

(مقاله پژوهشی)

## بررسی شکست نمونه‌های شیاردار VO ساخته شده از ماده هدفمند تنگستن-مس تحت مود دوم غالب بارگذاری

هادی صلواتی<sup>۱\*</sup>، حمید ثمره<sup>۲</sup>، محمد زهساز<sup>۳</sup>

hadi\_salavati@uk.ac.ir

- ۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
 ۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز  
 ۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

### چکیده

مود دوم غالب بارگذاری در تحلیل شکست مواد هدفمند از اهمیت بالایی برخوردار هست که تاکنون به آن پرداخته نشده است. در این مقاله شکست نمونه‌های شیاردار VO ساخته شده از مواد هدفمند تنگستن-مس تحت بارگذاری مود دوم غالب به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش آزمایشگاهی، نمونه‌ها با استفاده از روش متالورژی پودر ساخته شده اند و اثر شعاع انحنا و عمق شیار با انجام چندین آزمون شکست تحت مود دوم غالب بارگذاری بررسی شده است. در بخش عددی، برای پیش‌بینی بار بحرانی شکست این نمونه‌ها تحت بارگذاری مود دوم غالب، از معیار متوسط چگالی انرژی کرنشی داخل حجم کنترل استفاده شده است. همچنین علاوه بر بررسی تأثیر شعاع انحنا و عمق شیار، اثر زاویه شیار نیز بر روی بار بحرانی شکست بررسی شده است. تطابق مناسب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی تحقیق نشان می‌دهد که تئوری چگالی انرژی کرنشی به خوبی برای نمونه‌های شیاردار VO ساخته شده از مواد هدفمند تنگستن مس تحت بارگذاری مود دوم غالب قابل بکارگیری است.

واژگان کلیدی: مواد هدفمند، نمونه شیاردار VO، مود دوم غالب بارگذاری، چگالی انرژی کرنشی

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۹/۰۷/۲۲

صص ۲۲-۱۰

## ۱- مقدمه

شیارهای V، U و VO انواع متفاوتی از شیار هستند که در المان‌های سازه‌ای یافت می‌شوند. این شیارها باعث کاهش مقاومت سازه‌ها شده [۱] و بررسی شکست ترد آن‌ها موضوع مهمی است که مورد بررسی برخی از محققین قرار گرفته است. به منظور پیش‌بینی بار شکست بحرانی قطعات شیاردار، چندین معیار شکست در مراجع پیشنهاد شده است. معیار متوسط چگالی انرژی کرنشی<sup>۱</sup> (SED) یکی از این معیارها می‌باشد [۲]. بر اساس این معیار، زمانی که متوسط چگالی انرژی کرنشی داخل حجم کنترل مشخص به مقدار بحرانی می‌رسد، شکست استاتیک اتفاق می‌افتد [۳-۵]. یکی از مزیت‌های مهم این معیار این است که مقدار متوسط SED داخل حجم کنترل را می‌توان با دقت بالایی با استفاده از روش اجزا محدود و با تعداد کمی از المان‌ها محاسبه نمود [۶، ۷]. سایر کاربردهای این معیار، در نظر گرفتن اثرات تنش T، اثرات سه بعدی، پیش‌بینی شکست خستگی تک و چند محوره در اتصالات جوشی و اعضای شیاردار [۸-۱۱] و همچنین بررسی مودهای متفاوت بارگذاری می‌باشد. این معیار برای بررسی خستگی و شکست مواد همگن به طور وسیعی به کار گرفته شده است و لازم است تا رفتار شکست مواد پیشرفته با این تئوری بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

مواد هدفمند<sup>۲</sup> (FGM) گروهی از مواد پیشرفته می‌باشد که خصوصیات مکانیکی و غیر مکانیکی آن به منظور دستیابی به یک سری ویژگی‌های مشخص، نسبت به مکان تغییر می‌کند. تکنیک‌های متنوعی مانند بالک<sup>۳</sup> (پردازش ذره‌ای)، پردازش پیش فرایند<sup>۴</sup>، پردازش لایه‌ای<sup>۵</sup> و پردازش ذوب<sup>۶</sup> را می‌توان برای ساخت این مواد به کار گرفت. در سال‌های اخیر سه نوع ماده FGM ساخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته است که شامل مواد هدفمند سرامیک-فلز<sup>۷</sup>، فولادهای هدفمند<sup>۸</sup> و مواد هدفمند تنگستن-مس<sup>۹</sup> می‌باشد. [۱۲].

مواد هدفمند سرامیک-فلز معمولاً برای افزایش خصوصیات سیستم‌های مانع-حرارتی به کار گرفته می‌شوند. فولادهای هدفمند رفتار الاستیک-پلاستیک دارند. اخیراً این مواد از فولاد ضد زنگ سخت شده<sup>۱۰</sup> و فولاد ساده کربنی<sup>۱۱</sup> با روش تصفیه سرباره الکتریکی<sup>۱۲</sup> ساخته شده اند [۱۳ و ۱۴]. به منظور دستیابی به اجزایی که از چندین لایه هیدروکسید آهن، آستنیت، باینیت و مارتنزیت ساخته شده اند، باید ضخامت الکترودهای فولاد آستنیت و هیدروکسید اولیه به طور مناسب انتخاب شوند.

نظری و همکاران [۱۵] مقاومت کششی و میکرو سختی فولاد هدفمند آستنیتیک را با استفاده از تئوری پلاستیسیته گرادیان کرنشی مدل‌سازی کردند. صلواتی و همکاران [۱۶-۱۷] برای مدل کردن تغییر شکل گرم مواد مرتبه‌ای هدفمند از تئوری پلاستیسیته گرادیان کرنشی استفاده نمودند.

نظری و همکاران [۲۰-۲۲] انرژی ضربه‌ای فولادهای مرتبه‌ای هدفمند با پیکربندی تقسیم‌گر ترک را با استفاده از تئوری پلاستیسیته گرادیان کرنش و داده‌های تنش-کرنش اصلاح شده مطالعه نمودند. یک بیان تحلیلی جدیدی برای ارتباط بین انرژی ضربه‌ای چارپی<sup>۱۳</sup> و موقعیت نوک شیار برای فولادهای مرتبه‌ای هدفمند توسط صلواتی و همکاران [۲۳] توسعه داده شد.

ماده ساخته شده از فولادهای آستنیتیک-مارتنزیتیک ضعیف شده با شیار U شکل توسط براتی و همکاران [۲۴] مورد بررسی قرار گرفت. صلواتی و محمدی [۲۵] شکست نرم فولادهای باینیتیک را مطالعه نمودند و آزمایش‌های شکست را روی نمونه‌های شیار دار U شکل انجام دادند. این محققین تئوری SED با مفهوم مواد معادل<sup>۱۴</sup> را برای پیش-بینی شکست نرم فولادهای مرتبه‌ای به کار گرفتند.

