

## Research Paper

# Aluminum nanocrystalline powder production from aluminum alloy scrap by solid state recycling method

Hadi Rezazadeh<sup>1</sup>, Mazyar Azadbeh<sup>2\*</sup>

1. MSc student, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2. Professor, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Received: 2023/10/15

Revised: 2023/11/18

Accepted: 2023/11/25

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2023.32501.2015](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.32501.2015)

### Keywords:

Solid state recycling, Aluminum alloy scrap, Mechanical milling, Aluminum nanocrystalline powder

### Abstract

**Introduction:** The purpose of this research is solid state recycling of 3000 and 5000 series aluminum alloy scrap to produce aluminum nanocrystalline powder by mechanical milling without using process controlling agent. In this regard, aluminum used beverage cans (UBCs) which consist of lid (alloy 5182) and the monolith part (alloy 3004) of the body (thin) and bottom (thicker).

**Methods:** To achieve disintegration mechanism, lid part, body and bottom of monolith part are separated each other because of diverse constituent of Al series and different thickness. The three parts individually were decoated then cut into the small chips (app. 8 mm). The chips were mechanically ball milled at different times up to 104 hours under argon atmosphere. The ratio of ball to powder was 10 to 1.

**Findings:** The lid part chips are crushed faster than the monolith part chips, and, resulting in a finer powder. According to the PSA results, the D90 of the lid powder is less than 150 micrometers; while D90 of the body and bottom powders are more than 150 micrometers. This result can be used on an industrial scale to separate the constituent elements of crushed UBCs from each other. The smallest D90 values of lid, body and bottom powders, which obtained after 72, 80 and 80 h as optimum milling time, are 109, 258 and 391, respectively. Also, their flowability were 57.8, 59.3 and 61.1 s/50 g, as well as the apparent density were 1.38, 1.43 and 1.46 g/cm<sup>3</sup>, respectively.

**Citation:** Hadi Rezazadeh, Mazyar Azadbeh, Aluminum nanocrystalline powder production from aluminum alloy scrap by solid state recycling method, Quarterly Journal of New Materials. 2023; 14 (51): 17-38.

**\*Corresponding author:** Mazyar Azadbeh

**Address:** Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

**Tell:** +98-41-33459452

**Email:** [azadbeh@sut.ac.ir](mailto:azadbeh@sut.ac.ir)

## Extended Abstract

### Introduction

Metals and alloys, compared to other materials, have the highest potential for recycling [1]. Aluminum powder is widely used in aircraft fuel, aerated lightweight concrete, and explosives [2]. The recycling of aluminum waste is done by two Method: solid state and molten state. Two methods of milling (solid state) and gas or water atomization (molten state) are used to produce aluminum powder [3]. In molten state recycling, about 12% by weight of aluminum metal is oxidized and about 10% by weight is wasted during slag collection [4]. In recycling small - sized Al scraps like machining chips, oxidation losses increase up 16% or even up to 25% [5]. Also, in the next stages, such as casting and processing of aluminum ingots, there are losses amounting to about 8% and 18%, respectively, ultimately no more than 50% of the metal is recovered [6]. Therefore, solid state recycling is preferred, Due to energy and materials savings and environmental benefits [7]. Solid state recycling of aluminum scrap can be done through methods such as hot extrusion [8], friction stir extrusion [9], hot press forging [10], cold rolling [11], high pressure torsion [12], and mechanical milling [13]. The mills can be divided into two main groups: indirect and direct milling equipment [14]. Mechanical milling is widely regarded as one of the most efficient nanotechnology techniques for the top - down preparation approach of a broad variety of nanocrystalline, nanoparticles, and nanocomposites materials [15]. In planetary ball milling; Plastic deformation, cold welding and fracture are predominant factors [16]. Some of the important parameters in the milling process are: type of mill, milling container, ball-to-powder weight ratio, extent of filling the vial, milling atmosphere, speed, time and temperature of milling and process control agent [17]. Aluminum used beverage cans are made of two aluminum alloys (3004 ASTM for the main body and 5182 ASTM for the lids) [18]. According to Bochvar, the freezing range is the range between the temperature of the

onset of the linear shrinkage and the nonequilibrium solidus of the alloy [19]. During solidification of aluminum 3000 and 5000 alloys,  $Al_6(Mn, Fe)$  or  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  and  $Mg_2Si$  intermetallic phases are formed in the aluminum matrix, respectively [20]. Because the 5182 alloy has a wider freezing range than the 3004 alloy, it cracks in more places during milling and breaks into very smaller particles [18].

### Materials and Methods

The materials used in this research are aluminum beverages cans from the Coca-Cola brand with a capacity of 330 ml. Laboratory sulfuric acid with 98% purity was used to decoating and cleaning of aluminum cans. The decoated cans were cut into square pieces, with a dimension of less than 8 mm, by industrial scissors to obtain the primary chips needed for the mechanical milling process. The chips were mechanically milled up to 104 hours using a planetary ball milling machine without any process controlling agent (PCA) under argon atmosphere. The ball to powder ratio was 10 to 1. 15 min rest time was used in every 15 min milling. PSA, sieve analysis and SEM microscopy were used to determine particle size. XRD was used to obtaining constituent phases and also the crystallite size were calculated by Williamson hall equation. Flowability and apparent density of obtained powder were determined according to ASTM B213 and B212, respectively.

### Findings and Discussion

By analyzing the aluminum alloys chips of 3000 and 5000 series, it was observed that there are  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  and  $Mg_2Si$ , as intermetallic phases in the Al matrix, respectively. These intermetallic phases are seen as with polygonal and spherical particles matrix. On the other hand, after milling aluminum chips, it was observed that the lid powder are finer than the body and bottom powders. Also, the smallest powder size for lid, body and bottom obtained after 72, 80, and 80 hours milling (called as the optimum milling time). Their D90 were 109, 258, and 391 micrometers, respectively. Also, it can be seen that even the most

coarsest powder produced after 48 hours milling is smaller than the body and bottom powders after the same milling time. This is really beneficial achievement concept for separating lid powder from the body and bottom powders.

### **Conclusion**

In the present research, the solid state recycling of aluminum used beverage cans made of 3000 and 5000 series alloys was successfully carried out using a planetary ball milling machine, without using any process control agent. It was also concluded that disintegration and cold welding are in competition with each other so that before the optimum milling time the disintegration mechanism is dominant and after that agglomeration is occur.

### **Ethical Considerations compliance with ethical guidelines**

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### **Funding**

No funding.

### **Authors' contributions**

Design and conceptualization: Maziyar Azadbeh;

Conducting experiments: Hadi Rezazadeh;

Methodology and data analysis: Hadi Rezazadeh, Maziyar Azadbeh;

Initial writing: Hadi Rezazadeh;

Supervision and Final writing: Maziyar Azadbeh .

### **Conflicts of interest**

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

تولید پودر نانوکریستالی آلومینیوم از ضایعات آلیاژ آلومینیوم به روش بازیافت  
حالت جامدهادی رضازاده<sup>۱</sup>، مازیار آزادبه<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

۲. استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

## چکیده

**مقدمه:** هدف از این پژوهش، بازیافت حالت جامد ضایعات آلیاژ آلومینیوم سری ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ و تولید پودر نانوکریستالی آلومینیوم با روش آسیاکاری مکانیکی بدون استفاده از عامل کنترل‌کننده فرآیند است. در این راستا قوطی‌های آلومینیومی مستعمل نوشیدنی که از سه قسمت سر با آلیاژ ۵۱۸۲، قسمت یکپارچه بدنه (نازک) و پایه (ضخیم‌تر) از آلیاژ ۳۰۰۴ تشکیل شده‌اند، به‌عنوان مواد اولیه استفاده شدند.

**روش:** قسمت سر و قسمت یکپارچه‌ی بدنه و پایه به توجه به آلیاژهای سازنده‌شان از هم مجزا شده‌اند و بدنه و پایه‌ی قسمت یکپارچه نیز علیرغم ترکیب شیمیایی یکسان بدلیل ضخامت متفاوتشان از هم جدا شدند تا بتوان با در نظر گرفتن دو متغیر ترکیب شیمیایی و ضخامت، مکانیزمی برای خردایش‌شان تعیین کرد. هر سه قسمت به‌صورت جداگانه پس از عملیات رنگ‌زدایی توسط قیچی صنعتی به صورت چپس‌های ریز با اندازه کمتر از ۸ میلی‌متر خرد شدند. سپس با استفاده از دستگاه آسیای سیاره‌ای تحت اتمسفر گاز آرگون، در حضور گلوله‌هایی از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰، با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰ به ۱، در مدت زمان‌های مختلف آسیاکاری تا ۱۰۴ ساعت به ذرات پودری تبدیل شدند.

**یافته‌ها:** چپس‌های قسمت سر قوطی سریع‌تر از چپس‌های قسمت یکپارچه بدنه و پایه خرد شده و پودر حاصل از آن نیز ریزتر است. با توجه به نتایج آزمون PSA، D<sub>۹۰</sub> پودر تولیدشده قسمت سر قوطی کمتر از اندازه ۱۵۰ میکرومتر است؛ درحالی‌که برای D<sub>۹۰</sub> پودرهای تولیدشده قسمت یکپارچه بدنه و پایه قوطی این مقدار بیشتر از ۱۵۰ میکرومتر است که از این دستاورد می‌توان در مقیاس صنعتی برای جداسازی ذرات ریزتر آلیاژ آلومینیوم ۵۰۰۰ از ذرات درشت‌تر آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۰ به کمک الک با اندازه مش ۱۵۰ میکرومتر استفاده کرد.

**نتیجه‌گیری:** با استفاده از داده‌های آزمون PSA، مدت زمان بهینه آسیاکاری که منجر به تولید ریزترین اندازه پودر می‌شود برای سه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی به ترتیب ۷۲، ۸۰ و ۸۰ ساعت با D<sub>۹۰</sub> پودرهای حاصله مساوی با ۱۰۹، ۲۵۸ و ۳۹۱ میکرومتر به‌دست‌آمد. همچنین سیالیت پودرهای قسمت سر، بدنه و پایه به ترتیب برابر با ۵۷/۸، ۵۹/۳ و ۶۱/۱ s/50g و چگالی ظاهری نیز به ترتیب برابر با ۱/۳۸، ۱/۴۳ و ۱/۴۶ g/cm<sup>3</sup> به‌دست‌آمد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2023.32501.2015](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.32501.2015)

## واژه‌های کلیدی:

بازیافت حالت جامد، ضایعات آلیاژ آلومینیوم، آسیاکاری مکانیکی، پودر نانو کریستالی آلومینیوم.

