



## مطالعه تغییر فرم آلیاژ آمورف توده ای $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ با استفاده از آزمون فروروندگی

ابوالفضل رضایی بزاز<sup>۱</sup> محسن حداد سبزواری<sup>۲</sup> - محمد مروی مشهدی<sup>۳</sup> - مهدی محمد آبادی<sup>۴</sup>

### چکیده

در این پژوهش به منظور دستیابی به خواص مکانیکی آلیاژ آمورف توده ای  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  از آزمون فروروندگی با فرورونده ی ویکرز استفاده شده است. در این آزمون فرورونده با سرعتی بسیار پایین بر روی نمونه فشرده شده و همزمان عمق فرورفتگی و بار اعمالی اندازه گیری و ثبت می شود. با توجه به روابط آزمون فروروندگی و با استفاده از منحنی بار-جابجایی حاصل از آزمون، تنش تسلیم و توان کارسختی این آلیاژ محاسبه گردید. نتایج بدست آمده و الگوی سیلان مشاهده شده در تصاویر تهیه شده از محل اثر فرورونده با آنچه در مراجع برای آلیاژهای مشابه ذکر شده مطابقت خوبی دارد.

**واژه های کلیدی:** آلیاژ آمورف توده ای؛ آزمون فروروندگی؛ تنش تسلیم؛ کارسختی

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مهندسی مواد و متالورژی

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مهندسی مواد و متالورژی

<sup>۳</sup> دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مهندسی متالورژی

<sup>۴</sup> فارغ التحصیل مقطع کارشناسی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مهندسی مواد و متالورژی

## مقدمه

تحقیق درباره خواص مکانیکی فلزات شیشه ای، به سال 1960 بر می گردد [1]. در آن زمان مشخص شد که در سرعت های سرد کردن بالا (بیش از  $10^5 \text{ ks}^{-1}$ )، می توان روبان های نازک، سیم یا ورقه هایی از جنس فلزات آمورف تهیه کرد. نیاز به سرعت های سرد کردن بالا، ابعاد فلزات آمورف را به مقاطع نازک محدود می کند. Chen با مطالعات خود، پیشرفت قابل توجهی در این زمینه به وجود آورد؛ وی نشان داد که در سرعت های سرد کردن حدود  $10^{13} \text{ ks}^{-1}$  می توان میله های یا ابعاد میلی متری از جنس فلزات شیشه ای تهیه کرد [2,3]. بعداً در سال های 1980 و 1990، تکنیک های ریخته گری معمولی برای سنتز فلزات شیشه ای توده ای در ابعاد سانتیمتری به کار گرفته شد [4,5]. با تولید فلزات شیشه ای در شکل توده ای، تحقیق درباره خواص مکانیکی آلیاژهای آمورف امکان پذیر شد. از بین این آلیاژها، فلز شیشه ای توده ای پایه Zr، به صورت تجاری در بین مواد مهندسی توسعه یافت [6].

با اطلاع از کاربرد آلیاژهای آمورف به عنوان مواد مهندسی، مطالعه درباره خواص مکانیکی آنها ضروری به نظر می رسد. مشخصات تغییر شکل 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 پاسخ تغییر شکل الاستوپلاستیک آن ها، به وسیله تنش برشی، همانند تنش های موضعی تحت تأثیر قرار می گیرد و ممکن است به وسیله تنش های هیدروستاتیک نیز تحت تأثیر قرار گیرد [7,8]. سوم این که تغییر شکل فلزات شیشه ای، به طور خیلی زیاد، ناهمگن است، که به علت تجمع کرنش های غیر الاستیک در باندهای برشی موضعی می باشد.

در سال 2001 Suresh و همکارانش مطالعه ای پیرامون تغییر شکل مکانیکی فلز شیشه ای توده ای به وسیله آزمون فرو روندگی با فرورونده Berkovich انجام داده است [9]. اما در مطالعه حاضر، از آزمون فروروندگی با فرورونده هرمی (Vickers) استفاده شده است. در این آزمایشات، عمق نفوذ فرو رونده بر روی ماده و بار فرو روندگی به عنوان تابعی از عمق نفوذ، در حین بارگذاری-بار برداری ثبت می شوند.

نمودارهای بار-جابجایی به دست آمده در حین فرو روندگی، اطلاعات مهمی پیرامون خصوصیات تغییر شکل میکروسکوپی فلزات شیشه ای فراهم می کند. هدف مطالعه حاضر، انجام یک آزمایش تجربی فروروندگی بر روی آلیاژ آمورف توده ای پایه Zr است، که بدین وسیله، تنش تسلیم و توان کارسختی آن به دست می آیند.

