

شکست ترد در شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی، تحت بارگذاری مد I خالص

علیرضا ترابی^۱، شهاب امینی نژاد^۲

آزمایشگاه تحقیقاتی شکست، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

چکیده

در پژوهش حاضر، آزمایش های شکست بر روی نمونه های آزمایشگاهی دیسک برزیلی، دارای شیار V شکل با سوراخ انتهایی و از جنس پلاکسی گلاس (PMMA)، در حالت بارگذاری مد I خالص انجام گردیده و بار شکست نمونه ها برای هندسه های مختلف شیار، توسط دستگاه ثبت شد. مقادیر بار شکست بدست آمده از آزمایش ها، به کمک تحلیل اجزاء محدود به پارامترهای بحرانی میدان تنش در اطراف نوک شیار تبدیل گردید. به کمک این میدان تنش، مقادیر تجربی چقرمگی شکست شیار مربوط به هر نمونه، از طریق روابط مربوطه محاسبه شد. جهت پیش بینی مقادیر چقرمگی شکست شیار بدست آمده از آزمایش، دو معیار شکست ترد به نام های تنش نقطه ای و تنش متوسط مد نظر قرار گرفته و مقادیر چقرمگی شکست شیار برای هندسه های مختلف آزمایش شده، از طریق این دو معیار محاسبه گردید. از مقایسه مقادیر تجربی چقرمگی شکست شیار و مقادیر بدست آمده از دو معیار مفروض، مشخص گردید که با افزایش زاویه دهانه شیار، در مجموع دقت معیار تنش متوسط نزول کرده و درصد اختلاف مقادیر تئوری و تجربی افزایش می یابد. به علاوه، نشان داده شد که، هر دو معیار تنش نقطه ای و تنش متوسط در پیش بینی چقرمگی شکست شیار، دارای متوسط خطای کمتر از ۹٪ می باشند که بیانگر کارایی بسیار خوب این دو معیار شکست می باشد.

واژه های کلیدی

شکست ترد- شیار V شکل با سوراخ انتهایی- بارگذاری مد I خالص- معیار تنش نقطه ای- معیار تنش متوسط

مقدمه

شیارها از مهمترین ناپیوستگی های موجود در قطعات مهندسی می باشند. شیارها در طراحی قطعات تشکیل دهنده سازه های هوا فضایی جایگاه ویژه ای داشته و به وفور مورد استفاده قرار می گیرند. به دلیل حساسیت بالای این سازه ها، سلامت آنها باید تحت بارهای مختلف تضمین گردد. شیارها بسته به هندسه شان، تمرکز تنش را در اطراف خود بالا برده و ظرفیت تحمل بار قطعه شیاردار را کاهش می دهند. در رابطه با شکست قطعات شیاردار، به شکست قطعات ترد، همواره توجه خاصی شده است. زیرا در این قطعات، به دلیل ماهیت ترد ماده، لحظه شروع ترک از نوک شیار، همان لحظه شکست ناگهانی قطعه می باشد. در رابطه با شیارهای V شکل که از جمله پر کاربردترین شیارها در قطعات و سازه های مهندسی می باشند، به دلیل تمرکز تنش بالایی که در اطراف نوک آنها به وجود می آید، امکان شروع ترک از نوک این شیارها بالا است. به منظور جلوگیری از رشد ترک به وجود آمده و شکست قطعه، لازم است فرآیند تعمیراتی جهت برداشتن ترک

و کاهش تمرکز تنش در ناحیه بحرانی انجام گیرد. در رابطه با ترک هایی با طول کوتاه، فرآیند تعمیراتی غالب به این صورت است که با ایجاد یک سوراخ متوقف کننده، برداشت ترک از اطراف شیار صورت می گیرد. با این کار، عملاً شیار V شکل اولیه به صورت شیار V شکل با سوراخ انتهایی در می آید. قاعدتاً، طراحی اولیه انجام شده برای قطعه بر مبنای شیار V شکل بوده و اکنون با تغییر هندسه شیار، حداکثر بار قابل تحمل توسط قطعه دچار تغییراتی خواهد شد. ارزیابی استحکام شیار جدید در برابر بارهای وارده، در تداوم عملکرد صحیح سازه امری ضروریست. حوزه شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی، از جدیدترین حوزه های مکانیک شکست شیار می باشد که در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