\* نویسنده مسئول: دکتر مازیار آزادبه

نشانی: دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

تلفن: ۰۴۱۳۳۴۵۹۴۵۲

پست الکترونیکی: azadbeh@sut.ac.ir

## مقدمه

فلزات و آلیاژها در مقایسه با سایر مواد، با توجه به حجم زیاد ضایعات و همچنین داشتن ارزش اقتصادی بالا و خصوصیات متمایز و منحصر به فرد، از پتانسیل بازیافت بالایی برخوردار هستند [1]. پودر آلومینیوم در صنایع متالورژی پودر، کاربردهای وسیعی از جمله سوخت هواپیماها، بتن هوادهی شده سبک و مواد منفجره دارد. همچنین در زمینه چاپ سه بعدی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. بازیافت ضایعات آلومینیوم به دو صورت حالت جامد و حالت مذاب انجام می‌شود که از دو روش آسیاکاری (حالت جامد) و اتمی‌زاسیون گازی و یا آبی (حالت مذاب) به طور گسترده‌ای برای تولید پودر آلومینیوم استفاده می‌شود. از آنجایی که پودر آلومینیوم اشتعال پذیر است، به هنگام تولید پودر به روش اتمی‌زاسیون احتمال وقوع انفجار وجود دارد [3]. در بازیافت متداول (حالت مذاب) حدود ۱۲ درصد وزنی از فلز آلومینیوم اکسید می‌شود و حدود ۱۰ درصد وزنی از آن در زمان جمع کردن سرباره‌ی موجود در سطح مذاب فلز، هدر می‌شود [4]. از طرفی در مورد بازیافت ضایعات آلومینیوم کوچک مانند تراشه‌های ماشین‌کاری؛ به این دلیل که چپس‌ها نسبت سطح به حجم زیادی دارند که تمایل آن‌ها برای شناور شدن و باقی ماندن در سطح مذاب را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش تلفات از طریق اکسیداسیون تا ۱۶٪ یا حتی تا ۲۵٪ می‌شود [5]. همچنین در هر مرحله از پردازش‌های بعدی نظیر ریخته‌گری و پردازش شمش‌های آلومینیوم به ترتیب تلفاتی در حدود ۸٪ و ۱۸٪ وجود دارد که باعث می‌شود در نهایت بیش از ۵۰٪ فلز از بین رفته و بازیابی نشود [6]. بنابراین به منظور جلوگیری از اتلاف مواد، صرفه‌جویی در انرژی و حفاظت از محیط‌زیست بازیافت حالت جامد ترجیح داده می‌شود [7]. بازیافت حالت جامد ضایعات آلومینیومی می‌تواند از طریق روش‌هایی نظیر اکستروژن گرم [8]، اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی [9]، آهن‌گری پرس گرم [10]، نورد [11]، پیچش با فشار بالا [12] و آسیاکاری مکانیکی [13] انجام شود و همانطور که قبلاً اشاره شد، از روش آخر به منظور تولید پودرهای میکروکریستالی و نانوکریستالی استفاده می‌شود. تجهیزات آسیاکاری را می‌توان به دو گروه اصلی تجهیزات آسیای غیرمستقیم و مستقیم تقسیم کرد. از جمله تجهیزات آسیای مستقیم می‌توان به آسیای ساینده، آسیای چرخشی و آسیای غلطکی اشاره کرد و از تجهیزات آسیای غیرمستقیم می‌توان به آسیای گلوله‌ای افقی، آسیای ارتعاشی و آسیای سیاره‌ای اشاره کرد [14]. آسیاب گلوله‌ای در طی پنج دهه اخیر به عنوان یک روش قدرتمند برای تهیه مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی بهبود یافته و همچنین فازها و مواد مهندسی جدید تکامل یافته است و به طور گسترده به عنوان یکی از کارآمدترین تکنیک‌های نانوتکنولوژی برای رویکرد آماده سازی از بالا به پایین طیف وسیعی از مواد نانوکریستالی، نانوذرات و نانوکامپوزیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. این فرآیند برای اولین بار توسط جان بنجامین<sup>۱</sup> و همکارانش در شرکت بین‌المللی نیکل در سال ۱۹۶۰ توسعه یافت [15]. در آسیاکاری گلوله‌ای سیاره‌ای؛ تغییر شکل

پلاستیک، جوش سرد و شکست عوامل غالب هستند که در آن‌ها تغییر شکل منجر به تغییر شکل ذرات، جوش سرد باعث افزایش اندازه ذرات و شکست منجر به کاهش اندازه ذرات می‌شود [16]. برخی از پارامترهای مهم در فرآیند آسیاکاری عبارتند از: نوع آسیا، محفظه و محیط آسیا، نسبت وزنی گلوله به پودر، درصد حجم پر شدن کاپ‌ها، اتمسفر آسیا، سرعت، زمان و دمای آسیا و همچنین عوامل کنترل فرآیند اشاره کرد [17]. قوطی‌های آلومینیومی مستعمل نوشیدنی به دلیل ارزش زیاد ضایعات و سهولت جمع‌آوری، بازیافت پذیرترین مواد بسته‌بندی هستند و بازیافت آن‌ها موجب حذف ضایعات، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش استفاده از محل‌های دفن زباله‌های شهری و درآمد اضافی برای بازیافت کنندگان می‌شود. قوطی‌های نوشیدنی با استفاده از دو سری آلیاژ آلومینیوم (آلیاژ ۳۰۰۴ برای بدنه اصلی و پایه و آلیاژ ۵۱۸۲ برای سر) ساخته می‌شوند. آلیاژ ۳۰۰۴ دارای توانایی فرم استثنایی موردنیاز برای انجام فرآیند کشش عمیق است و آلیاژ ۵۱۸۲ سخت‌تر است [18]. به گفته بوچار<sup>۲</sup>، دامنه انجماد به محدوده بین دمای شروع انقباض خطی و جامد غیر تعادلی آلیاژ گفته می‌شود که در این محدوده، آلیاژ در حالت جامد-مایع قرار دارد و مهمترین خواص ریختگی مانند ترک داغ، قابلیت ریخته‌گری و تمایل به ایجاد حفره و فازهای ناپایدار به عرض آن بستگی دارد [۱۹]. در طول انجماد آلیاژهای آلومینیوم سری ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰، به ترتیب ترکیبات بین فلزی  $Al_6(Mn, Fe)$  یا  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  و  $Mg_2Si$  در زمینه آلومینیوم تشکیل می‌شوند. این ترکیبات به عنوان مکان‌های مستعد برای جوانه‌زنی و انتشار ترک در طول فرآیند آسیاکاری عمل می‌کنند [20]. از آنجایی که آلیاژ ۵۱۸۲ دارای دامنه انجماد گسترده‌تری نسبت به آلیاژ ۳۰۰۴ است، در طول انجماد آن ترکیبات بین فلزی بیشتری تشکیل می‌شود و در هنگام آسیاکاری از مکان‌های بیشتری ترک خورده و به ذرات بسیار کوچک‌تری می‌شکند [18].

در تحقیق حاضر پودر آلومینیوم از ضایعات قوطی‌های آلومینیوم با روشی ساده نظیر آسیاکاری مکانیکی که یکی از روش‌های بازیافت حالت جامد است تولید شد. این روش در مقایسه با روش حالت مذاب، علاوه بر اینکه از هدر رفتن مواد اولیه به صورت اکسید و سرباره جلوگیری می‌کند و منجر به افزایش راندمان بازیافت به بیش از ۹۵٪ می‌شود، روشی مقرون به صرفه، مطمئن و کم خطر برای تولید پودر است.

## مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش، قوطی‌های آلومینیومی مستعمل نوشیدنی از مارک کوکاکولا با ظرفیت ۳۳۰ میلی‌لیتر و با سری آلیاژی ۳۰۰۰ برای قسمت یکپارچه بدنه و پایه و ۵۰۰۰ برای قسمت سر می‌باشد. قوطی آلومینیومی مستعمل نوشیدنی به دلیل کاربردهای مختلفی که داشته‌اند، اغلب با یک ماده عالی پوشش داده می‌شوند که باید قبل از آسیاکاری مکانیکی حذف شوند؛ بنابراین به منظور رنگ‌زدایی و تمیزکاری

<sup>2</sup>. A. A. Bochar

<sup>1</sup>. J. S. Benjamin

تکنیک آنالیز اندازه ذره ( $PSA^3$ ) انجام گرفت. این تکنیک از روش پراکندگی نور دینامیکی ( $DLS^4$ ) برای تعیین اندازه ذرات استفاده می‌کند. با استفاده از داده‌های حاصله نمودار فراوانی نسبی برحسب اندازه ذرات پودر رسم شد. همچنین به‌منظور اطمینان از داده‌های آزمون قبلی، توزیع اندازه ذرات پودر آلومینیومی حاصل از آسیاکاری چپس‌های سه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌ها به مدت زمان بهینه آن‌ها توسط آزمون الک مطابق استاندارد ASTM E11 با استفاده از ۹ الک با مش‌های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۱۷۰، ۲۰۰، ۲۳۰، ۲۷۰ و ۳۲۵ تعیین شد و با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده نمودار فراوانی تجمعی برحسب اندازه ذرات پودر رسم شد. مورفولوژی سطحی و ریزساختار چپس‌های آلومینیومی و همچنین شکل، اندازه ذرات و سطح مقطع پودرهای آلومینیومی حاصل از آسیاکاری، به‌وسیله دستگاه FE-SEM مدل MIRA3 FEG-SEM مجهز به آنالیز EDS و دستگاه SEM مدل LEO440i مطالعه شد.

جهت بررسی سطح مقطع پودرهای با اندازه بهینه حاصل از آسیاکاری از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3 استفاده شد. جزئیات عملیات پولیش و اچ در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- جزئیات عملیات پولیش و اچ کاری

اچ	پولیش
شیمیایی با محلول کلره (۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲/۵ میلی- لیتر نیتریک اسید، ۱/۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید و ۱ میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید)	مکانیکی بر روی نم‌د همراه با آب‌صابون

برای تعیین فازهای تشکیل‌دهنده چپس‌های ریز آلومینیومی و بررسی تأثیر زمان آسیاکاری بر تغییرات فازی ذرات پودر و بررسی تغییرات شدت پیک‌ها از دستگاه پراش اشعه ایکس نوع ((BRUKER-(RAW) binary V3) با استفاده از تابش Cuka (با طول موج ۰۵۶۴۰۵۶) آنگستروم، پتانسیل الکتریکی ۴۰ کیلوولت و جریان ۴۰ میلی‌آمپر، سرعت اسکن ۴ درجه بر دقیقه، در محدوده زاویه  $2\theta$  برابر ۱۰ تا ۱۲۰ استفاده شد. اندازه بلورک و کرنش شبکه پودر با استفاده از رابطه ویلیامسون-هال<sup>۶</sup> محاسبه شد که به فرم زیر می‌باشد:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.9\lambda}{d} + 2A\epsilon \cdot \sin \theta$$

که در این رابطه  $\lambda$  طول موج اشعه ایکس (معمولاً لامپ مسی برابر با ۰۵۶۴۰۵۴ آنگستروم)،  $d$  اندازه بلورک،  $A$  ثابت (معمولاً برابر با ۱ است)،  $\beta$  پهنای پیک در نیمه ارتفاع آن (برحسب رادیان) و  $\theta$  زاویه‌ی براگ است.

قوطی‌های آلومینیومی از اسیدسولفوریک آزمایشگاهی با خلوص ۹۸٪ بدون رقیق‌سازی استفاده شد، به این صورت که ابتدا سه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌های آلومینیومی برش داده‌شده و از هم جدا شدند و هر قسمت جداگانه به مدت ۳۰ دقیقه تحت اتمسفر هوای معمولی درون اسید نگاه‌داشته شده و درنهایت با آب داغ شست‌وشو داده‌شده و خشک شدند (شکل ۱).



شکل ۱- قوطی نوشیدنی آلومینیومی رنگ‌زدایی شده

قوطی‌های رنگ‌زدایی شده تحت خردایش توسط قیچی صنعتی در ابعاد کمتر از ۸ میلی‌متر، به‌صورت مربعی شکل برش داده شدند تا چپس‌های اولیه موردنیاز برای انجام فرآیند آسیاکاری مکانیکی حاصل شود. چپس‌های حاصل از هر قسمت قوطی‌های فلزی به‌صورت جدا از هم، به همراه گلوله‌هایی از جنس فولاد بلبرنگی ۵۲۱۰۰ با سه اندازه قطر مختلف ۱۰، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر، به ترتیب به تعداد ۷، ۴ و ۶ عدد، با نسبت ۱۰ به ۱ گلوله به مواد اولیه به دستگاه آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای<sup>۱</sup> مدل FP2 دارای دو محفظه از جنس فولاد زنگ نزن تغذیه شدند. فرآیند آسیاکاری بدون استفاده از عامل کنترل‌کننده فرآیند ( $PCA^2$ ) تحت اتمسفر گاز آرگون با خلوص بالا با فرکانس ۲۲/۴ بر ثانیه و سرعت چرخش ۲۴۰ دور در دقیقه به مدت زمان‌های مختلف ۰، تا ۱۰۴ ساعت انجام گرفت. بعد از هر ۱۵ دقیقه کاری، ۱۵ دقیقه نیز زمان استراحت لحاظ شد. بعد از هر ۸ ساعت آسیاکاری، به‌منظور چگونگی خردایش و تعیین مکانیزم آن نمونه برداری و بررسی مواد حاصله صورت گرفت.