## تحلیل روابط موجود برای آزمون فروروندگی به کمک فرورونده هرمی

Suresh و Giannakopoulos در تحقیق خود [10]، به بررسی و محاسبه میزان تنش تسلیم و همچنین سایر پارامترهای 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 و همکاران انجام شده است و روش های دیگری ارائه گردیده است [11]. Suresh و همکاران به کمک فرورونده هرمی در یک سیکل بارگذاری - باربرداری، پارامترهای حداکثر عمق ایجاد شده ( $h_{\max}$ ) و عمق باقیمانده پس از باربرداری ( $h_r$ ) را بدست آوردند؛ همچنین با عبور دادن منحنی درجه 2 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 به کمک روش FEM روابط مورد نیاز برای محاسبه تنش تسلیم را ارائه دادند [10].

جدول (1) رابطه بين نسبت عمق باقیمانده پس از باربرداري ( $h_r$ ) به حداکثر عمق ایجاد شده پس از بارگذاري ( $h_{max}$ ) را با پارامتر  $Y$  نشان می‌دهد. نسبت  $\frac{h_r}{h_{max}}$  بیانگر میزان تغییر شکل مومسان و کارسختی است. پارامتر  $Y$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \frac{\sigma_{0.29} - \sigma_y}{0.29E^*} + \frac{11\sigma_y}{E^*} \quad (1)$$

جدول 1- ارتباط عددی بین کارسختی ماده و عمق باقیمانده مؤثر [10]

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

که در جدول فوق،  $\sigma_{0.29}$  تنش در کرنش 0.29%،  $\sigma_y$  تنش تسلیم معادل کرنش 0.2% و  $E^*$  تلفیقی از مدول یانگ فرورونده ( $E_{in}$ ) و ماده فروشونده ( $E$ ) هستند. برای محاسبه  $E^*$  رابطه زیر ارائه شده است:

$$E^* = \left[ \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_{in}^2}{E_{in}} \right]^{-1} \quad (2)$$

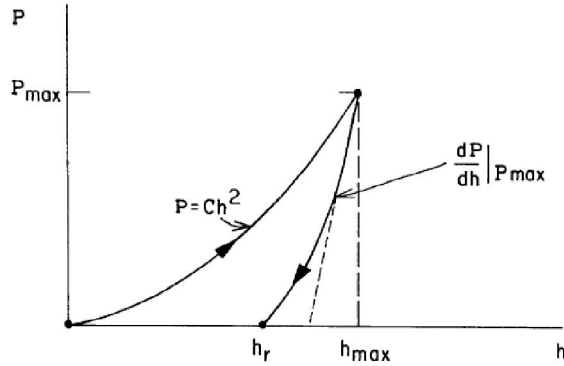
$\nu_{in}$  ضریب پواسون برای فرورونده از جنس الماس است و برابر 0/02 در نظر گرفته می‌شود. همچنین  $E_{in}$  مدول یانگ این فرورونده است که برابر 900GPa در نظر گرفته شده است [10].  $\nu$  ضریب پواسون نمونه، برابر 0/36 و  $E$  مدول یانگ نمونه، برابر 96 GPa در نظر گرفته شده است [9]. می‌توان با عبور دادن یک منحنی درجه دوم از نتایج عددی محاسبه شده در جدول (1)، به رابطه‌ی زیر دست یافت؛ اما این رابطه دارای دقت کمتری نسبت به جدول (1) است.

$$\frac{\sigma_{0.29} - \sigma_y}{0.29E^*} = 1 - 0.142 \left( \frac{h_r}{h_{max}} \right) - 0.957 \left( \frac{h_r}{h_{max}} \right)^2 \quad (3)$$

نهایتاً برای محاسبه تنش تسلیم، رابطه زیر نیاز است:

$$C = 6.5\sigma_{0.29} \left\{ 1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_{0.29}} \right\} \left\{ -1 + Ln \left( \frac{E^*}{\sigma_y} \right) \right\} \quad (4)$$

که  $C$  همان طور که قبلاً ذکر شد، مقدار انحنای قسمت بارگذاري نمودار نیرو - جابجایی به شرط عبور معادله  $P = Ch^2$  از این قسمت است. شکل (1)، شماتیکی از نمودار نیرو - جابجایی و قانون کیک را نشان می‌دهد.



شکل 1- شماتیکی از نمودار نیرو - جابجایی و قانون کبک [12].

