

مقایسه ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات FeNi_3 ساخته شده به روش‌های گرمابی و هم‌رسوبی

سید ابراهیم موسوی قهرخی^{*}، فاطمه حمل زاده احمدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱/۲۳)

چکیده: در این پژوهش، نانوذرات FeNi_3 به دو روش گرمابی و هم‌رسوبی تهیه شدند. در روش گرمابی، اثر زمان و دماهای مختلف با مقادیر متفاوت از کاهش‌دهنده هیدرازین بررسی گردید. سپس نمونه‌ها با پراش‌سنجد پرتو X (XRD)، میکروسکوپ الکترون روبشی گسیل میدانی (FESEM) و مغناطیس‌سنجد نمونه ارتعاشی (VSM) مشخصه‌یابی شدند. نتایج الگوی پراش نشان داد که مقدار استفاده شده از هیدرازین در تک فاز شدن نمونه‌ها بسیار مؤثر است. تصاویر FESEM نانو بودن ذرات را نشان می‌دهد، اما در بعضی از دما و زمان‌ها نانوذره تشکیل نشده‌اند یا چسبندگی و ذوب شدگی در تصاویر دیده می‌شود. نتایج VSM نشان داد که نمونه‌های تهیه شده به دو روش خاصیت مغناطیسی بالایی دارند و مغناطش اشباع آن‌ها تفاوت چندانی ندارد.

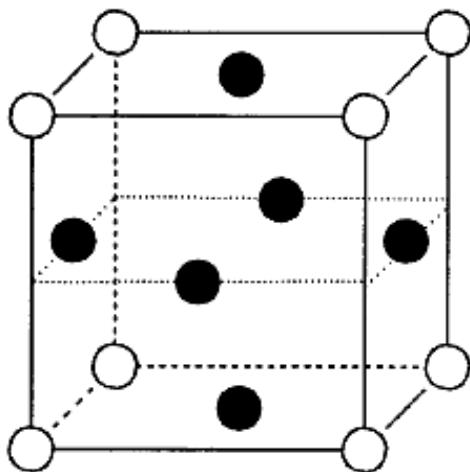
واژه‌های کلیدی: نانوذرات FeNi_3 ، روش گرمابی، روش هم‌رسوبی، ویژگی‌های ساختاری، ویژگی‌های مغناطیسی.

الکترومغناطیسی با مغناطش اشباع بالا و وادارندگی مغناطیسی کم است [۴، ۵]. ترکیب بین فلزی FeNi_3 در ساختار مکعبی مرکز سطحی (fcc) با گروه فضایی $\text{Pm}3\text{m}$ نوع AuCu_3 با ثابت شبکه $a = 0.3525\text{ nm}$ مبتلور می‌شود (شکل ۱) [۶]. آلیاژهای نانومتری Fe-Ni با روش‌های مختلفی از جمله آلیاژسازی مکانیکی، گرمابی، تراکم گازی اثر، سل-ژل و فرآیند کاهش شیمیایی تولید شده‌اند [۷، ۸]. در سال ۲۰۰۶ نانوذرات FeNi_3 در دمای 180°C با زمان‌های ۲، ۵، و ۱۵ h ولی با مغناطش اشباع بسیار پایین توسط لیائو و همکاران ساخته شدند [۹]. گتو و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ نانوذرات و نانوصفحات FeNi_3 را با تغییر pH و مقدار هیدرازین ساخته و ویژگی‌های مغناطیسی و ریخت‌شناسی آنها را بررسی کردند [۱۰]. در سال ۲۰۱۷ تائوهانگ و همکاران مغناطش اشباع حدود $87/7 \text{ emu/g}$ را برای نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به روش گرمابی در دمای 100°C با زمان 10 h گزارش کردند [۱۱].

مقدمه

در سال‌های اخیر، ساخت و بررسی نانوساختارهای مغناطیسی به دلیل ویژگی‌های خوب فیزیکی، کاتالیزوری، مغناطیسی و کاربردهای مهم آن‌ها در زمینه‌هایی چون القاگرها، مبدل‌ها، جذب امواج الکترومغناطیسی، آنتن‌ها، حسگرهای مغناطیسی، رسانه‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی و زیست پزشکی بسیار مورد توجه است [۱]. به ویژه، پیشرفت‌های سریع دستگاه‌های ارتباطی بی‌سیم نیاز به اجزای مغناطیسی مینیاتوری (کوچک) مانند القاگرها و مبدل‌ها دارد که در بسامد بالا کار می‌کنند و این امر نیازمند آن است که مواد مغناطیسی دارای مغناطش اشباع (M_s) بزرگ، نفوذپذیری (H) زیاد و اتلاف انرژی کم باشند. فریت‌های مغناطیسی نرم به دلیل نفوذپذیری زیاد و اتلاف انرژی کم، مواد مفیدی برای این کاربردها هستند. نانوذرات مغناطیسی فلزی چون آهن، کبالت، نیکل و آلیاژهای آن‌ها به دلیل مغناطش اشباع و دمای کوری بالا جایگزین ممکن برای فریتها هستند [۱۲، ۱۳]. در این میان، آلیاژ Fe-Ni، به ویژه FeNi_3 ، چشم انداز خوبی برای برنامه‌های کاربردی دستگاه

