



## Effect of Aging Heat Treatment and Extrusion Process on Mechanical Properties of Al-3Mg-2.5Cu-xEr Alloy

Research Article

Mohammad Alipour<sup>1</sup>DOI: [10.22067/jmme.2023.82403.1109](https://doi.org/10.22067/jmme.2023.82403.1109)

### 1- Introduction

Al alloys are very popular for structural applications due to their low density, high strength, weldability and good workability. In particular the extruded profiles are used for making crash boxes in cars, fuselage stringers and frames for airframe structures. In particular the grain refinement in Al alloys is mainly by heterogeneous nucleation and grain growth. Several studies have shown the importance of addition of various grain refiners like Al-10Ti, Al-5Ti-1B, Al-8B to aluminum alloys has influenced the microstructure, mechanical and tribological properties. Especially the combination of new processing technique like strain induced melt activation process and grain refiners have enhanced the mechanical properties of Al Al-Mg-Cu series. On the other hand the rare earth elements like La, Sc, Ce and Er are also used for refining grain sizes and modifying the eutectic microstructures. Fang et al. studied the effect of rare earth element like Er on the mechanical and corrosion characteristics of AlZnMgCu alloy. The secondary precipitate like Al<sub>3</sub>Er with size of 15-25 nm was found to inhibit the recrystallization and improved fracture toughness. Liu et al. studied the effect of Sc and Zr addition on hardness and tensile properties of AlZnMgCu alloy sheets fabricated by a combination of hot and cold rolling. With the increase in Sc and Zr addition, the alloy found to exhibit resistance to recrystallization by inhibiting dislocation mobility. Hardness and tensile strength was found to be enhanced due to presence of large volume fraction of precipitates of Al<sub>3</sub>Sc and Al<sub>3</sub>Zr. Due to the possibility of aging of the alloy used in this research, the aging steps were carried out on this alloy and the simultaneous effect of aging heat treatment and mechanical deformation (extrusion) on this alloy was investigated. According to the research, the simultaneous effect of these two processes on this series of alloys has not been done. The main goal of this research is to study the effect of extrusion process and heat treatment on mechanical properties and microstructure of Al-3Mg-2.5Cu-xEr alloy.

### 2- Experimental

Al-3Mg-2.5Cu alloy was used as base alloy. Melting of aluminum alloy was done by heating up to ~750°C. Er was

added to the molten alloy at a temperature of 750°C using Amighan Al-30Er in different percentages of 0.5, 1, 1.5 and 2% by weight. After the successful addition of Er, the melt was poured into a permanent mold designed and manufactured according to ASTM B557M-10. A scanning electron microscope equipped with X-ray energy diffraction analysis (EDX) was used for microstructural studies. The cut parts of the alloy were polished and then etched using sandpaper to obtain the desired structure. The average grain size of the samples was measured according to ASTM: E112 standard. The phase was determined by X-ray diffraction method. Tensile test was performed on all the samples at room temperature with the SANTAM machine with a strain rate of 1 mm/min. Four samples were prepared and tested for each of the percentages and the average value was reported in the article. Before the tensile test, the extrusion process was applied to all the samples. In other words, samples made under different conditions using a hydraulic press at a speed of 1 mm/s at a temperature of 320 °C on a primary cylindrical billet with a diameter of 29 mm with an extrusion ratio of 6 to 1 (which is the ratio of the cross-sectional area of the initial billet to the final cross-sectional area after extrusion) was extruded. Figure 1 shows the metal mold, the dimensions of the tensile sample and the schematic of the extrusion mold. After applying extrusion on the samples, the tensile test was performed on the samples again. To study the effect of heat treatment (T6 conditions) on mechanical properties, Al-3Mg-2.5Cu alloy cast samples were heated to 460 °C for 8 hours and then immediately cooled with water. Finally, the cooled samples were heated at 120°C for 24 hours in an oven.

\*Manuscript received: May 14, 2023, Revised: July 9, 2023, Accepted, October 4, 2023.

<sup>1</sup> Corresponding author: Assistance Professor. Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran **Email:** [alipourmo@tabrizu.ac.ir](mailto:alipourmo@tabrizu.ac.ir)

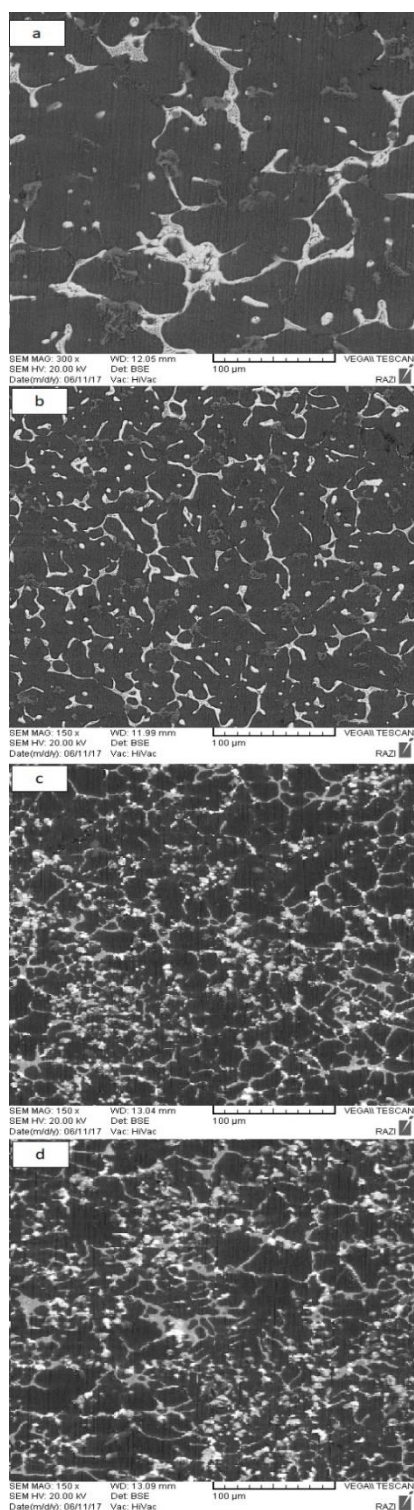


Fig 1. SEM microstructures of refined specimens, with (a) 0.0 wt.% Er, (b) 0.5 wt.% Er, (c) 1 wt.% Er and (d) 2 wt.% Er.

