

# بررسی اثر فرآیند ECAP بر بافت آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

- محمد حسین شاعری<sup>۱\*</sup>، مرتضی شاعری<sup>۲</sup>، محمدتقی صالحی<sup>۳</sup>، سید حسین سیدین<sup>۴</sup>، محمدرضا ابوطالبی<sup>۵</sup>
- ۱- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین، (پست الکترونیکی: shaeri@eng.ikiu.ac.ir)
- ۲- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (پست الکترونیکی: yasinshaeri@gmail.com)
- ۳- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، (پست الکترونیکی: salehi@iust.ac.ir)
- ۴- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، (پست الکترونیکی: seyyedein@iust.ac.ir)
- ۵- استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران، (پست الکترونیکی: mrezab@iust.ac.ir)

## Texture evolution of ultrafine grained Al-7075 alloy produced by ECAP

M.H. Shaeri<sup>1\*</sup>, M. Shaeri<sup>2</sup>, M.T. Salehi<sup>3</sup>, S.H. Seyyedein<sup>4</sup>, M.R. Abutalebi<sup>5</sup>

- 1- Assistant professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Email: shaeri@eng.ikiu.ac.ir
- 2- MSc, Department of Materials Engineering, Sharif University of Technology, Email: yasinshaeri@gmail.com
- 3- Associated professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Email: salehi@iust.ac.ir
- 4- Associated professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Email: seyyedein@iust.ac.ir
- 5- Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Email: mrezab@iust.ac.ir

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی بافت آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرس شده در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) در شرایط عملیات حرارتی آنیل در مسی‌های مختلف می‌باشد. در این پژوهش نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی آنیل تحت ۴ پاس فرآیند ECAP در دمای محیط در مسی‌های A و BC قرار گرفتند. پس از تولید نمونه‌ها بافت نمونه‌ها در دو جهت مختلف به صورت کمی و کیفی به وسیله XRD و EBSD مورد بررسی قرار گرفت. در ضمن اثر غلاف دار کردن نمونه‌ها با لوله مسی بر بافت نیز بررسی شد. بررسی کمی و کیفی بافت با استفاده از تصاویر قطبی و توابع توزیع جهت‌گیری و همچنین محاسبات اجزاء بافت ECAP نشان داد، بافت پاس اول ECAP وابستگی زیادی به بافت اولیه دارد، ولی بافت پاس‌های بعدی بیشتر به مسیر فرآیند وابسته است. محاسبات انجام شده با استفاده از نرم‌افزار Labotex نشان داد انطباق خوبی بین نتایج به دست آمده در دو جهت مختلف وجود دارد و در ضمن استفاده از غلاف مسی باعث کاهش اندکی در استحکام بافت و در نتیجه آن باعث بهبود همگنی ریزساختار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فرآیند ECAP، آلیاژ Al-7075، بافت، اجزاء بافت.

### Abstract

The aim of current research was to examine the texture of annealed Al-7075 alloy that develops during Equal channel angular pressing (ECAP) in different ECAP routes. After annealing heat treatment, the material was pressed up to 4 passes by route A and BC at room temperature. The effect of copper tube casing on the texture evolution was also investigated. The texture was studied by X-Ray diffractometer in ED-plane as well as TD-plane. The qualitative and quantitative analysis of the texture reveals that the texture of the first pass is relevant to initial texture, but by increasing pass number this dependency disappears and the texture is mainly relevant to processing route. The texture calculation by Labotex software shows that the results in both TD (z) and ED (x) planes are in good agreement and covering the specimens with copper tube causes a decrease in texture strength and microstructure inhomogeneity of the specimens.

**Keywords:** Equal channel angular pressing; Al-7075 alloy; Texture; Texture components.

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ مورد استفاده در پژوهش حاضر (درصد وزنی).

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
باقیمانده	۰/۰۷	۰/۰۹	۱/۵۰	۰/۰۴	۲/۶۵	۰/۲۱	۵/۷	۰/۲۰

ترکیب شیمیایی آلیاژ ۷۰۷۵ مورد استفاده در این پژوهش که به وسیله اسپکترمتر GNR Italy Metallab-7580J اندازه‌گیری شده، در جدول ۱ نمایش داده شده است. قطر نمونه‌های استوانه‌ای شکل مورد نیاز جهت فرآیند ECAP به وسیله ماشین‌کاری به ۱۹/۱ و ۱۷/۱ میلیمتر کاهش پیدا کرد و سپس میله‌ها با طول ۱۴ سانتیمتر بریده شدند. نمونه با قطر ۱۹/۱ برای ECAP بدون غلاف مسی و نمونه با قطر ۱۹/۱ برای ECAP با غلاف (لوله) مسی استفاده شدند. در ضمن با در نظر داشتن قطر کانال قالب، لوله‌های مس خالص تجاری با قطر خارجی ۱۹/۰۵ میلیمتر و ضخامت‌های ۱ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفتند (Shaeri et al., 2013). قبل از انجام فرآیند ECAP نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  نگهداری شده و پس از سرد شدن به مدت ۲۴ ساعت داخل کوره، در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  از کوره عملیات حرارتی خارج شدند. نمونه‌ها پس از آنیل تحت ۱ تا ۴ پاس فرآیند ECAP در دمای محیط در مسیرهای BC و A قرار گرفتند.

اندازه‌گیری بافت با استفاده دستگاه پراش اشعه ED ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , Cu K $\alpha$ , Rigaku, d/max-2500) در دو صفحه (صفحه عمود بر جهت اکستروژن) و TD (صفحه موازی با جهت اکستروژن) صورت گرفت. سیستم مختصات مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌های مورد نیاز با ضخامت حدود ۱ میلیمتر و مقطع  $19 \times 19$  میلیمتر از قسمت میانی نمونه‌های ECAP تهیه شد و سپس سطوح نمونه‌ها به وسیله سنباده‌زنی، پولیش‌کاری و پولیش‌کاری نهایی با Colloidal Silica کاملاً صیقلی شد. محاسبات مربوط به تصاویر قطبی (PF) با استفاده از روش Shultz back reflection انجام شد. با استفاده از نرم‌افزار Labotex 2.1 پردازش داده‌های خام اولیه و تهیه تصاویر قطبی و تصاویر قطبی معکوس (IPF)، محاسبه توابع توزیع جهت‌گیری (ODF) از سه تصویر قطبی  $\{111\}$ ،  $\{200\}$  و  $\{220\}$  و همچنین محاسبه کسر حجمی اجزاء بافت انجام گردید. لازم به ذکر است از نتایج EBSD نیز جهت آنالیز بافت برخی از نمونه‌ها استفاده شد.