عمده پژوهش های انجام گرفته در رابطه با این نوع شیارها توسط Berto, Zappalorto و Lazzarin بوده است. نخستین پژوهش توسط Zappalorto و Lazzarin [۱] انجام گرفته است. در این پژوهش، میدان تنش در شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی در هندسه های مختلف شیار و برای انواع مدهای بارگذاری ارائه گردیده است. این میدان های تنش در دو نوع عبارت شامل حداکثر تنش الاستیک در نوک شیار و عبارت شامل ضرایب شدت تنش شیار ارائه شده اند. دقت این روابط نیز از طریق تحلیل اجزاء محدود تحت بررسی جامع قرار گرفته است.

در پژوهش دیگر که توسط Lazzarin و همکاران انجام گرفته است [۲]، عمدتاً به بررسی ضرایب شدت تنش در شیارهای نوک گرد پرداخته شده که در بخشی از آن شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی در مد II بارگذاری مد نظر قرار گرفته است. همچنین در این پژوهش میدان تنش ارائه شده برای شیار V شکل با سوراخ انتهایی، برای شیارهای U و V شکل استفاده گردیده و نتایج حاصله مورد بحث قرار گرفته است.

دیگر پژوهش در این زمینه، توسط برتو و زاپالورتو انجام گرفته است [۳]. ایشان در این پژوهش فرضیه FNR^1 (شعاع ساختگی شیار) را در رابطه با شکست شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی مورد بررسی قرار دادند.

از دیگر تحقیقات انجام گرفته در رابطه با این نوع شیارها می توان به پژوهش لازارین و همکاران اشاره نمود [۴]. در این پژوهش، شیارهای کلیدی شکل که حالت خاصی از شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی می باشند (برای زاویه دهانه صفر درجه)، مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۴] مؤلفین، شکست ترد در نمونه های مستطیلی شکل، دارای شیار مرکزی کلیدی شکل و از جنس گرافیت ایزواستاتیک را در بارگذاری مرکب درون صفحه ای مورد بررسی تئوری و تجربی قرار دادند که مشخص گردید تطابق خوبی مابین نتایج تجربی و نتایج حاصل از معیار چگالی انرژی کرنش (SED^2) وجود دارد.

1-Fictitious notch radius

2-Strain energy density

۱- استادیار، ۰۲۱-۶۱۱۱۸۵۷۲، a_torabi@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

معیارهای شکست

در این بخش به کمک دو معیار شکست ترد تنش نقطه ای و تنش متوسط، مقادیر چقرمگی شکست شیار برای نمونه های آزمایش پیش بینی می گردد. در توجیه این موضوع که چرا رفتار ترد برای جنس مورد آزمایش مد نظر قرار می گیرد، می توان به شکل ۳ اشاره نمود. در این شکل، نمودار بار-جابجایی که توسط دستگاه آزمایش ثبت گردیده، برای یک نمونه آزمایشگاهی مشاهده می شود. به وضوح مشخص است که رفتار ماده از لحظه شروع بارگذاری تا لحظه شکست، تقریباً به صورت خطی بوده و شکست به صورت ناگهانی در انتهای خط مورب رخ می دهد که بیانگر رفتار ترد ماده PMMA در دمای اتاق می باشد.

