

بررسی ریزساختاری و تکسچر آلومینیوم خالص تجاری تحت تغییر

شکل پیچشی به کمک شبیه‌سازی کریستال پلاستیسیته

عرفان مداح^۱، محمد جواد رضایی^۲ و محمد صدیقی^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳. استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده – سیم‌های آلومینیومی، با توجه به کاربرد فراوانشان در صنایع گوناگون، به خصوص در صنعت انتقال برق، از اهمیت بسزایی برخوردار بوده‌اند. یکی از موثرترین روش‌ها برای بررسی ریزساختار، استفاده از تئوری کریستال پلاستیسیته است. در این پژوهش، تحولات ریزساختاری یک سیم آلومینیومی سری 1000 (گرید ۱۳۵۰) با قطر ۴ میلی‌متر تحت بارگذاری پیچشی با استفاده از حل گر طیفی (تبدیل فوریه سریع) نرم‌افزار داماسک مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، حل کریستال پلاستیسیته طیفی (CPFFT) بر روی یک نماینده المان حجمی (RVE) با تعداد ۱۰۰ دانه انجام می‌شود. بافت اولیه غیرتصادفی به صورت اعداد چهاروجهی به نماینده المان حجمی اختصاص داده شده و سپس به کمک حل طیفی کریستال پلاستیسیته، اعداد چهاروجهی تغییرشکل یافته در اثر تغییرشکل برش استخراج می‌گردند. با استفاده از بسته نرم‌افزاری MTEX موجود در MATLAB، این اعداد به اشکال قطبی (PF)، اشکال قطبی معکوس (IPF) و تابع توزیع جهت‌گیری (ODF) دانه‌ها تبدیل شده و ترسیم گردید. صحت‌سنجی نتایج CPFFT به کمک مقایسه نتایج تجربی آزمایش پراکنش الکترون برگشتی (EBSD) با نتایج شبیه‌سازی انجام شده است. مقایسه نتایج نمونه π رادیان چرخش نشان داد که جزءهای A ، \bar{A} ، A_1^* ، A_2^* و B در نتایج شکل قطبی مشاهده می‌شوند اما جزء محسوسی از نتایج تابع توزیع جهت در هر دو نمونه آزمون‌های EBSD و CPFFT دیده نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: کریستال پلاستیسیته؛ بافت؛ تحولات ریزساختاری؛ روش عددی طیفی

Microstructure and Texture Investigation of Commercial Pure Aluminium Subjected to Torsion Deformation by Using Crystal Plasticity Simulation

E. Maddah¹, M.J. Rezaei², M. Sedighi^{3,*}

1. MSc Student, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2. Ph.D. Student, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3. Prof., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract: Aluminum wires, due to their extensive use in various industries, particularly in the electrical power transmission industry, have been of significant importance. One of the most effective methods for investigating microstructure is the utilization of crystal plasticity theory. In this study, the microstructural changes of a 1000 aluminum wire (grade 1350) with a diameter of 4 mm under torsional loading are examined using a spectral solver (Fast Fourier Transform) in DAMASK software. For this purpose, Crystal Plasticity Fast Fourier Transform (CPFFT) is applied to a Representative Volume Element (RVE) containing 100 grains. The initial non-random texture is assigned to the Representative Volume Element (RVE) as quaternion numbers, and then, using crystal plasticity spectral solver, the deformed quaternion numbers due to shear deformation are extracted. Using the MTEX

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sedighi@iust.ac.ir

toolbox available in Matlab, these numbers are transformed into pole figures (PF), inverse pole figures (IPF), and orientation distribution functions (ODF) of grains were converted and plotted. The accuracy of CPFPT results is validated against experimental results from Electron Backscatter Diffraction (EBSD) tests. Comparison of the results for a π -radian rotation sample shows that components A , \bar{A} , A_1^* , A_2^* , B , and \bar{B} are created from the pole figure results. However, no substantial component is seen in orientation distribution functions in both EBSD and CPFPT test samples.

Keywords: Crystal plasticity, Texture, Microstructural evolution, Numerical spectral solver.

فهرست علائم

علائم یونانی		A	عنصر ایده‌آل در تغییرشکل برشی ساده مواد FCC
γ	کرنش برشی	a	ضریب سخت شونده
$\dot{\gamma}$	نرخ کرنش بر روی صفحه دلخواه	A_2^*	عنصر ایده‌آل در تغییرشکل برشی ساده مواد FCC
$\dot{\gamma}_0$	نرخ برش مرجع	B	عنصر ایده‌آل در تغییرشکل برشی ساده مواد FCC
τ	مولفه تنش برشی در صفحه دلخواه α	\bar{B}	عنصر ایده‌آل در تغییرشکل برشی ساده مواد FCC
ξ	مقاومت در برابر لغزش در صفحه دلخواه α	C_{ij}	ثابت الاستیک
ϵ_f	کرنش حدی	E	مدول الاستیسیته
ν	ضریب پواسون	h_0	ضریب سخت‌شوندگی
σ_y	تنش تسلیم	$h^{\alpha\beta}$	ماتریس برهم‌کنش لغزش-لغزش
σ_u	تنش حد نهایی	N	تعداد دوران اعمال شده
θ	مقدار زاویه دوران میله پس از اعمال بار پیچشی	N_s	تعداد کل سیستم‌های لغزش
بالانویس‌ها		n	ضریب حساسیت نرخ کرنش
α	صفحه لغزش دلخواه	L	طول سیم
β	صفحه لغزش دلخواه	R	شعاع سیم

مقدمه

سیم‌ها، کاهش اندازه دانه‌ها ضمن افزایش چگالی نابجایی‌ها در مرز دانه‌ها می‌باشد [۲]. این موضوع نخستین بار توسط هال - پیچ معرفی شد. تاکنون روش‌های مختلفی جهت تولید مواد ریزدانه معرفی گردیده که در این میان، فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید به‌صورت ویژه‌ای جهت تولید مواد فوق ریزدانه^۱ مورد توجه فراوان محققین این حوزه قرار گرفته است [۳]. انجام فرآیندهای حرارتی و روش‌های مرسوم استحکام‌دهی به وسیله کارسختی و همچنین تبدیل ساختار به دانه‌های ریز به وسیله فرآیندهای پیوسته شکل‌دهی فلزات، همچون کشش بر روی سیم‌های آلومینیومی خالص، دارای محدودیت است [۴]. فرآیندهایی که با تغییرشکل پلاستیک شدید همراه هستند، از روش‌هایی برای

سیم‌های آلومینیومی خالص تجاری به دلیل رسانایی الکتریکی خوب، وزن کم و مقاومت بالا در برابر خوردگی، در قطره‌های گوناگون کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلفی نظیر صنعت انتقال توان الکتریکی دارند [۱]. به همین دلیل بهبود استحکام مکانیکی این سیم‌ها، ضمن تحت تاثیر قرار ندادن خواص الکتریکی خوب آن‌ها، مورد توجه صنعت گران و محققان قرار گرفته است تا بتوان از آن‌ها در میدان وسیعی از کاربردها استفاده کرد [۲]. یکی از روش‌های رایج برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب آلیاژهای آلومینیوم خالص تجاری، مانند افزایش استحکام این

