



بررسی اثر باوشینگر با استفاده از آزمون های کشش- فشار و فروروندگی به کمک فرورونده هر می

ابوالفضل رضایی بزاز^۱ - سینا سالاری^۲ - سید حمید هاشمی نسب^۳

چکیده

بررسی ها نشان داده اند که قیاسی بین آزمون کشش تک محوری و فروروندگی پس از چند سیکل وجود دارد. بنابراین به کمک این موضوع، اثر باوشینگر آلیاژهای CK45 و آلومینیوم سری 7XXX با استفاده از دو آزمون کشش - فشار و فروروندگی به کمک فرورونده هر می بررسی شد. آزمایشات در دمای محیط و در دو سیکل انجام شد. نمودارهای تنش - کرنش و نیرو - جابجایی برای آزمون های به ترتیب کشش - فشار و فروروندگی به دست آمد و با فرض ثابت بودن مقدار توان کرنش سختی، تنش های تسلیم در هر سیکل به کمک نمودارها محاسبه شد و اثر باوشینگر بررسی گردید.

واژه های کلیدی: اثر باوشینگر، آزمایش فروروندگی، کارسختی.

^۱ استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مهندسی مواد و متالورژی

^۲ دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران - گروه مهندسی متالورژی

^۳ فارغ التحصیل مقطع کارشناسی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - گروه مهندسی مواد و متالورژی

مقدمه

مواد مختلف در اثر تغییر جهت نیرو از خود کاهش تنش سیلان نشان می دهند. پدیده کاهش استحکام تسلیم در اثر اعمال بار در جهت مخالف، اثر باوشینگر نامیده می شود [1]. اثر باوشینگر می تواند نتایج مهمی در شکل دهی فلزات مانند خمکاری یا نورد داشته باشد [2].

استفاده از آزمون فروروندگی، جایی که نیروی وارده از طرف فرورونده را می توان به عنوان تابعی از عمق فرورفتن در نمونه حین بارگذاری - باربرداری ثبت کرد، در بررسی خواص مکانیکی مواد، موضوع مورد توجهی در دوده دهه اخیر بوده است. اولین بار هیل¹ و همکاران راه حلی برای ماده ای که رفتار پلاستیک آن از قانون توان پیروی می کند، با استفاده از فرورونده کرومی پیشنهاد کردند [3]. همچنین سورش² و همکاران با استفاده از فرورونده های هرمی، تحقیقات زیادی جهت بررسی خواص مکانیکی مواد انجام داده اند [5-8]. هوبر³ و همکاران او بر روی اثر باوشینگر به کمک فرورونده کرومی مطالعه کرده اند و به تشابهی میان آزمون کشش تک محوری و آزمون فروروندگی دست پیدا کرده اند [4]؛ اما اثر باوشینگر به کمک آزمون فروروندگی به وسیله فرورونده هرمی مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین یک از اهداف تحقیق حاضر، بررسی اثر باوشینگر با آزمون فروروندگی به کمک فرورونده هرمی است. از طرفی، مقالات کمی درباره نحوه آزمون کشش - فشار در بررسی پدیده باوشینگر وجود دارد اما موسی⁴ روشی مناسب برای انجام این کار ارائه کرده است [9]. بنابراین هدف دوم این تحقیق، بررسی پدیده باوشینگر به کمک این آزمون و بررسی امکان مقایسه آن با روش فروروندگی است.

تحلیل روابط موجود برای آزمون فروروندگی به کمک فرورونده هرمی

سورش و همکاران در تحقیق خود [5]، 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. آن ها 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 کیک⁵ معروف است، به انحنای بارگذاری (C) دست یافتند. سپس به کمک روش اجزا محدود روابط مورد نیاز برای محاسبه تنش تسلیم را ارائه دادند [5].

