

تأثیر عنصر نیکل بر روی میکرو ساختار آلیاژ پایه آهن $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ تهیه شده به روش

آلیاژسازی مکانیکی

علی عیدداوی^{۱*}، مهدی بروجرذ نیا^۲، عبدالله طیبی^۳ و مجید رحیمی^۴^۱ گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.^۲ گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.^۳ مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.^۴ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران.^۵ مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران.**Effect of Ni on Microstructure of $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ Fe-Based Prepared by Mechanical Alloying**Ali Obeydavi^{1,2*}, Mehdi Boroujerdnia¹,
Abdollah Tayyebi³, Majid Rahimi⁴¹ Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.² Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran.⁴ Advanced Materials Research Center, Faculty of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran**Abstract**

In this study, iron-based alloy with $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ was prepared by mechanical alloying method. The effect of nickel content on its microstructure with 200 hours of milling was investigated. In this study X-ray diffraction and scanning electron microscopy equipped with chemical composition analyzer. Addition of nickel in the $Fe_{65}Ti_5Al_5B_{15}Si_{10}$ alloy system and its increase reduced the intensity of all peaks, their broadening and also the shift of peaks to lower angles. This indicates a decrease in the size of iron-alpha phase crystals and an increase in lattice strain due to an increase in nickel element. Also, an increase in nickel reduced the particle size due to milling at the same hours of alloying.

Keywords: Nickel, Microstructure, Iron-based alloy, $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$, Mechanical alloying.

Received: 2022/01/02

Accepted: 2022/04/14

چکیده

در این پژوهش، آلیاژ پایه آهن با ترکیب $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ به روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه گردید و تأثیر میزان نیکل بر روی میکرو ساختار آن با ۲۰۰ ساعت آسیاب کاری مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از دستگاه‌های پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز گر ترکیب شیمیایی بهره گرفته شد. افزودن نیکل در سیستم آلیاژی $Fe_{65}Ti_5Al_5B_{15}Si_{10}$ و افزایش درصد آن سبب کاهش شدت همه قله‌ها، پهن شدن آن‌ها و همچنین جابجایی قله‌ها به سمت زوایای کمتر شد. این موضوع حاکی از کاهش اندازه بلورک‌های فاز آهن-آلفا و افزایش کرنش شبکه در اثر افزایش نیکل است. همچنین افزایش نیکل باعث کاهش اندازه ذرات در اثر آسیاب کاری در ساعت‌های یکسان آلیاژسازی شد.

واژه‌های کلیدی: نیکل، میکروساختار، آلیاژ پایه آهن، $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ آلیاژسازی مکانیکی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

* نویسنده مسئول: علی عیدداوی

نشانی: اصفهان، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

پست الکترونیکی: Aliobeydavi1986@gmail.com, a.obeydavi@alumni.iut.ac.ir

۱. مقدمه

FeSiBAlNi را به روش آلیاژسازی مکانیکی و SPS تهیه کردند. آن‌ها موفق شدند که بعد از ۲۴۰ ساعت به ساختار کاملاً آمورف دست یابند. گزارش شده است که سختی نسبتاً پایین آلیاژهای پایه آهن و مقاومت به خوردگی ضعیف عواملی هستند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین محققان به روش‌های گوناگونی در تلاش هستند تا سختی و مقاومت به خوردگی آلیاژهای پایه آهن را بهبود دهند. در این مطالعه، آلیاژ جدید پایه آهن با ترکیب Fe₆₅B₁₅Si₁₀Ti₅Al₅ با استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شد و پایداری فاز و مشخصه‌های ساختاری مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت آلیاژ Fe₆₅B₁₅Si₁₀Ti₅Al₅ در جدول ۱ لیست شده است. دستگاه آلیاژسازی مکانیکی سیاره‌ای با انرژی بالا برای آلیاژسازی استفاده شد. آلیاژسازی در اتمسفر Ar در دمای محیط و در کاپ فولاد سخت شده با حجم ۲۵۰ سانتی متر مکعب انجام شد. از اسید استناریک (C₁₈H₃₆O₂، نقطه ذوب: ۶۱۹/۶ °C) به عنوان عامل کنترل فرآیند (PCA) MA استفاده شد. در جدول ۲، پارامترهای آلیاژسازی مکانیکی لیست شده است.

جدول ۱- مواد اولیه مورد استفاده برای ساخت آلیاژ پایه آهن

عنصر	Fe ₆₅ B ₁₅ Si ₁₀ Ti ₅ Al ₅	اندازه ذرات (μm)	خلوص (%)
Fe	۹۹/۰۰	<۴۵	
Ti	۹۹/۸	<۴۵	
Al	۹۹/۸	<۲۰	
Ni	۹۹/۹	<۴۵	
B	۹۹/۸	<۲	
Si	۹۹/۹	<۵	

تجزیه و تحلیل فازی پودرهای آسیاب شده توسط پراش سنج اشعه ایکس (XRD) در زوایای ۱۰-۱۰۰° (Philips) 2θ=۱۰-۱۰۰°، XPERTMPD، تابش Cu Kα با λ = 0.1542 نانومتر، ۴۰