شکل‌دهی استفاده می‌کنند که در آن کرنش‌های بسیار بالا به قطعه‌کار اعمال می‌شود به طوری که تغییرات قابل توجهی در ابعاد کلی آن ایجاد نشده و به جای آن، باعث ایجاد دانه‌های بسیار ریز می‌شود [۵]. روش‌های تجربی برای مطالعه رفتار تغییرشکل در پلی‌کریستال‌ها همواره چالش برانگیز بوده و بیشتر اوقات باعث غیر قابل استفاده شدن نمونه مورد بررسی می‌شوند. از طرف دیگر، ساختار ناهمگون دانه‌ها، جهت‌های کریستالی گوناگون هر یک از دانه‌ها در میان تعداد زیادی از دانه‌های تشکیل‌دهنده یک قطعه، نواحی ناپیوستگی در مرز دانه‌ها و تأثیراتی که هر دانه بر دانه‌های مجاور خودش می‌گذارد، موارد مهمی هستند که به پیچیدگی تحلیل تغییرشکل در پلی‌کریستال‌ها می‌افزایند. به همین دلیل، روش‌های شبیه‌سازی عددی به دلیل غیرمخرب بودنشان، توجه محققان را به خود جلب کرده‌اند. در میان این روش‌ها، شبیه‌سازی‌های کریستال پلاستیسیته اجزا محدود (CPFEM)^۲ و روش محاسباتی با استفاده از حل گر طیفی، از پرکاربردترین ابزارهایی هستند که به طور گسترده توسط پژوهشگران برای بررسی تغییرشکل پلی‌کریستال‌ها به کار گرفته شده‌اند. یک نکته قابل توجه در مورد روش‌های شبیه‌سازی عددی، رسیدن به یک حد بهینه میان سرعت محاسبات و وضوح بالاتر می‌باشد. روش CPFEM این ضعف را در الگوریتم محاسباتی خود دارد: هزینه محاسباتی در وضوح‌های نسبتاً بالا به طور قابل توجهی بالا است. در حالی که روش حل طیفی در فضای فوریه عمل کرده و به نسبت روش FEM به دلیل استفاده مکرر از تبدیل فوریه سریع (FFT)^۳ به عنوان بخشی از الگوریتم حل تکرارشونده، می‌تواند در وضوح‌های بالا بدون هزینه محاسباتی سنگین مدیریت شود. مدل‌های پیوسته که تحولات ریزساختاری را استخراج می‌کنند بر دو مولفه اساسی استوار هستند: (۱) متغیرهای کمی وضعیت که ویژگی‌های اساسی وضعیت ماده را در بر می‌گیرند و (۲) معادلاتی که تحولات رخ داده را تحت بارگذاری توصیف می‌کنند [۶]. توسعه یک بسته نرم‌افزاری که قادر به ادغام این جوانب مختلف برای به دست آوردن یک دیدگاه کامل از تحولات ریزساختاری اتفاق افتاده باشد، نیازمند به کارگیری

تخصص‌های زیادی می‌باشد [۶]. بسته نرم‌افزاری داماسک (DAMASK)^۴ ابزاری برای این منظور است [۶]. ساختار این بسته نرم‌افزاری به شیوه سلسله‌مراتبی طراحی شده است تا رفتار مادی را برای حل مسائل مقدار مرزی الاستوپلاستیک در حوزه‌هایی همچون آسیب، اثرات حرارتی و برخی اثرات ترمودینامیکی، از مقیاس تک‌کریستال تا قطعات، در فرآیندهای تولید پیچیده، مدل کند [۶]. این نرم‌افزار قادر به مزدوج نمودن معادلات تعادل مکانیکی فرآیند با قوانین و مدل‌های گوناگون کریستال پلاستیسیته بوده که هر یک از این معادلات به دست آمده را می‌تواند با ابزارهای عددی اجزا محدود و روش طیفی بر پایه تبدیل فوریه سریع حل کند [۶]. تغییرشکل پیچشی ساده به طور موفقیت‌آمیزی برای اعمال کرنش‌های پلاستیک بزرگ به مواد فلزی مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۹]. صدیقی و همکاران [۴]، اثر تغییرشکل حاصل از بار پیچشی را بر خواص کششی سیم‌های آلومینیومی خالص تجاری مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها سیم‌های آلومینیومی با قطر یکسان را با گام‌های طولی مختلف تحت تغییرشکل پیچشی قرار دادند تا اثر تغییرات ریزساختاری حاصل در اثر تغییرشکل پیچشی را مطالعه کنند. نتایج نشان دادند که میزان ریز شدن دانه‌ها با مقدار تغییرشکل پلاستیکی برشی ناشی از تغییرشکل پیچشی ارتباط مستقیم دارد. کاروسو و آمبروگیو [۱۰]، آثار استحکام‌بخشی (استحکام تسلیم و نهایی، پلاستیسیته، چقرمگی)، رسانایی الکتریکی و تغییرات ریزساختاری آلومینیوم خالص تجاری ۱۳۷۰ (با خلوص ۹۹.۷٪ آلومینیوم) را هنگامی که فرآیندهای مرسوم کشش سیم با روش تغییرشکل پلاستیک شدید کشش در کانال‌های همسان زاویه‌ای (ECAD)^۵ ترکیب می‌شوند، مورد بررسی قرار دادند. نشان داده شده است که سیم‌های تولید شده طی فرآیند به کار گرفته شده کشش-ECAD-کشش در این پژوهش، بهبود مشهودی را نسبت به سیم‌هایی که به روش مرسوم کشش سیم تولید می‌شوند، از خود ارائه داده‌اند. به این صورت که با داشتن ساختاری با دانه‌های ریزتر، استحکام مکانیکی این سیم‌ها افزایش داشته و همچنین رسانایی الکتریکی آن‌ها نیز تحت تاثیر قرار نگرفته است.

از دیگر دستاوردهای مهم این پژوهش می‌توان به کاهش اندازه-های دانه‌ها اشاره کرد که انجام فرآیندهای حرارتی را که نیازمند صرف مقدار زیادی زمان و انرژی هستند، بی‌نیاز می‌کند. شیخ و همکاران [۱۱]، در پژوهش خود به توصیف و مدل‌سازی بافت-های کریستالی در یکی از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید به نام تکنیک اکستروژن برش ساده (SSE)^۶ پرداختند. در مدل‌های CPFEM آن‌ها، سه مجموعه پلی‌کریستال به عنوان حجم‌های نماینده در منطقه مرکزی یک نمونه، تحت تغییرشکل قرار می‌گیرند که تاریخچه تغییرشکل‌های حقیقی مشاهده شده در SSE را مدل می‌کنند. مشاهده شده است که مدل‌های CPFEM توسعه داده شده در این پژوهش نه تنها تعاملات پیچیده میان هر کدام از کریستال‌های تشکیل‌دهنده مجموعه کریستالی را ثبت می‌کنند، بلکه شرایط مرزی درونی فرآیند SSE را نیز به تصویر می‌کشند. رضایی و همکاران [۱۲]، در پژوهشی، شبیه-سازی اجزا محدود چند مقیاسی کریستال پلاستیسیته برای مواد پلی‌کریستال را در یک چارچوب محاسباتی سلسله‌مراتبی انجام داده و به تجزیه و تحلیل ساختار در مقیاس ماکرو/میکرو پرداختند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که بافت پس از پیش‌آلودگی آلومینیوم خالص به طور کامل به لغزش نابجایی‌ها نسبت داده می‌شود و توسط کریستال پلاستیسیته قابل پیش‌بینی می‌باشد. همچنین، نشان داده شده است که شبیه‌سازی چندمقیاسی کریستال پلاستیسیته می‌تواند تأثیر کرنش ناهمگن بر بافت تغییرشکل یافته را پیش‌بینی کند. یک پیشرفت مهم برای پیش‌بینی پاسخ مکانیکی مواد ساختاری می‌تواند با استفاده از یک اصلاح دقیق‌تر در ریزساختار ایجاد شده، صورت بگیرد. به این منظور، رسیدن به بالاترین حد ممکن در وضوح فضایی مدل، می‌تواند مفید واقع شود. به منظور استخراج جزئیات پیچیده ریزساختاری، روش‌های طیفی به عنوان یک جایگزین کارآمد برای روش مرسوم اجزا محدود در سالیان گذشته معرفی و قابلیت‌های آن‌ها برای مورد مواد پلی‌کریستالی نشان داده شده است. آیزنلوه و همکاران [۱۳]، در پژوهش خودشان، توسعه فرمولاسیون طیفی موجود برای پلی‌کریستال‌ها را، در شرایط کرنش‌های محدود،

