

## تولید و مشخصه‌یابی نانو ساختار آلومینیوم ۷۰۱۴ به روش آلیاژسازی مکانیکی

دانیال داودی<sup>۱\*</sup>، سید امیر حسین امامی<sup>۲</sup> و علی سعیدی<sup>۳</sup><sup>۱</sup>کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران<sup>۲</sup>استاد یار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران<sup>۳</sup>استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۹۳/۳/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۳/۶/۱۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۳/۶/۲۲

## چکیده

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل دارا بودن خواص مطلوبی نظیر چگالی پایین و نسبت استحکام به وزن بالا در بسیاری از صنایع به ویژه خودرو سازی و هوا و فضا کاربرد گسترده ای پیدا کرده‌اند. در این پژوهش ابتدا روند تولید آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ به روش آلیاژسازی مکانیکی در یک آسیاب سیاره ای پر انرژی با نسبت وزنی پودر به گلوله ۱: ۲۰ تحت آتمسفر آرگون بررسی شد. با توجه به نتایج XRD و تصاویر XRY-MAP و همچنین تغییرات ثابت شبکه، با افزایش زمان آسیاب کاری به تدریج محلول جامد آلومینیوم حاوی عناصر روی و منیزیم ایجاد شده است و آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ پس از سه ساعت آسیاب کاری تشکیل شد. همچنین برای بدست آوردن تاثیر زمان آسیاب کاری بر روی اندازه بلورک ها، آسیاب کاری نمونه ها در زمان های (۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ ساعت) انجام شد. در نهایت اندازه بلورک ها در زمان ۱۵ ساعت آسیاب کاری حدود ۱۱ نانو متر گزارش شد. میزان سختی آلیاژ نیز با افزایش زمان آسیاب کاری افزایش پیدا می‌کند، به طوری که در زمان ۱۵ ساعت آسیاب کاری ۱۳۰ ویکرز گزارش شد.

کلمات کلیدی: آلیاژسازی مکانیکی، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴، سختی.

## Synthesis and Characterization of Al 7014 Nanostructure by Mechanical Alloying

Daniel Davoodi<sup>1\*</sup>, Seyed Amir Hossain Emami<sup>2</sup> and Ali Saidi<sup>3</sup><sup>1</sup>M.Sc. Student, Department of material engineering, Islamic Azad University, Najaf Abad branch, Iran<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of material engineering, Islamic Azad University, Najaf Abad branch, Iran<sup>3</sup>Professor, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

### Abstract

Aluminum and its alloys due to favorable properties such as low density and high strength to weight ratio, have found many applications in industries, particularly the automotive and aerospace. In this study, the production process of aluminum alloy 7014 using mechanical alloying in a high energy planetary mill, at a weight ratio of powder to bullet 1: 20, under argon atmosphere was investigated. According to the XRD results and XRY-MAP images and also the changes in lattice parameter, with increasing milling time gradually aluminum solid solution containing zinc and magnesium elements was created and aluminum alloy 7014 after a three-hour milling established. Also, effect of milling time on crystalline size, was investigated by milling at different times (4, 6, 8, 10, 15, 20 and 25 h). finally, the crystalline size of about 11 nm was reported on 15 hours of milling. Also the Alloy hardness value increased with increasing milling time, so 130 Vickers was reported after 15 hours of the milling.

**Keywords:** Mechanical alloying, Aluminum alloy 7014, Hardness.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: نجف آباد، فلکه دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد

تلفن: ۰۳۱۴۲۲۹۱۱۱۱، دورنگار: -، پیام‌نگار: davoodi.danial80@gmail.com

## ۱- مقدمه

استحکام آن قبل از آلیاژسازی مکانیکی ۳۵ MPa بوده است. به عبارت دیگر با ایجاد ساختار نانو استحکام آلومینیوم ۱۰ برابر افزایش پیدا کرده است. جعفری و همکارانش [۱۰] خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آلیاژ Al2024 نانو ساختار را با آلیاژ Al2024 تجاری مقایسه کردند. خواص سایشی نانو ساختار Al2024 به مراتب بهبود داشته است. با توجه به مطالب بیان شده هدف از این پژوهش بررسی روند تشکیل پودر نانو ساختار آلومینیوم آلیاژی ۷۰۱۴ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و همچنین تاثیر زمان آسیاب کاری بر روی اندازه بلورک های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ است.

## ۲- نحوه آزمایش

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق، پودرهای آلومینیوم، روی، منیزیم، منگنز، آهن، مس و سیلیسیم با خلوص بالاتر از ۹۸ درصد و دانه بندی زیر ۳۰۰ میکرومتر بودند. آسیاب کاری نمونه ها در یک آسیاب سیاره ای پر انرژی مدل FP2 با ۶۰۰ دور در دقیقه و با حجم محفظه ۱۲۵ میلی لیتر و نسبت وزنی پودر به گلوله ۱: ۲۰ [۱۱] (۷ گرم پودر، ۱۴۰ گرم گلوله) یا ۵ گلوله فولادی پر کرم و تحت آتمسفر گاز خنثی آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد انجام شد. در هر ۱ ساعت آسیاب کاری دستگاه جهت خنک شدن محفظه های آسیاب ۱۵ دقیقه خاموش می شد. همچنین به دلیل ناچیز بودن مقدار چسبندگی ذرات آلومینیوم به گلوله ها از مواد PCA<sup>۱</sup> مانند اسید استئاریک استفاده نشد. آنالیز فازی نمونه ها توسط پراش سنج پرتو ایکس مدل Philips- PW30-40 صورت گرفت. ولتاژ مورد استفاده در دستگاه ۳۰ کیلو وات و جریان اعمالی ۳۰ میلی آمپر بود. در کلیه آزمایش ها از پرتو ایکس تک موج CuK $\alpha$  با طول موج ۱/۵۴۰۵ آنگسترم استفاده شد. برای شناسایی فازها نیز از نرم افزار X'Pert-MPD استفاده شد. بررسی ساختار محصولات نیز به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO-VP435 انجام گرفت. جهت بدست آوردن اندازه بلورک ها و همچنین مقدار کرنش شبکه از رابطه ویلیامسون- هال رابطه (۱) استفاده شد.