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۶۱۲۳۳۱۰۴۰، پست الکترونیکی: Musavi_ebrahim@yahoo.co.uk



شکل ۱ یاخته یکه FeNi_3 دایره‌های توپر اتم‌های Ni و دایره‌های توخالی اتم‌های Fe هستند [۸].

تفلون ۵۰ ml منتقل شد و با مقدار هیدرازین ۱ ml برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ h در ۱۰۰ °C و با مقدار هیدرازین ۳ ml برای ۱۰ h در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ °C در کوره قرار داده شد. فراورده بدست آمده با آب یون‌زدایی و اتانول چند بار شستشو داده و سپس در دمای ۸۰ °C بهمدت ۱۲ h در کوره خشک شد [۹، ۱۰]. فرآیند تهیه نانوذرات FeNi_3 به روش گرمابی در شکل ۲ نشان داده شده است.

ساخت نانوذرات FeNi_3 به روش همرسوبی

در این روش نخست، ۰.۹۸۸ g کلرید آهن در ۲۰۰ ml آب یون‌زدایی شده به مدت ۱۵ دقیقه در معرض امواج صوتی و سپس چرخش مغناطیسی قرار گرفت. پس از آن، ۰.۱۳۱ g کلرید نیکل به محلول افزوده شد تا سوسپانسیون بدست آید. ۱ g از پلی اتیلن گلیکول نیز به محلول اضافه و pH محلول در ۱۲ تنظیم گردید. سپس ۰.۷ ml هیدرازین به محلول افزوده شد و محلول بهمدت ۲۴ h به طور مغناطیسی هم زده شد. فراورده نهایی با استفاده از آهنربا جمع‌آوری و با آب یون‌زدایی شده و اتانول شستشو داده شد. نمونه‌ها در کوره ۸۰ °C بهمدت ۱۲ h خشک شدند [۱۱]. فرآیند تهیه نانوذرات FeNi_3 به روش همرسوبی در شکل ۳ نشان داده شده است. فاز نمونه‌ها با پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD)، ریختار آنها با میکروسکوپ الکترونی رویشی گسیل‌میدانی (FESEM) و ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها با مغناطیس‌سنج (VSM) نمونه ارتعاشی (SUS) بررسی شد.

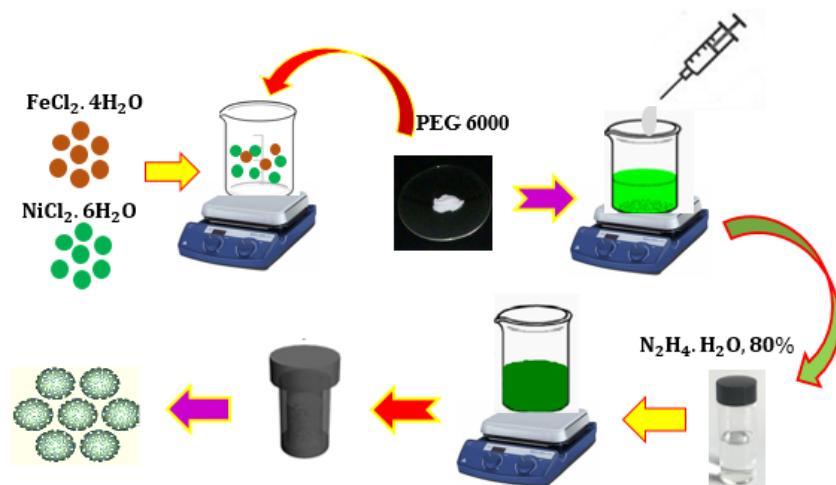
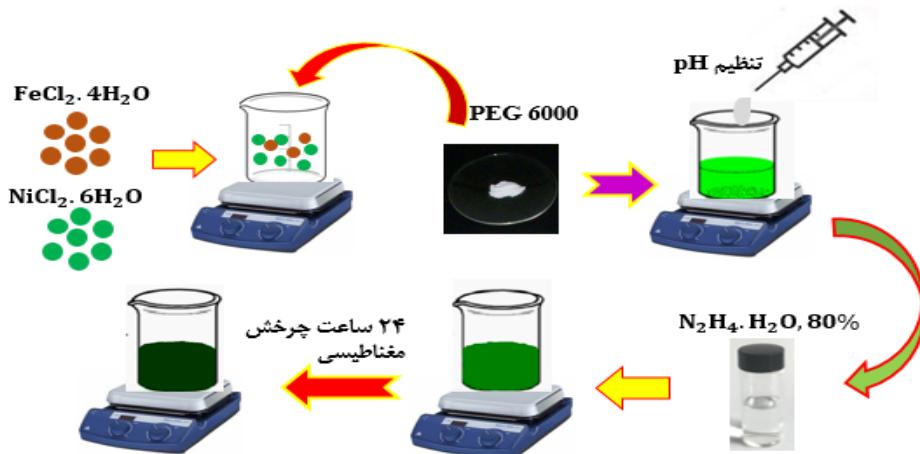
پژوهش‌های کمی پیرامون اثر دما و زمان بر ویژگی‌های نانوذرات FeNi_3 انجام شده است. همچنین تاکنون ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به دو روش گرمابی و همرسوبی مقایسه نشده‌اند. از این رو در این پژوهش، نانوذرات FeNi_3 با این دو روش و با هیدرازین به عنوان کاهش دهنده تهیه شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی (مغناطش اشباع) این نمونه‌ها نسبت به کار دیگران بهبود یافته است.