### 3- Results and Discussion

Figure 1 shows the microstructure images of Al-3Mg-2.5Cu alloy casting and modified with different weight percentages of Er. The images clearly show that after the addition of Er, a remarkable change occurs in the dendritic morphology of the Al-3Mg-2.5Cu alloy.

Figure 2 shows the effect of different amounts of Al-30Er on the grain size of Al-3Mg-2.5Cu alloy. It was found that the

average grain size of the basic Al-3Mg-2.5Cu alloy was about 550  $\mu\text{m}$ . The addition of Er to the Al-3Mg-2.5Cu alloy severely fines the primary columnar and coarse  $\alpha$ -Al grains and produces fine coaxial  $\alpha$ -Al grains with an average size of 65  $\mu\text{m}$ .

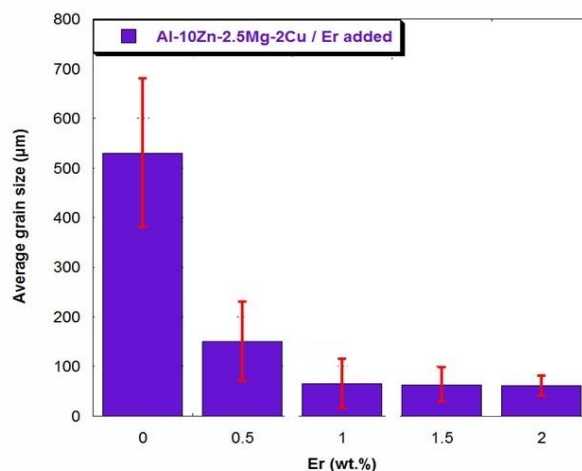


Fig. 2. Grain size variations with Er contents.

Table 1 shows the mechanical properties of Al-3Mg-2.5Cu alloy under different conditions. As seen in Table 1, the average ultimate tensile strength (UTS) of the samples before and after the T6 extrusion and heat treatment processes increased from 225 MPa to 602 MPa. The tensile properties of Al-3Mg-2.5Cu-xEr alloy mainly depend on the shape, size, distribution of  $\alpha$ -Al grains, secondary phase structure and distribution of intermetallic among the grains.

Table 1. UTS of unrefined and Er refined samples at the different conditions.

Er %	As-cast	As-cast-T6	As-cast-extrusion	As-cast-extrusion-T6
0	230	460	275	510
0.5	245	480	303	530
1	270	500	317	580
1.5	242	475	300	528
2	235	468	278	512

### 4- Conclusion

- 1- The mechanical properties of Al-3Mg-2.5Cu alloys mainly depend on the shape and size of deposits and grain size of  $\alpha$ -Al and the distribution of secondary phases.
- 2- Al-30Er is effective in reducing the grain size, changing the dendritic morphology and creating a fine and uniform microstructure.
- 3- The increase in tensile properties with the addition of Er nucleating agent is due to the breaking of primary  $\alpha$ -Al grains and the formation of  $\alpha$ -Al grains with a more uniform distribution and a narrower distribution of secondary phases.
- 4- The optimal percentage of germinating Er in this research was selected as one weight percent, and in this weight percentage of Amijan, the highest tensile properties were obtained.
- 5- The final tensile strength of casting alloys increases significantly by adding Er. This is mainly due to the microdispersion and uniform distribution of eutectic phase and  $\alpha$ -Al dendrite and strengthening through precipitated Al<sub>3</sub>Er particles using Oravan mechanism.



## مهندسی متالورژی و مواد

<https://jmme.um.ac.ir/>


## تأثیر عملیات حرارتی پیرسختی و فرآیند اکستروژن بر خواص مکانیکی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu-xEr\*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور<sup>(۱)</sup>

DOI: 10.22067/jmme.2023.82403.1109

**چکیده** در این مقاله، اثر جوانه زای Al-30Er، عملیات حرارتی و فرآیند اکستروژن بر روی آلیاژ آلومینیوم Al-3Mg-2.5Cu مورد بررسی قرار گرفت. آمیزان نادر خاکی Al-30Er در درصدهای 0.5، 1.5، 2 و ایربیوم به مذاب در دمای 750 درجه سانتیگراد افزوده شد. مقدار بهینه Er برابر یک درصد وزنی به دست آمد. مطالعات ریزساختاری و شکست نگاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنجی پراش اشعه ایکس انجام شد. عملیات حرارتی T6 شامل همگن سازی، کوئنچ سریع تا دمای اتاق و پیرسازی در دمای 120 °C به مدت 24 ساعت، برای دست یابی به استحکام بیشینه صورت گرفت. جهت از بین بردن تخلخل داخل نمونه ها و بهبود استحکام نمونه ها از فرآیند اکستروژن با نسبت 6 به 1 استفاده شد. برای نمونه های اولیه جهت اکستروژن قطر استوانه اولیه 29 میلی متر می باشد. با افزودن جوانه زا و اعمال عملیات حرارتی T6 و فرآیند اکستروژن، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی حاصل شد. میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه ها قبل و بعد از عملیات حرارتی T6 و فرآیند اکستروژن از 225 MPa تا 602 MPa افزایش یافت. افزودن یک درصد وزنی Er، اعمال عملیات حرارتی و فرآیند اکستروژن، باعث ایجاد 167٪ بهبود در استحکام کششی در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم پایه گردید.

