



## Structural and Mechanical properties of Magnesium Alloy Processed by Severe Plastic Deformation Method of Hydrostatic Cyclic Expansion Extrusion

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Siahsarani A.<sup>1</sup> MSc,  
Faraji Gh.\*<sup>1</sup> PhD,  
Samadpour F.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Siahsarani A, Faraji Gh, Samadpour F. Structural and Mechanical properties of Magnesium Alloy Processed by Severe Plastic Deformation Method of Hydrostatic Cyclic Expansion Extrusion. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):925-932.

### ABSTRACT

Magnesium and its alloys have received much attention not only in the aerospace and electronics industry, but also in medical applications due to its low density, excellent physical properties, and biocompatibility. However, magnesium and its alloys have low ductility and poor strain hardening ability because of the hexagonal crystal structure with the limited number of slip systems at room temperature. Therefore, it seems necessary to improve their ductility and other mechanical properties via novel technologies. In this research, hydrostatic cyclic expansion extrusion has been used to produce ultrafine-grained magnesium rod. Properties of produced rods have been investigated morphologically and mechanically. The numerical investigation has also been performed to show the effects of hydrostatic pressure on strain distribution. Due to the brittleness of magnesium, the process has been conducted at elevated temperatures. Also, due to the fluid limitation at high temperatures, melted polyethylene has been used as the fluid in the process. The results showed that the yield and ultimate strength increased by 54% and 43% after only one pass of the hydrostatic cyclic expansion extrusion process, respectively. Also, elongation increased by 46%. Furthermore, microhardness has also increased with an average of 57 Hv to 70 Hv. The microstructure result showed that the grains become ultrafine-grained after only one pass of the process. Finite element investigation revealed that high hydrostatic pressure has a good effect on improving the strain distribution and the microstructure. This process seems very appropriate for industrial applications due to its ability to produce long ultrafine-grained rods.

**Keywords** Severe Plastic Deformation; Hydrostatic Pressure; Ultrafine; Mechanical Properties; AM60 Magnesium Alloy

### CITATION LINKS

[1] Application of bulk nanostructured materials in ... [2] Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic ... [3] Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained ... [4] Bulk nanostructured materials from severe plastic ... [5] Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and ... [6] Bulk nanostructured materials: Fundamentals and ... [7] Nanocrystalline titanium produced by hydrostatic ... [8] A new method for unlimited deformation of metals and ... [9] Continuous grain refinement of aluminum strip by ... [10] A new designed incremental high pressure torsion process for producing long nanostructured ... [11] Grain refinement in aluminium and the aluminium Al-Cu-Mg-Mn alloy by ... [12] Recent development in grain refinement by hydrostatic ... [13] Microstructural evolution over a large strain range in aluminium ... [14] Cyclic expansion-extrusion (CEE): A modified counterpart of cyclic extrusion-compression ... [15] Hydrostatic cyclic expansion extrusion process for producing ultrafine-grained ... [16] Hydrostatic cyclic expansion extrusion (HCEE) as a novel severe plastic deformation process for producing long ... [17] Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material ... [18] Solute strengthening of prismatic slip, basal slip and {1 0 1 2} twinning in Mg and Mg-Zn binary ... [19] Cyclic extrusion compression angular pressing (CECAP) as a novel severe plastic deformation method for producing bulk ultrafine grained ... [20] Finite element analysis and optimization of equal channel angular pressing for producing ultra-fine grained ... [21] Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic ... [22] Effect of accumulative plastic deformation on generation of spheroidal structure, thixoformability and mechanical properties of ... [23] Microstructure and hardness inhomogeneity of fine-grained AM60 magnesium alloy subjected to ... [24] Effect of different c/a ratio on the microstructure and mechanical properties in magnesium alloys processed by ...

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, North Kargar Street, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 61119966  
Fax: +98 (21) 61119966  
ghfaraji@ut.ac.ir

#### Article History

Received: March 09, 2019  
Accepted: September 11, 2019  
ePublished: April 17, 2020

## مطالعه ساختاری و مکانیکی آلیاژ منیزیم تولیدشده توسط روش تغییر شکل پلاستیک شدید انبساط-اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک

آرمین سیه‌سرانی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

قادر فرجی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

فرشاد صمدپور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

منیزیم و آلیاژهای آن به سبب خواص خود نظیر چگالی کم، زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری نه تنها در کاربردهای هوافضا و الکترونیک، بلکه در زمینه پزشکی نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. تنها محدودیت شکل‌پذیری و کرنش سختی کم آن به منظور ساختار هگزاگونال و تعداد محدود سیستم‌های لغزش در دمای اتاق است. در نتیجه بهبود خواص مکانیکی با استفاده از تکنولوژی‌های جدید حایز اهمیت است. در این پژوهش از روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید انبساط-اکستروژن هیدرواستاتیک به منظور بهبود ساختار و میکروسختی آلیاژ منیزیم استفاده شده است. به منظور بررسی اثرات فشار هیدرواستاتیک در بهبود توزیع کرنش و بررسی نیرو نیز از مطالعات عددی استفاده شده است. به منظور تردی منیزیم، فرآیند در دمای بالا انجام شده و با توجه به محدودیت سیال در دماهای بالا از مذاب پلی‌اتیلن به عنوان سیال مقاوم در دمای بالا استفاده شده است. نتایج نشان داد که استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب ۵۴ و ۴۳٪ بعد از یک پاس از فرآیند افزایش می‌یابد. همچنین ازدیاد طول نیز از ۴۶٪ افزایش می‌یابد. میکروسختی نیز افزایش داشته و میانگین آن از ۵۷ به ۷۰ میکرون رسیده است. نتایج ریزساختار نشان‌دهنده فوق ریزدانه شدن دانه‌ها بعد از پاس اول است. مطالعات عددی نشان داده است که وجود فشار هیدرواستاتیک بالا در فرآیند در بهبود توزیع کرنش و بهبود ریزساختار کمک شایانی کرده است. این روش بسیار مناسب برای کاربردهای صنعتی به نظر می‌رسد چرا که قابلیت استفاده در تولید میله‌های فوق ریزدانه با طول بلند در دماهای بالا را دارد.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر شکل پلاستیک شدید، فشار هیدرواستاتیک، فوق ریزدانه، خواص مکانیکی، آلیاژ منیزیم AM60

