



## مطالعه تغییر فرم آلیاژ آمورف توده ای Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> با استفاده از آزمون فروروندگی توسط دو فروروندگی توافق نده با دو زاویه متفاوت

ابوالفضل رضائی بزار<sup>۱</sup>، محمد مروی مشهدی<sup>۲</sup>، محسن حداد سبزوار<sup>۳</sup>، مصطفی رضائی<sup>۴</sup>، مصطفی عباسی<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

آزمون فروروندگی یکی از روش‌های رایج جهت دستیابی به خواص مکانیکی مواد می‌باشد. در این آزمون، فروروندگی با سرعت بسیار کم روی نمونه فشرده شده و عمق فرورفتگی و بار اندازه گیری و ثبت می‌شود. سپس با توجه به روابط و منحنی بار-جایجایی، تنش تسلیم و توان کارسختی محاسبه می‌شود. در این پژوهش به منظور دستیابی به خواص مکانیکی آلیاژ آمورف توده‌ای Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> از آزمون فروروندگی توسط دو فروروندگی هرمی و یکرز و مخروطی را کول استفاده شد. منحنی‌های بار-جایجایی حاصل از دو آزمون رسم و مقادیر مربوط به تنش تسلیم و توان کارسختی آلیاژ مورد آزمون محاسبه گردید. مقادیر حاصل برای تنش تسلیم و توان کارسختی با آنچه در مراجع برای آلیاژ‌های مشابه ذکر شده، مطابقت خوبی دارد. شبیه‌سازی آزمون فروروندگی با فرض پیروی ماده مورد آزمون از رابطه مور-کولمب و همچنین فون-میزز، انجام شد. انطباق قابل قبول منحنی حاصل از شبیه‌سازی آزمون با فرض پیروی ماده از رابطه مور-کولمب با منحنی تجربی، حاکی از صحت نتایج بدست آمده برای خواص مکانیکی ماده مورد آزمون و معتبر بودن رابطه مور-کولمب برای توصیف خواص مکانیکی این نوع مواد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آمورف توده ای؛ آزمون فروروندگی؛ تنش تسلیم؛ توان کارسختی

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

۳- دانشیار

۴- دانشجو، کارشناسی

## مطالعه تغییر فرم آلیاژ آمورف توده ای Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> با استفاده از آزمون فروروندگی توسط دو فروروند دو زاویه متفاوت

ابوالفضل رضائی بزا<sup>۱</sup>، محمد مروی مشهدی<sup>۲</sup>، محسن حداد سبزوار<sup>۳</sup>، مصطفی رضائی<sup>۴</sup>، مصطفی عباسی<sup>۵</sup>

### چکیده

آزمون فروروندگی یکی از روش‌های رایج جهت دستیابی به خواص مکانیکی مواد می‌باشد. در این آزمون، فروروندہ با سرعت بسیار کم روی نمونه فشرده شده و عمق فرورفتگی و بار اندازه گیری و ثبت می‌شود. سپس با توجه به روابط و منحنی بار- جابجایی، تنش تسلیم و توان کارسختی محاسبه می‌شود. در این پژوهش به منظور دستیابی به خواص مکانیکی آلیاژ آمورف توده ای Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> از آزمون فروروندگی توسط دو فروروند دو زاویه ویکرز و مخروطی راکول استفاده شد. منحنی‌های بار- جابجایی حاصل از دو آزمون رسم و مقادیر مربوط به تنش تسلیم و توان کارسختی آلیاژ مورد آزمون محاسبه گردید. مقادیر حاصل برای تنش تسلیم و توان کارسختی با آنچه در مراجع برای آلیاژ‌های مشابه ذکر شده، مطابقت خوبی دارد. شبیه‌سازی آزمون فروروندگی با فرض پیروی ماده مورد آزمون از رابطه‌ی مور- کولمب و همچنین فون- میزز، انجام شد. انطباق قابل قبول منحنی حاصل از شبیه‌سازی آزمون با فرض پیروی ماده از رابطه‌ی مور- کولمب با منحنی تجربی، حاکی از صحبت نتایج بدست آمده برای خواص مکانیکی ماده مور آزمون و معتبر بودن رابطه‌ی مور- کولمب برای توصیف خواص مکانیکی این نوع مواد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژ آمورف توده ای؛ آزمون فروروندگی؛ تنش تسلیم؛ توان کلکسختی

۱- استادیار گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد

Email:mohamad12969@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۵- دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱- مقدمه