توزیع اندازه تراشه‌های آلومینیومی کوچک‌تر از ۸ میلی‌متر به کمک نرم-افزار image z با دامنه اندازه‌گیری ۴ تا ۷ میلی‌متر تعیین گردید. تعیین اندازه ذرات پودر و به دست آوردن زمان بهینه آن‌ها (مدت‌زمان آسیاکاری که در آن ریزترین اندازه پودر حاصل می‌شود) با استفاده از

1. Planetary ball mill

2. Process control agents

3. Particle size analysis

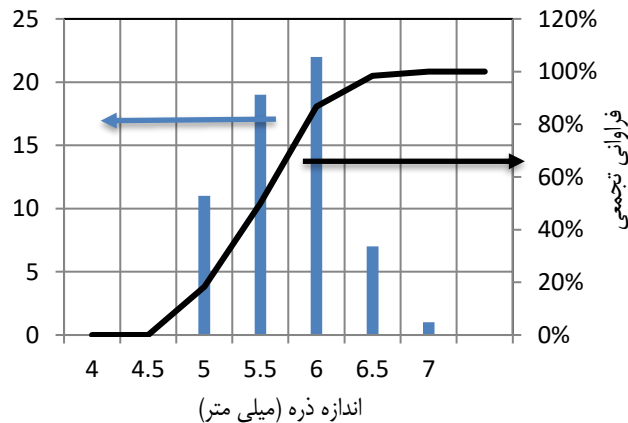
4. Dynamic light scattering

5. Keller's reagent

6. Williamson-Hall

پایه ترکیبات بین فلزی بیشتری نسبت به چپیس قسمت بدنه دارد که با مدنظر قرار دادن اتفاقاتی که در فرآیند کشش عمیق برای ساخت این قسمت اعمال می‌شود، منطقی است. با توجه به داده‌های حاصل از آنالیز نقشه‌ای EDS می‌توان مشاهده کرد که عناصر Al, Mn, Fe, Mg, Si در چپیس‌های هر سه قسمت به‌وضوح وجود دارند، که با در نظر گرفتن نتایج حاصل از آزمون XRD می‌توان این عناصر را مربوط به حضور فازهای بین فلزی  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  و  $Mg_2Si$  در زمینه آلومینیوم دانست.

شکل ۶ (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب الگوی پراش اشعه ایکس چپیس قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌های آلومینیومی با اندازه کوچک‌تر از ۸ میلی‌متر که در تحقیق حاضر به‌عنوان مواد تغذیه فرآیند آسیاکاری مکانیکی استفاده شد را نشان می‌دهد. تعداد ۷ پیک در  $2\theta$  های ۳۸، ۴۴، ۶۵، ۷۸، ۹۹، ۱۱۱ و ۱۱۶ می‌توان مشاهده کرد که مربوط به پیک‌های آلومینیوم است. همچنین در هر سه قسمت قوطی پیک با  $2\theta = 41$  مربوط به ترکیب بین فلزی از خانواده  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  می‌باشد. لازم به ذکر است که در الگوی پراش اشعه ایکس چپیس قسمت سر، پیک با  $2\theta = 86/83$  مربوط به ترکیب بین فلزی منیزیم-سیلیسیم ( $Mg_2Si$ ) است، که در زمینه آلومینیومی پراکنده شدند.



(ب)

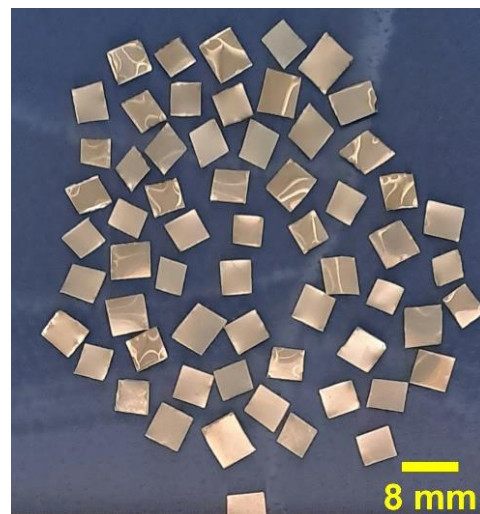
سیالیت یا همان سرعت جریان و چگالی ظاهری پودرهای حاصل از آسیاکاری چپیس‌های سه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌های نوشیدنی که پارامترهای مهم در نرخ یکنواختی و متراکم‌سازی پودر هستند با استفاده از روش کیف هال و به‌ترتیب مطابق استاندارد ASTM B213 و استاندارد ASTM B212 تعیین گردید.

## نتایج

### بررسی مواد مصرفی

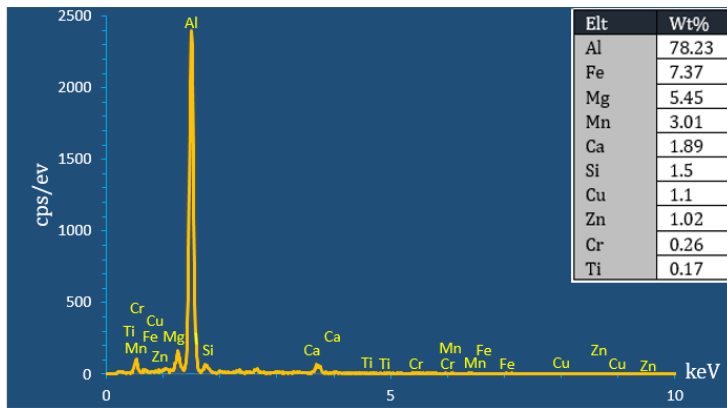
در شکل ۲ (الف) مورفولوژی چپیس‌های ریز (با ابعاد کوچک‌تر از ۸ میلی‌متر) و در شکل ۲ (ب) توزیع اندازه آن‌ها (که با استفاده از نرم‌افزار image j تعیین شده است) به‌صورت فراوانی نسبی و فراوانی تجمعی نشان داده شده است. چپیس‌های آلومینیومی دارای شکل منظم (تقریباً مربعی شکل) می‌باشند و منحنی توزیع اندازه آن بصورت تک کوهانه و متوسط اندازه در بازه ۵-۷ میلی‌متر می‌باشد.

اشکال ۳-۵ به ترتیب ریزساختار و آنالیز نقشه‌ای EDS چپیس قسمت سر، بدنه و پایه پس از آماده‌سازی متالوگرافی را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر SEM، ترکیبات بین فلزی  $Al_6(Mn, Fe)$  یا  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  و  $Mg_2Si$  مطابق نتایج حاصل شده در پژوهش‌های قبلی [۲۱]، به ترتیب با مورفولوژی‌های چندضلعی نسبتاً منظم (معمولاً چهارضلعی) و نسبتاً کروی قابل مشاهده هستند. همچنین می‌توان مشاهده کرد تراکم فازهای ناپایدار در چپیس قسمت سر با سری آلیاژی ۵۰۰۰، بیشتر از توزیع فازهای ناپایدار در چپیس‌های قسمت یکپارچه بدنه و پایه با سری آلیاژی ۳۰۰۰ می‌باشد و در مورد قسمت یکپارچه نیز می‌توان گفت چپیس قسمت

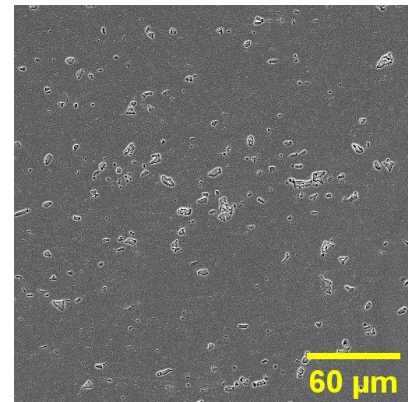


(الف)

شکل ۲- آنالیز چپیس‌های آلومینیومی: (الف) مورفولوژی تراشه‌ها و (ب) توزیع اندازه ذرات چپیس با استفاده از نرم‌افزار image j

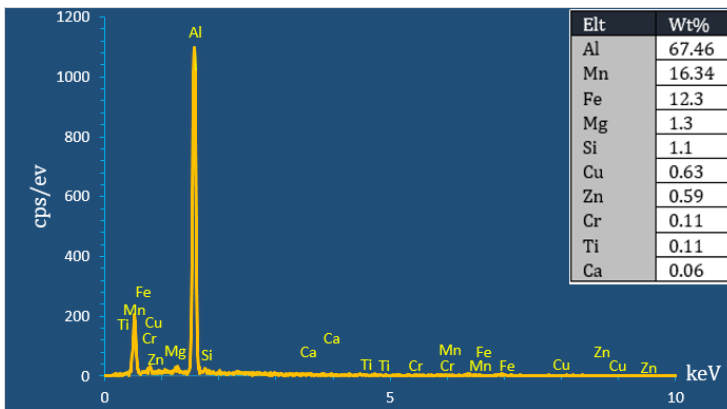


(ب)

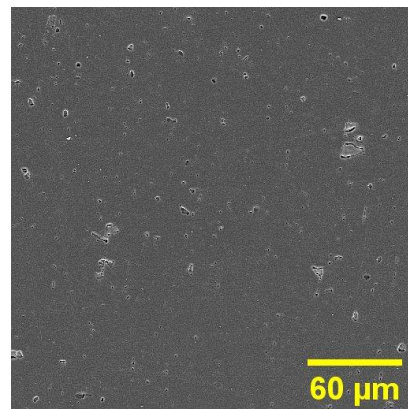


(الف)

شکل ۳- (الف) تصویر SEM، و (ب) آنالیز نقشه‌ای EDS چپس قسمت سر

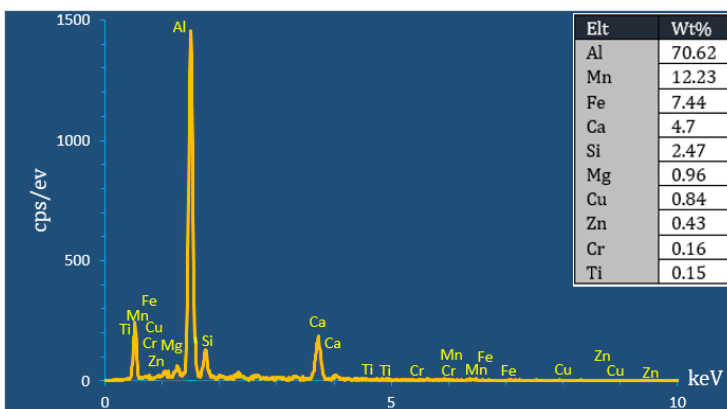


(ب)

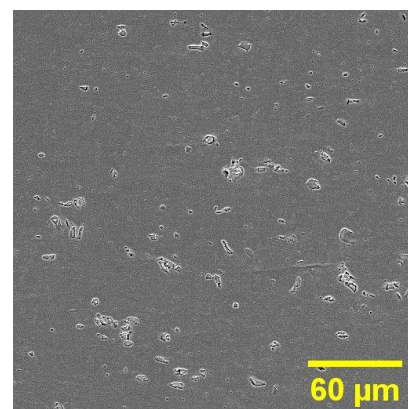


(الف)

شکل ۴- (الف) تصویر SEM، و (ب) آنالیز نقشه‌ای EDS چپس قسمت بدنه



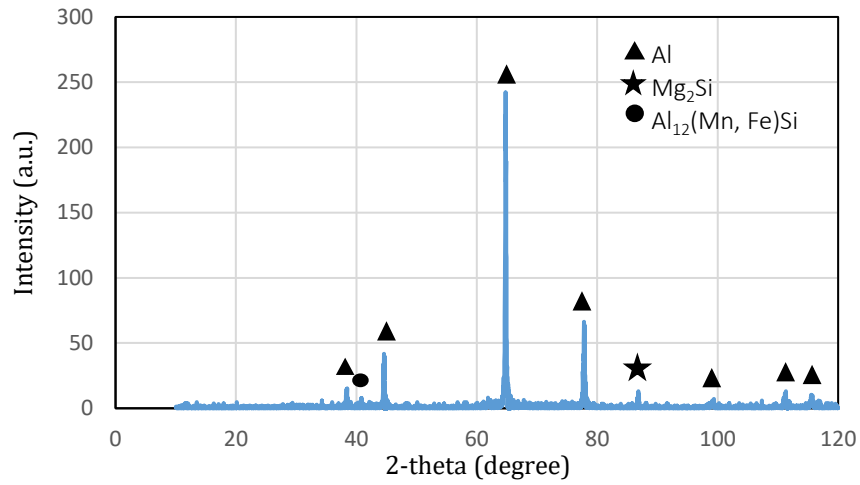
(ب)



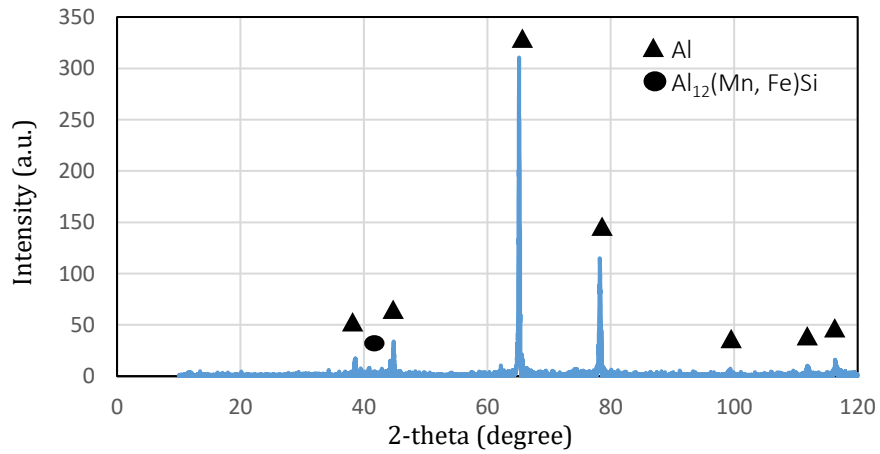
(الف)