- معیار تنش نقطه ای (PS):

این معیار لحظه شکست در قطعه دارای شیار را زمانی می داند که مقدار تنش کششی در فاصله ای بحرانی از نوک شیار، به مقدار بحرانی خود برسد. قابل ذکر است که این مقدار بحرانی معمولاً برابر با استحکام کششی ماده در نظر گرفته می شود، به علاوه فاصله بحرانی مد نظر در این معیار به صورت $r_c = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right]^2$ می باشد که در آن σ_c برابر با استحکام کششی ماده مورد آزمایش (σ_u) و K_{Ic} چقرمگی شکست کرنش صفحه ای ماده می باشد که مقدار آن برای PMMA در جدول ۴ آمده است. برای اعمال شرایط این معیار، نخست توزیع تنش محیطی روی خط نیمساز شیار V شکل با سوراخ انتهایی به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته می شود [۱]. در این رابطه K_I^{VO} ضریب شدت تنش شیار V شکل با سوراخ انتهایی در مد I بارگذاری می باشد. ضرایب λ و ϕ نیز به زاویه دهانه شیار بستگی داشته که در مرجع [۱] آمده است. قابل ذکر است که طبق شکل ۴، مبنای سنجش Γ در رابطه (۱)، مبدا مختصات قطبی واقع در مرکز سوراخ انتهایی می باشد. فاصله بحرانی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$\sigma_{\theta\theta}(r,0) = \frac{K_I^{VO,\rho} r^{-B}}{A\sqrt{2\pi}} \left[C + (5\lambda_1 - 2\lambda_1^2 - 1) \left(\frac{\rho}{r} \right)^E + (4 - 6\lambda_1 + 2\lambda_1^2) \left(\frac{\rho}{r} \right)^F + \phi_1 + \phi_1 B \left(\frac{\rho}{r} \right)^E + \phi_1 D \left(\frac{\rho}{r} \right)^{2C} \right] \quad (1)$$

به کمک میدان تنش فوق و شرایط بیان شده برای معیار تنش نقطه ای، شرایط شکست به صورت رابطه (۲) بیان می گردد که در آن $r = \rho + r_c$ می باشد. با ساده سازی رابطه (۲) و جایگذاری مقدار r در آن، نهایتاً مقدار بحرانی چقرمگی شکست شیار به صورت رابطه (۳) به دست می آید:

$$(\sigma_{\theta\theta})_C = \frac{K_I^{VO,\rho} r^{-B}}{A\sqrt{2\pi}} \left[C + (5\lambda_1 - 2\lambda_1^2 - 1) \left(\frac{\rho}{r} \right)^E + (4 - 6\lambda_1 + 2\lambda_1^2) \left(\frac{\rho}{r} \right)^F + \phi_1 + \phi_1 B \left(\frac{\rho}{r} \right)^E + \phi_1 D \left(\frac{\rho}{r} \right)^{2C} \right] \quad (2)$$

$$K_{IC}^{VO} = \frac{\sqrt{2\pi} A \sigma_u (\rho + r_c)^B}{f(\rho, r_c)} \quad (3)$$

همانطور که در پیشینه تحقیق شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی مشخص گردید، پژوهش در رابطه با شکست این نوع شیارها از موضوعات بسیار جدید مکانیک شکست می باشد. در پژوهش حاضر، به کمک آزمایش های متعدد، شکست ترد در شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی در شرایط بارگذاری مد I خالص مورد بررسی تجربی قرار گرفته و نیز با استفاده از معیارهای شکست ترد تنش نقطه ای و تنش متوسط، مقایسه ای بین نتایج تئوری و تجربی در پیش بینی چقرمگی شکست شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی انجام گرفت. نشان داده شد که دقت متوسط هر دو معیار شکست کمتر از ۹٪ بوده که بیانگر کارایی این معیارها، در پیش بینی چقرمگی شکست شیارهای V شکل با سوراخ انتهایی است.