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

\*نویسنده مسئول: ghfaraji@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار، موادی هستند که دارای ویژگی و خواص بهتری نسبت به مواد حاصل از روش‌های سنتی شکل‌دهی هستند. از این رو در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده و پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است [1]. خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی این مواد در مقایسه با مواد درشت‌دانه بسیار متفاوت و بهبودیافته هستند [2, 3]. به منظور توسعه فرآیندهای تولید مواد فلزی فوق ریزدانه تحقیقات زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و حتی صنعتی صورت گرفته است. استحکام

به وزن فلزات فوق ریزدانه و نانو ساختار بسیار بالاتر و در مواردی در حدود ۲ تا ۵ برابر استحکام به وزن همان فلز با اندازه دانه معمولی است. در مواد فوق ریزدانه، خواص دیگری مانند ریزساختار هم‌محور و همگن و با مرزدهانه‌هایی با زوایای ترجیحی بالا وجود دارند [4, 5]. در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید وجود فشار هیدرواستاتیک زیاد همراه کرنش برشی شدید باعث تولید عیوب با چگالی بالا مخصوصاً نابجایی در شبکه کریستالی می‌شود [6]. از طرفی دیگر وجود فشار هیدرواستاتیک مانع از ایجاد ترک در ماده می‌شود که امکان ایجاد تغییر شکل‌های شدید در مواد با شکل‌پذیری کم را فراهم می‌کند [7].

در دهه اخیر، با توجه به نیاز روز افزون قطعات با استحکام بالا، تحقیقاتی در جهت تولید مواد فوق ریزدانه در ابعاد صنعتی صورت گرفته است. ریچارد [8]، میله‌های فوق ریزدانه با طول نامحدود را با استفاده از روش ایکپ- تطبیقی (ECAP-conform) تولید نمود. *اوتسونومیا* و همکاران [9]، روش جدید دیگری تحت عنوان کونشیرینگ (Conshearing) جهت تولید این نوع مواد معرفی کردند. اسکندر زاده و همکاران [10]، فرآیند پیوسته پیچش با فشار بالا را به عنوان روشی بهینه، ارزان و با قابلیت صنعتی ابداع نمودند.

روش‌های ذکر شده، قابلیت تولید مواد فوق ریزدانه با ابعاد و طول بزرگ را دارند؛ ولی همان‌طور که پیش‌تر گفته شد فشار هیدرواستاتیک در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید نقش مهمی دارد؛ بنابراین روشی که قابلیت ایجاد فشار هیدرواستاتیک بیشتر داشته باشد، بسیار مناسب است. روش اکستروژن هیدرواستاتیک با استفاده از سیال، فشار هیدرواستاتیک بسیار بالایی را به نمونه اعمال می‌کند و به میزان کرنش یکسان نسبت به دیگر روش‌های ذکر شده، ریزدانه‌گی بیشتری را فراهم می‌آورد. این نتیجه اهمیت فشار هیدرواستاتیک را بین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید نشان می‌دهد [11, 12]. با این وجود، روش اکستروژن هیدرواستاتیک علی‌رغم اعمال فشار هیدرواستاتیک بالا، به دلیل کاهش قطر نمونه بعد از هر پاس توانایی اعمال کرنش محدود را دارد. از طرفی، فرآیند اکستروژن فشاری متوالی (Cyclic Extrusion Compression; CEC) در مقایسه با سایر فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید از قابلیت‌هایی برخوردار است؛ از جمله اینکه می‌توان نمونه‌ها را بدون خارج کردن از قالب، تا تعداد پاس مورد نظر شکل‌دهی کرد که این به عنوان قابلیت برای تولید مواد فوق ریزدانه در مقیاس صنعتی است [13]. اما با توجه به ماهیت روش CEC نیاز به یک سیستم فشار پستی در قالب وجود دارد که اعمال این فشار، نیازمند تجهیزات دقیق و گران قیمت است. به همین دلیل با تغییری در طرح قالب فرآیند انبساط و اکستروژن متوالی (Cyclic expansion extrusion; CEE) [14] خلق شده است. در فرآیند CEE، همان‌گونه که از مزایای فرآیند CEC استفاده می‌شود، نیاز به سیستم فشار پستی حذف می‌شود. با این وجود، در فرآیند CEE متداول، نمی‌توان

- گام اول: نمونه درون قالب قرار می‌گیرد و سیال، اطراف نمونه را پوشش می‌دهد. آب‌بند و سنبه نیز به ترتیب پشت سیال قرار گرفته و آن را تحت فشار قرار می‌دهد.