بدون محدودیت به یک قانون ساختاری پلاستیسیته خاص و با در نظر گرفتن اجرای آن برای یک مدل قابل تعمیم برای انواع مواد مختلف، ارائه کردند. آن‌ها در این مقاله، دو رویکرد حل کریستال پلاستیسیته به روش تبدیل فوریه سریع (CPFEM) و CPFEM را در حل مسائل کریستال پلاستیسیته مورد مقایسه قرار دادند. نشان داده شد که روش CPFEM نسبت به روش CPFEM وابستگی بسیار کمتری به تعداد مش داشته و نتایج حاصل از رویکرد CPFEM با سرعت و وضوح بسیار بیشتری از نتایج CPFEM استخراج محاسبه می‌شوند. مکانیزم‌های گوناگونی همچون جریان پلاستیک ناهمسانگرد، شروع آسیب و انتشار ترک، پاسخ کلی مکانیکی مواد سازه‌ای را بیان می‌کنند. بنابراین، درک چگونگی اثر گذاشتن هر یک از این مکانیزم‌ها بر روی یکدیگر، امری ضروری در طراحی آلیاژهای ارتقا یافته می‌باشد. در همین زمینه، دیهل و همکاران [۱۴]، با استفاده از بسته نرم-افزاری داماسک، چگونگی مزدوج کردن رویکرد کریستال پلاستیسیته با روش‌های میدان فازی شکست، برای درک بهتر ارتباط پیچیده میان جهت‌گیری کریستالی و هندسه یک حفره، را مورد بررسی قرار دادند. در یک پژوهش دیگر، هائولا و همکاران [۱۵]، اثر اندازه دانه را بر جریان تنش در چند ماده با ساختار کریستال FCC (مس، آلومینیوم، نقره و نیکل)، با استفاده از همگن‌سازی محاسباتی یک نماینده المان حجمی (RVE)^۸ برای یک ریزساختار، با رویکرد FFT و ترکیب آن با یک مدل کریستال پلاستیسیته بر مبنای گرادیان کرنش، مورد بررسی قرار دادند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که چگونه ترکیب FFT با مدل کریستال پلاستیسیته بر مبنای گرادیان کرنش می‌تواند اثر مرزانه‌ها بر رفتار مکانیکی را، ضمن استفاده از RVE واقع‌گرایانه برای ریزساختار مورد نظر، بررسی کند.

در این مقاله، یک سیم آلومینیومی خالص تجاری تحت بار پیچشی به میزان π رادیان قرار گرفته است. این فرآیند با سرعت دورانی ۵ RPM توسط دستگاه آزمایش پیچش سنتام انجام شده که به جهت افزایش استحکام مکانیکی سیم آلومینیومی با ایجاد تغییرشکل پلاستیک شدید در آن صورت می‌گیرد. تصاویر مربوط

$$\dot{\gamma}^{\alpha} = \dot{\gamma}_0^{\alpha} \left| \frac{\tau^{\alpha}}{\xi^{\alpha}} \right|^n \text{sgn}(\tau^{\alpha}) \quad (1)$$

در این رابطه، $\dot{\gamma}_0^{\alpha}$ نرخ برش مرجع، n ضریب حساسیت نرخ کرنش و τ^{α} بیانگر مولفه تنش برشی می‌باشد. همچنین، ξ^{α} پارامتر مقاومت در برابر لغزش نامیده شده و از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۷]:

$$\xi^{\alpha} = h_0 \sum_{\beta=1}^{N_s} |\dot{\gamma}^{\beta}| \left| 1 - \frac{\xi^{\beta}}{\xi_{\infty}^{\beta}} \right|^a \text{sgn} \left(1 - \frac{\xi^{\beta}}{\xi_{\infty}^{\beta}} \right) h^{\alpha\beta} \quad (2)$$

در این رابطه، N_s کل تعداد سیستم‌های لغزش بوده که برای ساختار کریستالی FCC آلومینیوم این مقدار برابر ۱۲ می‌باشد. همچنین h_0 ، a ، ξ_{∞}^{β} و $h^{\alpha\beta}$ ضرایب مادی هستند. از طرفی h_0 و a از طریق روی هم انداختن نمودارهای تجربی و مدل-سازی عددی بدست می‌آیند. ξ^{β} ضریب کارسختی ماده می‌باشد و $h^{\alpha\beta}$ ماتریس برهم کنش لغزش-لغزش (slip - slip) بین سیستم‌های لغزش α و β است که سخت‌شوندگی کریستال را توصیف می‌کند.

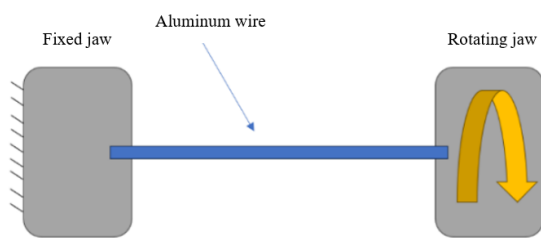
با توجه به آزمون EBSD که روی مقطع عرضی سیم آلومینیومی در مرحله پیش از اعمال بار صورت گرفت، مشخص شد که توزیع بافت سیم آلومینیومی مورد آزمایش در این مقاله به صورت غیرتصادفی و یا جهت‌دار بوده است. بدین صورت که در آن، جهت [۱۰۰] کریستالی آن با جهت X یا همان نورد (RD) نمونه هم‌جهت بوده است. نرم‌افزار داماسک از الگوریتم حل FFT در تحلیل مسائل خود استفاده می‌کند. این قابلیت یک روش محاسباتی موثر برای حل معادلات حاکم بر شبیه‌سازی کریستال پلاستیسیته که توصیف‌گر رفتار مواد در شرایط گوناگون، شامل رفتار الاستیسیته و پلاستیسیته مواد، هستند فراهم می‌کند. حل‌گر FFT عموماً به علت توانایی بالای آن در تحلیل شرایط مرزی متناوب، که در شبیه‌سازی‌های کریستال پلاستیسیته بسیار فراوان هستند، انتخاب می‌شود. طبیعت تکرارشونده شبکه-های کریستالی در اینگونه شبیه‌سازی‌ها نیاز به یک رویکردی که

به بافت تجربی شامل تابع توزیع جهت، شکل قطبی و شکل قطبی معکوس این آزمایش با انجام آزمایش پراکنش الکترون برگشتی (EBSD) [۹] بدست می‌آیند. همچنین شبیه‌سازی‌های عددی جهت پیش‌بینی این رفتار با استفاده از حل‌گر طیفی داماسک انجام می‌شود. هدف از شبیه‌سازی عددی انجام شده در این مقاله با استفاده از حل‌گر طیفی داماسک، به دست آوردن تحولات ریزساختاری از جمله بافت ایجاد شده در نمونه آلومینیومی تحت بارگذاری پیچشی است. در این بررسی، بافت حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام شده برای نمونه آلومینیومی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

در سالیان اخیر روش CPFEM برای حل مسائل کریستال پلاستیسیته، به عنوان یک جایگزین برای روش مرسوم CPFEM معرفی شده است [۱۳]. علاوه بر این، با استفاده از نرم‌افزار داماسک، شرایط انعطاف‌پذیری برای ترکیب کردن چندین قانون ساختاری کریستال پلاستیسیته با طرح‌های همگن‌سازی محاسباتی CPFEM فراهم می‌شود. توان بالای این نرم‌افزار، به خصوص در زمینه شبیه‌سازی با رویکرد حل طیفی، باعث شده است که مسیرهای تحقیقاتی بسیار گسترده و نوآورانه‌ای به روی محققان باز شده باشد تا بتوانند، شبیه‌سازی‌های عددی سنگین‌تر و با وضوح نتایج بیشتری را، در زمینه‌هایی که روش CPFEM در تحلیلشان ضعف داشت، انجام دهند. بنابراین در این مقاله، با استفاده از رویکرد CPFEM، شبیه‌سازی تغییرشکل پیچشی ساده در سیم آلومینیومی سری ۱۰۰۰ (گرید ۱۳۵۰) تحت بارگذاری پیچشی با استفاده از بسته نرم‌افزاری داماسک انجام شده است.

