

Investigation of the Effect of Texture on the Deformation Behavior of Additively Manufactured 316L Stainless Steel Using the Crystal Plasticity Finite Element Method

Sina Jabarzadeh ^{a*}, Ahmad Ghasemi-Ghalebahman ^a, Amir Najibi ^a

^a Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, 35131-19111, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Jabarzadeh S, Ghasemi-Ghalebahman A, Najibi A. Investigation of the Effect of Texture on the Deformation Behavior of Additively Manufactured 316L Stainless Steel Using the Crystal Plasticity Finite Element Method. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(3):387-403.

 <https://10.61186/masm.4.3.387>

KEYWORDS

Additive manufacturing,
Crystal plasticity finite element
method,
316L stainless steel,
EBSD analysis.

ABSTRACT

In this study, the effect of texture and morphology on the mechanical behavior of 316L stainless steel samples fabricated by selective laser melting was investigated using the crystal plasticity finite element method. To this end, four representative volume elements with varying grain aspect ratios were reconstructed based on the EBSD data obtained from the samples. The crystal plasticity constitutive relations were implemented into the ABAQUS software through a UMAT subroutine, and the representative volume elements were simulated under tensile loading. The results show that isotropic morphology leads to higher tensile strength on a macroscopic scale. Moreover, as the grain aspect ratio increases and the grains become more elongated, the tensile strength of the samples gradually decreases. Additionally, the stress distribution becomes more non-uniform with increasing grain elongation, and regions with stress concentration along the loading direction and at the boundaries of elongated grains increase. This study highlights the critical role of grain morphology in determining the mechanical behavior of polycrystalline materials. Furthermore, the proposed crystal plasticity finite element modeling approach provides an effective tool for accurately predicting the performance of materials manufactured through additive manufacturing methods, facilitating the exploration and development of new alloys and advanced materials.

Extended Abstract

1. Introduction

Selective Laser Melting (SLM) is an additive manufacturing method where metal powder is melted layer by layer to form the final geometry. This method offers several advantages, including the ability to produce complex geometries, high dimensional accuracy, excellent surface quality, high density, and desirable mechanical properties, making it suitable for applications in industries like medical, automotive, and aerospace [1-3]. Stainless steels, particularly L316, are popular materials in SLM due to their high corrosion resistance and extensive industrial applications [4,5]. However, SLM typically results in anisotropic and unidirectional microstructures with columnar grains aligned along the build direction, caused by rapid solidification along the steepest thermal gradient [6,7]. Since mechanical behavior strongly depends on grain size, shape, and texture, understanding microstructure and crystallographic texture evolution during additive manufacturing is crucial [8].

Various multiscale modeling techniques, including the crystal plasticity finite element method (CPFEM), have been employed to analyze how microstructural parameters influence material behavior. CPFEM has been used to study the effects of grain morphology, melt pool size, voids, and crystallographic texture on mechanical properties [9-12]. For example, studies by Ahmadi et al. [11] and Taheri et al. [12] investigated the mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by SLM, demonstrating that CPFEM can accurately predict the effects of defects,

* Corresponding author. Tel.: +989127273144

E-mail address: ghasemi@semnan.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.3.387>

Received: November 02, 2024; Received in revised form: December 04, 2024; Accepted: December 18, 2024.

© Author



grain morphology, and crystallographic orientation on mechanical performance. Other studies, such as those by Cao et al. [13], revealed that grain refinement improves fatigue resistance, while ductility plays a more significant role than grain size in determining fatigue limits. Additionally, Demir et al. [14] and Wang et al. [15] emphasized the critical role of crystallographic texture and residual stresses in determining mechanical properties in additively manufactured components.

This study extends previous work by examining the effect of crystallographic texture on the mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by SLM. Samples were analyzed using EBSD, and representative volume elements (RVEs) with varying grain aspect ratios were generated. These RVEs were implemented in ABAQUS using a UMAT subroutine incorporating CPFEM equations, and tensile loading simulations were performed. The findings provide insights into the relationship between texture and mechanical performance and highlight the potential of CPFEM as a tool for optimizing additive manufacturing processes.

2. Materials and methods

Samples were fabricated using the NOURA M120 SLM system equipped with a continuous fiber laser operating at 300 W power and a maximum build speed of 20 cm³/h. The system's layer thickness ranged from 20 to 80 μm, with a laser focus diameter of approximately 80 μm and a maximum scanning speed of 7 m/s. Commercial gas-atomized 316L stainless steel powder with particle sizes below 65 μm was used for manufacturing, with the chemical composition provided in Table 1. After fabrication, the samples were stress-relieved at 850°C for 2 hours. Subsequently, they were separated from the build platform using wire cutting, sandblasted, and prepared for the next steps.

One sample was allocated for tensile testing, while a smaller cylindrical sample was used for EBSD analysis (Figure 1(a)). Tensile specimens were machined in accordance with ASTM E8/E8M standards [16] and tested using a SANTAM-STM400 universal testing machine in displacement control mode at a constant rate of 1 mm/min (Figure 1(b)). EBSD analysis samples were prepared through mechanical and electro-polishing. The results of the EBSD analysis (Figure 2) showed that the grains exhibited a random orientation distribution, as confirmed by the pole figures (Figure 2(b)).

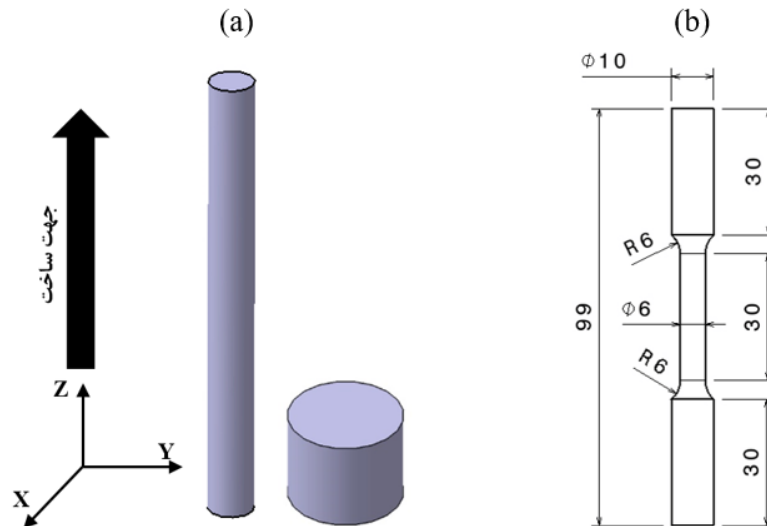


Figure 1. (a) Samples fabricated using the Selective Laser Melting method, (b) Dimensions of the standard tensile test specimen after machining.

Table 1. The chemical composition of 316L stainless steel powder [18].

Component	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	C	P
Indicative value (%)	Balance	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	0–2.0	0–1.0	0–0.03	0–0.03	0–0.045

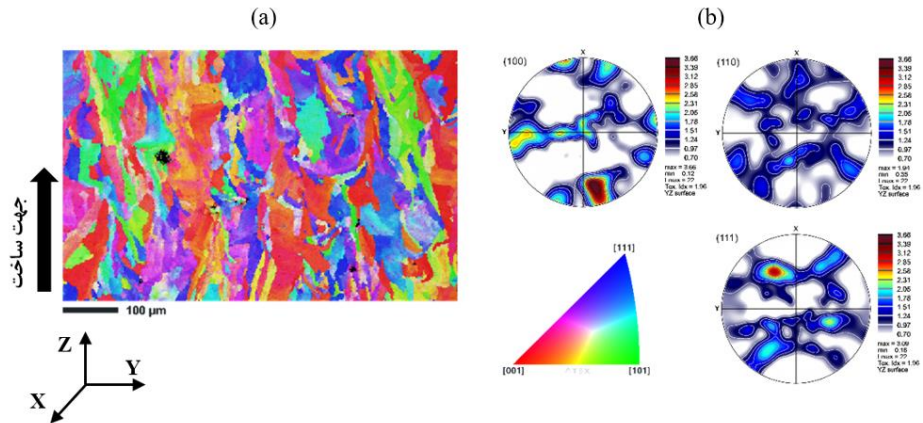


Figure 2. (a) EBSD scan of the sample, (b) Pole figures obtained from the EBSD analysis.