به دلیل تفاوت زیاد بین نقطه ذوب دو فلز، ساخت مواد مرتبه‌ای هدفمند تنگستن-مس دشوار است. بنابراین در این زمینه، برخی روش‌های ساخت مانند Spark plasma sintering [۲۶]، Microwave sintering [۲۷]، Laser

<sup>1</sup> Strain Energy Density

<sup>2</sup> Functionally Graded Material

<sup>3</sup> Bulk

<sup>4</sup> Preform Processing

<sup>5</sup> Layer Processing

<sup>6</sup> Melt Processing

<sup>7</sup> Metal-Ceramic FGM

<sup>8</sup> Functionally Graded Steel

<sup>9</sup> Tungsten-Copper Functionally Graded Material (W-Cu FGM)

<sup>10</sup> Austenitic stainless steel

<sup>11</sup> Carbon steel

<sup>12</sup> Electro Slag Refining (ESR) Method

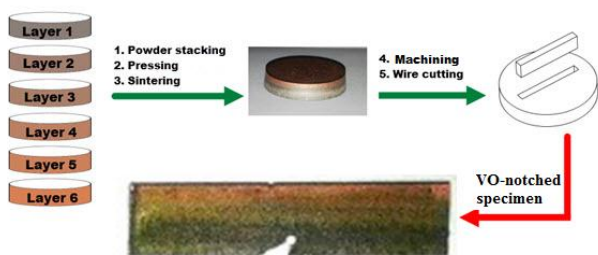
<sup>13</sup> Charpy

<sup>14</sup> Equivalent material concept

است. در این تحقیق به منظور تولید نمونه‌های شش لایه‌ای W-Cu FGM، از روش متالورژی پودر استفاده شده است. به طوری که ضخامت میانگین ناحیه WBA، ناحیه مرتبه-ای و ناحیه مس به ترتیب ۰/۹۵، ۲/۳ و ۰/۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود (شکل (۱)). شکل (۲) شماتیک فرآیند ساخت ماده هدفمند تنگستن-مس و نمونه‌های استخراج شده را نشان می‌دهد.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی هر یک از لایه‌ها

شماره لایه	درصد حجمی آلیاژ پایه تنگستن	درصد حجمی مس	ترکیبات شیمیایی لایه‌ها (Wt. %)			
			W	Ni	Mn	Cu
۱	۱۰۰	۰	۹۰	۴	۳/۳۳	۲/۶۷
۲	۸۰	۲۰	۷۱/۶۱	۳/۱۸	۲/۶۵	۲۲/۵۶
۳	۶۰	۴۰	۵۳/۴۱	۲/۳۷	۱/۹۸	۴۲/۲۳
۴	۴۰	۶۰	۳۵/۴۲	۱/۵۷	۱/۳۱	۶۱/۷۰
۵	۲۰	۸۰	۱۷/۶۱	۰/۷۸	۰/۶۵	۸۰/۹۵
۶	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۱۰۰



شکل (۲) فرآیند ساخت نمونه‌های هدفمند شیاردار

## ۲-۲ اندازه‌گیری خواص مکانیکی نمونه‌های تک‌فاز

به منظور به دست آوردن خواص مکانیکی هر یک از لایه‌های ماده‌ی مرتبه‌ای، تعدادی نمونه غیر مرتبه‌ای از هر یک از ترکیب‌های جدول (۱) با روش متالورژی پودر ساخته شد. در شکل (۳) نمونه‌های ساخته شده از جنس هر یک از لایه‌ها نشان داده شده است.



شکل (۳) نمونه‌های ساخته شده از جنس هر یک از لایه‌ها (از

سمت چپ به راست به ترتیب لایه‌های ۱ تا ۶)

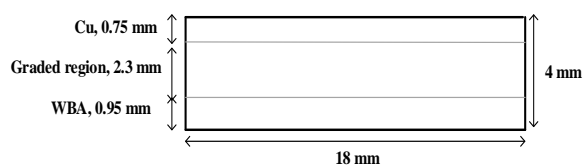
sintering [۲۸]، One step resistance sintering [۲۹] و ... پیشنهاد شده است. بررسی رفتار مکانیکی مواد هدفمند ذکر شده، هدف اصلی کارهای علمی اخیر است. اخیراً محققان رفتار شکست W-Cu FGM ضعیف شده با انواع مختلف شیار را مورد مطالعه قرار داده اند [۳۰-۳۶]. در این تحقیق شکست نمونه‌های W-Cu FGM دارای شیار VO تحت مود غالب بارگذاری II به صورت عددی و آزمایشگاهی برای اولین بار بررسی شده است. در بخش عددی، تئوری چگالی انرژی کرنشی برای پیش‌بینی بارهای شکست نمونه‌های شیاردار VO مورد بحث قرار گرفته است. نتایج حاصل تطابق مناسبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همچنین اثرات پارامترهای تغییر شکل شیار مانند شعاع انحنای شیار، عمق شیار بر روی بار بحرانی شکست مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲- آزمایش‌ها

### ۲-۱- خصوصیات مواد

در تحقیق حاضر از ماده هدفمند تنگستن-مس (W-Cu FGM) استفاده شده که شامل سه ناحیه WBA، ناحیه مس و ناحیه مرتبه‌ای که به WBA متصل است، می‌باشد (شکل (۱)).

در حالت کلی این ماده حاوی شش لایه می‌باشد. بالاترین و پایین‌ترین سطح ماده ساخته شده به ترتیب مس خالص (Cu) و یک آلیاژ تنگستنی (WBA) با درصد وزنی 90W-4Ni-3.33Mn-2.67Cu می‌باشد. بنابراین چهار لایه داخلی (لایه ۲ تا ۵) به عنوان ناحیه مرتبه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی این لایه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱) هندسه ماده هدفمند تنگستن-مس

لازم به ذکر است که به دلیل تفاوت زیاد در نقطه ذوب دو فلز، ساخت W-Cu FGM دشوار می‌باشد. چندین روش ساخت W-Cu FGM توسط برخی محققین پیشنهاد شده است که در مرجع شماره [۲۸] در مورد آن‌ها بحث شده

نشان دهد. در مقاله حاضر، آزمون تجربی روی نمونه‌های تک فاز گرفته شد و با داشتن خاصیت‌های مکانیکی چند نقطه در ناحیه‌ی مرتبه‌ای (جدول ۴)، توان تابع توانی به روش برازش منحنی محاسبه شد. در واقع خواص مکانیکی در این پژوهش به صورت دقیق‌تری به دست آمده است.

$$E(Z) = [E_{Cu} - E_{WBA}] \left( \frac{2Z+h}{2h} \right)^n + E_{WBA}$$

$$\nu(Z) = [\nu_{Cu} - \nu_{WBA}] \left( \frac{2Z+h}{2h} \right)^n + \nu_{WBA} \quad (1)$$

$$\sigma_{ut}(Z) = [\sigma_{utCu} - \sigma_{utWBA}] \left( \frac{2Z+h}{2h} \right)^{n1} + \sigma_{utWBA}$$

$$K_{Ic}(Z) = [K_{IcCu} - K_{IcWBA}] \left( \frac{2Z+h}{2h} \right)^{n2} + K_{IcWBA}$$

در رابطه فوق، E مدول الاستیسیته،  $\nu$  نسبت پواسون،  $\sigma_{ut}$  تنش کششی نهایی،  $K_{Ic}$  چقرمگی شکست، n1 و n2 مؤلفه‌های Power Law، Z مختصات مربوط به ضخامت ناحیه مرتبه‌ای ( $-h/2 < Z < h/2$ ) و h ضخامت ناحیه مرتبه‌ای می‌باشند (برابر با ۲/۳ میلی‌متر). همچنین زیرنویس‌های Cu و WBA به ترتیب خصوصیات مس و تنگستن را نشان می‌دهند.