**واژه‌های کلیدی** نادر خاکی، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی، ریزساختار.

### Effect of Aging Heat Treatment and Extrusion Process on Mechanical Properties of Al-3Mg-2.5Cu-xEr Alloy

Mohammad Alipour

**Abstract** In this study, the effect of Al-30Er grain refiners, extrusion and heat treatment conditions on an Al-3Mg-2.5Cu aluminum alloy was studied. Different amounts of Al-30Er (0.5 wt.% Er, 1 wt.0% Er, 1.5 wt.% Er and 2 wt.% Er) were added to the molten alloy at 750 °C. The optimum level of Er was found to be 1 wt.%. Microstructural examinations and fracture surfaces were conducted by scanning electron microscopy coupled with an energy dispersive spectrometry. T6 heat treatment including quenching to room temperature and aging at 120 °C for 24 h was employed to reach to the maximum strength. In order to eliminate the porosity inside the samples and improve the strength of the samples, the extrusion process was used with a ratio of 6 to 1. For the prototypes in the direction of extrusion, the diameter of the primary cylinder is 29 mm. By adding grain refiners and applying T6 heat treatment and extrusion process, a significant improvement in mechanical properties was achieved. The average ultimate tensile strength (UTS) of the samples before and after T6 heat treatment and extrusion process increased from 225 MPa to 602 MPa. Addition of one percent by weight of Er, applying heat treatment and extrusion process, caused a 167% improvement in tensile strength compared to the base aluminum alloy.

**Keywords** Rare earth, Heat treatments, Mechanical Properties, Microstructure.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۷/۱۲ می باشد.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

## مقدمه

خصوص اثرات و توزیع بسیاری از عناصر نادر خاکی (Y, Er, Ce, La, Gd, Nd, Sc, و غیره) در آلومینیوم خالص و آلیاژ آلومینیوم صورت گیرد.

بدلیل امکان پیرسازی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق، مراحل پیرسازی بر روی این آلیاژ انجام شد و تأثیر همزمان اعمال عملیات حرارتی پیرسازی و تغییر شکل مکانیکی (اکستروژن) بر روی این آلیاژ بررسی شد. طبق تحقیقات انجام شده تأثیر همزمان این دو فرآیند بر روی این سری از آلیاژها انجام نشده است. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه‌ی اثر فرآیند اکستروژن و عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu-xEr است.

## روش تحقیق

آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu آلومینیوم به عنوان آلیاژ اولیه مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند ذوب آلیاژ در یک کوره ی مقاومت الکتریکی با استفاده از بوتی ی کاربید سیلیسیم انجام شد. Al، Mg و Cu عنصری خالص صنعتی (همگی با خلوص % 99.9) به عنوان مواد اولیه در تهیه‌ی شمش به کار گرفته شدند. شمش‌های آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu آلومینیوم به قطعات کوچک برش خورده و سپس داخل یک بوتی‌ی گرافیتی قرار داده شد. بوتی‌ی گرافیتی در یک کوره مقاومت الکتریکی قرار داده شد. ذوب آلیاژ آلومینیوم با حرارت دهی تا دمای  $750^{\circ}\text{C}$  صورت گرفت. مقادیر مختلفی از Al-30Er (0.5 wt% Er، 1 wt% Er، 1/5 wt% Er و 2 wt% Er) به آلیاژ مذاب در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  افزوده شد.

پیش از انجام آزمون کشش، فرآیند اکستروژن بروی تمام نمونه‌ها اعمال گردید. به عبارتی نمونه‌های ساخته شده تحت شرایط مختلف با استفاده از پرس هیدرولیک با سرعت 1 mm/s در دمای  $320^{\circ}\text{C}$  بروی شمش استوانه‌ای اولیه با قطر 29 mm با نسبت اکستروژن 6 به 1 (که نسبت سطح مقطع بیلت اولیه به سطح مقطع نهایی پس از اکستروژن است) اکستروژن شد. شکل (۱) قالب فلزی، ابعاد نمونه کشش و شماتیک قالب اکستروژن را نشان می‌دهد. بعد از اعمال اکستروژن بر روی نمونه‌ها، آزمون کشش بر روی نمونه‌ها مجدد انجام شد.

برای مطالعات ریزساختاری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (ساخت Cam Scan MV2300) مجهز به تحلیل پراش انرژی پرتو (EDX) X مورد استفاده قرار گرفت. بخش‌های برش

ریزدانه کردن آلیاژهای آلومینیوم از متداول‌ترین عملیات در صنایع شمش ریزی و ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیوم است. این کار به طور معمول با اضافه کردن جوانه‌زا به مذاب صورت می‌گیرد. لذا استفاده از جوانه‌زای مناسب جهت ریزدانگی آلیاژهای آلومینیومی می‌تواند تأثیر زیادی بر کیفیت این گونه قطعات داشته باشد. آلیاژهای آلومینیوم سری ۵۰۰۰، یک آلیاژ آلومینیوم منیزیم است که خواص مقاومت در برابر خوردگی و چقرمگی و قابلیت جوشکاری خوب و استحکام متوسطی دارد [1] و از خانواده آلیاژهای آلومینیوم کارپذیر (Wrought Aluminum Alloy) است. آلیاژ آلومینیوم 5000 بیش از 70 سال پیش ساخته شد. با این حال طی دهه‌ی اخیر تحقیقات بسیاری پیرامون آن صورت گرفته است [1-4]. استحکام بالا و سبک بودن آلیاژ، ویژگی‌های جذابی هستند که به استفاده‌ی رایج آن در کاربردهای حمل و نقل منجر می‌شود. انواع این آلیاژها عبارتند از: آلیاژ آلومینیوم ۵۰۰۵، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۶، آلیاژهای آلومینیوم گروه ۵۰۰۰ گرید ۵۰۸۳، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶، آلیاژ آلومینیوم سری xxx5 شامل آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۴، آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۴، آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶، آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۷، آلیاژ آلومینیوم ۵۶۵۲ و آلیاژ آلومینیوم ۵۶۵۷ هستند. در ضمن، آلیاژ آلومینیوم 5083 بدلیل دارا بودن استحکام به وزن بالا کاربرد وسیعی در صنایع هوافضا و دریایی پیدا کرده است [5]. آلیاژ آلومینیوم 5083 معمولاً با فرآیند شکل دهی تولید می‌شود که به استحکام بالا می‌انجامد. با این حال، هزینه‌ی این روش تولید در مقایسه با روش ریخته‌گری بسیار بالاست. با این تفاسیر، معایب ریخته‌گری متداول، از جهت ساختار مواد دارای نواقص ناشی از ریخته‌گری، نظیر تخلخل و حفره‌های انقباضی است که به استحکام کم می‌انجامد [6]. در دهه‌های اخیر استفاده از جوانه‌زاهایی نظیر Al-5Ti-B و Al-8B بیشتر شده و بر خواص تریبولوژی، مکانیکی و ریزساختار مجموعه‌ی آلیاژهای AA5000 در مطالعات بسیاری گزارش شده است [7-9].