$$\beta \cos\theta = 0.9\lambda/d + 2A \varepsilon \sin\theta \quad (\text{معادله ۱})$$

آلیاژهای آلومینیوم دارای تنوع وسیعی از کاربردهای صنعتی هستند که به دلیل چگالی کم، نسبت استحکام به وزن بالا، امکان بالا رفتن استحکام به خاطر رسوب سختی، هدایت الکتریکی و گرمایی بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، انبساط حرارتی پایین و... موارد استفاده آنها بعد از فولاد از سایر فلزات بیشتر است و در بسیاری از صنایع به ویژه خودرو سازی و هوا و فضا کاربرد گسترده ای پیدا کرده اند [۱]. اما در کنار این مزایا، معایبی نظیر استحکام کم در دماهای بالا، ضریب انبساط حرارتی بالا، مدول صلبیت و مقاومت به سایش پایین در آلومینیوم و برخی از آلیاژهای آن وجود دارد که کاربرد آن را محدود می کند [۲]. به همین دلیل برای بهبود عملکرد آلومینیوم تاکنون راه حل های مختلفی از جمله استفاده از آلومینیوم های آلیاژی به جای استفاده از آلومینیوم خالص، آلیاژهای نانو ساختار و همچنین استفاده از کامپوزیت های زمینه آلومینیومی مطرح شده است [۳]. در بین روش های ایجاد آلیاژهای نانو ساختار، آلیاژسازی مکانیکی یکی از روش های پر کاربرد در حالت جامد است. اساس کار این روش بر تعادل دو فرآیند جوش سرد و شکستن ذرات در کار سرد شدید در حین آسیاب کاری بنیان نهاده شده است [۴]. آلیاژ سازی مکانیکی یک فرآیند تولید در حالت جامد برای ایجاد مواد همگن و یک روش ساده و مفید برای تولید فازهای تعادلی و فازهای غیر تعادلی از مواد تجاری است. یکی از بزرگترین مزایای آلیاژ سازی مکانیکی، تولید و به دست آوردن مواد نوینی است که در حالت عادی مثل ذوب و ریخته گری، قابل ترکیب و آمیزش نیستند. خواص محصول نهایی پودر آسیاب شده نظیر توزیع اندازه ذره، درجه بی نظمی یا آمورف شدن به نوع آسیاب، زمان آسیاب کاری، مشخصات محفظه آسیاب و سرعت گردش آن بستگی دارد [۵-۸].

مطالعات نشان داده که خواص آلومینیوم و آلیاژهای آن در مقیاس نانو نسبت به خواص آلومینیوم تجاری بهبود داشته است. به عنوان مثال Khan و همکارانش [۹] پودر آلومینیوم خالص نانو ساختار را به وسیله آلیاژسازی مکانیکی تولید کردند. اندازه بلورک ها پس از ایجاد قطعه بالک ۷۵ نانومتر و میزان استحکام آن ۳۷۰ MPa گزارش شده است. در حالی که

<sup>۱</sup>Process control agent

بنابراین برای تعیین پهنای پیک پس از رسم پیک با نرم افزار Sigma Plot و برازش آن با تابع Gaussian چهار متغیره، مقداری که برای b گزارش شده را در ۰/۰۴۱۱ ضرب شد تا پهنای در نیمه ارتفاع پیک بر حسب رادیان بدست آمد. همچنین برای به دست آوردن ثابت شبکه از قانون براگ معادله (۵) استفاده شد.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{معادله ۵})$$

که در این رابطه،  $\theta$  زاویه پراش پیک و  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس (۱,۵۴۰۵ آنگسترم) می باشد. از آنجا که شبکه بلوری آلومینیوم FCC است، بنابراین d به صورت معادله (۶) محاسبه می شود.

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (\text{معادله ۶})$$

نمونه ها در یک قالب یکطرفه و تحت فشار ۹۰۰ مگاپاسکال فشرده شده و در یک کوره ی لوله ای تحت آتمسفر آرگون به مدت ۱ ساعت زینتر شدند. جهت اندازه گیری و مقایسه سختی پودرهای تولیدی از دستگاه ریزسختی سنج مدل Koopa، و نرم افزار Hareh استفاده شد. بدین منظور نمونه ها مانع سرد و پولیش کاری شدند. لازم به اشاره است سنجش سختی با مقیاس ویکرز [۱۲] طی نیروی ۱۰۰ گرم و مدت بارگذاری ۳۰ ثانیه صورت گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تولید پودر نانو ساختار آلومینیوم آلیاژی

۷۰۱۴

برای تولید آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ به روش آلیاژسازی مکانیکی عناصر تشکیل دهنده آن طبق ترکیب شیمیایی آن مطابق جدول (۱) مخلوط شدند. به منظور تعیین روند تشکیل آلومینیوم آلیاژی ۷۰۱۴، روند تغییرات فازی پودر ها برای تشکیل آلیاژ در طول آسیاب کاری بررسی شد. شکل (۱) الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری آلومینیوم ۷۰۱۴ را از زمان صفر آسیاب کاری تا زمان تشکیل آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴

که در این رابطه  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس برحسب نانو متر، d اندازه بلورک برحسب نانو متر، A ثابت است که در بیشتر مواقع برابر با ۱ است.  $\beta$  پهنای پیک در نیمه ارتفاع آن (بر حسب رادیان)،  $\varepsilon$  کرنش شبکه و  $\theta$  زاویه براگ است. به منظور بالا بردن دقت و حذف خطا در اندازه گیری پهنای پیکها، از نرم افزار Sigma Plot که یک نرم افزار پیشرفته برای رسم نمودار و برازش منحنی است استفاده شد. در واقع اطلاعات تک تک پیکها، شامل مقادیر زاویه تابش اشعه پرتو ایکس و شدت اشعه تفرق یافته در هر زاویه را که توسط نرم افزار پراش پرتو ایکس گزارش می شود به نرم افزار Sigma Plat داده و پیک مجدداً رسم شد. پیک رسم شده دقیقاً همان شکل پیک رسم شده توسط دستگاه پراش پرتو ایکس را دارد. سپس با استفاده از نرم افزار، پیکها را با تابع Gaussian چهار متغیره که شبیه ترین تابع به شکل پیک می باشد برازش و فرمول ریاضی پیک به همراه برخی پارامترهای آماری نظیر Rsqr (ضریب برازش) بدست آمد. فرمول عمومی تابع Gaussian چهار متغیره به صورت زیر می باشد که در آن  $a, b, x_0, x_1$  مقادیر ثابت هستند.

$$y = y_0 + a \exp[-0.5(x - x_0/b)^2] \quad (\text{معادله ۲})$$

در این رابطه پارامتر b معیاری از پهنای پیک است. برای تعیین اندازه بلورک نیاز به داشتن پهنای پیک در نیمه ارتفاع یعنی پهنای در ارتفاع  $y = y_0 + a/2$  است که اگر این رابطه را در معادله (۲) قرار دهیم دو مقدار برای x بدست می آید که نسبت به خط  $x = x_0$  متقارن هستند. اگر این دو مقدار را  $x_1$  و  $x_2$  بنامیم داریم:

$$x_1 = x_0 + b\sqrt{2 \ln 2} \quad (\text{معادله ۳})$$

$$x_2 = x_0 - b\sqrt{2 \ln 2}$$

اختلاف این دو مقدار پهنای در نیمه ارتفاع پیک می باشد.

البته واحد آن درجه می باشد چرا که اطلاعات مربوط به زوایای تابش پرتو ایکس به نمونه بر حسب درجه به نرم افزار داده شده است. با تبدیل این مقدار به رادیان، پهنای پیک در نیمه ارتفاع بر حسب رادیان ( $\beta$ ) بدست می آید:

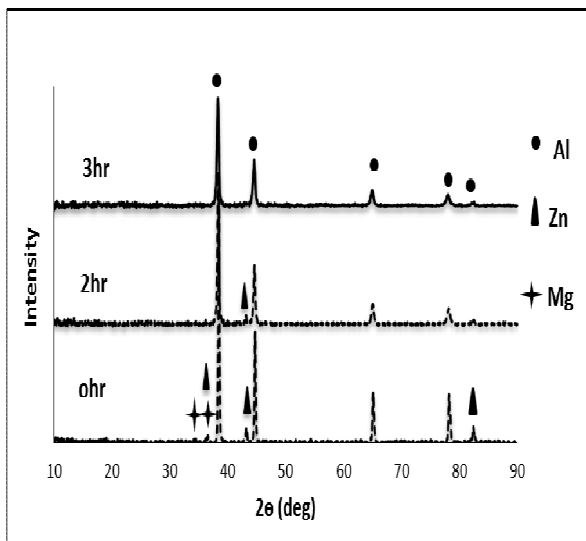
$$\beta = \pi/180 (x_1 - x_2) = \pi/180 * 2\sqrt{(2 \ln 2)} * b \quad (\text{معادله ۴})$$

$$\beta = 0.0411 * b$$

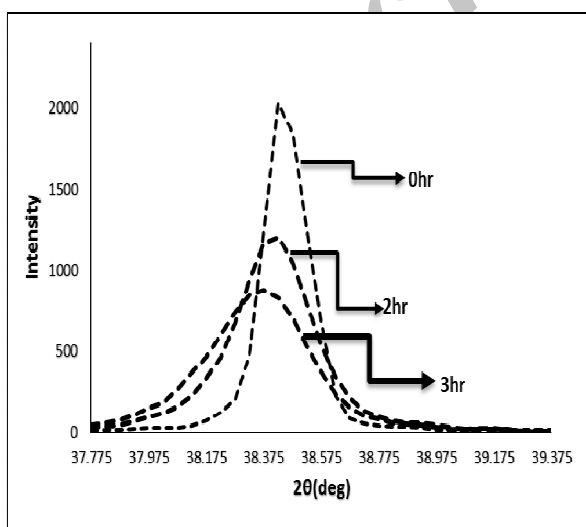
- حضور تنش های تک محوری باقی مانده
- حل شدن عناصر آلیاژی با شعاع های اتمی متفاوت در شبکه بلور

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۱۴ [۱۵].

عناصر	Al	Zn	Mg	Mn	Si	Cu	Fe
درصد وزنی	بقیه	5.2-6.2	2.2-3.2	0.3-0.7	0.5	0.3-0.7	0.5



شکل ۱: الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری آلومینیوم ۷۰۱۴ در زمان های مختلف آسیاب کاری