### نتایج و بحث

در پژوهش حاضر جهت بررسی بافت از تصاویر قطبی و توابع ODF تهیه شده به وسیله دستگاه XRD از نمونه‌های آنیل ECAP شده در وضعیت‌های مختلف در دو جهت TD و ED استفاده شد. همان‌طور که در قسمت روش پژوهش عنوان شد با استفاده از دستگاه EBSD

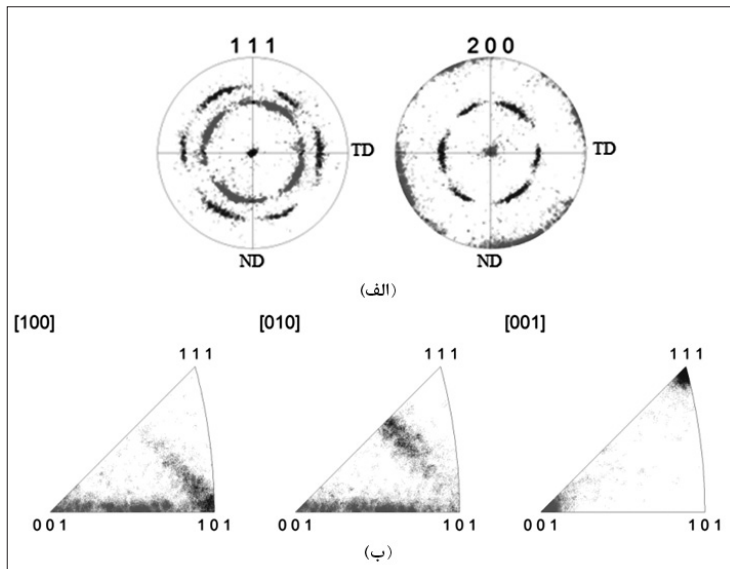
فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)، قابلیت خود را به عنوان یک روش مناسب برای ایجاد ساختارهای بسیار ریزدانه در حد زیرمیکرون و نانو در فلزات و آلیاژها اثبات کرده است (Valiev & Langdon, 2006). در بین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان (ECAP) موثرترین و کاربردی‌ترین روش برای تولید قطعات حجیم با دانه‌های فوق‌العاده ریز (UFG) و خواص مکانیکی فوق‌العاده می‌باشد. از مهم‌ترین مزایای فرآیند ECAP قابلیت تولید مواد کاملاً چگال و اندازه مناسب برای کاربردهای صنعتی واقعی است. در فرآیند ECAP، تغییر شکل پلاستیک شدید به وسیله برش ساده با پرس مکرر قطعات در قالبی حاوی دو کانال با سطح مقطع یکسان که در زاویه قالب  $\Phi$  و انحنای خارجی  $\Psi$  به هم متصل شده‌اند، اعمال می‌گردد. با توجه به این‌که ابعاد نمونه در حین فرآیند ECAP تغییر پیدا نمی‌کند، ریزدانه‌سازی و همچنین افزایش چگالی نابجایی‌ها حین فرآیند ECAP باعث افزایش قابل ملاحظه استحکام فلزات و آلیاژها می‌شود (Xu & Langdon, 2006; Xu & Langdon, 2003).

از آنجائی‌که خرد شدن دانه‌ها وابسته به جهت‌گیری دانه‌هاست، لذا بررسی سیر تکامل بافت جهت درک مکانیزم‌های تغییر شکل و ریزدانه شدن حین ECAP ضروری می‌باشد (Li, Beyerlin, Alexander, 2006). تغییر شکل پلاستیک زیاد و تغییرات مسیر کرنش حین ECAP باعث ایجاد تغییرات پیچیده و قابل توجه در بافت بلوری می‌شود (Li, Beyerlin, Bourke, 2005). سیر تکامل بافت هر ماده به تغییر شکل اعمال شده (مسیر فرآیند، تعداد پاس‌ها، زاویه قالب و ...)، مکانیزم‌های تغییر شکل (لغزش، سیستم دو قلولی و ...) و بافت اولیه وابسته است. با توجه به این‌که تغییر شکل حین ECAP در صفحه فصل مشترک دو کانال مشابه با برش ساده است، لذا در بیشتر مطالعات، بافت تشکیل شده حین ECAP با بافت شکل گرفته در آزمون‌های برش ساده مانند پیچش مقایسه می‌شود (Beyerlin & Toth, 2009; Li, Beyerlin, Alexander, Vogel, 2005).

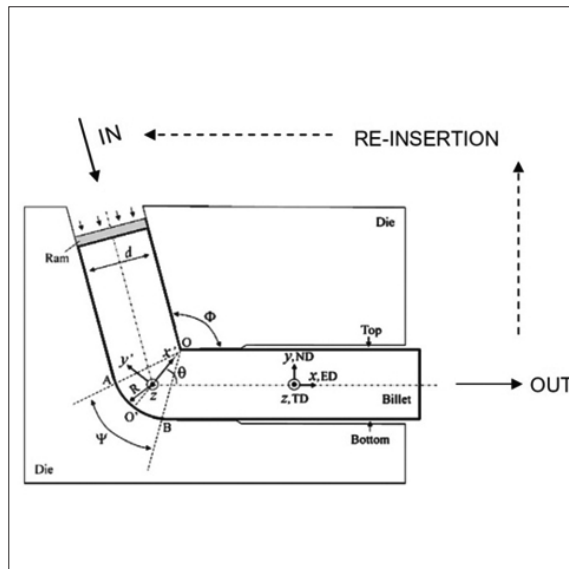
در پژوهش حاضر بافت ایجاد شده در حین ECAP آلیاژ ۷۰۷۵ آنیل شده در دمای محیط به وسیله دستگاه XRD و میکروسکوپ الکترونی مجهز به EBSD در دو جهت مختلف بررسی شد و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از ECAP نمونه‌ها با غلاف مسی مقایسه گردید.

### مواد و روش تحقیق

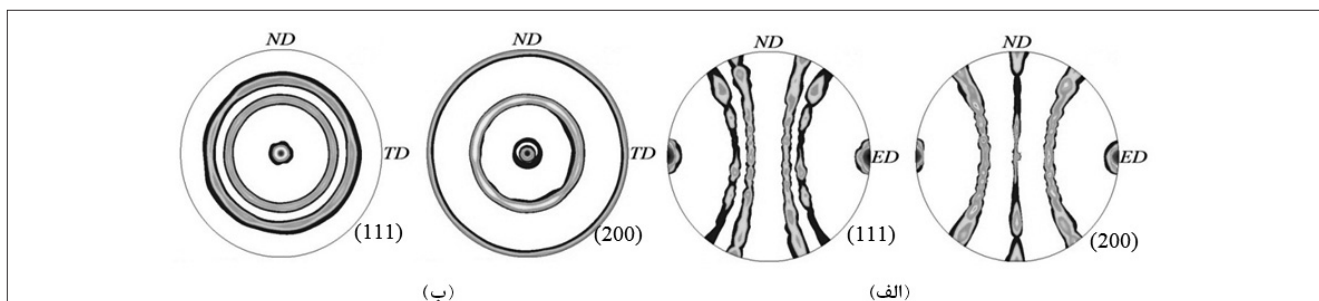
آلیاژ ۷۰۷۵ مورد نیاز برای فرآیند ECAP به شکل میلگرد‌های اکستروژن شده با قطر ۲۰ میلیمتر از شرکت آلومینات تهیه شد.



شکل ۲- (الف) تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) و (ب) تصاویر قطبی معکوس [۱۰۰] و [۰۰۱] نمونه اولیه در صفحه ED تهیه شده به وسیله EBSD.



شکل ۱- سیستم مختصات مورد استفاده در پژوهش حاضر.



شکل ۳- تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) نمونه اولیه در (الف) صفحه TD و (ب) صفحه ED.