شکل ۵- (الف) تصویر SEM، و (ب) آنالیز نقشه‌ای EDS چپس قسمت پایه

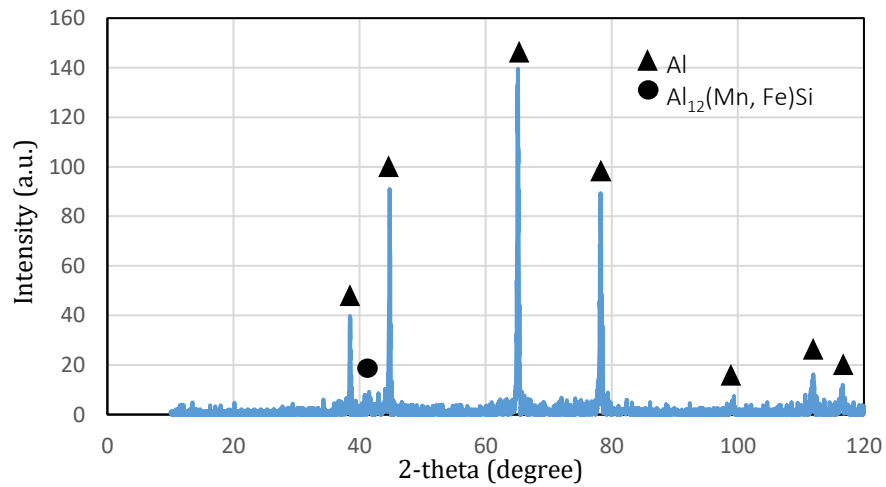




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- الگوی پراش اشعه ایکس چپیس: (الف) قسمت سر، (ب) قسمت بدنه، و (ج) قسمت پایه قوطی

## مطالعه پودرهای آلومینیوم حاصل از آسیابکاری چپس‌های

## ریز

شکل ۷ پودرهای حاصل از آسیابکاری چپس‌های ریز قسمت سر به مدت ۷۲ ساعت و قسمت بدنه و پایه قوطی‌های نوشیدنی به مدت ۸۰ ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پودرهای حاصل از آسیابکاری چپس‌های قسمت سر ریزتر از پودرهای قسمت یکپارچه بدنه و پایه است. دو پارامتر ترکیب شیمیایی و ضخامت قسمت‌های مختلف قوطی، عوامل اصلی و تأثیرگذار در فرآیند خردایش چپس‌ها می‌باشند. ضخامت قسمت‌های سر، بدنه و پایه قوطی‌های آلومینیومی به ترتیب برابر با ۱۶۰، ۱۱۰ و ۳۰۰ میکرومتر است [۲۲].

وجود تفاوت در ترکیب شیمیایی دو قسمت سر قوطی و قسمت یکپارچه بدنه و پایه، پارامتر غالب در خردایش پودر این دو قسمت است. قسمت سر به علت داشتن ترکیبات بین فلزی بیشتر به‌ویژه درصد بالای ترکیب  $Mg_2Si$  نسبت به قسمت یکپارچه بدنه و پایه، که با دقت در تصاویر SEM آن قسمت‌ها حفرات ریزی در کنار فازهای ناپایدار قابل مشاهده است که می‌توانند در حین آسیابکاری به‌عنوان مکان‌های مستعد جوانه‌زنی ترک عمل کنند. با توجه به این مورد در طول فرآیند آسیابکاری به‌هنگام برخورد گلوله‌های فولادی، ذرات آلومینیومی قسمت سر سریع‌تر شکسته شده و موجب خردایش بیشتر پودر می‌شود. در مورد قسمت یکپارچه بدنه و پایه که دارای ترکیب شیمیایی یکسانی هستند، تفاوت در ضخامت و در نتیجه‌ی آن توزیع فازهای ناپایدار و عبارتی نزدیک بودن‌شان به‌همدیگر، پارامتر غالب در خردایش پودر دو قسمت بدنه و پایه است. بطوریکه با در نظر گرفتن شرایط ساخت قسمت یکپارچه‌ی قوطی شامل بدنه و پایه مسلم است که فازهای ناپایدار در قسمت پایه به هم نزدیک‌تر می‌باشند و این در حالی است که در قسمت بدنه به‌علت کشش عمیق این فازها دورتر از همدیگر قرار می‌گیرند. در اینجا علیرغم اینکه قسمت پایه قوطی فازهای ناپایدار بیشتری نسبت به قسمت بدنه قوطی دارد ولی چون قسمت بدنه ضخامت کمتری نسبت به قسمت پایه دارد در طول فرآیند آسیابکاری در برابر برخورد گلوله‌های فولادی مقاومت کمتری داشته و سریع‌تر دچار شکست شده است در نتیجه پودرهای حاصل از آن ریزتر از پودرهای حاصل از قسمت پایه بوده است. لازم بذکر است که این نتیجه ممکن است با شرایط آسیابکاری تغییر کند، مثلاً اگر عامل کنترل‌کننده فرآیند اضافه شود ممکن است مکانیزم گسترش ترک از کنار فازهای ناپایدار غالب شود و در نتیجه قسمت پایه بیشتر ریز شود.

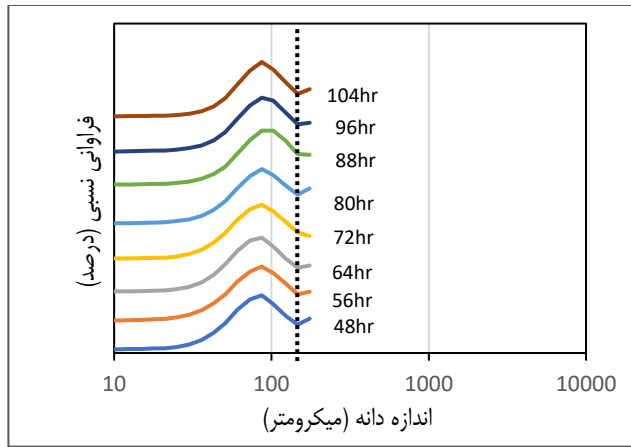
نتایج PSA ذرات پودر حاصل از فرآیند آسیابکاری بصورت نمودارهای توزیع اندازه که در آن فراوانی نسبی برحسب اندازه ذرات پودر رسم شده‌اند در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به شکل ۸ (الف) که مربوط به داده

درصد فراوانی پودر حاصل از چپس‌های قسمت سر قوطی آلومینیومی می‌باشد، کمترین اندازه ذره پودر در بازه ۴۸ تا ۱۰۴ ساعت، متعلق به ۷۲ ساعت آسیابکاری است که  $D_{90}$  و  $D_{50}$  آن به ترتیب برابر با ۱۰۹ و ۷۵ میکرومتر می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۸ (ب) که مربوط به داده درصد فراوانی پودر حاصل از چپس‌های قسمت بدنه قوطی آلومینیومی می‌باشد، کمترین اندازه ذره پودر در بازه ۴۸ تا ۱۰۴ ساعت، پس از ۸۰ ساعت آسیابکاری حاصل شده است که  $D_{90}$  و  $D_{50}$  آن به ترتیب برابر با ۲۵۸ و ۱۷۱ میکرومتر می‌باشد. در نهایت شکل ۸ (ج) که مربوط به پودر حاصل از چپس‌های قسمت پایه قوطی آلومینیومی می‌باشد، کمترین اندازه ذره پودر در بازه ۴۰ تا ۱۰۴ ساعت، متعلق به ۸۰ ساعت آسیابکاری است که  $D_{90}$  و  $D_{50}$  آن به ترتیب برابر با ۳۹۱ و ۲۶۰ میکرومتر می‌باشد. با توجه به منحنی‌های حاصل از نتایج PSA می‌توان مشاهده کرد،  $D_{90}$  پودر تولیدشده قسمت سر که از سری آلیاژی ۵۰۰۰ است، کمتر از اندازه ۱۵۰ میکرومتر است؛ درحالی‌که برای  $D_{90}$  پودرهای تولیدشده قسمت یکپارچه بدنه و پایه که از سری آلیاژی ۳۰۰۰ است این مقدار بیشتر از اندازه ۱۵۰ میکرومتر است.

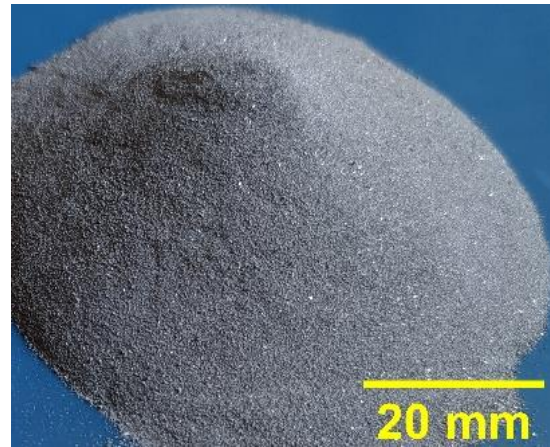
به‌منظور مطالعه صحت نتایج، توزیع اندازه ذرات با آزمایش دیگری مثلاً آزمون الک برای زمان‌های بهینه که در آن‌ها ریزترین اندازه  $D_{90}$  به‌دست آمده است، در اینجا بررسی شد. شکل ۹ نمودار توزیع اندازه پودرهای حاصل از آسیابکاری با استفاده از داده‌های تست الک را نشان می‌دهد. با بررسی منحنی‌های به‌دست‌آمده می‌توان مشاهده کرد که مقادیر  $D_{90}$  حاصل شده با مقادیر  $D_{90}$  حاصل از آزمون PSA تقریباً مطابقت دارد. همچنین برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر در ادامه در شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به‌ترتیب تصاویر SEM پودرهای آلومینیومی قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌های مستعمل نوشیدنی حاصل از آسیابکاری سیاره‌ای آورده شده است، تا بدین وسیله بتوان با روش میکروسکوپیکی نیز توزیع اندازه ذرات را مطالعه کرد.

شکل ۱۰ تصاویر SEM پودرهای قسمت سر با بزرگنمایی ۵۰ در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۴ ساعت آسیابکاری را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که تا مدت‌زمان ۳۲ ساعت خردایش و ریزشدن پودر صورت گرفته است و میانگین اندازه ذرات برحسب قطر فرت<sup>۱</sup> تقریباً ۱۳۱ میکرومتر به دست آمد، سپس در بازه زمانی ۴۰ تا ۴۸ ساعت مکانیزم جوش سرد رخ داده و میانگین اندازه ذرات پودر به ۱۴۹ میکرومتر افزایش یافته است و مجدداً در ادامه فرآیند پودر ریز شده است به‌طوری‌که در زمان ۷۲ ساعت ریزترین اندازه پودر با میانگین اندازه ۹۷ میکرومتر حاصل شده است. با ادامه فرآیند آسیابکاری تا ۱۰۴ ساعت، میانگین اندازه ذرات پودر به ۱۲۸ میکرومتر افزایش یافته است.