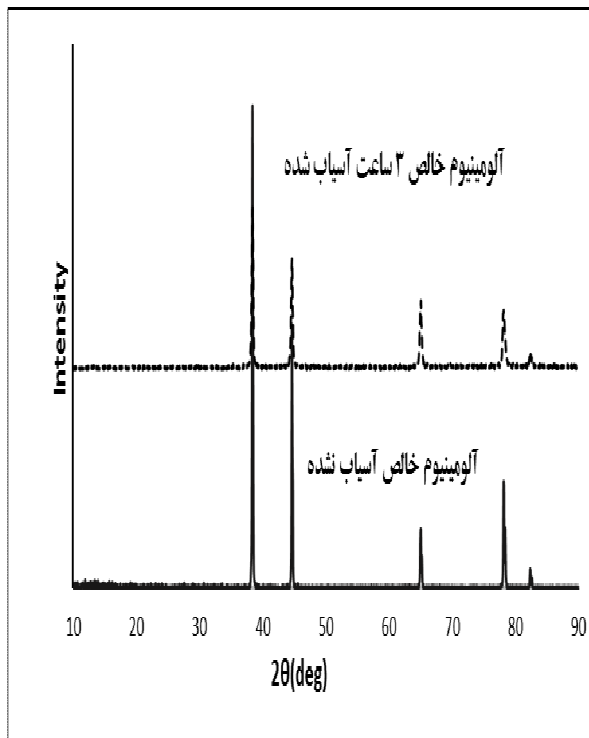


شکل ۲: جابجایی پیک (۱۱۱) آلومینیوم بر حسب زمان آسیاب کاری

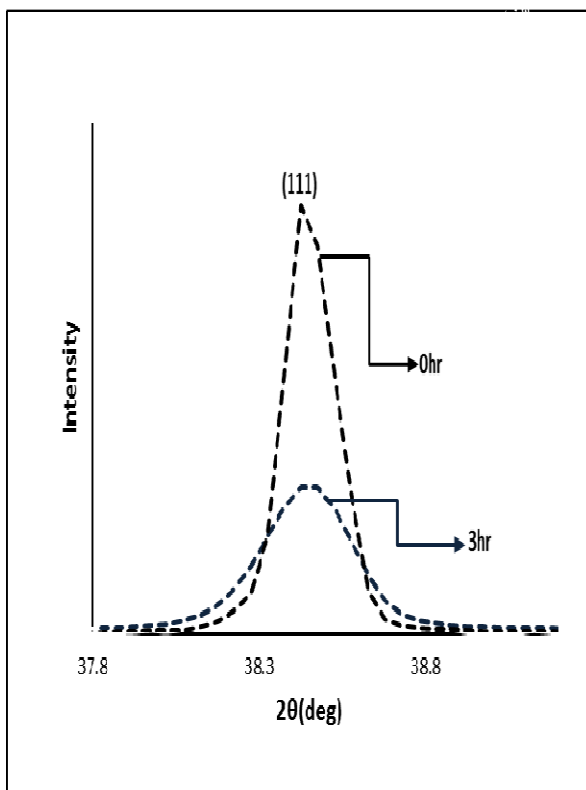
یعنی زمان ۳ ساعت آسیاب کاری نشان می دهد. ملاحظه می شود در زمان صفر آسیاب کاری پیک های مربوط به مواد اولیه اصلی (آلومینیوم - روی - منیزیم) دیده می شود اما با افزایش زمان آسیاب کاری پیک های روی و منیزیم حذف شده و پیک های مربوط به آلومینیوم پهن شده و شدت آن کاهش می یابد که این به دلیل تغییر ریزساختار و افزایش کرنش شبکه در اثر آسیاب کاری و تشکیل محلول جامد است (کاهش اندازه دانه های بلوری، تجمع عیوب ساختاری و افزایش کرنش های شبکه ای و همچنین تشکیل محلول جامد باعث می شود پیک های آلومینیوم پهن شده و از شدت آن ها کاسته شود) [۱۳].

آسیاب کاری یک فرآیند غیر تعادلی بوده و باعث می شود اتم های روی و منیزیم و دیگر عناصر آلیاژی (آهن، مس، منگنز و سیلیسیم) در ساختار آلومینیوم در دماهایی نزدیک به دمای محیط حل شوند. دلیل این انحلال در ساختار آلومینیوم را می توان مربوط به اتفاقاتی دانست که در فرآیند آسیاب کاری بر روی ذرات پودر رخ می دهد. در حین فرآیند آسیاب کاری به دلیل برخورد مکرر گلوله ها به ذرات پودر، چگالی نواقص بلوری در ساختار افزایش می یابد. این نواقص می تواند شامل نابجایی ها، جاهای خالی و مرز دانه ها باشد. تمام این نواقص از ساختار باز تری برخوردار بوده و قابلیت انحلال عناصر حل شونده در ساختار را دارند و همچنین این نواقص باعث ایجاد فصل مشترک هایی در ساختار می شوند و از آنجا که در فصل مشترک ها اتم ها از حالت تعادل انحراف دارند و برای خارج کردن اتم ها از حالت تعادل انرژی مصرف می شود لذا فصل مشترک ها از سطح انرژی بالاتری برخوردار هستند. از طرفی از لحاظ ترمودینامیکی هر سیستم تمایل دارد به حداقل انرژی آزاد خود برسد، که یک راه برای کاهش این انرژی داخلی انجام انحلال است. پس می توان گفت انحلال عناصر آلیاژی آلومینیوم ۷۰۱۴ در ساختار آلومینیوم به منظور کاهش فصل مشترک فازی بین عناصر آلیاژی و آلومینیوم راهی است برای این که سیستم انرژی داخلی خود را کاهش دهد [۱۴].