- گام دوم: سنبه بالایی رو به پایین حرکت می‌کند و نمونه با توجه به سیال تحت فشار قرار می‌گیرد و رو به پایین حرکت می‌کند و در محفظه شکل‌دهی با برخورد به سنبه پشتی انبساط پیدا می‌کند.

- گام سوم: در این مرحله، بعد از حذف سنبه پشتی حرکت رو به پایین سنبه بالایی ادامه پیدا می‌کند و پاس اول فرآیند تکمیل می‌شود.

- گام چهارم: برای انجام پاس دوم فرآیند قالب ۱۸۰ درجه دوران داده می‌شود، سیال و آب‌بند جاگذاری می‌شود و سنبه بالایی نمونه را تا انتها پیش برده و پاس دوم انجام می‌شود. پاس‌های بعدی فرآیند نیز فاقد با چرخش قالب و حرکت رو به پایین سنبه بالایی انجام می‌شود.

کرنش پلاستیک معادل را در یک پاس از فرآیند HCEE<sup>[5]</sup>، می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\bar{\epsilon}_t = \ln \frac{D^2}{d^2} - \ln \frac{d^2}{D^2} = 4 \ln \frac{D}{d} \quad (1)$$

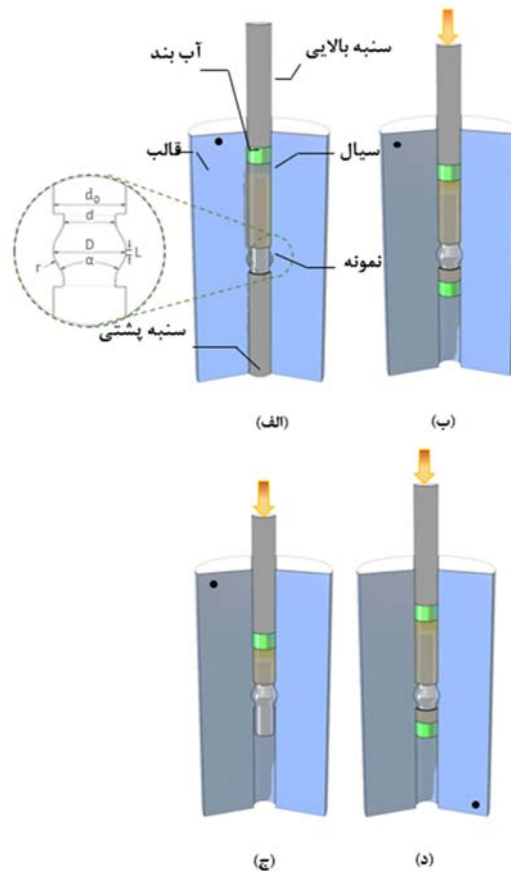
در این پژوهش، برای نخستین بار از فرآیند انبساط-اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک در دمای بالا برای تولید میله فوق ریزدانه آلیاژ منیزیم AM60 ترد استفاده شده است. در پژوهش پیشین نویسندگان، آلیاژ آلومینوم ۱۰۵۰ با طول بلند در دمای محیط توسط فرآیند HCEE فوق ریزدانه شد<sup>[16]</sup>. در پژوهش حاضر قابلیت فرآیند HCEE برای تولید مواد فوق ریزدانه با شکل‌پذیری کم همانند منیزیم که نیاز به دمای بالا دارند به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی

### ۲-۱- تجربی

در این مقاله برای بررسی روش HCEE در دمای بالا نمونه از جنس آلیاژ منیزیم AM60 استفاده شده است. قطر خارجی میله ۱۰ میلی‌متر و طول آن ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. قالب مورد استفاده در این پژوهش از جنس گرم‌کار H13 است که تحت عملیات حرارتی به میزان ۵۵۰ راکول سخت شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، این قالب می‌تواند تا فشار ۱۵۵۰ مگاپاسکل را تحمل کند و برای انجام فرآیند در جنس‌های گوناگون مناسب است. اجزای قالب به دو صورت مونتاژشده و دمونتاژشده در شکل ۲ نشان داده شده است. پارامترهای قالب فرآیند HCEE در جدول ۱ آورده شده است. به دلیل اینکه کمتر روغنی در دمای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت به حرارت دارد، از پلی‌اتیلن<sup>[17]</sup> به‌عنوان سیال محفظه قالب در دمای بالا استفاده شده است. قابل ذکر است که پلیمر پلی‌اتیلن پس از گرم‌شدن قالب باید به محفظه قالب ریخته شود تا به سرعت ذوب شود. به‌منظور آب‌بندی نواحی تماس اجزای قالب از مس خالص استفاده شده است. همچنین، به‌منظور انجام فرآیند HCEE از پرس هیدرولیک با سرعت

نمونه‌هایی با طول‌های بلند ایجاد کرد، زیرا افزایش نیروی اصطکاک ناشی از تماس بین قالب و نمونه مانع از انجام فرآیند می‌شود. فرجی و همکاران<sup>[15]</sup>، روش انبساط و اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک (Hydrostatic cyclic expansion extrusion; HCEE) را اختراع کردند که مشکل محدودیت طول نمونه را در فرآیند CEE حل کرد. شماتیک فرآیند HCEE در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیند HCEE علاوه بر تولید میله فوق ریزدانه به صورت تناوبی، قابلیت استفاده از مزیت روش اکستروژن هیدرواستاتیک را دارد که شامل فشار هیدرواستاتیک بالا، جلوگیری از افزایش دمای منطقه تغییر شکل و بازیابی دینامیکی، اعمال نرخ کرنش بالا و غیره است.