تحقیق و توسعه در مورد شیشه‌های فلزی به وسیله محققان و صنعتگران به علت خواص منحصر به فرد در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱، ۲]. در میان تعدادی از سیستم‌های شیشه‌های فلزی، آلیاژهای پایه آهن از سال ۱۹۹۵ [۳] به علت خواص مکانیکی، مقاومت به سایش بالا، مقاومت به خوردگی خوب و هزینه نسبتاً پایین مورد توجه قرار گرفت. برای آلیاژهای شیشه فلزی پایه آهن دوتایی مانند Fe-B و Fe-P و سختی‌های بالا به ترتیب ۹۰۰ و ۱۳۰۰ ویکرز^۱ گزارش شده است [۱] و برای آلیاژهای شیشه فلزی توده‌ای پایه آهن ۴ تایی و ۵ تایی با ترکیبات Fe₇₄Ni₄Mo₃B₁₇Si₂، Fe₇₇Cr₂B₁₆Si₅، Fe₄₀Ni₃₈Mo₄B₁₈Si₅ میکرو سختی به ترتیب ۸۸۵، ۸۵۸ [۴]، ۹۹۰ و ۸۶۰ [۵] ویکرز به دست آمده است. برای آلیاژهای پایه Fe-Cr مانند Fe_{71.4}-Cr₆Y₂ [۶] و Fe_{71.4}-Cr₆Y₂ رفتار ضد خوردگی بالا گزارش شده است. آلیاژهای پایه آهن به روش‌های مختلفی مانند انجماد سریع، آلیاژسازی مکانیکی و لایه نشانی از فاز بخار مانند کندوپاش تهیه شدند [۸-۱۰]. در سال ۲۰۰۷، شارما و همکاران آلیاژ پایه آهن Fe₄₂-Zr₁₀-X-B₂₀ را به روش آلیاژسازی مکانیکی به منظور بررسی تأثیر عناصر آلیاژی مانند Al، Ni، Co، Ge، Sn، Mn بر روی آمورف شدن بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که افزودن آلومینیوم تا ۲۸ درصد اتمی، آمورف شدن را در ۱۰ ساعت آسیاب کاری ایجاد می‌کند و تا ۴۰ ساعت نیز پایدار می‌کند. افزودن منگنز و قلع باعث ایجاد ساختار آمورف نگرديد درحالی که افزودن آلومینیوم، نیکل و کبالت و ژرمانیوم به تولید ساختار آمورف منجر شد. در سال ۲۰۰۷ در تحقیق دیگری که نیز توسط اورلیکن و همکارانش انجام شد، آلیاژ پایه آهن

Fe₄₂Ni₂₈Zr₁₀C₁₀B₁₀ به منظور بررسی آمورف شدن آن توسط آلیاژسازی مکانیکی تهیه شد. آن‌ها گزارش کردند که بعد از ۸ ساعت آسیاب کاری ساختار آمورف به دست می‌آید [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ ونگ و همکاران [۱۲] آلیاژ پایه آهن

^۱ Vickers

میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM)،
XRD از اندازه مرحله ۰/۰۲ درجه و زمان هر گام ۱ ثانیه
استفاده شد. مطالعه مورفولوژی سطح و تجزیه و تحلیل
ترکیبات شیمیایی پودرهای آسیاب شده با استفاده از

کیلوولت و ۳۰ میلی آمپر) انجام شد. برای تهیه الگوهای
VEGA@TSCAN) مجهز به طیفسنجی پرتویکس
پراکنده انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- پارامترهای آلیاژسازی مکانیکی برای ساخت آلیاژ پایه آهن $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ با درصد‌های مختلف نیکل

آلیاژ (برحسب درصد اتمی)	زمان (ساعت)	سرعت چرخش محفظه (دور بر دقیقه)	کنترل کننده فرآیند (میزان)	نسبت وزنی گلوله به پودر	اندازه و تعداد گلوله‌ها
$Fe_{65}Ti_5Al_5B_{15}Si_{10}$	۰-۲۰۰	۳۰۰	اسید استتاریک (۱) درصد وزنی)	۱۰:۱	۱۵- #mm-۶ ۲۰- #mm-۴
$Fe_{65-x}Ti_5Al_5B_{15}Si_{10}Ni_x$ (X=0, 5, 10)	۰-۱۰۰	۳۰۰	اسید استتاریک (۱) درصد وزنی)	۱۰:۱	۱۵- #mm-۶ ۲۰- #mm-۴