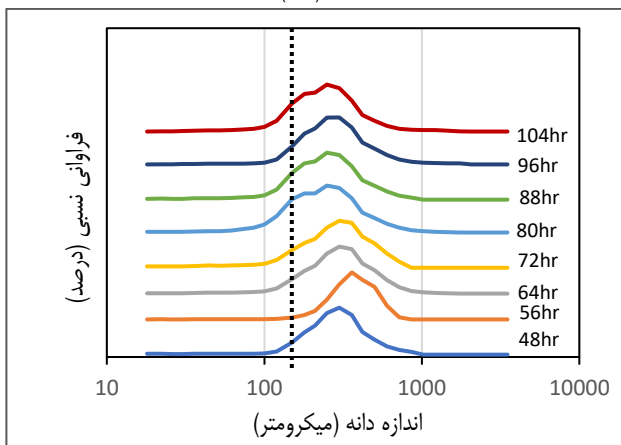
1. Feret's diameter



(الف)



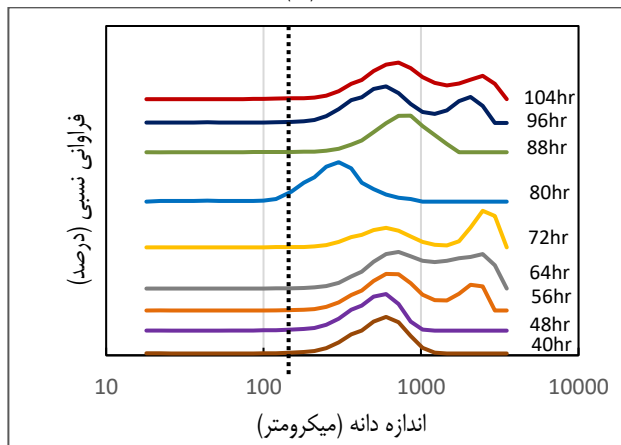
(الف)



(ب)



(ب)



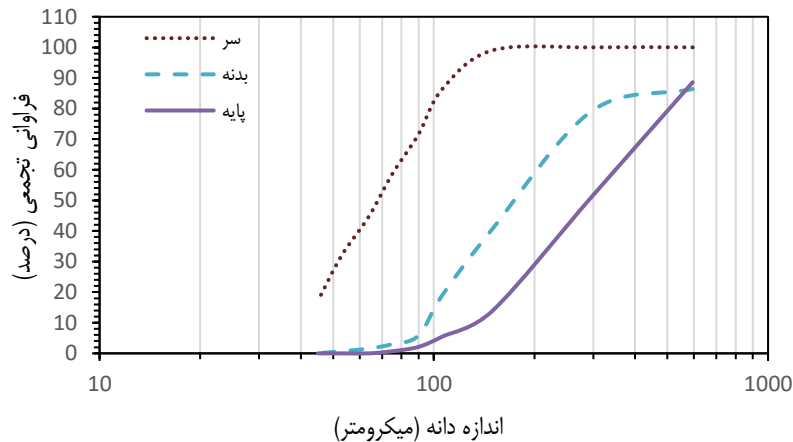
(ج)



(ج)

شکل ۸- منحنی‌های توزیع اندازه ذرات پودر به دست آمده از آزمون PSA: (الف) قسمت سر، (ب) قسمت بدنه، و (ج) قسمت پایه قوطی‌های نوشیدنی آلومینیومی برای ساعت‌های مختلف آسیاکاری

شکل ۷- تصویر میکروسکوپی ریزترین پودرهای حاصل از آسیاکاری چپس‌های ریز: (الف) قسمت سر به مدت ۷۲ ساعت، (ب) قسمت بدنه به مدت ۸۰ ساعت، و (ج) قسمت پایه به مدت ۸۰ ساعت



شکل ۹- منحنی‌های توزیع اندازه ذرات پودر تعیین شده با نتایج آزمون الک، پس از آسیابکاری قسمت سر به مدت ۷۲ ساعت، بدنه ۸۰ ساعت و پایه ۸۰ ساعت (زمان‌های بهینه که در آنها ریزترین اندازه  $D_{90}$  بدست آمده است)

با نگاهی دوباره و با دقت به تصاویر SEM ذرات پودر هر سه قسمت سر، بدنه و پایه می‌توان به‌وضوح مشاهده کرد که پودرهای قسمت سر در هر مدت زمان آسیابکاری ریزتر از پودرهای قسمت یکپارچه بدنه و پایه هستند. نتایج آزمون PSA نیز اثبات‌کننده این ادعا است. از این یافته می‌توان در مقیاس صنعتی به‌عنوان یک نوآوری استفاده کرد، به این صورت که با خردایش قوطی‌های آلومینیومی پرس‌شده به‌صورت عمده و در ادامه آسیابکاری آن‌ها با شرایطی که در اینجا ذکر شده است، می‌توان با گذراندن مواد حاصله از الک با روزهایی با اندازه ۱۵۰ میکرومتر (مش ۱۰۰) می‌توان پودر ریزتر آلیاژ آلومینیوم ۵۰۰۰ را از پودر درشت‌تر آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۰ جدا کرد. لازم بذکر است که این جداسازی حتی می‌تواند در هر زمان ابتدایی خردایش و یا آسیابکاری صورت گیرد، مثلاً در زمان ۲۴ ساعت می‌توان تفاوت معنی‌دار در اندازه ذرات هر سه قسمت به‌منظور تفکیک حداقل قسمت سر از قسمت یکپارچه بدنه و پایه را مشاهده نمود. آنالیز ترکیب شیمیایی توسط طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDS) به‌منظور شناسایی درصد عناصر موجود در پودرهای حاصل از آسیابکاری سیاره‌ای انجام گرفت.

جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ به ترتیب درصد عناصر موجود در پودر بهینه قسمت سر، بدنه و پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج حاصل شده می‌توان مشاهده کرد، پودر قسمت سر که از آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ است دارای ۵/۲۴٪ منیزیم می‌باشد که به‌مراستب بیشتر از درصد منیزیم موجود در پودر قسمت بدنه و پایه است که به ترتیب ۱/۳۵٪ و ۱/۵۲٪ اندازه‌گیری شد. همچنین پودر قسمت بدنه و پایه که از آلیاژ آلومینیوم سری ۳۰۰۰ هستند درصد آلومینیوم و منگنز بیشتری نسبت به پودر قسمت سر دارند. در ترکیب شیمیایی حاصل از پودر هر سه قسمت درصد مشخصی اکسیژن مشاهده شد که احتمالاً به دلیل واکنش پودر فلز آلومینیوم فعال در حضور هوا بوده است. در مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با مشخصات ترکیب شیمیایی آلیاژهای ۵۱۸۲ و ۳۰۰۴ که به‌ترتیب مربوط

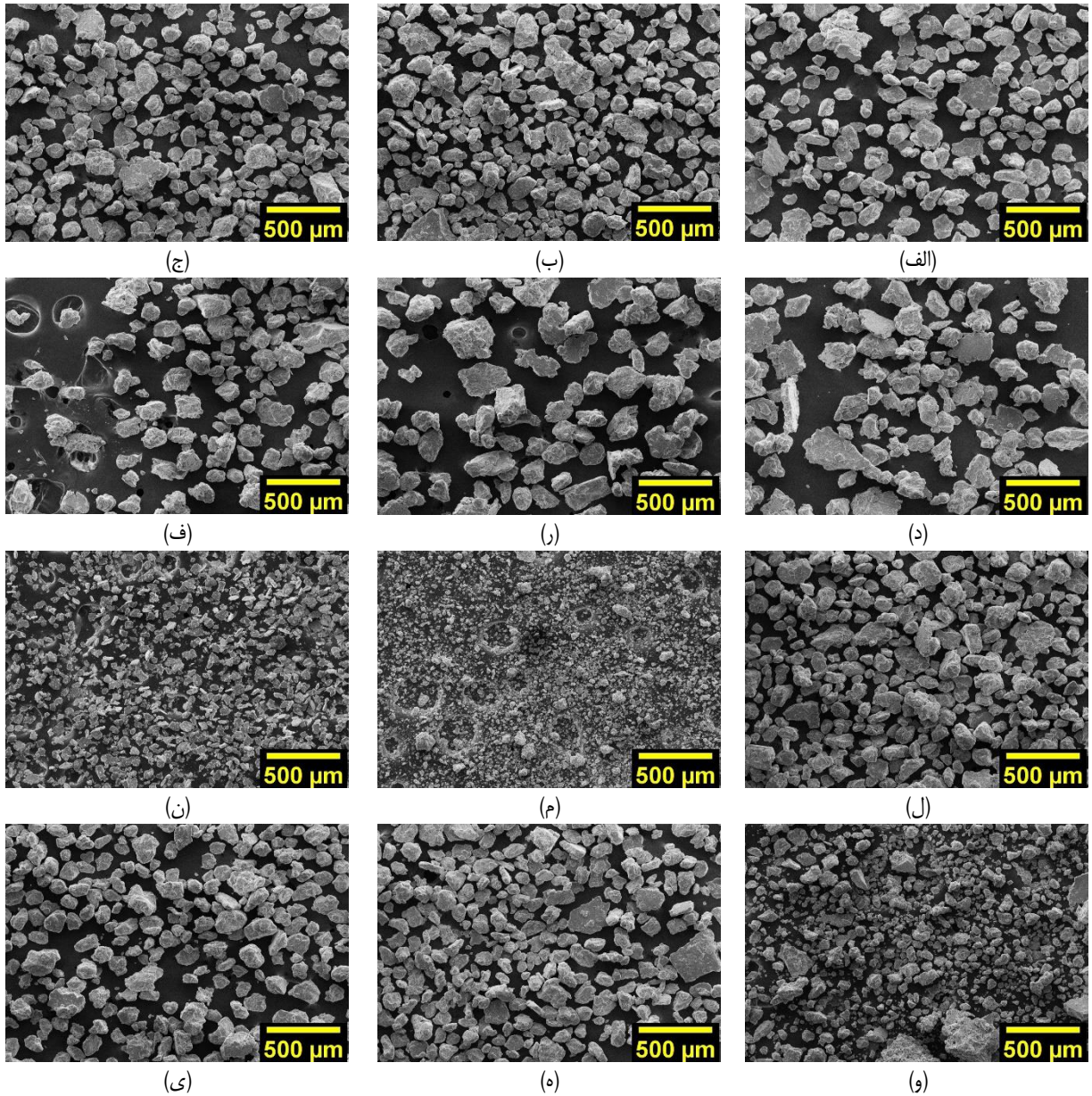
شکل ۱۱ تصاویر SEM پودرهای قسمت بدنه با بزرگنمایی ۵۰ در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۴ ساعت آسیابکاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا مدت‌زمان ۴۸ ساعت اندازه ذرات پودر خردایش قابل‌توجهی صورت نگرفته است و میانگین اندازه ذرات تقریباً ۹۳۲ میکرومتر به‌دست آمد. با ادامه فرآیند آسیابکاری پودرها تحت فرآیند خردایش شروع به ریز شدن کردند و در زمان ۸۰ ساعت ریزترین اندازه پودر با میانگین اندازه ذره ۲۴۵ میکرومتر حاصل شد. سپس در زمان ۸۸ ساعت اندازه ذرات به سبب جوش سرد درشت‌تر شده و میانگین اندازه ذرات به ۳۴۱ میکرومتر افزایش یافت ولی در ۱۰۴ ساعت خردایش مجدد پودر رخ داد و میانگین اندازه ذرات به ۲۹۲ میکرومتر کاهش یافت.

شکل ۱۲ تصاویر SEM پودرهای قسمت پایه با بزرگنمایی ۵۰ در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۴ ساعت آسیابکاری را نشان می‌دهد. پودرهای قسمت پایه نیز همانند قسمت بدنه از زمان ۱۶ تا ۸۰ ساعت تحت پدیده خردایش ریز شدند به‌طوری‌که میانگین اندازه ذرات تقریباً از ۱۱۱۴ میکرومتر به ۴۰۴ میکرومتر کاهش یافت و در نتیجه ریزترین اندازه پودر در زمان ۸۰ ساعت آسیابکاری حاصل شد. با ادامه فرآیند آسیابکاری تا ۱۰۴ ساعت، پدیده جوش سرد و درشت شدن پودر رخ داده و میانگین اندازه ذرات به ۵۱۵ میکرومتر افزایش یافت.

