

## Effect of strain hardening behavior of material on deformation characteristics of samples during equal channel angular pressing

\*Mehdi Shaban Ghazani

Assistant Professor, Department of Materials Science Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

**Citation:** Shaban Ghazani M. Effect of strain hardening behavior of material on deformation characteristics of samples during equal channel angular pressing. Metallurgical Engineering 2019; 22(3): 215-224 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.104244.1234>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.104244.1234>

### **ABSTRACT**

In the present study, the effect of strain hardening exponent of material on flow characteristics, strain and damage distribution in sample and the load required for the execution of the deformation process was investigated using finite element simulation. Results showed that the corner gap is not formed during deformation of ideally plastic material and the amount of equivalent strain is higher in the bottom side of sample compared with other regions. However, with increasing the work hardening exponent, the size of corner gap increases and the bottom side receives less amount of strain. Also, damage factor in the sample of ideally plastic material is higher at the top side compared with other regions and the tensile stresses are applied on this area. Whereas, in the strain hardened material the higher damage factor was observed at the lower half of the sample. Finally, it was concluded that the pressing force increases with increasing the work hardening exponent.

**Keywords:** Equal channel angular pressing, finite element simulation, work hardening, damage.

Received: 18 February 2019 | Accepted: 5 January 2020

■.....■

\* *Corresponding Author:*

Mehdi Shaban Ghazani, PhD

Address: Department of Materials Science Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

Tel: +98 (9104000567)

E-mail: m\_shaban@bonabu.ac.ir

## بررسی تأثیر ضریب کارسختی ماده بر مشخصه‌های تغییر شکل نمونه در فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع

\* مهدی شبان‌غازانی

استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران.

### چکیده

در این تحقیق تأثیر ضریب کارسختی بر روی نحوه سیلان فلز و توزیع کرنش، فاکتور تخریب و نیروی لازم برای پرس نمونه با استفاده از تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد در مورد ماده پلاستیک ایده آل منطقه پر نشده از فلز در محل تقاطع کانال‌ها ایجاد نمی‌شود و کرنش اعمالی به ناحیه پایینی نمونه از سطح بالایی بیشتر است. در حالی که با افزایش ضریب کارسختی اندازه ناحیه پر نشده افزایش یافته و کرنش کمتری به قسمت پایینی نمونه اعمال می‌شود. همچنین فاکتور تخریب در نمونه با رفتار پلاستیک ایده آل در سطح بالایی نمونه نسبت به نواحی دیگر بالا بوده و در این ناحیه تنش‌های کششی نیز اعمال می‌شود. برعکس در مورد نمونه‌ای با رفتار کارسختی، بیشترین فاکتور تخریب مربوط به ناحیه نیمه پایینی نمونه است. از طرفی مشاهده شد با افزایش ضریب کارسختی میزان نیروی لازم برای پرس نمونه کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع، تحلیل المان محدود، ضریب کارسختی، فاکتور تخریب.

دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹ | پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

### ۱. مقدمه

در این رابطه  $\Phi$  زاویه کانال قالب و  $\Psi$  زاویه انحنای بیرونی محل تقاطع کانال‌ها می‌باشد. این رابطه برای اولین بار توسط Iwahashi و همکارانش ارائه شده است. رابطه فوق تنها تأثیر پارامترهای هندسی قالب را در نظر گرفته و با این فرض بدست آمده که کرنش اعمالی بر روی نمونه کاملاً یکنواخت است. در عمل مشاهده شده است که خواص مکانیکی نمونه‌های حاصل از فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع غیریکنواخت است [۸-۱۰]. این غیریکنواختی خواص مکانیکی به دلیل غیریکنواختی ریزساختار نمونه است که خود ناشی از غیریکنواختی کرنش اعمالی بر روی نمونه می‌باشد [۱۱-۱۳]. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر نحوه توزیع کرنش در نمونه ضریب کارسختی ماده می‌باشد. به منظور بررسی غیریکنواختی کرنش اعمالی، در عمل نیاز به انجام مطالعات ریزساختاری و سختی سنجی از تمام قسمت‌های نمونه می‌باشد که مستلزم صرف وقت و انرژی زیاد است [۱۴ و ۱۵]. در سال‌های اخیر تحلیل المان محدود به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها در این زمینه مطرح شده است. مطالعه منابع علمی در دسترس نشان می‌دهد تأثیر

پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع یکی از مؤثرترین روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی مواد فلزی است [۱ و ۲]. مهم‌ترین هدف از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی مواد فلزی کاهش اندازه دانه‌های آن‌ها و دستیابی به ترکیب بهینه‌ای از استحکام و شکل‌پذیری می‌باشد [۳-۶]. با استفاده از این روش اندازه دانه‌ها در ریزساختار مواد را می‌توان تا مقادیر زیر میکرون نیز کاهش داد. در شکل (۱) شماتیکی از روش پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای یا مربعی از داخل کانال قالبی عبور داده می‌شود که این کانال در ناحیه‌ای به صورت متقاطع می‌باشد. به هنگام عبور نمونه از محل تقاطع کانال‌ها کرنش پلاستیک شدیدی از نوع برشی بر روی ماده اعمال می‌شود. مقدار کرنش اعمال شده در این روش از طریق رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi + \Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi + \Psi}{2} \right) \right]$$

\* نویسنده مسئول:

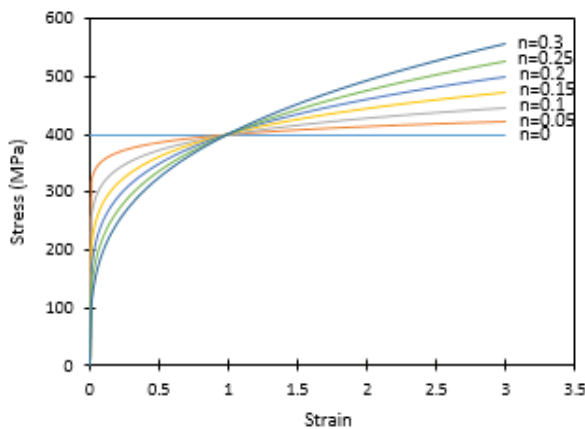
دکتر مهدی شبان‌غازانی

نشانی: بناب، دانشگاه بناب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد.