شکل ۱) شماتیک فرآیند HCEE؛ (الف) حالت اولیه، (ب) انبساط میله، (ج) اکستروژن میله و انجام پاس اول و (د) انجام پاس دوم

همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، سیال اطراف قطعه را می‌پوشاند و از تماس مستقیم بین قالب و نمونه جلوگیری می‌کند. البته در منطقه تغییر شکل نمونه به‌طور مستقیم با قالب در تماس است و این منطقه همانند روش CEE است. نمونه با عبور از این قسمت دچار تغییر شکل شدید شده و ریز ساختار دچار تغییر می‌شود. سیال، اطراف و پشت نمونه قرار گرفته و اصطکاک بین نمونه و دیواره قالب حذف می‌شود. مراحل انجام فرآیند HCEE با توجه به شکل ۱ به چهار قسمت زیر تقسیم می‌شود:

تغییر شکل شدید المان‌ها یکی از مشکلات اصلی بود؛ لذا از مش‌زنی حالت تطبیقی استفاده شد.

### ۲-۳- آزمون کشش

تست کشش برای بررسی خواص مکانیکی نمونه قبل از فرآیند و بعد از فرآیند در دمای محیط انجام شد. ابعاد نمونه تست کشش بر اساس استاندارد E8 ASTM انتخاب شد. آزمایش توسط دستگاه آزمون کشش اینسترون با نرخ کرنش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت.

### ۲-۴- سختی‌سنجی

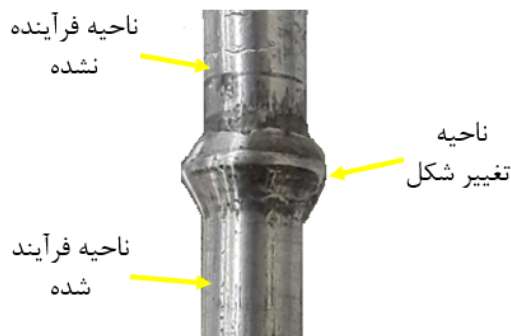
نمونه‌های مناسب برای آزمون میکروسختی از نمونه منیزی قبل و بعد از فرآیند HCEE جدا شد و سختی‌سنجی بعد از مانت‌کردن و پولیش‌زدن با استفاده از دستگاه میکروسختی ویکرز کوپا انجام شد. در این آزمون برای اعمال اثر سنجی نیروی ۵۰ گرم در زمان ۲۰ ثانیه اعمال شد.

### ۲-۵- متالوگرافی نوری

برای مطالعه تغییرات ریزساختار بعد از فرآیند HCEE، سطح مقطع نمونه‌ها برش داده شد و سپس مانت گرفته شد. برای مشاهده ریزساختار، سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سیلیسیم و پودر آلومینا به حالت آینه‌ای درآمد. سپس با استفاده از محلول شیمیایی ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه، ۷۰ میلی‌لیتر اتانول، ۱۰ میلی‌لیتر استیک اسید و ۴/۲ گرم پودر پیکریک اسید، سطح نمونه در دمای محیط حکاکی شیمیایی شد [18]. در نهایت تغییرات ریزساختار با میکروسکپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت.

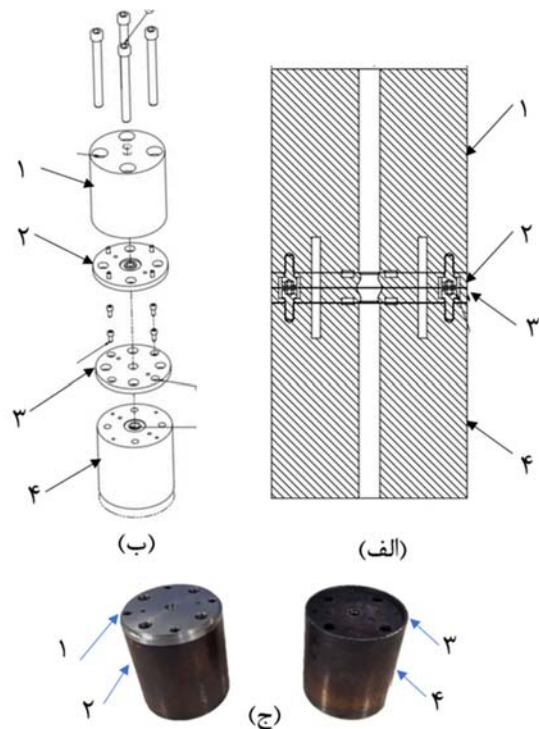
### ۳- نتایج و بحث

در فرآیند انبساط-اکستروژن متوالی از سیال تحت فشار استفاده می‌شود که بسیار روی فشار وارده بر سیال و نوع آب‌بندی تاثیر می‌گذارد. در این پژوهش با استفاده از واشرهای چند لایه مس، نواحی تماس سطوح اجزای قالب به خوبی آب‌بندی شد و نمونه منیزیم AM60 با استفاده از فرآیند HCEE به خوبی تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. شکل ۳، تصویر قسمت تغییر شکل نمونه منیزیم AM60 را بعد از فرآیند نشان می‌دهد.



شکل ۳) ناحیه تغییر شکل نمونه منیزیم AM60 شکل‌دهی شده در فرآیند HCEE

۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. فرآیند به صورت گرم و در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای رساندن دمای قطعه کار و قالب به میزان مورد نظر از یک هیتر به صورت کمربند الکتریکی که در اطراف قالب بسته می‌شود، استفاده شده است.