مواد و روش تحقیق

در شبیه‌سازی کریستال پلاستیسیته، مدل سخت‌شوندگی پدیدارشناختی توانی^{۱۰}، در ساده‌ترین شکل خودش برای بررسی سخت‌شوندگی موادی مورد استفاده می‌گیرد که تحت شرایط بارگذاری با کرنش شبه‌استاتیکی و در وضعیت محیطی همدم باشد [۱۶]. برش بر روی هر سیستم لغزش دلخواه α به شکل نرخ آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:



شکل ۲- تصویر شماتیکی از نحوه بسته شدن سیم آلومینیومی به فک دستگاه تست پیچش

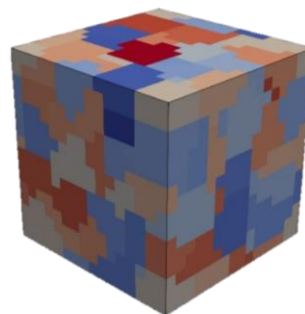
اعمالی بر روی RVE با تعریف نرخ گرادیان تغییر شکل برشی به صورت معادله (۵) صورت گرفته است:

$$\dot{F}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & * & 0 \\ 0 & 0 & * \end{bmatrix} \times 10^{-3} \cdot s^{-1} \quad (5)$$

در شکل ۱، تصویری از هندسه تعریف شده در گام اولیه (پیش از اعمال بار) نمایش داده شده است. برای توصیف تصویری المان‌های طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار داماسک، از نرم‌افزار پاراوو^{۱۲} استفاده می‌شود.

در این پژوهش، یک نمونه سیم آلومینیومی خالص تجاری به قطر ۴ میلی‌متر و طول موثر ۳۰ میلی‌متر به دو سر فک دستگاه آزمایش پیچش ستام بسته می‌شود. این آزمایش پیچش مطابق استاندارد ASTM: A938 - 07 بر روی سطح مقطع عرضی سیم انجام شده است. در شکل ۲، تصویری شماتیکی از نحوه اعمال بار پیچشی بر روی نمونه آزمایش شده، جهت بدست آوردن نتایج تجربی آزمایش پیچش، ارائه شده است.

جهت بدست آوردن رفتار و استخراج خواص مکانیکی سیم آلومینیومی، یک آزمایش کشش نیز بر روی همان سیم انجام شده است که نمودار تنش - کرنش مربوط به آن در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. آزمایش کشش تک‌محوره بر روی نمونه در دمای اتاق با استفاده از دستگاه آزمایش کشش ستام و با نرخ کرنش $10^{-3} s^{-1}$ صورت گرفته است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM: E8/E8M-15a بر روی سطح مقطع عرضی سیم انجام شده است. همچنین، طول موثر نیز با طول اولیه سیم برابر بوده است. جدول



شکل ۱- مکعب نماینده المان حجمی مجازی در گام نخست پیش از اعمال بار

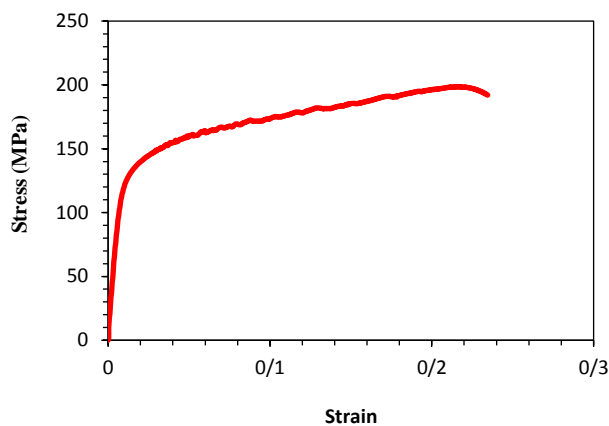
بتواند به طور مناسبی این ذات تناوبی را مدیریت کند ضروری کرده است و به همین جهت رویکرد FFT به یک گزینه ایده‌آل در این زمینه تبدیل شده است. برای شبیه‌سازی با حل گر FFT نرم‌افزار داماسک، ابتدا یک RVE مجازی متناوب با تعداد $10^5 \times 10^5 \times 10^5$ دانه، با وضوح $16 \times 16 \times 16$ و به حجم $10^{-5} \times 10^{-5} \times 10^{-5} m^3$ تشکیل و بافت جهت‌دار نمونه به آن اختصاص داده شده است. شرایط مرزی متناوب در نظر گرفته شده و بارگذاری به نحوی بر روی نماینده المان حجمی اعمال می‌گردد که کشش تک‌محوره در راستای محور X و برش بر روی صفحه XY را ایجاد نماید. شرایط مرزی ترکیبی مربوط به بار کششی ذکر شده به صورت معادله (۳) تعریف شده است:

$$\dot{F}_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & * \end{bmatrix} \times 10^{-3} \cdot s^{-1} \quad (3)$$

همچنین تنش پیولا-کیرشهف متناسب با این بار به صورت معادله (۴) می‌باشد:

$$\bar{P}_{ij} = \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & 0 & * \\ * & * & 0 \end{bmatrix} \text{ Pa} \quad (4)$$

که در معادلات (۳) و (۴)، \dot{F}_{ij} گرادیان تغییر شکل و \bar{P}_{ij} تانسور تنش پیولا-کیرشهف اول هستند و علامت‌های * نشان‌دهنده مولفه‌های تکمیل کننده شرایط بارگذاری می‌باشند. همانند آزمایش کشش تجربی انجام شده در این مقاله، شرایط مرزی مشابهی با اعمال نرخ کرنش کششی $10^{-3} s^{-1}$ به نماینده المان حجمی، برای شبیه‌سازی عددی ایجاد شده است. همچنین، برای شبیه‌سازی آزمایش پیچش نیم‌دور سیم آلومینیومی، شرایط مرزی



شکل ۳- نتایج مربوط به تست کشش تک محوره سیم آلومینیومی

جدول ۱- حدود ترکیبات شیمیایی آلومینیوم خالص [۱۲]

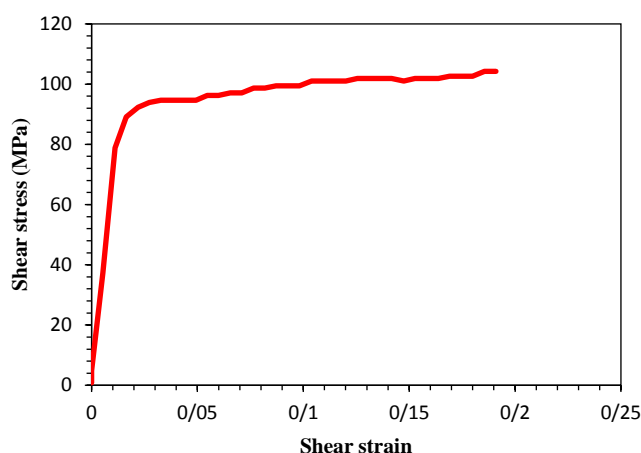
سایر	تیتانیم	رومی	حداکثر	حداکثر منیزیم	حداکثر منگنز	حداکثر مس	حداکثر آهن	حداکثر سیلیسیوم	حداقل آلومینیوم
۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴	۰/۲۵	۹۹.۵

جدول ۲- خواص مکانیکی سیم آلومینیومی خالص تجاری [۱۲]

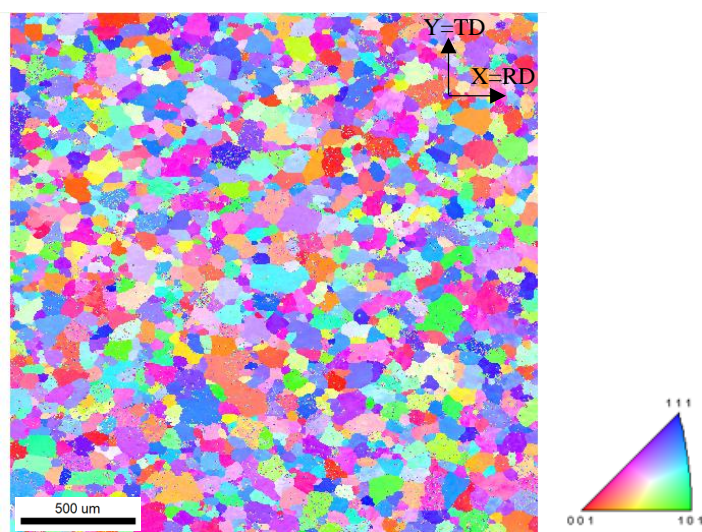
ϵ_f	$(MPa)\sigma_u$	$(MPa)\sigma_y$	E (GPa)	ν
۲۴٪	۱۹۸	۹۷	۶۹	۰/۳۳