با بررسی دقیق تر پیک مربوط به صفحه (۱۱۱) آلومینیوم در شکل (۲)، کاهش زاویه پراش با افزایش زمان آسیاب کاری دیده می شود. دو عامل وجود دارد که می تواند باعث جابجایی پیک های مربوط به یک عنصر در الگوی پراش شود که عبارت



شکل ۳: پراش پرتو ایکس آلومینیوم خالص آسیاب نشده و آلومینیوم خالص ۳ ساعت آسیاب شده

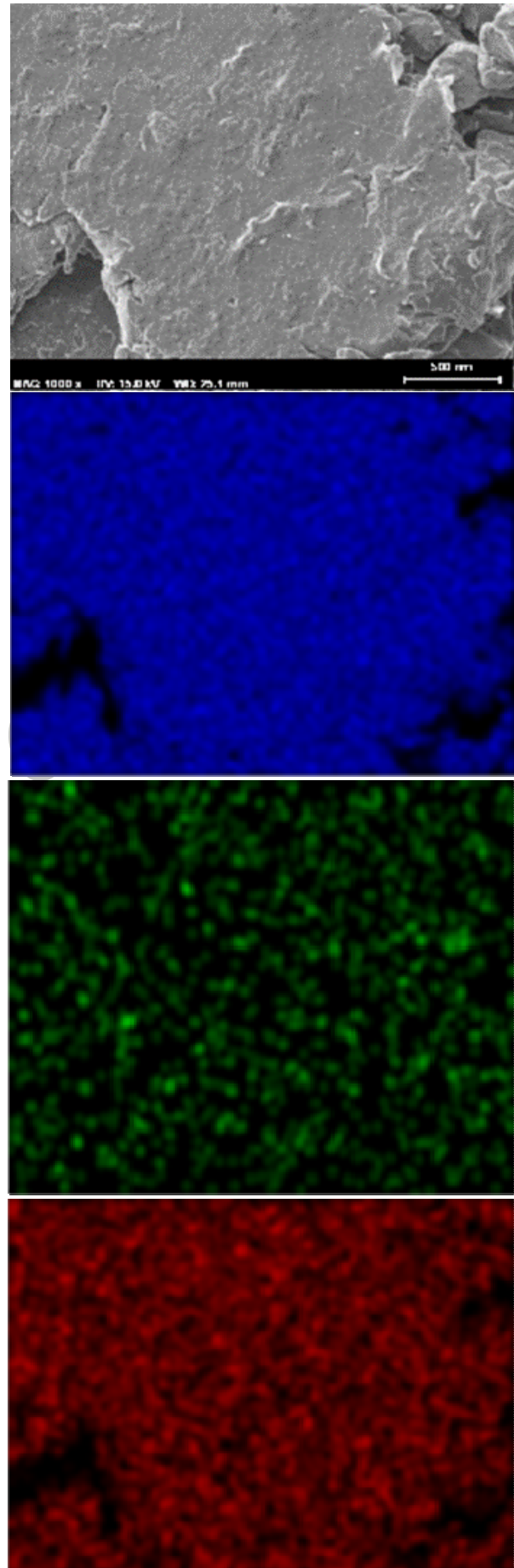


شکل ۴: پیک (۱۱۱) آلومینیوم خالص بر حسب زمان آسیاب کاری

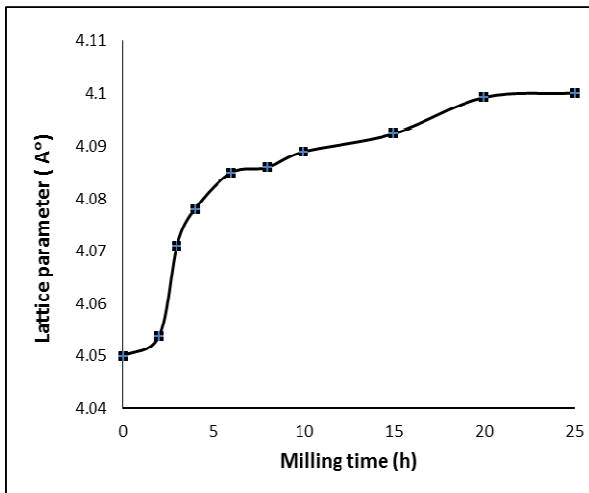
طی فرآیند آلیاژسازی مکانیکی به دلیل برخورد مکرر گلوله ها به ذرات پودر چگالی بالایی از نواقص بلوری و نابجایی در ساختار به وجود می آید. با توجه به این که فضای اطراف هر نابجایی هم شامل تنش های کششی و هم فشاری است [۱۶]

می توان گفت، تنش های باقی مانده در مورد فرآیند آلیاژسازی نمی تواند عامل جابجایی پیک ها باشد. بنابراین جابجایی پیک ها در الگوی پراش به دلیل انحلال عنصری است. با توجه به این که انحلال منیزیم و روی در آلومینیوم قابل ملاحظه است و شعاع اتمی منیزیم و روی به ترتیب بیشتر و کمتر از آلومینیوم است، با قرار گرفتن منیزیم و روی و دیگر عناصر آلیاژی (آهن، مس، منگنز و سیلیسیم) در شبکه آلومینیوم و وارد شدن آنها به عنوان عناصر جانشین در ساختار، ثابت شبکه آلومینیوم افزایش می یابد. افزایش ثابت شبکه سبب جابجایی پیک های مربوط به آلومینیوم به طرف زوایای کمتر می شود. جهت بررسی دقیق تر این نتایج، آلومینیوم خالص به مدت زمان مشابه با آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ آسیاب کاری شد (۳ ساعت). در شکل (۳) الگوی پراش آلومینیوم خالص (۳ ساعت) آسیاب کاری شده با آلومینیوم خالص آسیاب کاری نشده مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود زاویه پراش پیک (۱۱۱) هیچ گونه جابجایی نداشته است و فقط از شدت آن کاسته و پهن تر شده است که نشان دهنده ریز شدن اندازه بلورک ها و افزایش کرنش در داخل شبکه است. شکل (۴) این اطمینان را می دهد که جابجایی پیک آلومینیوم ۷۰۱۴ به دلیل انحلال اتمی عناصر آلیاژی است. به منظور بررسی دقیق تر تشکیل شدن آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ و نحوه توزیع عناصر آلیاژی از زمان ۳ ساعت آسیاب کاری که محلول جامد به طور کامل در این زمان تشکیل شده است. همچنین نقشه عنصری از نمونه تهیه شد. با توجه به این نتایج، همان گونه که در تصویر شکل (۵) دیده می شود، عناصر آلیاژی یعنی روی و منیزیم به صورت یکنواخت در زمینه آلومینیوم پراکنده شده اند که این نشان دهنده این است که این عناصر در شبکه آلومینیوم حل شده و تشکیل محلول جامد داده است.