تلفن: (۹۱۰۴۰۰۵۶۷) ۹۸+

پست الکترونیکی: m\_shaban@bonabu.ac.ir

در این رابطه  $n$  ضریب کارسختی،  $\epsilon$  کرنش پلاستیک،  $\sigma$  تنش سیلان و  $k$  ثابت مربوط به ماده است. مقدار ضریب  $k$  برابر با ۴۰۰ مگاپاسکال و مقدار ضریب کارسختی برای مواد در محدوده  $0 < n < 0.3$  در نظر گرفته شد. در شکل (۲) منحنی‌های تنش-کرنش این مواد نشان داده شده است. در تمام تحلیل‌ها ضریب اصطکاک بین نمونه و دیواره قالب ۰/۱ و سرعت حرکت سنبه ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



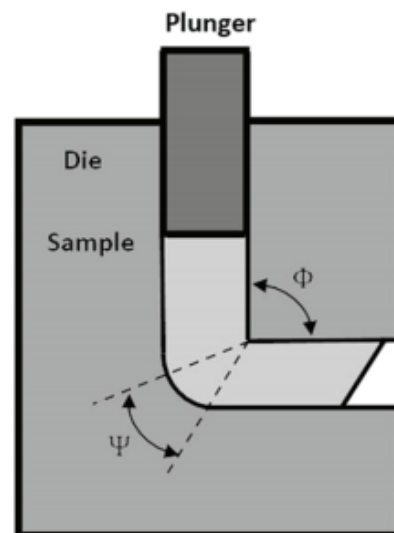
شکل ۲. منحنی‌های تنش-کرنش مواد با ضریب کارسختی مختلف.

### ۳. نتایج و بحث

#### تأثیر ضریب کارسختی بر توزیع کرنش

در شکل (۳) تأثیر ضریب کارسختی بر روی نحوه توزیع کرنش پلاستیک در نمونه نشان داده شده است. بررسی این تصاویر نشان می‌دهد که کرنش پلاستیک به صورت یکنواخت در کل نمونه توزیع نشده است. از روی توزیع کرنش می‌توان نمونه پرس شده را به چهار ناحیه مختلف تقسیم کرد. ناحیه I مربوط به قسمت انتهایی نمونه است به طوری که کرنش پلاستیک به این قسمت اعمال نشده است. زیرا این قسمت از نمونه وارد ناحیه اعمال تغییر شکل نشده است. ناحیه II به منطقه اعمال تغییر شکل پلاستیک معروف است. زمانی که نمونه از این ناحیه عبور می‌کند تغییر شکل پلاستیک شدیدی، که عمدتاً از نوع برشی است، بر روی آن اعمال می‌شود. باید توجه داشت که در مورد مواد با رفتار تغییر شکل پلاستیک ایده آل (ضریب کارسختی صفر) ناحیه اعمال تغییر شکل پلاستیک در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع به صورت صفحه‌ای است که از تقاطع بین دو کانال ورودی و خروجی قالب به دست می‌آید. در این حالت تغییر شکل اعمالی بر روی نمونه از نوع برشی خالص است. ولی در مورد موادی با ضریب کارسختی غیر صفر، در قسمت بیرونی محل تقاطع کانال‌ها یک ناحیه پر نشده از فلز ایجاد شده و ناحیه تغییر شکل از حالت صفحه‌ای خارج شده و بصورت

پارامترهای مربوط به هندسه قالب مانند زاویه قالب، زاویه انحنای بیرونی محل تقاطع کانال‌ها و ضریب اصطکاک بر روی مشخصه‌های تغییر شکل نمونه در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶-۱۸]. با این حال مطالعات محدودی در مورد تأثیر پارامترهای مربوط به نوع ماده مانند ضریب کارسختی، ضریب حساسیت تنش به نرخ کرنش و ریزساختار اولیه نمونه انجام گرفته است [۱۹ و ۲۰]. بنابراین در تحقیق حاضر تأثیر ضریب کارسختی ماده بر روی رفتار سیلان ماده در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع با استفاده از نرم‌افزار DEFORM 3D با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین مواردی که مطالعه شد عبارت‌اند از نحوه توزیع کرنش در نمونه و یکنواختی آن، توزیع فاکتور تخریب و نیروی لازم برای انجام فرآیند.

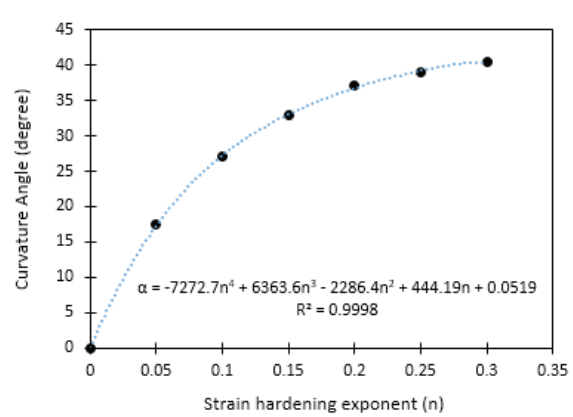


شکل ۱. شماتیک روش ECAP.

#### ۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق برای بررسی رفتار تغییر شکل مواد با ضریب کارسختی مختلف، در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع، از تحلیل المان محدود دوبعدی استفاده شد. نرم‌افزار مورد استفاده برای تحلیل فرآیند تغییر شکل DEFORM 2D V10.2 می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی، نمونه‌ای با سطح مقطع مربعی در نظر گرفته شد. از آنجایی که شرایط کرنش صفحه‌ای در این فرآیند برقرار است، تحلیل به صورت دوبعدی انجام شد. بدین منظور نمونه‌ای با ابعاد اولیه  $۱۰ \times ۶۰$  میلی‌متر با استفاده از ۴۰۰۰ المان مربعی مش بندی شد. نمونه به صورت ماده تغییر شکل‌پذیر و سنبه و قالب به صورت ماده صلب در نظر گرفته شدند. برای توصیف رفتار تغییر شکل ماده از رابطه‌ای به شکل زیر استفاده شده است [۲۱ و ۲۲]:

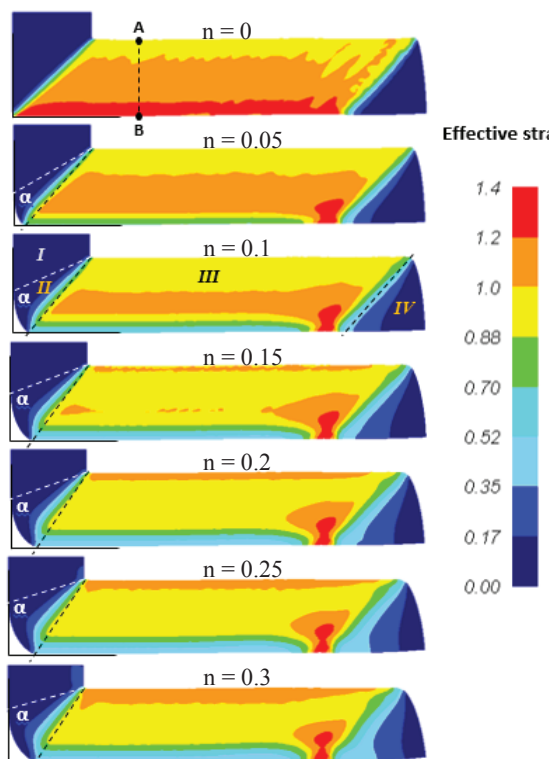
$$\sigma = k\epsilon^n$$



شکل ۴. تغییرات زاویه انحنای بیرونی نمونه با ضریب کارسختی ماده مورد استفاده در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع.