تسکان میرا ۱۴۳، با یک تشخیص دهنده معروف به هیکاری^{۱۵} انجام شده است. آنالیز داده‌های بدست آمده با استفاده از بسته نرم‌افزاری او آی ام^{۱۶} صورت گرفته است. فرآیند آماده‌سازی سیم آلومینیومی برای آزمایش EBSD به صورت سمباده‌زنی مقطع عرضی سیم و سپس پولیش‌زنی این مقطع صورت بوده است. اسکن‌ها در یک وضوح تک و در مناطق اسکن از پیش تعریف شده، با استفاده از ولتاژ موثر ۲۸ کیلوولت بر روی نمونه‌ای که با زاویه ۷۰ درجه کج شده است، انجام شدند. اندازه‌گیری‌ها برای نمونه بدون تغییرشکل در یک منطقه بزرگ و برای نمونه تغییرشکل یافته در یک منطقه کوچک صورت گرفتند. در اسکن بزرگ، منطقه انتخاب شده ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ میکرومتر با اندازه گام ۲ میکرومتر و در اسکن کوچک، این منطقه ۳۰۰ در ۶۰۰ میکرومتر با اندازه گام ۱ میکرومتر بوده است. پس از انجام

۱ و ۲، به ترتیب نشان دهنده ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی پایه استخراج شده از آزمایش تنش تک محوره می‌باشند [۱۲]. همچنین نمودار تنش - کرنش مربوط به آزمایش پیچش سیم آلومینیومی نیز در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در انتهای فرآیند اعمال بار در این آزمایش، سیم آلومینیومی پس از طی کردن نیم دور دوران (معادل π رادیان)، دچار تغییرشکل پلاستیک می‌شود. برای سیم آلومینیومی استفاده شده در این آزمایش، تصاویر مربوط به تابع توزیع جهت، شکل قطبی و شکل قطبی معکوس در حالت اولیه سیم و بعد از اعمال بار پیچشی به دست آمده‌اند. برای این منظور از آزمایش‌های EBSD بر روی سیم آلومینیومی مورد بررسی در این تحقیق استفاده شده است. جمع‌آوری داده‌های این آزمایش با استفاده از روش میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)^{۱۳} مجهز به میکروسکوپ



شکل ۴- نتایج مربوط به آزمایش پیچش سیم آلومینیومی



شکل ۵- تصویر بدست آمده از آزمون EBSD پیش از تغییر شکل پیچشی در سیم

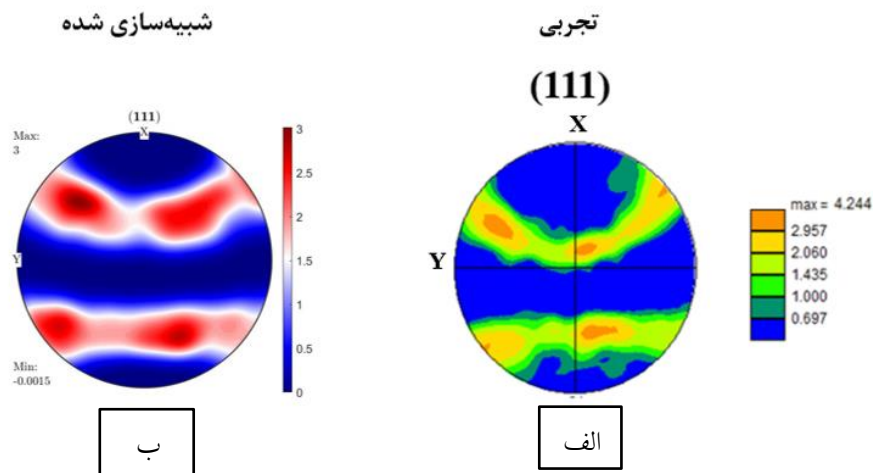
دانه‌ها $55 \mu m$ محاسبه شده است. سپس شکل قطبی حاصل از این آزمون برای صفحه کریستالی (۱۱۱)، مطابق شکل ۶-الف بدست آمده است. همچنین در شکل ۶-ب، شکل قطبی محاسبه شده از حل عددی نیز، برای فاصله $1/5$ میلی‌متری از مرکز سیم، ارائه شده است. در هر دو شکل مشاهده می‌شود که جهت $[100]$ کریستالی با جهت RD نمونه هم‌جهت می‌باشد.

ویژگی‌های مادی مرتبط با رفتار الاستیک و پلاستیک از طریق آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از روش سعی و خطا به دست آمده‌اند. این ویژگی‌ها سپس به ماده مورد بررسی

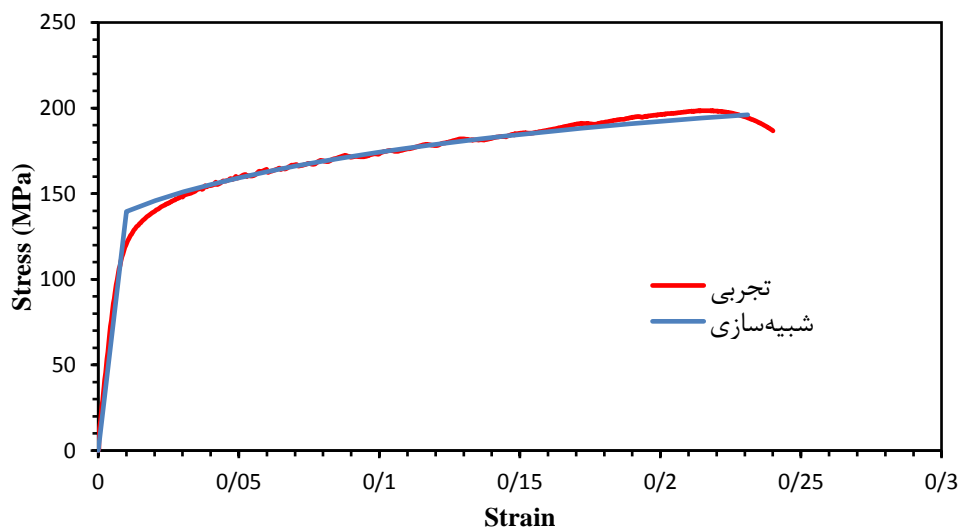
آزمایش EBSD، الگوهای ثبت شده از بازگشت الکترون‌ها ذخیره شده و سپس توسط نرم‌افزار OIM اطلاعات ریزساختاری، از جمله شکل قطبی (PF)^{۱۷}، شکل قطبی معکوس (IPF)^{۱۸} و تابع توزیع جهت (ODF)^{۱۹} استخراج شده‌اند.

نتایج و بحث

شکل ۵، شکل استخراج شده از آزمون EBSD متعلق به نمونه قبل از تغییر شکل اندازه‌گیری در یک مستطیل محاط شده از مرکز تا نزدیک سطح خارجی است. از این آزمون، میانگین قطر



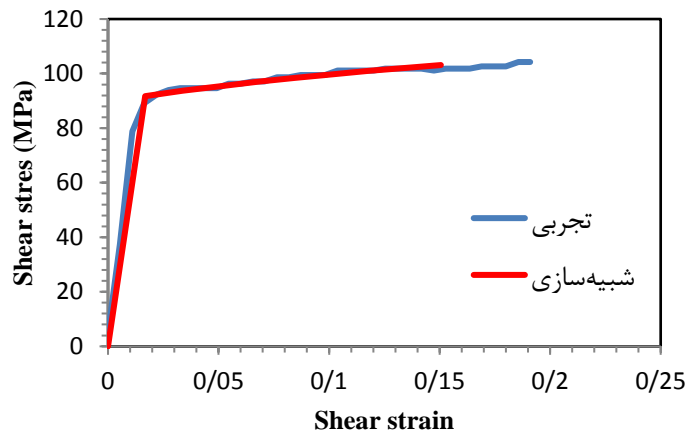
شکل ۶- شکل قطبی (۱۱۱) بدست آمده از الف) نمونه تجربی و ب) حل عددی، برای وضعیت اولیه نمونه



شکل ۷- مقایسه نتایج تجربی و مدل سازی بار کششی، برای به دست آوردن خواص مادی نمونه.