جدول (۲) ویژگی‌های شرط مرزی معادله (۱) و خصوصیات مکانیکی لایه‌های FGM را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که خواص مکانیکی لایه ۱ (Cu) و لایه ۶ (WBA) که مواد همگن می‌باشند با انجام کار آزمایشگاهی بدست آمده است و خواص لایه‌های ۲ تا ۵ بر اساس توابع مندرج در معادله (۱) استخراج شده است.

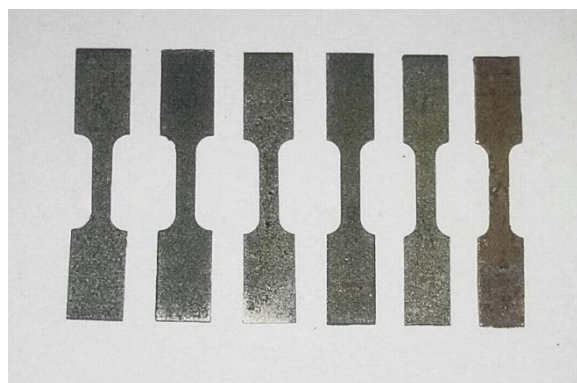
### ۳-۲- آزمون‌های تجربی

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، تیرهای دارای شیار VO مورب در نظر گرفته می‌شوند. هندسه نمونه‌ها و ابعاد لایه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. ضخامت، عرض و طول نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۲، ۴ و ۱۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده که مطابق استاندارد ASTM E1820 می‌باشند. فاصله بین تکیه‌گاه نیز برابر با ۸ میلی‌متر فرض می‌شود. شکل (۶) نمونه‌های آزمایشگاهی دارای شیار VO مورب را نشان می‌دهد.

از هر یک از نمونه‌ها، نمونه‌هایی جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی استخراج شد و مورد آزمون قرار گرفتند. شکل (۴) نمونه‌های کشش ساخته شده از جنس هر یک از لایه‌ها را نشان می‌دهد. در جدول (۲) خواص مکانیکی هر یک از لایه‌ها آورده شده است.

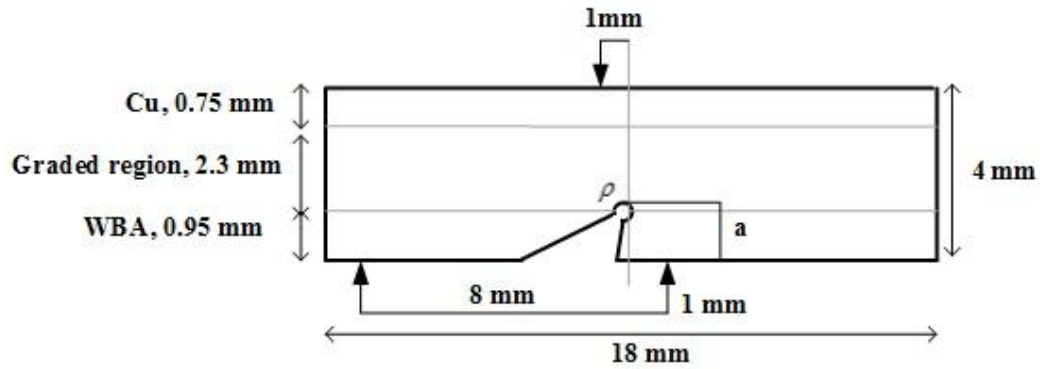
جدول (۲) خواص مکانیکی لایه‌ها

شماره لایه	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش حد نهایی (MPa)	چقرمگی شکست (MPa.m <sup>0.5</sup> )
۱	۲۸۹/۵	۴۴۷/۳	۴/۵۲
۲	۲۵۴/۳	۴۲۴/۷	۸/۸۴
۳	۲۲۴/۳	۳۷۲/۸	۹/۶
۴	۱۹۵/۸	۳۱۰/۲	-
۵	۱۲۴/۴	۲۴۰/۱	-
۶	۱۱۲/۷	۱۸۸/۹	-

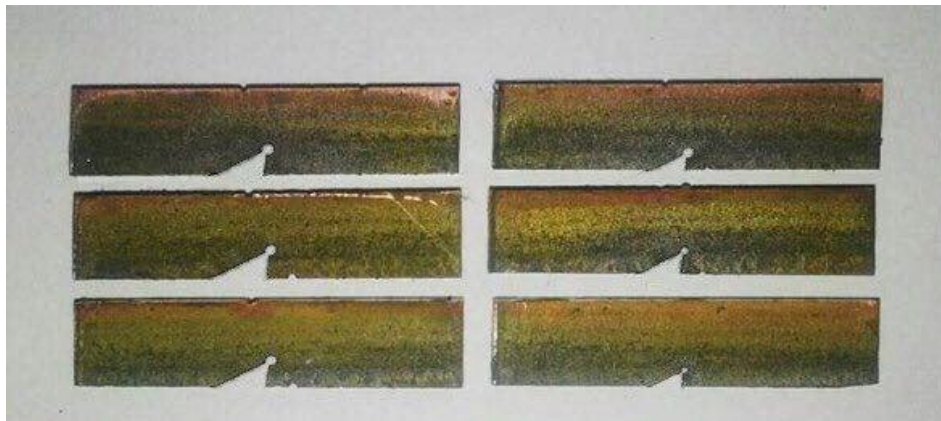


شکل (۴) نمونه‌های آزمون کشش هر یک از لایه‌ها

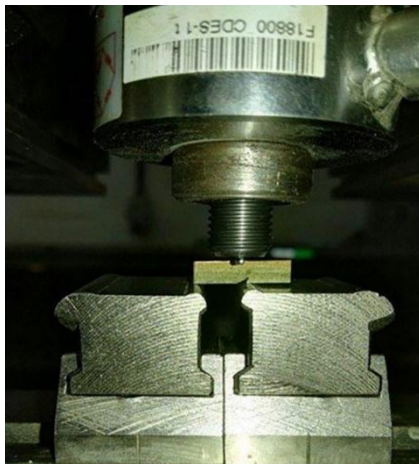
با توجه به اینکه خواص مکانیکی در قسمت مرتبه‌ای به صورت پیوسته تغییر می‌کند، از توابع مختلفی مانند تابع توانی، تابع نمایی و تابع خطی برای بیان خصوصیات مکانیکی در مراجع مختلف استفاده شده است [۱۴]. در مقاله حاضر از تابع توانی برای توصیف خواص مکانیکی در ناحیه‌ی مرتبه‌ای نمونه‌ها استفاده شده است. ویژگی منحصر به فرد تابع توانی این است که با تغییر توان می‌توان توزیع‌های مختلفی از خواص مکانیکی را پوشش داد. در واقع این تابع به ازای مقدار توان برابر با ۱ می‌تواند تبدیل به تابع خطی شده و به ازای مقادیر دیگر توان، می‌تواند توزیع‌های دیگری را برای خاصیت مکانیکی مورد نظر



شکل (۵) هندسه و ابعاد ماده W-Cu FGM تضعیف شده با شیار VO مورب



شکل (۶) نمونه‌های دارای شیار VO برای آزمون‌های تجربی



شکل (۷) نمونه تیر دارای شیار VO تحت آزمون خمش سه نقطه

در کار حاضر، اثر شعاع انحنا ( $\rho$ ) و عمق شیار ( $a$ ) روی بار بحرانی شکست بررسی شده است و لذا دو شعاع انحنا برابر با  $0/2$  و  $0/4$  میلی‌متر و سه عمق شیار برابر با  $1/1$ ،  $1/2$  و  $1/4$  میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. زاویه دهانه شیار ( $2\alpha$ ) نیز برای تمام نمونه‌ها  $60^\circ$  فرض می‌شود.