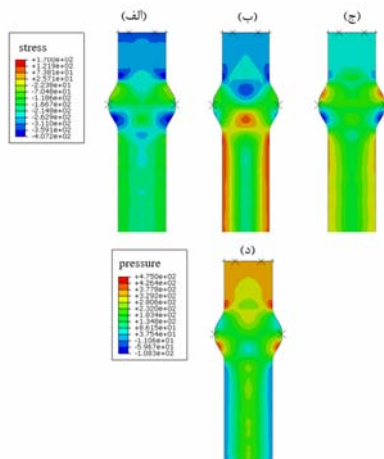


شکل ۴) اجزای قالب HCEE: الف) مونتاژ کلی قالب، ب) شکل انفجاری قالب و ج) دو نیمه قالب قبل از مونتاژ

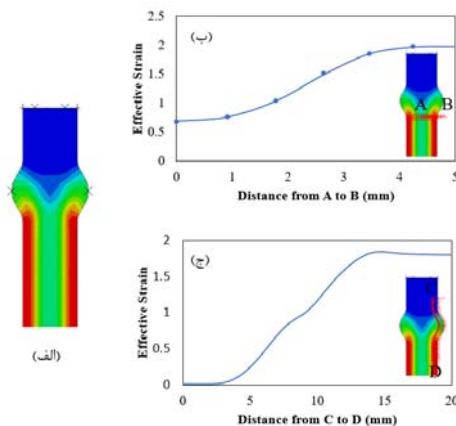
### ۲-۲- شبیه‌سازی‌های المان محدود

شبیه‌سازی‌های المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS جهت بررسی مقادیر فشار هیدرواستاتیک و توزیع تنش و کرنش حین فرآیند HCEE (به صورت تقارن محوری) انجام شد. در این مدل، قالب و سنبه‌ها به صورت صلب مجزا و میله به صورت تغییر شکل‌پذیر شبیه‌سازی شد. پارامترهای هندسی قالب بنا به حالت تجربی موجود در نظر گرفته شد. ماده مورد نظر نمونه معرفی شده به نرم‌افزار، آلیاژ منیزیم AM60 با خواص مکانیکی: مدول الاستیکی ۴۵ گیگاپاسکال و ضریب پواسان ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. آنالیز به صورت دینامیک ایکپلیسیست که در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به کار می‌رود، انجام شد. تماس بین بیل و دیواره قالب، به علت وجود سیال و حذف اثر اصطکاک، بدون اصطکاک مدل شد و در مناطق تماسی که سیال وجود نداشت، ضریب اصطکاک ۰/۷ در نظر گرفته شد. بارگذاری نیز به صورت حرکتی به نمونه اعمال شد. قالب و سنبه به دلیل صلب در نظر گرفته شدن فاقد مش بوده و در نمونه منیزی، مش به صورت مربعی از نوع CAX4R و اندازه ۰/۸ میلی‌متر و با تعداد مش ۷۵۰ عدد در نظر گرفته شد. از آنجا که طی شبیه‌سازی فرآیند،

به ترتیب، در نمودار ۳-ب و ۳-ج مشهود است. با توجه به نمودار ۳-ب، مشاهده می‌شود که توزیع کرنش در ضخامت میله از مقدار نزدیک به ۰/۶ در مرکز میله تا مقدار ۲ در سطح خارجی رسیده است که مقدار قابل توجهی تلقی می‌شود؛ لذا این انتظار وجود دارد که حتی پس از انجام اولین پاس HCEE بهبود ریزساختار و ریزدانه‌گی قابل توجهی در ماده ایجاد شود. توزیع کرنش در ضخامت میله پس از انجام اولین پاس از فرآیند HCEE، بیشتر از مقادیر کرنش گزارش شده برای پاس اول در بسیاری از مطالعات مربوط به روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید از جمله ECAP<sup>[20]</sup> است. با توجه به نمودار ۳-ج، مشاهده می‌شود که مقدار کرنش راستای طولی میله، پس از عبور از منطقه تغییر شکل، به عدد ۲ می‌رسد که نشان‌دهنده پتانسیل بالای فرآیند برای بهبود ریزساختار است. همچنین در نمودار ۳-ج، دو پله مشاهده می‌شود که پله اول، مربوط به وقوع انبساط و پله دوم، مربوط به وقوع اکستروژن حین انجام HCEE است.

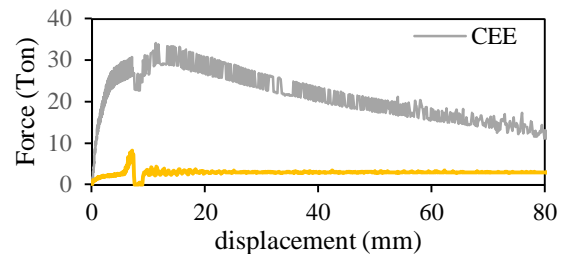


**نمودار ۲)** توزیع انواع تنش‌ها حین انجام فرآیند HCEE روی میله: الف: توزیع تنش‌های شعاعی (در راستای شعاع میله)، ب: توزیع تنش‌های محوری (موازی محور میله)، ج: توزیع تنش‌های محیطی و د: توزیع فشار هیدرواستاتیک در نمای برش خورده میله



**نمودار ۳)** الف: توزیع کرنش موثر، ب: کرنش موثر در مسیر عرضی (A - B) و ج: کرنش موثر در مسیر طولی (C - D؛ مسیر حرکت در امتداد محور میله) در طول HCEE