در شکل (۵) تغییرات کرنش پلاستیک در مقطع عرضی نمونه (خط AB در شکل (۳)) در مورد موادی با ضریب کارسختی مختلف نشان داده شده است. در مورد ماده پلاستیک ایده آل با ضریب کار سختی صفر دیده می‌شود کرنش پلاستیک اعمالی بر نمونه از سطح بالایی به طرف سطح پایین نمونه به تدریج افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که در موادی با ضریب کارسختی غیر صفر کرنش اعمالی از سطح بالایی به طرف پایین نمونه کاهش پیدا می‌کند. البته باید به این نکته توجه کرد که تغییرات کرنش پلاستیک در حدود ۷ الی ۸ میلی‌متر بالای نمونه مقدار ناچیزی است و بیشتر کاهش در سطح کرنش اعمالی در نیمه پایینی نمونه اتفاق می‌افتد. از طرفی چنین استنباط می‌شود که با افزایش ضریب کارسختی ماده مقدار کرنش در نیمه پایینی نمونه کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این در حدود ۲ میلی‌متر از قسمت بالایی نمونه افزایش ضریب کارسختی موجب افزایش کرنش مؤثر اعمالی می‌شود. رفتار متفاوت ماده پلاستیک ایده آل و ماده‌ای با ضریب کارسختی غیر صفر را می‌توان با در نظر گرفتن نحوه تغییرات سرعت سیلان ماده در نمونه توضیح داد. در شکل (۶) توزیع سرعت سیلان ماده در محل‌های مختلف نمونه مورد بررسی برای ماده‌ای با رفتار تغییر شکل پلاستیک ایده آل ( $n=0$ ) و ماده‌ای با رفتار کارسختی ( $n=0.3$ ) نشان داده شده است. در مورد ماده پلاستیک ایده آل سرعت سیلان در قسمت پایین محل تقاطع کانال‌ها کمتر از نواحی دیگر است. این نشان‌دهنده رفتاری مشابه با ایجاد ناحیه مرده<sup>۱</sup> در این منطقه از نمونه می‌باشد. به عبارتی زمانی که سرعت سیلان ماده در یک ناحیه بصورت موضعی کاهش پیدا می‌کند مقدار کرنش اعمالی به ماده اطراف آن افزایش پیدا می‌کند. در مورد ماده‌ای با ضریب کارسختی غیر صفر ( $n=0.3$ ) برعکس حالت اول مشاهده می‌شود. به عبارتی ماده در قسمت پایین محل تقاطع کانال‌ها به دلیل ایجاد ناحیه پر نشده از فلز با سرعت بیشتری سیلان پیدا می‌کند که این امر

1. Dead Metal Zone

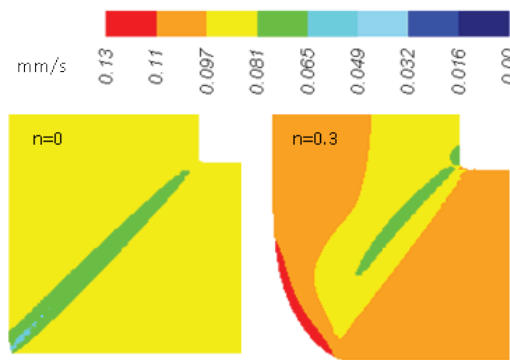


شکل ۵. نحوه توزیع کرنش پلاستیک در نمونه بعد از اعمال تغییر شکل برای موادی با نرخ کارسختی مختلف.

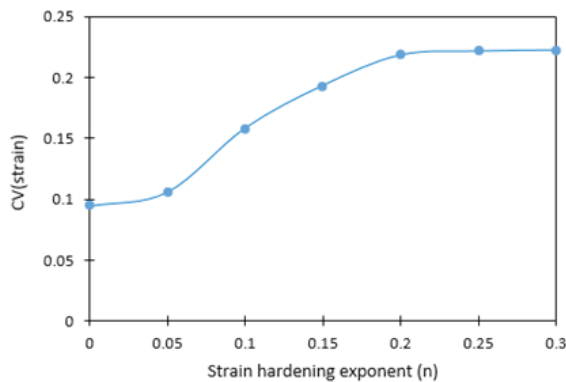
ناحیه‌ای محصور بین دو صفحه‌ای درمی‌آید که نشان‌دهنده زاویه انحنای بیرونی محل تقاطع کانال‌ها می‌باشند. ناحیه III در شکل (۳)، ناحیه تغییر شکل یکنواخت نامیده می‌شود و شامل حجم بالایی از نمونه است. ماده در این ناحیه از نمونه در اثر عبور از ناحیه تغییر شکل، تحت کرنش بالایی قرار گرفته است. مقدار و توزیع کرنش در این ناحیه از نمونه به پارامترهای مختلفی از جمله زاویه کانال قالب، زاویه انحنای بیرونی محل تقاطع کانال‌ها، ضریب اصطکاک، اعمال فشار معکوس و همچنین ضریب کارسختی ماده بستگی دارد. همچنین ناحیه IV که مربوط به ابتدای نمونه است، به دلیل اینکه در شروع فرآیند در جلوی منطقه اعمال تغییر شکل قرار دارد کرنش پلاستیکی را تجربه نمی‌کند (شکل (۳)). علاوه بر این، مشاهده می‌شود ناحیه پر نشده از فلز در قسمت بیرونی محل تقاطع کانال‌ها با افزایش ضریب کارسختی بزرگ‌تر می‌شود.