تحقیق درباره خواص مکانیکی فلزات شیشه ای، به سال ۱۹۶۰ بر می گردد [۱]. از بین این آلیاژها، فلز شیشه ای توده ای پایه Zr، به صورت تجاری در بین مواد مهندسی توسعه یافت [۲]. مشخصات تغییرشکل فلزات شیشه ای در بسیاری موارد نسبت به فلزات بلورین متفاوت است؛ نخست اینکه فلزات آمورف هیچ گونه کرنش سختی از خود نشان نمی دهند. دوم اینکه تنفس های برشی و همچنین هیدروستاتیک نیز بر رفتار مکانیکی و خواص الاستیکی و پلاستیکی آن ها اثر می گذارند [۳، ۴]. سوم این که تغییر شکل آن ها شدیدا ناهمگن است که به علت تجمع کرنش های غیر الاستیک در باندهای برشی موضعی می باشد. مدل های متفاوتی برای استخراج خواص الاستیک-پلاستیک از منحنی های بارگذاری و باربرداری توسعه پیدا کردند که در این مقدمه مروری بر آنها خواهیم داشت.

### ۱.۱ سختی

سختی مواد طبق تعریف نسبت بین نیروی نرمال ( $F$ ) و مساحت منطقه تماس ( $A$ ) است.

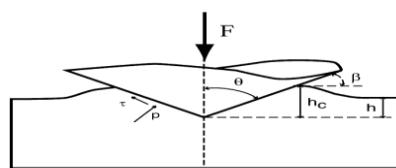
$$H_n = F/A \quad \text{رابطه (۱)}$$

سطح تماس بعد از باربرداری، توسط بررسی اثرفرو رفتگی با میکروسکوپ نوری یا الکترونی قابل بررسی است [۷، ۸]. Tabur نشان داد که سختی به تنفس ماده تحت آزمون فروروندگی قرار گرفته ( $\sigma_T$ ) و کرنش مفروض متناظر با آن ( $\epsilon_T$ ) مرتبط است که همان کرنش تغییر شکل پلاستیک تعریف شده بوسیله خود او است [۶]. شکل (۱) نمایی از فروروند مخروطی را نشان می دهد. بر طبق روش جانسون، کرنش معادل به صورت زیر می تواند تعریف شود [۹] :

$$\epsilon_T = 0.2 \cot\theta \quad \text{رابطه (۲)}$$

برای فروروندهای کروی، کرنش مفروض  $\epsilon_T$  با افزایش عمق نفوذ فرورونده افزایش پیدا می کند [۱۰]. در عمق نفوذ های بالاتر به عبارت دیگر در حالت روند کاملا پلاستیک، Tabur رابطه زیر را پیشنهاد کرد [۶] :

$$\sigma_T \approx H_n / 2.8 \quad \text{رابطه (۳)}$$



شکل ۱. فروروند مخروطی،  $p$  و  $\tau$  به ترتیب تنش های نرمال و مماسی هستند [۹].

هربرت پیشنهاد مقایسه‌ای بین رفتار تنش-کرنش یک آلیاژ آلومینیوم درآزمون کشش غیرمحوری و آزمون فروروندگی با فرورونده کروی را داد [۱۱]. او از رابطه *Tabur* در حالت کاملاً پلاستیک استفاده کرد و نشان داد که این رابطه امکان ساختن منحنی تنش-کرنش غیرمحوری را نمی‌دهد. تحلیل‌های عددی توسط *Larsson*، نشان داد که موادی که خواص کرنشی مختلفی دارند ولی تنش سیلان همسان دارند، سختی یکسانی ندارند [۱۲]. *Dao* نشان داد که موادی که دارای تنش حقیقی یکسانی برای کرنش ۳.۳ درصد ارائه می‌کنند، دارای نمودار بارگذاری یکسانی درآزمون فروروندگی هستند [۱۳]. *Suresh* و *Giannakopoulos* پیشنهاد مقدار ۲۹ درصد برای  $\sigma_T$  جهت آزمون فروروندگی ویکرز را، کردنده [۱۴]. *Chaudhri* نشان داد که روش *Tabur* برای تخمین کرنش نمی‌تواند یک مقدار یکتا را برای نسبت  $H_n/\sigma_T$  ارائه دهد [۱۵]. به علاوه *Felder* و *Bucaille* نشان دادند که مقدار کرنش پلاستیک معادل، به نسبت بین تغییرشکل الاستیک به کل تغییرشکل بستگی دارد [۱۶]. مقادیر  $T$  فقط تحت شرایط معینی معتبرند و باید با احتیاط از آنها استفاده کرد. لذا تعیین منحنی تنش-کرنش با محاسبات ساده سختی، بسیار پیچیده است و فقط تقریبی از خواص مکانیکی ماده را به ما می‌دهد.