نیروی لازم برای انجام فرآیند در دو حالت هیدرواستاتیک (HCEE) و سنتی (بدون سیال یا خشک با ضریب اصطکاک ۰/۷) در نمودار ۱ مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، استفاده از سیال تحت فشار، باعث کاهش نیروی انجام فرآیند، از حدود ۳۲ تن به حدود کمتر از ۸ تن (کاهش به یک چهارم) می‌شود؛ لذا با روش HCEE به راحتی می‌توان میله‌های با طول بلند را بدون اینکه هیچ‌گونه نگرانی از بابت اثرات نامطلوب اصطکاک، افزایش نامتعرف نیروی فرآیند و احتمال کماتش و شکست سنبه وجود داشته باشد، تولید نمود. در واقع استفاده از سیال در ناحیه تماسی نمونه و قالب و استفاده از فشار روغن به منظور شکل‌دهی محدودیت طول تولید مواد نانو ساختار در SPD را به راحتی حل می‌کند.



**نمودار ۱)** مقایسه نیروی لازم برای انجام فرآیند در دو حالت هیدرواستاتیک (HCEE) و سنتی (CEE)

در نمودار ۲، توزیع انواع تنش‌ها در منطقه تغییر شکل میله، حین انجام فرآیند HCEE نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۲-الف و ۲-ج، کل تنش‌های شعاعی و محیطی وارد بر همه قسمت‌های میله از نوع فشاری هستند که این مساله، یکی از مزایای اصلی روش است. در راستای طولی نیز اغلب تنش‌های به وجود آمده حین تغییر شکل فشاری هستند؛ فقط در کناره‌ها کمی تنش کششی در راستای محوری وجود دارد. چنین حالتی منجر خواهد شد تا با توجه به نمودار ۲-د، فشار هیدرواستاتیک بالایی به قطعه وارد شود که در نتیجه آن، امکان انجام پاس‌های بیشتر فرآیند (به منظور اعمال کرنش بیشتر و ریزتر شدن و بهبود بیشتر ریزساختار) وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، فشار هیدرواستاتیک بالا، ایجاد و رشد ترک را به تاخیر می‌اندازد؛ بنابراین می‌توان تعداد پاس‌های HCEE بیشتری را روی میله انجام داد و باعث بهبود بیشتر ریزساختار شد. فشار هیدرواستاتیک این فرآیند، به طرز قابل توجهی بیشتر از فشار هیدرواستاتیک بسیاری از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید دیگر از جمله ECAP و در حد فرآیندهایی نظیر CECAP است<sup>[19]</sup>.

در نمودار ۳-الف، توزیع کرنش موثر حاصل از انجام فرآیند HCEE، در منطقه تغییر شکل میله، نشان داده شده است. همچنین، نمودار کرنش موثر در مسیر عرضی A - B (ضخامت میله)، طولی C - D (مسیر حرکت در امتداد محور میله)،



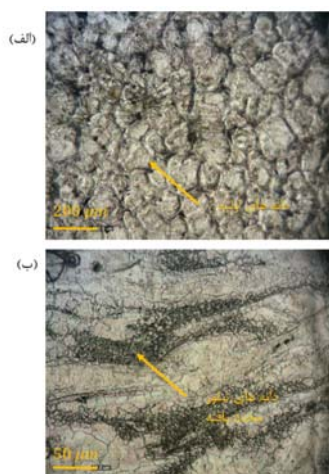
بالا نیز است که اهمیت فرآیند HCEE را نشان می‌دهد. همچنین فشار بالای هیدرواستاتیک در فرآیند HCEE باعث جلوگیری از ایجاد و رشد میکروترک‌ها در نمونه شده و باعث بهبود درصد ازدیاد طول نسبت به دیگر فرآیندها می‌شود.

جدول ۲) مقادیر تنش تسلیم، نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه منیزیم AM60 قبل و بعد از HCEE

فرآیند HCEE	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
قبل از فرآیند	۱۳۸	۲۲۱	۱۵
بعد از فرآیند	۲۱۲	۳۱۷	۲۲

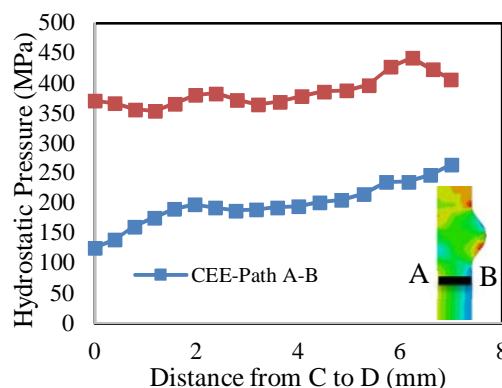
### ۳-۳- بررسی میکروساختاری

شکل ۴، تصویر ریزساختار از سطح مقطع نمونه در دو حالت قبل و بعد از فرآیند HCEE را نشان می‌دهد. شکل ۴- الف که منطقه فرآیند نشده را نشان می‌دهد که دارای ریزساختار درشت (۱۰۷ میکرومتر) است و رسوب بین فازی  $Mg_{17}Al_{12}$  بین دانه‌ها قرار گرفته است. در این ناحیه هیچ تبلور مجدد دینامیکی صورت نمی‌گیرد. از طرفی دیگر، رسوب بین فازی  $Mg_{17}Al_{12}$  باعث کاهش درصد ازدیاد طول در آلیاژهای ریختگی منیزیم می‌شود [22]. بعد از انجام پاس اول فرآیند HCEE ریزساختار فوق ریزدانه تشکیل شده است. شکل ۴- ب، توزیع ریزساختار فوق ریزدانه پس از فرآیند HCEE را نشان می‌دهد. همچنین فاز بین فلزی به قسمت‌های کوچکی تقسیم شده است و این باعث افزایش درصد ازدیاد طول شده است. مکانیزم ریزدانه‌گی در آلیاژ منیزیم تبلور مجدد دینامیکی است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، ریزساختار ریز اطراف دانه درست را در بر گرفته است که نشان‌دهنده به‌وجود آمدن تبلور مجدد دینامیکی است [23]. تبلور مجدد دینامیکی بسیار با مقدار کرنش معادل در ارتباط است، به‌طوری که هرچه مقدار کرنش معادل افزایش یابد، ریزدانه‌گی بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۴) تغییرات ریزساختار: الف) نمونه منیزیم AM60 اولیه و ب) فوق ریزدانه‌شده توسط فرآیند HCEE