3. Crystal Plasticity Finite Element modeling

The first step in modeling using the CPFEM is the reconstruction of the microstructure and creation of representative volume elements (RVEs). These RVEs differ visually from the actual microstructure of the material but contain all relevant microstructural information. In this study, crystallographic and morphological parameters obtained from EBSD analysis were used to reconstruct the microstructure. Parameters such as crystal structure, grain aspect ratios, grain size distribution, and grain orientation distribution were input into Dream3D software [17]. Four different RVEs, each with 300 grains, were created for this study, with aspect ratios (1,1,1), (1,0.5,0.5), (1,0.25,0.25), and (1,0.1,0.1) assigned to RVEs 1 to 4, respectively (Figure. 3). The average grain size, based on EBSD data, was considered to be 16 μm , and the dimensions of all RVEs were set to $70 \times 70 \times 70 \mu\text{m}$. After creating the RVEs, a MATLAB code was used to convert them into a format that ABAQUS software could process. The outputs from Dream3D were processed by the MATLAB code, which determined the node coordinates for each voxel in the RVEs. Each voxel was then converted into a linear C3D8 element. The processed files were then imported into ABAQUS. To implement the crystal plasticity model and perform finite element simulations, all equations were incorporated into ABAQUS using a UMAT subroutine, which was developed based on an initial version written by Huang [24]. Boundary conditions were applied to the RVEs. A 10% displacement was applied to the upper surface of the RVEs. After performing the crystal plasticity finite element simulations, the results were homogenized using the volume averaging method [25], so that the grain-scale (micro) results could be used at the macro scale and compared with experimental results. A Python code was developed to automate the homogenization process.

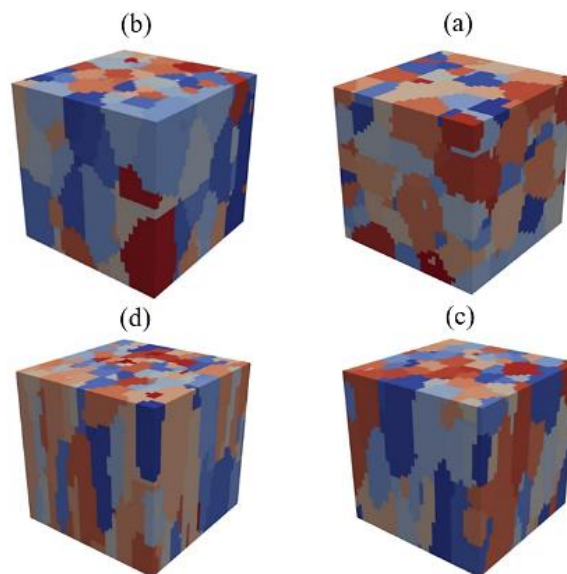


Figure 3. (a) RVE_1 with grain aspect ratio of (1,1,1), (b) RVE_2 with grain aspect ratio of (1,0.5,0.5), (c) RVE_3 with grain aspect ratio of (1,0.25,0.25), (d) RVE_4 with grain aspect ratio of (1,0.1,0.1).

4. Results and discussion

To investigate the effect of texture on the mechanical behavior of 316L stainless steel samples fabricated by selective laser melting, four representative volume elements (RVEs) with aspect ratios of (1,1,1), (1,0.5,0.5), (1,0.25,0.25), and (1,0.1,0.1) were simulated under tensile loading using CPFEM. As shown in Figure 6, the stress-strain curves from the simulations for all four RVEs exhibit similar trends. The RVE_1 with aspect ratio (1,1,1) has the highest stress, indicating that isotropic morphology leads to higher mechanical resistance at the macro scale. In contrast, as the aspect ratio of the grains changes (RVEs 2 to 4), the actual stress decreases gradually for the same strain levels. At the highest strain, RVE_4 (aspect ratio of (1,0.1,0.1) shows a 2% reduction in stress compared to RVE_1. For RVEs 2 and 3, the reductions are 1.43% and 1.75%, respectively. Figure 7 presents the stress distribution of the RVEs under tensile loading. The stress distribution in RVE_1 is more uniform than in the other RVEs, with fewer areas of stress concentration. As the aspect ratio of the grains changes (RVEs 2 to 4), the stress distribution becomes more non-uniform, with an increase in stress concentration areas along the loading direction and at elongated grain boundaries. This behavior highlights the role of changing grain aspect ratios and their elongation in promoting localized deformations and explains the lower stress levels in these RVEs, as seen in Figure 6. Overall, the results demonstrate that as the aspect ratio increases and grains elongate, the stress distribution in the RVEs becomes more non-uniform, leading to lower stress at the macro scale. This underscores the significant role of grain morphology in determining the mechanical behavior of polycrystalline materials. These findings emphasize the importance of microstructural features in CPFEM simulations for accurate prediction of material performance under mechanical loading.

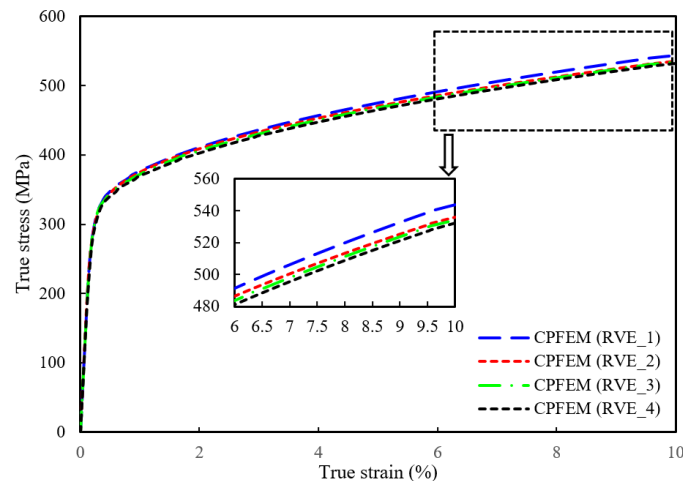


Figure 6. Results of CPFEM simulation on four RVEs with different aspect ratios.

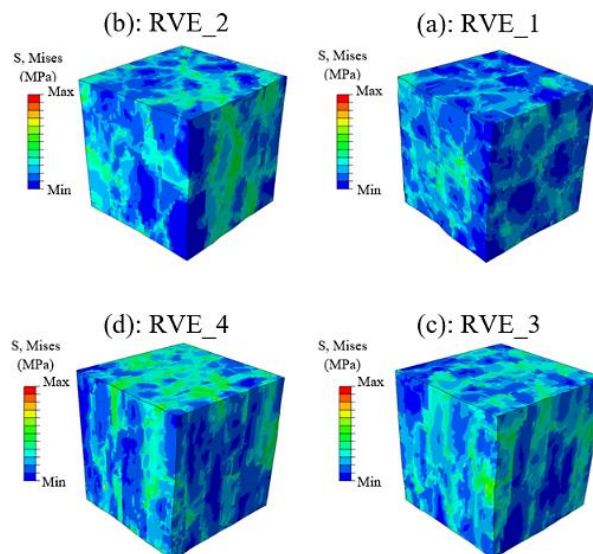


Figure 7. Results of stress analysis obtained from CPFEM simulations for RVEs with different aspect ratios of grains.