## روش آزمایش

### دستگاه آزمون و مواد مورد آزمون

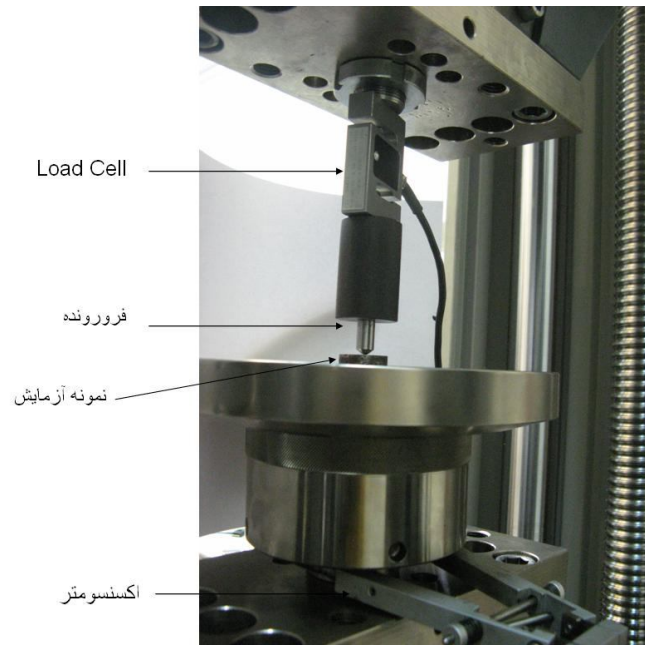
برای انجام آزمون فروروندگی، از دستگاه آزمون کشش Zwick Z250 با دقت  $\pm 3N$  استفاده شد؛ دقت اندازه گیری جابجایی این دستگاه برابر  $\pm 3\mu m$  است. در انجام آزمایش فروروندگی، از یک Load Cell 2 تنی با دقت نیروی  $\pm 0.01N$  و یک اکستنسومتر با دقت  $\pm 0.3\mu m$  استفاده گردید.

ماده ای که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت، یک آلیاژ آمورف توده ای با ترکیب شیمیایی  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  بود. نمونه های آزمایش، به شکل مستطیل و به طول و عرض 3 میلی متر و ضخامت 1 میلی متر تهیه شدند. تعداد 3 نمونه تهیه شد، که روی هر یک حداقل 5 بار آزمون فروروندگی انجام شد. سطح نمونه های آزمون فروروندگی قبل از انجام آزمون و برای از بین بردن ناصافی سطح، با کاغذ سنباده 1000 میکرون سنباده زنی شدند.

### آزمون فروروندگی به کمک فرو رونده هرمی

شکل (2) نحوه انجام آزمون فروروندگی را نشان می دهد. فرو رونده ی از نوع ویکرز مورد استفاده قرار گرفت که بار بین 10N و حداکثر 20N به وسیله آن بر روی نمونه ها اعمال شد. سرعت بارگذاری  $1\mu m \cdot min^{-1}$  بود. بارگذاری تا نیروی مشخصی صورت گرفت و سپس باربرداری انجام شد؛ سپس داده ها با استفاده از نرم افزار Excel مورد بررسی قرار گرفتند

و نمودارهای نیرو - جابجایی رسم شدند. سپس مقادیر حداکثر عمق ایجاد شده، عمق باقیمانده و در نتیجه، نسبت  $\frac{h_r}{h_{max}}$  و انحنای قسمت بارگذاری بدست آمدند. سپس به کمک روابط بحث شده در قسمت 2 تحقیق حاضر، تنش تسلیم بدست آمد.