نیز داده‌های مورد نیاز برای تحلیل بافت استخراج گردید، ولی با توجه به این که نتایج XRD و EBSD تقریباً یکسان بودند و همچنین داده‌های XRD نشان‌دهنده وضعیت بافت کل سطح مورد بررسی بوده ولی داده‌های EBSD موضعی می‌باشند، در این بخش داده‌های XRD ارائه شده است. در ضمن با توجه به این که تصاویر قطبی و همچنین تصاویر قطبی معکوس هر دو نشان‌دهنده جهت‌گیری دانه‌ها بوده، به دلیل این که تحلیل تصاویر قطبی آسان‌تر می‌باشد، در این گزارش به جهت اجتناب از عنوان مطالب تکراری تصاویر قطبی معکوس ارائه نشده است. لازم به ذکر است نتایج تهیه شده به وسیله EBSD و همچنین تصاویر قطبی معکوس نمونه اولیه به منظور مقایسه در شکل ۲ نمایش داده شده، ولی برای سایر نمونه‌ها این نتایج ارائه نشده است.

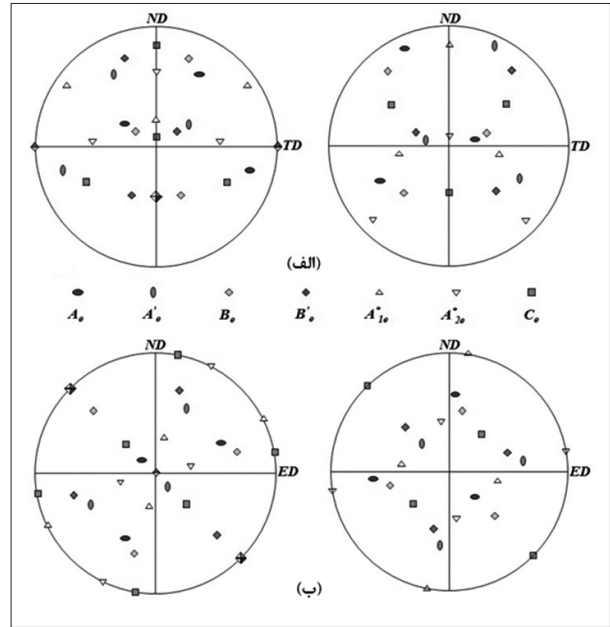
تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) نمونه اولیه در دو جهت TD و ED در شکل ۳ نشان داده شده است. این تصاویر قطبی به وضوح تشریح می‌کند که بافت ماده اولیه شامل فایبر قوی <۱۰۰> و فایبر ضعیف <۱۱۱> بوده و محور فایبرها موازی با محور طولی نمونه (جهت ED) می‌باشد. محاسبات انجام شده به وسیله نرم‌افزار Labo-  
tex نشان می‌دهد که جزء حجمی فایبر <۱۰۰> حدود ۶۸ درصد و جزء حجمی فایبر <۱۱۱> حدود ۲۰ درصد می‌باشد. در تصاویر قطبی تهیه شده به وسیله EBSD (شکل ۲(الف)) قطب‌های مربوط به فایبرهای <۱۰۰> و <۱۱۱> به ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی مشخص شده‌اند. در شکل ۲(ب) تصاویر قطبی معکوس [۱۰۰]، [۰۱۰] و [۰۰۱] ماده اولیه نیز ارائه شده است.  
برای بیان بافت یا جهت‌گیری دانه‌ها در ECAP از اندیس میلر به صورت <uvw> {hkl} استفاده می‌شود، که {hkl} اندیس صفحه موازی با صفحه ND و <uvw> اندیس جهت موازی با جهت ED می‌باشد [Li, Beyerlin, Alexander, Vogel, 2005]. زوایای اولیه و اندیس‌های میلر اجزاء اصلی بافت فلزات FCC که به وسیله قالب با زاویه  $\Phi = 90^\circ$  تحت فرآیند ECAP قرار گرفته‌اند در جدول ۲ ارائه شده است [Chowdhury, Xu, Langdon, 2008]. جهت کمک به تفسیر تصاویر قطبی نمونه‌های ECAP شده، تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) راهنمای مکان اجزاء ایده‌آل بافت ECAP در دو صفحه ED و TD در شکل ۴ نشان داده شده است.

نیز داده‌های مورد نیاز برای تحلیل بافت استخراج گردید، ولی با توجه به این که نتایج XRD و EBSD تقریباً یکسان بودند و همچنین داده‌های XRD نشان‌دهنده وضعیت بافت کل سطح مورد بررسی بوده ولی داده‌های EBSD موضعی می‌باشند، در این بخش داده‌های XRD ارائه شده است. در ضمن با توجه به این که تصاویر قطبی و همچنین تصاویر قطبی معکوس هر دو نشان‌دهنده جهت‌گیری دانه‌ها بوده، به دلیل این که تحلیل تصاویر قطبی آسان‌تر می‌باشد، در این گزارش به جهت اجتناب از عنوان مطالب تکراری تصاویر قطبی معکوس ارائه نشده است. لازم به ذکر است نتایج تهیه شده به وسیله EBSD و همچنین تصاویر قطبی معکوس نمونه اولیه به منظور مقایسه در شکل ۲ نمایش داده شده، ولی برای سایر نمونه‌ها این نتایج ارائه نشده است.

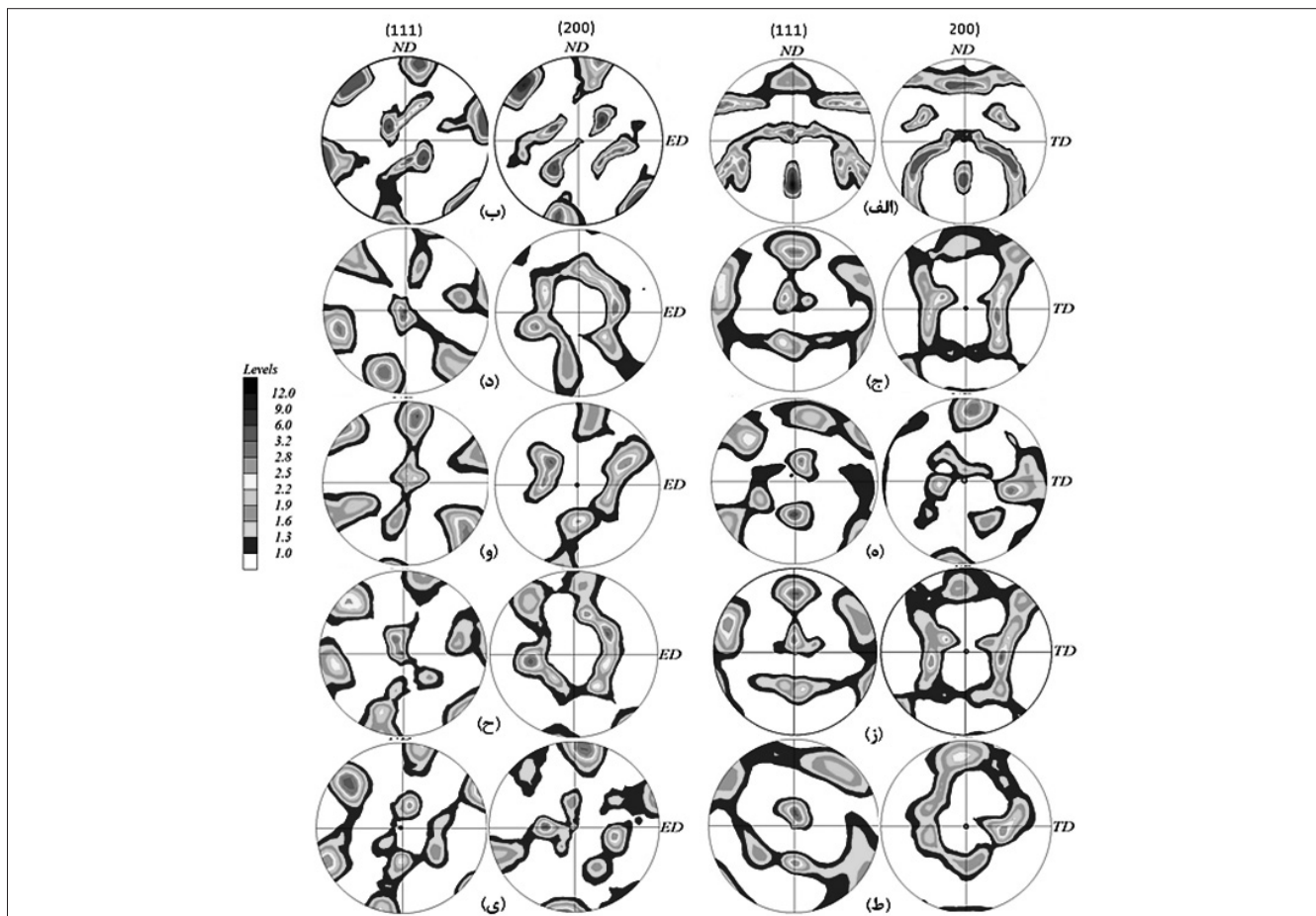
تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) نمونه اولیه در دو جهت TD و ED در شکل ۳ نشان داده شده است. این تصاویر قطبی به وضوح تشریح می‌کند که بافت ماده اولیه شامل فایبر قوی <۱۰۰> و فایبر ضعیف <۱۱۱> بوده و محور فایبرها موازی با محور طولی نمونه (جهت ED) می‌باشد. محاسبات انجام شده به وسیله نرم‌افزار Labo-