آزمایش های شکست

در این بخش، آزمایش های شکست بر روی ۳۶ نمونه دیسک برزیلی، دارای شیار V شکل با سوراخ انتهایی و از جنس PMMA، در شرایط بارگذاری مد I خالص انجام گرفته و بارهای شکست مربوط به هر نمونه ثبت گردید. شکل های ۱ و ۲، به ترتیب نمونه های آزمایش در حین انجام آزمایش و بعد از شکست را نشان می دهند. نمونه های دیسک برزیلی به صورت دیسک هایی به قطر ۸۰ میلیمتر و به ضخامت ۱۰ میلیمتر، در ۱۲ هندسه مختلف و از طریق برش با جت آب تولید شدند. این هندسه ها در سه حالت زاویه دهانه شیار ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به همراه چهار حالت شعاع سوراخ انتهایی برابر ۰.۵، ۱، ۲ و ۴ میلیمتر آماده سازی شدند. از هر هندسه سه نمونه آزمایش گردید که مجموعاً ۳۶ آزمایش شکست مد I خالص انجام و بارهای شکست مربوطه ثبت شد. در جداول ۱، ۲ و ۳، بارهای شکست حاصل از آزمایش به تفکیک برای هر زاویه دهانه شیار آمده است. جدول ۴ نیز خواص مکانیکی جنس PMMA مورد آزمایش را نشان می دهد.

جدول ۱- بارهای شکست نمونه های با زاویه دهانه شیار ۳۰ درجه

ρ (mm)	P_1 (N)	P_2 (N)	P_3 (N)
0.5	5635	5277	5724
1	5203	5612	5128
2	6497	6081	6389
4	6997	6530	6730

جدول ۲- بارهای شکست نمونه های با زاویه دهانه شیار ۶۰ درجه

ρ (mm)	P_1 (N)	P_2 (N)	P_3 (N)
0.5	3857	3790	3566
1	4073	4089	4533
2	5325	5440	4754
4	5793	5866	5939

جدول ۳- بارهای شکست نمونه های با زاویه دهانه شیار ۹۰ درجه

ρ (mm)	P_1 (N)	P_2 (N)	P_3 (N)
0.5	2290	2481	2360
1	2570	2473	2385
2	2827	3013	3013
4	3779	3947	3971

جدول ۴- خواص مکانیکی PMMA [۴]

E	مدول یانگ	2.96 GPa
ν	ضریب پواسون	0.38
σ_u	استحکام کششی	70.5 MPa
K_{Ic}	چقرمگی شکست کرنش صفحه ای	1.96 MPa.m ^{0.5}

نتایج

بارهای شکست به دست آمده از هر آزمایش، به کمک تحلیل اجزاء محدود و روابط موجود در مرجع [۱]، به مقادیر متناظر چقرمگی شکست شیار در مد I تبدیل شدند. متوسط این مقادیر تجربی به ازای سه نمونه آزمایش شده، به همراه نتایج حاصل از دو معیار تنش نقطه ای و تنش متوسط و همچنین درصد اختلاف مقادیر تئوری و تجربی، در جداول ۶، ۷ و ۸ به ترتیب برای زاویه های دهانه شیار ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. به وضوح از نتایج به دست آمده و همچنین از روابط (۳) و (۵) مشخص است که مقدار بحرانی چقرمگی شکست شیار، تابع جنس و هندسه شیار است و با تغییر شعاع سوراخ انتهایی و زاویه دهانه شیار، دچار تغییراتی می گردد. همچنین، تغییرات K_{IC}^{VO} برحسب شعاع نوک (ρ) شیار، برای دو معیار تنش نقطه ای و تنش متوسط به همراه نتایج آزمایشگاهی در شکل های ۷، ۸ و ۹ آمده است.

جدول ۶- مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای زاویه دهانه شیار ۳۰ درجه

ρ (mm)	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for exp (Mpa.m ^{0.4985})	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for PS	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for MS	Dis for PS %	Dis for MS %
۰.۵	2.2991	1.929	2.3019	16.09	0.121
1	2.3861	2.3005	2.6307	3.58	10.25
2	3.2078	2.9479	3.2118	8.1	0.124
4	4.1434	3.9514	4.1501	4.63	0.161

جدول ۷- مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای زاویه دهانه شیار ۶۰ درجه

ρ (mm)	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for exp (Mpa.m ^{0.4985})	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for PS	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for MS	Dis for PS %	Dis for MS %
۰.۵	2.2444	2.0837	2.4881	7.16	10.85
1	2.6024	2.4597	2.8173	5.48	8.25
2	3.3414	3.1228	3.4072	6.54	1.96
4	4.1533	4.1504	4.3633	0.069	5.05