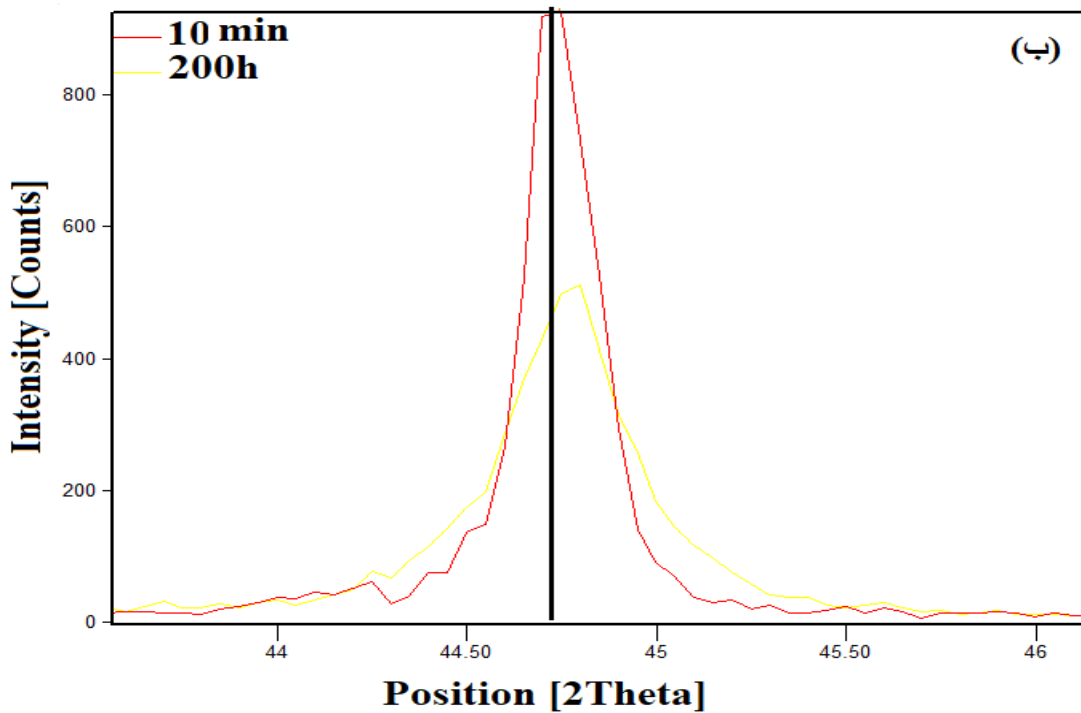
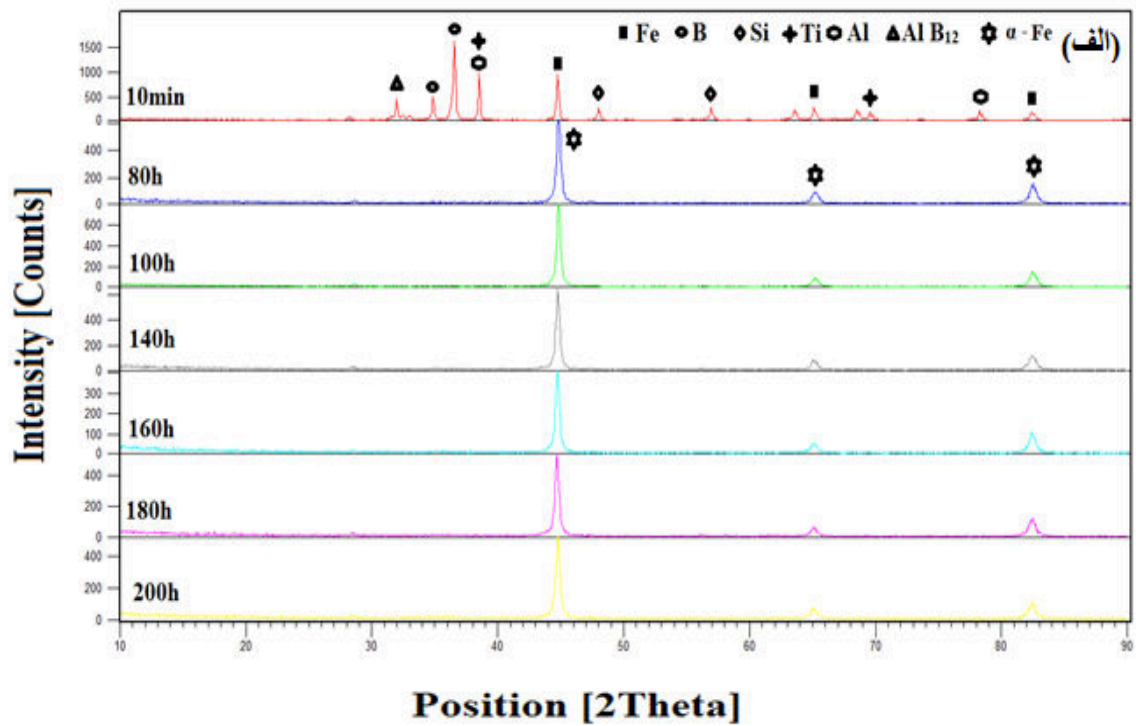
زویای بزرگ‌تر جابجا می‌شوند. این مورد در شکل ۲ به خوبی نشان داده شده است. علی‌رغم انجام آلیاژسازی تا ۲۰۰ ساعت نیز ساختار آمورف حاصل نگردید و ساختار نهایی محلول جامد آهن-آلفا با ساختار BCC گردید. این فاز با کارت استاندارد ۸۵۳۷-۹۰۰-۹۶ مطابقت دارد که در زویای ۴۴/۷۵، ۶۵/۰۱ و ۸۲/۴۳ درجه با اندیس‌های میلر صفحات (۰۱۱)، (۰۰۲) و (۱۱۲) متناظر است. بر اساس قوانین اینو^۱ [۸] افزایش تعداد عناصر در یک ترکیب، باعث افزایش تمایل به تشکیل ساختار آمورف می‌شود، در این تحقیق تأثیر افزایش نیکل بر روی تشکیل ساختار آمورف مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲ و ۳ تأثیر عنصر نیکل بر فرآیند آسیاب کاری آلیاژ $Fe_{65-x}Ni_x$ (X=0, 5, 10) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فاز آهن-آلفا بعد از انجام فرآیند آسیاب کاری تا ۱۰۰ ساعت و در سرعت چرخش ۳۰۰ دور بر دقیقه در مقادیر مختلف نیکل ۰، ۵ و ۱۰ درصد اتمی مشاهده می‌شود. وجود نیکل در این سیستم آلیاژی سبب کاهش شدت همه پیک‌ها، پهن شدن آن‌ها و همچنین انتقال پیک‌ها به سمت زویای کمتر شد. این موضوع بیان می‌کند که افزودن نیکل باعث کاهش اندازه بلورک‌های فاز آهن-آلفا و افزایش کرنش شبکه شده است.

