

## تأثیر رفتار کارسختی ماده بر مقدار بشکه ای شدن و توزیع تنش و کرنش در آزمایش فشار با استفاده از روش اجزای محدود

شیوا مولایی<sup>۱</sup>، مهرداد شهباز<sup>۲</sup> و رامین ابراهیمی<sup>۳\*</sup>

### چکیده

مقدار بشکه‌ای شدن در آزمایش فشار نسبت به شرایط اصطکاکی بسیار حساس است. بر این اساس، این آزمایش می‌تواند به عنوان یک روش ساده برای برآورد فاکتور اصطکاک بکار گرفته شود. از سوی دیگر، علم بر اثر پارامترهای دیگر از جمله خواص ماده بر مقدار بشکه ای شدن، موجب افزایش دقت اندازه گیری این آزمایش در برآورد مقدار اصطکاک می‌شود. در این پژوهش اثر خواص مکانیکی ماده از قبیل توان کارسختی،  $n$ ، ضریب استحکام،  $k$ ، و تنش تسلیم،  $\sigma_0$ ، بر پدیده بشکه ای شدن در آزمایش فشار تک محوری با استفاده از روش اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است و بدین ترتیب، اثر پارامترهای یاد شده بر چگونگی توزیع تنش و کرنش در ماده، بررسی شده است. آزمایش های فشار انجام شده نتایج ناشی از شبیه سازی را تأیید می‌کنند.

واژه های کلیدی: اصطکاک، آزمایش فشار، بشکه ای شدن، روش اجزای محدود.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.

۲- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.

۳- دانشیار، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.

\*- نویسنده مسئول مقاله: ebrahimi@shirazu.ac.ir

## پیشگفتار

آزمایش فشار بواسطه اهمیت فراوانی که در تعیین رفتار تنش - کرنش ماده و اصطکاک بین قالب و قطعه دارد، به وسیله پژوهشگران بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در این فرآیند، اصطکاک بین قالب و قطعه به صورت مستقیم بر تغییر فرم پلاستیک اثر می گذارد و در نتیجه، با ایجاد تغییر فرم ناهمگن، پدیده بشکه ای شدن در نمونه رخ می دهد [۱]. بررسی های اولیه در مورد این پدیده و اندازه گیری مقدار بشکه ای شدن از سال ۱۹۶۹ به وسیله کول کارنی و کالپکجیان آغاز شد [۲].

در سال های اخیر با پیشرفت روش اجزای محدود و شبیه سازی های کامپیوتری فرایندهای شکل دهی [۳]، امکان محاسبه توزیع تنش، کرنش، دما و متغیر های دیگر در فلز فراهم شده است. کارتر و همکارانش با استفاده از این روش، اثر اصطکاک بر روی رفتار فلزات تحت فشار تک محوری را ارزیابی کرده و هم چنین، توزیع کرنش را مورد بحث قرار داده اند [۴]. بررسی اثر اصطکاک بر تغییر سختی و توزیع کرنش مؤثر در آزمایش فشار نشان داده است که با افزایش اصطکاک، شیب کاهشی کرنش مؤثر از مرکز به سطح بیش تر می شود و افزایش اصطکاک، تغییرات زیاد کرنش از مرکز به سطح و در نتیجه افزایش بشکه ای شدن را در پی خواهد داشت. به گونه ای که با فاصله از مرکز، مقدار کرنش کاهش یافته و بیش تر تغییر شکل متمرکز در مرکز قطعه می باشد. هم چنین، سختی از مرکز به سطح با بهبود شرایط اصطکاک با تقریب خوبی یکنواخت می شود [۵].

بررسی اثر متغیر های گوناگون فرآیندی از قبیل شرایط اصطکاک و اندازه ارتفاع به قطر نمونه بر مقدار بشکه ای شدن [۲]، هم چنین، بررسی اثر کرنش، نرخ کرنش و دما [۶] بر اصطکاک و ثابت نبودن شرایط اصطکاک در طول آزمایش فشار از جمله مسائلی است که به وسیله پژوهشگران مورد ارزیابی قرار گرفته است. در فرآیند فشار تک محوری، تنش میانگین از مرکز به سمت سطح آزاد، از فشاری به کششی تبدیل می شود، به گونه ای که تغییر شرایط اصطکاک بر روی این توزیع اثر گذار است [۷-۸].

ابراهیمی و نجفی زاده با استفاده از تئوری کران بالایی و در نظر گرفتن اثر مستقیم شرایط اصطکاک بر هندسه قطعه و مقدار بشکه ای شدن، رابطه ای برای فاکتور ثابت اصطکاک،  $m$  ارائه نمودند که در این رابطه از اثر خواص مکانیکی صرف نظر شده است [۹]. در این پژوهش هدف بررسی اثر خواص مکانیکی ماده از قبیل توان کارسختی،  $n$  ضریب استحکام،  $k$  و تنش تسلیم،  $\sigma_0$  بر پدیده بشکه ای شدن و چگونگی توزیع تنش و کرنش، در شرایط اصطکاک ثابت می باشد که برای این منظور از نرم افزار المان محدود (version 9.0) DEFORM-2D استفاده شده است [۱۰]. افزون بر این، با انجام آزمایش های فشار، درستی نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

## روش اجزای محدود

در آنالیز فرآیند فشار تک محوری با نرم افزار اجزای محدود DEFORM-2D، فک های بالا و پایین دستگاه پرس، جسم صلب فرض شدند و از آن جا که در بررسی ها، کرنش الاستیک ماده قابل صرف نظر کردن است، لذا قطعه کار به صورت صلب- پلاستیک تعریف شد. به دلیل متقارن بودن شرایط تغییر فرم در آزمایش فشار، تمامی شبیه سازی ها بر همین اساس انجام شدند. تعداد ۳۰۰۰ المان چهار گوشه روی قطعه کار ریخته شد و گزینه مش ریزی دوباره اتوماتیک برای کرنش های بزرگ، انتخاب شد. هم چنین، روش حل Skyline و روش همگرایی Newton-Raphson برای شبیه سازی ها در نظر گرفته شد. پارامترهای هندسی و فرآیندی برای شبیه سازی ها در جدول ۱ آمده است. با توجه به کارپذیری کم تر برخی از مواد، بمنظور تعمیم نتایج بدست آمده برای گستره ای از مواد، تمامی بررسی ها در کرنش ۰/۵ انجام گرفت. شکل ۱ هندسه قطعه را پیش و پس از تغییر فرم نشان می دهد که در آن  $R_0$  و  $H_0$  شعاع و ارتفاع اولیه قطعه می باشند. هم چنین،  $R_T$ ،  $H$  و  $R_M$  به ترتیب ارتفاع لحظه ای، شعاع بالایی و شعاع وسط قطعه پس از تغییر فرم می باشند.