جدول ۸- مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای زاویه دهانه شیار ۹۰ درجه

ρ (mm)	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for exp (Mpa.m ^{0.4985})	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for PS	$K_{IC}^{VO,\rho}$ for MS	Dis for PS %	Dis for MS %
۰.۵	3.0041	2.6583	3.1731	11.51	5.62
1	3.043	3.0563	3.5078	0.437	15.27
2	3.4798	3.7834	4.1367	8.72	18.87
4	4.3448	4.9088	5.1681	12.98	18.94

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می باشد:

- (۱) با افزایش زاویه دهانه شیار، دقت معیار تنش متوسط کمتر شده و متوسط درصد اختلاف مقادیر تئوری و تجربی افزایش می یابد.
- (۲) حداکثر متوسط درصد اختلاف مربوط به معیار تنش متوسط و در زاویه دهانه شیار برابر ۹۰ درجه می باشد، کمترین متوسط درصد اختلاف نیز مجدداً مربوط به معیار تنش متوسط و در زاویه دهانه شیار برابر ۳۰ درجه می باشد.

$$f(\rho, r_c) = C + (5\lambda_1 - 2\lambda_1^2 - 1) \left(\frac{\rho}{\rho + r_c} \right)^E + (4 - 6\lambda_1 + 2\lambda_1^2) \left(\frac{\rho}{\rho + r_c} \right)^F + \phi_1 + \phi_1 B \left(\frac{\rho}{\rho + r_c} \right)^E + \phi_1 D \left(\frac{\rho}{\rho + r_c} \right)^{2C}$$

- معیار تنش متوسط (MS):

بر طبق این معیار، شکست در قطعه دارای شیار هنگامی خواهد بود که مقدار متوسط تنش محیطی، در فاصله ای بحرانی از نوک شیار به مقدار بحرانی خود برسد که این مقدار بحرانی، استحکام کششی ماده در نظر گرفته می شود. فاصله بحرانی نیز طبق مرجع [6]، برابر با $d_c = \frac{2}{\pi} \left[\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right]^2$ می باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است. واضح است که مقدار d_c ، چهار برابر مقدار r_c ای می باشد که در معیار تنش نقطه ای ارائه شد. به کمک رابطه (۱) و شرایط بیان شده برای معیار تنش متوسط، رابطه (۴) در نظر گرفته می شود که با انتگرال گیری و ساده سازی آن، چقرمگی شکست بحرانی شیار به صورت رابطه (۵)، به دست می آید.

$$\frac{1}{d_c} \int_{\rho}^{\rho+d_c} \sigma_{\theta\theta}(r, 0).dr = (\sigma_{\theta\theta})_c \quad (۴)$$

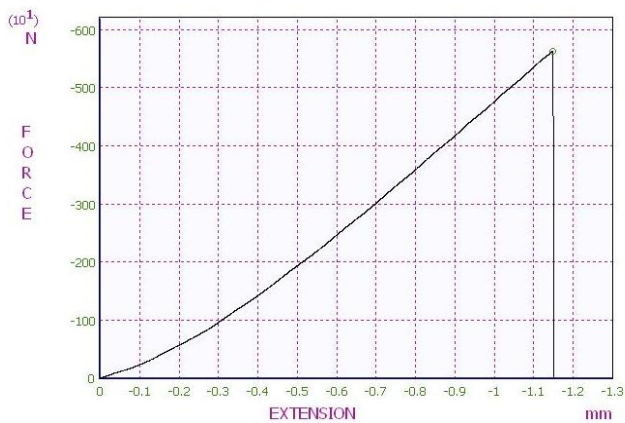
$$K_{IC}^{VO} = \frac{\sqrt{2\pi A} \sigma_u d_c}{f(\rho, d_c)} \quad (۵)$$