۳. نتایج و بحث

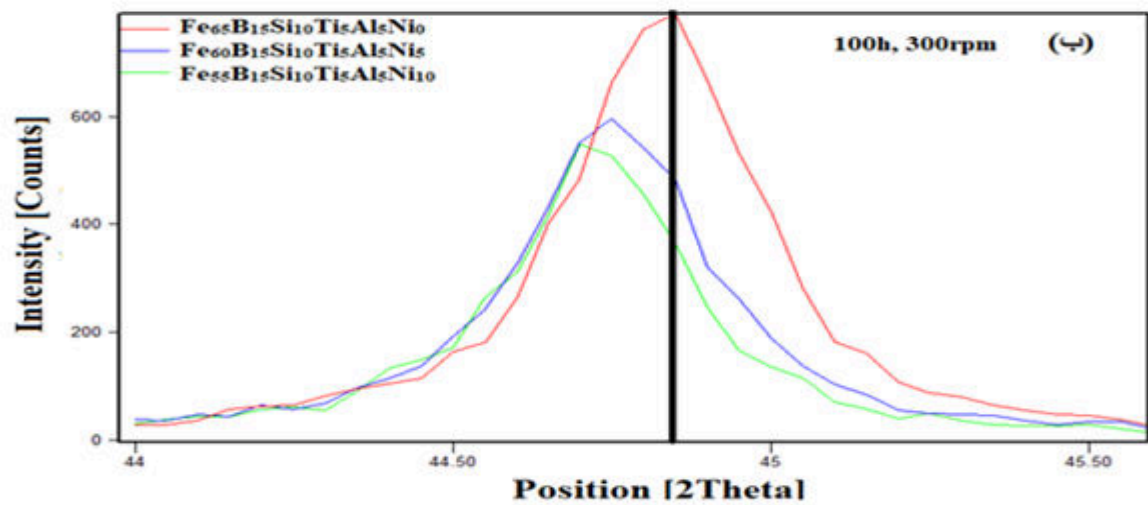
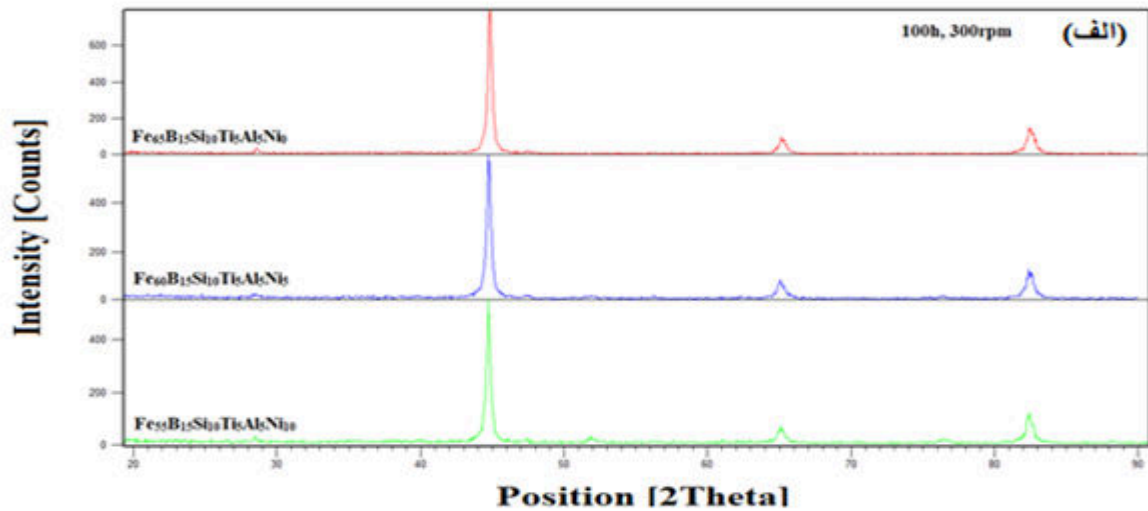
۳.۱. نتایج پراش پرتویکس

در شکل ۱ نتایج الگوهای XRD آسیاب کاری آلیاژ پایه آهن با ترکیب $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ در زمان‌های مختلف آلیاژسازی آمده است. در ۱۰ دقیقه اول آسیاب کاری الگوهای پراش عناصر تشکیل دهنده آهن، آلومینیوم، بور، سیلیسیم و تیتانیوم حضور دارند. با گذشت زمان، بعد از ۸۰ ساعت آسیاب کاری قله‌های مربوط به عناصر خالص آلومینیوم، تیتانیوم، بور و سیلیسیم ناپدید شدند و فقط پیک‌های شاخص آهن قابل مشاهده است. این موضوع نشان دهنده حل شدن این عناصر در شبکه آهن است که منجر به تشکیل محلول جامد آهن-آلفا ($Fe-\alpha$) شده است. در واقع با انجام فرآیند آلیاژسازی و افزایش نواقص شبکه، راه‌های نفوذ این عناصر افزایش یافته که در نهایت در شبکه آهن قرار می‌گیرند. با افزایش زمان آلیاژسازی تا ۲۰۰ ساعت، شدت قله‌های محلول جامد کاهش یافته و قله‌ها پهن شدند. این موضوع به علت کاهش اندازه دانه و افزایش کرنش داخلی شبکه است که محققین در فرآیندهای آلیاژسازی به آن اشاره کردند [۱۳]. با توجه به قرارگیری عناصر با شعاع اتمی کوچک‌تر در آهن و با در نظر گرفتن قانون براگ [۱۴] (کاهش فاصله بین صفحات اتمی)، پیک‌ها آهن به سمت