## ۱- آزمون فروروندگی

*Suresh* و *Giannakopoulos* در تحقیق خود [۱۷]، به بررسی میزان تنش تسلیم و سایر خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیک و توان کرنش سختی با استفاده از آزمون فروروندگی به کمک فرورونده نوک تیز پرداخته اند. این آزمون توسط *Chollacoop* نیز انجام شده است [۱۸]. *Suresh* با فرورونده هرمی دریک سیکل بارگذاری-باربرداری، پارامتر حداکثر عمق ایجاد شده ( $h_{max}$ ) و عمق باقیمانده پس از باربرداری ( $h_r$ ) را بدست آوردند؛ باعوردادن منحنی درجه ۲ از قسمت بارگذاری نمودار به شکل  $P=Ch^2$  که به قانون کیک (*Kick's Law*) معروف است، به انحنای بارگذاری یا  $C$  دست یافتند. سپس با روش *FEM* روابط مورد نیاز برای محاسبه تنش تسلیم را ارائه دادند [۱۷]. جدول (۱) رابطه بین نسبت عمق باقیمانده پس از باربرداری ( $h_r$ ) به حداکثر عمق ایجاد شده پس از بارگذاری ( $h_{max}$ ) را با پارامتر  $Y$  نشان میدهد. نسبت  $(h_r/h_{max})$  بیانگر میزان تغییر شکل موisman و کارسختی است. پارامتر  $Y$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \left[ (\sigma_{0.29} - \sigma_y) / (0.29E^*) \right] + \left[ (11\sigma_y) / E^* \right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

جدول ۱. ارتباط عددی بین کارسختی ماده و عمق باقیمانده مؤثر [۱۷]

$Y$	1	0.33	0.27	0.05	0.025	0.00
$h_r/h_{max}$	0.00	0.76	0.85	0.91	0.94	1.00

$$E^* = \left\{ \left[ (1-v^2)/E \right] + \left[ (1-v_{in}^2)/E_{in} \right] \right\}^{-1} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$\nu_{in}$  ضریب پوآسون برای فرورونده‌ی الماسی، برابر ۰.۰۲ و  $E_{in}$  مدول یانگ فرورونده، برابر ۹۰۰ GPa است [۱۷]. ضریب پواسون نمونه، برابر ۰.۳۶ و مدول یانگ نمونه برابر ۹۶ GPa می‌باشد [۵]. شکل (۲)، شماتیک نمودار نیرو- جابجایی و قانون کیک را نشان می‌دهد. با عبوردادن منحنی درجه ۲ از نتایج عددی جدول (۱)، روابط زیر حاصل می‌شود:

$$[(\sigma_{0.29}-\sigma_y) / (0.29E^*)] = 1 - 0.142(h_r/h_{max}) - 0.957(h_r/h_{max})^2 \quad (6)$$

$$C = 6.5 \sigma_{0.29} \{I + (\sigma_y / \sigma_{0.29})\} \{-I + \ln(E^*/\sigma_y)\} \quad (7)$$

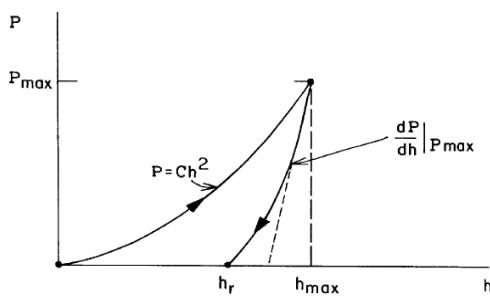
### ۳-۱- شبیه‌سازی عددی آزمون فروروندگی

آنالیز بازگشتی برای فرورونده هرمی جهت استخراج منحنی تنش-کرنش حقیقی از اطلاعات بار- جابجایی را رائه کرد [۱۹ و ۲۰]. آنالیز کامل برگشتی با دنونه فرورونده متفاوت برای پلیمرها ارائه کرد [۲۱]. یکی از کاملترین تحقیقات بر روی آلیاژهای آلومینیوم بوسیله روش اجزای محدود توسط Dao برای توسعه الگوریتم‌های تحلیل پیشرونده و بازگشتی انجام گردید [۱۳]. در ادامه، آزمون فروروندگی با روش FEM روی مواد استوپلاستیک با ۴ فرورونده مخروطی با زوایای ۴۲.۳°، ۵۰°، ۶۰°، ۷۰.۳° و  $\theta = ۶۰$ ° انجام شد. شکل (۳) الگوریتم بازگشتی Bucaille و رابطه و ۹ تابع بدون بعد بولی  $\Theta = ۰.۰۵۳۷$ ،  $\epsilon_r = ۰.۰۳۳$  و  $\theta = ۷۰.۳$  را نشان می‌دهد [۲۲].