جدول ۲- زوایای اویلر و اندیس‌های میلر اجزاء اصلی بافت آلیاژهای FCC که به‌وسیله قالب با زاویه  $\Phi=90^\circ$  تحت فرآیند ECAP قرار گرفته‌اند.

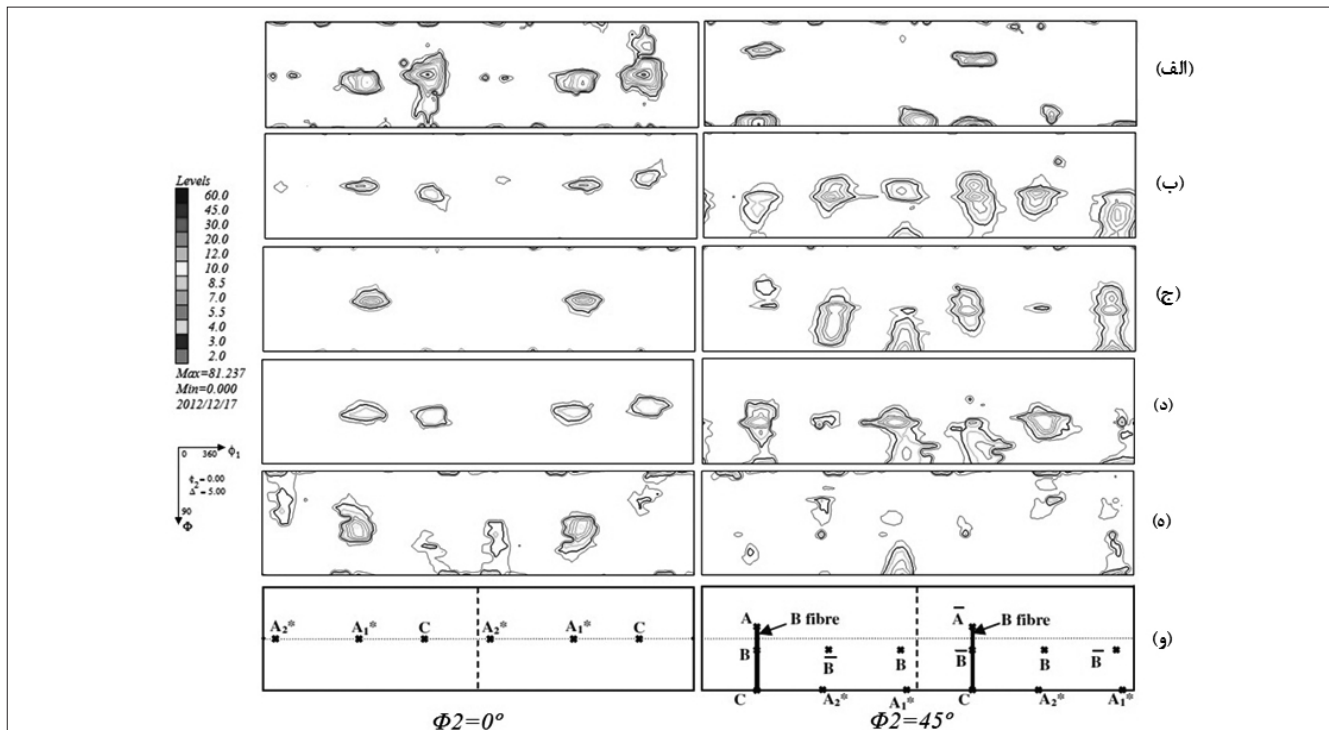
جزء بافت	زوایای اویلر ( $^\circ$ )			اندیس میلر		
	$\Phi_1$	$\Phi$	$\Phi_2$	ND	ED	TD
$A_{10}^*$	80.26/260.26	45	0	$[81\bar{1}]$	$[\bar{1}44]$	$[011]$
	170.26/350.26	90	45			
$A_{20}^*$	9.74/189.74	45	0	$[\bar{1}44]$	$[81\bar{1}]$	$[011]$
	99.74/279.74	90	45			
$A_\theta$	45	35.26	45	$[914]$	$[\bar{1}11\bar{5}]$	$[\bar{1}12]$
$A'_\theta$	225	35.26	45	$[\bar{1}11\bar{5}]$	$[\bar{9}1\bar{4}]$	$[\bar{1}12]$
$B_\theta$	45/165/285	54.74	45	$[15411]$	$[72619]$	$[\bar{1}11]$
$B'_\theta$	105/225/345	54.74	45	$[\bar{7}2619]$	$[\bar{1}5411]$	$[\bar{1}11]$
$C_\theta$	135/315	90	0	$[334]$	$[22\bar{3}]$	$[\bar{1}10]$
	45/225	45	45			



شکل ۴- تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) راهنما حاوی مکان اجزاء ایده‌آل بافت ECAP در (الف) صفحه ED و (ب) صفحه TD.



شکل ۵- تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰)، (الف) نمونه ۱ پاس ECAP شده (صفحه ED)، (ب) نمونه ۱ پاس ECAP شده (صفحه TD)، (ج) نمونه بدون غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر A (صفحه ED)، (د) نمونه بدون غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر A (صفحه TD)، (و) نمونه بدون غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر BC (صفحه ED)، (ز) نمونه بدون غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر BC (صفحه TD)، (ح) نمونه با غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر A (صفحه ED)، (ط) نمونه با غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر BC (صفحه ED)، (ی) نمونه با غلاف مسی ۴ پاس ECAP شده، مسیر BC (صفحه TD).