بررسی تاثیر بافت بر رفتار تغییر شکل فولاد ضدزنگ ۳۱۶L ساخته شده به روش ساخت افزایشی با استفاده از روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته

سینا جبارزاده الف، احمد قاسمی قلعه بهمن ب*، امیر نجیبی ج

الف دانشجوی دکتر، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، s.jabarzadeh.k@semnan.ac.ir

ب دانشیار، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، ghasemi@semnan.ac.ir

ج استادیار، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، a.najibi@semnan.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
ساخت افزایشی، روش اجزاء محدود، کریستال پلاستیسیته، فولاد ضدزنگ ۳۱۶L، آنالیز EBSD	در این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته به بررسی تأثیر بافت و مورفولوژی بر رفتار مکانیکی نمونه‌های فولاد ضدزنگ ۳۱۶L ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر پرداخته شده است. برای این منظور، با استفاده از اطلاعات حاصل از آنالیز EBSD نمونه‌ها، چهار المان حجمی نماینده با نسبت‌های ابعادی مختلف دانه‌ها بازسازی گردیدند. روابط ساختاری کریستال پلاستیسیته با استفاده از یک زیر برنامه UMAT در نرم‌افزار آباکوس اعمال و المان‌های حجمی نماینده تحت بار کششی شبیه‌سازی شدند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که همسانگرد بودن مورفولوژی منجر به مقاومت کششی بالاتر در مقیاس ماکرو می‌شود. همچنین با افزایش نسبت ابعادی دانه‌ها و کشیده‌تر شدن آن‌ها، مقاومت نمونه‌ها تحت بار کششی به تدریج کاهش می‌یابد. توزیع تنش نیز با کشیده‌تر شدن دانه‌ها غیریکنواخت‌تر شده و نواحی دارای تمرکز تنش در راستای بارگذاری و مرز دانه‌های کشیده شده افزایش می‌یابد. این پژوهش نشان می‌دهد که مورفولوژی دانه نقش مهمی در تعیین رفتار مکانیکی مواد پلی کریستال ایفا می‌کند. همچنین روش مدل‌سازی پیشنهادی بر پایه چارچوب اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته، ابزاری مناسب برای پیش‌بینی دقیق عملکرد مواد ساخته شده به روش تولید افزایشی بوده و امکان مطالعه و توسعه آلیاژهای جدید و مواد پیشرفته را فراهم می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸	

۱- مقدمه

روش ذوب لیزری گزینشی یکی از تکنیک‌های تولید قطعات به روش ساخت افزایشی است که در آن پودر فلز به صورت لایه‌لایه ذوب می‌شود و هندسه نهایی تولید می‌گردد. از مزایای برجسته این روش ساخت می‌توان به امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده، دقت ابعادی بالا، کیفیت سطح عالی، چگالی بالا و خواص مکانیکی مطلوب اشاره کرد. همچنین کاهش زمان تولید و امکان سفارشی‌سازی قطعات، باعث جذاب بودن این روش ساخت برای بسیاری از کاربردها در صنایع مختلف از جمله صنایع پزشکی، خودروسازی و هوافضا شده است [۱-۳]. فولادهای ضدزنگ با توجه به مقاومت بالا در محیط‌های خوردنده، قابلیت پردازش بالا و همچنین کاربردهای فراوانی که در صنایع مختلف دارند، یکی از اولین و محبوب‌ترین مواد فلزی هستند که در تولید قطعات به روش ساخت افزایشی مورد استفاده قرار گرفتند. فولاد ضدزنگ ۳۱۶L یکی از مهم‌ترین انواع این گروه از فولادها

می‌باشد [۵، ۴]. ریزساختار قطعات ساخته شده به روش ذوب لیزری گزینشی، معمولاً به شکل ناهمسانگرد و تک جهتی می‌باشد که در آن دانه‌ها به شکل ستونی و کشیده شده در جهت ساخت قرار گرفته‌اند. علت این امر انجماد سریع دانه‌ها در جهت ساخت می‌باشد که بیشترین گرادیان دمایی را دارد [۷، ۶]. با توجه به اینکه رفتار مکانیکی محصول نهایی به شدت به اندازه دانه، شکل و بافت بستگی دارد، از این رو درک ریزساختار و تکامل بافت کریستالوگرافی در طول فرآیند ساخت افزایشی بسیار مهم می‌باشد [۸]. انواع مختلف تکنیک‌های مدل‌سازی چندمقیاسی ماده وجود دارند که با استفاده از آن‌ها می‌توان تأثیر پارامترهای ریزساختاری و کریستالوگرافی بر رفتار ماده را بررسی و پیش‌بینی کرد که در این میان روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته یکی از بهترین روش‌ها می‌باشد [۹، ۱۰]. یکی از کاربردهای مهم روش کریستال پلاستیسیته اجزاء محدود در نمونه‌های ساخته شده به روش ساخت افزایشی، پیش‌بینی تأثیر خواص ریزساختاری مانند اندازه حوضچه مذاب و وجود حفره بر خواص مکانیکی نمونه می‌باشد؛ از این رو احمدی و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای به بررسی این موضوع در نمونه‌های فولادی از جنس ۳۱۶L که به روش ذوب انتخابی با لیزر ساخته شده بودند، پرداختند. برای این منظور ابتدا نمونه‌هایی با پارامترهای ساخت مختلف از جمله توان لیزر، سرعت اسکن و جهت اسکن را آماده نمودند و سپس تحت آزمون کشش قرار دادند؛ سپس با استفاده از روش کریستال پلاستیسیته اجزاء محدود، ریزساختارهای بازسازی شده را تحلیل نمودند و مشاهده کردند که نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی سازگاری خوبی دارند. طاهری و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای به مدل‌سازی میکرومکانیکی نمونه‌های فلزی ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر پرداختند. آن‌ها مدلی بر پایه روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته برای تخمین تأثیر عیوب ناشی از ساخت بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها توسعه دادند و همچنین نقش جهت‌گیری کریستالوگرافی دانه‌ها و جهت بارگذاری مکانیکی را نیز با استفاده از مدل فوق بررسی نمودند و بیان کردند که با توجه به انطباق خوب بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی مدل توسعه داده شده از دقت خوبی برای تخمین تأثیر پارامترهای ذکر شده بر رفتار نمونه‌های فلزی ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر برخوردار است. کائو و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای به بررسی خواص خستگی در نمونه‌های فولاد ۳۱۶L ساخته شده به دو روش ذوب گزینشی با لیزر و نورد شده پرداختند. آن‌ها برای مدل‌سازی در این پژوهش از شبیه‌سازی اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته در دو حالت مختلف بر روی ریزساختارهای بازسازی شده استفاده کردند. در شبیه‌سازی اول مقدار داکتیلیته^۱ ثابت نگه داشته شد و اندازه دانه‌ها تغییر داده شد و در شبیه‌سازی دوم اندازه دانه‌ها ثابت نگه داشته شد و داکتیلیته تغییر کرد. نتایج شبیه‌سازی اول نشان داد که ریزدانه کردن نمونه باعث افزایش حد خستگی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی دوم نیز نشان داد که کاهش داکتیلیته باعث افزایش حد خستگی می‌شود. در این مقاله نشان داده شد که داکتیلیته نسبت به ریز دانه بودن نقش مهم‌تری در حد خستگی ایفا می‌کند و از طرفی با توجه به اینکه نمونه‌های ۳۱۶L نورد شده، داکتیلیته بالاتری از خود نشان می‌دهند پس در نتیجه این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر از حد خستگی پایین‌تری برخوردار می‌باشند. دمیر و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای به تخمین خواص مکانیکی در قطعات ساخته شده به روش جوشکاری پرتو الکترونی پرداختند. در این مدل پیشنهادی، ابعاد دانه به روش منحصربه‌فردی از طریق برآزش بیضی‌ها به هر دانه تعیین گردید و از این رو تأثیر مورفولوژی دانه و اندازه دانه بر فاصله لغزش در مدل نشان داده شد. آن‌ها بیان کردند بافت کریستالوگرافی مهم‌ترین عامل برای مدل‌سازی دقیق پاسخ مکانیکی ریزساختار مواد تولید شده به روش جوشکاری پرتو الکترونی می‌باشد و باید در مدل گنجانده شود. ونگ و همکاران [۱۵] نیز در مطالعه‌ای به بررسی عدم تقارن کشش- فشار ناهمسانگرد در نمونه‌های فولادی از جنس فولاد ۳۱۶L زنگ‌نزن ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر پرداختند. در این مقاله از مدل کریستال پلاستیسیته المان محدود برای درک تأثیر تنش‌های پسماند در مقیاس میکرو و دانه‌های ستونی بر تکامل تغییر شکل پلاستیک استفاده شد. با بررسی مطالعات پیشین مشخص گردید که مطالعات در زمینه‌ی بررسی تأثیر بافت بر رفتار مکانیکی نمونه‌های ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر با استفاده از روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته محدود می‌باشد؛ از این رو در این مطالعه ابتدا نمونه‌هایی از جنس فولاد ۳۱۶L زنگ‌نزن برای انجام آزمون کشش و همچنین بررسی ریزساختاری با استفاده از تصاویر EBSD ساخت گردیدند. در مرحله بعد از اطلاعات ریزساختاری به دست آمده برای تولید المان‌های حجمی نماینده با نسبت‌هایی ابعادی مختلف برای دانه‌ها استفاده گردید. در مرحله بعد المان‌های حجمی نماینده وارد نرم‌افزار آباکوس^۲

¹ ductility

² Abaqus

شدند و با استفاده از یک سابروتین^۳ UMAT که در برگزیده معادلات ساختاری کریستال پلاستیسته بود، تحت بارگذاری کششی شبیه‌سازی گردیدند و اثر بافت کریستالوگرافی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها بررسی گردید.