جدول ۳، نشان دهنده مقادیر ثوابت الاستیک ماده است که از تنظیم نمودارهای آزمایش کشش تجربی و حل عددی بر روی هم بدست آمده است. همچنین جدول ۴ و جدول ۵، نشان دهنده مقادیر مدل ساختاری سخت شونده گی Phenopowerlaw ماده آلومینیومی استفاده شده در این مقاله می باشند. بر خلاف روش های شبیه سازی اجزا محدود، برای حل گر طیفی داماسک به صورت مستقیم امکان اعمال بار پیچشی بر روی نماینده المان حجمی داماسک وجود ندارد. از طرفی، پیشش نوع خاصی از بارهای برشی است. بنابراین، میزان کرنش برشی

اختصاص داده شده اند. در شکل ۷ و ۸، مقایسه میان نمودار خواص مادی تجربی و خواص مادی استفاده شده برای شبیه سازی نمایش داده شده است. بنابراین، با توجه به نزدیکی قابل توجه نمودارهای شبیه سازی و تجربی، می توان خواص مادی استفاده شده در شبیه سازی عددی با حل گر طیفی نرم افزار داماسک را گزارش نمود. تطابق بالای این نتایج بیان گر امکان استفاده از ابزارهای شبیه سازی کریستال پلاستیسیته برای درک رفتار ماده در مقیاس میکرو و تعمیم آن تا مقیاس های ماکرو می باشد.



شکل ۸- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی بار برشی برای π رادیان دوران، جهت بدست آوردن خواص مادی نمونه

جدول ۳- خواص الاستیک

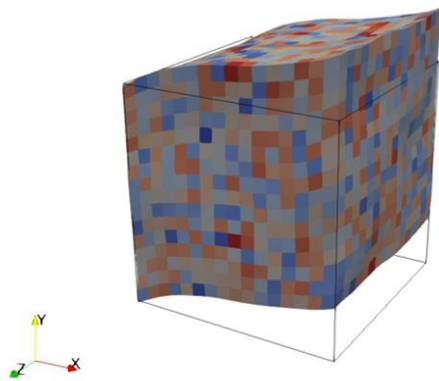
مقدار	واحد	ثوابت الاستیک
۱۰۶/۸	GPa	C ₁₁
۶۰/۴۱	GPa	C ₁₂
۲۸/۳۴	GPa	C ₄₄

جدول ۴- ضرایب پلاستیسیته مدل ساختاری Phenopowerlaw برای شبیه‌سازی بار کششی

مقدار	واحد	تعریف	متغیر
۰/۰۰۱	s ⁻¹	نرخ برش مرجع	$\dot{\gamma}_0$
۶۰	MPa	مقاومت لغزشی	τ_0
۱۱۰	MPa	تنش اشباع	τ_{sat}
۶۰۰	MPa	ضریب سخت‌شوندگی	h_0
۲/۲۵	-	ضریب سخت‌شوندگی	a
۲۰	-	ضریب حساسیت نرخ کرنش	n

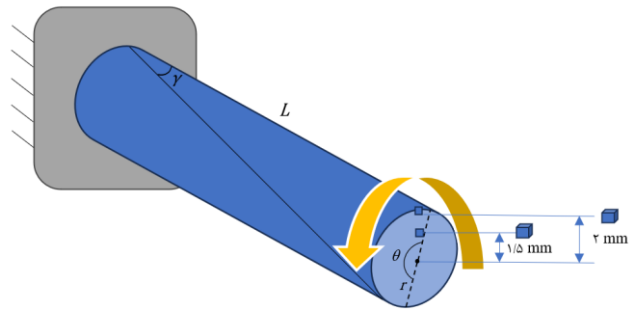
جدول ۵- ضرایب پلاستیسیته مدل ساختاری Phenopowerlaw بدست آمده برای مدل‌سازی بار پیچشی

مقدار	واحد	تعریف	متغیر
۰/۰۰۱	s ⁻¹	نرخ برش مرجع	$\dot{\gamma}_0$
۲۴	MPa	مقاومت لغزشی	τ_0
۷۵	MPa	تنش اشباع	τ_{sat}
۲۰	MPa	ضریب سخت‌شوندگی	h_0
۲/۲۵	-	ضریب سخت‌شوندگی	a
۲۰	-	ضریب حساسیت نرخ کرنش	n



شکل ۱۰- نماینده المان حجمی بعد از تغییر شکل حاصل از بار
برشی ساده در صفحه XY

دارد. به همین علت، فاصله ۱/۵ میلی متری ذکر شده انتخاب گردید تا بتوان هر دو نیاز فوق را برآورده نمود. با استفاده از رابطه (۲)، کرنش برشی در این فاصله از مرکز مقطع دایروی سیم برابر با $\gamma = 0.157$ می باشد. تصویر مربوط نماینده المان حجمی، پس از این مقدار کرنش در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. اطلاعات مربوط به جهت گیری کریستالی دانه های نماینده المان حجمی از ابتدا تا انتهای فرآیند شبیه سازی با داماسک به صورت اعداد چهاروجهی در یک فایل متنی آماده می شوند. برای تفسیر جهت گیری های کریستالی و تحولات بافت در نتایج شبیه سازی با داماسک این فایل های متنی را می توان در افزونه MTEX نرم افزار MATLAB بارگذاری کرد. با استفاده از کدهای موجود در این افزونه، این اعداد به PF، ODF، و IPF تبدیل می شوند تا بتوان با ارائه یک توصیف تصویری از جهت گیری ها، در مورد جهت گیری کریستالی دانه های نماینده المان حجمی در ابتدا و انتهای فرآیند شبیه سازی اظهار نظر کرده و تغییرات اتفاق افتاده را ملاحظه کرد. در انتهای فرآیند اعمال بار پیچشی آزمایش تجربی و بار برشی شبیه سازی، برای ناحیه ای در فاصله ۱/۵ میلی متری از مرکز سیم آلومینیومی، شکل قطبی نمونه تجربی به صورت شکل ۱۱-الف و شکل قطبی حل عددی به صورت شکل ۱۱-ب مشاهده شده است. همچنین، در شکل ۱۱-ج، جزءهای 2° ایده آل در پلی کریستال های FCC که تحت تغییر شکل برشی ساده قرار گرفته اند نشان داده شده است [۱۹].



شکل ۹- شماتیک بارگذاری بر روی سیم آلومینیومی

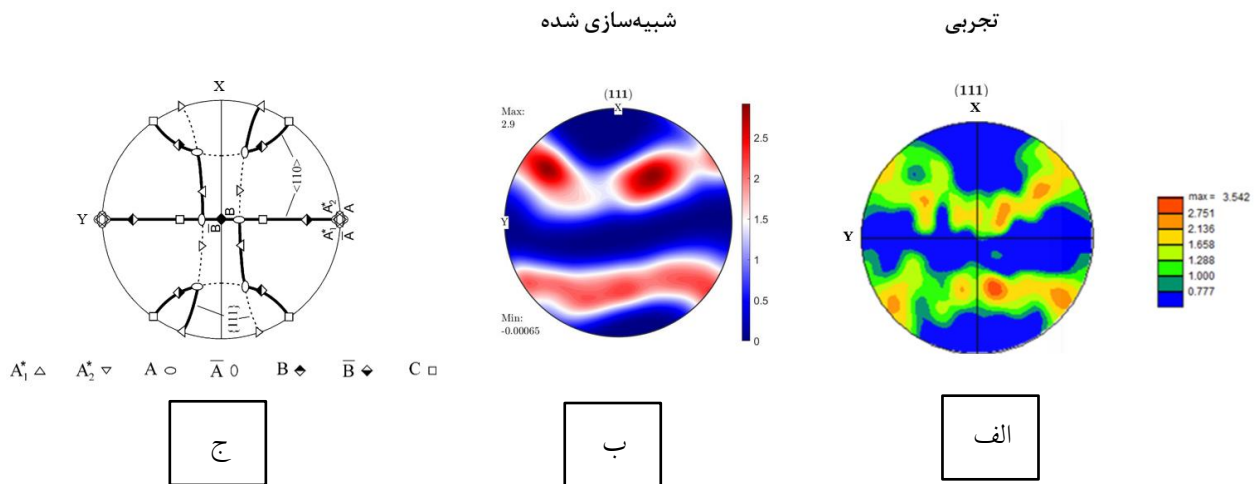
حاصل از تغییر شکل پیچشی بر روی یک مقطع دایروی را می توان از طریق رابطه (۶) محاسبه کرد [۴].