همان‌طور که اشاره شد، فشار هیدرواستاتیک نقش ویژه‌ای را در انجام بهتر فرآیندهای SPD، به‌خصوص شکل‌دهی مواد ترد ایفا می‌کند. به‌منظور مشخص‌شدن بیشتر این موضوع، مقدار تنش هیدرواستاتیک به‌وجودآمده در طول فرآیندهای CEE و HCEE با شبیه‌سازی در مسیر عرضی نمونه مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس دیاگرام تنش هیدرواستاتیک در مرکز ناحیه تغییر شکل در طول HCEE که در نمودار ۴ نشان داده شده است، مقدار خوبی از تنش هیدرواستاتیک در طول مسیر A-B وجود دارد که به انجام بهتر فرآیند شکل‌دهی کمک می‌کند. مقدار ماکزیمم فشار هیدرواستاتیک در طول فرآیند HCEE به  $450\text{MPa}$  می‌رسد که بسیار بیشتر از مقادیر حاصل از CEE است.



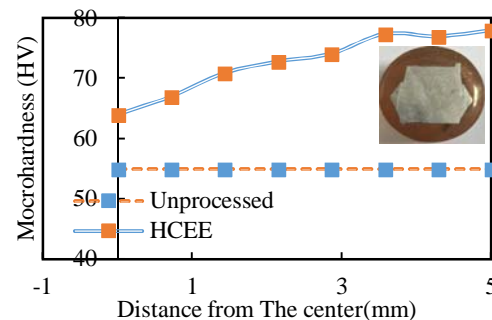
نمودار ۴) توزیع تنش هیدرواستاتیک در مسیر A-B در طول CEE و HCEE منیزیم

### ۳-۲- خواص مکانیکی از آزمون کشش

به‌منظور بررسی پارامترهای استحکامی ماده مانند استحکام تسلیم، استحکام نهایی و درصد تغییر طول نهایی شکست از آزمون کشش در دمای محیط استفاده شد. در جدول ۲، مقادیر به‌دست‌آمده برای استحکام تسلیم، نهایی و درصد ازدیاد طول پس از انجام آزمون کشش بر نمونه اولیه و نمونه فوق ریزدانه‌شده توسط فرآیند HCEE در دمای  $300^\circ\text{C}$  آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، استحکام نمونه‌ها پس از انجام فرآیند انبساط و اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک افزایش پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت فرآیند انبساط و اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک است؛ بدین صورت که می‌توان علاوه بر تولید میله‌های فوق ریزدانه با طول بلند به خواص مکانیکی مطلوبی نیز دست یافت. کاهش شدید اندازه دانه و توزیع همگن آن‌ها پس از انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها و در نتیجه افزایش استحکام می‌شود. همان‌طور که از مقادیر جدول مشخص است، استحکام تسلیم و نهایی میله منیزیم AM60 بعد از یک پاس فرآیند HCEE به ترتیب ۵۴ و ۴۳٪ افزایش می‌یابد. درصد تغییر طول نیز در این پژوهش افزایش پیدا کرده است. علت این افزایش‌ها علاوه بر توزیع یکنواخت رسوب در ریزساختار [21]، فشار هیدرواستاتیک

### ۴-۳ نتایج سختی سنجی ویکرز

نمودار ۵، توزیع مقدار میکروسختی ویکرز در راستای ضخامت نمونه منیزیم AM60 قبل و بعد از فرآیند HCEE را نشان می‌دهد. پس از انجام فرآیند HCEE قطعه فوق ریزدانه می‌شود، با توجه به رابطه هال-پچ<sup>[24]</sup> که برای سختی و استحکام معروف است، سختی با ریز شدن دانه‌ها افزایش پیدا می‌کند. بنابراین نمودار ۵، سختی پس از فرآیند HCEE بیش از ۲۰٪ از حالت خام اولیه افزایش پیدا کرده است. توزیع سختی بعد از انجام فرآیند HCEE کاملاً غیریکنواخت است که علت اصلی آن توزیع غیریکنواخت کرنش معادل است.



نمودار ۵) توزیع میکروسختی در عرض نمونه منیزیم AM60 اولیه و فرآیندشده توسط فرآیند HCEE

### ۴-۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش انبساط و اکستروژن متوالی هیدرواستاتیک جهت تولید مواد فوق ریزدانه با طول بلند و شکل‌پذیری کم در دمای محیط استفاده شده است. این روش با موفقیت روی فلز منیزیم AM60 انجام گرفت. بعد از انجام فرآیند نتایج زیر به دست آمد.