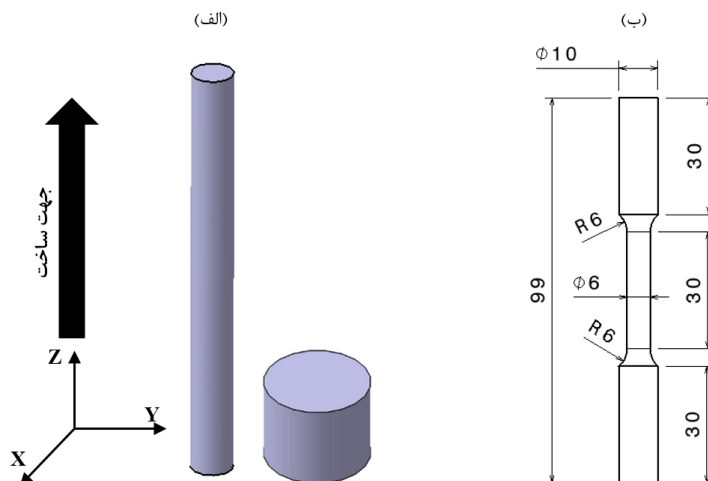
۲- مواد و روش‌ها

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه NOURA M120 SLM system مجهز به فیبر لیزری پیوسته، با توان ۳۰۰W و ماکزیمم سرعت ساخت $20 \text{ cm}^3/h$ تولید گردیدند. ضخامت لایه‌های تولیدی با این سیستم بین ۲۰ الی ۸۰ میکرومتر، قطر فوکوس تقریباً ۸۰ میکرومتر و بیشینه مقدار سرعت اسکن معادل ۷ متر بر ثانیه می‌باشد. پودر اتمیزه شده گازی فولاد ۳۱۶L تجاری با اندازه ذرات کمتر از ۶۵ میکرومتر برای ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی پودر در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. نمونه‌ها بعد از ساخت به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد تنش‌گیری گردیدند. بعد از اتمام عملیات تنش‌گیری، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات^۴ از میز ساخت جدا شده، سند بلاست^۵ گردیده و برای مراحل بعدی آماده شدند. یکی از نمونه‌های موجود در شکل ۱ (الف) برای آزمون کشش و دیگری (نمونه استوانه‌ای کوچکتر) برای آنالیز EBSD مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله بعد نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E8/E8M [۱۶] ماشین‌کاری گردیده و برای آزمون کشش آماده شدند (شکل ۱ (ب)). آزمون با استفاده از دستگاه تست کشش یونیورسال SANTAM-STM400 در حالت جابجایی کنترل و با نرخ ثابت 1 mm/min انجام گردید. برای انجام آنالیز EBSD نمونه با استفاده از پولیش مکانیکی و الکتروپولیش، آماده‌سازی گردید. نتایج آنالیز EBSD نمونه در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. تصاویر قطبی حاصل از آنالیز EBSD نشان می‌دهند که دانه‌ها دارای توزیع تصادفی می‌باشند (شکل ۲ (ب)).

۳- مدل‌سازی به روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسته

۳-۱- بازسازی ریزساختار

اولین قدم در مدل‌سازی به روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسته، بازسازی ریزساختار و ایجاد المان‌های حجمی نماینده می‌باشد. المان حجمی نماینده از نظر ظاهری با ریزساختار اصلی ماده تفاوت دارد ولی تمامی اطلاعات ریزساختاری آن را در بر می‌گیرد. در این مطالعه از پارامترهای کریستالوگرافی و مورفولوژیکی به‌دست‌آمده از آنالیز EBSD نمونه‌ها برای بازسازی ریزساختار استفاده گردید.



شکل ۱ (الف) نمونه‌های ساخته شده به روش ذوب لیزری گزینشی، (ب) ابعاد نمونه استاندارد آزمون کشش بعد از ماشین‌کاری.

³ subroutine

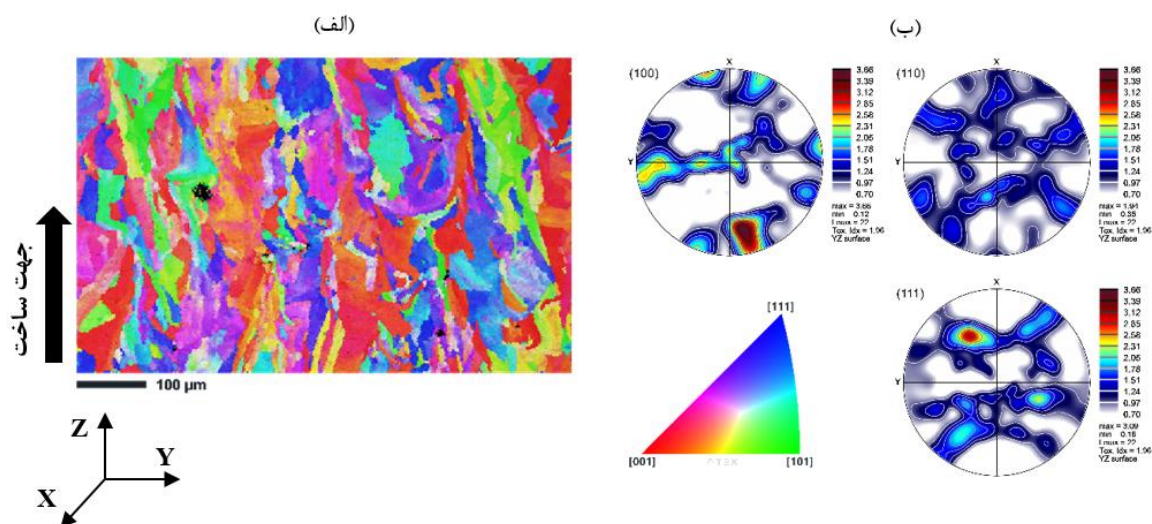
⁴ wire cut

⁵ sandblast

برای این منظور اطلاعاتی همچون ساختار کریستالی، نسبت ابعادی دانه‌ها، توزیع ابعادی دانه‌ها و تابع توزیع جهت‌گیری دانه‌ها وارد نرم‌افزار Dream3D [۱۷۷] گردید. با توجه به هدف مطالعه حاضر چهار المان حجمی نماینده مختلف که دارای ۳۰۰ عدد دانه بودند، تولید شدند (شکل ۳). برای این منظور نسبت‌های ابعادی (۱،۰/۵،۰/۵)، (۱،۰/۲۵،۰/۲۵) و (۱،۰/۱،۰/۱) به ترتیب برای المان‌های حجمی ۱ تا ۴ در نظر گرفته شدند. با توجه به اطلاعات استخراج شده از تصاویر EBSD میانگین سایز دانه معادل ۱۶ میکرومتر در نظر گرفته شد. ابعاد تمامی المان‌های حجمی نماینده نیز معادل $70 \times 70 \times 70$ میکرومتر می‌باشند.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی پودر فولاد ضدزنگ ۳۱۶L [۱۸].

Component	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	C	P
Indicative value (%)	Balance	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	0–2.0	0–1.0	0–0.03	0–0.03	0–0.045



شکل ۲ (الف) اسکن EBSD نمونه، (ب) تصاویر قطبی حاصل از آنالیز EBSD.

۳-۲- مدل کریستال پلاستیسیته

۳-۲-۱- سینماتیک تغییر شکل کریستالی

بر اساس سینماتیک تغییر شکل محدود، گرادیان تغییر شکل (F) متشکل از یک قسمت پلاستیک (F^p) و یک قسمت الاستیک (F^e) می‌باشد که رابطه آن‌ها مطابق معادله ۱ می‌باشد [۱۹-۲۱]:

$$F = F^e F^p, \det(F^p) = 1 \quad (1)$$

در این رابطه (F^p) ناشی از لغزش صفحات کریستالوگرافی بوده و (F^e) مربوط به اعوجاج الاستیک شبکه کریستالی می‌باشد.