در شکل (۴) تغییرات زاویه انحنای بیرونی نمونه با ضریب کارسختی ماده نشان داده شده است. با توجه به این شکل چنین نتیجه‌گیری می‌شود که زاویه انحنای بیرونی نمونه ( $\alpha$ ) با افزایش ضریب کارسختی ماده افزایش پیدا می‌کند. سرعت این افزایش در ابتدا زیاد بوده و به تدریج با افزایش ضریب کارسختی کاهش پیدا می‌کند. بین زاویه انحنای بیرونی نمونه و ضریب کارسختی ماده رابطه‌ای به صورت زیر برقرار می‌باشد:

$$\alpha = -7272.7n^4 + 6363.6n^3 - 2286.4n^2 + 444.19n + 0.0519$$



شکل ۶. سرعت سیلان ماده در قسمت‌های مختلف نمونه‌ای از جنس ماده پلاستیک ایده آل (n=0) و ماده‌ای باقابلیت وقوع کارسختی (n=0.3).

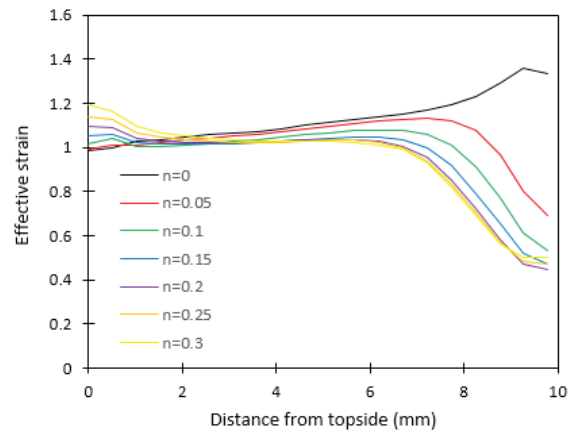


شکل ۷. تغییرات فاکتور غیریکنواختی کرنش با ضریب کارسختی ماده.

مقدار CV $\epsilon$ ، که به آن ضریب واریانس کرنش گفته می‌شود، افزایش می‌یابد. در شکل (۷) تغییرات CV $\epsilon$  مربوط به مقادیر کرنش بر روی خط AB (در شکل (۳))، با ضریب کارسختی نشان داده شده است. از این تغییرات نتیجه‌گیری می‌شود که یکنواخت‌ترین توزیع کرنش زمانی به دست می‌آید که ماده به صورت پلاستیک ایده آل (n=0) در نظر گرفته شود. همچنین با افزایش ضریب کارسختی در ابتدا غیریکنواختی توزیع کرنش به سرعت افزایش یافته و در مقادیر بالاتر به یک مقدار ثابت میل می‌کند.

### تأثیر ضریب کارسختی بر فاکتور تخریب

یکی از مشکلات فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به خصوص پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع شکستن نمونه در حین اعمال تغییر شکل می‌باشد. تحقیقات متعددی در مورد مواد با شکل‌پذیری پایین مانند آلیاژهای منیزیم، تیتانیوم و آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ نشان داده است که نمونه‌ها در حین پرس شکسته و ادامه اعمال فرآیند به منظور افزایش میزان کرنش اعمالی غیرممکن شده است. به منظور پیش‌بینی شکست نمونه در حین فرایندهای تغییر شکل می‌توان از



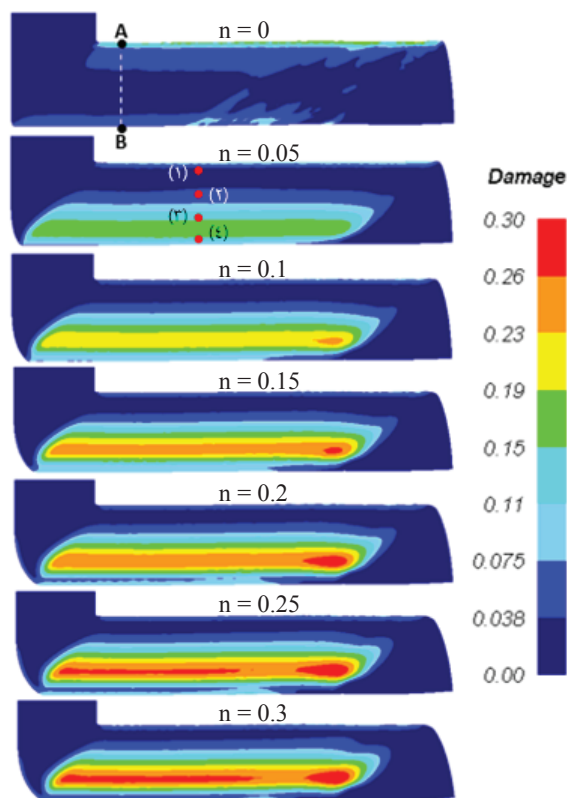
شکل ۸. نحوه تغییرات کرنش پلاستیک در عرض نمونه تغییر شکل یافته (خط AB در شکل (۳)).

باعث کاهش میزان کرنش اعمالی در این ناحیه می‌شود. از طرفی در قسمت بالایی محل تقاطع کانال‌ها سرعت سیلان ماده کمتر بوده و این امر نشان‌دهنده اعمال کرنش بیشتر به این ناحیه می‌شود. بنابراین نتایج نشان داده شده در شکل (۵) به صورت کامل با در نظر گرفتن تغییرات سرعت سیلان ماده در نمونه قابل توجیه می‌باشد. به این صورت که با افزایش ضریب کارسختی ناحیه پر نشده از فلز در قسمت پایین محل تقاطع کانال‌ها افزایش یافته و در نتیجه سرعت سیلان ماده در این ناحیه افزایش پیدا می‌کند. این امر باعث کاهش میزان کرنش پلاستیک اعمالی بر ناحیه پایینی نمونه مورد بررسی می‌شود. در مورد قسمت بالایی نمونه برعکس این اتفاق می‌افتد. به طوری که با افزایش ضریب کارسختی سرعت سیلان در قسمت بالایی محل تقاطع کانال‌ها کاهش یافته و این امر باعث ایجاد کرنش موضعی در این ناحیه می‌شود.