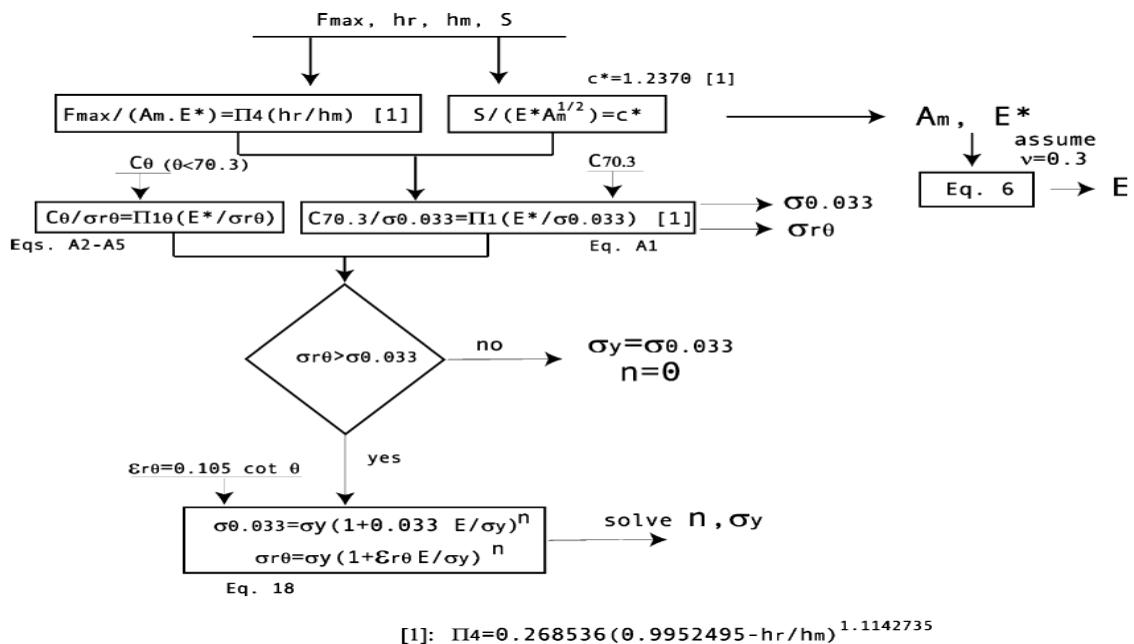
$$\Pi_I = C/\sigma_{0.0537} = 0.06463[\ln(E^*/\sigma_{0.0537})]^3 - 2.2102[\ln(E^*/\sigma_{0.0537})]^2 + 21.589[\ln(E^*/\sigma_{0.0537})] - 28.5741 \quad (8)$$

$$\Pi_I = C/\sigma_{0.033} = -1.131[\ln(E^*/\sigma_{0.033})]^3 + 13.635[\ln(E^*/\sigma_{0.033})]^2 - 30.594[\ln(E^*/\sigma_{0.033})] + 29.267 \quad (9)$$

فرورونده هرمی با زاویه‌ی نوک ۱۳۶ درجه معادل فرورونده مخروطی با نیم زاویه‌ی نوک ۷۰.۳° در نظر گرفته می‌شود [۲۲].



شکل ۲. شماتیکی از نمودار نیرو- جابجایی و قانون کیک [۱۲].



شكل ۳. الگوریتم بازگشتی Bucaille جهت تعیین خواص مکانیکی مواد توسط چند فرآورونده [۲۲].

۲- مواد و روش تحقیق

## ۱-۲- دستگاه آزمون و مواد مورد آزمون

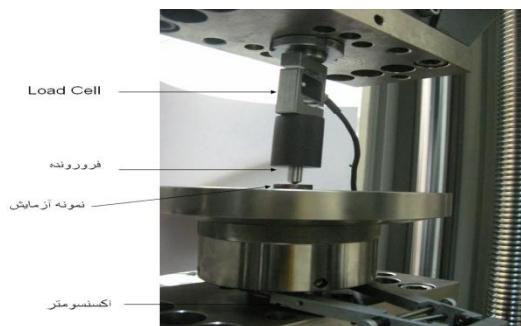
جهت آزمون، از دستگاه آزمون کشش Zwick Z250 با دقت  $3N \pm$  استفاده شد؛ دقت جابجایی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه برابر  $3\mu m \pm$  است. در انجام آزمایش فرورونده‌گی، از یک Load Cell ۲ تنی با دقت نیروی  $0.01N \pm$  و یک اکستنسیومتر کششی با دقت  $0.3\mu m \pm$  استفاده شد. ماده‌ی مورد مطالعه، آلیاژ آمورف توده‌ای  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  بود. نمونه‌ها، به شکل مربع به طول ۳ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر تهیه شد. روی هر نمونه حداقل ۵ بار آزمون فرورونده‌گی انجام شد. نمونه‌ها قبل از انجام آزمون و برای از بین بردن ناصافی سطح، با کاغذ سنباده ۱۰۰۰ میکرونی سنباده زنی شد.