## نتایج و بحث

### نتایج ناشی از شبیه سازی ها

در شرایطی که اصطکاک بین قطعه و قالب در نظر گرفته نشود و پدیده بشکه ای شدن رخ ندهد، به ازای جابه جایی فک بالایی، در همه قطعه کرنشی یکسان ایجاد می شود، اما در عمل اصطکاک بین فک و ماده به عنوان مانعی برای حرکت در جهت شعاعی ماده زیر فک عمل کرده و سیلان شعاعی ماده در این ناحیه را دشوار می سازد. در حالی که نواحی میانی، ممانعتی برای سیلان در جهت شعاعی ندارند. در نتیجه، وجود اصطکاک باعث توزیع ناهمگن کرنش در نمونه می شود. شکل ۲ چگونگی توزیع کرنش در شرایط وجود و عدم وجود اصطکاک را نشان می دهد.

### اثر ضریب استحکام، $k$ بر روی پدیده بشکه ای شدن

برای بررسی اثر ضریب استحکام بر روی پدیده بشکه ای شدن، مواد گوناگون با توان های کارسختی یکسان و ضرایب استحکامی متفاوت تعریف شدند. نتایج ناشی از تعریف  $k$  های متفاوت، با شرط ثابت بودن توان کارسختی، نشان می دهد که این پارامتر هیچ گونه اثری بر توزیع کرنش مؤثر در ماده و پدیده بشکه ای شدن ندارد. شکل ۳ توزیع کرنش مؤثر در کرنش اعمالی ۰/۵ برای دو ماده با توان کارسختی ۰/۱ و  $k$  های متفاوت ۲۰۰ و ۴۰۰ MPa، در شرایط اصطکاک  $m = ۰/۱$  را نشان می دهد. علت عدم تأثیر ضریب استحکام بر مقدار بشکه ای شدن را می توان این گونه بیان کرد که با تغییر مقدار  $k$ ، استحکام کل ماده به یک اندازه تغییر خواهد کرد. یعنی استحکام نقاط گوناگون ماده نسبت به یکدیگر ثابت می ماند. بدین ترتیب این پارامتر، اثر موضعی بر حسب موقعیت مکانی ماده نخواهد داشت. در نتیجه، تغییر در مقدار  $k$  بر روی نحوه سیلان نقاط گوناگون ماده نسبت به یکدیگر، اثر ندارد. از آنجا که بشکه ای شدن، پدیده ای نسبی است و میزان آن به سیلان نقاط گوناگون ماده نسبت به یکدیگر بستگی دارد، با تغییر  $k$  همچنان ثابت باقی خواهد ماند.

### اثر توان کارسختی، $n$ بر روی پدیده بشکه ای شدن

بمنظور بررسی اثر کارسختی بر پدیده بشکه ای شدن، مواد گوناگون با توان های کارسختی متفاوت (۰/۱-۰/۶)  $n$  و تنش تسلیم یکسان با رابطه کارسختی هولمن،  $\sigma = k\varepsilon^n$ ، برای آنالیز المان محدود در نظر گرفته شدند. در این روابط، برای مواد گوناگون،  $k$  بگونه ای انتخاب شد که در توان های کارسختی متفاوت، تنش تسلیم یکسان باقی بماند (شکل ۴). در شرایط اصطکاک ثابت، با افزایش توان کارسختی اندازه تنش سیلان در ناحیه میانی که بیش تر کرنش یافته است نسبت به مناطق زیر فک که تحت کرنش کمتری قرار گرفته اند، بسیار افزایش می یابد. بدین ترتیب با افزایش کارسختی، نواحی زیر فک که دارای تنش سیلان کمتری نسبت به نواحی مرکزی قطعه می باشند، تمایل بیش تری برای سیلان در جهت شعاعی از خود نشان می دهند. شکل ۵ نحوه توزیع تنش برای سه توان کارسختی را نشان می دهد. همان گونه که انتظار می رود به گونه نسبی تنش سیلان ماده زیر فک در شرایطی که توان کارسختی بزرگ است کم تر می باشد.

نتایج مربوط به توزیع کرنش مؤثر در شرایط اصطکاک یکسان برای توان های کارسختی متفاوت (شکل ۶) بیانگر تمایل به یک نواخت شدن توزیع کرنش و کاهش پدیده بشکه ای شدن با افزایش توان کارسختی است که این نیز بیانگر نتایج بدست آمده بالاست.

اندازه گیری های مربوط به اختلاف شعاع نمونه،  $\Delta R$ ، در موقعیت وسط و بالای نمونه نشان می دهد که با افزایش توان کارسختی در شرایط اصطکاک ثابت،  $\Delta R$  کاهش می یابد (شکل ۷). با افزایش توان کارسختی، منطقه مرده زیر فک کوچک تر می شود. به بیان دیگر، با افزایش کارسختی، تمایل ماده زیر فک برای سیلان در جهت شعاعی افزایش می یابد زیرا این ناحیه نسبت به دیگر نواحی دارای تنش سیلان پایین تری خواهد بود. شکل ۸ توزیع سرعت در جهت عمودی برای دو ماده با  $n = ۰/۱$  و  $n = ۰/۶$  در کرنش اعمالی ۰/۵ را نشان می دهد. وسعت ناحیه زیر فک (منطقه مرده) که با سرعتی نزدیک به سرعت فک حرکت می کند، با افزایش توان کارسختی کاهش می یابد. این موضوع نیز راحتی نسبی سیلان ماده

زیر فک در شرایطی که ماده خاصیت کارسختی بالاتری دارد را تأیید می‌کند.