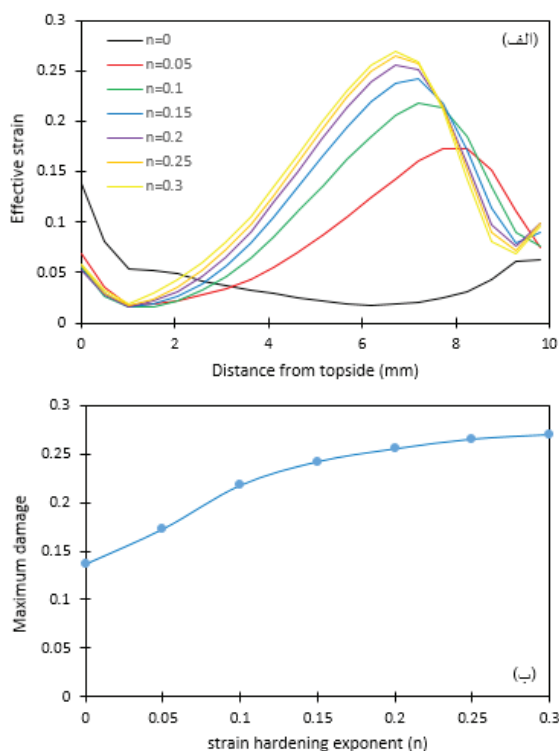
در مورد مواد فرآوری شده به روش تغییر شکل پلاستیک شدید، یکنواختی ریزساختار حاصل تحت تأثیر یکنواختی توزیع کرنش پلاستیک قرار دارد. به طوری که نمونه‌ای با توزیع کرنش پلاستیک یکنواخت‌تر دارای خواص مکانیکی و ریزساختار یکنواخت‌تری نیز می‌باشد. غیریکنواختی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده با افزایش میزان غیریکنواختی کرنش پلاستیک افزایش پیدا می‌کند. یکی از عواملی که یکنواختی توزیع کرنش را تحت تأثیر قرار می‌دهد مقدار ضریب کارسختی ماده است. در این تحقیق میزان غیریکنواختی کرنش در عرض نمونه‌های تغییر شکل یافته از طریق رابطه زیر مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]:

$$CV_{\epsilon} = \frac{\text{Stdev}(\epsilon)}{\text{Average}(\epsilon)}$$

در این رابطه  $\text{stdev}(\epsilon)$  میزان انحراف استاندارد مقادیر کرنش و  $\text{average}(\epsilon)$  مقدار متوسط آن‌ها می‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که غیریکنواختی توزیع کرنش با افزایش



شکل ۸. توزیع فاکتور تخریب کرافت-لاتام در نمونه‌هایی با ضریب کارسختی مختلف.

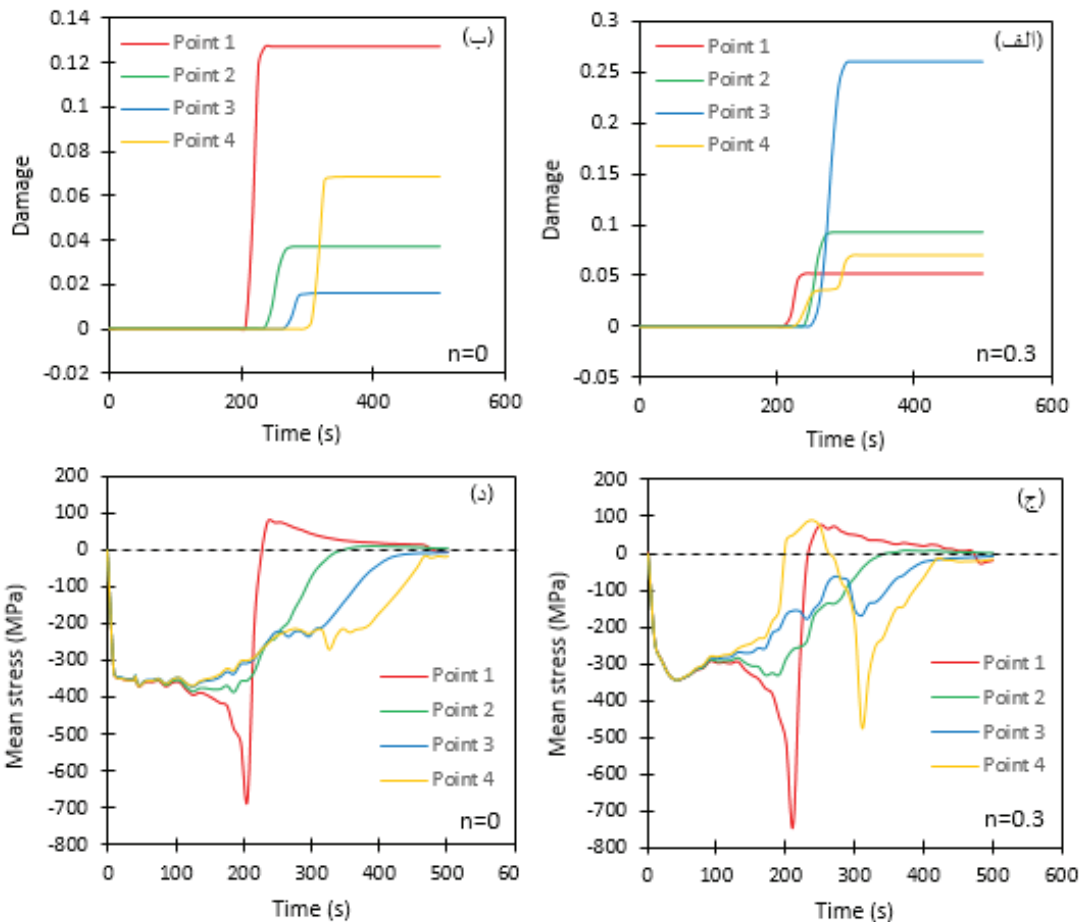


شکل ۹. تغییرات فاکتور تخریب در عرض نمونه‌های تغییر شکل داده شده از موادی با ضریب کارسختی مختلف (الف)، تغییرات فاکتور تخریب ماکزیمم با ضریب کارسختی ماده (ب).

معیارهای شکست مختلفی که توسط محققین پیشنهاد شده استفاده کرد. یکی از این معیارها که به صورت موفقیت‌آمیزی در پیش‌بینی شکست در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع استفاده شده است، معیار تخریب کرافت-لاتام می‌باشد. این معیار به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۲۴ و ۲۵]:

$$C = \int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma}{\sigma_0} d\epsilon$$