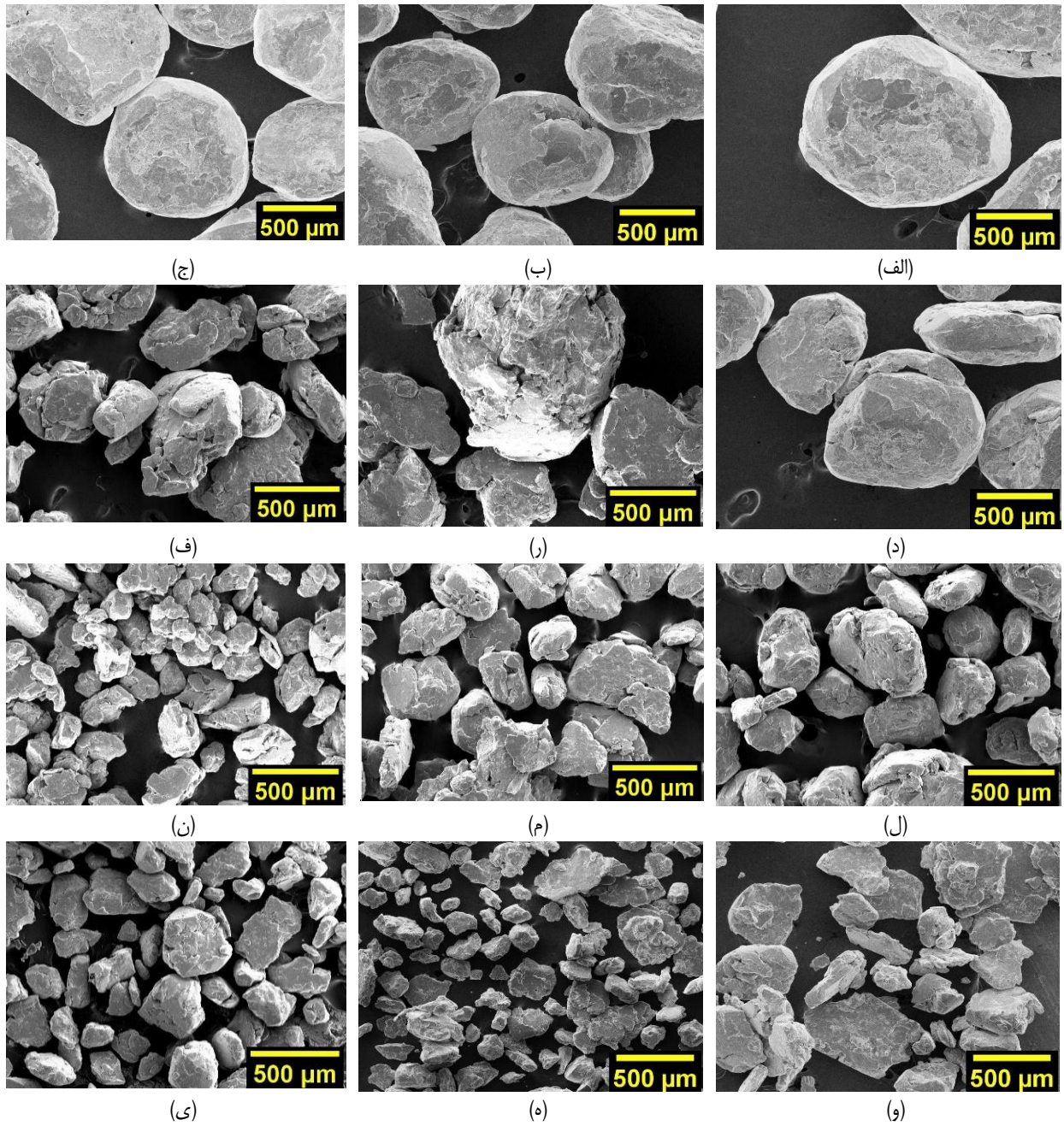
به‌طور کلی با مقایسه توزیع اندازه ذرات پودر به‌عنوان تابعی از زمان آسیابکاری می‌توان فهمید در طول فرآیند آسیابکاری دو مکانیزم خردایش و جوش سرد همواره با یکدیگر در حال رقابت هستند و چیرگی هر یک بر دیگری موجب ایجاد تغییراتی در اندازه ذرات پودر می‌شود که در شکل ۱۳ شماتیکی از رقابت بین این دو مکانیزم در طول آسیابکاری پیچس‌های قسمت سر، بدنه و پایه قوطی نشان داده شده است.

کمپانی‌های مختلف و جداسدن ترکیبات بین فلزی از فلز زمینه در حین آسیاکاری باشد.

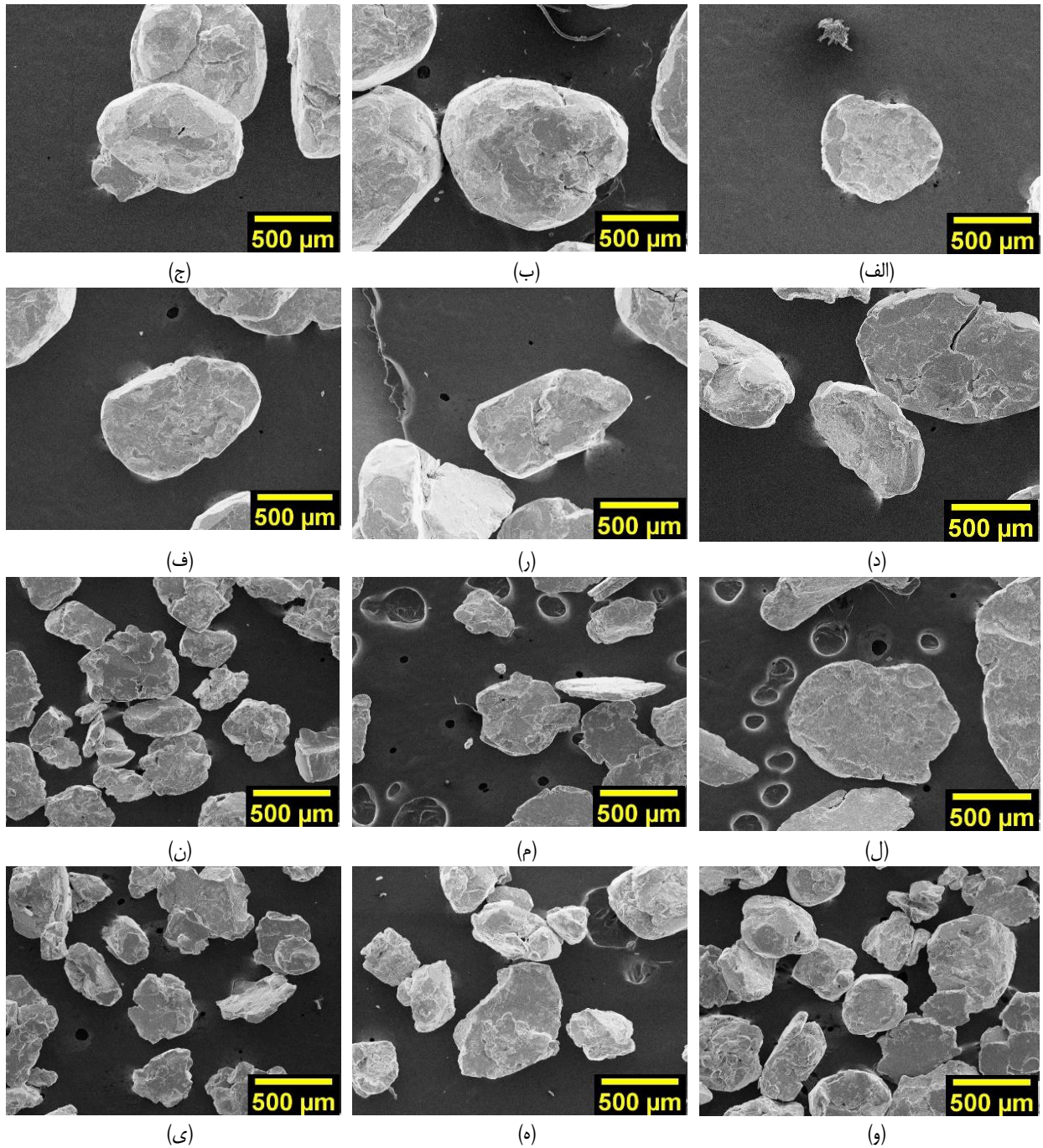
به قسمت سر و قسمت یکپارچه بدنه و پایه می‌باشد، تطابق نسبتا قابل قبولی مشاهده می‌شود. دلایل انحراف می‌تواند خطای آزمون EDS، خطای جزئی در ترکیب شیمیایی قوطی آلومینیومی نوشیدنی ساخت



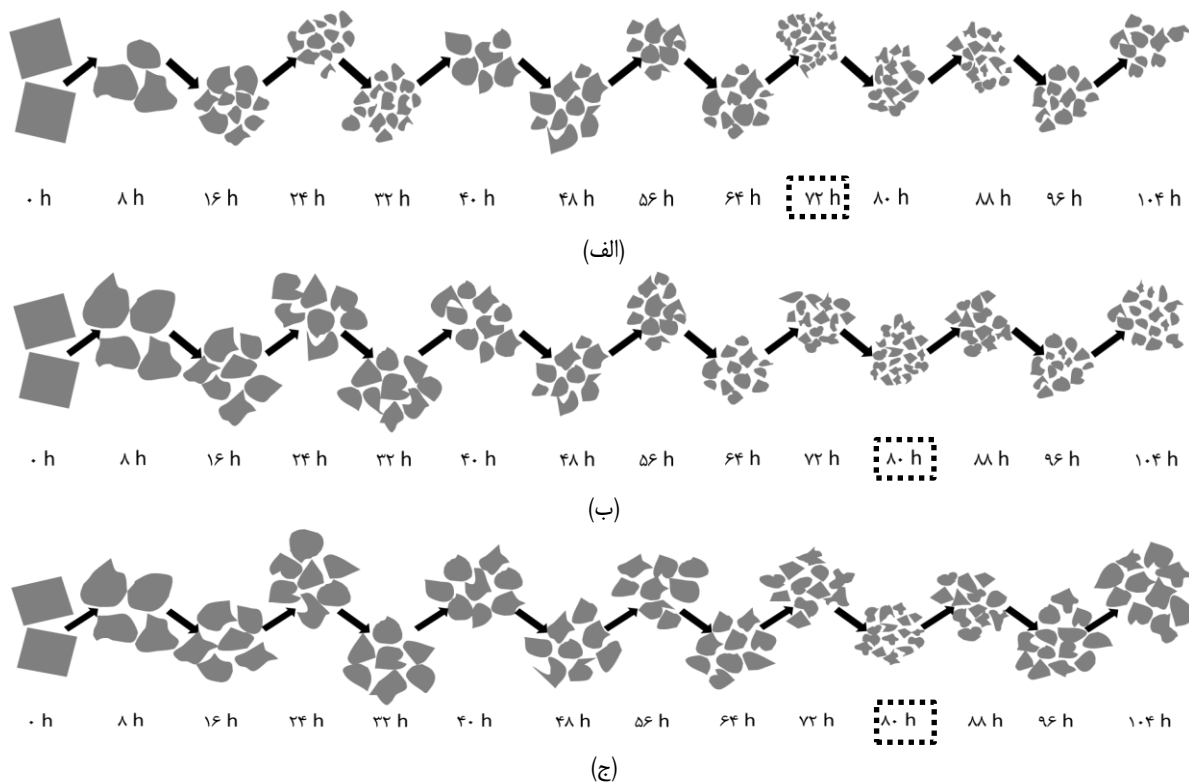
شکل ۱۰- تصاویر SEM مربوط به فرآیند آسیاکاری قسمت سر با بزرگنمایی ۵۰ در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۴ ساعت: (الف) ۱۶، (ب) ۲۴، (ج) ۳۲، (د) ۴۰، (ر) ۴۸، (ف) ۵۶، (ل) ۶۴، (م) ۷۲، (ن) ۸۰، (و) ۸۸، (ه) ۹۶، و (ی) ۱۰۴ ساعت



شکل ۱۱- تصاویر SEM مربوط به فرآیند آسیاکاری قسمت بدنه با بزرگنمایی ۵۰ در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۴ ساعت: (الف) ۱۶، (ب) ۲۴، (ج) ۳۲، (د) ۴۰، (هـ) ۴۸، (و) ۵۶، (ز) ۶۴، (ح) ۷۲، (ط) ۸۰، (ی) ۸۸، (ک) ۹۶، و (ل) ۱۰۴ ساعت



شکل ۱۲- تصاویر SEM مربوط به فرآیند آسیاکاری قسمت پایه با بزرگنمایی ۵۰ در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۴ ساعت: (الف) ۱۶، (ب) ۲۴، (ج) ۳۲، (د) ۴۰، (ه) ۴۸، (ف) ۵۶، (ز) ۶۴، (ح) ۷۲، (ط) ۸۰، (ی) ۸۸، (ک) ۹۶، و (ل) ۱۰۴ ساعت



شکل ۱۳- شماتیک تأثیر فرآیند آسیابکاری مکانیکی بر اندازه ذرات پودر: (الف) قسمت سر، (ب) قسمت بدنه، و (ج) قسمت پایه قوطی

جدول ۲- درصد عناصر موجود در پودر بهینه قسمت سر

عنصر	Al	Mg	O	C	Cu	Fe	Mn	Cr	Ti	Zn	Ca	Si	کل
Wt%	۸۸/۶۳	۵/۲۴	۲/۷۱	۱/۱۳	۰/۹۳	۰/۴۲	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱	۰/۰۸	۱۰۰