$$f(\rho, d_c) = \frac{(\rho+d_c)^{\lambda_1} - \rho^{\lambda_1}}{\lambda_1} + (\rho+d_c)^{\lambda_1} - \rho^{\lambda_1} - 5\rho^E [(\rho+d_c)^{-\lambda_1} - \rho^{-\lambda_1}] + E\rho^E [(\rho+d_c)^{-\lambda_1} - \rho^{-\lambda_1}] + \frac{\rho^E}{\lambda_1} [(\rho+d_c)^{-\lambda_1} - \rho^{-\lambda_1}] - \frac{4\rho^F}{C} [(\rho+d_c)^{-C} - \rho^{-C}] + \frac{6\lambda_1\rho^F}{C} [(\rho+d_c)^{-C} - \rho^{-C}] - \frac{2\lambda_1^2\rho^F}{C} [(\rho+d_c)^{-C} - \rho^{-C}] - \rho^{-C} + \frac{\phi_1}{\lambda_1} [(\rho+d_c)^{\lambda_1} - \rho^{\lambda_1}] - \frac{\phi_1\rho^E}{\lambda_1} [(\rho+d_c)^{-\lambda_1} - \rho^{-\lambda_1}] + \phi_1\rho^E [(\rho+d_c)^{-\lambda_1} - \rho^{-\lambda_1}] - \frac{2\phi_1\rho^{2C}}{D} [(\rho+d_c)^{-D} - \rho^{-D}] - \frac{\lambda_1\phi_1\rho^{2C}}{D} [(\rho+d_c)^{-D} - \rho^{-D}]$$

به کمک روابط (۳) و (۵)، می توان مقدار چقرمگی شکست بحرانی شیار را برای هر نمونه آزمایش شده، محاسبه نمود. قابل ذکر است در جدول ۵، علائم مربوط به روابط فوق معرفی گردیده است.

جدول ۵- معرفی علائم استفاده شده در روابط تئوری

$A = 1 + \lambda_1 + \phi_1$	$D = 2 + \lambda_1$
$B = 1 - \lambda_1$	$E = 2\lambda_1$
$C = 1 + \lambda_1$	$F = 2\lambda_1 + 1$



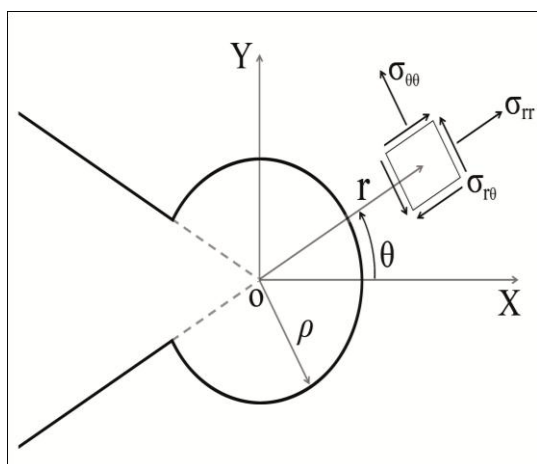
شکل ۳: نمودار بار-جابجایی برای یک نمونه آزمایشگاهی دیسک برزیلی شیاردار

۳) معیار تنش متوسط در زاویه های دهانه شیاردار بزرگ، همچون ۹۰ درجه، با افزایش شعاع سوراخ انتهایی، پیش بینی هایی با دقت کمتر ارائه می دهد. این موضوع می تواند به دلیل دور شدن هندسه شیاردار از حالت شیاردار V شکل بانوک گرد باشد.

۴) در زاویه دهانه شیاردار ۳۰ درجه، معیار تنش متوسط پیش بینی های بهتری را نسبت به معیار تنش نقطه ای ارائه می دهد، ولی چنانکه در نمودارها به وضوح مشخص است، با افزایش زاویه دهانه شیاردار، دقت معیار تنش نقطه ای بیشتر از معیار تنش متوسط خواهد بود.