گرادیان سرعت کل مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید [۲۱]:

$$L = \dot{F}F^{-1} \quad (2)$$

از طرف دیگر گرادیان سرعت را می‌توان به صورت مجموع تانسور انبساط متقارن (D) و تانسور چرخش نامتقارن (Ω) نشان داد [۲۱]:

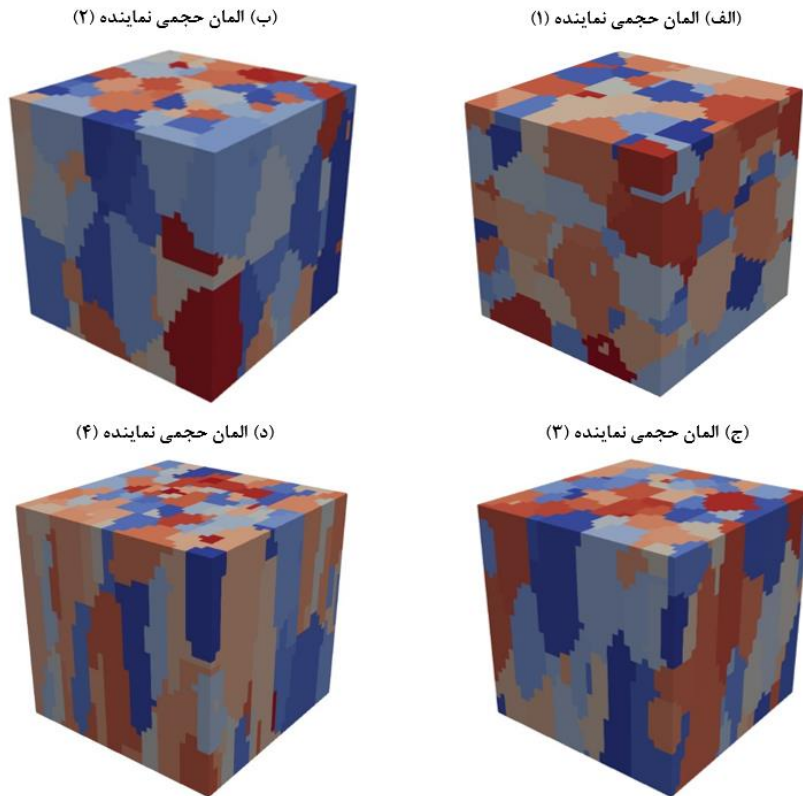
$$L = D + \Omega \quad (3)$$

مطابق رابطه ۴ هرکدام از تانسورهای فوق را می‌توان به دو بخش الاستیک و پلاستیک تجزیه نمود [۲۱]:

$$D = D^e + D^p, \Omega = \Omega^e + \Omega^p \quad (4)$$

گرادیان سرعت الاستیک در حالت تغییر شکل یافته نیز از رابطه ۵ به دست می‌آید [۲۱]:

$$L^e = D^e + \Omega^e = \dot{F}^e F^{e-1} \quad (5)$$



شکل ۳ الف) المان حجمی نماینده (۱) با نسبت ابعادی (۱،۱،۱)، ب) المان حجمی نماینده (۲) با نسبت ابعادی (۱،۰/۵،۰/۵)، ج) المان حجمی نماینده (۳) با نسبت ابعادی (۱،۰/۲۵،۰/۲۵)، د) المان حجمی نماینده (۴) با نسبت ابعادی (۱،۰/۱،۰/۱).

همچنین گرادیان سرعت لغزش پلاستیک را نیز می‌توان مطابق رابطه ۶ بیان نمود [۲۱]:

$$L^p = D^p + \Omega^p = \sum_{\alpha} \dot{\gamma}^{\alpha} s^{\alpha} \otimes n^{\alpha} \quad (6)$$

در این رابطه $\dot{\gamma}^{\alpha}$ نرخ کرنش مربوط به سامانه لغزش α می‌باشد و s^{α} و n^{α} به ترتیب نشانگر بردار جهت لغزش و بردار نرمال صفحه لغزش سامانه لغزش α می‌باشند.

۳-۲-۲- معادلات ساختاری

در بخش قبل سینماتیک تغییر شکل کریستالی مورد بحث و بررسی قرار گرفت که ویژگی‌های هندسی ناهمسانگردی را در مکانیک کریستالی، بدون توجه به اثرات تنش‌ها، توصیف می‌کند. در این بخش نیز معادلات ساختاری کریستال پلاستیسیته که میزان لغزش را نسبت به تنش و شرایط ریزساختاری ماده تعیین می‌کنند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در این مطالعه از یک قانون توانی ویسکوپلاستیک [۲۲] برای توصیف نرخ لغزش ($\dot{\gamma}^{\alpha}$) به عنوان تابعی از تنش برشی تجزیه شده (τ^{α}) استفاده شده است:

$$\dot{\gamma}^{\alpha} = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^{\alpha}}{g^{\alpha}} \right|^m \text{sign}(\tau^{\alpha}) \quad (7)$$

در این رابطه $\dot{\gamma}_0$ ، g^{α} و m به ترتیب نشان‌دهنده نرخ لغزش اولیه، مقاومت ماده نسبت به لغزش و حساسیت نرخ کرنش می‌باشند. تغییرات مقاومت ماده در برابر لغزش نسبت به زمان (g^{α}) از رابطه ۸ به دست می‌آید [۱۹]:

$$\dot{g}^{\alpha} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{\beta}| \quad (8)$$

در این رابطه $h_{\alpha\beta}$ مدول سخت‌شوندگی ناشی از خودسخت‌شوندگی و سخت‌شوندگی مکمل می‌باشد و β نیز نشان‌دهنده تعداد سامانه‌های لغزش فعال است. ارتباط بین مدول سخت‌شوندگی مکمل ($h_{\alpha\beta}$) و مدول خودسخت‌شوندگی ($h_{\alpha\alpha}$) از رابطه ۹ به دست می‌آید [۱۹]:

$$h_{\alpha\beta} = qh_{\alpha\alpha} \quad (9)$$

در این معادله q یک ثابت ماده می‌باشد که برهمکنش‌های میکرومکانیکی بین سیستم‌های لغزش مختلف را بیان می‌کند.

مدول خودسخت‌شوندگی با استفاده از مدل پیشنهادی پییرس و همکاران [۲۳] مطابق رابطه ۱۰ توصیف می‌شود:

$$h_{\alpha\alpha} = h_0 \operatorname{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| \quad (10)$$

در این رابطه h_0 مدول سخت‌شوندگی اولیه بوده و τ_s مقدار اشباع تنش جریان در سیستم لغزش α را نشان می‌دهد. همچنین γ کرنش برشی تجمعی تیلور در تمام سیستم‌های لغزشی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_s} \int_0^t |\dot{\gamma}^\alpha| dt \quad (11)$$

در این رابطه N_s نشانگر تعداد سیستم‌های لغزش فعال شده می‌باشد.

۳-۳- شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته

بعد از ایجاد المان‌های حجمی نماینده، از یک کد متلب^۶ برای تبدیل آن‌ها به یک ورودی قابل پردازش توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. برای این منظور خروجی‌های نرم‌افزار Dream3D [۱۷] توسط کد متلب پردازش شده و برای هر یک از المان‌های حجمی نماینده مختصات گره‌ها در هر یک از وکسل‌ها^۷ مشخص گردید و هر یک از وکسل‌ها به‌عنوان یک المان خطی از نوع C3D8 تبدیل گردید. در مرحله بعد فایل‌های پردازش شده وارد نرم‌افزار آباکوس شدند. برای پیاده‌سازی مدل کریستال پلاستیسیته و انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود، تمام معادلات بخش قبل با استفاده از یک زیر برنامه UMAT که بر پایه نسخه اولیه نوشته شده توسط هوانگ [۲۴] توسعه داده شده بود، وارد نرم‌افزار آباکوس شدند. در شبیه‌سازی مواد پلی کریستال با استفاده از روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته، انتخاب شرایط مرزی مناسب، یکی از مراحل مهم می‌باشد؛ چراکه انتخاب شرایط مرزی نامناسب می‌تواند منجر به تغییر در برهم‌کنش دانه‌ها شود و باعث پیش‌بینی نادرست رفتار واقعی ماده گردد. با توجه به اهمیت این موضوع شرایط مرزی مطابق شکل ۴ بر المان‌های حجمی نماینده اعمال گردید. بر سطح بالایی المان حجمی نماینده، جابجایی به میزان ۱۰٪ اندازه اولیه آن اعمال گردید. بعد از انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته، نتایج با استفاده از روش میانگین‌سازی حجمی [۲۵]، همگن‌سازی شدند تا نتایج تحلیل در مقیاس دانه (میکرو) قابل استفاده در مقیاس ماکرو و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی شوند. در این مطالعه یک کد پایتون^۸ توسعه داده شد تا فرآیند همگن‌سازی نتایج به صورت اتوماتیک انجام شود.