مواد و روش‌ها

برای تهیه نانوذرات FeNi_3 ، از کلرید آهن ۴ آبه ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)، کلرید نیکل ۶ آبه ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، پلی اتیلن گلیکول (PEG 6000) به عنوان روکنشگر و عامل پراکنده کننده، سدیم هیدروکسید (NaOH) برای تنظیم pH، هیدرازین ۰.۲۲۵ g از پلی اتیلن گلیکول نیز به محلول اضافه و آب یون‌زدایی شده به عنوان حلal استفاده شد.

ساخت نانوذرات FeNi_3 به روش گرمابی

در این روش نخست، ۰.۰۷۵ g کلرید آهن در ۳۵ ml آب یون‌زدایی شده ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه در معرض امواج صوتی و سپس چرخش مغناطیسی قرار گرفت. پس از آن، ۰.۰۶۹ g کلرید نیکل به محلول افزوده شد تا سوسپانسیون شفاف به دست آید. سپس ۰.۰۶۹ g از پلی اتیلن گلیکول نیز به محلول اضافه و برای تنظیم pH=۱۲ از سدیم هیدروکسید استفاده شد. سرانجام هیدرازین با دو مقدار متفاوت ۱ و ۳ ml به محلول افزوده شد. سپس سوسپانسیون به اتوکلاو