۵) در مجموع در هر دو معیار تنش نقطه ای و تنش متوسط، به جزء در یک حالت استثناء، متوسط درصد اختلاف مقادیر تئوری و تجربی کمتر از ۹٪ است که از نظر مهندسی درصدی بسیار خوب تلقی می گردد.

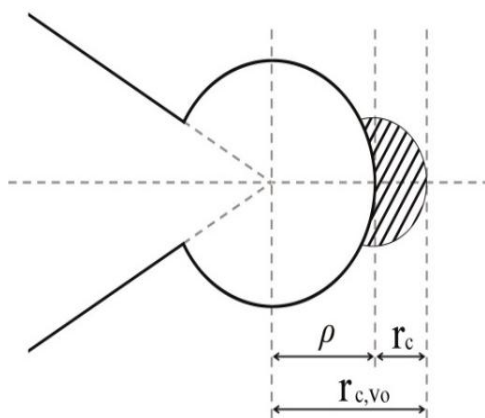
۶) به دلیل مشاهده رفتار الاستیک خطی در نمودارهای نیرو-جابجایی برای جنس PMMA مورد آزمایش در دمای اتاق، و همچنین شکست ناگهانی که در هنگام آزمایش نمونه ها مشاهده گردید، استفاده از معیارهای شکست ترد در رابطه با جنس PMMA مجاز می باشد.



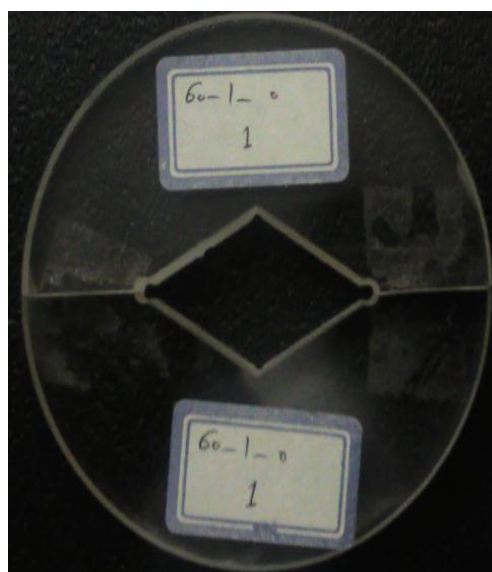
شکل ۴: نمایی از یک شیاردار V شکل با سوراخ انتهایی و دستگاه مختصات قطبی مربوط به آن



شکل ۱: نمونه دیسک برزیلی دارای شیاردار V شکل با سوراخ انتهایی حین انجام آزمایش شکست مد I خالص

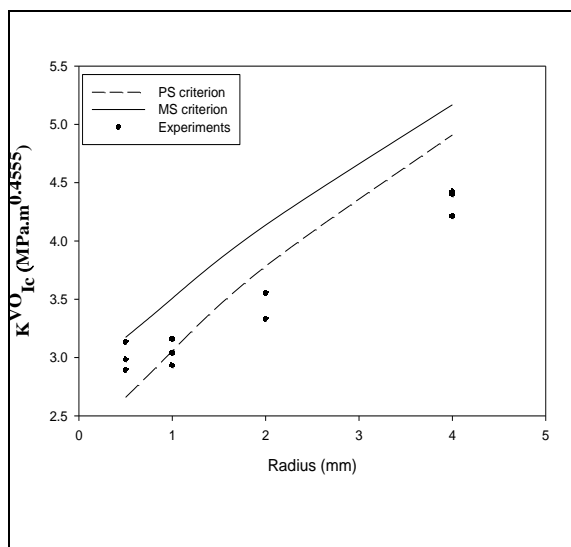


شکل ۵: نمایی از فاصله بحرانی در معیار تنش نقطه ای برای شیاردار V شکل با سوراخ انتهایی