جدول ۳- درصد عناصر موجود در پودر بهینه قسمت بدنه

عنصر	Al	O	Mg	Zn	Cu	Si	Fe	C	Cr	Ca	Ti	کل
Wt%	۹۰/۴۲	۲/۴۵	۱/۳۵	۱/۰۹	۱/۰۰	۰/۹۴	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۱۵	۱۰۰

جدول ۴- درصد عناصر موجود در پودر بهینه قسمت پایه

عنصر	Al	Mn	Mg	O	Zn	Cu	C	Fe	Cr	Si	Ti	Ca	کل
Wt%	۹۱/۲۹	۱/۸۰	۱/۵۲	۱/۰۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱	۱۰۰



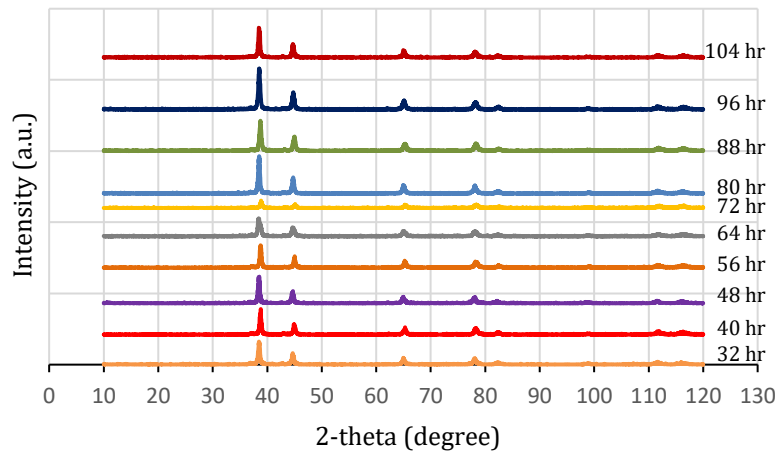
و پایه، ترک‌هایی مشاهده می‌شود که اشاعه‌شان به تأخیر افتاده است. در واقع در قسمت سر که فازهای ناپایدار به هم نزدیک‌تر بوده، ترک ایجاد شده در اطراف آن فازها سریع‌تر به هم رسیده‌اند ولی در قسمت یکپارچه فازها از هم دور بوده‌اند و اگر ترکی در کنار این فازها به وجود آمده نتوانسته مسیر خود را تا اتصال به ترک ایجاد شده در کنار فاز ناپایدار همسایه خود برساند.

سیالیت یا نرخ جریان توسط قیف هال برای پودرهای قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌های نوشیدنی به‌عنوان مشخصه دیگری از پودر تعیین شده و به ترتیب برابر با  $57/8$ ،  $59/3$  و  $61/1$  S/50g به دست آمد که می‌توان به طور میانگین مقدار  $59/3$  را برای هر سه مورد در نظر گرفت. به‌طور کلی ذرات پودر با مورفولوژی کروی سیالیت بهتری نسبت به ذرات با گوشه‌های تیز دارند ولی ریز بودن پودر به نوبه خود باعث افزایش سیالیت می‌گردد، بنابراین نتایج به دست آمده برای سیالیت منطقی به نظر می‌رسند. چگالی ظاهری نیز برای پودرهای قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌های نوشیدنی با روش قیف هال محاسبه شد که به ترتیب برابر با  $1/38$ ،  $1/43$  و  $1/46$  g/cm<sup>3</sup> به دست آمد.

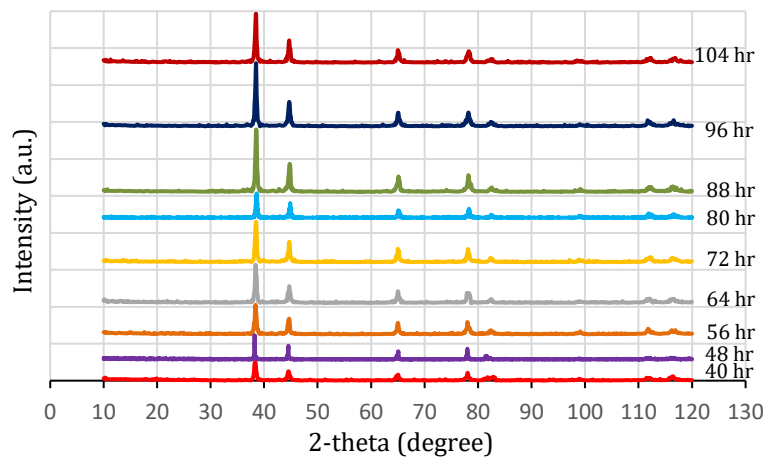
در شکل ۱۴ اثر زمان آسیاکاری بر الگوی پراش اشعه X پودرهای حاصل از چپس‌های قسمت سر (الف) و بدنه (ب) و پایه (ج) قوطی‌های آلومینیومی نشان داده شده است. در تمامی موارد، پیک‌های ظاهر شده در الگوی پراش اشعه ایکس پودرهای حاصله که تماماً پیک‌های آلومینیوم می‌باشند، به‌طور تقریبی در زوایای  $2\theta$  برابر با  $38$ ،  $44$ ،  $65$ ،  $78$ ،  $82$ ،  $98$ ،  $111$  و  $116$  قرار گرفته‌اند. همچنین پیک‌های مربوط به زوایای  $2\theta=41$  و  $2\theta=86/83$  که به ترتیب نشان‌دهنده ترکیبات بین فلزی  $Mg_2Si$  و  $Al_{12}(Mn, Fe)Si$  در الگوی پراش پرتو ایکس چپس‌های ریز بوده‌اند، در الگوی پراش اشعه ایکس پودرهای حاصله حذف شده‌اند. این امر به این دلیل است که در طول فرآیند آسیاکاری، ترکیبات بین فلزی مذکور از زمینه جدا شده‌اند (مطابق توضیحاتی که در مکانیزم خردایش و پودر شدن آورده شده است) و با توجه به ماهیت سرامیکی‌شان بیشتر از تکه‌های آلومینیومی ریز شده‌اند و شاید به دلیل چسبیدن این ذرات بسیار ریز به بدنه کاپ‌ها و گلوله‌ها در بستر پودر کمتر حضور یافته‌اند و تشخیص‌شان با این روش امکان پذیر نبوده است.

با بررسی‌های آماری انجام گرفته بر روی شدت و پهنای پیک‌های آلومینیوم می‌توان به این نتیجه رسید که با ادامه فرآیند آسیاکاری تا رسیدن به زمان بهینه هر قسمت (۷۲ ساعت برای قسمت سر و ۸۰ ساعت برای قسمت یکپارچه بدنه و پایه قوطی‌های آلومینیومی)، از شدت پیک‌ها کاسته شده و پهن‌تر شده‌اند که حاکی از ریز شدن اندازه بلورک‌ها می‌باشد. شکل ۱۵ تغییرات اندازه بلورک و کرنش شبکه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی را نشان می‌دهند. با توجه به منحنی‌ها، ریزترین اندازه بلورک برای قسمت سر، بدنه و پایه به ترتیب  $29$ ،  $35$  و  $37$  نانومتر به دست آمد.

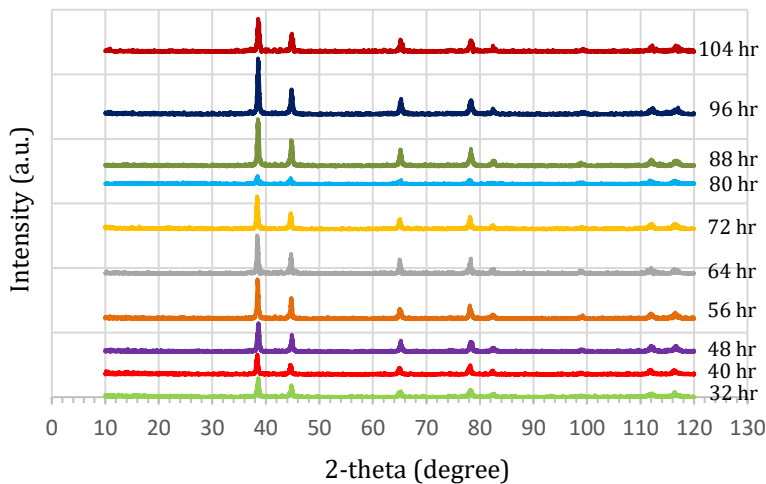
شکل ۱۶ تصاویر میکروسکوپ نوری به دست آمده از سطح مقطع پودرهای حاصل از آسیاکاری چپس‌های ریز قوطی‌های آلومینیومی را نشان می‌دهد که از نور پلاریزه به منظور آشکارسازی ریزساختار پودر استفاده شده است و مورفولوژی چندضلعی پودرها (به‌ویژه قسمت سر) به‌طور واضح قابل مشاهده است. همچنین در پودرهای درشت‌تر مربوط به قسمت بدنه



(الف)

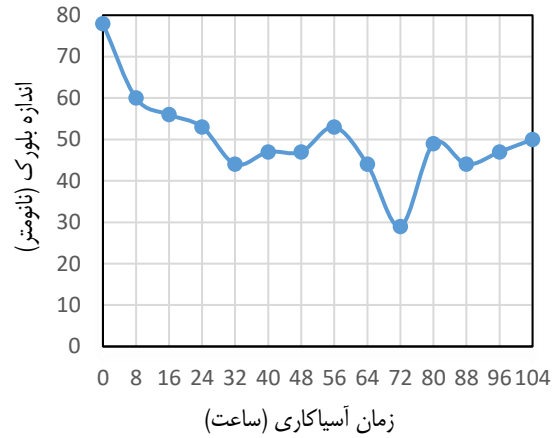
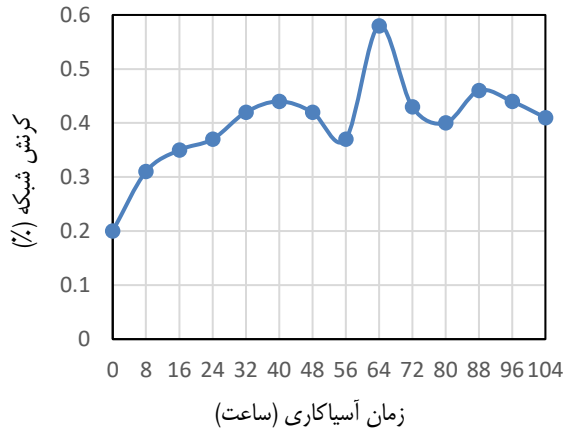


(ب)

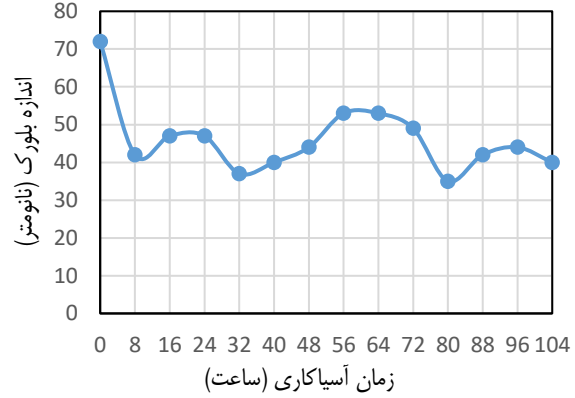
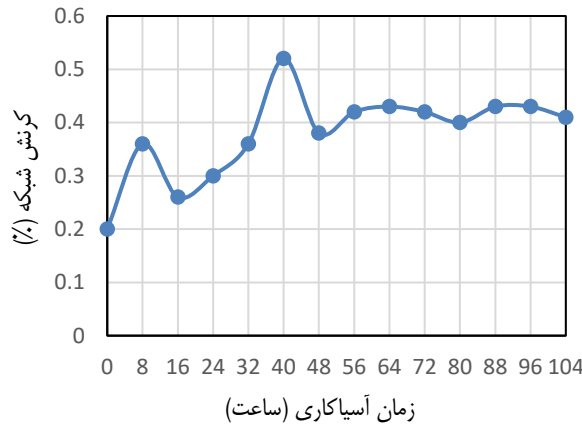


(ج)