### اثر تنش تسلیم بر روی بشکه ای شدن در شرایط پلاستیک کامل

برای بررسی اثر تنش تسلیم بر مقدار بشکه‌ای شدن نمونه در آزمایش فشار تک محوری، از داده های تنش-کرنش مربوط به حالت پلاستیک کامل در آنالیز المان محدود استفاده شد. این نوع رفتار ماده را می‌توان برای شرایط تغییر شکل در دماهای بسیار بالا و یا شرایط کرنش پلاستیک بسیار شدید نسبت داد [۱۱].

تطابق بسیار خوب داده‌های مربوط به تنش تسلیم های گوناگون در شکل ۹، بیانگر عدم تأثیر تنش تسلیم بر مقدار بشکه ای شدن نمونه با رفتار تنش-کرنش پلاستیک کامل است. در ماده‌ای که از خود خاصیت کارسختی نشان نمی‌دهد، توزیع تنش متناسب با توزیع کرنش تغییر نخواهد کرد بلکه مقدار تنش همواره ثابت است. در نتیجه، اثر تغییر در تنش تسلیم در سر تا سر نمونه به صورت یکنواخت و نه موضعی خواهد بود. بگونه ای که با تغییر در تنش تسلیم، تنش سیلان نسبی نقاط گوناگون ماده ثابت خواهد ماند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بدون در نظر گرفتن خطاهای اندازه‌گیری با افزایش مقادیر اصطکاکی، مقدار بشکه‌ای شدن افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که شیب افزایش مقدار بشکه‌ای شدن با افزایش فاکتور ثابت اصطکاک، ابتدا کاهش و پس از آن ثابت باقی می‌ماند. ثابت ماندن آن در شرایط اصطکاکی شدید نشان می‌دهد که مقدار بشکه‌ای شدن حدی بحرانی دارد، به گونه‌ای که با افزایش اصطکاک، بشکه ای شدن با سرعتی کم‌تر رخ می‌دهد.

### نتایج آزمایشگاهی

بمنظور بررسی اثر توان کارسختی بر مقدار بشکه‌ای شدن، دو نمونه مسی با نسبت  $H_0/D_0 = 1/5$  و توان‌های کارسختی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. یکی از نمونه‌ها، مورد تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته و کرنش معادل  $1/4$  در آن ذخیره شده است. بنابراین، این نمونه رفتار پلاستیک کامل را در نمودار

تنش-کرنش از خود نشان می‌دهد (شکل ۱۰) [۱۱]. نمونه دیگر، در دمای  $650^\circ\text{C}$  به مدت ۲ ساعت آنیل و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در کوره تا دمای محیط سرد شده است. با توجه به نمودار تنش-کرنش آن، توان کارسختی این نمونه مسی تقریباً  $0/5$  می باشد (شکل ۱۱). گفتنی است که شرایط اصطکاکی برای هر دو نمونه یکسان است و آزمایش در شرایط اصطکاکی خشک، بدون استفاده از روان‌ساز انجام شده است.

شکل ۱۲، این نمونه ها را پس از آزمایش فشار با کرنش  $0/4$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در شرایط اصطکاکی یکسان مقدار بشکه ای شدن برای دو نمونه از یک جنس با توجه به توان کارسختی ماده، متفاوت است. در نمونه تغییر فرم یافته که توان کارسختی آن بسیار ناچیز است، بشکه ای شدن کاملاً مشخص است. در حالی که در نمونه آنیل با توان کارسختی بزرگ ( $n=0/5$ )، بشکه ای شدن چندان محسوس نیست. بنابراین، با توجه به دلایل ذکر شده، کاهش میزان بشکه‌ای شدن در شرایط اصطکاکی یکسان با افزایش توان کارسختی، در عمل نیز مشاهده می‌شود.

### نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه سازی آزمایش فشار تک محوری در نرم افزار اجزاء محدود DEFORM و بررسی توزیع تنش مؤثر و کرنش مؤثر، اثر خواص مکانیکی ماده بر پدیده بشکه‌ای شدن در شرایط اصطکاکی ثابت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش توان کارسختی و قابلیت سخت شدن ماده میزان بشکه ای شدن کاهش می‌یابد زیرا مقدار تنش مؤثر در ناحیه میانی قطعه که تحت کرنش بیش‌تری قرار گرفته است، بسیار زیاد می‌شود. در نتیجه سیلان شعاعی ماده در این ناحیه که خود دلیل بشکه‌ای شدن نمونه می‌باشد، کاهش می‌یابد و بدین ترتیب ماده زیر فک که تحت کرنش مؤثر کم‌تری نسبت به نواحی میانی قرار داشته، شروع به سیلان در جهت شعاعی خواهد کرد. آزمایش‌های فشار انجام شده نیز نتایج بدست آمده از شبیه سازی را تأیید می‌کنند. همچنین، بررسی اثر ضریب استحکام،  $k$  و تنش تسلیم نشان داد که

میزان بشکه ای شدن بی تأثیرند.

این دو پارامتر در نحوه توزیع تنش و کرنش اثری ندارند و فقط مقادیر تنش و کرنش را تغییر می دهند، بنابراین، بر