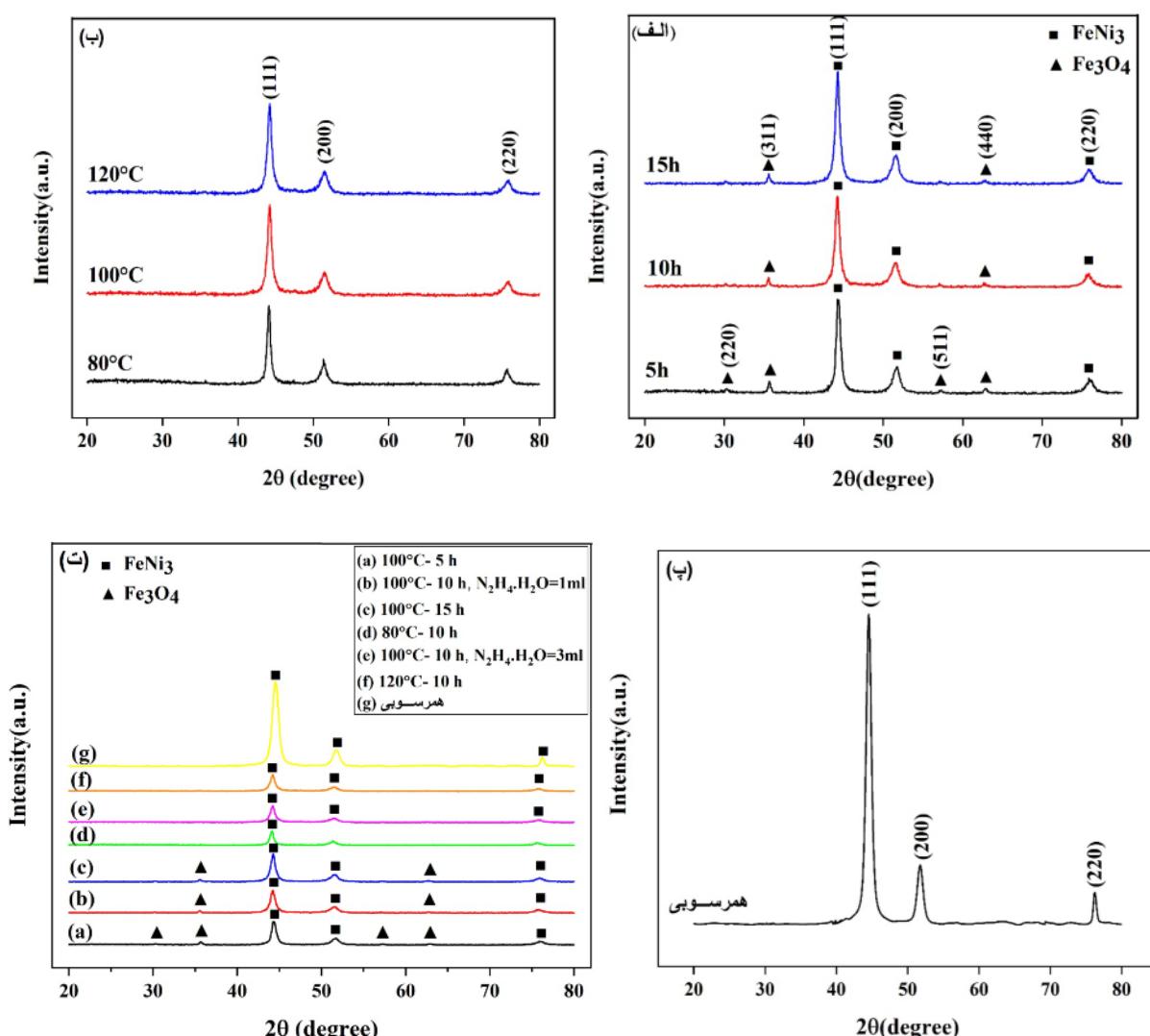
شکل ۲ فرآیند تهیه نانوذرات FeNi₃ به روش گرمابی.شکل ۳ فرآیند تهیه نانوذرات FeNi₃ به روش همروسوی.

مقایسه شکل‌های ۴ الف و ب دیده می‌شود که افزایش هیدریت هیدرازین باعث بهبود واکنش احیا و در نتیجه منجر به تولید FeNi₃ خالص گردیده است [۱۲، ۳].

شکل ۴ پ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه تهیه شده به روش همروسوی در گستره ۲۰–۸۰° را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که این روش منجر به تولید FeNi₃ خالص شده است و سه قله ۴۴/۶، ۵۱/۷ و ۷۶/۱ به ترتیب متناظر با صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) هستند. براساس الگوهای پراش نمونه‌ها اثر بهسزایی دارد. همچنین در روش همروسوی نیاز به بهینه سازی دما و زمان نیست و سریع‌تر می‌توان نمونه خالص را تهیه کرد. الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های در شکل ۴ ت مقایسه شده‌اند.