در این رابطه  $\epsilon_f$  مقدار کرنش نهایی،  $\sigma$  مقدار ماکزیمم تنش کششی،  $\sigma_0$  تنش متوسط و  $C$  مقدار فاکتور تخریب می‌باشد. بر این اساس در هر نقطه فرضی از نمونه میزان فاکتور تخریب از ابتدا تا انتهای فرآیند تغییر شکل به تدریج افزایش می‌یابد. برای هر ماده یک مقدار بحرانی برای فاکتور تخریب وجود دارد به طوری که در هر نقطه از نمونه اگر مقدار فاکتور تخریب محاسبه شده از این میزان بحرانی فراتر رود نمونه از آن نقطه می‌شکند. به عبارت دیگر این رابطه مقدار انرژی کرنش کششی ذخیره شده در واحد حجم ماده را محاسبه می‌کند. اگر مقدار فاکتور تخریب در نقاط مختلف نمونه محاسبه شود می‌توان چنین استنباط کرد که نمونه از نواحی می‌شکند که میزان فاکتور تخریب در آن نواحی ماکزیمم مقدار خود را داشته باشد. در شکل (۸) تغییرات فاکتور تخریب کرافت-لاتام در نمونه تغییر شکل یافته از موادی با ضرایب کارسختی مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در ماده‌ای با رفتار تغییر شکل پلاستیک ایده آل ( $n=0$ )، ماکزیمم مقدار فاکتور تخریب در سطح بالایی نمونه ایجاد شده است. در حالی که در مورد ماده‌ای با رفتار کارسختی ( $n \neq 0$ ) ماکزیمم مقدار فاکتور تخریب مربوط به نیمه پایینی نمونه می‌باشد. همچنین دیده می‌شود مقدار فاکتور تخریب در ناحیه داخلی نیمه پایینی نمونه با افزایش ضریب کارسختی افزایش می‌یابد. در شکل (۹-الف) تغییرات فاکتور تخریب در مقطع نمونه‌هایی با ضرایب کارسختی مختلف نشان داده شده است. دیده می‌شود در ماده پلاستیک ایده آل، ماکزیمم فاکتور تخریب مربوط به سطح بالایی نمونه بوده و در مورد مواد با ضریب کارسختی غیر صفر ماکزیمم فاکتور تخریب در ناحیه داخلی نمونه ایجاد شده است. همچنین با توجه به شکل (۹-ب) مقدار ماکزیمم فاکتور تخریب با افزایش ضریب کارسختی ماده افزایش پیدا می‌کند. بنابراین فقط با در نظر گرفتن توزیع فاکتور تخریب چنین برمی‌آید که در مورد ماده‌ای با رفتار پلاستیک ایده آل شکست با احتمال زیاد در سطح بالایی نمونه اتفاق می‌افتد ولی در مورد نمونه‌ای با ضریب کارسختی غیر صفر، شکست از ناحیه داخلی اتفاق می‌افتد. همچنین باید به این نکته توجه کرد که جوانه‌زنی ترک از نواحی آغاز می‌شود که ماکزیمم مقدار فاکتور تخریب را دارند ولی در ادامه اشاعه ترک به نوع تنش‌های اعمالی بستگی دارد. به عبارتی اگر ترک به وجود آمده تحت تنش‌های کششی قرار بگیرد رشد کرده و منجر به شکست نمونه می‌شود ولی اگر تنش اعمالی از نوع



شکل ۱۰. تغییرات فاکتور تخریب (الف و ب) و تنش متوسط (ج و د) در چهار نقطه مختلف از نمونه (نشان داده شده در شکل (۸)) بصورت تابع از زمان.

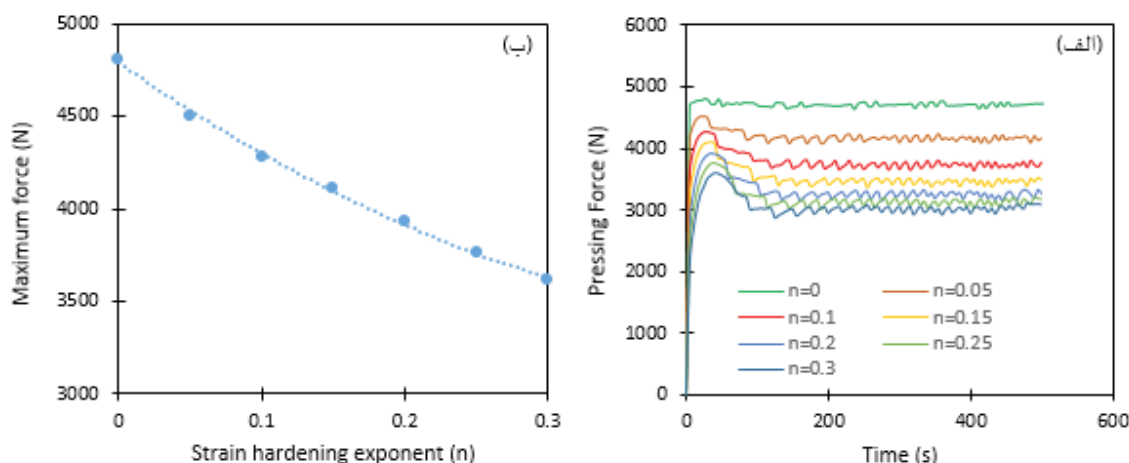
### تأثیر ضریب کارسختی بر نیروی لازم برای انجام فرآیند تغییر شکل

در شکل (۱۱-الف) تغییرات نیروی پرس با زمان در حین پرس در کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع برای موادی با ضریب کارسختی مختلف نشان داده شده است. در مورد ماده‌ای با رفتار پلاستیک ایده آل ( $n=0$ ) نیروی پرس در ابتدای فرآیند تا یک مقدار افزایش یافته و سپس تا پایان فرآیند پرس در این مقدار ثابت باقی می‌ماند. در حالی که در مورد موادی با ضریب کارسختی غیر صفر ( $n \neq 0$ ) در ابتدا نیروی پرس به یک مقدار ماکزیمم افزایش یافته و سپس مقداری کاهش می‌یابد و تا پایان فرآیند در این مقدار ثابت باقی می‌ماند. این رفتار به تشکیل ناحیه پر نشده از فلز در محل تقاطع کانال‌ها مربوط می‌شود. در شکل (۱۱-ب) تغییرات ماکزیمم نیروی پرس با ضریب کارسختی نشان داده شده است. واضح است که نیروی پرس با افزایش ضریب کارسختی کاهش پیدا می‌کند.