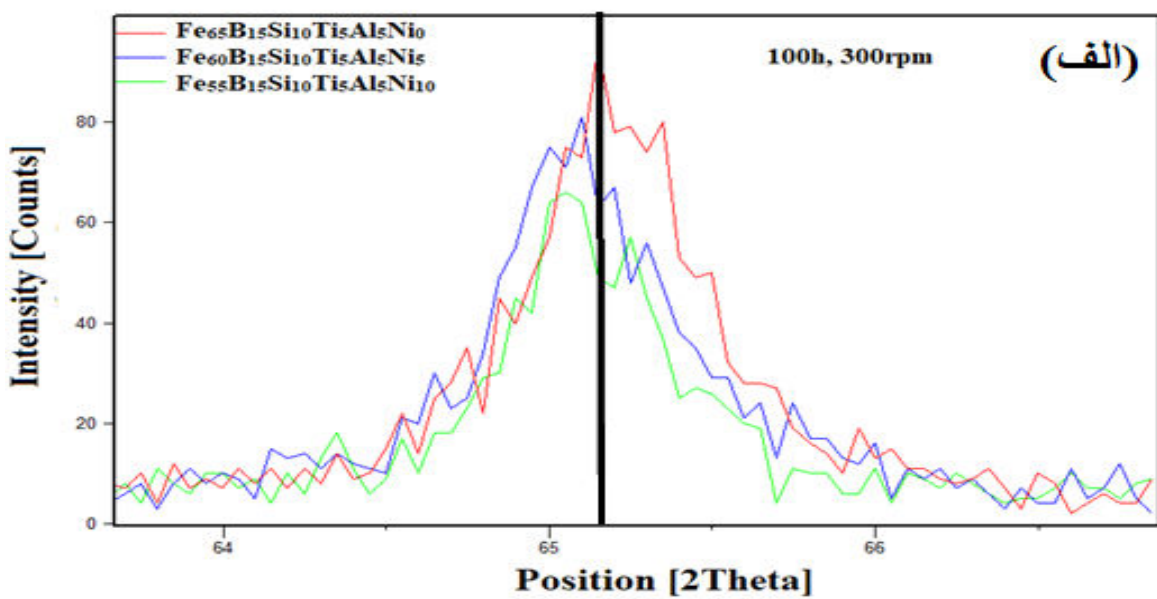
¹ Inoue

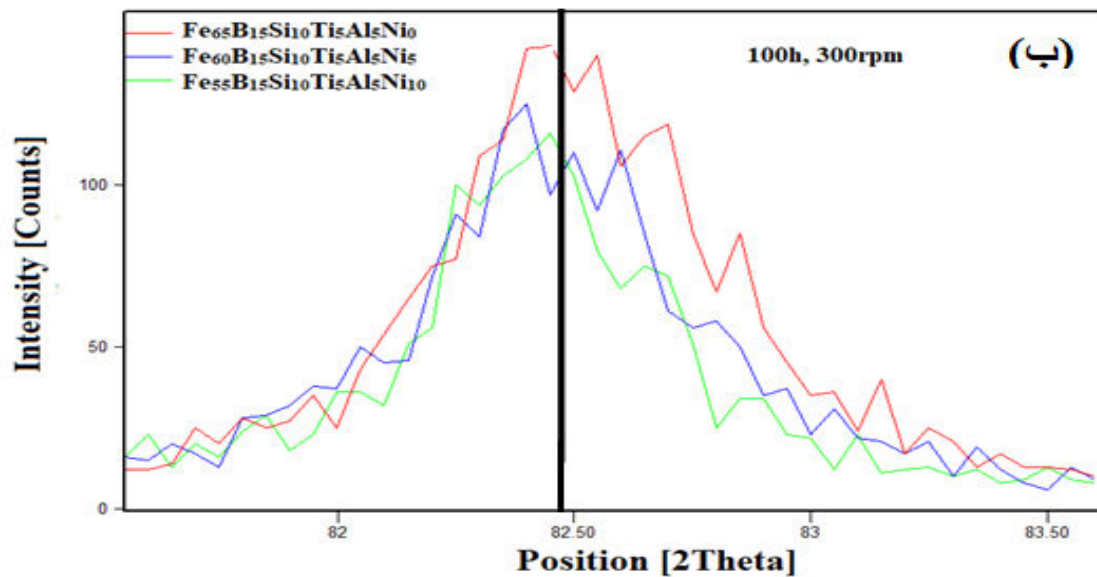


شکل ۱- الف) الگوهای پراش اشعه ایکس ترکیب $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ در زمان آسیاب کاری بعد از گذشت ۲۰۰ ساعت، ب) جایجایی الگوهای پراش اشعه ایکس



شکل ۲- الف) الگوهای پراش اشعه ایکس تأثیر عنصر نیکل بر روی آلیاژ $Fe_{65-x}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_x$ ($x=0, 5, 10$). ب) جایجایی الگوهای پراش اشعه ایکس





شکل ۳- الف) الگوهای XRD ترکیب $Fe_{65-x}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_x$ ($x=0, 5, 10$) بعد از گذشت ۱۰۰ ساعت آسیاب کاری، ب) جابجایی الگوهای XRD

با استفاده از رابطه شرر می توان اندازه بلورک و کرنش شبکه را محاسبه کرد. معادله شرر در رابطه ۱ جهت محاسبه اندازه بلورک و رابطه ۲ جهت محاسبه کرنش شبکه استفاده شد [۱۴]. در این رابطه β پهنای نصف ارتفاع پیک ماکزیمم است که با واحد رادیان بیان می شود، D اندازه بلوری و K عددی ثابت که در حدود ۰/۹ است، λ طول موج اشعه X که برحسب نانومتر است و از روی دستگاه خوانده می شود و θ زاویه ای است که از روی محور افقی XRD خوانده می شود.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