$$\gamma = \frac{2\pi RN}{L} \quad (6)$$

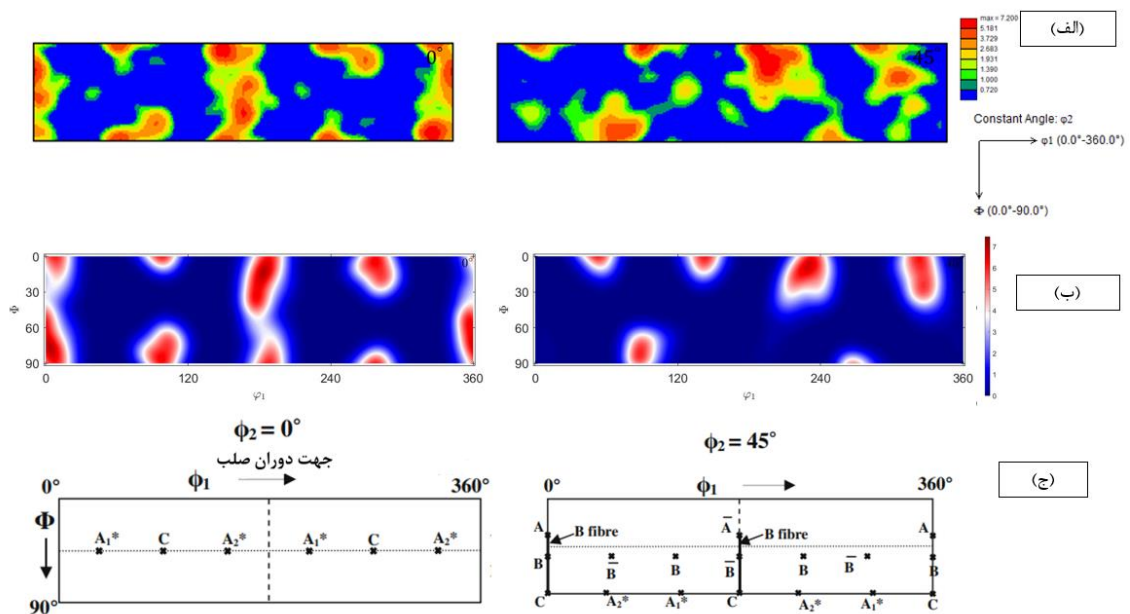
در این رابطه R نشان دهنده فاصله از مرکز سیم، N تعداد دوران اعمال شده و طول سیم تغییر شکل یافته است. همچنین، کرنش برشی پلاستیک حاصل را نیز می توان از طریق رابطه (۷) محاسبه کرد [۴]:

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

بنابراین، با توجه به شکل شماتیک بارگذاری صورت گرفته که در شکل ۹ نمایش داده شده است، حداکثر کرنش برشی اتفاق افتاده بر روی سیم آلومینیومی به طول $L = 30 \text{ mm}$ و شعاع $r = 2 \text{ mm}$ پس از نیم دور تغییر شکل پیچشی برابر است با 0.209 . $\gamma_{max} =$ در این پژوهش، مکعب المان نماینده مورد بررسی در فاصله ۱/۵ میلی متری از مرکز سیم انتخاب شده است. علت انتخاب این ناحیه از سیم به دلیل ترک هایی بوده است که در اثر اعمال بار پیچشی بر روی سطح خارجی سیم اتفاق می افتادند و با وجود این ترک ها، آزمون EBSD نمی توانست نتایج مناسبی را در سطح خارجی سیم ارائه کند. از طرف دیگر، هدف این مقاله بررسی تغییرات ریزساختاری دورترین ناحیه از مرکز سیم بوده است. زیرا توزیع بار پیچشی از مرکز تا سطح نمونه به صورت غیریکنواخت است و در نواحی نزدیک به لبه بیشترین مقدار را



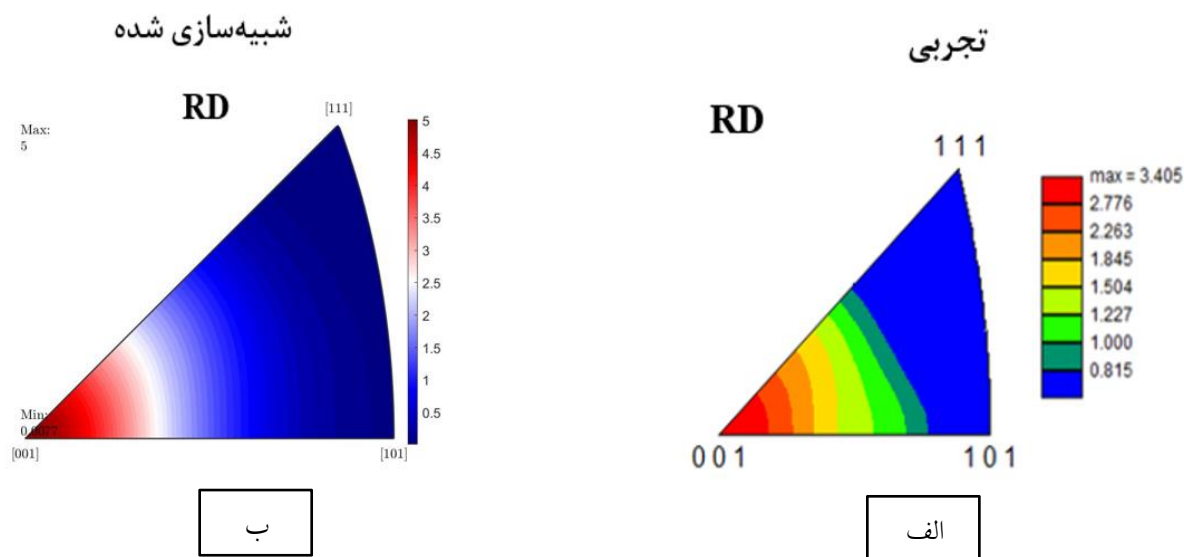
شکل ۱۱- الف) شکل قطبی نمونه در صفحه کریستالی (۱۱۱)، پس از نیم دور تغییر شکل پیچشی، ب) شکل قطبی شبیه‌سازی شده پس از اعمال کرنش برشی معادل ۱۵۷٪ و ج) شکل قطبی صفحه (۱۱۱) نمایش دهنده جزءهای ایده‌آل مرتبط با تغییر شکل برشی ساده در مواد با ساختار کریستالی FCC [۱۹]



شکل ۱۲- تابع توزیع جهت در $\phi_2 = 0^\circ$ و $\phi_2 = 45^\circ$ الف) اندازه‌گیری شده از آزمایش EBSD پس از اعمال نیم دور تغییر شکل پیچشی به سیم آلومینیومی، ب) مدل‌سازی عددی پس از اعمال کرنش برشی معادل ۱۵۷٪ و ج) موقعیت جزءهای ایده‌آل برای تغییر شکل برشی ساده در مواد با ساختار کریستالی FCC [۱۸]

پس از اعمال نیم دور تغییر شکل پیچشی به سیم آلومینیومی، به همراه ODF بدست آمده از شبیه‌سازی عددی، در فاصله‌ای به اندازه ۱/۵ میلی‌متر از مرکز سیم، به ترتیب در شکل ۱۲-الف و

با توجه به شکل ۱۱-الف و شکل ۱۱-ب، نتایج تجربی و حل عددی شکل قطبی، جزءهای A ، A_1^* ، A_2^* ، B و \bar{B} را نشان داده‌اند. همچنین، نتایج ODF به دست آمده از آزمایش EBSD



شکل ۱۳- نمایش توزیع جهات کریستالی توسط شکل قطبی معکوس سیم آلومینیومی در جهت RD نمونه: الف) اندازه‌گیری شده از آزمایش EBSD پس از نیم دور تغییر شکل پیچشی و ب) حل عددی پس از اعمال کرنش برشی معادل ۱۵۷°

پیچش خالص بر روی سیم آلومینیومی خالص تجاری، با استفاده از رویکرد حل عددی CPFPT پرداخته است. شبیه‌سازی عددی انجام شده با استفاده از حل گر طیفی (تبدیل فوریه سریع) بسته نرم‌افزاری داماسک صورت گرفته است. بدین ترتیب، نتایج زیر بدست آمده‌اند:

- از آزمایش EBSD روی نمونه آلومینیومی در مرحله پیش از اعمال بار، مشخص شد که جهت‌گیری الیاف [۱۰۰] موازی با محور X نمونه بوده است. این جهت‌گیری به صورت یک بافت جهت‌دار به RVE ساخته شده با ۱۰۰ دانه اعمال شده است.
- به منظور استخراج ضرایب الاستیسیته و مدل سخت-شوندگی Phenopowerlaw سیم آلومینیومی، شبیه‌سازی-های آزمایش کشش تک‌محوره و برش بر روی نماینده المان حجمی با استفاده از حل گر طیفی داماسک، جهت کالیبره کردن این ضرایب، انجام شد.
- شکل قطبی به دست آمده در شبیه‌سازی و نتایج تجربی حضور جزء A ، \bar{A} ، A_1^* ، A_2^* و B را نشان دادند اما تشکیل جزء مشهودی در نتایج تابع توزیع جهت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی ملاحظه نمی‌شود.