- بررسی‌های عددی نشان داد که تنش هیدرواستاتیک بالایی در طول فرآیند HCEE روی ماده اعمال می‌شود که به انجام بهتر فرآیند، به‌خصوص مواد ترد کمک می‌کند. همچنین مقادیر کرنش بالا و نسبتاً همگن در فرآیند HCEE در مقایسه با سایر روش‌های SPD نظیر ECAP به دست می‌آید.
- استحکام تسلیم و نهایی میله بعد از فرآیند HCEE به‌صورت چشمگیری افزایش یافت. مقدار آن‌ها به ترتیب برای استحکام تسلیم و نهایی از حالت اولیه ۵۴٪ و ۴۳٪ افزایش یافت.
- درصد ازدیاد طول بعد از فرآیند HCEE به دو دلیل وجود فشار هیدرواستاتیک و کوچک شدن رسوبات بیش از ۴۵٪ نسبت به حالت اولیه افزایش یافت.
- مقدار میکروسختی همانند استحکام، افزایش یافت و مقدار آن ۲۰٪ نسبت به حالت اولیه بهبود یافت. توزیع سختی در عرض نمونه کاملاً غیریکنواخت به دست آمد.
- ریزساختار بعد از پاس اول فرآیند HCEE توسط مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی فوق ریزدانه شد و همچنین اندازه رسوبات کاملاً ریز و بین دانه‌ها پراکنده شد.

- تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
- تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
- تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
- سهم نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
- منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

### منابع

- 1- Latysh V, Krallics G, Alexandrov I, Fodor A. Application of bulk nanostructured materials in medicine. *Current Applied Physics*. 2006;6(2):262-2662.
- 2- Valiev RZ, Estrin Y, Horita Z, Langdon TG, Zechetbauer MJ, Zhu YT. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society (TMS)*. 2006;58:33-39.
- 3- Iwahashi Y, Wang J, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta Materialia*. 1996;35(2):143-146.
- 4- Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 2000;45:103-189.
- 5- Zhilyaev AP, Langdon TG. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*. 2008;53(6):893-979.
- 6- Valiev RZ, Zhilyaev AP, Langdon TG. Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications. Hoboken: John Wiley & Sons; 2013.
- 7- Pachla W, Kulczyk M, Sus-Ryszkowska M, Mazur A, Kurzydłowski KJ. Nanocrystalline titanium produced by hydrostatic extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;205(1-3):173-182.
- 8- Richert J. A new method for unlimited deformation of metals and alloys. *Aluminum*. 1986;62:604-607.
- 9- Utsunomiya H, Hatsuda K, Sakai T, Saito Y. Continuous grain refinement of aluminum strip by conshearing. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;372(1-2):199-206.
- 10- Eskandarzade M, Masoumi A, Faraji G, Mohammadpour M, Yan XS. A new designed incremental high pressure torsion process for producing long nanostructured rod samples. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;695:1539-1546.
- 11- Lewandowska M, Garbacz H, Pachla W, Mazur A, Kurzydłowski KJ. Grain refinement in aluminium and the aluminium Al-Cu-Mg-Mn alloy by hydrostatic extrusion. *Material Science Poland*. 2005;23(1):279-286.
- 12- Lewandowska M, Kurzydłowski KJ. Recent development in grain refinement by hydrostatic extrusion. *Journal of Materials Science*. 2008;43:7299-7306.
- 13- Richert M, Liu Q, Hansen N. Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic-extrusion-compression. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;260(1-2):275-283.
- 14- Pardis N, Talebanpour B, Ebrahimi R, Zomorodian S. Cyclic expansion-extrusion (CEE): A modified counterpart of cyclic extrusion-compression (CEC). *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(25-26):7537-7540.
- 15- Faraji G, Samadpour F, Babaei P inventors. Hydrostatic cyclic expansion extrusion process for

optimization of equal channel angular pressing for producing ultra-fine grained materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;184(1-3):209-216.

21- Yamashita A, Horita Z, Langdon TG. Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 2001;300(1-2):142-147.

22- Chen Q, Zhao Z, Chen G, Wang B. Effect of accumulative plastic deformation on generation of spheroidal structure, thixoformability and mechanical properties of large-size AM60 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;632:190-200.

23- Amani S, Faraji G, Abrinia K. Microstructure and hardness inhomogeneity of fine-grained AM60 magnesium alloy subjected to cyclic expansion extrusion (CEE). *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;28 Pt 1:197-208.

24- Minárik P, Král R, Čížek J, Chmelík F. Effect of different  $c/a$  ratio on the microstructure and mechanical properties in magnesium alloys processed by ECAP. *Acta Materialia*. 2016;107:83-95.

producing ultrafine-grained rods. United States Patent US20180029097. 2018 Feb 1.

16- Samadpour F, Faraji G, Babaie P, Bewsher SR, Mohammadpour M. Hydrostatic cyclic expansion extrusion (HCEE) as a novel severe plastic deformation process for producing long nanostructured metals. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;718:412-417.

17- Rhee K, Han WY, Park HJ, Kim SS. Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;384(1-2):70-76.

18- Stanford N, Barnett MR. Solute strengthening of prismatic slip, basal slip and  $\{1\ 0\ 1\ 2\}$  twinning in Mg and Mg-Zn binary alloys. *International Journal of Plasticity*. 2013;47:165-181.

19- Ensafi M, Faraji G, Abdolvand H. Cyclic extrusion compression angular pressing (CECAP) as a novel severe plastic deformation method for producing bulk ultrafine grained metals. *Materials Letters*. 2017;197:12-16.

20- Xu S, Zhao G, Ma X, Ren G. Finite element analysis and