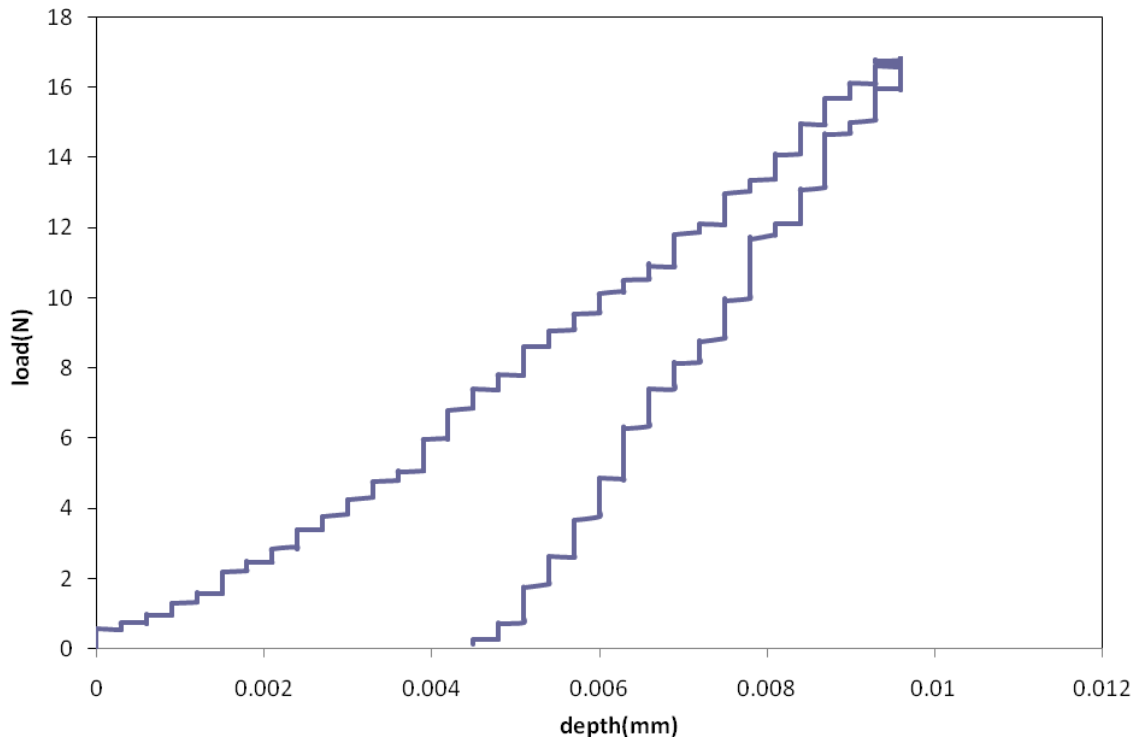


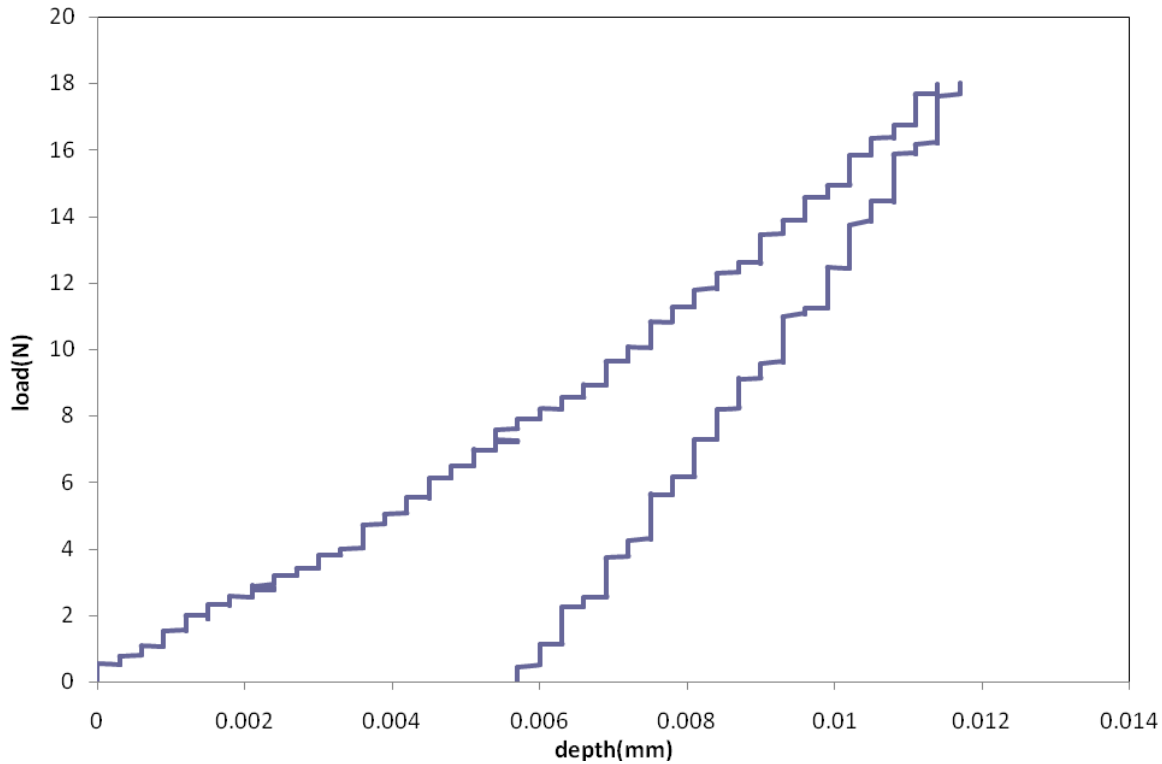
شکل 2- نحوه انجام آزمون فرورندگی.