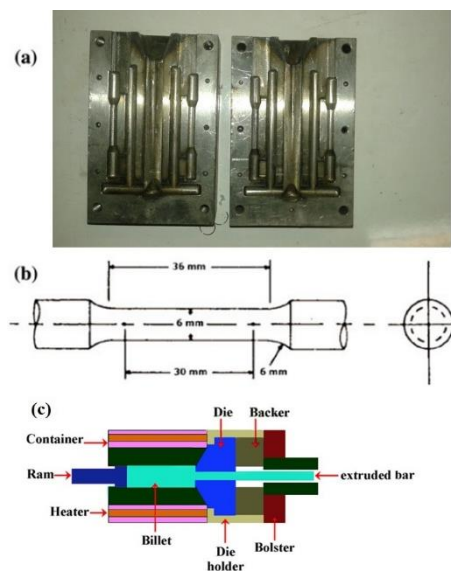
واقعیت این است که به واسطه‌ی پیچیدگی سیستم آلیاژ آلومینیوم و محدودیت مشخصه‌یابی اثرات عناصر نادر خاکی بر روی آلیاژهای آلومینیوم، همچنان مشکلات علمی بسیاری در این خصوص وجود دارد. بنابراین، لازم است که تحقیقاتی در

دندریتی احاطه شده است. طبق شکل (۳) ملاحظه می شود که افزودن Er تعداد مرزدا نه ها را افزایش داده و بالطبع توزیع همگن تر رسوبات بین فلزی را تقویت می کند. روشن است که افزودن Er شکل و اندازه فاز یوتکتیک را تغییر می دهد. مقدار بهینه ی Er که می-توان برای آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu به کار برد، 1 wt% وزنی می باشد.

شکل (۳) تصویر میکرو سکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu اصلاح شده با یک درصد وزنی Er را نشان می دهد. فازهای مختلف به وضوح در تصاویر قابل مشاهده هستند. علاوه بر این، EDX انجام شده روی این آلیاژ حاکی از وجود فاز بین فلزی  $Al_3Er$  بود که نشان می دهد مقدار Al و Er از سطح میانگین ترکیب شیمیایی در آلیاژ بالاتر بوده است.

شکل (۴) تأثیر مقادیر مختلف Al-30Er را بر اندازه دانه ی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu نشان می-دهد. مشخص شد که میانگین اندازه دانه ی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu پایه در حدود  $550 \mu m$  بوده است. افزودن Er به آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu دانه های  $\alpha-Al$  اولیه ی ستونی و درشت را به شدت ریز کرده و دانه های هم محور ریز  $\alpha-Al$  با میانگین سایز  $65 \mu m$  را به وجود می آورد. علت اصلی این است که ذرات  $Al_3Er$  حین انجماد دانه های  $\alpha-Al$  به عنوان عامل های جوانه زنی عمل می کنند. به وضوح مشاهده می شود که ریز ساختار آمیزان Er 30 wt% Al متشکل از ماتریس  $\alpha-Al$  و فاز  $Al_3Er$  بین فلزی است. فاز  $Al_3Er$  به طور یکنواخت در ماتریس  $\alpha-Al$  توزیع شده است. مکانیسم های مختلفی برای فرایند ریز شدن دانه پیشنهاد شده است. در برخی از مکانیسم ها گفته شده است که وجود ذراتی نظیر  $Al_3Er$  در پروسه ی ریز شدن دانه مؤثر است. وجود برخی عناصر آلیاژی نظیر Mg و Cu باعث بهبود بازده برخی جوانه زا ها نظیر آمیزان Al-30Er می گردد. با افزایش مقدار درصد وزنی Er، این ذرات مرزدا نه ها را تثبیت کرده و ریزشدگی دانه را افزایش می دهند. همچنین این ذرات باعث تثبیت ترک شده و استحکام را بهبود می بخشند.

خورده ی آلیاژ با استفاده از ورق سمباده ی پایه SiC پولیش شده و سپس با عامل کلر (2 ml HF، 2 ml HCl، 5 ml HNO<sub>3</sub>، 190 ml H<sub>2</sub>O) اچ شدند تا ساختار مورد نظر به دست آید. میانگین سایز دانه ی نمونه ها طبق استاندارد ASTM: E12 اندازه گیری شد. تعیین فاز با روش پراش پرتو X (ساخت Philips 1830) انجام شد. برای مطالعه ی اثر عملیات حرارتی (شرایط T6) بر خواص مکانیکی، نمونه های ریختگی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu به مدت 8 ساعت تا دمای  $460^\circ C$  حرارت داده شده و سپس با آب فوراً سرد شد. در نهایت، نمونه های سرد شده در دمای  $120^\circ C$  به مدت 24 ساعت حرارت داده شده و با کوره سرد شدند [2]. آزمون کشش روی تمام نمونه ها در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه SANTAM با نرخ کرنش 1 mm/min انجام شد. چهار نمونه آزمایشی برای هر حالت تست شده و مقدار میانگین در اینجا گزارش شده است.