آزمون خمش سه نقطه‌ای با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری مود دوم غالب بارگذاری، بر روی نمونه‌ها انجام شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه ZWICK 1494 با نرخ تغییر مکان ثابت  $0/5$  میلی‌متر بر دقیقه انجام شده اند. یک نمونه تیر دارای شیار VO تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین، یک منحنی ساده نیرو-جابجایی نیز در شکل (۸) آورده شده و جدول (۳) نیز بار شکست مربوط به هر آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقادیر آزمایشگاهی بار شکست بحرانی

شعاع انحنا $\rho$ (mm)	عمق شیار $a$ (mm)	زاویه دهانه شیار $2\alpha$ ( $^{\circ}$ )	بار شکست بحرانی $F_{cr}$ (N)
۰/۲	۱/۱	۶۰	۳۸۲/۳۹
۰/۲	۱/۲	۶۰	۳۶۴/۳۶
۰/۲	۱/۴	۶۰	۳۳۷/۸۸
۰/۴	۱/۱	۶۰	۳۹۴/۱۴
۰/۴	۱/۲	۶۰	۳۷۲/۰۷
۰/۴	۱/۴	۶۰	۳۳۷/۹۶

$$r_0 = \frac{q-1}{q} \rho \quad (۴)$$

$$q = \frac{2\pi - 2\alpha}{\pi}$$

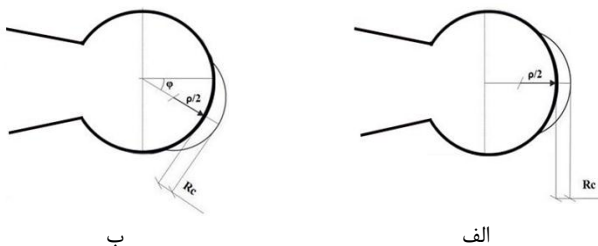
باید توجه داشت که در مواد FGM به دلیل تغییرات پیوسته در خواص مکانیکی مواد،  $R_c$  ثابت نیست و نقطه به نقطه تغییر می‌کند. به عبارت دیگر مرز بیرونی حجم کنترل دیگر به شکل قوس دایره‌ای نمی‌باشد. در کار حاضر یک روش عددی برای بدست آوردن مرز خارجی حجم کنترل پیشنهاد شده است [۳۴]. برای مواد FGM با شیار VO تحت مود غالب که خواص مکانیکی مواد در جهت  $x$  تغییر می‌کند، مرز بیرونی حجم کنترل را می‌توان طبق معادلات زیر بدست آورد (شکل (۱۰)):

$$x = a - \rho + (R_c(x) + r_0) \cos(\theta + \varphi) + (\rho - r_0) \cos(\varphi)$$

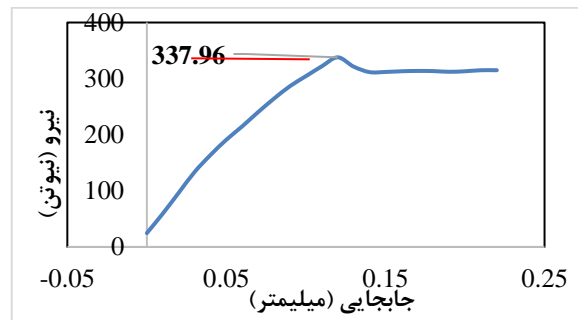
$$y = (R_c(x) + r_0) \sin(\theta + \varphi) + (\rho - r_0) \sin(\varphi) \quad (۵)$$

$$R_c(x) = \frac{(1+\nu(x))(5-8\nu(x))}{4\pi} \left( \frac{K_{lc}(x)}{\sigma_{ut}(x)} \right)^2$$

که  $x$  و  $y$  مختصات نقطه روی مرز بیرونی می‌باشند.  $\theta$  زاویه مربوط به نقطه‌ای است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.  $a$  عمق شیار بوده و  $R_c(x)$  شعاع بحرانی را به صورت تابعی از مختصات  $x$  نشان می‌دهد.



شکل (۹) حجم کنترل مواد همگن برای الف) بارگذاری مود اول، ب) بارگذاری ترکیبی



شکل (۸) منحنی ساده نیرو-جابجایی

### ۳- شکست ماده FGM تضعیف شده با شیار VO تحت مود دوم غالب بارگذاری با استفاده از معیار متوسط چگالی انرژی کرنشی

براساس تئوری متوسط چگالی انرژی کرنشی، شکست ترد زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار متوسط چگالی انرژی کرنشی داخل حجم کنترل مشخص به مقدار بحرانی  $W_c$  برسد [۳] و [۵].  $W_c$  مستقل از هندسه شیار بوده و مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

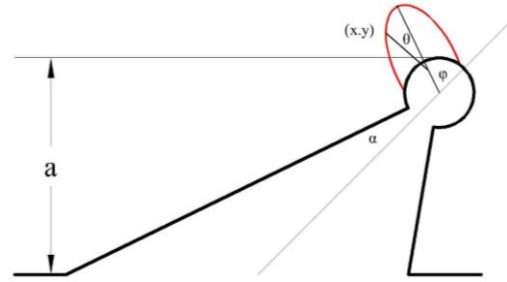
$$W_c = \frac{\sigma_{ut}^2}{2E} \quad (۲)$$

$R_c$  بیان‌کننده شعاع بحرانی بوده که در طول خط نیمساز شیار اندازه‌گیری شده و با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_c = \frac{(1+\nu)(5-8\nu)}{4\pi} \left( \frac{K_{lc}}{\sigma_{ut}} \right)^2 \quad (۳)$$

مقدار  $R_c$  در مواد همگن ثابت می‌باشد و شعاع بیرونی حجم کنترل به صورت  $R_c + r_0$  تعریف می‌شود که در شکل (۹) شماتیک حجم کنترل برای مواد همگن، الف) برای بارگذاری مود اول و شکل ب) برای بارگذاری مود دوم و یا مود ترکیبی نشان داده شده است. مقدار  $r_0$  را می‌توان با توجه به رابطه زیر تعیین کرد:

(۱۰). این نقطه متناظر با نقطه‌ای روی مرز شیار است که حداکثر تنش اصلی اتفاق می‌افتد. به منظور برآورد فاکتورهای شدت تنش، ضریب اختلاط مود و زاویه شروع رشد ترک برای هندسه‌های متفاوت شیار VO، از تحلیل اجزا محدود با المان ۸ گرهی استفاده شده است. جدول (۴) مقادیر فاکتور شدت تنش و ضریب اختلاط مود را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) مرز بیرونی حجم کنترل برای مواد FGM