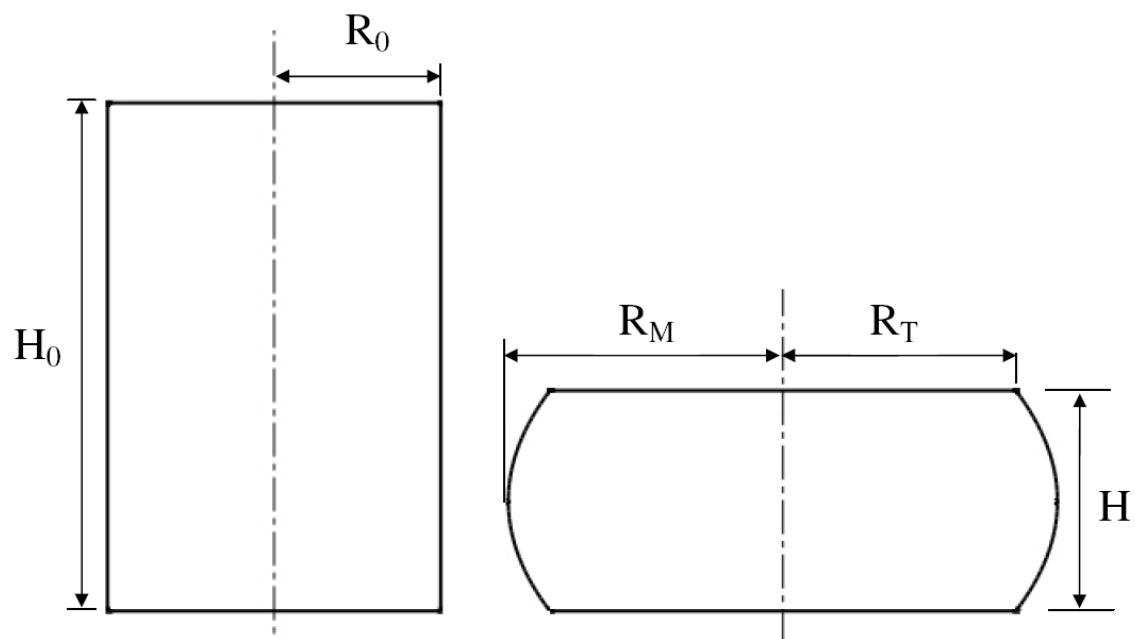
### References

- 1- K. Manisekar and R. Narayanasamy, "Some Aspect on Barreling in Solid of Non-Circular Aluminum during Cold Upset Forging with Different Lubricants", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 12, pp. 24-32, 2005.
- 2- K. M. Kulkarni and S. Kalpakjian, "A Study of Barreling as an Example of Free Deformation in Plastic Working", Journal of Engineering for Industry, Vol. 91, pp. 743-754, 1969.
- 3- Sh. Koayashi, Oh. Soo-IK and T. Altan, "Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford Series on Advanced Manufacturing", 1989.
- 4- W. T. Carter, Jr. and D. Lee, "A Finite Element Analysis of Cylinder and Ring Compression and Its Experimental Verification", Computers & Structures, Vol. 21, pp. 1-19, 1985.
- 5- R. Ganesh Narayanan, M. Gopal and A. Rajadurai, "Influence of Friction in Simple Upsetting and Prediction of Hardness Distribution in a Cold Forged Product", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 36, pp. 1-13, 2008.
- 6- S. Y. Lin, "An Investigation of Die-Workpiece Interface Friction during the Upsetting Process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 54, pp. 239-248, 1995.
- 7- J. Devaux, J. C. Gelin, J. Oudin and Y. Ravalard, "Theoretical Analysis and Experimental Applications of Barreling and Folding in Cylinder Upsetting Tests", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 26, pp. 555-572, 1984.
- 8- P. L. Menezes, K. Kumar, Kishore and S. V. Kailas, "Influence of Friction during Forming Processes—A Study Using a Numerical Simulation Technique", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 40, pp. 1067-1076, 2009.
- 9- R. Ebrahimi and A. Najafizadeh, "A New method for Evaluation of Friction in Bulk Metal Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 152, pp. 136-143, 2004.
- 10- DEFORM-2D V 9.0., Sci. Form. Technol. Corporation (SFTC).
- 11- W. Wei, K. X. Wei and G. J. Fan, "A New Constitutive Equation for Strain Hardening and Softening of fcc Metals during Severe Plastic Deformation", Acta Materialia, Vol. 56, pp. 4771-4779, 2008.

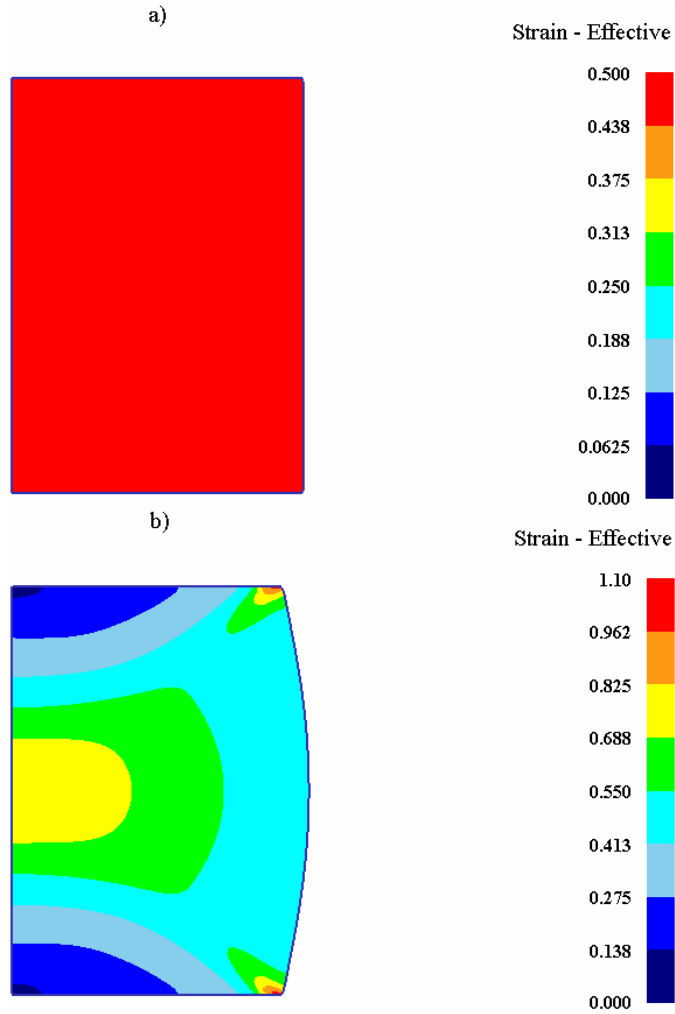
### پیوست ها

جدول ۱- پارامترهای مربوط به شبیه سازی آزمایش فشار.