## ۲-۲- آزمون فروروندگی به کمک فرو رونده هرمی ویکرز و مخروطی را کول

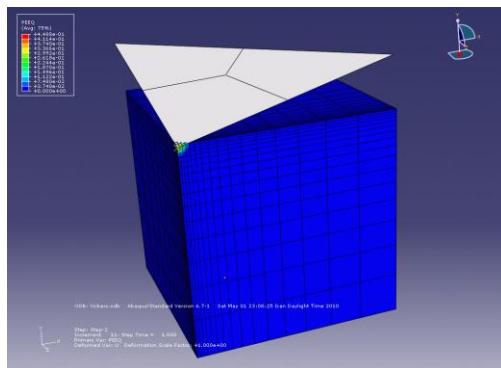
شکل (۴) نحوه انجام آزمون فروروندگی رانشان می دهد. فروروندهای ویکرزوراکول جهت آزمون استفاده شد. بار بین ۱۰N و ۲۰N بطور جداگانه برروی نمونه ها اعمال شد. سرعت بارگذاری  $\mu m \cdot min^{-1}$  ۱ بود. بارگذاری تا نیروی مشخصی صورت گرفت و سپس باربرداری انجام شد. سپس با استفاده از نرم افزار Excel نمودارهای نیرو- جابجایی برای هر یک از دو فرورونده رسم گردید.

### ۳-۲- شبیه‌سازی آزمون فروروندگی

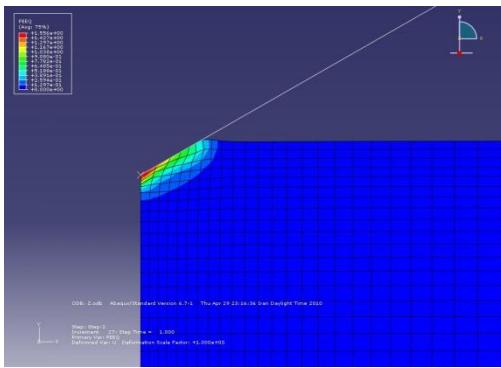
شبیه سازی اجزاء محدود آزمون فروروندگی ویکرز در ماده، بصورت سه بعدی و بوسیلهٔ نرم افزار چند منظورهٔ ABAQUS صورت گرفت. با توجه به وجود تقارن مرتبهٔ چهار، یک چهارم از ماده و فروروندهٔ مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. آلیاژ بوسیلهٔ اجزاء هشت نودی ایزوپارامتریک C3D8R شبیه‌سازی گردید. تعداد اجزاء مورد استفاده برای شبیه‌سازی این ماده ۴۰۹۶ جزء بود و بتدریج به سمت محل اعمال بار، مش‌ها ریزی شدند. جهت شبیه‌سازی فروروندهٔ از یک جزء صلب ۷ گره‌ای استفاده شد. شکل(۵) بطور نمادین مش‌بندی مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. کلیهٔ گره‌های واقع در زیر نمونه که در صفحهٔ ۱-۲ قرار دارند از حرکت در تمام جهات بازداشت شده‌اند و بروی وجودهٔ ۱-۳ و ۲-۳ شرایط تقارن درجهات بترتیب ۲ و ۳ اعمال گردید. با اعمال جابجایی بر گرهٔ مینا در جزء صلب، بارگذاری انجام شد و منحنی بار-جابجایی با محاسبهٔ جابجایی گره‌ای که زیر جسم صلب قرار داشت و نیروی وارد بر گرهٔ مینای جسم صلب رسم گردید. با توجه به وجود تقارن محوری در هندسهٔ آزمون بلفروروندهٔ مخروطی، جهت شبیه‌سازی از مدل متقارن محوری<sup>۱</sup> استفاده شد. آلیاژ آمورف با اجزاء چهارنودی CAX4R شبیه‌سازی شد. تعداد اجزاء مورد استفاده برای شبیه‌سازی این ماده ۲۵۰۰ جزء بود که بتدریج بسمت محل اعمال بارتوسط فرورونده، مش‌ها ریزی شدند. گره‌های واقع در زیر نمونه درجهت ۲ و گره‌های سمت چپ نمونه درجهت ۱ مقید گردید. با اعمال جابجایی بر گرهٔ مینادر جزء صلب، بارگذاری انجام و منحنی بار-جابجایی با محاسبهٔ جابجایی گره‌ای که زیر جسم صلب قرار داشت و نیروی وارد بر گرهٔ مینای جسم صلب رسم گردید. شکل(۶) مش‌بندی مورد استفاده را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی با روابط اساسی تسلیم فون-میز و مور-کولمب انجام شد. رابطهٔ مور-کولمب بصورت  $\tau = k_0 - \alpha \sigma_n$  می‌باشد.  $\tau$  تنש برشی است که در نقطهٔ تسلیم بر روی صفحهٔ لغزشی اعمال می‌شود،  $k_0$  هر دو ثوابت ماده و  $\sigma_n$  نیز مولفهٔ تنش عمودی عمود بر صفحهٔ لغزشی می‌باشد.  $\alpha$  با سعی و خطا طوری انتخاب شدند که بهترین تطابق بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آزمون بدست آید.