#### ۵- بکارگیری معیار چگالی انرژی کرنشی برای نمونه-های W-Cu FGM شیاردار VO تحت مود دوم غالب بارگذاری

در بخش تئوری این تحقیق، از نرم افزار ABAQUS 6.14 برای محاسبه مقدار متوسط SED داخل حجم کنترل توسط تحلیل اجزا محدود استفاده شده است (شکل (۱۱)). همه این تحلیل‌ها تحت شرایط کرنش صفحه‌ای با فرض رفتار خطی الاستیک خطی انجام شده اند. همچنین برای هر هندسه دو مدل ایجاد شده است. اولین مدل به منظور تعیین نقطه‌ای روی مرز شیار که ماکزیمم تنش اصلی اتفاق می‌افتد و دومین مدل برای بدست آوردن متوسط چگالی انرژی کرنشی داخل حجم کنترل مشخص، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۱۲) کانتور ماکزیمم تنش اصلی و کانتور متوسط چگالی انرژی کرنشی برای حالت  $\rho = 0.4 \text{ mm}$  و  $a = 1.1 \text{ mm}$  را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار متوسط چگالی انرژی کرنشی و هم بار بحرانی شکست، نسبت به اندازه المان‌های داخل حجم کنترل حساس نیستند [۷]، بنابراین یک مش درشت با حدود تقریبی ۱۰۰ المان مورد استفاده قرار گرفته است. اگر یک بار دلخواه در نرم افزار بکار گرفته شود، بار بحرانی شکست را می‌توان به شکل زیر محاسبه نمود:

$$\frac{F_{app}}{F_{th}} = \sqrt{\frac{SED}{W_c}} \quad (9)$$

که  $F_{app}$  بار بکار گرفته شده در مدل عددی بوده و  $F_{th}$  بار بحرانی شکست تئوری را نشان می‌دهد.

#### ۴- برآورد فاکتورهای شدت تنش، ضریب اختلاط مود و زاویه شروع رشد ترک لاپالورتو و لازارین [۳۸] فاکتورهای شدت تنش برای شیار VO را مطابق رابطه (۶) معرفی کردند:

$$K_{I'}^{Vo} = \frac{\sqrt{2\pi r}^{1-\lambda_1} \sigma_{\theta\theta}(r,0) [(1+\lambda_1) + \phi_1(\gamma)]}{\left\{ g_1 + g_2 \left(\frac{\rho}{r}\right)^{2\lambda_1} + g_3 \left(\frac{\rho}{r}\right)^{2\lambda_1+1} + g_4 \left(\frac{\rho}{r}\right)^{2\lambda_1+2} \right\}} \quad (6)$$

$$K_{II}^{Vo} = \frac{\sqrt{2\pi r}^{1-\lambda_2} \tau_{r\theta}(r,0)}{\left\{ 1 + h_1 \left(\frac{\rho}{r}\right)^{2\lambda_2} + h_2 \left(\frac{\rho}{r}\right)^{2\lambda_2+1} + h_3 \left(\frac{\rho}{r}\right)^{2\lambda_2+2} \right\}}$$

برای بدست آوردن مؤلفه‌های تنش  $\sigma_{\theta\theta}$  و  $\tau_{r\theta}$  در طول نیمساز شیار، از روش اجزا محدود استفاده شده است. به منظور حذف وابستگی ضعیف به فاصله نوک شیار، مقادیر متوسط فاکتورهای چگالی تنش تعمیم یافته را می‌توان مطابق رابطه زیر بدست آورد:

$$\bar{K}_{1\rho} = \frac{1}{\eta\rho} \int_{\rho/2}^{\rho/2+\eta\rho} (K_{1\rho}) dr \quad (7)$$

$$\bar{K}_{2\rho} = \frac{1}{\eta\rho} \int_{\rho/2}^{\rho/2+\eta\rho} (K_{2\rho}) dr$$

پارامتر  $\eta$  با توجه به مرجع [۳۸] بین ۰/۲ تا ۰/۳ می‌باشد که در کار حاضر برابر با ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. ضریب اختلاط مود را نیز می‌توان طبق رابطه زیر محاسبه نمود:

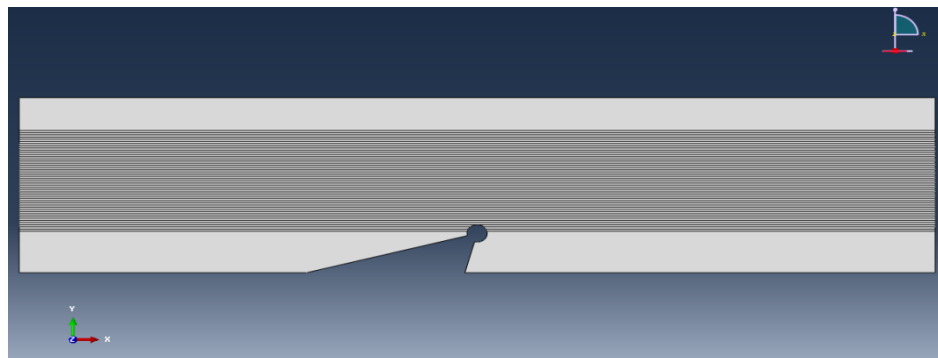
$$\chi = \frac{2}{\pi} \arctan \left[ \frac{\bar{K}_{2\rho}}{\bar{K}_{1\rho}} \right] \quad (8)$$

زاویه شروع رشد ترک به صورت زاویه بین خط نیمساز شیار و خط عبوری از نقطه شروع رشد ترک و مرکز سوراخ که با زاویه  $\phi$  نشان داده شده است، تعریف می‌شود (شکل