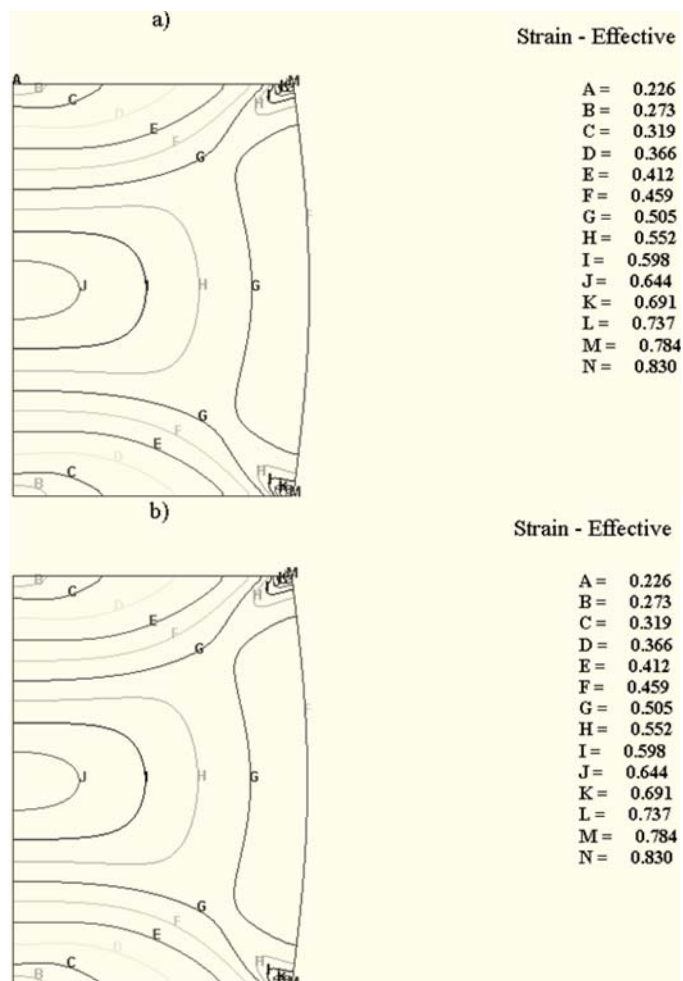
(mm) قطر قطعه کار ( $D_0$ )	۲۰
(mm) ارتفاع قطعه کار ( $H_0$ )	۳۰
(mm/s) سرعت فک	۱۰



شکل ۱- شماتیکی از هندسه قطعه قبل و پس از تغییر فرم.

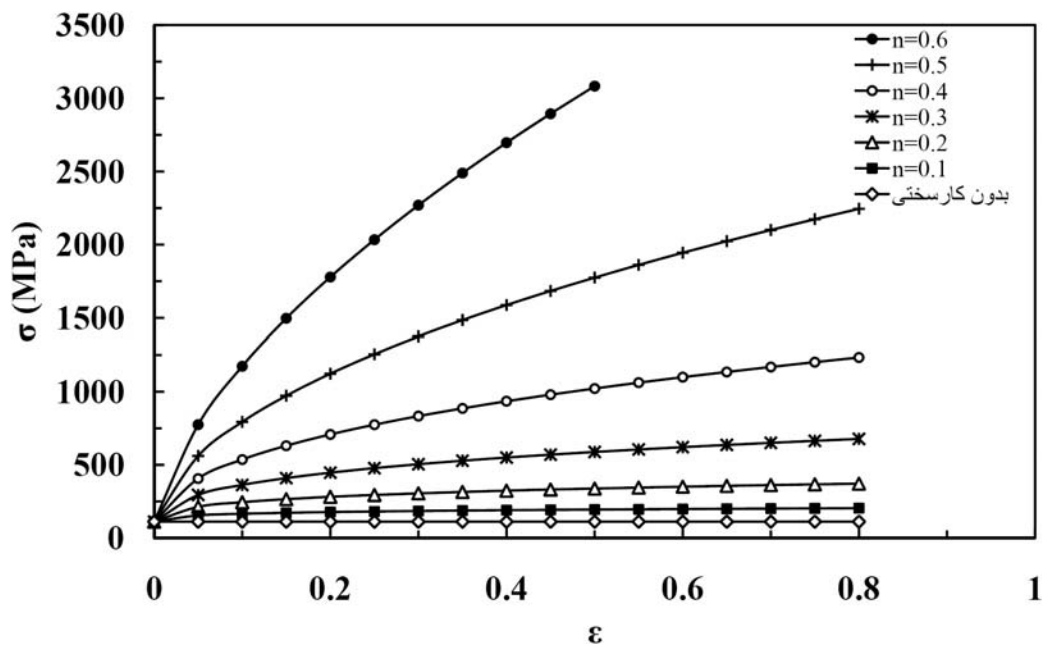


شکل ۲- توزیع کرنش مؤثر برای دو ماده با توان کارسختی یکسان ( $n = 0/1$ ) و شرایط اصطکاکی (a)  $m = 0$  (b)  $m = 0/2$ .  
 ( $\epsilon = 0/5$ )