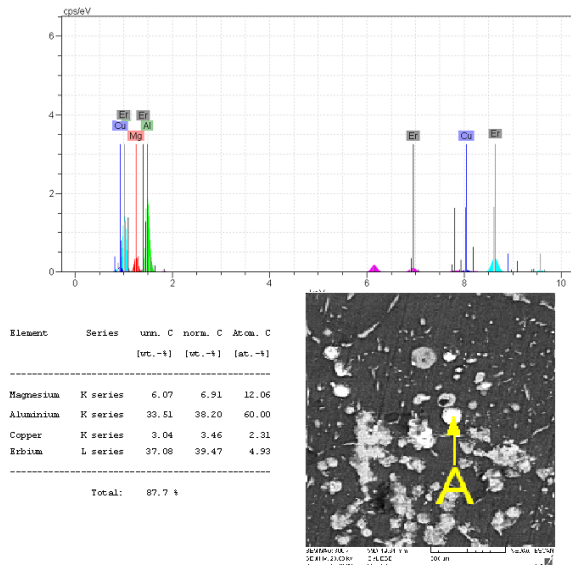


شکل ۱ (الف) قالب ریخته گری، (ب) ابعاد نمونه تست کشش، (ج) قالب اکستروژن

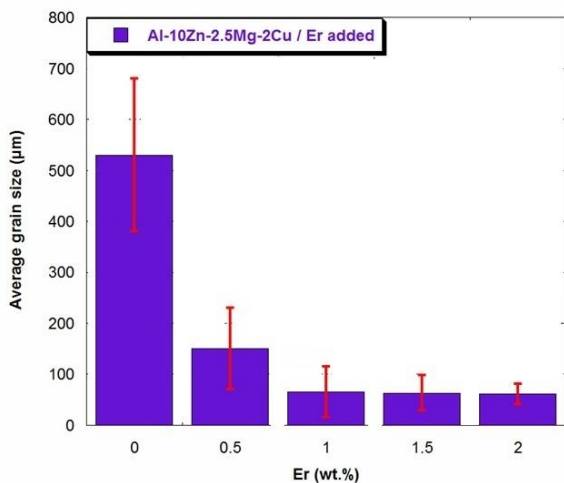
## نتایج و بحث

### مطالعات ریزساختاری

شکل (۲) تصاویر ریزساختار ریخته گری آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu و اصلاح شده با درصدهای وزنی مختلف Er را نشان می دهد. تصاویر به وضوح نشان می دهند که پس از افزودن Er، تغییر قابل ملاحظه ای در مورفولوژی دندریتی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu رخ می دهد. ریزساختار آلیاژ شکل گلولی دانه های  $\alpha-Al$  اولیه را نشان می دهند که با فازهای ثانویه ی بین



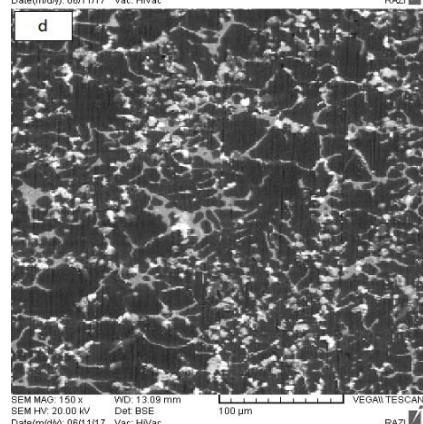
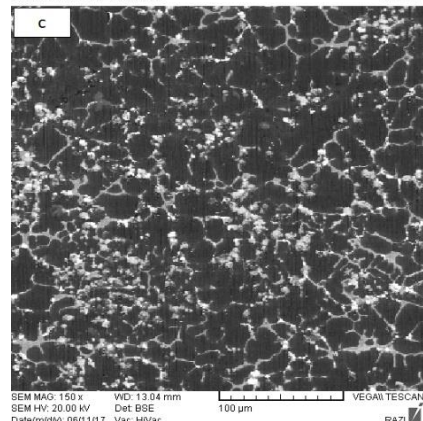
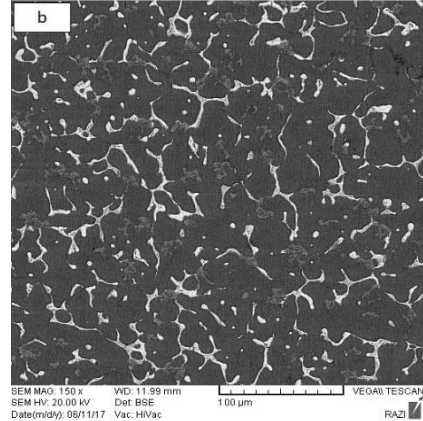
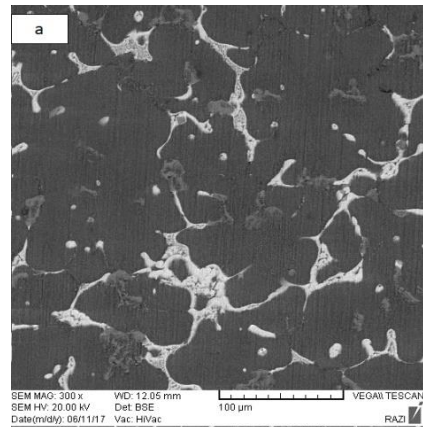
شکل ۳ آنالیز عنصری اشعه ایکس آلیاژ آلومینیوم Al-3Mg-2.5Cu / 1% Er



شکل ۴ اندازه دانه بر حسب میزان عنصر نادر خاکی Er

شکل (۵) تصویر آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu | صلاح شده با ۰,۵ wt% Er را پس از عملیات اکستروژن نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید کل ساختار بهم ریخته و شکل دانه‌ها کاملاً نامنظم بوده و در راستای اکستروژن کشیده شده است.