شکل های (۶) و (۷) تاثیر زمان آسیاب کاری بر اندازه بلورک ها و افزایش کرنش شبکه پودر آلیاژی آلومینیوم ۷۰۱۴ را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود با افزایش زمان آسیاب کاری اندازه بلورک ها کاهش یافته و کرنش شبکه (به غیر از زمان ۱۵ ساعت) افزایش یافته است. علت کاهش اندازه دانه در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، تغییر شکل پلاستیک شدیدی است که بر ذرات پودری تحمیل می شود. این تغییر شکل باعث افزایش چگالی انواع عیوب به ویژه نابجایی ها می شود. افزایش نابجایی ها و سایر عیوب بلوری باعث افزایش زیاد انرژی سیستم و همچنین افزایش کرنش داخلی شبکه می شود. در نتیجه سیستم برای کاهش انرژی و رسیدن به تعادل، آرایش مجددی به نابجایی ها داده و با ایجاد مرزهای فرعی بلورک های جدید با اندازه کوچک تر تشکیل می دهد [۱۷]. از دیگر دلایل کاهش اندازه بلورک های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۴ از لحظه صفر آسیاب کاری تا زمان ۳ ساعت آسیاب کاری (زمانی که محلول جامد تشکیل می شود). حل شدن عناصر آلیاژی منیزیم و روی و همچنین دیگر عناصر (آهن، مس، منگنز و سیلیسیم) و تشکیل محلول جامد است. با تشکیل محلول جامد و به دلیل اختلاف اندازه اتم های حلال و حل شونده و تغییر در ثابت شبکه، کارسختی و در نتیجه چگالی نابجایی ها افزایش می یابد. از طرفی به دلیل اختلاف در شعاع اتمی روی و منیزیم (به ترتیب ۱/۳۳ و ۱/۶ آنگسترم) نسبت به آلومینیوم (۱/۴۳ آنگسترم)، اتم های روی و منیزیم ترجیح می دهند که در امتداد نابجایی ها در شبکه آلومینیوم نفوذ کنند، بنابراین افزایش چگالی نابجایی ها منجر به حل شدن بیشتر روی و منیزیم در زمینه آلومینیوم می شود. نفوذ بیشتر منجر به افزایش بیشتر کارسختی و در نهایت کاهش بیشتر اندازه بلورک ها می شود [۱۸]. همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می شود مقدار کرنش با افزایش زمان آسیاب کاری در حال زیاد شدن است که دلیل آن، هم کاهش در اندازه بلورک ها و هم حل شدن عناصر آلیاژی در ساختار آلومینیوم می باشد. اما ملاحظه می شود که در زمان ۱۰ تا ۱۵ ساعت آسیاب کاری کرنش شبکه به شدت کاهش می یابد این کاهش را می توان به اثر اندازه بلورک ها در کرنش شبکه نسبت داد. از آنجایی که در زمان ۱۵ ساعت آسیاب کاری به کمترین میزان در اندازه بلورک ها یعنی ۱۱ نانومتر می رسد در نتیجه نابجایی ها راحت تر خود را به مرز



شکل ۵: تصاویر آنالیز X-Ray Map



شکل ۸: تغییرات پارامتر شبکه آلومینیوم بر حسب زمان آسیاب کاری در آلیاژ آلومینیوم ۷.۵

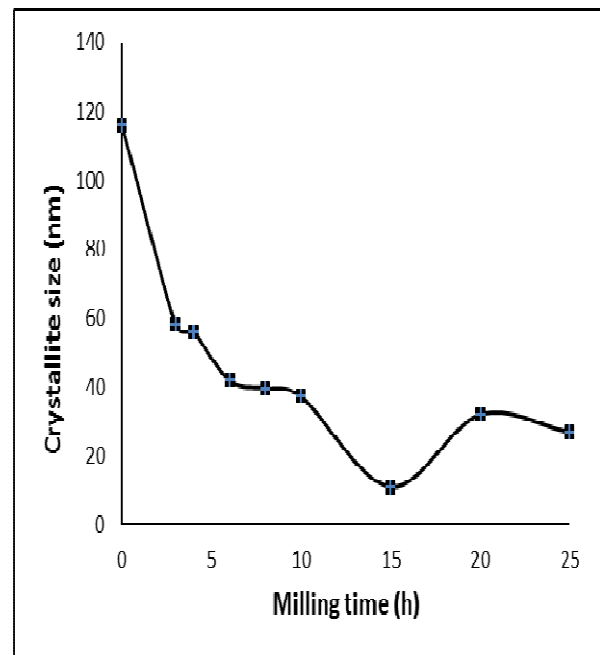
همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود از زمان صفر آسیاب کاری تا زمان ۳ ساعت آسیاب کاری ثابت شبکه افزایش یافته است که یکی از دلایل اصلی این افزایش در ثابت شبکه به خاطر حل شدن عناصر آلیاژی در ساختار آلومینیوم می‌باشد اما از آنجا که بعد از اتمام آلیاژسازی باز هم پارامتر شبکه رو به افزایش می‌باشد به خصوص در زمان های بالای آسیاب کاری می‌توان به خود عملیات آسیاب کاری اشاره کرد. زیرا با افزایش تغییر شکل پلاستیک، چگالی نواقص بلوری نیز افزایش می‌یابد. لذا در مناطق اطراف نواقص بلوری، فاصله بین صفحات بیشتر شده و باعث جابجایی و تغییر موقعیت پیک ها به سمت زوایای کمتر و نهایتاً افزایش در ثابت شبکه می‌شود [۱۸، ۲۰].