$$\beta = K_{\epsilon} \cdot \epsilon \cdot \tan\theta \quad (2)$$

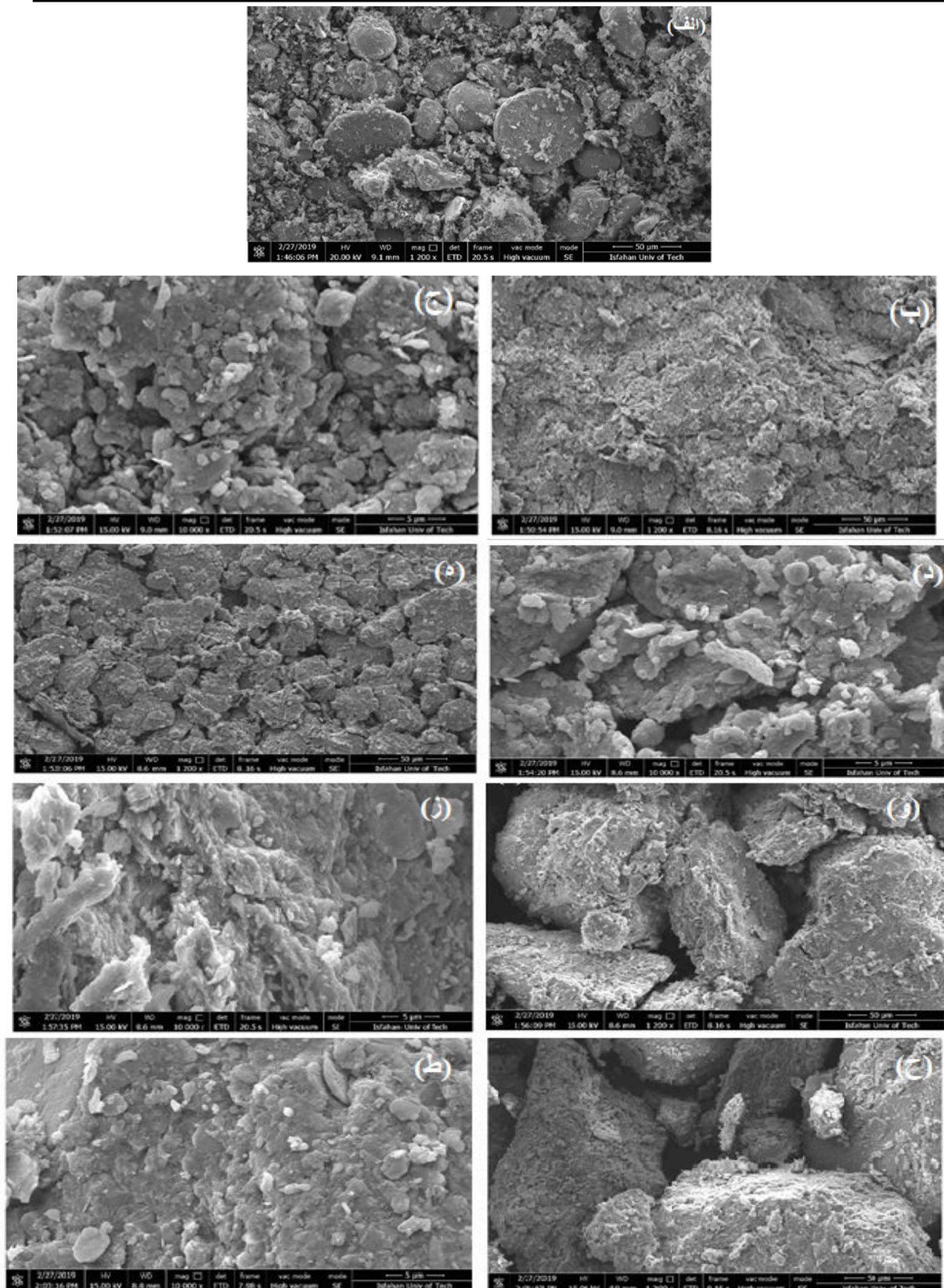
جدول ۳- اندازه بلورک و کرنش شبکه محلول جامد آهن آلفا پودرهای آلیاژی پایه آهن با درصدهای مختلف نیکل

آلیاژ	نوع آسیاب	زمان آسیاب کاری (h)	اندازه بلورک (nm)	کرنش شبکه (%)
$Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$	سیاره ای	۱۰۰	۴۱/۹	۰/۲۲۳
$Fe_{60}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_5$	سیاره ای	۱۰۰	۳۳/۱۳	۰/۲۲۴
$Fe_{55}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_{10}$	سیاره ای	۱۰۰	۳۳/۲۳	۰/۲۴۳

ذرات به صورت بشقابی، گوشه دار و کروی مشاهده می شود. در شکل های (ب) و (ج) ذرات پودری بعد از ۴۰ ساعت، شکل های (د) و (ه) ذرات پودری بعد از ۱۰۰ ساعت، در شکل های (و) و (ز) ذرات پودر بعد از ۱۶۰ ساعت آسیاب کاری و در شکل های (ح) و (ط) ذرات پودر بعد از ۲۰۰ ساعت آسیاب کاری مشاهده می شود.

۲.۳. نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی

در شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر آلیاژ پایه آهن $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_0$ در بزرگنمایی های مختلف و در زمان های مختلف آلیاژسازی نشان داده شده است. در شکل ۴ (الف)، پودر پایه آهن قبل از شروع آسیاب کاری را نشان می دهد که اشکال مختلفی از