باید توجه داشت که به علت نیاز به بالا بودن دقت آزمون در اندازه گیری عمق های ایجاد شده در ماده فروشونده، از اکستنسیومتر کششی با دقت  $\pm 0/3 \mu m$  استفاده شد؛ نحوه استفاده از اکستنسیومتر، در شکل (2) نشان داده شده است.

### نتایج و بحث

نمودار نیرو به عنوان تابعی از عمق فرورفتگی در شکل (3) نشان داده شده است.





شکل 3- نمودارهای نیرو- جابجایی حاصل از آزمایش فروروندگی.

حالت دندان‌های ایجاد شده در نمودارهای فوق که در مراجع دیگر نیز مشاهده شده است به دلیل ماهیت نا همگن تغییر شکل در آلیاژهای شیشه‌ای می‌باشد [9]. لازم به ذکر است در این تحقیق این رفتار در سرعت‌های بالاتر بارگذاری مشاهده شد.

تنش تسلیم ( $\sigma_y$ )، توان کارسختی ( $n$ ) و سایر اطلاعات به دست آمده از آزمون فروروندگی، در جدول 2 آمده‌اند.

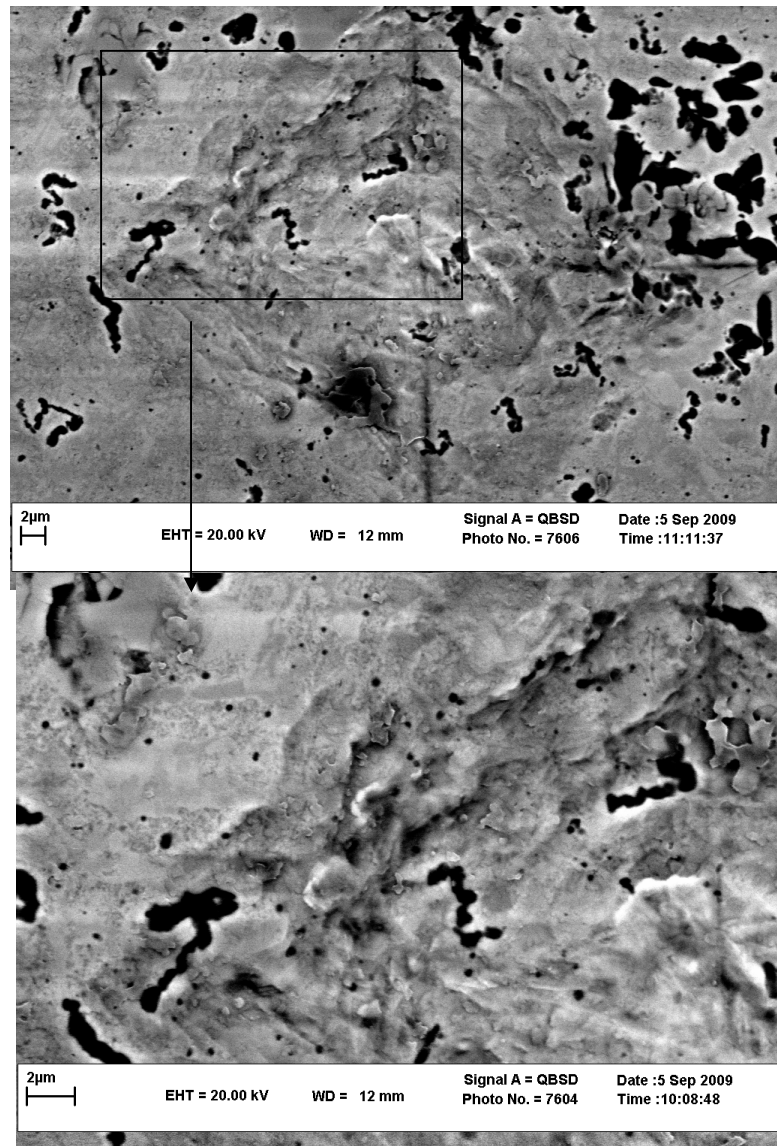
با جایگذاری مقدار تنش تسلیم بدست آمده در رابطه (1) مشخص شد که مقدار  $\sigma_{0.29}$  کوچکتر از  $\sigma_y$  می‌باشد و در اینصورت با توجه به آنچه در مراجع آمده است مقدار  $n$  را برابر صفر فرض کرده و مقدار  $\sigma_y$  را برابر با  $\sigma_{0.29}$  گرفته و با توجه به رابطه (4) مقدار  $\sigma_y$  را مجدداً محاسبه و در صورت تطابق قابل قبول با آنچه که قبلاً برای  $\sigma_y$  بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که فرض  $n=0$  درست بوده است [10]. با انجام عملیات مذکور و محاسبه مجدد  $\sigma_y$  فرض  $n=0$  نتیجه شد.