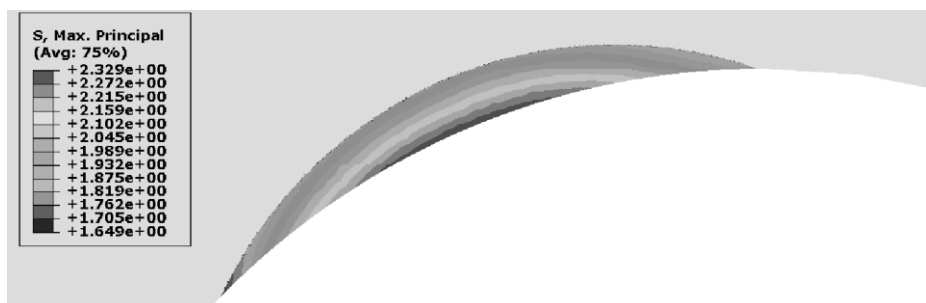


جدول (۴) مقدار متوسط فاکتورهای چگالی تنش شیبار تعمیم یافته و اختلاط مود

شماره مدل	$\rho(\text{mm})$	$a(\text{mm})$	$2\alpha(^{\circ})$	$K_{I\rho}$ (MPa.mm <sup>0.5</sup> )	$K_{I\rho}$ (MPa.mm <sup>0.5</sup> )	Mixity Mode ( $\gamma$ )	$\varphi(^{\circ})$
۱	۰/۱	۱/۱	۳۰	-۰/۰۱۵	۰/۳۲۱	۰/۹۷	۷۲
۲	۰/۱	۱/۲	۳۰	-۰/۰۱۷	۰/۳۴۶	۰/۹۷	۷۱
۳	۰/۱	۱/۴	۳۰	-۰/۰۱۵	۰/۳۹۶	۰/۹۸	۷۱
۴	۰/۲	۱/۱	۳۰	-۰/۰۷۸	۰/۳۴۱	۰/۸۶	۷۱
۵	۰/۲	۱/۲	۳۰	-۰/۰۸۰	۰/۳۶۴	۰/۸۶	۷۲
۶	۰/۲	۱/۴	۳۰	-۰/۰۸۱	۰/۴۱۱	۰/۸۸	۷۲
۷	۰/۴	۱/۱	۳۰	-۰/۱۸۹	۰/۳۹۳	۰/۷۱	۷۴
۸	۰/۴	۱/۲	۳۰	-۰/۱۹۱	۰/۴۱۶	۰/۷۳	۷۴
۹	۰/۴	۱/۴	۳۰	-۰/۱۸۸	۰/۴۵۵	۰/۷۵	۷۴
۱۰	۰/۱	۱/۱	۶۰	-۰/۰۱۳	۰/۳۸۰	۰/۹۸	۶۵
۱۱	۰/۱	۱/۲	۶۰	-۰/۰۱۴	۰/۴۱۲	۰/۹۸	۶۳
۱۲	۰/۱	۱/۴	۶۰	-۰/۰۱۰	۰/۴۷۱	۰/۹۹	۶۴
۱۳	۰/۲	۱/۱	۶۰	-۰/۰۷۵	۰/۳۸۷	۰/۸۸	۶۸
۱۴	۰/۲	۱/۲	۶۰	-۰/۰۷۷	۰/۴۱۳	۰/۸۸	۶۷
۱۵	۰/۲	۱/۴	۶۰	-۰/۰۷۷	۰/۴۹۵	۰/۹۰	۶۷
۱۶	۰/۴	۱/۱	۶۰	-۰/۱۸۸	۰/۴۱۳	۰/۷۳	۷۴
۱۷	۰/۴	۱/۲	۶۰	-۰/۱۸۹	۰/۴۳۷	۰/۷۴	۷۴
۱۸	۰/۴	۱/۴	۶۰	-۰/۱۸۶	۰/۴۷۸	۰/۷۶	۷۴

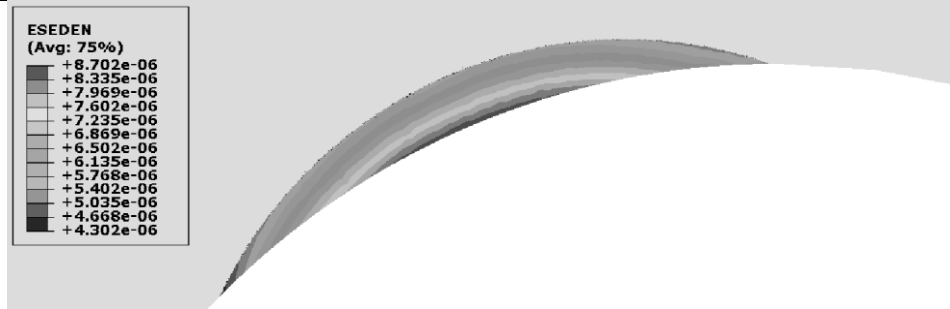


شکل (۱۱) شبیه سازی اجزا محدود نمونه دارای شیبار VO



(الف)





(ب)

شکل (۱۲) تنش اصلی حداکثر و خطوط کنترول SED با در نظر گرفتن  $\rho = 0.4 \text{ mm}$  و  $a = 1.1 \text{ mm}$

توان در تحلیل‌های عددی حاضر پیشنهاد نمود. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب تغییرات بار بحرانی شکست برحسب

عمق شیار برای شعاع انحنای متفاوت را برای دو زاویه دهانه شیار نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل، بار شکست بحرانی با افزایش عمق شیار کاهش می‌یابد. توجه شود که برای هر منحنی شعاع انحنا و زاویه دهانه شیار ثابت در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود برای برخی شعاع انحنای شیار مثل  $0.5$  میلی‌متر، زمانی که عمق شیار افزایش می‌یابد بار بحرانی شکست کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عمق شیار، نوک شیار در موادی با چقرمگی شکست بالاتر و تنش کششی نهایی کوچکتر قرار می‌گیرد. بنابراین بار بحرانی شکست با بزرگ شدن اندازه حجم کنترل افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به جدول (۶) حداکثر تغییرات  $W_c$  نسبت به نوک شیار  $5$  درصد می‌باشد.

## ۶- مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی

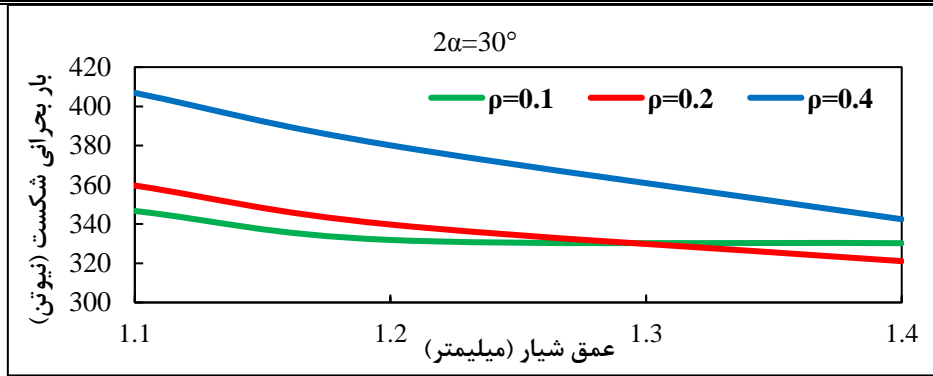
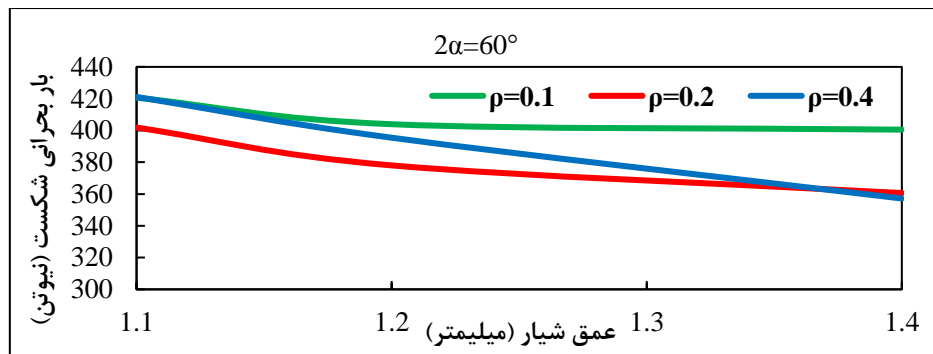
مقادیر میانگین بارهای شکست تئوری و آزمایشگاهی بر پایه معیار متوسط چگالی انرژی کرنشی در جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری مقایسه شده است، که یک تطابق مناسب بین نتایج وجود دارد. باید توجه داشت اگرچه آزمایش‌ها در اغلب موارد تکرار نشده اند، ولی حل تئوری به طور مناسبی مقادیر نتایج آزمایشگاهی و همچنین روند آن‌ها را به خوبی تخمین می‌زند.