1- Hill
2- Suresh
3- Huber
4- Mossey
5- Kick's law

جدول (1) رابطه بين نسبت عمق باقیمانده پس از باربرداری به حداکثر عمق ایجاد شده پس از بارگذاری 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 می شود:

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

جدول 1- ارتباط عددی بين کارسختی ماده و عمق باقیمانده مؤثر [5]

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%، σ_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:

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

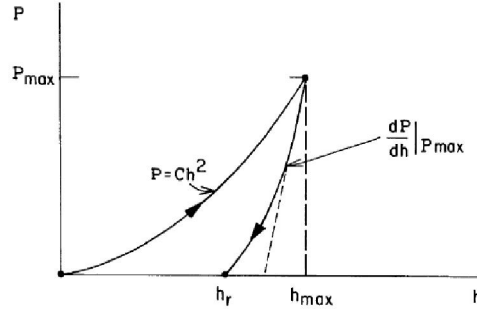
که ν ضریب پواسون ماده فروشونده و ν_{in} ضریب پواسون برای فرورونده که از جنس الماس است و برابر 0.02 در نظر گرفته می شود. همچنین مدول یانگ این فرورونده برابر 900 GPa در نظر گرفته شده است [5]. می توان با عبور دادن یک منحنی درجه دوم از نتایج عددی محاسبه شده در جدول (1)، به رابطه ی زیر دست یافت؛ اما این رابطه 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 همان طور که قبلاً ذکر شد، مقدار انحنای قسمت بار گذاری 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 می دهد.



شکل 1- شماتیکی از نمودار نیرو - جابجایی و قانون کیک [8].

همچنین مقدار توان کرنش سختی با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$n = \frac{\text{Ln}\left(\frac{\sigma_{0.29}}{\sigma_y}\right)}{5.01} \quad (5)$$

می توان نشان داد که به فرض ثابت بودن توان کرنش سختی در طی دو مرحله بار گذاری - بار برداری، با کاهش مقدار C، مقدار تنش تسلیم نیز کاهش می یابد؛ یعنی با بدست آوردن مقدار انحنای کمتر در سیکل دوم نسبت به سیکل اول، بدون محاسبه مقدار تنش تسلیم، اثر باوشینگر اثبات می شود. اثبات ریاضی گفته فوق به صورت زیر است:

$$n = \frac{\text{Ln}\left(\frac{\sigma_{0.29}}{\sigma_y}\right)}{5.01} \Rightarrow \sigma_{0.29} = \sigma_y \exp(5.01n)$$

$$\Rightarrow C = 6.5 \sigma_y \exp(5.01n) \left[1 + \exp(-5.01n)\right] \left[-1 + \text{Ln}\left(\frac{E^*}{\sigma_y}\right)\right]$$

$$\Rightarrow \frac{\partial C}{\partial \sigma_y} = 6.5 \left[1 + \exp(5.01n)\right] \left[-2 + \text{Ln}\left(\frac{E^*}{\sigma_y}\right)\right]$$

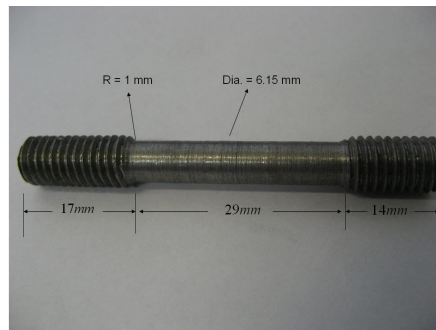
از آنجایی که مقدار $\left[-2 + \text{Ln}\left(\frac{E^*}{\sigma_y}\right)\right]$ برای بیشتر فلزات مثبت و مقدار $6.5[1 + \exp(5.01n)]$ همواره مثبت است، بنابراین نسبت $\frac{\partial C}{\partial \sigma_y}$ همواره مثبت خواهد بود؛ یعنی C یک تابع اکیداً صعودی نسبت به σ_y است. لذا کاهش σ_y منجر به کاهش مقدار C می شود. این بدان معناست که کاهش مقدار C در سیکل دوم نسبت به سیکل اول، وجود اثر باوشینگر را نشان می دهد.