شکل ۶- ODF نمونه‌های آنیل ECAP شده در وضعیت‌های مختلف (الف) ۱ پاس، (ب) ۴ پاس به‌وسیله مسیر A (بدون غلاف مسی)، (ج) ۴ پاس به‌وسیله مسیر BC (بدون غلاف مسی)، (د) ۴ پاس به‌وسیله مسیر A (با غلاف مسی)، (ه) ۴ پاس به‌وسیله مسیر BC (با غلاف مسی)، (و) اجزاء ایده‌آل بافت برای فلزات fcc.

تصاویر قطبی (۱۱۱) و (۲۰۰) به‌دست آمده از آنالیز XRD نمونه‌های آنیل ۱ تا ۴ پاس ECAP شده به‌وسیله مسیر A و BC در حالت با غلاف مسی و بدون غلاف مسی در شکل ۵ نشان داده شده است. تصاویر قطبی در هر دو صفحه TD و ED به منظور مقایسه و حصول اطمینان از نتایج تهیه شده‌اند. از تصاویر قطبی موجود برای صفحه TD می‌توان نتیجه گرفت، تقارن مونوکلینیک در نمونه‌های ۱ پاس ECAP شده و ۴ پاس ECAP شده به‌وسیله مسیر A وجود دارد، در حالی‌که در نمونه‌های پرس شده به‌وسیله مسیر BC این تقارن وجود ندارد. تقارن مونوکلینیک به عدم تغییر تصاویر قطبی یا بافت در صورت چرخش ۱۸۰ درجه‌ای حول محور TD اشاره می‌کند. با توجه به این‌که بافت اولیه دارای تقارن مونوکلینیک است، لذا پس از پاس اول تقارن مونوکلینیک باقی می‌ماند. چرخش نمونه‌ها حول محورهای دیگر به جز محور TD باعث از بین رفتن تقارن مونوکلینیک می‌شود، در نتیجه این تقارن پس از ۴ پاس پرس در مسیر A حفظ می‌شود، در حالی‌که در مسیر BC این تقارن به دلیل چرخش حول محور ED از بین می‌رود. [Beyerlin & Toth, 2009]

برای بررسی اجزاء اصلی بافت ECAP این دو مقطع کافی است) ODF نمونه‌های ECAP شده در وضعیت‌های مختلف را نمایش می‌دهد. اجزاء ایده‌آل بافت ECAP نیز در ODF راهنما ارائه شده است (شکل ۶ و). بررسی ODF نشان می‌دهد که حداکثر شدت جهت‌گیری  $f(g)_{max}$  پس از پاس اول ECAP به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و با ادامه فرآیند ECAP تا پاس چهارم به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

استحکام بافت (texture strength) معمولاً به‌وسیله شاخص اندیس بافت (texture index) سنجیده می‌شود. اندیس بافت (T) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [Suwas et al., 2006]:

$$T = \int_{EulerSpace} [f(g)]^2 dg$$

g نشان‌دهنده جهت‌گیری است که با زوایای اویلر تعیین می‌شود و f(g) شدت ODF در g می‌باشد. مقادیر اندیس بافت محاسبه شده به‌وسیله نرم‌افزار Labotex برای نمونه‌های ECAP شده در وضعیت‌های مختلف در جدول ۳ نمایش داده شده است.

مقادیر مربوط به اندیس بافت نشان می‌دهد (جدول ۳) که اندیس بافت نمونه ۱ پاس ECAP شده حدود دو برابر نمونه اولیه بوده و پس از ۴ پاس ECAP حدود ۴ برابر کاهش می‌یابد (اندیس بافت ماده اولیه ۴/۷ می‌باشد). مورد مهم دیگری که از بررسی مقادیر T حاصل

جدول ۳- جزء حجمی اجزاء اصلی بافت ECAP و اندیس بافت نمونه‌های ECAP شده در وضعیت‌های مختلف.

شرایط ECAP	۴ پاس - صفحه TD				۴ پاس - صفحه ED				۱ پاس	
	مسیر BC		مسیر A		مسیر A		مسیر BC		صفحه TD	صفحه ED
	با غلاف مسی	بدون غلاف مسی	با غلاف مسی	بدون غلاف مسی	بدون غلاف مسی	با غلاف مسی	بدون غلاف مسی	با غلاف مسی	بدون غلاف مسی	
$A_0$	۱/۱	۱/۲	۱/۸	۱/۵	۱/۱	۳/۳	۱/۹	۱/۱	۲/۴	۳/۱
$A'_0$	۰/۳	۲/۴	۱/۳	۲/۱	۱/۴	۲/۳	۰/۶	۱/۹	۲/۹	۲/۸
$B_0$	۰/۷	۱/۴	۳/۸	۳/۶	۲/۸	۲/۳	۱/۴	۱/۲	۰/۱	۰/۱
$B'_0$	۱/۵	۳/۲	۲/۴	۴/۴	۳	۲/۵	۱/۱	۲/۵	۰/۱	۰/۱
$A^*_{20}$	۱/۲	۱/۳	۰/۷	۰/۹	۰/۴	۱/۳	۰/۶	۱/۶	۱/۳	۲/۵
$A^*_{10}$	۴/۹	۴/۲	۲/۹	۲/۴	۲/۹	۲/۳	۵/۱	۳/۹	۵/۸	۴/۶
$C_0$	۰/۸	۰/۷	۲/۴	۱/۸	۱	۳/۵	۲	۰/۹	۱۴/۵	۱۰/۴
اندیس بافت	۱/۲	۲/۳	۲/۱	۲/۴	۲/۲	۲	۲	۲/۲	۱۰/۳	۹/۱

مسیر A نیز وجود دارد، زیرا شدت  $A_0$  و  $A'_0$  و همچنین شدت  $B_0$  و  $B'_0$  تقریباً برابر است. با مقایسه جزء حجمی اجزاء بافت نمونه‌های ECAP شده با غلاف مسی و بدون غلاف مسی می‌توان دریافت که جزء حجمی تمام اجزاء بافت به جز  $C_0$  و  $A^*_{10}$  با غلاف دار کردن آلیاژ ۷۰۷۵ با لوله مسی به مقدار اندکی کاهش می‌یابد. بررسی‌های مربوط به اجزاء  $A_0/A'_0$  و  $B_0/B'_0$  نشان می‌دهد که تقارن مونوکلینیک در نمونه‌های با غلاف مسی کمتر از نمونه‌های بدون غلاف مسی می‌باشد. همانند نمونه ۱ پاس ECAP شده جزء حجمی تمام اجزاء بافت به استثنای  $A^*_{10}$  در صفحه ED کمتر از صفحه TD بوده، هرچند این اختلاف پس از ۴ پاس کمی بیشتر از ۱ پاس می‌باشد.