شکل ۴. نحوه انجام آزمون فروروندگی.



شکل ۵. نمایی از تغییر فرم ایجاد شده در ماده توسط فرورونده‌ی هرمی ویکرز پس از اعمال بارگذاری.



شکل ۶. نمایی از تغییر فرم ایجاد شده در ماده توسط فرورونده‌ی مخروطی راکول پس از اعمال بارگذاری.

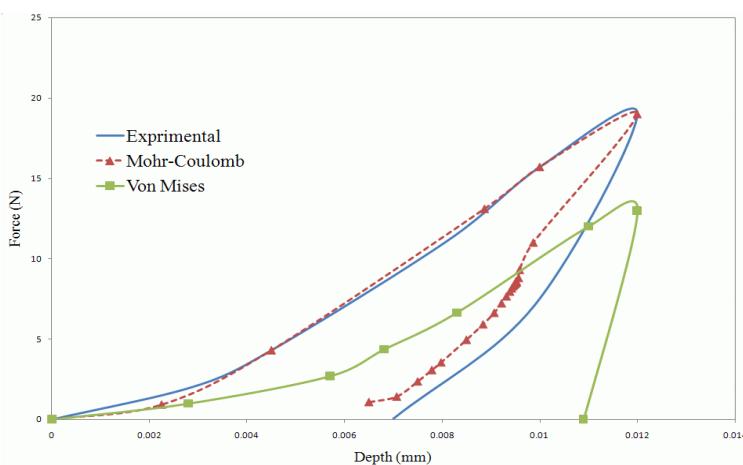
### ۳- نتایج و بحث

نmodار بار- جابجایی فرورونده‌ی هرمی ویکرز و مخروطی راکول در شکل (۷) آمده است. با عبور منحنی درجه ۲ از قسمت بارگذاری، مقدار  $C$  برای نmodار بار- جابجایی هر یک از دو فرورونده بدست آمد. با توجه به روابط بحث شده در بخش ۱-۲ و جایگذاری مقدار  $C$  نmodار آزمون فرورونده هرمی در رابطه‌ی (۷)، مقدار  $\sigma_y$  محاسبه گردید که با مقادیر ذکر شده در مراجع [۲۳ و ۵] که برای آلیاژهای مشابه ذکر شده همخوانی دارد.

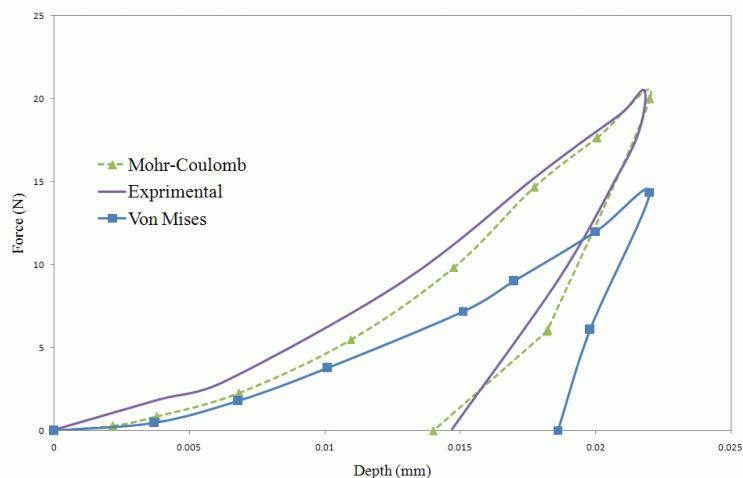
با توجه به روابط بحث شده در بخش ۱-۳ و جایگذاری مقدار  $C$  نmodار آزمون فرورونده هرمی در رابطه (۹) و  $C$  نmodار آزمون فرورونده مخروطی در رابطه (۸)، بترتیب مقدار  $\sigma_{0.05379} \sigma_{0.033}$  محاسبه گردید. با توجه به الگوریتم بازگشتی (بخش ۱-۳) و با در نظر گرفتن اینکه مقدار  $\sigma_{0.033}$  مربوط به فرورونده هرمی بزرگ‌تر از مقدار  $\sigma_{0.0537}$  *Bucaille* مربوط به فرورونده مخروطی است لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقدار توان کارسختی ماده‌ی مورد آزمون برابر صفر