روش آزمایش

دستگاه آزمون و مواد مورد آزمون

برای انجام آزمون های کشش - فشار و فروروندگی، از دستگاه آزمون کشش Zwick Z250 با دقت $\pm 3N$ استفاده شد؛ دقت اندازه گیری جابجایی این دستگاه برابر $3\mu m$ است. در انجام آزمایش فروروندگی، از یک لودسل¹ 2 تن با دقت نیروی $\pm 0.01N$ و یک اکسنومتر با دقت $\pm 0.3\mu m$ استفاده گردید.

مواد مورد آزمون، فولاد CK45 و آلومینیوم سری 7XXX بودند. برای تست کشش - فشار، نمونه هایی به صورت شکل (2) ساخته شدند و نمونه های قرصی شکل با ارتفاع 5 میلیمتر برای آزمون فروروندگی استفاده گردیدند. سطح نمونه های آزمون فروروندگی قبل از انجام آزمون و برای از بین بردن ناصافی سطح، با کاغذ سنباده 1000 میکرون سنباده زنی شدند.



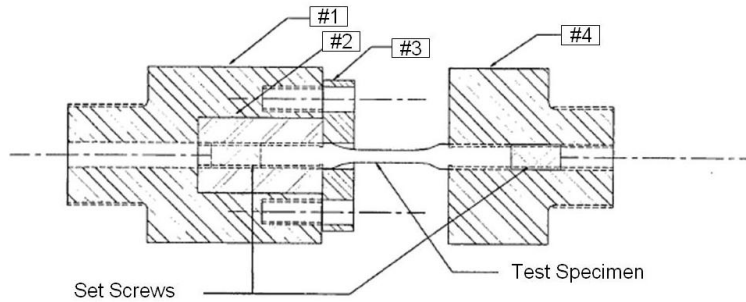
شکل 2- نمونه های آزمون کشش - فشار.

آزمون کشش - فشار

این آزمون در یک سیکل پیوسته کشش و فشار انجام شد. نمودارهای تنش - کرنش به کمک نرم افزار اکسل² رسم شدند و تنش های تسلیم مربوط به حالت کشش و فشار این سیکل بدست آمدند. برای انجام این آزمون از فیکسچرهایی که موسی ارائه داده بود [9]، استفاده شد. شکل شماتیک این فیکسچرها در شکل (3) نشان داده شده است.

1- Load cell

2- Excel



شکل 3- شکل شماتیک فیکسچر مورد استفاده برای تحقیق اثر باوشینگر به کمک آزمون کشش - فشار [9].

علت استفاده از این چنین فیکسچرهایی، محکم نگاه داشتن نمونه در حین تغییر جهت کامل در طی بارگذاری، نگه داشتن نمونه در راستای محور بارگذاری دستگاه آزمون است؛ همچنین، این فیکسچر کماتش و خمشی بسیار کم و نزدیک به صفر را در نمونه حین بارگذاری فشاری ایجاد می کند. فیکسچر مورد استفاده از 4 قسمت تشکیل شده است؛ قسمت اول و چهارم در داخل فک دستگاه قرار می گیرند. قسمت 2 داخل بدنه فیکسچر (قسمت 1) قرار می گیرد و قسمت شماره 3 که به شکل یک حلقه است، روی بدنه پیچ و مانع خروج قسمت شماره 2 می گردد. درون قسمت دوم رزوه شده است تا نمونه از یک سمت آن و از سمت دیگرش، یک پیچ برای محکم کردن نمونه وارد شود. انتهای دیگر نمونه در قسمت 4 قرار می گیرد و از طرف دیگر این قسمت، یک پیچ به منظور سفت کردن نمونه وارد می شود؛ و نهایتاً از دو عدد مهره برای جلوگیری از چرخش قسمت های 1 و 4 در داخل فک دستگاه، استفاده شد. آزمون کشش و فشار، هر کدام تا کرنش معینی ادامه پیدا کردند و سپس باربرداری صورت گرفت. کرنش های فوق الذکر در جدول زیر برای هر ماده آمده است:

جدول 2- حد کرنش های استفاده شده در آزمون کشش - فشار

نوع ماده	کرنش حداکثر در کشش (%)	کرنش حداکثر در فشار (%)
فولاد	4	-0.8
آلومینیوم	4	-0.4

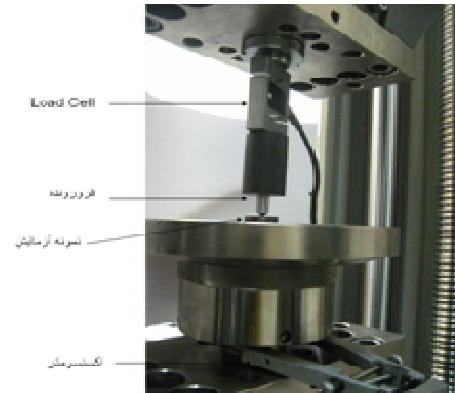
آزمون فرورودگی به کمک فرورونده هرمی

شکل (4) نحوه انجام آزمون فرورودگی را نشان می دهد. این آزمون نیز برای هر ماده در دو سیکل انجام شد. بر روی هر ماده تا نیروی مشخصی بارگذاری صورت گرفت و سپس باربرداری گردید؛ مجدداً تا نیروی خاصی بارگذاری انجام شد و نهایتاً باربرداری شد تا سیکل دوم نیز تکمیل شود. سپس با استفاده از نرم افزار اکسل نمودارهای نیرو - جابجایی رسم شدند و در هر سیکل مقادیر حداکثر عمق ایجاد شده،

عمق باقیمانده و بنابراین نسبت $\frac{h_r}{h_{max}}$ و انحنای قسمت بارگذاری بدست آمدند. سپس به کمک روابط بحث شده تنش های تسلیم بدست آمدند. توجه شود که برای سهولت در محاسبه تنش تسلیم در سیکل دوم، از ثابت بودن مقدار توان کرنش سختی استفاده شد و مقدار $\frac{h_r}{h_{max}}$ در سیکل دوم محاسبه نشد. جدول (3) حداکثر نیروی وارد بر هر ماده و در هر سیکل را نشان می دهد.