### ۳-۲- بررسی ریزسختی

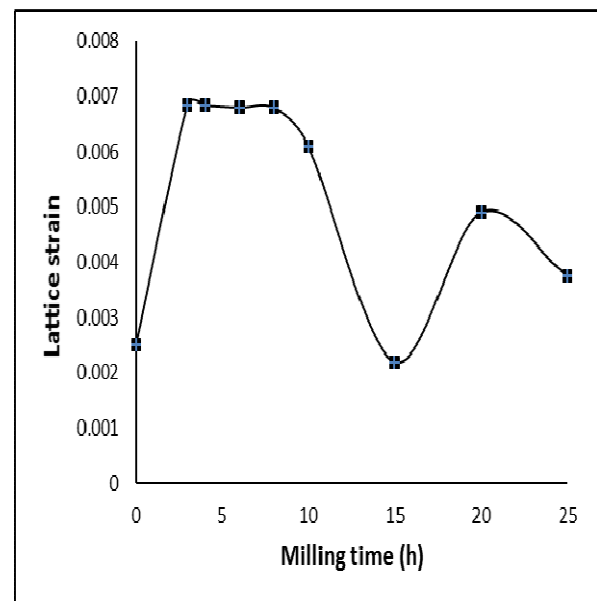
در این قسمت به بررسی تاثیر زمان آسیاب کاری بر میزان سختی آلیاژ آلومینیوم ۷.۵ و آلومینیوم خالص پرداخته شد.

شکل (۹) تغییرات ریزسختی آلیاژ آلومینیوم ۷.۵ و آلومینیوم خالص را بر حسب زمان آسیاب کاری نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش زمان آسیاب کاری سختی افزایش می‌یابد.

دانه ها رسانده و آزاد می‌شوند و همانطور که ملاحظه می‌شود تاثیر مستقیمی در کاهش کرنش شبکه خواهد گذاشت [۱۹].



شکل ۶: تغییرات اندازه بلورک های آلومینیوم ۷.۵ بر حسب زمان آسیاب کاری



شکل ۷: تغییرات کرنش شبکه آلیاژ آلومینیوم ۷.۵ بر حسب زمان آسیاب کاری

در زمان های مختلف آسیاب کاری (۰، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، و ۲۵ ساعت) آلیاژ آلومینیوم ۷.۵، ثابت شبکه محاسبه شد و نتایج آن بر حسب زمان آسیاب کاری در شکل (۸) آورده شده است.

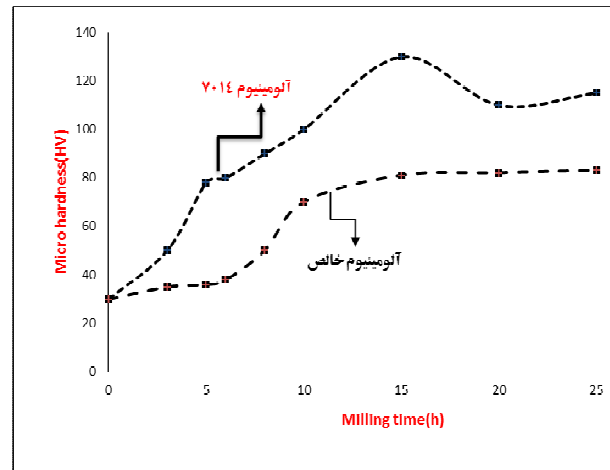
اندازه متوسط بلورکها است. از طرفی در مورد آلومینیوم آلیاژی علاوه بر اثر هال-پیچ، زمانی که عناصر آلیاژی در شبکه آلومینیوم حل می‌شوند و تشکیل محلول جامد می‌دهند ایجاد میدان های تنش در اطراف خود خواهند کرد که این میدانها موانع حرکتی برای نابجاییها هستند و هرچه تعداد این میدانها بیشتر باشد، مانع حرکتی نابجاییها قویتر و در نتیجه سختی آلیاژ بیشتر خواهد بود [۱۶].

#### ۴- نتیجه گیری

۱. امکان تولید آلیاژ نانو ساختار آلومینیوم ۷۰۱۴ به روش آلیاژسازی مکانیکی وجود دارد.
۲. با افزایش زمان آسیاب کاری اندازه بلورکها کاهش می‌یابد به طوری که کمترین اندازه بلورکهای آلومینیوم ۷۰۱۴ در فرآیند آسیاب کاری مربوط به زمان ۱۵ ساعت می‌باشد که اندازه بلورکها در این زمان ۱۱ نانومتر می‌باشد.
۳. میزان سختی آلیاژ نیز با افزایش زمان آسیاب کاری افزایش پیدا می‌کند، به طوری که در زمان ۱۵ ساعت آسیاب کاری، سختی ۱۳۰ ویکرز گزارش گردید.