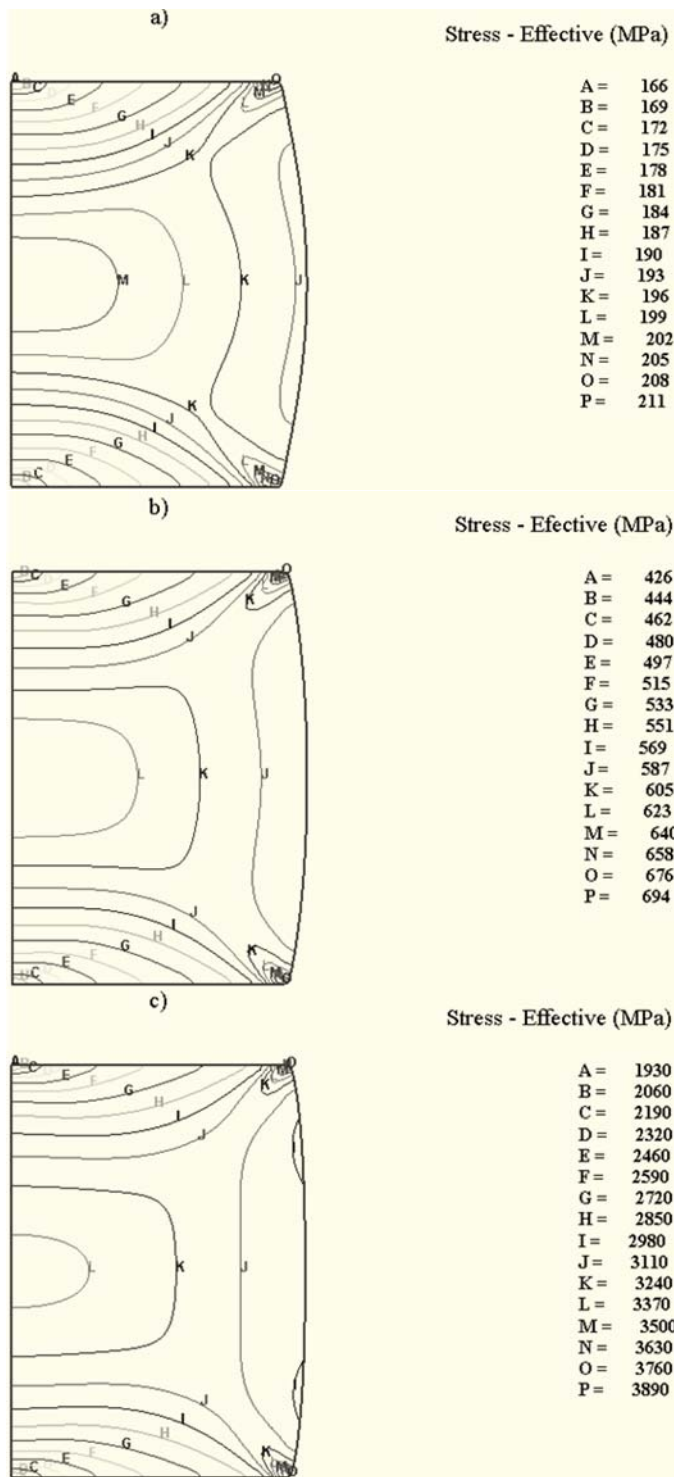


شکل ۳- توزیع کرنش مؤثر در دو ماده با توان کار سختی یکسان و ضریب استحکام (a)  $k=200$  MPa و (b)  $k=400$  MPa  
( $m = 0/1$  و  $\epsilon = 0/5$ ).

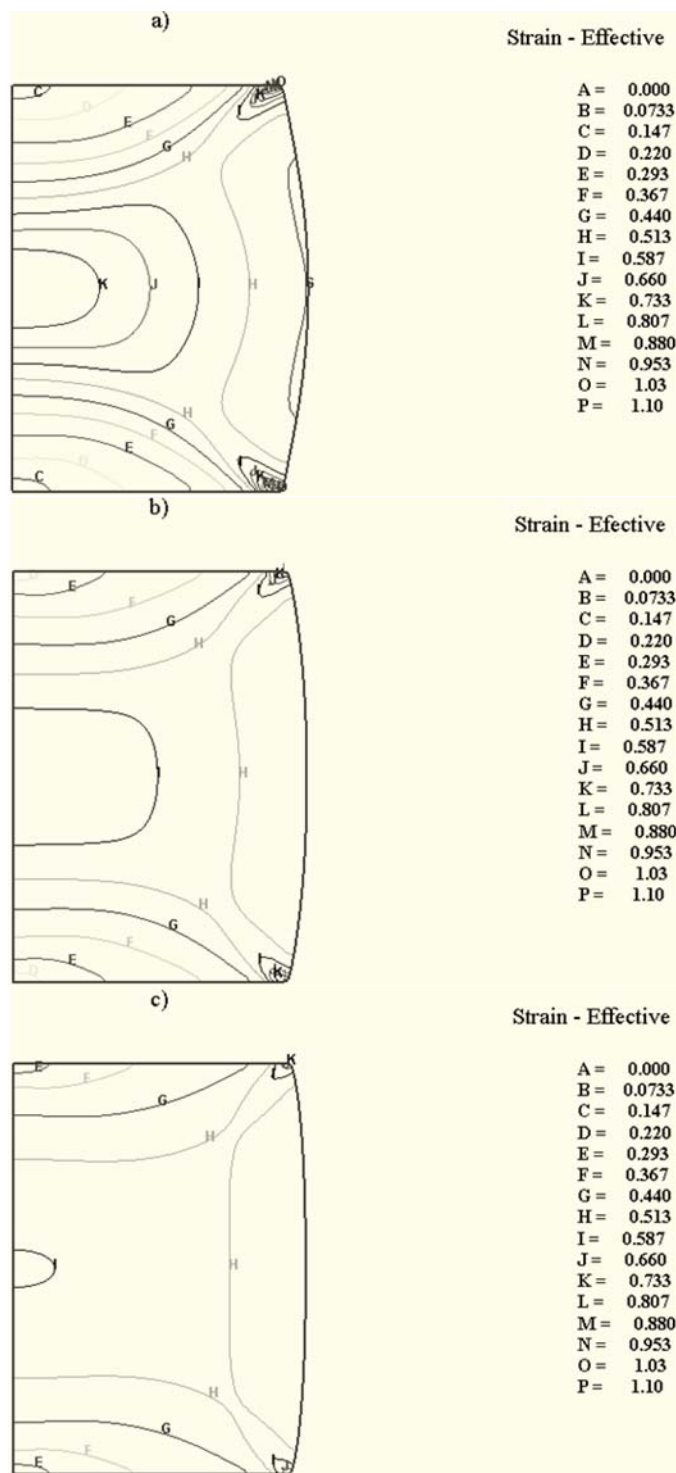




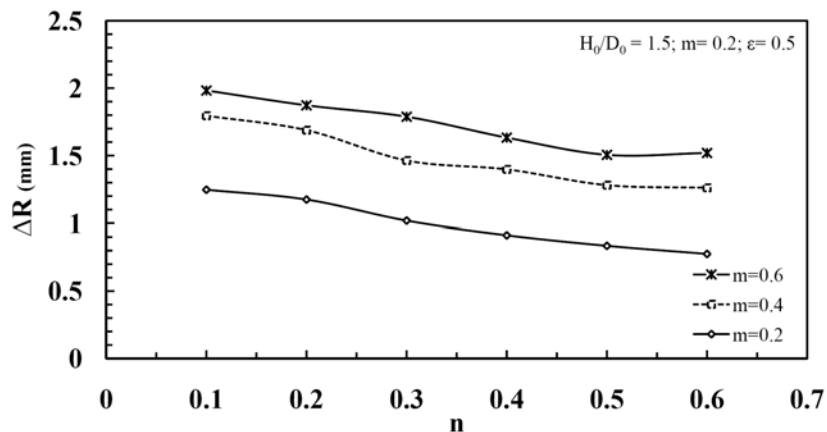
شکل ۴- نمودار تنش- کرنش مواد فرضی گوناگون با توان های کارسختی متفاوت و ماده بدون کارسختی.