**۴ پاس ECAP به وسیله مسیر BC:** پس از ۴ پاس ECAP در مسیر BC، جزء  $A^*_{10}$  تبدیل به قوی‌ترین جزء شده و جزء  $C_0$  تقریباً ناپدید می‌شود. شدت اجزاء  $A_0$  و  $B_0$  ضعیف و شدت اجزاء  $A'_0$  و  $B'_0$  متوسط بوده، لذا می‌توان نتیجه گرفت که تقارن مونوکلینیک در مسیر BC وجود ندارد، زیرا شدت  $A_0$  و  $A'_0$  و همچنین شدت  $B_0$  و  $B'_0$  متفاوت می‌باشد. با توجه به نتایج محاسبات بافت می‌توان بیان نمود، غلاف دار کردن آلیاژ ۷۰۷۵ با لوله مسی باعث کاهش قابل ملاحظه جزء حجمی اجزاء  $B_0$ ،  $A'_0$  و  $B'_0$  و افزایش اندک جزء حجمی  $A^*_{10}$  می‌شود. بررسی بافت نمونه‌های ECAP شده در مسیر BC نشان می‌دهد که نتایج مربوط به صفحه TD انطباق خوبی با نتایج مربوط به صفحه ED دارد.

### تحلیل نتایج

در این بخش در مورد تاثیر فرآیند ECAP و پارامترهای آن

می‌شود، کاهش اندک استحکام بافت نمونه‌های ECAP شده در صورت استفاده از غلاف مسی می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از غلاف مسی بافت بلوری نمونه‌های ECAP شده ضعیف‌تر می‌شود. به منظور مقایسه کمی دقیق‌تر اجزاء بافت نمونه‌های ECAP شده در شرایط مختلف، جزء حجمی اجزاء اصلی بافت ECAP به وسیله نرم‌افزار Labotex محاسبه شد (جدول ۳). در ادامه یافته‌های حاصل از بررسی بافت در شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۳ توضیح داده می‌شود.

**۱ پاس ECAP:** در پاس اول  $C_0$  قوی‌ترین جزء بافت بوده و پس از آن  $A^*_{10}$  نیز قوی می‌باشد. شدت اجزاء  $A_0/A'_0$  متوسط بوده و جزء  $A^*_{20}$  ضعیف می‌باشد، در ضمن اجزاء  $B_0/B'_0$  نیز در بافت حضور ندارند. با توجه به این‌که شدت  $A_0$  و  $A'_0$  و همچنین شدت  $B_0$  و  $B'_0$  تقریباً برابر است، می‌توان نتیجه گرفت تقارن مونوکلینیک در نمونه‌های ۱ پاس پرس شده وجود دارد. مقایسه جزء حجمی اجزاء بافت در دو صفحه TD و ED نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین نتایج در این دو صفحه وجود دارد و اختلاف بین جزء حجمی اجزاء بافت در این دو صفحه کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد (به استثنای جزء  $A^*_{20}$ ، که اختلاف حدود ۲ برابر می‌باشد).

**۴ پاس ECAP به وسیله مسیر A:** با افزایش تعداد پاس‌های ECAP در مسیر BC اجزاء  $B_0/B'_0$  قوی شده و جزء  $C_0$  ضعیف می‌شود. قوی‌ترین اجزاء پس از ۴ پاس ECAP در مسیر A اجزاء  $B_0/B'_0$  و ضعیف‌ترین جزء  $A^*_{20}$  می‌باشند. شدت سایر اجزاء ( $A_0/A'_0$ ،  $A^*_{10}$ ،  $C_0$ ) نیز متوسط می‌باشد. مشابه با نمونه ۱ پاس ECAP شده تقارن مونوکلینیک در نمونه‌های ۴ پاس پرس شده در

بر تقارن بافت، استحکام بافت و اجزاء بافت ECAP به تفکیک بحث می‌شود.

### ۱- تقارن بافت:

در آنالیز بافت یکی از مهمترین مسائل بررسی تقارن نمونه با توجه به تغییر شکل ماکروسکوپی اعمال شده می‌باشد. اگر بافت اولیه اتفافی بوده و یا دارای تقارن مونوکلینیک باشد، تقارن مونوکلینیک برشی ساده در پاس اول به دست می‌آید. فقط در صورتی که برش ساده ایده‌آل در صفحه تقاطع دو کانال وجود داشته باشد، تقاطع مونوکلینیک می‌تواند باقی بماند و هرگونه انحراف از تغییر شکل مانند جریان گرد و نامتقارن در منطقه پلاستیک باعث انحراف از تقارن مونوکلینیک می‌شود. از طرف دیگر در صورتی که بافت اولیه قوی بوده و دارای تقارن مونوکلینیک نباشد، تقارن مونوکلینیک در پاس اول مشاهده نمی‌شود.

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۳ مشخص است در این پژوهش مشابه با پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققین روی مس (Tóth, Arruffat Massion, Germain, Baik, Suwas, 2004)، آلومینیوم، نیکل (Beyerlin, Li, Necker, Alexander, Tome, 2005) و فولاد (Li, Gazdar, Beyerlin, Pereloma, Davis, 2006) به دلیل بافت اولیه نسبتاً قوی و دارای تقارن مونوکلینیک، پس از یک پاس ECAP تقارن مونوکلینیک قوی به وضوح قابل مشاهده است. این مسئله نشان‌دهنده غالب بودن تغییر شکل برشی در صفحه تقاطع دو کانال است. در حالت ایده‌آل هنگامی که برش ساده در ECAP رخ می‌دهد، هر چرخشی حول محور TD که محور تقارن در فرآیند برش ساده است، تغییری در تقارن بافت ایجاد نمی‌کند. لذا محور TD می‌تواند محور تقارن بافت در فرآیند ECAP نامیده شود. چرخش نمونه حول محورهای دیگر منجر به از بین رفتن سریع تقارن می‌شود. به همین دلیل تقارن مونوکلینیک در مسیر A پس از پاس‌های زیاد ECAP باقی می‌ماند ولی در مسیر BC پس از پاس اول ECAP تقارن مونوکلینیک اولیه در پاس‌های بعدی از بین می‌رود. در این پژوهش نیز مانند پژوهش‌های انجام شده توسط سایر محققین بر روی فلزات و آلیاژهای دیگر (Gholinia, Prangnell, Markushev, 2000 Li et al., 2006) تقارن مونوکلینیک پس از ۴ پاس در مسیر A دیده می‌شود ولی در مسیر BC این تقارن دیده نمی‌شود.

### ۲- استحکام بافت:

استحکام بافت معمولاً به عنوان تابعی از مسیر فرآیند و تعداد پاس‌ها می‌باشد. هنگامی که استحکام بافت بررسی می‌شود باید به این نکته توجه شود که استحکام بافت می‌تواند به ناهمگنی‌های موضعی نمونه در اندازه‌گیری، تکنیک اندازه‌گیری، حجم و یا مساحت

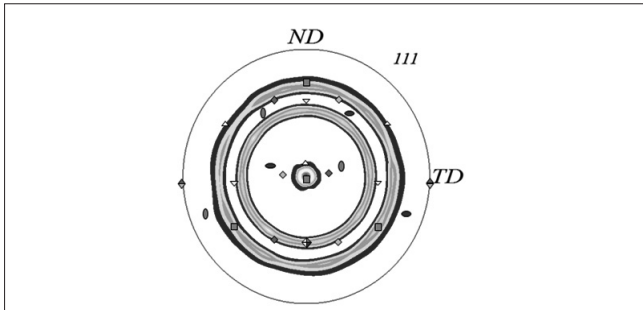
اسکن شده، تعداد دانه‌ها در اندازه‌گیری و بافت اولیه حساس باشد. به طور کلی استحکام بافت ECAP به‌طور قابل توجهی با مسیر فرآیند و تعداد پاس‌ها تغییر نمی‌کند مگر این‌که بافت اولیه قوی وجود داشته باشد. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است در پژوهش حاضر در پاس اول ECAP استحکام افزایش یافته و پس از ۴ پاس در هر دو مسیر A و BC استحکام بافت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، در ضمن استحکام بافت در هر دو مسیر مذکور تقریباً یکسان است. به دلیل این‌که مقادیر استحکام بافت به پارامترهای مختلفی حساس است، لذا بسیار دشوار و یا حتی غیر ممکن است که یک رویه معنادار برای تغییرات استحکام بافت با تعداد پاس‌ها پیدا کرد.