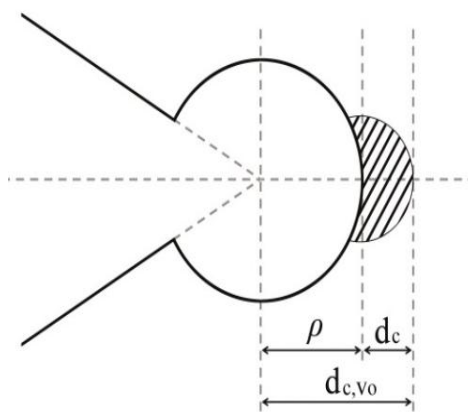


شکل ۲: نمونه دیسک برزیلی دارای شیاردار V شکل با سوراخ انتهایی بعد از شکست

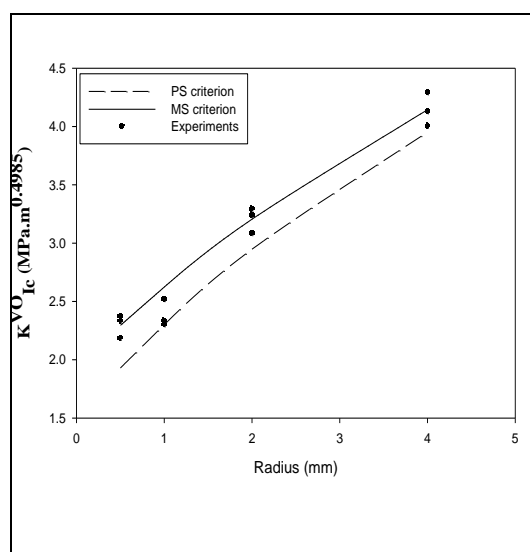
شکل ۸: تغییرات چقرمگی شکست شیار بر حسب شعاع شیار برای $2\alpha = 60$ به همراه نتایج تجربی



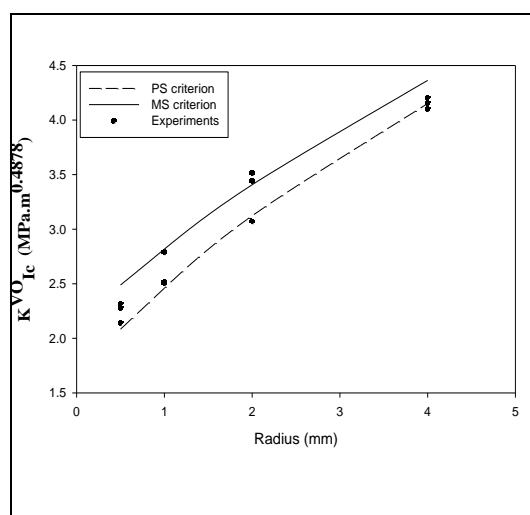
شکل ۹: تغییرات چقرمگی شکست شیار بر حسب شعاع شیار برای $2\alpha = 90$ به همراه نتایج تجربی



شکل ۶: نمایی از فاصله بحرانی در معیار تنش متوسط برای شیار V شکل با سوراخ انتهایی



شکل ۷: تغییرات چقرمگی شکست شیار بر حسب شعاع شیار برای $2\alpha = 30$ به همراه نتایج تجربی



مراجع

1. Zappalorto M, Lazzarin P. In-plane and out-of-plane stress field solutions for V-notches with end holes. *Int J Fract*, 2011, 168:167-180.
2. Lazzarin P, Zappalorto M, Berto F. Generalised stress intensity factors for rounded notches in plates under in-plane shear loading. *Int J Fract*, 2011, 170:123-144.
3. Berto F, Zappalorto M. Fictitious notch rounding concept applied to V-notches with end holes under mode I loading. *Int J Fract*, 2011, 171:91-98.
4. Lazzarin P, Berto F, Ayatollahi MR. Brittle failure of inclined key-hole notches in isostatic graphite under in-plane mixed mode loading. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 00, 1-14.
5. Ayatollahi MR, Torabi AR. Investigation of mixed mode brittle fracture in rounded-tip V-notched components. *Eng Fract Mech*, 2010, 77:3087-3104.
6. Ayatollahi, M.R., Torabi, A.R., 2010. "Brittle fracture in rounded-tip V-shaped notches". *Mater Design*, 31, pp. 60-67.