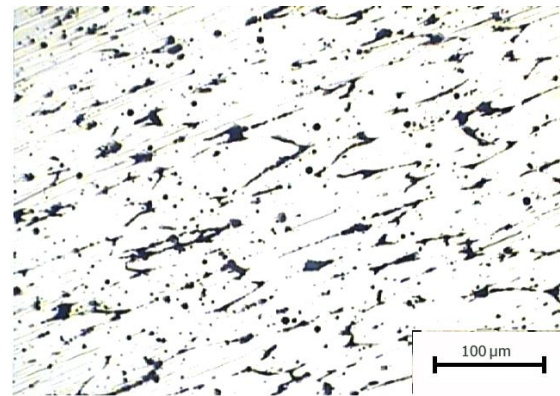
شکل (۶) تصویر آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu | صلاح شده با ۰,۵ wt%, ۱ wt%, و ۲ wt% Er را پس از عملیات حرارتی T6 نشان می‌دهد. روشن است که افزودن Er، شکل و اندازه رسوبات را تغییر می‌دهد. دلیل این امر که این سری از آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی دارند این است که بخاطر حضور عنصر مس در داخل ترکیب این آلیاژ باعث شده است



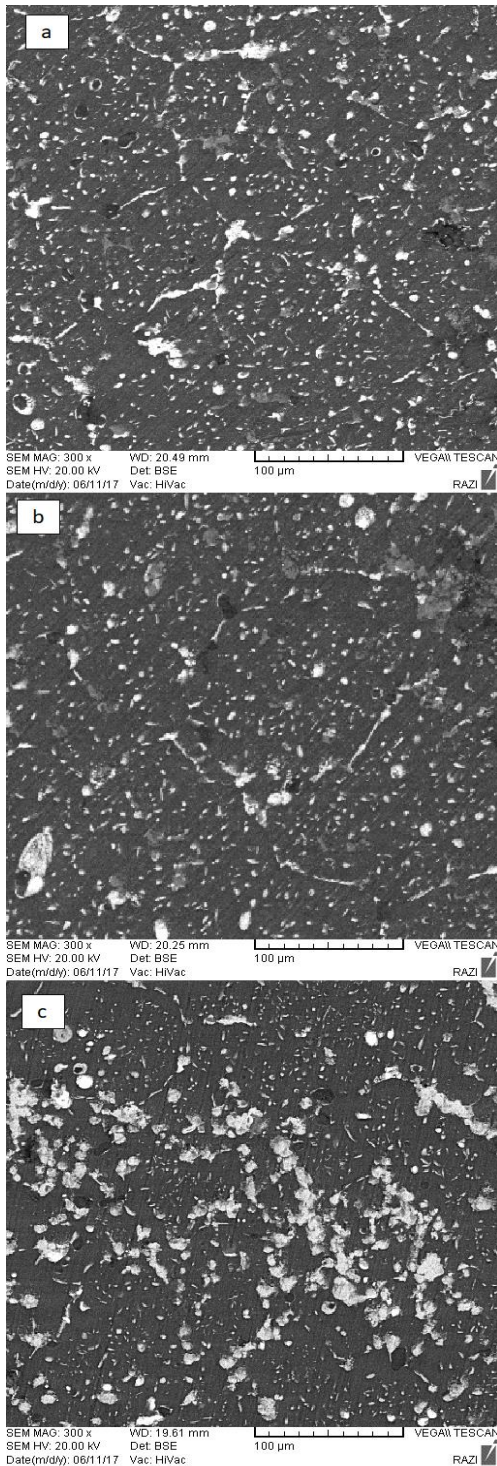
شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی ریزساختار آلیاژ پایه با (الف) صفر درصد Er، (ب) 0.5 درصد Er، (ج) 1 درصد Er و (د) 2 درصد Er

بدین معناست که نابجایی توسط رسوب رانده می‌شود. با این حال، برای کسر حجمی ثابتی از ذره، در مقادیر بالاتر به دلیل افزایش فواصل ذره، این تنش می‌تواند کاهش یابد. نابجایی نیز می‌تواند پیرامون یک ذره رسوب خم شود که مکانیسم حاکم بر آن، مکانیسم اوروان نامیده می‌شود.

که این سری از آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی داشته باشند.



شکل ۵ ریزساختار آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu بعد از فرآیند اکستروژن



شکل ۶ تصویر SEM نمونه‌های اصلاح شده با (الف) 0.5 درصد Er، (ب) 1 درصد Er و (ج) 2 درصد Er. پس از عملیات T6

رسوبات تشکیل شده در مراحل مختلف پیرسازی برای آلیاژهای 5xxx به این ترتیب است: محلول جامد فوق اشباع ( $\alpha$ ) تبدیل به فاز GP و سپس تبدیل به  $\eta'$  متاپایدار و سپس  $\eta$  پایدار می‌شود.

فاز  $\eta$ ، فاز تعادلی است و فصل مشترک ناهمدوس با ماتریس  $\alpha$ (Al) دارد. در این سه نوع رسوب، نواحی GP و فاز  $\eta'$  متاپایدار، فاز اصلی پیرسازی در آلیاژهای Al-Mg-Cu تجاری است. حضور ذرات فاز ثانویه معمولاً باعث اعوجاج شبکه می‌شود. این اعوجاج‌ها شبکه هنگامی رخ می‌دهند که ذرات رسوب از نظر ساختار کریستالوگرافی و اندازه با اتم‌های میزبان فرق داشته باشند. فاز  $\eta$  ( $\eta$ -MgCu) در آلیاژهای حاوی منیزیم و مس تشکیل می‌شود و همیشه به عنوان بخشی از یوتکتیک حضور دارد. بنابراین ساختار یوتکتیکی متشکل از فازهای آلومینیومی ( $\alpha$ ) و  $\eta$  است و به صورت تقریباً لایه ای است. در رابطه با نوع ساختار فاز اتا اطلاعات دقیقی وجود ندارد و یک ساختار پیچیده دارد.