مطالعه تغییرفرم آلیاژ آمورف توده ای ...

می باشد. جدول (۲) نتایج حاصل از آزمون ها را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۷. منحنی های بار - جابجایی فرورونده دی : (الف) هرمی ویکرز، (ب) مخروطی راکول.

جدول ۲. داده های حاصل از آزمون فرورونده گی

	$C$ (GPa)	$\sigma_y$ (GPa)	$\sigma_{rr}$ (GPa)	$\sigma_{sr}$ (GPa)
آزمون فرورونده گی (فرورونده هرمی ویکرز)	70	1.8	1.1	-
آزمون فرورونده گی (فرورونده مخروطی راکول)	27.07	-	-	0.88

در شکل(۷) نمودار مربوط به شبیه سازی اجزاء محدود نیز نشان داده شده است. همانگونه که از شکل پیداست؛ فرض پیروی منحنی‌های بار-جابجایی حاصل از آزمون، از قانون مور-کولمب تطابق بیشتری با نتایج حاصل از آزمون ایجاد می‌کند؛ که این امر نیز با آنچه در مراجع در مورد رفتار آلیاژهای آمورف بیان شده مطابقت می‌کند[۵،۲۳]. در شبیه سازی مقدار تنش تسلیم  $1.8 \text{ GPa}$ ، بهترین تطابق را بین نتایج حاصل از آزمون و شبیه سازی ایجاد کرد و همچنین مشخص شد که آلیاژ کارسخت نمی‌شود. این مقدار نیز بسیار نزدیک به آنچه که برای تنش تسلیم آلیاژ آمورف مورد مطالعه در مرجع [۲۳] ذکر شده، می‌باشد. پارامترهای  $k_0$  و  $\alpha$  در رابطه‌ی مور-کولمب برای آلیاژ مورد مطالعه بترتیب  $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$  و  $0.13 \text{ MPa}$  بدست آمد که کاملاً شبیه پارامترهایی است که برای آلیاژ آمورف  $830 \text{ MPa}$  در مرجع [۵] ذکر شده است. به این ترتیب می‌توان چنین نتیجه گرفت که لاقل در مورد آلیاژ آمورف فوق و آلیاژ آمورفی که در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است، پارامترهای  $k_0$  و  $\alpha$  به ترکیب شیمیایی بستگی ندارند.

#### ۴- نتیجه گیری

آزمون فروروندگی با فروروندهای هرمی و یکرز و مخروطی راکول روی آلیاژ آمورف توده‌ای  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  انجام شد. با رسم نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از دوآزمون و به کمک روابط موجود، مقدار عددی تنش تسلیم و توان کارسختی محاسبه شد، که بسیار نزدیک به مقادیر گزارش شده در مراجع بود. استفاده از دوفروروندگی با دو زاویه متفاوت، باعث بالا رفتن دقت مجامعتات، بویژه در محاسبه‌ی توان کارسختی گردید. شبیه سازی آزمون فروروندگی با فرض پیروی ماده موردازمون از رابطه‌ی مور-کولمب و نیزفون-میزز، انجام شد. انطباق خوب منحنی حاصل از شبیه سازی آزمون با فرض پیروی ماده از رابطه‌ی مور-کولمب با منحنی تجربی، حاکی از معتبر بودن رابطه‌ی مور-کولمب برای توصیف خواص مکانیکی این نوع مواد می‌باشد. پارامترهای مربوط به رابطه‌ی مور-کولمب برای آلیاژ مورد مطالعه بدست آمد که کاملاً شبیه پارامترهایی است که برای آلیاژهای آمورف مشابه، در مراجع ذکر شده است. به این ترتیب می‌توان چنین نتیجه گرفت که لاقل در مورد آلیاژ آمورف فوق و آلیاژهای آمورف با ترکیب مشابه، پارامترهای  $k_0$  و  $\alpha$  به ترکیب شیمیایی بستگی ندارند. همینطور در مراجع ذکر شده است که رفتار تغییر فرم آلیاژهای آمورف توده‌ای از قانون فون-میزز تبعیت نمی‌کند اما در این پژوهش نشان داده شد که با استفاده از روش ساده تری که آن نیز از FEM بدست آمده است، لاقل می‌توان تنش تسلیم و توان کارسختی را برای آلیاژهای آمورف توده‌ای با دقت خوبی بدست آورد. علی‌رغم اینکه در بدست آوردن این روش ساده فرض شده است که رفتار تغییر شکل آلیاژ از رابطه اساسی تسلیم فون-میزز تبعیت می‌کند.