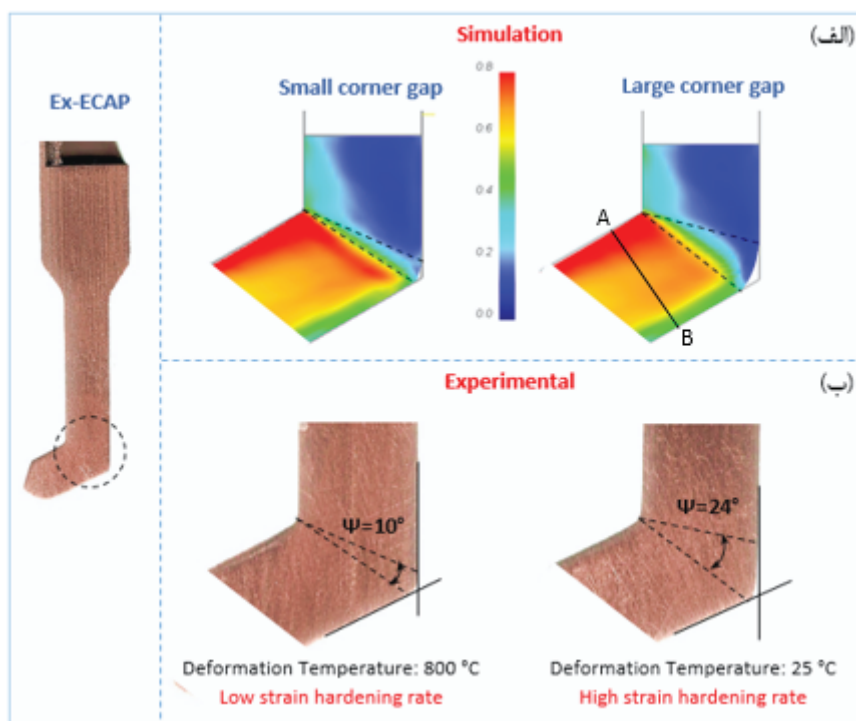
### مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی

به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان

فشاری باشد در این حالت ترک جوانه‌زده شده بسختی اشاعه پیدا می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر امکان شکست نمونه، تغییرات تنش مؤثر و فاکتور تخریب در طول فرآیند تغییر شکل در چهار نقطه مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرد. این چهار نقطه در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. برای ماده‌ای با ضریب کارسختی  $0.3$  با توجه به شکل (۱۰-الف) ماکزیمم مقدار فاکتور تخریب مربوط به نقطه ۳ می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که با رسیدن فاکتور تخریب به مقدار بحرانی در این نقطه از نمونه ترک جوانه‌زنی کند. با توجه به شکل (۱۰-ج) تنش متوسط اعمالی بر روی نقطه ۳ در طول فرآیند تغییر شکل از نوع فشاری است. بنابراین ترک ایجاد شده به سختی اشاعه پیدا می‌کند. در حالی که در مورد ماده‌ای با رفتار پلاستیک ایده آل، ماکزیمم فاکتور تخریب در نقطه ۱ بدست می‌آید (شکل (۱۰-ب)). با بررسی تغییرات تنش متوسط در طول فرآیند در نقطه ۱ مشاهده می‌شود این محل از نمونه تحت تنش‌های کششی (در حدود  $100$  مگا پاسکال) قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که ترک جوانه‌زده از این نقطه می‌تواند تحت تنش‌های کششی به راحتی اشاعه پیدا کند.



شکل ۱۱. تغییرات نیروی پرس با زمان (الف) و تغییرات ماکزیمم نیروی پرس با ضریب کارسختی (ب).



شکل ۱۲. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی: (الف) شبیه‌سازی ناحیه ECAP مربوط به فرآیند تلفیقی Ex-ECAP در دماهای تغییر شکل ۲۵ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، (ب) ناحیه ECAP نمونه‌های مس تغییر شکل یافته در دماهای ۲۵ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد.

و وقوع تبلور مجدد می‌باشد. در شکل (۱۲) قسمتی از نمونه‌های تغییر شکل یافته در ناحیه تقاطع کانال‌های ECAP نشان داده شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی (شکل ۱۲-الف)) نشان می‌دهد با کاهش دمای تغییر شکل، منطقه پر نشده از فلز در گوشه کانال‌ها بزرگ‌تر می‌شود. بررسی نمونه‌های تغییر شکل داده شده نیز تأیید کننده این موضوع می‌باشد (شکل ۱۲-ب)). همچنین انطباق خوبی بین اندازه ناحیه پر نشده از فلز پیش‌بینی شده به روش آنالیز المان محدود و مقدار واقعی آن‌ها در دو دمای تغییر شکل وجود دارد. علاوه بر

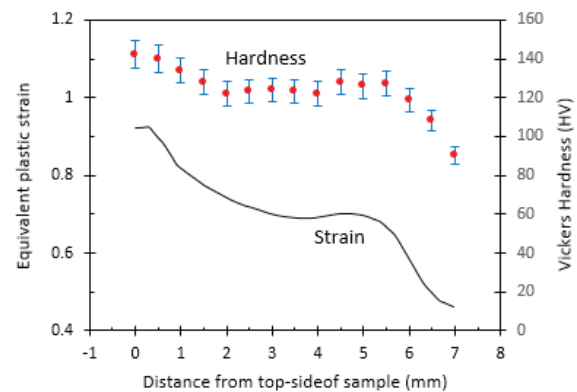
محدود و مقایسه آن با نتایج تجربی، مرحله ECAP در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید به روش تلفیقی Ex-ECAP که برای فرآوری مواد فلزی نانو ساختار و فوق ریزدانه قبلاً توسط این محقق مورد استفاده قرار گرفته است، شبیه‌سازی شد و با نمونه‌های تغییر شکل یافته مقایسه گردید. به این منظور از نمونه‌های مس خالص تجاری (CDA 110) استفاده شد و فرآیند تغییر شکل در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و دمای پیش گرم ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. باید به این نکته توجه کرد که ضریب کارسختی ماده با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند و دلیل آن افزایش نرخ بازیابی دینامیکی



است. با افزایش ضریب کارسختی زاویه انحنای بیرونی نمونه و وسعت ناحیه پر نشده از فلز افزایش می‌یابد. در چنین حالتی کرنش اعمالی به قسمت پایینی نمونه کاهش می‌یابد. در مورد نمونه‌ای با رفتار تغییر شکل پلاستیک ایده آل یکنواخت‌ترین توزیع کرنش به دست آمد. همچنین مشاهده شد با افزایش ضریب کارسختی غیریکنواختی توزیع کرنش افزایش می‌یابد. تحلیل نحوه توزیع فاکتور تخریب کرافت-لاتام نشان داد در مورد نمونه با رفتار پلاستیک ایده‌آل بیشترین فاکتور تخریب در قسمت بالایی نمونه ایجاد می‌شود که به‌طور هم‌زمان تحت تنش‌های کششی قرار می‌گیرد. در نتیجه امکان شکست نمونه از این ناحیه وجود دارد. با افزایش ضریب کارسختی فقط ناحیه داخلی در نیمه پایینی نمونه دارای ماکزیمم فاکتور تخریب می‌باشد و از آنجایی که این ناحیه تحت تنش‌های فشاری است می‌توان نتیجه گرفت ترک شروع شده در این ناحیه بسختی می‌تواند رشد کند. همچنین مشاهده شد نیروی لازم برای پرس کردن نمونه با افزایش ضریب کارسختی کاهش پیدا می‌کند.