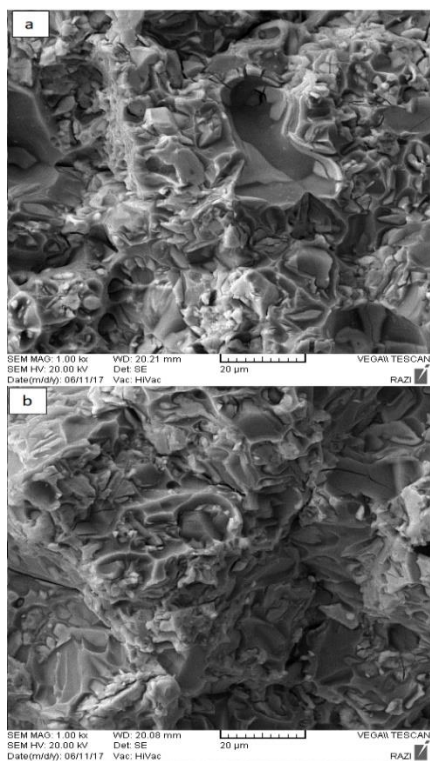
ذرات کوچکتر رسوب در یک شبکه‌ی میزبان باعث ایجاد تنش کششی در ساختار می‌شوند، درحالی که ذرات بزرگتر رسوب باعث ایجاد یک تنش فشاری در شبکه می‌شوند. نواقص نابجایی نیز یک میدان تنش ایجاد می‌کنند. بالای نابجایی یک تنش فشاری و پایین آن یک تنش کششی وجود دارد. متعاقباً، یک انرژی برهم کنش منفی بین یک نابجایی و یک رسوب وجود دارد که هریک به ترتیب یک تنش فشاری و یک تنش کششی ایجاد می‌کنند. به عبارت دیگر، نابجایی به سمت رسوب جذب می‌شود. به علاوه، یک انرژی برهم کنش مثبت بین یک نابجایی و یک رسوب وجود دارد که همان نوع میدان تنش را دارد. این

استحکام آلیاژ پایه را بهبود داد. ذرات میکرو یا نانومتری  $Al_3Er$  نقش مهمی در مکانیسم استحکام بخشی بازی می کنند. بنابراین، استحکام کششی نهایی آلیاژها با افزودن Er به طرز قابل توجهی افزایش یافت. این عمدتا به دلیل مقاوم سازی توسط ذرات رسوب  $Al_3Er$  است.

### شکست نگاری

شکل (۷) سطوح شکست آلیاژهای ریخته گری را تحت شرایط مختلف نشان می دهد. در شکل (۷) به وضوح مشاهده می شود که صفحات کلیواژ و رگه های پارگی روی تمام سطح شکست آلیاژ اصلاح نشده مشهود هستند.

به واسطه ی اصلاح Er روی یوتکتیک، ناحیه ی صفحات کلیواژ کاهش یافته و تعداد حفره ها افزایش می یابد. در نتیجه، آلیاژ اصلاح شده با 1 wt% Er از حفره های بیشتر و استحکام بالاتری در مقایسه با سایر آلیاژهای اصلاح شده دارد. تحت شرایط اصلاح نشده، سطح ترک عمدتا با صفحه ی کلیواژ پوشیده شده است. به وضوح می توان نتیجه گرفت که میزان تخلخل آلیاژ از طریق استفاده از جوانه زای Er و فرایند اکستروژن به شدت کاهش می یابد. تخلخل ها برای خواص کششی ریخته گری مضر بوده و مطالعات متعددی به تشکیل تخلخل ها و اثرات آن بر خواص کششی پرداخته اند [15-17].



### استحکام کششی

جدول (۱) خواص مکانیکی آلیاژ  $Al-3Mg-2.5Cu$  را تحت شرایط مختلف نشان می دهد. همان طور که در جدول (۱) مشاهده می شود، میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه ها قبل و بعد از فرایندهای اکستروژن و عملیات حرارتی T6 از 225 MPa به 602 MPa افزایش یافته است. خواص کششی آلیاژ  $Al-3Mg-2.5Cu-xEr$  عمدتا به شکل، اندازه، توزیع دانه های  $\alpha$ -Al، ساختار فاز ثانویه و توزیع بین فلزی ها در بین دانه ها بستگی دارد [10].

جدول ۱ استحکام کشش نهایی آلیاژ پایه و نمونه های اصلاح شده با Er تحت شرایط مختلف

Er %	As-cast	As-cast-T6	As-cast-extrusion	As-cast-extrusion-T6
0	230	460	275	510
0.5	245	480	303	530
1	270	500	317	580
1.5	242	475	300	528
2	235	468	278	512

علت اصلی این بهبود، به احتمال زیاد اندازه کوچکتر دانه ها است که به توزیع یکنواخت تر و کوچکتری از فازهای ثانویه (بین فلزی ها) در آلیاژ  $Al-3Mg-2.5Cu-xEr-T6$  منجر می شود. مشخص است که طبق نظریه ی هال-پچ هرچه دانه ها ریزتر باشند، استحکام بیشتر است [11]. ولی به واسطه ی مکانیسم های متعدد حاکم بر استحکام بخشی آلیاژهای Al-5xxx، به ویژه اندازه، وابستگی استحکام به اندازه ذره روشن نیست. ترکیبات بین فلزی ترد هستند و به عنوان محل های مهم جوانه زنی ترک حین بارگذاری شناخته می شوند. گزارش های متعددی نشان داده اند که رسوبات همدوس یا نیمه همدوس متاپایدار  $\eta$  حین عملیات پیرسازی تشکیل می گردند [12, 13]. استحکام نهایی نمونه های ریخته گری شده بدون افزودن آمیزان و فرآیند اکستروژن، مقدار کمی دارد که به دلیل وجود تخلخل های انقباضی داخل دانه ها و مرز دانه ها است. با توجه به فرایند اکستروژن، مقادیر UTS نمونه ها پس از عملیات حرارتی T6 بیشتر از نمونه های تحت شرایط دمایی T6 بدون فرایند اکستروژن هست [14].