۴- نتایج

۴-۱- کالیبراسیون

در این بخش از نتایج آزمون تجربی کشش برای کالیبره کردن پارامترهای مدل کریستال پلاستیسیته استفاده گردید. برای انجام این فرآیند ابتدا پارامترها مطابق مطالعات پیشین [۱۵]، مقداردهی شدند. در گام بعدی نتایج تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی استخراج گردیده و با نتایج آزمون کشش تجربی نمونه مقایسه گردید. برای انطباق این دو منحنی، پارامترهای اولیه اصلاح شدند و فرآیند سعی و خطا برای رسیدن به حالت مطلوب ادامه یافت. جدول ۲ مقادیر نهایی کالیبره شده برای پارامترهای مدل کریستال پلاستیسیته را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی بعد از کالیبراسیون

^۶ Matlab

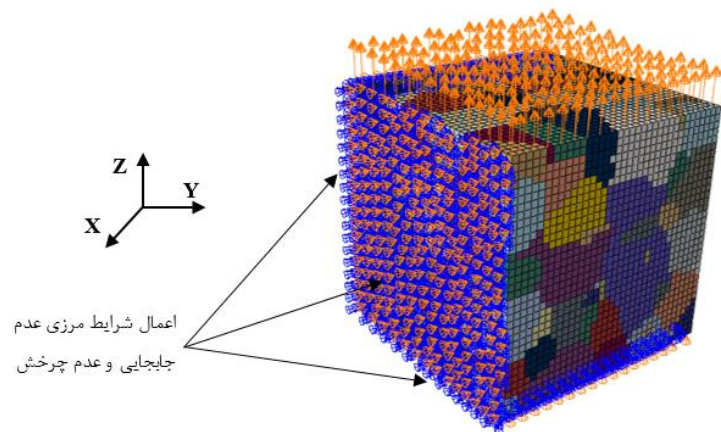
^۷ voxel

^۸ Python

پارامترهای مدل کریستال پلاستیسیته، مطابقت خوبی با نتایج آزمون تجربی کشش نشان می‌دهند. بیشترین اختلاف بین نتایج تخمین زده شده توسط شبیه‌سازی و نتایج تجربی در کرنش‌های کمتر از ۲٪ مشاهده می‌گردد که می‌تواند ناشی از این باشد که المان حجمی نماینده در شبیه‌سازی بدون نقص در نظر گرفته شده است و این در حالی است که ماده در شرایط واقعی دارای نقص‌های در مقیاس ریزساختار است که می‌تواند بر رفتار اولیه الاستیک آن تأثیر بگذارد. وجود عیوب ریزساختاری مانند تخلخل یا حفره‌ها با توجه به تأثیر مستقیم آن‌ها بر عواملی همچون تمرکز تنش، مقاومت ماده و تغییر شکل و شکست آن، تأثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی ماده دارند.

۴-۲- بررسی تأثیر بافت

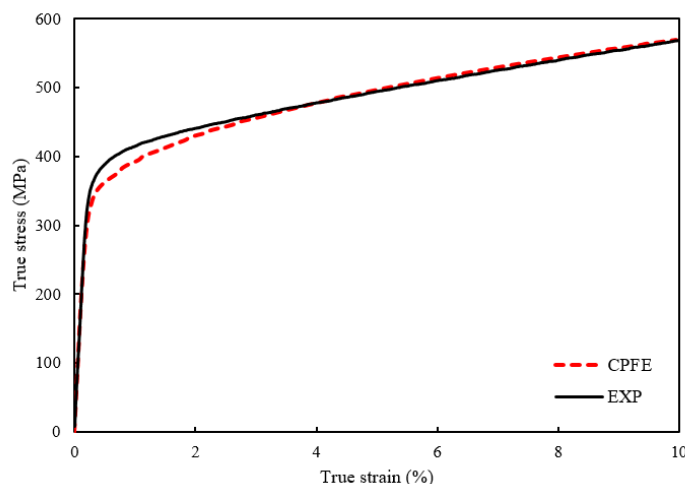
در این بخش برای بررسی تأثیر بافت بر رفتار مکانیکی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر، چهار المان حجمی نماینده با نسبت‌های ابعادی (۱،۱،۱)، (۱،۰/۵،۰/۵)، (۱،۰/۲۵،۰/۲۵) و (۱،۰/۱،۰/۱) همان‌طور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، با استفاده از روش اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته تحت بار کششی شبیه‌سازی شدند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی برای هر چهار المان حجمی نماینده تقریباً روند مشابهی را نشان می‌دهند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با نتایج مطالعات پیشین [۱۴] دارند که این امر نشان‌دهنده اعتبار و صحت مدل توسعه داده شده می‌باشد. المان حجمی نماینده ۱ (RVE_1) با نسبت ابعادی (۱،۱،۱) بیشترین تنش را نسبت به سایر المان‌های حجمی نماینده دارا می‌باشد و نشان می‌دهد که مورفولوژی همسانگرد منجر به مقاومت مکانیکی بالاتری در مقیاس ماکرو می‌شود.



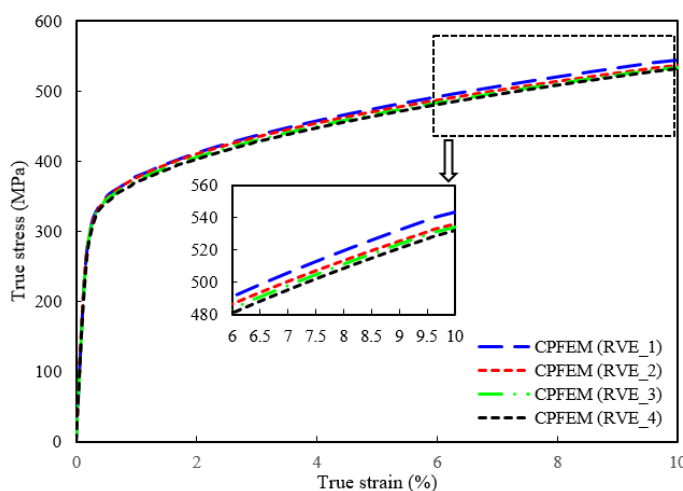
شکل ۴ شرایط مرزی اعمال شده بر المان حجمی نماینده.

جدول ۲ پارامترهای کالیبره شده مدل کریستال پلاستیسیته.