شکل ۱۲-ب ارائه شده‌اند. ضمناً، برای بررسی جزءهای ایده‌آل ایجاد شده در تابع توزیع جهت، برای تغییر شکل برشی ساده، در زوایای $\varphi_2 = 0^\circ$ و $\varphi_2 = 45^\circ$ ، از شکل ۱۲-ج استفاده می‌شود [۱۸]. اما از مقایسه نتایج تابع توزیع جهت به دست آمده در نتایج تجربی و حل عددی با جزءهای ایده‌آل، تشکیل جزء محسوسی در هیچ یک از نتایج مشاهده نمی‌شود.

شکل قطبی معکوس به دست آمده از آزمایش EBSD پس از اعمال نیم دور تغییر شکل پیچشی به سیم آلومینیومی، به همراه شکل قطبی معکوس بدست آمده توسط شبیه‌سازی عددی، در فاصله‌ای به اندازه ۱/۵ میلی‌متر از مرکز سیم، به ترتیب در شکل ۱۳-الف و شکل ۱۳-ب نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل ۱۳، که جهت‌گیری‌های کریستالی را توسط شکل قطبی معکوس در راستای نورد (RD) نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که هم نتایج تجربی و هم نتایج شبیه‌سازی شدت بیشتر حضور جهت کریستالی [۰۰۱] را پس از اعمال تغییر شکل برشی نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی شبیه‌سازی کریستال پلاستیسیته در فرآیند

قدردانی

این تحقیق حمایت خاصی از موسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

- در بررسی شکل قطبی معکوس، تراکم حضور بیشتر جهت کریستالی [001]، در راستای ثابت نورد (RD) نمونه نسبت به سایر جهتها، هم در نتایج تجربی و هم در نتایج مدل‌سازی مشاهده شد.

واژه‌نامه

- 1- ultrafine grained
- 2- crystal plasticity finite element method
- 3- fast fourier transformation
- 4- Düsseldorf Advanced Material Simulation Kit
- 5- equal channel angular drawing
- 6- simple shear extrusion
- 7- crystal plasticity fast fourier transformation
- 8- representantive volume element
- 9- electron backscattered diffraction
- 10- phenomenological power law
- 11- rolling direction
- 12- Paraview
- 13- Scanning Electron Microscope
- 14- Tescan Mira3
- 15- Hikari
- 16- OIM
- 17- pole figure
- 18- inverse pole figure
- 19- orientation distribution function
- 20- component

مراجع

1. Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, J. F., and Kaintzyk, U., *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*, vol. 759, Springer, 2003.
2. Pourbashiri, M., Poletti, M. C., Sedighi, M., and Sommitsch, C., "Strengthening Mechanisms of Al Wires Processed by Equal Channel Angular Torsion Drawing", *Materials Science and Technology*, Vol. ?, No. ?, pp. ?, 2019.
3. Valiev, R. Z., "Developing SPD Methods For Processing Bulk Nanostructured Materials with Enhanced Properties", *Metals and Materials International*, Vol. 7, No. 5, pp. 413–420, 2001.
4. Sedighi, M., Vaezi, A., and Pourbashiri, M., "Influence of Different Torsion Pitch on Microstructural Evolution and Strengthening Mechanism of Al Wires", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. ?, No. ?, pp. ?, 2018.
5. ابراهیمی، محمود و صفرزاده، امین و غلیپور، سعید، ۱۳۹۵، فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید برای تولید سیم های فوق ریزدانه و نانو ساختار، سومین کنفرانس نوآوری های اخیر در مهندسی صنایع و مهندسی مکانیک، تهران، <https://civilica.com/doc/594568>
6. Roters, F. *et al.*, "DAMASK–The Düsseldorf Advanced Material Simulation Kit for Modeling Multi-Physics Crystal Plasticity, Thermal, and Damage Phenomena from The Single Crystal Up to The Component Scale", *Computational Materials Science*, Vol. 158, pp. 420–478, 2019.
7. Khamsuk S., Park N., Gao, S., Terada, D., Adachi, H., and Tsuji, N., "Mechanical Properties of Bulk Ultrafine Grained Aluminum Fabricated by Torsion Deformation at Various Temperatures and Strain Rates", *Materials Transactions*, Vol. 55, No. 1, pp. 106–113, 2014.
8. Wang, C., Li, F., Li, J., Dong, J., and Xue, F., "Microstructure Evolution, Hardening and Thermal Behavior of Commercially Pure Copper Subjected to Torsion Deformation", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 598, pp. 7–14, 2014.
9. Li, J., Li, F., Zahid Hussain, M., Wang, C., and Wang, L., "Micro-structural Evolution Subjected to Combined Tension–Torsion Deformation for Pure Copper", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 610, pp. 181–187, 2014.
10. Caruso, S., and Ambrogio, G., "Novel Drawing System Approach to Manufacture Performant Commercially Pure Aluminium Fine Wires", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 118, No. 3–4, pp. 1101–1109, 2022.
11. Sheikh, H., Ebrahimi, R., and Bagherpour, E., "Crystal plasticity Finite Element Modeling of Crystallographic Textures in Simple Shear Extrusion (SSE) Process", *Materials & Design*, Vol. 109, pp. 289–299, 2016.
12. Rezaei, M. J., Sedighi, M., and Pourbashiri, M., "Developing a New Method to Represent the Low and High Angle Grain Boundaries by Using Multi-Scale Modeling of Crystal Plasticity", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 939, p. 168844, 2023.

13. Eisenlohr, P., Diehl, M., Lebensohn, R. A., and Roters, F., "A spectral Method Solution to Crystal Elasto-Viscoplasticity at Finite Strains", *International Journal of Plasticity*, Vol. 46, pp. 37–53, 2013.
14. Diehl, M., Wicke, M., Shanthraj, P., Roters, F., Brueckner-Foit, A., and Raabe, D., "Coupled Crystal Plasticity–Phase Field Fracture Simulation Study on Damage Evolution Around a Void: Pore Shape Versus Crystallographic Orientation", *JOM*, Vol. 69, No. 5, pp. 872–878, 2017.
15. Haouala, S., Lucarini, S., Lorca, J. L., and Segurado, J., "Simulation of the Hall-Petch Effect in FCC Polycrystals by Means of Strain Gradient Crystal Plasticity and FFT Homogenization", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 134, p. 103755, 2020.
16. Khan, A. S., Liu, J., Yoon, J. W., and Nambori, R., "Strain Rate Effect of High Purity Aluminum Single Crystals: Experiments and Simulations", *International Journal of Plasticity*, Vol. 67, pp. 39–52, 2015.
17. Fu, W., Li, Y., Hu, S., Sushko, P., and Mathaudhu, S., "Effect of loading Path on Grain Misorientation and Geometrically Necessary Dislocation Density in Polycrystalline Aluminum Under Reciprocating Shear", *Computational Materials Science*, Vol. 205, p. 111221, 2022.
18. Beyerlein, I. J., and Tóth, L. S., "Texture evolution in Equal-Channel Angular Extrusion", *Progress in Materials Science*, Vol. 54, No. 4, pp. 427–510, 2009.
19. Li, S., Beyerlein, I. J., and Bourke, M. A. M., "Texture Formation During Equal Channel Angular Extrusion of Fcc and Bcc Materials: Comparison with Simple Shear", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 394, No. 1, pp. 66–77, 2005.