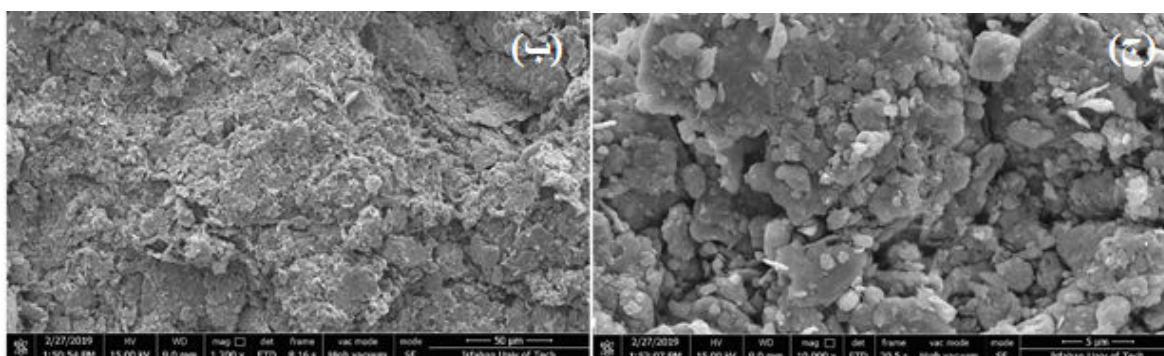
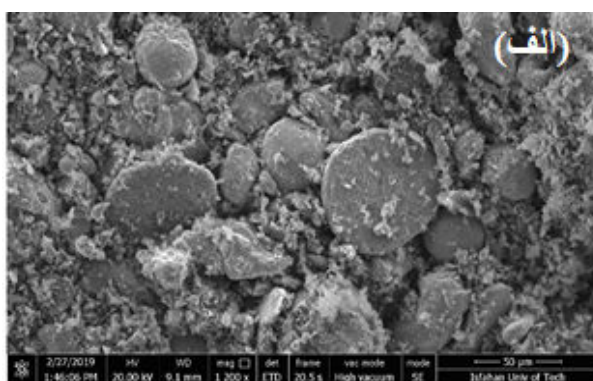


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر آلیاژ پایه آهن $\text{Fe}_{65}\text{B}_{15}\text{Si}_{10}\text{Ti}_5\text{Al}_5\text{Ni}_0$ در بزرگنمایی‌های مختلف و در زمان‌های مختلف آلیاژسازی. شکل‌های (الف) قبل از آسیاب کاری، (ب) و (ج) بعد از ۴۰ ساعت، (د) و (ه) بعد از ۱۰۰ ساعت، (و) و (ز) بعد از ۱۶۰ ساعت و (ح) و (ط) بعد از ۲۰۰ ساعت آسیاب کاری.

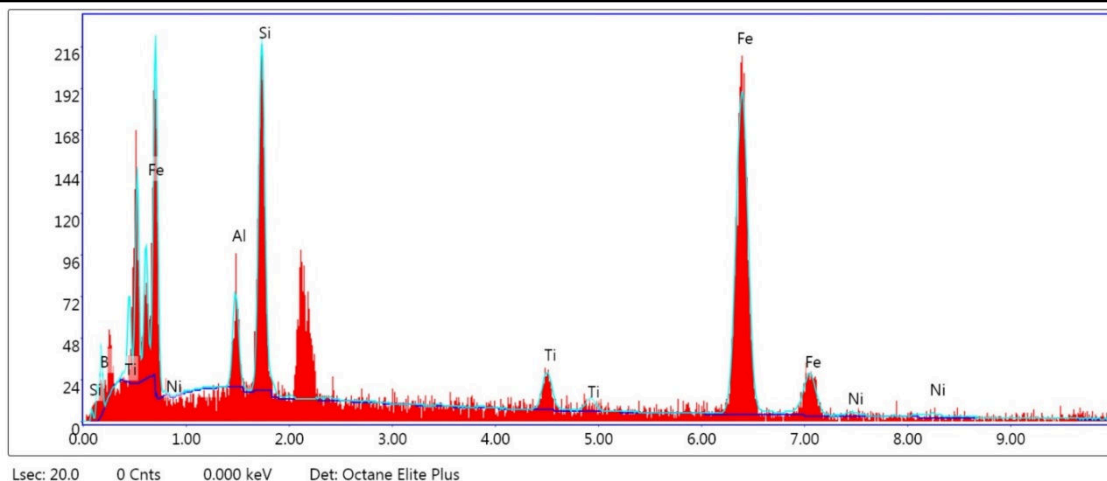
۱۰ درصد در شکل ۵ با مقیاس ۵۰ میکرون بعد از ۱۰۰ ساعت آسیاب کاری نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در شکل (الف) که مربوط به آلیاژ بدون نیکل $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_0$ است ذرات در حدود ۵۰ میکرون و یا حتی بزرگتر به همراه ذرات کوچکتر از ۵۰ میکرون مشاهده می شوند. با افزایش میزان نیکل از ۵ درصد اتمی به ۱۰ درصد اتمی تعداد ذرات زیر ۵۰ میکرون افزایش می یابد که در واقع نشان می دهد افزایش نیکل باعث کاهش اندازه ذرات در اثر آسیاب کاری در ساعت های یکسان آلیاژسازی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز اشعه ایکس و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی می توان نتیجه گرفت که افزایش نیکل باعث ایجاد ذراتی کوچکتر با اندازه بلوری کوچکتر شده است. در واقع با ایجاد دانه های بلوری کوچک با مساحت مرز دانه های بیشتر در میزان بالای نیکل، مسیرهای نفوذ عناصر در ذرات پودری افزایش می یابد که این امر می تواند منجر به تسریع فرآیند آلیاژسازی و رسیدن به محصول نهایی شود.

همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان آسیاب کاری تا ۴۰ ساعت، ذرات در اثر برخورد با گلوله و دیواره های ریزتر شدند. این در حالی است که با افزایش بیشتر زمان آسیاب کاری تا ۲۰۰ ساعت آلیاژسازی آگلومرهای بزرگتر ایجاد شده است. این موضوع می تواند نشان دهنده ادغام ذرات و نفوذ عناصر در یکدیگر و ایجاد یک آلیاژ با ترکیب مشخص باشد [۱۳].