C_{11} (MPa)	$204/6 \times 10^3$
C_{12} (MPa)	$137/7 \times 10^3$
C_{44} (MPa)	$126/6 \times 10^3$
h_0 (MPa)	۹۰
τ_0 (MPa)	۱۰۰
τ_s (MPa)	۹۰
$\dot{\gamma}_0$ (1/s)	۰/۰۰۱
m (-)	۸/۸
q (-)	۱



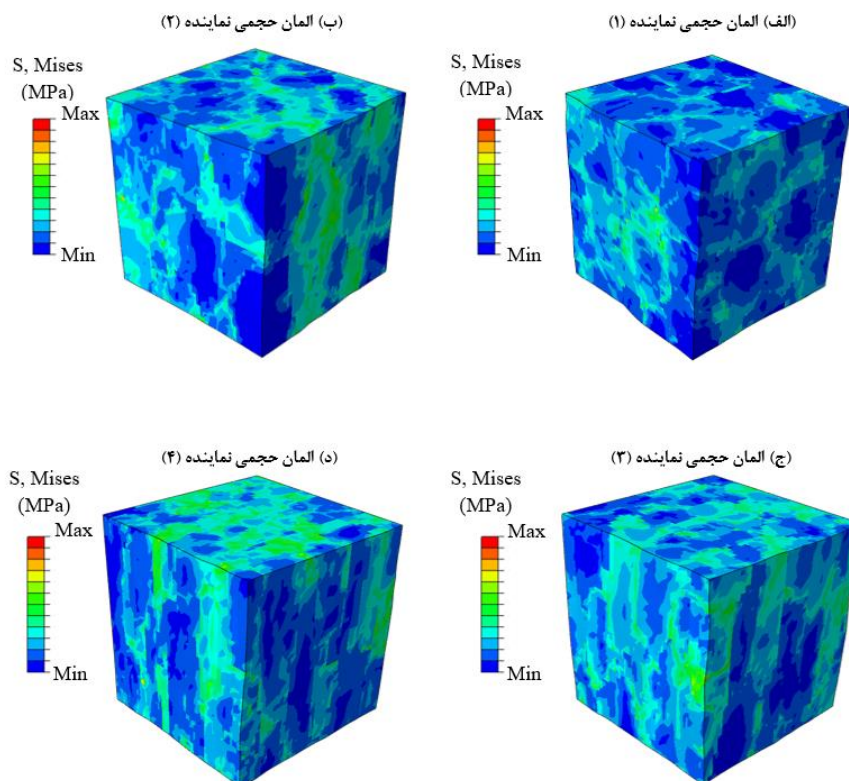
شکل ۵ مقایسه نتایج تنش- کرنش حاصل از آزمون تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته بعد از کالیبراسیون پارامترهای مدل.



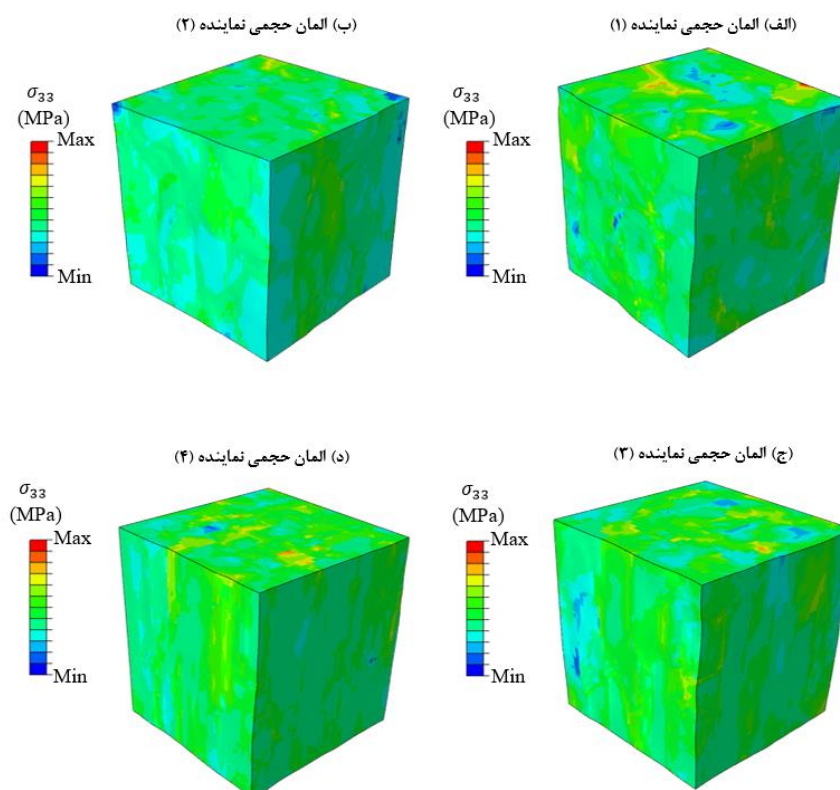
شکل ۶ نتایج مربوط به شبیه‌سازی اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته بر روی چهار المان حجمی نماینده با نسبت‌های ابعادی مختلف.

در مقابل، با تغییر نسبت ابعادی دانه‌ها (المان‌های حجمی نماینده ۲ تا ۴) تنش واقعی برای سطوح کرنش یکسان به تدریج کاهش می‌یابد. در بیشترین مقدار کرنش، المان حجمی نماینده ۴ (RVE_4) با نسبت ابعادی (۱،۰/۱،۰/۱) کاهش معادل ۲٪ در مقدار تنش در مقایسه با المان حجمی نماینده ۱ از خود نشان می‌دهد. این مقدار برای المان‌های حجمی نماینده ۲ و ۳ به ترتیب معادل ۱/۴۳٪ و ۱/۷۵٪ می‌باشد. شکل ۷ نتایج تحلیل تنش المان‌های حجمی نماینده را تحت بار کششی نشان می‌دهد. توزیع تنش در المان حجمی نماینده ۱ نسبت به سایر المان‌های حجمی نماینده یکنواخت‌تر بوده و نواحی دارای تمرکز تنش، کمتر می‌باشند. با تغییر نسبت ابعادی دانه‌ها (المان‌های حجمی نماینده ۲ تا ۴)، توزیع تنش غیریکنواخت‌تر می‌شود و نواحی دارای تمرکز تنش در راستای بارگذاری و مرز دانه‌های کشیده شده افزایش می‌یابد. این رفتار نقش تغییر نسبت ابعادی دانه‌ها و کشیده شدن آن‌ها را در ترویج تغییر شکل‌های موضعی نشان می‌دهد و همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده گردید، علت سطوح پایین تنش را برای این المان‌های حجمی توصیف می‌کند. شکل ۸ نیز توزیع تنش اصلی در جهت بارگذاری را نشان می‌دهد. همانند نتایج توزیع تنش فون مایسز^۹، در المان حجمی نماینده ۱، توزیع تنش در ریزساختار تقریباً یکنواخت است و این موضوع نشان می‌دهد که توزیع بار بین دانه‌ها به‌صورت یکنواخت اتفاق می‌افتد. در المان‌های حجمی با دانه‌های کشیده‌تر، تمرکز تنش σ_{33} در نواحی خاص، به‌ویژه در مرزهای دانه مشاهده می‌شود و ظرفیت تحمل بار در این نواحی کاهش می‌یابد.

^۹ Von Mises



شکل ۷ نتایج تحلیل تنش حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته برای المان‌های حجمی نماینده با نسبت‌های ابعادی مختلف برای دانه‌ها.



شکل ۸ نتایج تحلیل تنش اصلی در راستای بارگذاری حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته برای المان‌های حجمی نماینده با نسبت‌های ابعادی مختلف برای دانه‌ها.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که با تغییر نسبت ابعادی و کشیده‌تر شدن دانه‌ها، توزیع تنش در المان‌های حجمی نماینده غیریکنواخت‌تر می‌شود و این امر منجر به کاهش سطح تنش در مقیاس ماکروسکوپی می‌شود و نقش مهم مورفولوژی دانه را در تعیین رفتار مکانیکی مواد پلی کریستالی برجسته می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت نقش ویژگی‌های ریزساختاری در شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته برای پیش‌بینی دقیق عملکرد مواد تحت بارگذاری مکانیکی تأکید می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر بافت و ساختار مورفولوژیکی بر رفتار مکانیکی نمونه‌های فولادی زنگ‌نزن ۳۱۶L ساخته شده به روش ذوب گزینشی با لیزر پرداخته شد. برای این منظور ابتدا با استفاده از نتایج آنالیز EBSD نمونه‌ها، یک المان حجمی نماینده برای بازسازی ریزساختار و انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته ایجاد گردید. در مرحله بعد برای بررسی تأثیر بافت، المان‌های حجمی نماینده دیگری با نسبت‌های ابعادی دانه (۱،۰/۵،۰/۵)، (۱،۰/۲۵،۰/۲۵) و (۱،۰/۱۰،۰/۱) تولید گردیدند. سپس از یک زیر برنامه UMAT برای پیاده‌سازی روابط در نرم‌افزار آباکوس و انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته استفاده گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد:

۱- المان حجمی نماینده ۱ (RVE_1) با نسبت ابعادی دانه‌های (۱،۱) بیشترین مقدار مقاومت را تحت بار کششی نشان می‌دهد و ثابت می‌کند همسانگرد بودن مورفولوژی منجر به مقاومت مکانیکی بالاتری در مقیاس ماکرو می‌شود.