## ۷- بررسی اثر پارامترهای هندسی شیار بر بار بحرانی شکست

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای هندسی شیار مانند شعاع انحنای شیار ( $\rho$ ) و عمق شیار ( $a$ ) بر روی بار بحرانی شکست مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر هندسه شیار روی بار شکست، هندسه‌های متفاوت را می‌-

جدول (۵) بار بحرانی شکست تئوری و آزمایشگاهی برای مقادیر متفاوت شعاع انحنا و عمق شیار

$\rho$ (mm)	a(mm)	$2\alpha$ (°)	$F_{cr, th}$ (N)	$F_{cr, Exp}$ (N)	$F_{cr, th} / F_{cr, Exp}$
0.2	1.1	60	382/39	401/8	0.95
0.2	1.2	60	364/36	378/0	0.96
0.2	1.4	60	337/88	360/6	0.94
0.4	1.1	60	394/14	421/1	0.94
0.4	1.2	60	372/07	495/4	0.94
0.4	1.4	60	337/96	357/2	0.95

شکل (۱۳) تغییرات بار شکست بحرانی بر حسب عمق شیار بر حسب شعاع‌های متفاوت شیار برای  $2\alpha = 30$ شکل (۱۴) تغییرات بار شکست بحرانی بر حسب عمق شیار بر حسب شعاع‌های متفاوت شیار برای  $2\alpha = 60$ جدول (۶) بار شکست تئوری  $F_{th}$  برای مقادیر متفاوت شعاع نوک شیار و عمق شیار

شماره مدل	$\rho$ (mm)	$a$ (mm)	$2\alpha$ (°)	$W_{cr}$ (MJ/m <sup>3</sup> )	SED(J/m <sup>3</sup> )	$F_{cr, FGM}$ (N)	$F_{cr, Hom}$ (N)
۱	۰/۱	۱/۱	۳۰	۰/۳۵۰	۲/۹۱۲	۳۴۶/۷	۴۵۳/۷
۲	۰/۱	۱/۲	۳۰	۰/۳۴۹	۳/۱۷۱	۳۳۱/۹	۴۳۰/۳
۳	۰/۱	۱/۴	۳۰	۰/۳۴۴	۳/۱۵۲	۳۳۰/۲	۴۲۶/۰
۴	۰/۲	۱/۱	۳۰	۰/۳۵۰	۲/۷۰۶	۳۵۹/۶	۴۶۷/۶
۵	۰/۲	۱/۲	۳۰	۰/۳۴۹	۳/۰۲۶	۳۳۹/۷	۴۴۱/۸
۶	۰/۲	۱/۴	۳۰	۰/۳۴۴	۳/۳۳۴	۳۲۱/۱	۴۱۱/۷
۷	۰/۴	۱/۱	۳۰	۰/۳۵۰	۲/۱۱۴	۴۰۶/۹	۵۳۲/۲
۸	۰/۴	۱/۲	۳۰	۰/۳۴۹	۲/۴۱۷	۳۸۰/۱	۴۹۸/۰
۹	۰/۴	۱/۴	۳۰	۰/۳۴۴	۲/۹۳۱	۳۴۲/۴	۴۴۵/۶
۱۰	۰/۱	۱/۱	۶۰	۰/۳۵۰	۱/۹۷۸	۴۲۰/۶	۵۵۰/۱
۱۱	۰/۱	۱/۲	۶۰	۰/۳۴۹	۲/۱۴۱	۴۰۳/۹	۵۲۷/۴
۱۲	۰/۱	۱/۴	۶۰	۰/۳۴۴	۲/۱۴۳	۴۰۰/۵	۵۱۰/۹
۱۳	۰/۲	۱/۱	۶۰	۰/۳۵۰	۲/۱۶۷	۴۰۱/۸	۵۲۴/۲
۱۴	۰/۲	۱/۲	۶۰	۰/۳۴۹	۲/۴۴۴	۳۷۸/۰	۴۹۷/۳
۱۵	۰/۲	۱/۴	۶۰	۰/۳۴۴	۲/۶۴۳	۳۶۰/۶	۴۶۲/۳
۱۶	۰/۴	۱/۱	۶۰	۰/۳۵۰	۱/۳۷۹	۴۲۱/۱	۵۵۱/۷
۱۷	۰/۴	۱/۲	۶۰	۰/۳۴۹	۲/۲۳۴	۳۹۵/۴	۵۲۰/۳
۱۸	۰/۴	۱/۴	۶۰	۰/۳۴۴	۲/۶۹۴	۳۵۷/۲	۴۶۸/۴

## ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق، بار بحرانی شکست نمونه‌های ساخته شده از ماده هدفمند تنگستن-مس (W-Cu FGM) دارای شیار VO به صورت عددی و آزمایشگاهی تحت مود دوم غالب بارگذاری بدست آمده است. در ادامه، نتایج اصلی تحقیق حاضر آورده شده است:

- برای اولین بار، یک سری آزمایش بر روی نمونه‌های دارای شیار VO تحت مود غالب بارگذاری انجام شد و سپس شکست نمونه‌ها بررسی شد.

- تأثیر برخی پارامترها مانند شعاع انحنای شیار و عمق شیار بر روی بار شکست بحرانی مطالعه شد.

- مرز خارجی حجم کنترل برای مواد هدفمند تحت مود دوم غالب بارگذاری با یک روش عددی توسعه داده شد.

- اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی حدود ۲ درصد بدست آمد.

- برای برخی شعاع انحنای شیار مثل ۰/۰۵ میلی‌متر، زمانی که عمق شیار افزایش می‌یابد بار بحرانی شکست کاهش می‌یابد.

- با افزایش عمق شیار، نوک شیار در موادی با چقرمگی شکست بالاتر و تنش کششی نهایی کوچکتر قرار می‌گیرد. بنابراین بار بحرانی شکست با بزرگ شدن اندازه حجم کنترل افزایش می‌یابد.

## ۹- مراجع

- [1] Lei, X. Li, C. Shi, X. Xu, X. Wei, Y. "Notch strengthening or weakening governed by transition of shear failure to normal mode fracture", Scientific reports. Vol. 5, pp.10537, 2015.
- [2] Sih, G.C. "Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems", International Journal of Fracture. Vol. 10, pp. 305, 1974.
- [3] Lazzarin, P. Zambardi, R. "A Finite-Volume-Energy Based Approach to Predict the Static and Fatigue Behavior of Components with Sharp V-Shaped Notches", International Journal of Fracture. Vol. 112, pp. 275-298, 2001.
- [4] Lazzarin, P. Berto, F. "Some Expressions for the Strain Energy in a Finite Volume Surrounding the Root of Blunt V-Notches", International Journal of Fracture. Vol. 135, pp. 161-185, 2005.
- [5] Berto, F. Lazzarin, P. "Recent Developments in Brittle and Quasi-Brittle Failure Assessment of Engineering Materials by Means of Local Approaches", Material Science and Engineering: R: Reports. Vol. 75, pp. 1-48, 2014.
- [6] Lazzarin, P. Berto F. Zappalorto, M. "Rapid Calculations of Notch Stress Intensity Factors
- [7] Salavati, H., Alizadeh, Y., Ayatollahi, M. R., "Fracture Assessment of Inclined Double Keyhole Notches in Isostatic Graphite" Physical Mesomechanics, Vol. 21, pp. 110-116, 2018.
- [8] Berto, F. Campagnolo, A. Lazzarin, P. "Fatigue strength of severely notched specimens made of Ti-6Al-4V under multiaxial loading", Fatigue & Fract of Engineering Material & Structures. Vol. 38, pp. 503-517, 2015.
- [9] Berto, F. Campagnolo, A. Welo, T. "Fatigue and Fracture Assessment of Notched Components by Means of the Strain Energy Density", Engineering Fracture Mechanics. Vol. 167, pp. 176-187, 2016.
- [10] Berto, F. Campagnolo, A. Welo, T. "Local Strain Energy Density to Assess the Multiaxial Fatigue Strength of Titanium Alloys", Fracture Structural Integrity. Vol. 10, pp. 69-79, 2016.
- [11] Berto, F. Campagnolo, A. Chebat, F. Cincera M. Santini, M. "Fatigue Strength of Steel Rollers with Failure Occurring at the Weld Root Based on the Local Strain Energy Values: Modelling and Fatigue Assessment", International Journal of Fatigue. Vol. 82, pp. 643-657, 2016.
- [12] Jha, D.K. Kant, T. Singh, R. K. "A Critical Review of Recent Research on Functionally Graded Plates", Composite. Structures. Vol. 96, pp. 833-849, 2013.
- [13] Aghazadeh Mohandesi, J. Shahosseini, M.H. "Transformation Characteristics of Functionally Graded Steels Produced by Electroslag Remelting", Metall. Mater. Trans. A. Vol. 36, pp. 3471-3476, 2005.
- [14] Aghazadeh Mohandesi, J. Shahossinie, M.H. Parastar Namin, R. "Tensile behavior of functionally graded steels produced by electroslag", Metallurgical and Materials Transactions. Vol. 37, pp. 2125, 2006.
- [15] Nazari, A. Aghazadeh Mohandesi, J. Tavareh, S. "Modeling Tensile Strength of Austenitic Graded Steel Based on the Strain Gradient Plasticity Theory", Computational Material Science. Vol. 50, pp. 1791-1794, 2011.
- [17] Salavati, H. Berto, F. Alizadeh, Y. "The Flow Stress Assessment of Austenitic Martensitic Functionally Graded Steel under Hot Compression", Engineering Solid Mechanics. Vol. 2, pp. 83-90, 2014.
- [18] Abolghasemzadeh, M. Samareh Salavati Pour, H. Berto, F. Alizadeh, Y. "Modeling of Flow Stress of Bainitic and Martensitic Functionally Graded Steels under Hot Compression", Material Science and Engineering: A. Vol. 534, pp. 329-338, 2012.
- [19] Salavati, H. Alizadeh, Y. Berto, F. "Application the Mechanism-Based Strain Gradient