ج

نوع ماده	شماره سیکل	حداکثر نیروی وارده (N)
فولاد	1	20
	2	30
آلومینیوم	1	10
	2	20

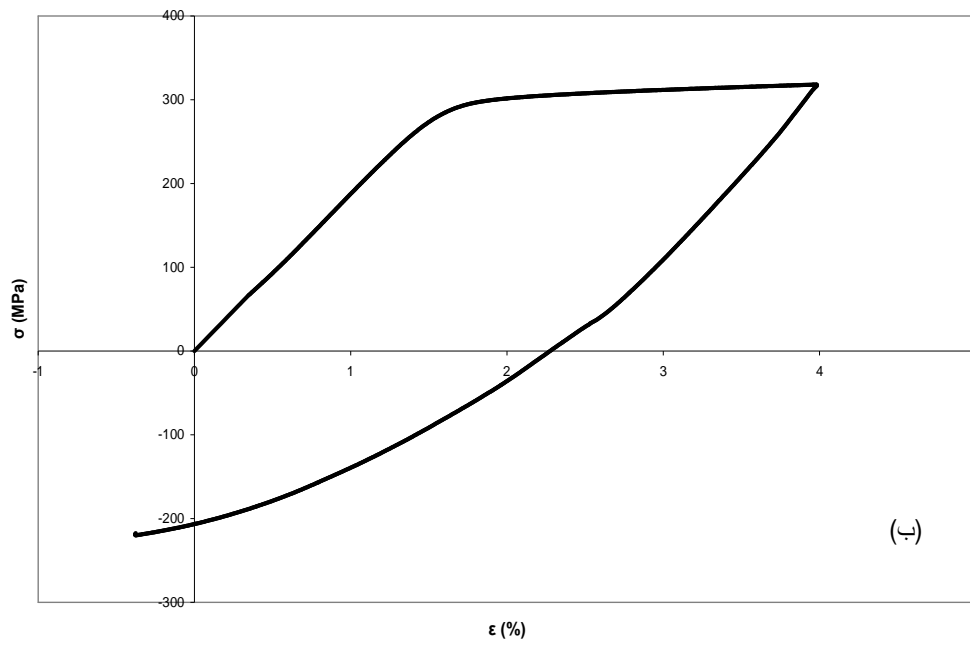
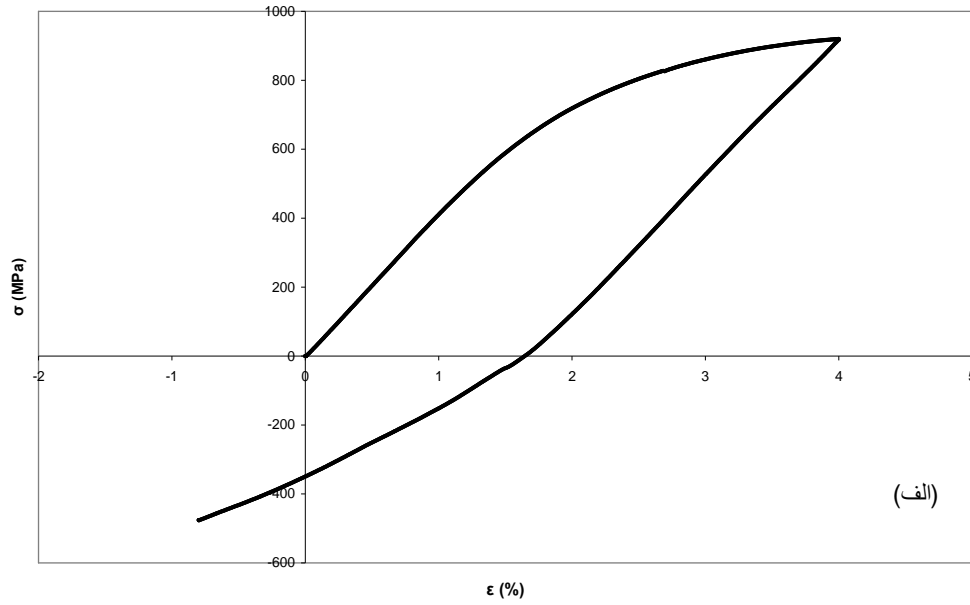


شکل 4- نحوه انجام آزمون فرورونده.

باید توجه داشت که به علت نیاز به بالا بودن دقت آزمون در اندازه گیری عمق های ایجاد شده در ماده فروشونده، از اکسنسومتر کششی با دقت $\pm 0.3 \mu m$ استفاده شد؛ نحوه استفاده از اکسنسومتر، در شکل (4) نشان داده شده است.

نتایج و بحث

نمودار تنش - کرنش برای آزمون کشش - فشار برای هر دو ماده رسم شد (شکل 5) و نتایج جدول 4 با توجه به نمودارهای زیر حاصل گردید.