همان طور که در نتایج آنالیز اشعه ایکس در قسمت قبل مشخص شد که با افزایش زمان آسیاب کاری تا ۲۰۰ ساعت، محلول جامد آهن-آلفا با ساختار مکعبی مرکز دار به وجود آمد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که این ذرات محلول جامد آهن-آلفا هستند که به صورت ذرات بزرگ آگلومره شده مشاهده می شوند. همچنین از نتایج آنالیز اشعه ایکس می توان دریافت که افزودن نیکل به این سیستم آلیاژی باعث کاهش زمان آسیاب کاری و تشکیل محلول جامد آهن-آلفا بعد از ۱۰۰ ساعت گردید. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی ذرات پودر پایه آهن Fe_{65} ($X = 0, 5, 10$) و $Fe_{65-x}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_x$ با درصد های اتمی مختلف نیکل ۰، ۵ و



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از $Fe_{65-x}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_x$ ($X=0, 5, 10$) با میزان مختلف نیکل ۰، ۵ و ۱۰ درصد اتمی در ۱۰۰ ساعت آسیاب کاری. (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب ۰، ۵ و ۱۰ درصد اتمی نیکل



شکل ۶: تصویر آنالیز عنصری آلیاژ پایه آهن $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5Ni_{10}$ بعد از ۱۰۰ ساعت آسیاب کاری

مرجع‌ها

- [1] W. H. Duff, L. V. Zhigilei, editors. Computational study of cooling rates and recrystallization kinetics in short pulse laser quenching of metal targets. Journal of Physics: Conference Series; 2007: IOP Publishing.
- [2] H. E. Khalifa. University of California, San Diego; 2009.
- [3] J. Z. Jiang, editor Phase transformations in metallic glasses. Materials Science Forum; 2004: Trans Tech Publications Ltd., Zurich-Uetikon, Switzerland.
- [4] A. Basu, A. Samant, S. Harimkar, J. D. Majumdar, I. Manna, N. B. Dahotre Laser surface coating of Fe-Cr-Mo-Y-B-C bulk metallic glass composition on AISI 4140 steel *Surface Coatings Technology*. **202** (2008) 2623.
- [5] J. Yao, C. Hostert, D. Music, A. Frisk, M. Björck, J. Schneider Synthesis and mechanical properties of Fe-Nb-B thin-film metallic glasses *Scripta Materialia*. **67** (2012) 181.
- [6] M. Bilek, D. McKenzie A comprehensive model of stress generation and relief processes in thin films deposited with energetic ions *Surface Coatings Technology*. **200** (2006) 4345.
- [7] M. Tokita Mechanism of spark plasma sintering *Proc. of the Inter. Sympo. on Microwave, Plasma Thermochemical Processing of Advanced Materials*. (1997) 69.
- [8] A. Inoue, J. S. Gook Multicomponent Fe-based glassy alloys with wide supercooled liquid region before crystallization *Materials Transactions, JIM*. **36** (1995) 1282.
- [9] L. J. M. S. Schultz Formation of amorphous metals by mechanical alloying *Materials Science Engineering*. **97** (1988) 15.
- [10] K. Rajeswari, U. Hareesh, R. Subasri, D. Chakravarty, R. Johnson Comparative evaluation of spark plasma (SPS), microwave (MWS), two stage sintering (TSS) and conventional sintering (CRH) on the densification and micro structural evolution of fully stabilized zirconia ceramics *Science of Sintering*. **42** (2010) 2.
- [11] S. Sharma, C. Suryanarayana Mechanical crystallization of Fe-based amorphous alloys *Journal of Applied Physics*. **102** (2007) 083544.
- [12] H.-l. Wang, T.-x. Gao, J.-z. Niu, P.-j. Shi, J. Xu, Y. J. I. J. o. M. Wang, Metallurgy, Microstructure, thermal properties, and corrosion behaviors of FeSiBAlNi alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering *International Journal of Minerals, Metallurgy, Materials*. **23** (2016) 77.
- [13] M. Boroujerdnia, A. Obeydavi, M. J. P. M. Sabzi Synthesis and characterisation of a novel Fe-based nanocomposite by mechanical alloying and spark plasma sintering. **64** (2021) 283.
- [14] A. Stokes, A. J. P. o. t. P. S. Wilson The diffraction of X rays by distorted crystal aggregates-I. **56** (1944) 174 .

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر میزان عنصر نیکل در آلیاژ پایه آهن با ترکیب $Fe_{65}B_{15}Si_{10}Ti_5Al_5$ که به روش آسیاب کاری مکانیکی توسط دستگاه آسیاب پیرانژی گلوله تهیه شده، پرداخت شد. نتایج این پژوهش به اختصار به شرح زیر می باشند.

- ۱- افزودن نیکل در سیستم آلیاژی $Fe_{65}Ti_5Al_5B_{15}Si_{10}$ و افزایش آن سبب کاهش شدت همه قله‌ها و پهن شدن آن‌ها گردید و همچنین انتقال قله‌ها به سمت زوایای کمتر شد.
- ۲- افزودن نیکل در این سیستم آلیاژی پایه آهن سبب کاهش اندازه بلورک‌های فاز آهن-آلفا و افزایش کرنش شبکه در اثر افزایش نیکل است.
- ۳- افزودن نیکل به این سیستم آلیاژی باعث کاهش زمان آسیاب کاری و تشکیل محلول جامد آهن-آلفا بعد از ۱۰۰ ساعت گردید.
- ۴- افزایش نیکل باعث کاهش اندازه ذرات در اثر آسیاب کاری در ساعت‌های یکسان آلیاژسازی شد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به خاطر حمایت‌های مالی این پژوهش کمال تشکر و سپاسگزاری را می‌نمایند.