## ۵- مراجع

1. Clement, W., Willens, R. H. and Duwez, P., *Nature*, 1960, **187**, 869.
2. Manufactured by Howmet Corporation, Greenwich, CT and marketed by Liquid Metal Golf Inc., Laguna Miguel, CA.
3. Donovan, P. E., *Acta metall.*, 1989, **37**, 445.
4. Lowhaphandu, P., Montgomery, S. L. and Lewandowski, J. J., *Scripta mater.*, 1999, **41**, 19.
5. R. Vaidyanathan, M. Dao, G. Ravichandran and S. Suresh, "Study of mechanical deformation in bulk metallic glass through instrumented indentation", *Acta metal.*, 2001, **49**, 3781-3789
6. Tabor D. The hardness of metals. Oxford: Clarendon Press, 1951.
7. Hochstetter G, Jimenez A, Loubet J-L. *J. Macromol. Sci. Phys.* 1999;B38(5-6):681-92.
8. Oliver WC, Pharr GM. *J. Mater. Res.* 1992;7(6):1564-83.
9. Johnson KL. *J. Mech. Phys. Solids* 1970;18:115-26.
10. Field JS, Swain MV. *J. Mater. Res.* 1992;8(2):297-306.
11. Herbert EG, Pharr GM, Oliver WC, Lucas BN, Hay JL. *Thin Solid Film* 2001;398-399:331-5.
12. Larsson PL. *Int. J. Mech. Sci.* 2001;43:895-920.
13. Dao M, Chollacoop N, Van Vliet KJ, Venkatesh TA, Suresh S. *Acta Mater* 2001;49:389-918.
14. Giannakopoulos AE, Suresh S. *Scripta Mater* 1999;40(10):1191-8.
15. Chaudhri MM. *Acta Mater* 1998;46(9):3047-56.
16. Bucaille JL, Felder E. *Phil. Mag. A* 2002;82(10):2003-12.
17. A. E. Giannacopoulos, S. Suresh, "Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation", *Scripta Mater.* Vol. 40, No. 10, pp. 1191-1198, 1999.
18. N. Chollacoop, M. Dao, S. Suresh, "Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters", *Acta Mater.* 51 (2003) 3713-3729.
19. Constantinescu A, Tardieu N. *Inverse Problems in Engineering* 2001;9:19-44.
20. Tardieu N. Identification de lois de comportement elastoviscoplastique par indentation. PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2000.
21. Bucaille JL, Felder E, Hochstetter G. *J. Mat. Sci* 2002;37:3999-4011.
22. Bucaille JL, Stauss S, Felder E, Michler J, "Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters", *Acta Mater.* 51 (2003) 1663-78.

23. V.Keryvin,"Indentation of metallic glasses:relationships between shear bands observed around the prints and hardness",Acta Mater. 55 (2007) 2565-2578.

# Study of mechanical deformation of the $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glass through instrumented indentation using different sharp indenters

A. Rezaee-Bazzaz\*, M. Marvi-Mashhadi, M. Haddad-Sabzevar, M. Rezaee, M. Abbasi

Materials and Metallurgical Engineering Department, ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Bazaz-r@um.ac.ir

## Abstract

Indentation testing is a common method to assess the mechanical properties of materials. In this test, indenter indents sample surface slowly and force-penetration curve is recorded, simultaneously. In this study, indentation testing was carried out in an attempt to measure the yield strength,  $\sigma_y$ , and the strain hardening exponent, n, of  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  bulk metallic glass. Indentation studies are conducted fore two different indenters: Vickers pyramid and Rockwell conical indenters. The measured values of  $\sigma_y$  and n were in good agreement with the corresponding values reported for other BMGs with similar composition. Finite element method was carried out to simulate the indentation test using Mohr-Coulomb and von Mises criteria. Finite element simulation using Mohr-Coulomb model with parameters coming from force-penetration curves, describes pretty well experimental data. Therefore, Mohr-Coulomb model is the best criterion to describe mechanical behavior of this group of materials.

**Keywords:** Bulk Metallic Glass, Indentation testing, Yield Strength, Strain Hardening Exponent