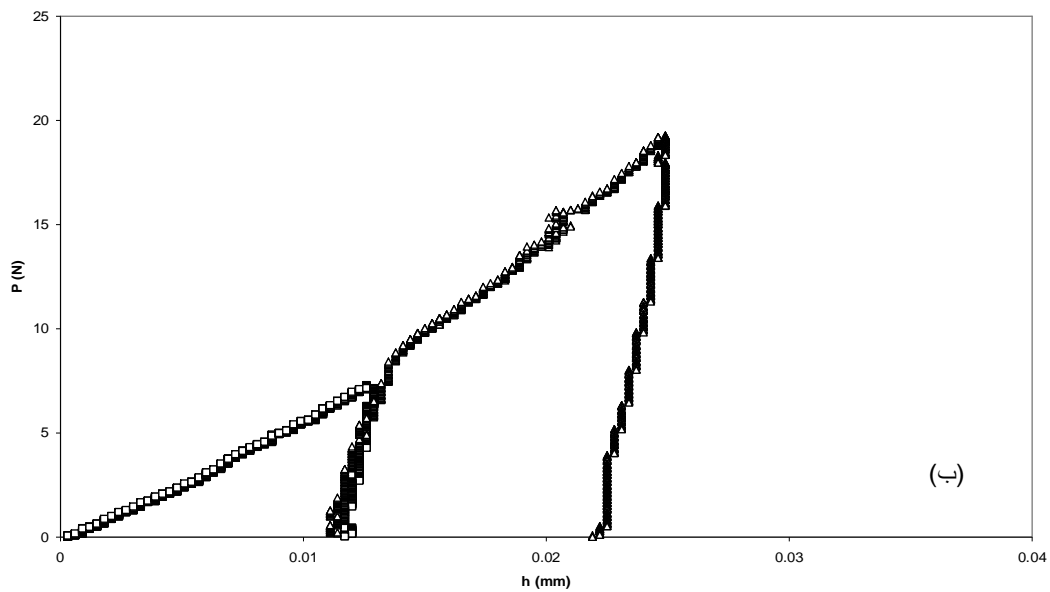
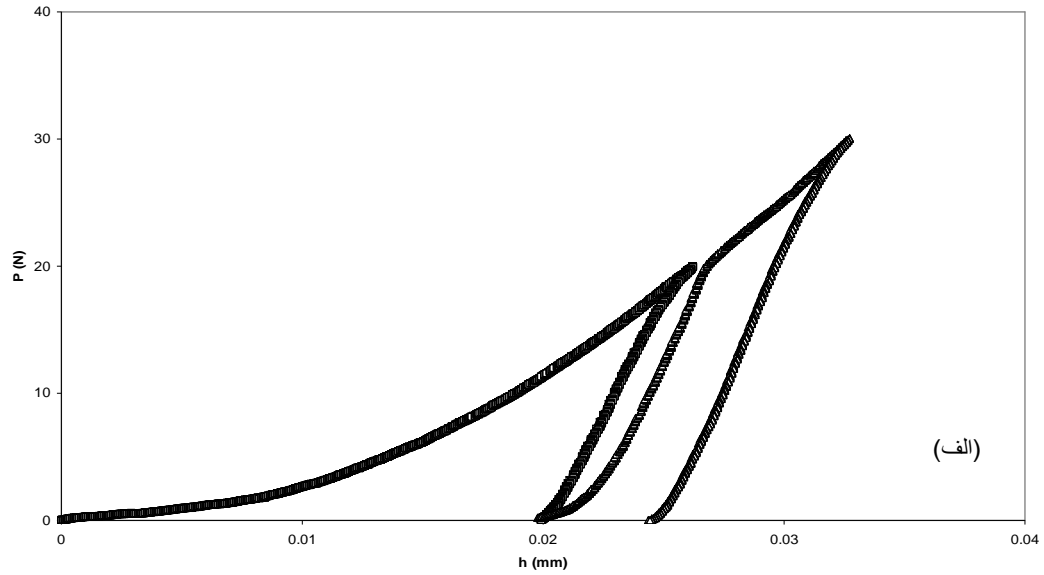


شکل 5- نمودارهای تنش کرنش بدست آمده از آزمون کشش-فشار، (الف) فولاد، (ب) آلومینیوم.

جدول 4- نتايج بدست آمده از آزمون کشش - فشار

نوع ماده	استحکام تسلیم در کشش (GPa)	استحکام تسلیم در فشار (GPa)
فولاد	0.607	0.439
آلومینیوم م	0.268	0.160

همچنين نمودار نیرو به عنوان تابعی از عمق فرورفتگی برای آزمون فرورندگی رسم شد که این نمودارها برای دو ماده فولادی و آلومینیومی در شکل 6 نشان داده شده اند. نتایج بدست آمده از این آزمون برای دو سیکل انجام شده، در جدول 5 آمده است.



شکل 6- نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمون فرورندگی به کمک فرورنده هرمی، (الف) فولاد، (ب) آلومینیوم.