- Matererial & Design, vol. 31, pp. 4686-4692, 2010.
- [31] Barati, E. Alizadeh, Y. and J.A. Mohandesi, "J-Integral Evaluation of Austenitic-Martensitic Functionally Graded Steel in Plates Weakened by U-Notches", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 77, pp. 3341-3358, 2010.
- [32] Mehran, S. Rouhi, S. Ramzani, B. Barati, E. "Fracture Analysis of Functionally Graded Materials with U-and V-Notches under Mode I Loading Using the Averaged Strain-Energy Density Criterion", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 35, pp. 614-627, 2012.
- [33] Mohammadi, H. Salavati, H. Alizadeh, Y. Abdullah, A. Berto, F. "Fracture Investigation of U-Notch Made of Tungsten-Copper Functionally Graded Materials by Means of Strain Energy Density", Fatigue & Fracture of Engineering Matererials & Structures. Vol. 40, pp. 1984-1993, 2017.
- [34] Mohammadi, H., Salavati, H., Mosaddeghi, MR., Yusefi, A., Berto, F., "Local strain energy density to predict mixed mode I+ II fracture in specimens made of functionally graded materials weakened by V-notches with end holes", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 92, pp. 47-58, 2017.
- [35] Mohammadi, H., Salavati, H., Alizadeh, Y., Berto, F., Panin, SV., "Fracture investigation of V-notch made of tungsten-copper functionally graded materials", Physical Mesomechanics, Vol. 20, pp. 457-464, 2017.
- [36] Mohammadi, H. Salavati, H. Alizadeh, Y. Berto, F. "Prevalent Mode II Fracture Assessment of Inclined U-Notched Specimens Made of Tungsten-Copper Functionally Graded Material", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 89, pp. 90-99, 2017.
- [37] Yosibash, Z. Bussiba, A. Gilad, I. "Failure criteria for brittle elastic materials", International Journal of Fracture. Vol. 125, pp. 307-333, 2004.
- [38] Zappalorto, M. Lazzarin, P. "In-Plane and out-of-Plane Stress Field Solutions for V-Notches with End Holes", International Journal of Fracture. Vol. 168, pp. 167-180, 2011.
- Plasticity Theory to Model the Hot Deformation Behavior of Functionally Graded Steels", Structural Engineering and Mechanics. Vol. 51, pp. 627-641, 2014.
- [20] Nazari, A. Aghazadeh Mohandesi, J. "Impact Energy of Functionally Graded Steels with Crack Divider Configuration", Journal of Materials Science & Technology. Vol. 25, pp. 847-852, 2009.
- [21] Nazari, A. "Modeling Charpy Impact Energy of Functionally Graded Steel Based on the Strain Gradient Plasticity Theory and Modified Stress-Strain Curve Data", Computational Matererial Science. Vol. 50, pp. 3350-3357, 2011.
- [22] Nazari, A. Aghazadeh Mohandesi, J. Riahi, S. "Modeling Impact Energy of Functionally Graded Steels in Crack Divider Configuration Using Modified Stress-Strain Curve Data", International Journal of Damhage Mechanics. Vol. 21, pp. 27-50, 2012.
- [23] Samareh Salavati Pour, H. Berto, F. Alizadeh, Y. "A New Analytical Expression for the Relationship between the Charpy Impact Energy and Notch Tip Position for Functionally Graded Steels", Acta Metallurgica Sinica. (English Letters). Vol. 26, pp. 232-240, 2013.
- [24] Barati, E. Alizadeh, Y. Aghazadeh Mohandesi, J. "J-Integral Evaluation of Austenitic-Martensitic Functionally Graded Steel in Plates Weakened by U-Notches", Engineering Fracture Mechanics. Vol. 77, pp. 3341-3358, 2010.
- [25] Salavati, H., Mohammadi, H., Ductile failure prediction of U-notched bainitic functionally graded steel specimens using the equivalent material concept combined with the averaged strain energy density, Physical Mesomechanics, vol 22, pp. 255-260, 2019.
- [26] Tang, X. Zhang, H. Du, D. Qu, D. Hu, C. Xie, R. "Fabrication of W-Cu Functionally Graded Material by Spark Plasma Sintering Method", International Journal of Refractory Metal and Hard Mater. Vol. 42, pp. 193-199, 2014.
- [27] Liu, R. Hao, T. Wang, K. Zhang, T. Wang, XP. Liu, CS. "Microwave Sintering of W/Cu Functionally Graded Materials", Journal of Nuclear Materials. Vol. 431, pp. 196-201, 2012.
- [28] Pintsuk, G. Brünings, SE. Döring, JE. Linke, J. Smid, I. Xue, L. "Development of W/Cu—Functionally Graded Materials", Fusion. Eng. Des. Vol. 66, pp. 237-240, 2003.
- [29] Zhou, Z-J. Du, J. Song, S-X. Zhong, Z-H. Ge, C-C. "Microstructural Characterization of W/Cu Functionally Graded Materials Produced by a One-Step Resistance Sintering Method", Journal of Alloys and Compounds. Vol. 428, pp. 146-150, 2007.
- [30] Barati, E. Aghazadeh Mohandesi, J. Alizadeh, Y. "The Effect of Notch Depth on J-Integral and Critical Fracture Load in Plates Made of Functionally Graded Aluminum-Silicone Carbide Composite with U-Notches under Bending",