#### مراجع

1. N. Yazdani, F. Karimzadeh, M. Tavoosi, "Microstructural of nanostructure 7075 aluminum alloy during isothermal annealing", *Journal of Alloys and Compounds*, No. 493, PP. 137- 141, 2010.
2. T. G. During, D. Karabi, D. Siddharatha, "Synthesis and Characterization of Al Matrix Composites Reinforced by in Situ Alumina Particulates", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 445- 446, pp. 100- 105, 2007.
3. J. L. Hernandez Rivera, J. J. Cruz Rivera, V. Pazdelangel, V. Garibay Febles, O. Coreno Alonso, R. Martnezsanchez, "Structural and morphological study of a 2024 Al- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite produced by mechanical alloying in high energy mill", *Materials and Design*, No. 37, pp. 96 - 101, 2012
4. C. Suryanarayana, N. Al- Aqeeli, "Mechanically alloyed Nano composites", *Progress in Materials Science*, Vol. 58, pp. 383- 502, 2012.
5. E. M. Rui Navas, J. B. Foganolo, F. Velasco, J. M. Rui Prieto, L. Froyen, "One Step Production of Aluminum Matrix Composite Powders by Mechanical Alloying", *Composite Part A*, No. 37, pp. 2114-2120, 2006.
6. S. M. Zebarjad, S. A. Sajjadi, "Microstructure Evaluation of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Produced by Mechanical Alloying Method", *Materials and Design*, No. 27, pp. 684- 688, 2006.
7. M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani, "Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made



شکل ۹: تغییرات ریزسختی آلومینیوم ۷۰۱۴ با آلومینیوم خالص با زمان آسیاب کاری

تحقیقات نشان می‌دهد [۴] سختی آلیاژهای تهیه شده توسط آلیاژسازی مکانیکی تحت تاثیر سه عامل است که عبارتند از:

-تشکیل محلول جامد

-کاهش اندازه بلورکها

-کارسختی پودر

همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود با افزایش زمان

آسیاب کاری سختی آلومینیوم خالص در حال افزایش است که این افزایش ناشی از کاهش اندازه بلورکها است و در مورد آلومینیوم آلیاژی علاوه بر کاهش اندازه بلورکها تشکیل محلول جامد نیز تاثیر بسزایی دارد به طوری که در زمان ۳ ساعت آسیاب کاری سختی آلومینیوم خالص ۳۵ ویکرز و در زمان مشابه برای آلومینیوم ۷۰۱۴، ۵۰ ویکرز است.

رابطه بین اندازه بلورکها و تغییرات استحکام را دو

محقق موسوم به هال-پیچ بررسی کرده‌اند که نتایج حاکی از

این بود که افزایش سختی با کاهش اندازه دانه رابطه مستقیمی

دارد که بین تنش تسلیم و اندازه متوسط بلورکها رابطه (۷)

برقرار است [۱۶].

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این رابطه  $\sigma_0$  تنش تسلیم،  $\sigma_i$  تنش اصطکاکی

شبکه مخالف با حرکت نابجاییها،  $k$  ثابت هر ماده و  $D$  مقدار



14. M. Tavoosi, M. H. Enayati, F. Karamzadeh, "Softening behavior of Nano structured Al-14 Wt % Zn alloy during mechanical alloying", *Journal of Alloy and Compounds*, No. 464, pp. 107-110, 2008.
۱۵. ج. دینا، ر. اسلامی فارسانی، "کلید آلومینیوم و آلیاژهای وابسته"، چاپ اول، انتشارات لویه، ۱۳۸۲.
۱۶. د. هال، د. بیکن، ع. اکرامی، "متالورژی مکانیکی آشنایی با نایجایی‌ها"، موسسه انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.
17. J. Gubicza, M. Kassem, G. Ribarik, T. Unger, "The micro structure of mechanically alloyed Al-Mg determined X-ray diffraction peak profile analysis", *Journal of Materials Science and Engineering A*, No. 372, pp.115-122. 2004.
18. O. Ismail, A. Sascha, M. Silke, W. Bernhard, "Nano crystalline Al- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p and SiC<sub>p</sub> composite produced by high- energy ball milling", *Journal of Materials Processing*, No. 205, pp. 111-118, 2008.
۱۹. ج. صفری، غ. ح. اکبری، "مشخصه یابی تاثیر افزایش منیزم بر کامپوزیت نانو ساختار Al- 5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> حین فرآیند آلیاژ سازی مکانیکی"، دومین همایش ملی نانو مواد و نانو تکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اردیبهشت ۱۳۸۹.
20. S. M. Zebarjad, S. A. Sajjadi, "Microstructure Evaluation of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Produced by Mechanical Alloying Method", *Materials and Design*, No. 27, pp. 684-688, 2006.
- by powder metallurgy", *Materials Science and Engineering*, No. A527, PP. 1031-1038, 2010.
8. D. Gu, Z. Wang, Y. Shen, Q. Li, Y. Li, "In-Situ TiC Particle Reinforced Ti-Al Matrix Composites Powder Preparation by Mechanical Alloying and Selective Laser Melting behavior", *Applied Surface Science*, No. 255, pp. 9230- 9240, 2009.
9. A. S. Khan, B. Farrokh, L. Takacs, "Effect of Grain Refinement on Mechanical Properties of Ball-Milled Bulk Aluminum", *Materials Science and Engineering*, No. A 489, pp. 77-84. 2008.
10. M. Jafari, M. H. Enayati, M. H. Abbasi, F. Karimzadeh. "Compressive and Wear Behaviors of Bulk Nanostructured Al2024 Alloy." *Materials and Design*, No. 31, 663- 669. 2010.
11. J. Safari, G. H. Akbari, A. Shahbazkhan, M. Delshad Chermahini, "Microstructural and Mechanical properties of Al- Mg/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano Composite prepared by mechanical alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, No. 509, pp. 9419 -9424, 2011.
12. G. H. Akbari, J. Safari, " Structural evolution of Al- Mg matrix Nano Composite reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles during high- energy ball milling", *International Conference on Composite*, PP. 27-30, 2010.
۱۳. م. طاهری اثنی عشری، ف. کریم زاده، م. ح. عنایتی، "بررسی مکانیزم تشکیل آلیاژ نانو ساختار Al6061 حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته گران ایران.

Archive of SID

Surf and download all data from SID.ir: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)

Translate via STRS.ir: [www.STRS.ir](http://www.STRS.ir)

Follow our scientific posts via our Blog: [www.sid.ir/blog](http://www.sid.ir/blog)

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: [www.sid.ir/workshop](http://www.sid.ir/workshop)