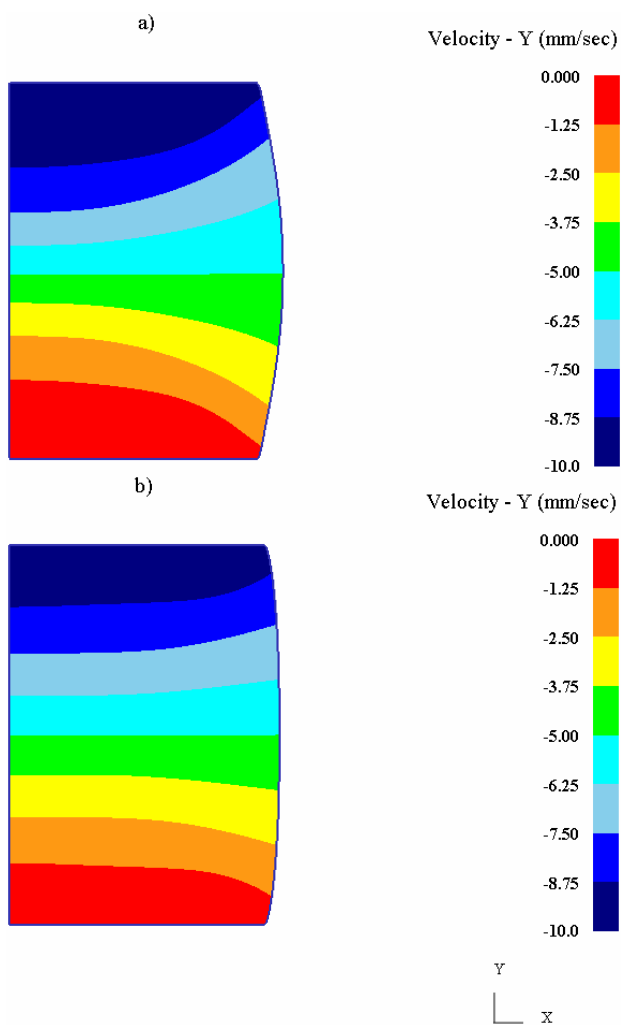
شکل ۵- توزیع تنش مؤثر در کرنش ۰/۵ برای سه ماده با توان های کارسختی (a)  $n = ۰/۱$  (b)  $n = ۰/۳$  و (c)  $n = ۰/۶$ .  
 (  $m = ۰/۲$  )



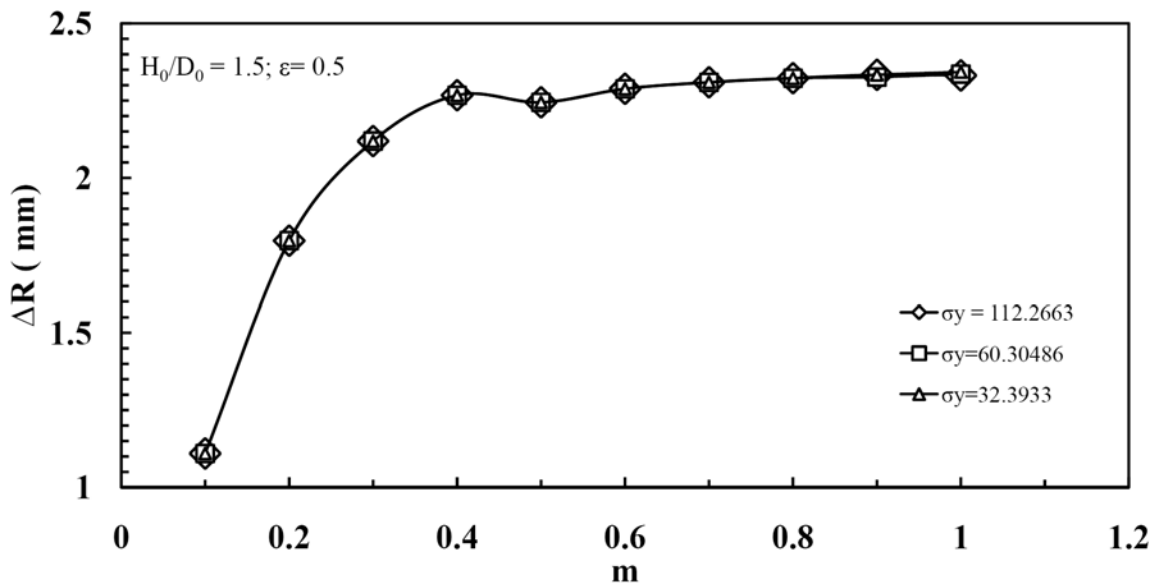
شکل ۶- توزیع کرنش مؤثر در کرنش ۰/۵ برای سه ماده با توان های کارسختی (a)  $n = ۰/۱$ ، (b)  $n = ۰/۳$  و (c)  $n = ۰/۶$ .  
(  $m = ۰/۲$  )



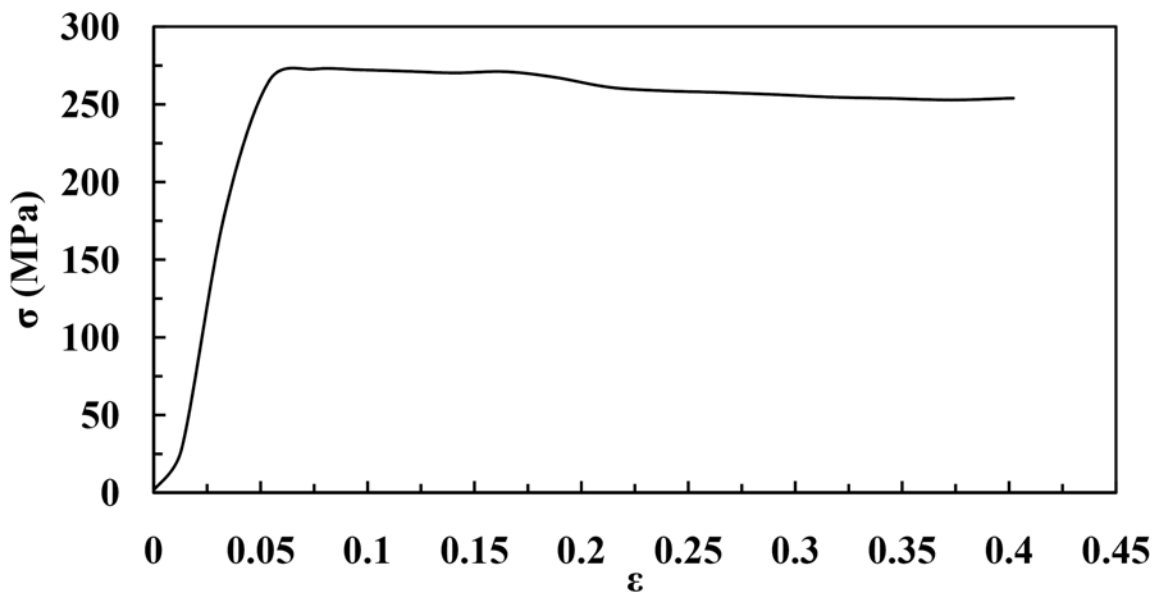
شکل ۷- نمودار تغییرات  $\Delta R$  بر حسب توان کارسختی ( $n$ ) در شرایط اصطکاکی ثابت.