بررسی پژوهش‌های مختلف اختلاف‌های قابل ملاحظه‌ای را برای این نتایج نشان می‌دهد که در ادامه برخی از این نتایج مقایسه می‌شوند. در پژوهش Li و همکاران (Li et al., 2005) به وسیله پراش نوترونی افزایش ملایمی در استحکام بافت مس با افزایش تعداد پاس‌های ECAP تا ۱۶ پاس مشاهده شده است. مشاهدات Baik و همکاران (Baik et al., 2003) به وسیله پراش اشعه X متضاد بود، در مسیر BC با افزایش تعداد پاس‌ها استحکام بافت کاهش می‌یافت. Ferrasse و همکاران در تحقیقات خود بر روی مس (Ferrasse, Segal, Hartwig, Goforth, 1997) نیز ضعیف شدن بافت را با افزایش تعداد پاس‌ها مشاهده کردند، هرچند در یک آلیاژ Al دریافتند که استحکام بافت در مسیر BC بیشتر از مسیر A نوسان کرده و پس از ۴ پاس پایدار می‌شود. Cao و همکاران (Cao, Godfery, Liu, 2003) به وسیله EBSD افزایش استحکام بافت در Al را با تعداد پاس‌ها مشاهده کردند و در نهایت Li و همکاران (Li et al., 2006) با استفاده از پراش اشعه X تغییر قابل ملاحظه‌ای را در استحکام بافت فولاد IF با افزایش تعداد پاس‌ها مشاهده نکرده‌اند.

### ۳- اجزاء بافت:

با توجه به شرایط فرآیند مانند مسیر، پاس و دمای فرآیند و همچنین بافت اولیه امکان دارد اجزاء ایده‌آل موجود در بافت ECAP و شدت آن‌ها متفاوت باشد، به طوری که به عنوان مثال ممکن است در یک مسیر یک جزء بافت کاملاً غایب باشد و همان جزء در مسیر دیگر با شدت بالایی وجود داشته باشد. در ضمن معمولاً در اکثر موارد امکان انحراف چرخشی اجزاء بافت ECAP نسبت به مکان ایده‌آل وجود دارد، لذا برای محاسبه جزء حجمی اجزاء بافت به وسیله نرم‌افزار Labotex میزان انحراف حداکثر ۱۰ درجه برای محاسبات در نظر گرفته شده است.

۱ پاس ECAP: همان‌طور که در جدول ۳ ذکر شده است قوی‌ترین جزء بافت در نمونه‌های ۱ پاس پرس شده جزء C<sub>0</sub> می‌باشد. دلیل بالا



شکل ۷- مکان اجزاء ایده آل بافت ECAP بر روی تصویر قطبی <111> آلیاژ آنیل اولیه در صفحه ED (جزء  $C_0$  با مربع های سبز رنگ مشخص شده است).

۴ پاس ECAP (مسیر  $B_c$ ): همان طور که در جدول ۳ مشخص است در مسیر  $B_c$  جزء  $A^*_{10}$  قوی ترین جزء بافت است و این مسئله با نتایج Li و همکاران (Li et al., 2005) که عنوان کرده اند بیشترین چگالی جهت گیری در اطراف  $A^*_{10}$  وجود دارد مطابقت دارد. از طرف دیگر نتایج پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی برخی محققین مانند Baik و همکاران (Baik et al. 2003) و Cao و همکاران (Cao et al., 2003) کاملاً متفاوت است. با توجه به این که تغییر شکل اعمال شده توسط مسیر  $B_c$  بسیار پیچیده است، تحلیل بررسی بافت در این مسیر بسیار دشوار می باشد. دلیل این پیچیدگی چرخش نمونه حول دو محور TD و ED بین پاس های متوالی ECAP می باشد. در نهایت می توان به طور کلی عنوان نمود در پاس های اولیه ECAP بافت بیشتر به بافت اولیه وابسته است و در پاس های بعدی از تاثیر بافت اولیه کاسته شده و بافت بیشتر به مسیر فرآیند بستگی دارد.

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر در زمینه بررسی اثر ECAP بر بافت آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را به صورت زیر می توان خلاصه کرد:

- ۱- با توجه به بافت قوی اولیه، بافت پاس های اول ECAP وابستگی زیادی به بافت اولیه دارد، ولی بافت پاس های بعدی بیشتر به مسیر فرآیند وابسته است.
- ۲- پس از پاس اول ECAP استحکام بافت افزایش قابل ملاحظه ای یافته، در حالی که با افزایش بیشتر پاس ها استحکام بافت شدیداً افت می کند. در ضمن استفاده از غلاف مسی باعث کاهش استحکام بافت می شود.
- ۳- محاسبات کمی بافت آشکار می سازد، جزء  $C_0$  قوی ترین جزء بافت در نمونه ۱ پاس ECAP شده می باشد، در صورتی که اجزاء  $B_0/B'_0$  و  $A^*_{10}$  به ترتیب قوی ترین اجزاء در نمونه های ECAP شده به وسیله مسیرهای A و  $B_c$  می باشند.
- ۴- مقایسه جزء حجمی اجزاء بافت در دو صفحه TD و ED

بودن شدت این جزء در مقایسه با سایر اجزاء مرتبط با بافت فایبر اولیه <۱۰۰> و <۱۱۱> می باشد. شکل ۷ مکان اجزاء ایده آل بافت ECAP را بر روی تصویر قطبی <۱۱۱> آلیاژ آنیل اولیه در صفحه ED به عنوان نمونه نشان می دهد. جزء  $C_0$  که با مربع های سبز رنگ مشخص شده است دارای انطباق کامل با تصویر قطبی بافت اولیه می باشد و انطباق سایر اجزاء با بافت اولیه در مقایسه با  $C_0$  بسیار کمتر می باشد. لذا مشخص است پس از پاس اول اثرات بافت اولیه کاملاً از بین نرفته و دلیل قوی تر بودن  $C_0$  انطباق خوب این جزء با بافت اولیه است. لذا می توان عنوان نمود بافت پاس اول وابسته به بافت اولیه است و این مورد در پژوهش های سایر محققین نیز مطرح شده است (Ferrase, Segal, Kaldidi, Alford, 2004; Li et al., 2005; Suwas et al., 2006).