## References

- [1] Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon T. Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of materials science*. 2001;36(12):2835-43.
- [2] Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in materials science*. 2006;51(7):881-981.
- [3] Han BQ, Mohamed FA, Lavernia EJ. Mechanical properties of iron processed by severe plastic deformation. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2003;34(1):71-83.
- [4] Sabirov I, Murashkin MY, Valiev R. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;560:1-24.
- [5] Valiev R. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. *Nature materials*. 2004;3(8):511.
- [6] Valiev R, Enikeev N, Murashkin MY, Kazykhanov V, Sauvage X. On the origin of the extremely high strength of ultrafine-grained Al alloys produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*. 2010;63(9):949-52.
- [7] Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Wang J, Langdon TG. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta materialia*. 1996;35(2).
- [8] Akbaripناه F, Fereshteh-Saniee F, Mahmudi R, Kim H. Microstructural homogeneity, texture, tensile and shear behavior of AM60 magnesium alloy produced by extrusion and equal channel angular pressing. *Materials & Design*. 2013;43:31-9.
- [9] Qiao X, Starink M, Gao N. Hardness inhomogeneity and local strengthening mechanisms of an Al1050 aluminium alloy after one pass of equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;513:52-8.
- [10] Wei W, Nagasekhar A, Chen G, Tick-Hon Y, Wei KX. Origin of inhomogeneous behavior during equal channel angular pressing. *Scripta Materialia*. 2006;54(11):1865-9.



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات کرنش پلاستیک پیش‌بینی شده به روش المان محدود با تغییرات سختی در مقطع عرضی نمونه.

این، در شکل (۱۳) تغییرات کرنش پلاستیک در مقطع عرضی نمونه حاصل از تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای محیط به‌صورت تابعی از فاصله از سطح بالایی نمونه (خط AB در شکل (۱۲)) به همراه تغییرات سختی در این مقطع به‌صورت نمودار نشان داده شده است. به‌طور واضح، کرنش پلاستیک پیش‌بینی شده به روش المان محدود از سطح بالایی به‌طرف پایین نمونه کاهش پیدا می‌کند. با اندازه‌گیری سختی میکرو از مقطع عرضی نمونه از بالا به‌طرف پایین نیز تغییرات مشابهی مشاهده می‌شود. بنابراین انطباق خوبی بین تغییرات سختی و میزان کرنش پلاستیک پیش‌بینی شده به روش المان محدود وجود دارد. توضیح این نکته ضروری است که در حین تغییر شکل در دمای محیط با افزایش میزان کرنش اعمال شده بر ماده، به دلیل افزایش دانسیته نابجایی‌ها، سختی و استحکام ماده افزایش پیدا می‌کند که به این پدیده کرنش سختی گفته می‌شود. انطباق بین کرنش پلاستیک پیش‌بینی شده و تغییرات سختی در مقطع نمونه، صحت نتایج حاصل از تحلیل المان محدود را تأیید می‌کند. همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد به دلیل ایجاد منطقه پر نشده از فلز در محل تقاطع کانال‌ها کرنش اعمالی به ناحیه پایینی نمونه کاهش پیدا می‌کند. کاهش سختی نمونه تغییر شکل یافته در قسمت پایینی نمونه (شکل (۱۳)) به‌وضوح این موضوع را تأیید می‌کند.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر ضریب کارسختی ماده بر روی نحوه سیلان ماده، توزیع کرنش پلاستیک و فاکتور تخریب در نمونه و نیروی لازم پرس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، در مورد ماده‌ای با رفتار پلاستیک ایده‌آل ناحیه پر نشده از فلز در قسمت بیرونی محل تقاطع کانال‌ها ایجاد نمی‌شود و کرنش اعمالی بر نمونه از نوع برشی خالص است. در این حالت کرنش در قسمت پایینی بیشتر از ناحیه بالایی نمونه

- [11] Figueiredo RB, Cetlin PR, Langdon TG. Stable and unstable flow in materials processed by equal-channel angular pressing with an emphasis on magnesium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010;41(4):778-86.
- [12] Moon B, Kim H, Hong S. Plastic flow and deformation homogeneity of 6061 Al during equal channel angular pressing. *Scripta materialia*. 2002;46(2):131-6.
- [13] Nagasekhar A, Tick-Hon Y, Seow H. Deformation behavior and strain homogeneity in equal channel angular extrusion/pressing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;192:449-52.
- [14] Xu C, Langdon TG. Influence of a round corner die on flow homogeneity in ECA pressing. *Scripta Materialia*. 2003;48(1):1-4.
- [15] Xu J, Shirooyeh M, Wongs-Ngam J, Shan D, Guo B, Langdon TG. Hardness homogeneity and micro-tensile behavior in a magnesium AZ31 alloy processed by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;586:108-14.
- [16] Aour B, Zairi F, Naït-Abdelaziz M, Gloaguen J-M, Rahmani O, Lefebvre J-M. A computational study of die geometry and processing conditions effects on equal channel angular extrusion of a polymer. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008;50(3):589-602.
- [17] Djevanroodi F, Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(4-5):1230-5.
- [18] Yoon S, Quang P, Hong S, Kim H. Die design for homogeneous plastic deformation during equal channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;187:46-50.
- [19] Kim I, Kim J, Shin DH, Park K-T. Effects of grain size and pressing speed on the deformation mode of commercially pure Ti during equal channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2003;34(7):1555-8.
- [20] Ko Y, Jung W, Shin D, Lee C. Effects of temperature and initial microstructure on the equal channel angular pressing of Ti-6Al-4V alloy. *Scripta Materialia*. 2003;48(2):197-202.
- [21] Chen X, Lu L. Work hardening of ultrafine-grained copper with nanoscale twins. *Scripta materialia*. 2007;57(2):133-6.
- [22] Kim HS, Hong SI, Seo MH. Effects of strain hardenability and strain-rate sensitivity on the plastic flow and deformation homogeneity during equal channel angular pressing. *Journal of Materials Research*. 2001;16(3):856-64.
- [23] Basavaraj VP, Chakkingal U, Kumar TP. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation. *Journal of materials processing technology*. 2009;209(1):89-95.
- [24] Figueiredo RB, Cetlin PR, Langdon TG. The evolution of damage in perfect-plastic and strain hardening materials processed by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;518(1-2):124-31.
- [25] Ghazani MS, Vajd A. Finite element simulation of flow localization during equal channel angular pressing. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017;70(5):1323-8.