از طرف دیگر، می توان با رسوب دادن ذرات  $Al_3Er$  پس از افزودن آمیزان Er 30 wt% به آلیاژ  $Al-3Mg-2.5Cu$

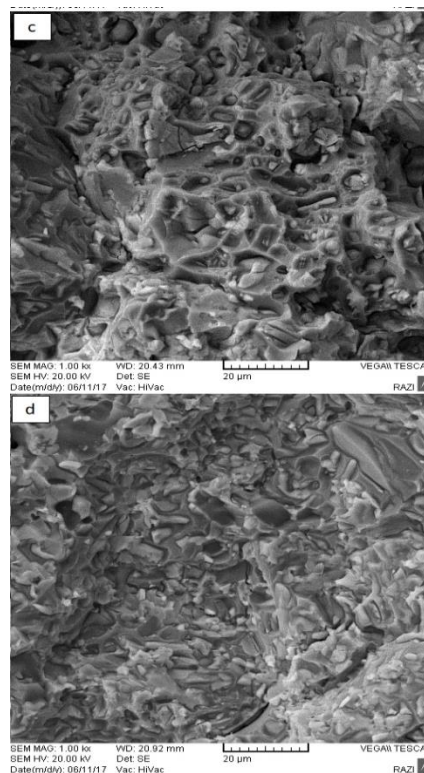


### نتیجه گیری

نتایج زیر از این مطالعه قابل استخراج است:

۱. خواص مکانیکی آلیاژهای Al-3Mg-2.5Cu عمدتاً به شکل، اندازه رسوبات و اندازه دانه  $\alpha$ -Al و توزیع فازهای ثانویه بستگی دارد.
۲. Al-30Er مؤثر در کاهش سایز دانه، تغییر مورفولوژی دندریتی و ایجاد ریزساختار ریز و یکنواخت است.
۳. افزایش خواص کششی با افزودن جوانه زای Er به دلیل شکست دانه های  $\alpha$ -Al اولیه و تشکیل دانه های  $\alpha$ -Al با توزیع یکنواخت تر و توزیع باریک تر فازهای ثانویه است.
۴. درصد بهینه جوانه زای Er در این پژوهش یک درصد وزنی انتخاب شد که در این درصد وزنی از آمیزان، بیشترین خواص کششی بدست آمد.
۵. استحکام کششی نهایی آلیاژهای ریخته گری با افزودن Er به طرز قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. این عمدتاً به دلیل ریزشدن و پخش یکنواخت فاز یوتکتیک و دندریت  $\alpha$ -Al و مقاوم سازی از طریق ذرات  $Al_3Er$  رسوبی با استفاده از مکانیسم اوراوان است.

### تقدیر و تشکر



شکل ۷ سطوح شکست نمونه کشش برای (الف) آلیاژ پایه، (ب) 1 درصد Er، (ج) 1 درصد Er بعد از عملیات T6 و (د) 1 درصد Er بعد از عملیات T6 و فرآیند اکستروژن

### مراجع

- [1] J. Hirsch, "Aluminium in innovative light-weight car design," *Materials Transaction*, Vol. 52, no. 5, pp. 818-824, (2011). <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201132>
- [2] T. Dursun, C. Soutis, "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys," *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 862-871, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>
- [3] A. Haghparast, M. Nourimotlagh and M. Alipour, "Effect of the strain-induced melt activation (SIMA) process on the tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy modified by Al-5Ti-1B grain refiner," *Materials Characterization*, Vol. 71, pp. 6-18, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.015>
- [4] M. Alipour, M. Emamy, "Effects of Al-5Ti-1B on the structure and hardness of a super high strength aluminum alloy produced by strain-induced melt activation process," *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4485-4492, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.044>
- [5] M. Alipour, M. Emamy, R. E. Farsani, M. H. Siadati and H. Khorsand, "Effects of a modified SIMA process on the structure, hardness and mechanical properties of Al-12Zn-3Mg-2.5Cu alloy," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 12, pp. 77-88, (2015).
- [6] M. Alipour, B.G. Aghdam, H.E. Rahnoma and M. Emamy, "Investigation of the effect of Al-5Ti-1B grain refiner on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy formed by strain-induced melt activation process," *Materials and*

- Design*, Vol. 46, pp. 766-775, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.058>
- [7] M. Alipour, M. Emamy, S.H.S. Ebrahimi, M. Azarbarmas, M. Karamouz and J. Rassizadehghani, "Effects of pre-deformation and heat treatment conditions in the SIMA process on properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy modified by Al-8B grain refiner," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 4482-4490, (2011).  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.026>
- [8] M. Alipour, M. Emamy, M. Azarbarmas and M. karamouz, "Effects of Al-5Ti-1B master alloy on the microstructural evaluation of a highly alloyed aluminum alloy produced by SIMA process," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1252, no. 1, pp. 1060-1072, (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3457501>
- [9] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz and M. Azarbarmas, "Effects of Al-8B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy," *TMS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 309-320, (2011). <http://dx.doi.org/10.1002/9781118062142.ch38>
- [10] G.S. Pradeep Kumar, P.G. Koppad, R. Keshavamurthy and M. Alipour, "Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061-TiC metal matrix composites," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 17, no. 3, pp. 535-544, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.006>
- [11] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz and M. Azarbarmas, "Effects of Al-5Ti-1B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy," *TMS Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 833-842, (2011). <https://doi.org/10.1002/9781118062173.ch105>
- [12] M. Alipour, M. Azarbarmas, F. Heydari, M. Houghoughi, M. Alidoost and M. Emamy, "The effect of Al-8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy," *Materials and Design*, Vol. 38, pp. 64-73, (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.008>
- [13] S.S. Mirjavadi, M. Alipour, A.M.S. Hamouda, M.K. Besharati Givi and M. Emamy, "Investigation of the effect of Al-8B master alloy and strain-induced melt activation process on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy" *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 308-316, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.013>
- [14] B.M. Afshari, S.S. Mirjavadi, Y.A. Dolatabad, M. Aghajani, M.K.B. Givi, M. Alipour and M. Emamy, "Effects of pre-deformation on microstructure and tensile properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy produced by modified strain induced melt activation," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Vol. 26, no. 9, pp. 2283-2295, (2016). [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64349-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64349-2)
- [16] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Azarbarmas and M. Karamouz, "Effect of predeformation and heat treatment conditions in the modified SIMA process on microstructural of a new developed super high-strength aluminum alloy modified by Al-8B grain refiner," *TMS Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 843-853, (2011).  
<https://doi.org/10.1002/9781118062173.ch106>
- [17] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz and M. Azarbarmas, "Effects of Al-8B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy," *TMS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 309-320, (2011). <http://dx.doi.org/10.1002/9781118062142.ch38>