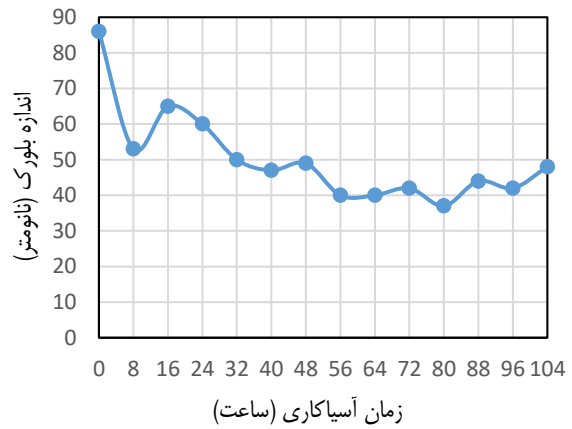
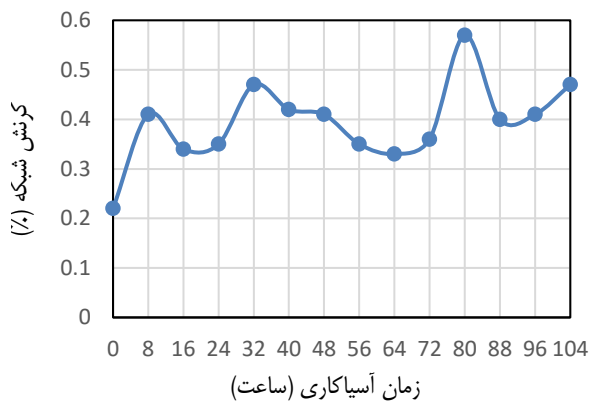
شکل ۱۴- الگوی پراش XRD پودرهای حاصل از آسیابکاری چپیس‌های: (الف) قسمت سر، (ب) بدنه، و (ج) پایه قوطی‌های نوشیدنی در زمان‌های مختلف



الف

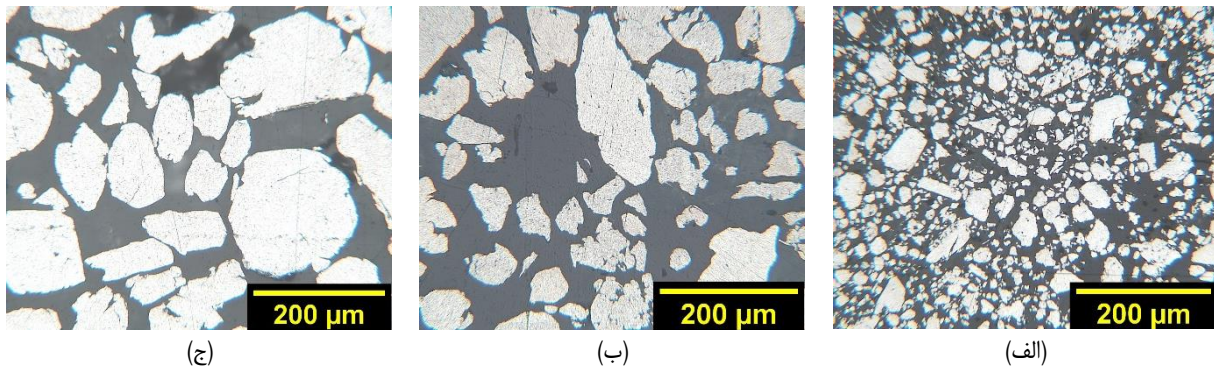


ب



ج

شکل ۱۵- تغییرات اندازه بلورک، و تغییرات کرنش شبکه در بازه زمانی ۰ تا ۱۰۴ ساعت برای سه قسمت: (الف) سر، (ب) بدنه و (ج) پایه



شکل ۱۶- تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع ذرات پودر حاصل از آسیاکاری چپس‌های ریز با بزرگنمایی  $100\times$ : (الف) قسمت سر، (ب) قسمت بدنه، و (ج) قسمت پایه

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، بازیافت حالت جامد قوطی‌های مستعمل نوشیدنی آلومینیومی از جنس آلیاژهای سری ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ با استفاده از دستگاه آسیای سیاره‌ای، بدون استفاده از هرگونه عامل کنترل‌کننده فرآیند با موفقیت انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی محصولات حاصل از آن نشان داد که:

۱. پودرهای حاصل از آسیاکاری چپس‌های قسمت سر قوطی با سری آلیاژی ۵۰۰۰ ریزتر از پودرهای قسمت یکپارچه بدنه و پایه با سری آلیاژی ۳۰۰۰ بود؛ به طوری که  $D_{90}$  پودر تولیدی قسمت سر دارای اندازه کمتر از ۱۵۰ میکرومتر و  $D_{90}$  پودر قسمت یکپارچه بدنه و پایه بیشتر از اندازه ۱۵۰ میکرومتر بود که از این دستاورد می‌توان در مقیاس صنعتی برای جداسازی پودر آلیاژ ۵۰۰۰ از پودر آلیاژ ۳۰۰۰ با استفاده از الک با اندازه مش ۱۵۰ میکرومتر استفاده کرد.

۲. ریزترین پودر در آسیاکاری به مدت‌زمان بهینه حاصل می‌شود که برای سه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی به ترتیب ۷۲، ۸۰ و ۸۰ ساعت با اندازه  $D_{90}$  پودر ۱۰۹، ۲۵۸ و ۳۹۱ میکرومتر به دست آمد. با ادامه فرآیند آسیاکاری به مدت زمان‌های بیشتر از زمان بهینه مکانیزم جوش سرد و درشت شدن پودر رخ می‌دهد.

۳. در فرآیند آسیاکاری چپس‌های هر سه قسمت سر، بدنه و پایه قوطی‌ها همواره دو مکانیزم خردایش که موجب کاهش اندازه ذرات پودر می‌شود و جوش سرد که باعث افزایش اندازه ذرات پودر می‌شود با یکدیگر در حال رقابت هستند و تسلط هر یک بر دیگری بر روی اندازه ذرات پودر تأثیر می‌گذارد.

۴. در این پژوهش مکانیزم خردایش پودر بر اساس دو متغیر ترکیب شیمیایی و ضخامت تعریف می‌شود. متغیر غالب در خردایش دو قسمت سر و قسمت یکپارچه بدنه و پایه عامل ترکیب شیمیایی می‌باشد چون این دو قسمت از نظر ترکیب شیمیایی متفاوت هستند و قسمت سر به دلیل داشتن فازهای ناپایدار بیشتر نسبت به قسمت یکپارچه بدنه و پایه بیشتر خرد شده و پودرهای حاصل از آن ریزتر بوده است. در مورد قسمت بدنه و

پایه یکپارچه که دارای ترکیب شیمیایی یکسانی هستند، متغیر غالب در خردایش ضخامت است. از آنجایی که ضخامت قسمت بدنه کمتر از قسمت پایه است در نتیجه پودرهای حاصل از آن به نسبت ریزتر از پودرهای قسمت بدنه می‌باشد.

۵. حذف پیک مربوط به ترکیبات بین فلزی مشاهده شده در چپس‌های ریز، از الگوی پراش اشعه ایکس پودرها، نشان از حذف کامل این ترکیبات نیست. بلکه در طول فرآیند آسیاکاری، ترکیبات بین فلزی مذکور از زمینه جدا شده‌اند و با توجه به ماهیت سرامیکی‌شان بیشتر از تکه‌های آلومینیمی ریز شده‌اند و شاید به دلیل چسبیدن این ذرات بسیار ریز به بدنه کاپ‌ها و گوله‌ها در بستر پودر کمتر حضور یافته‌اند و تشخیص‌شان با این روش امکان پذیر نبوده است.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: مازیار آزادبه؛

انجام آزمایش‌ها: هادی رضازاده؛

تحلیل داده‌ها و نتایج: هادی رضازاده، مازیار آزادبه؛

نگارش اولیه: هادی رضازاده؛

نظارت و نگارش نهایی: مازیار آزادبه.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

## References

1. PARASKEVAS, D., KELLENS, K., DEWULF, W. and DUFLOU, J. R. 2015. Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management. *Journal of Cleaner Production*, 105, 357-370.
2. Rojas-Díaz, L. M., Verano-Jiménez, L. E., Muñoz-García, E., Esguerra-Arce, J. and Esguerra-Arce, A. 2020. Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy. *Powder Technology*, 360, 301-311.
3. KHAING, H. Y. and KYWE, T. T. 2011. PRODUCTION OF FINE ALUMINUM POWDER FROM METALLIC ALUMINUM. The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology, Songkhla. Faculty of Engineering, 47-51.
4. TAGHIABADI, R., ROSTAMABADI, A., TASVIBI, S. and SHAERI, M. H. 2020. Increasing the recycling percent in liquid-state recycling of Al machining chips by friction stir processing. *Materials Chemistry and Physics*, 243, 122627.
5. PARASKEVAS, D., VANMEENSEL, K., VLEUGELS, J., DEWULF, W., DENG, Y. and DUFLOU, J. R. 2014. Spark Plasma Sintering As a Solid-State Recycling Technique: The Case of Aluminum Alloy Scrap Consolidation. *Materials*, 7, 5664-5687.
6. GRONOSTAJSKI, J., MARCINIAK, H. and MATUSZAK, A. 2000. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. *Journal of Materials Processing Technology*, 106, 34-39.
7. DUFLOU, J. R., TEKKAYA, A. E., HAASE, M., WELO, T., VANMEENSEL, K., KELLENS, K., DEWULF, W. and PARASKEVAS, D. 2015. Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling? *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1-4.
8. CHIBA, R. & YOSHIMURA, M. 2015. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf into c-channel by hot extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*, 17, 1-8.
9. MEHTEDI, M. E., FORCELLESE, A., SIMONCINI, M. and SPIGARELLI, S. 2018. A sustainable solid state recycling of pure aluminum by means of friction stir extrusion process (FSE). *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 030004-1-030004-6.
10. AHMAD, A., LAJIS, M. A., YUSUF, N. K. and WAGIMAN, A. 2016. HOT PRESS FORGING AS THE DIRECT RECYCLING TECHNIQUE OF ALUMINIUM – A REVIEW. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 2258-2265.
11. El Mehtedi, M., Buonadonna, P., Carta, M., El Mohtadi, R., Mele, A. and Morea, D. 2023. Sustainability Study of a New Solid-State Aluminum Chips Recycling Process: A Life Cycle Assessment Approach. *Sustainability*, 15(14), 11434.
12. PANDEY, A. K., PRAJAPATI, N., NAYAK, K. C. and DATE, P. P. 2019. Sustainable manufacturing process for recycling of aluminum alloy waste into direct product by high-pressure torsion process. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3099-3108.
13. Jiang, A., Wang, F., Xia, D., Li, M., Qiang, L., Zhu, Z., Wang, P., Fan, R., Lin, K. and Yang, Y. 2019. Aluminum nanoparticles manufactured using a ball-milling method with ammonium chloride as a grinding aid: achieving energy release at low temperature. *New Journal of Chemistry*, 43(4), 1851-1856.

14. GORRASI, G. and SORRENTINO, A. 2015. Mechanical milling as a technology to produce structural and functional bio-nanocomposites. *The Royal Society of Chemistry*, 1-16.
15. El-Eskandarany, M. S., Al-Hazza, A., Al-Hajji, L. A., Ali, N., Al-Duweesh, A. A., Banyan, M. and Al-Ajmi, F. 2021. Mechanical milling: a superior nanotechnological tool for fabrication of nanocrystalline and nanocomposite materials. *Nanomaterials*, 11(10), 2484.
16. YADAV, T. P., YADAV, R. M. and SINGH, D. P. 2012. Mechanical Milling: a Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, 22-48.
17. Shuai, C., He, C., Peng, S., Qi, F., Wang, G., Min, A., Yang, W. and Wang, W. 2021. Mechanical alloying of immiscible metallic systems: process, microstructure, and mechanism. *Advanced Engineering Materials*, 23(4), 2001098.
18. ALSAFFAR, K. A. and BDEIR, L. M. H. 2008. Recycling of Aluminum Beverage Cans. *Journal of Engineering and Development*, 12, 157-163.
19. Zolotarevskiy, V. S., Pozdniakov, A. V. and Khvan, A. V. 2011. Thermodynamic calculations of the effective solidification range and its relation to hot cracking of aluminum-based ternary alloys. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 52(1), 50-55.
20. von Hehl, A. and Krug, P. 2013. Aluminum and aluminum alloys. *Structural materials and processes in transportation*, pp.49-112.
21. Carrasco, C., Inzunza, G., Camurri, C., Rodríguez, C., Radovic, L., Soldera, F. and Suarez, S., 2014. Optimization of mechanical properties of Al-metal matrix composite produced by direct fusion of beverage cans. *Materials Science and Engineering: A*, 617, 146-155.
22. Liu, C. X., Qi, G. and Li, P. 2022. Crashworthy characteristics of sustainable thin-walled tubes: A study on recycled beverage cans. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(22), 3222-3236.