین دلیل نتایج تست شکست، مقدار واقعی چقرمگی شکست مود ۲ در ماده مورد نظر را تعیین نمی کند.

۳- با اصلاح فیکسچر بارگذاری بگونه ای که بار اعمالی با زاویه مناسبی به قطعه وارد شود می توان اثرات ناشی از مود ۱ را خنثی نموده، شرایط لازم برای آزمایش شکست مود ۲ خالص را فراهم نمود.

### مراجع

[1].ASTM Standard, vol. 3.01, *Metal Mechanical Testing*, ASTM, 2002.

[2] Banks-Sills, L. and Arcan, M. "A compact mode II fracture specimen," *Fracture Mechanics*, ASTM STP 905, Philadelphia, 1986, PP. 347-363.

[13] ABAQUS, V 5.7 ,User's Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, Rhode Island,1997.

[14] Anderson, T. L. "*Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*" CRC Press, 1995.

[11] Jones, D.L and Chisholm, D.B. "*An investigation of the edge-sliding mode in fracture mechanics*" Experimental Mechanics, Vol. 7, 1975, PP. 261-270.

[12] Rice, J.R. "*A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*" Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, PP. 379-386.