۲- با تغییر نسبت ابعادی دانه‌ها و کشیده‌تر شدن آن‌ها، (المان‌های حجمی ۲ تا ۴)، مقدار مقاومت نمونه‌ها تحت بار کششی به تدریج کاهش می‌یابد؛ به طوری که در بیشترین مقدار کرنش، المان‌های حجمی ۲ تا ۴ به ترتیب کاهشی معادل ۱/۴۳٪، ۱/۷۵٪ و ۲٪ در مقدار تنش از خود نشان می‌دهند.

۳- توزیع تنش در المان حجمی نماینده ۱ نسبت به سایر نمونه‌ها یکنواخت‌تر می‌باشد و با تغییر نسبت ابعادی دانه‌ها و کشیده‌تر شدن آن‌ها توزیع تنش غیریکنواخت‌تر می‌شود و نواحی دارای تمرکز تنش در راستای بارگذاری و مرز دانه‌های کشیده شده افزایش می‌یابد.

۴- نتایج این تحلیل اهمیت نقش مورفولوژی دانه را در تعیین رفتار مکانیکی مواد پلی کریستالی بیان می‌کند و نشان می‌دهد روش مدل‌سازی پیشنهادی بر پایه چارچوب اجزاء محدود کریستال پلاستیسیته یک ابزار مناسب برای پیش‌بینی دقیق عملکرد مواد ساخته شده به روش ساخت افزایشی تحت بارگذاری مکانیکی می‌باشد.

Authorship Contribution Statement

Dr. Sina Jabarzadeh



Biography: Dr. Sina Jabarzadeh earned his Ph.D. in Mechanical Engineering from Semnan University in 2025, where his research primarily focused on investigating the microstructure-property-performance relationship of additively manufactured metallic structures. He has expertise in multiscale modeling, metal additive manufacturing (LPBF/M), advanced metallurgical characterization methods including electron backscatter diffraction (EBSD) and the crystal plasticity finite element method (CPFEM). Dr. Jabarzadeh's work bridges theoretical modeling and experimental validation, aiming to enhance the reliability and performance of metal components produced through additive manufacturing. His research interests align with developing innovative simulation techniques to optimize processing conditions, improve material performance, and advance the field of metal additive manufacturing.

Contribution Statement: Methodology, Investigation, Software, Visualization, Data Curation, Validation, and Writing – original draft

Dr. Ahmad Ghasemi-Ghalebahman



Biography: Dr. Ahmad Ghasemi-Ghalebahman has been serving as an associate professor and faculty member in the Faculty of Mechanical Engineering at Semnan University since 2008. He earned both his Master's and Ph.D. degrees from Iran University of Science and Technology, and his research spans composites, nanocomposites, biocomposites, functionally graded materials, and advanced smart materials, including shape memory alloys and polymers as well as self-healing materials. His expertise includes fracture analysis, damage detection, structural health monitoring, fatigue and crack growth modeling, finite deformation analysis, and various numerical simulation techniques, along with cutting-edge manufacturing processes such as metal and polymer 3D printing.

Contribution Statement: Supervision, Conceptualization, Recourses, Project administration, Validation, and Writing – review & editing

Dr. Amir Najibi



Biography: Dr. Amir Najibi earned his Ph.D. in Automotive Engineering from the Iran University of Science and Technology (IUST) in 2014. Currently an associate professor at Hubei University of Automotive Technology (HUAT), he specializes in CAE, vehicle crashworthiness and safety, solid mechanics, advanced composite structures, NVH, and thermal stress analysis. Dr. Najibi serves as an assistant professor at Semnan University for ten years. With extensive industry experience, he worked as the chief master consultant for Iran Khodro Industrial Group (IKCO), collaborating with global automotive leaders such as PSA and Renault Nissan. Additionally, he spent five years as the chief R&D consultant for Oghabafshan Industrial Group (Scania). Bridging academia and industry, Dr. Najibi is dedicated to advancing research and innovation in automotive engineering.

Contribution Statement: Supervision, Conceptualization, Recourses, Project administration, Validation, and Writing – review & editing

۶- مراجع

- [1] Khairallah SA, Anderson AT, Rubenchik A, King WE. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*. 2016;108:36-45.
- [2] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, Brooks M, Pitot J, Lopez E, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021;209:110008.
- [3] Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia manufacturing*. 2017;11:545-54.
- [4] Bajaj P, Hariharan A, Kini A, Kürnsteiner P, Raabe D, Jäggle EA. Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;772:138633.

- [5] Hitzler L, Merkel M, Hall W, Öchsner A. A review of metal fabricated with laser- and powder- bed based additive manufacturing techniques: process, nomenclature, materials, achievable properties, and its utilization in the medical sector. *Advanced Engineering Materials*. 2018;20:1700658.
- [6] Suryawanshi J, Prashanth K, Ramamurty U. Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;696:113-21.
- [7] Hovig EW, Azar AS, Grytten F, Sørby K, Andreassen E. Determination of anisotropic mechanical properties for materials processed by laser powder bed fusion. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018;2018:7650303.
- [8] Zhao Q, Wahab MA, Ling Y, Liu Z. Grain-orientation induced stress formation in AA2024 monocrystal and bicrystal using Crystal Plasticity Finite Element Method. *Materials & Design*. 2021;206:109794.
- [9] Motaman SAH, Roters F, Haase C. Anisotropic polycrystal plasticity due to microstructural heterogeneity: A multi-scale experimental and numerical study on additively manufactured metallic materials. *Acta Materialia*. 2020;185:340-69.
- [10] Wang YM, Voisin T, McKeown JT, Ye J, Calta NP, Li Z, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility. *Nature materials*. 2018;17:63-71.
- [11] Ahmadi A, Mirzaeifar R, Moghaddam NS, Turabi AS, Karaca HE, Elahinia M. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework. *Materials & Design*. 2016;112:328-38.
- [12] Andani MT, Karamooz-Ravari MR, Mirzaeifar R, Ni J. Micromechanics modeling of metallic alloys 3D printed by selective laser melting. *Materials & Design*. 2018;137:204-13.
- [13] Cao Y, Moumni Z, Zhu J, Zhang Y, You Y, Zhang W. Comparative investigation of the fatigue limit of additive-manufactured and rolled 316 steel based on self-heating approach. *Engineering Fracture Mechanics*. 2020;223:106746.
- [14] Demir E, Horton EW, Mokhtarishirazabad M, Mostafavi M, Knowles D. Grain size and shape dependent crystal plasticity finite element model and its application to electron beam welded SS316L. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2023;178:105331.
- [15] Wang Z, Jiang B, Wu S, Liu W. Anisotropic tension-compression asymmetry in SLM 316L stainless steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023;246:108139.
- [16] ASTM Standard E8/E8M, Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Materials. 2011.
- [17] Groeber MA, Jackson MA. DREAM. 3D: a digital representation environment for the analysis of microstructure in 3D. *Integrating materials and manufacturing innovation*. 2014;3:56-72.
- [18] Jabarzadeh S, Ghasemi-Ghalebahman A, Najibi A. Investigation into microstructure, mechanical properties, and compressive failure of functionally graded porous cylinders fabricated by SLM. *Engineering Failure Analysis*. 2024:108794.
- [19] Roters F, Eisenlohr P, Hantcherli L, Tjahjanto DD, Bieler TR, Raabe D. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications. *Acta Materialia*. 2010;58:1152-211.
- [20] Helm D, Butz A, Raabe D, Gumbsch P. Microstructure-based description of the deformation of metals: theory and application. *Jom*. 2011;63:26-33.
- [21] Boyce MC, Weber G, Parks D. On the kinematics of finite strain plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1989;37:647-65.
- [22] Hutchinson JW. Bounds and self-consistent estimates for creep of polycrystalline materials. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*. 1976;348:101-27.

- [23] Peirce D, Asaro RJ, Needleman A. Material rate dependence and localized deformation in crystalline solids. *Acta metallurgica*. 1983;31:1951-76.
- [24] Huang Y. A user-material subroutine incorporating single crystal plasticity in the ABAQUS finite element program: Harvard Univ. Cambridge, UK, 1991.
- [25] Feaugas X, Pilvin P, Clavel M. Cyclic deformation behaviour of an α/β titanium alloy—II. Internal stresses and micromechanic modelling. *Acta Materialia*. 1997;45:2703-14.