۴ پاس ECAP (مسیر A): نتایج ارایه شده در جدول ۳ نشان می دهد که با افزایش تعداد پاس های ECAP در مسیر A جزء  $C_0$  ضعیف شده و اجزاء  $B_0/B'_0$  قوی می شوند، به طوری که پس از ۴ پاس اجزاء  $B_0/B'_0$  تبدیل به قوی ترین جزء شده و جزء  $C_0$  تقریباً حذف می شود. ضعیف شدن جزء  $C_0$  با افزایش تعداد پاس ها نشان می دهد وابستگی بافت به بافت اولیه با افزایش پاس ها کاهش یافته و پس از ۴ پاس بافت تقریباً به بافت اولیه وابسته نمی باشد. دلیل قوی شدن اجزاء  $B_0/B'_0$  با تعداد پاس ها را می توان بر اساس میدان جریان توضیح داد. در مسیر A پس از هر پاس نمونه به میزان ۹۰ درجه حول محور TD چرخیده و سپس برای پاس بعد داخل قالب قرار داده می شود. این مسئله باعث جابجایی کلی بافت به اندازه ۹۰ درجه در جهت کاهش  $\phi_1$  در فضای اوایلر می شود. این بدین معنی است که اجزاء  $B\theta/B'\theta$  پاس اول در سمت چپ مکان جدید  $B_0/B'_0$  با فاصله ۳۰ درجه در جهت  $\phi_1$  یعنی دقیقاً در وسط اجزاء  $B_0/B'_0$  جدید قرار می گیرند. بنابراین در پاس بعدی این اجزاء با توجه به ماهیت همگرایی جریان قوی تر خواهند شد. به این نکته باید توجه شود که اجزاء  $B_0/B'_0$  به صورت متقارن در هر ۶۰ درجه در فضای اوایلر قرار گرفته اند (شکل ۶ ب)). لذا قوی تر بودن این اجزاء به دلیل تقارن آن هاست. به این نکته نیز باید توجه نمود که قوی شدن اجزاء به فاکتورهای دیگری از قبیل خواص ماده، بافت اولیه، فرآیند ریزدانه سازی و تشکیل دوقلوبی ها نیز بستگی دارد (Suwas et al., 2006). در ضمن افزایش شدت اجزاء  $B_0/B'_0$  با تعداد پاس ها در تحقیقات سایر محققین از قبیل Suwas و همکاران روی نقره (Suwas, Tóth, Fundenberger, Eberhardt, 2003) و Skrotzki روی آلیاژ 6182-Al (Werenskiold & Roven, 2005) و Gholinia و همکاران روی آلومینیوم خالص (Gholinia, Bate, Prangnel, 2002) و Li و همکاران روی مس خالص (Li et al., 2006) نیز مشاهده شده است.



tron diffraction characterization and polycrystal modeling. *Acta Mater*, 53, 2111-2125.

12-Li, S., Beyerlein, I. J., Alexander, D. J. & Vogel, S. C. (2005). Texture evolution during equal channel angular extrusion: effect of initial texture from experiment and simulation. *Scr Mater*, 52, 1099-1104.

13-Li, S., Beyerlein, I. J. & Bourke, M. A. M. (2005). Texture formation during equal channel angular extrusion of fcc and bcc materials: comparison with simple shear. *Mater Sci Eng A*, 394, 66-77.

14-Li, S., Gazder, A., Beyerlein, I. J., Pereloma, E. V. & Davies, C. H. J. (2006). Effect of processing route on microstructure and texture development in equal channel angular extrusion of interstitial-free steel. *Acta Mater*, 54, 1087-1100.

15-Shaeri, M. H., Djavaanroodi, F., Sedighi, M., Ahmadi, S., Salehi, M. T. & Seyyedeh, S. H. (2013). Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing. *J Strain Analysis Eng Des*, 48, 512-521.

16-Suwas, S., Arruffat-Massion, R., Tóth, L. S., Fundenberger, J. J., Eberhardt, A. & Skrotzki, W. (2006). Evolution of texture in copper during equal channel angular extrusion-the role of material variables. *Metall Mater Trans A*, 37, 739-753.

17-Suwas, S., Tóth, L. S., Fundenberger, J. J., Eberhardt, A. & Skrotzki, W. (2003). Evolution of crystallographic texture during equal channel angular extrusion of silver. *Scr Mater*, 49, 1203-1208.

18-Tóth, L. S., Arruffat Massion, R., Germain, I., Baik, S. C. & Suwas, S. (2004). Analysis of texture evolution in equal channel angular extrusion of copper using a new flow field. *Acta Mater*, 52, 1885-1898.

19-Valiev, R. Z. & Langdon, T. G. (2006). Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement. *Prog Mater Sci*, 51, 881-981.

20-Werenskiold, J. C. & Roven, H. J. (2005). Microstructure and texture evolution during ECAP of an AlMgSi alloy: Observations, mechanisms and modeling. *Mater Sci Eng A*, 410-411, 174-177.

21-Xu, C. & Langdon, T. G. (2003). Influence of a round corner die on flow homogeneity in ECA pressing. *Scr Mater*, 48, 1-4.

22-Xu, C. & Langdon, T. G. (2007). The development of hardness homogeneity in aluminum and an aluminum alloy processed by ECAP. *J Mater Sci*, 42, 1542-1550.

نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین نتایج در این دو صفحه وجود دارد.

## منابع و مراجع

1-Baik, S. C., Estrin, Y., Hellmig, R. J., Jeongc, H. T., Brokmeier, H. G. & Kim, H. S. (2003). Modeling of texture evolution of copper under equal channel angular pressing. *z metallk*, 94, 1189-1198.

2-Beyerlein, I. J., Li, S., Necker, C. T., Alexander, D. J. & Tomé, C. N. (2005). Non-uniform microstructure and texture evolution during equal channel angular extrusion. *Philo. Mag*, 85, 1359-1394.

3-Beyerlein, I. J. & Tóth, L. S. (2009). Texture evolution in equal-channel angular extrusion. *Prog Mater Sci*, 54, 427-510.

4-Cao, W. Q., Godfrey, A. & Liu, Q. (2003). EBSD investigation of microstructure and texture evolution during equal channel angular pressing of aluminium. *Mater Sci Eng A*, 361, 9-14.

5-Chowdhury, S. C., Xu, C. & Langdon, T. G. (2008). Texture evolution in an aluminum alloy processed by ECAP with concurrent precipitate fragmentation. *Mater Sci Eng A*, 473, 219-225.

6-Ferrase, S., Segal, V. M., Hartwig, K. T. & Goforth, R. E. (1997). Microstructure and properties of copper and aluminum alloy 3003 heavily worked by equal channel angular. *Metall Mater Trans A*, 28, 1047-1057.

7-Ferrase, S., Segal, V. M., Kalidindi, S. R. & Alford, F. (2004). Texture evolution during equal channel angular extrusion Part I. Effect of route, number of passes and initial texture. *Mater Sci Eng A*, 368, 28-40.

8-Gholinia, A. Bate, P. & Prangnell, P. B. (2002). Modelling texture development during equal channel angular extrusion of aluminum. *Acta Mater*, 50, 2121-2136.

9-Gholinia, A., Prangnell, P. B. & Markushev, M. V. (2000). The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed Aluminium alloys processed by ECAE. *Acta Mater*, 48, 1115-1130.

10-Li, S., Beyerlein, I. J. & Alexander, D. J. (2006). Characterization of deformation textures in pure copper processed by equal channel angular extrusion via route A. *Mater Sci Eng A*, 431, 339-345.

11-Li, S., Beyerlein, I. J., Alexander, D. J. & Vogel, S. C. (2005). Texture evolution during multi-pass equal channel angular extrusion of copper: Neu-