جدول 2- اطلاعات بدست آمده از نمودارها برای ماده ی مورد آزمایش

	C (Gpa)	$\sigma_y$ (GPa)	n
آزمایش	70-90	1.8-2.65	0
مرجع 9	72	1.9	0

با توجه به نتایج آزمایش، مشخص شد که تنش تسلیم و توان کارسختی بدست آمده برای نمونه، در تطابق بسیار خوبی، با نتایج ارائه شده در مراجع می باشند [9].

همچنین تصاویر SEM تهیه شده از اثر فرورونده روی سطح نمونه، وجود باندهای برشی را در اطراف محل فرورفتگی نشان می دهند (شکل 4). وجود باندهای برشی در این تصویر نیز موید ماهیت نا همگن تغییر شکل در آلیاژهای شیشه ای می باشد که با آنچه در مراجع در مورد مواد مشابه ذکر شده است؛ مطابقت می کند.



شکل 4- تصاویر SEM تهیه شده از اثر فرو رونده بر سطح نمونه و باندهای برشی ایجاد شده در اطراف آن.



## نتيجه گيري

آزمون فرو روندگي به کمک فرو رونده هر می ويکرز بر روی آلياژ آمورف توده ای با تركيب شيميايي  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  انجام شد. با رسم نمودارهای نیرو- جابجایی حاصل از آزمایش و به کمک روابط موجود، مقدار عددي تنش تسليم و توان کارسختی محاسبه شد، که بسیار نزدیک به مقادير گزارش شده در مراجع بود. همچنين تصاویر SEM بدست آمده از اثر فرو رونده روی سطح نمونه، وجود باندهای برشی در اطراف اثر فرو رونده روی سطح را اثبات می کنند. در مراجع تا کنون برای بدست آوردن تنش تسليم و توان کارسختی از روش FEM استفاده شده است. همينطور در مراجع ذکر شده است که رفتار تغيير فرم آلياژهای آمورف توده ای از قانون فون میزز تبعیت نمی کند. در اين تحقيق نشان داده شد که با استفاده از روش ساده تری که آن نیز از FEM بدست آمده است لااقل می توان تنش تسليم و توان کارسختی را برای آلياژهای آمورف توده ای با دقت خوبی بدست آورد. علی رغم اینکه در بدست آوردن اين روش ساده فرض شده است که رفتار تغيير شکل آلياژ از قانون فون میزز تبعیت می کند.

- [1] Clement, W., Willens, R. H. and Duwez, P., *Nature*, 1960, 187, 869.
- [2] Chen, H. S., *Acta metall.*, 1974, 22, 1505.
- [3] Chen, H. S., *Rep. Prog. Phys.*, 1980, 43, 353.
- [4] Inoue, A., *Acta mater.*, 2000, 48, 279.
- [5] Johnson, W. L., *MRS Bull.*, 1999, 24(10), 42.  
[6] Manufactured by Howmet Corporation, Greenwich, CT and marketed by Liquid Metal Golf Inc., Laguna Miguel, CA.
- [7] Donovan, P. E., *Acta metall.*, 1989, 37, 445.  
[8] Lowhaphandu, P., Montgomery, S. L. and Lewandowski, J. J., *Scripta mater.*, 1999, 41, 19.  
[9] 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
- [10] A. E. Giannacopoulos, S. Suresh, "Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation", *Scripta Mater.* Vol. 40, No. 10, pp. 1191-1198, 1999.
- [11] N. Chollacoop, M. Dao, S. Suresh, "Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters", *Acta Mater.* 51 (2003) 3713-3729.
- [12] Suresh et al. "Depth sensing indentation and methodology for mechanical property measurements", Patent No. US 6,247,355 B1 (2001).