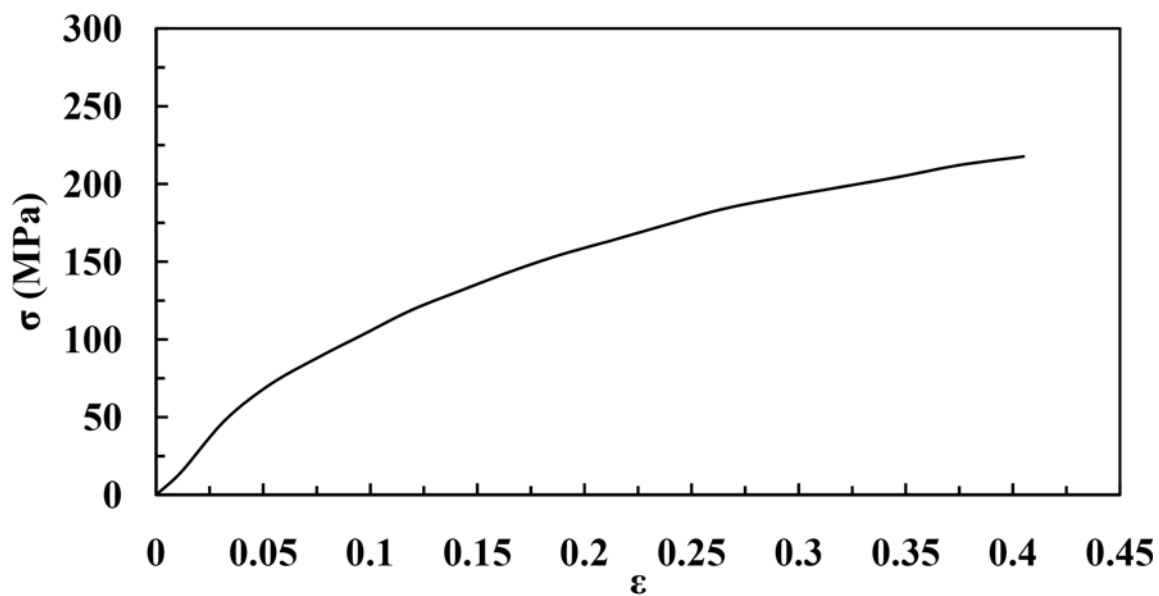
شکل ۸- توزیع سرعت ماده در جهت  $Y$  در کرنش  $0.5$  برای دو ماده با توان های کارسختی (a)  $n = 0.1$  و (b)  $n = 0.6, m = 0.2$ .



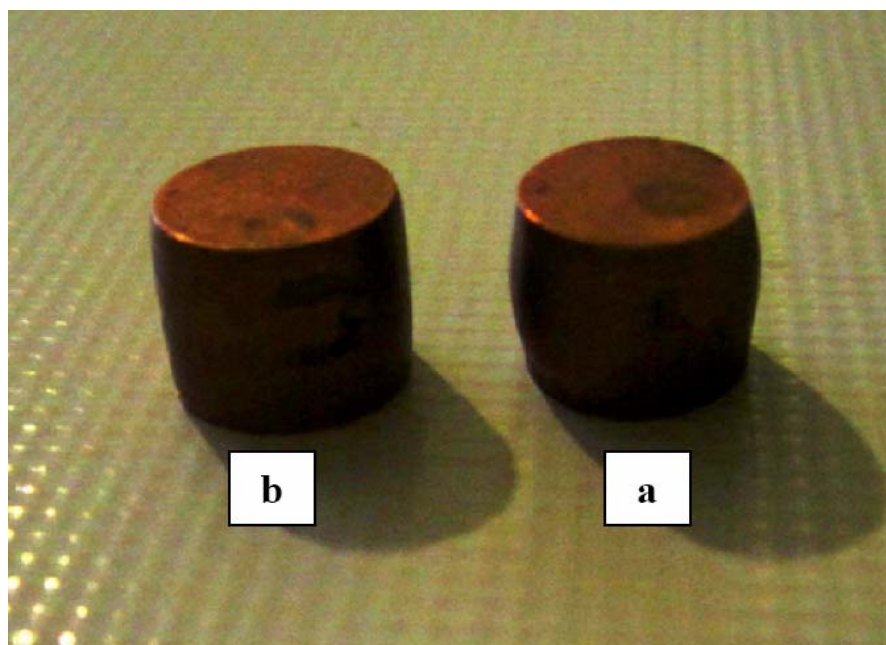
شکل ۹- تغییرات بشکه ای شدن بر حسب فاکتور ثابت اصطکاک برای مواد با تنش تسلیم های گوناگون.



شکل ۱۰- نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش فشار برای نمونه تغییر فرم یافته تا کرنش ۱/۴.



شکل ۱۱- نمودار تنش-کرنش ناشی از آزمایش فشار نمونه آنیل شده در دمای  $650^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۱۲- نمونه های مسی پس از اعمال کرنش  $0/4$ : (a) نمونه تغییر فرم یافته ( $n=0$ ) و (b) نمونه آنیل شده ( $n=0/5$ ).