جدول 5 - نتایج بدست آمده از آزمون فرورندگی هرمی

نوع ماده	شماره سیکل	E (Gpa)	ν	C (Gpa)	$\frac{h_r}{h_{max}}$	σ_y (GPa)	N
فولاد	1	207	0.3	42.36	0.9214	0.621	0.044
	2			32.67	-	0.447	
آلومینیوم	1	70	0.3	34.72	0.9048	0.238	0.266
	2			32.98	-	0.223	

همانطور که از نمودارهای شکل 5 و جدول 4 مشخص است، استحکام تسلیم در حالت فشار کمتر از تنش تسلیم در حالت کششی است. بنابراین اثر باوشینگر به وضوح در آزمون کشش - فشار قابل مشاهده است. در آزمون فروروندگی با توجه به نمودارهای نیرو - جابجایی، مشخص است که مقدار انحنای نمودار در سیکل دوم از سیکل اول کمتر شده است. همچنین با محاسبه مقدار تنش تسلیم در هر سیکل مشخص می شود که مقدار آن کاهش یافته است و این نشان از اثر باوشینگر دارد. از اینرو، شود کاهش مقدار انحنای نمودار، به معنای وجود رفتار باوشینگر خواهد بود (صحت اثبات مربوط به قسمت 2).

از طرف دیگر، از دو آزمون انجام شده، مقادیر تنش تسلیم تقریباً یکسانی بدست می آید. یعنی مقدار تنش تسلیم بدست آمده از آزمون فروروندگی، با تقریب مناسبی، برابر تنش تسلیم حالت کشش آزمون کشش - فشار و تنش تسلیم در سیکل دوم آزمون فروروندگی با همان تقریب، برابر تنش تسلیم بدست آمده از حالت فشاری آزمون کشش - فشار است. بنابراین، می توان ادعا کرد که تشابهی میان آزمون فروروندگی به کمک فرورونده هرمی و آزمون کشش - فشار تک محوری وجود دارد.

نتیجه گیری

آزمون های کشش - فشار و فروروندگی به کمک فرورونده هرمی بر روی فولاد CK45 و آلومینیوم سری 7XXX انجام شد. آزمون کشش - فشار در یک سیکل پیوسته کشش - فشار و آزمون فروروندگی در دو سیکل بارگذاری - باربرداری انجام شد و تنش های تسلیم در هر آزمون بدست آمد. با مقایسه تنش های تسلیم بدست آمده، اثر باوشینگر مشاهده گردید. علاوه بر این نتیجه گرفته شد که آزمون فروروندگی به کمک فرورونده هرمی روشی مناسب برای جایگزینی روش کشش - فشار در بررسی اثر باوشینگر است.

مراجع

- [1] N. Chawla, B. Jester, D.T. Vonk, "Bauschinger effect in porous sintered steels", *Mater. Sci. Eng. A346* (2003) 266-272.
- [2] G. E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Book, New York, 1988.
- [3] N. Chollacoop, M. Dao, S. Suresh, "Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters", *Acta Mater.* 51 (2003) 3713-3729.
- [4] N. Huber, Ch. Tsakmatis, "Experimental and theoretical investigation of the effect of kinematic hardening on spherical indentation", *Mech. Mater.* 27 (1998) 241-248
- [5] A. E. Giannacopoulos, S. Suresh, "Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation", *Scripta Mater.* Vol. 40, No. 10, pp. 1191-1198, 1999.
- [6] T.A. Venkatesh, K.J. Van Vliet, A.E. Giannacopoulos, S. Suresh, "Determination of elasto-plastic properties by instrumented sharp indentation: Guidelines for property extraction", *Scripta Mater.* 42 (2000) 833-839.
- [7] M. Dao, A. E. Giannacopoulos, K. J. Van Vliet, T. A. Venkatesh, S. Suresh, "Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation", *Acta Mater.* 49 (2001) 3899-3918.
- [8] Suresh et al. "Depth sensing indentation and methodology for mechanical property measurements", Patent No. US 6,247,355 B1 (2001).
- [9] C. Mossey, E. Troiano, F. Pfindel, "Bauschinger test fixture", Memorandum report arccb-MR-03001, 2003.