نتایج و بحث

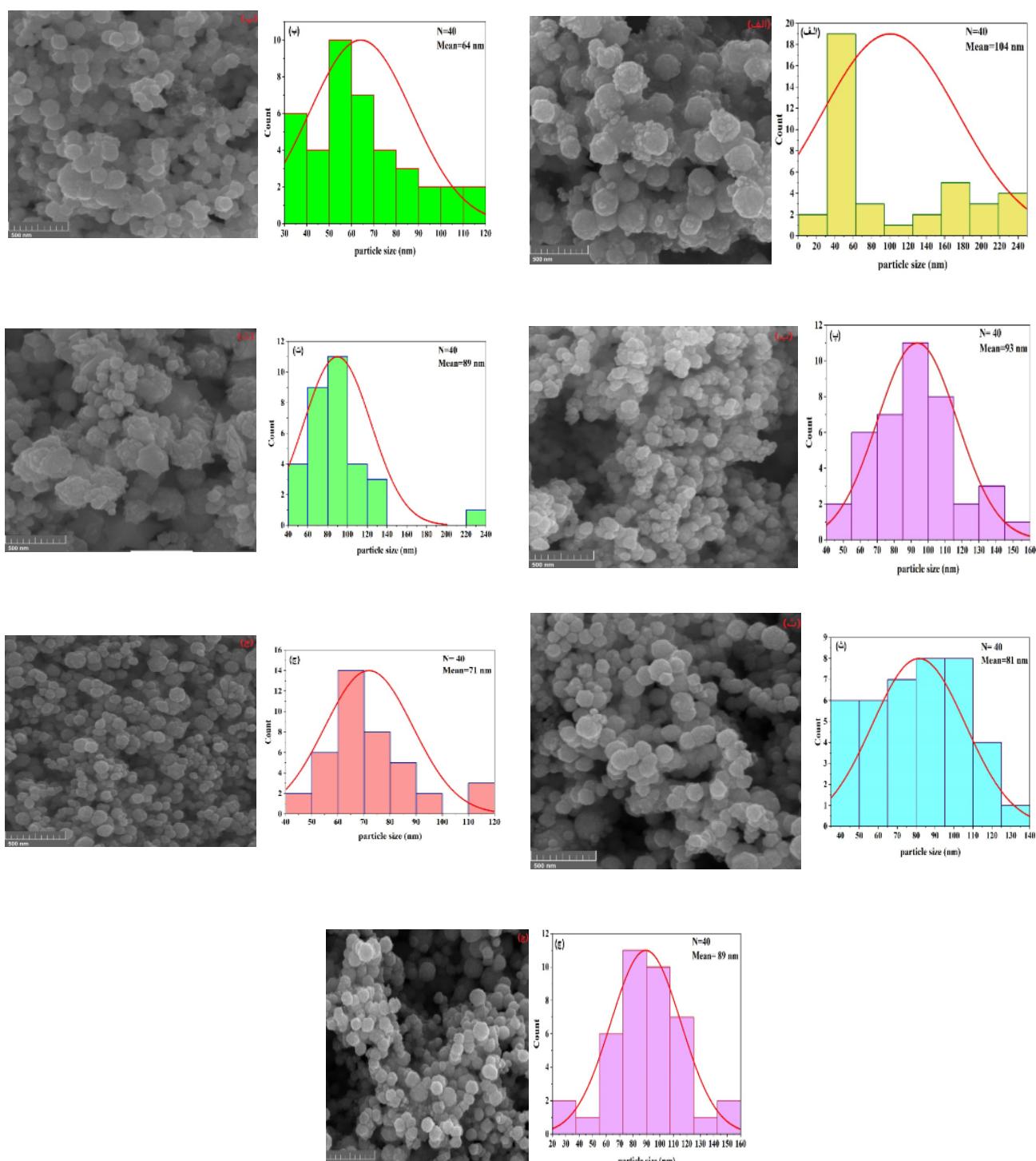
شکل‌های ۴ الف و ب الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات FeNi₃ تهیه شده به روش گرمابی را در گستره ۲۰–۸۰° نشان می‌دهند. از الگوی پراش نمونه‌های تهیه شده با ۱ ml هیدرازین در زمان‌های مختلف (شکل ۴ الف) دیده می‌شود که در زمان‌های بالا، ناخالصی Fe₃O₄ حذف نشده است. قله‌های ۳۰/۲، ۳۵/۶۵، ۴۴/۶ و ۶۲/۹ به ترتیب متناظر با صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۵۱۱) و (۴۴۰) از فاز Fe₃O₄ با شماره کارت استاندارد ۶۵۳۱۰۷-JCPDS و قله‌های ۴۴/۶، ۵۱/۷ و ۷۶/۱ به ترتیب متناظر با صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) از فاز FeNi₃ با شماره کارت استاندارد ۶۵۳۲۴۴-JCPDS هستند. در نمونه تهیه شده با ۳ ml هیدرازین در دماهای مختلف (شکل ۴ ب). هیچ ناخالصی وجود ندارد و فاز خالص FeNi₃ تشکیل شده است. بنابراین با



شکل ۴ الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات FeNi₃ تهیه شده با (الف) دمای ۱۰۰ °C و زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ h به روش گرمابی با ۱ml هیدرازین، (ب) زمان h ۱۰ در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ °C به روش همروسوی با ۳ml هیدرازین، (پ) روش گرمابی و (ت) دو روش همروسوی و همروسوی.

میانگین اندازه نانوذرات در این نمونه حدود ۶۴ nm محاسبه شد. با افزایش زمان پخت تا ۱۵ h، ذوب شدگی کمی در تصویر این نمونه دیده شده و یکنواختی ریختار آن از بین رفته است و اندازه نانوذرات در این حالت حدود ۹۳nm به دست آمد (شکل ۵ پ). از شکل ۵ ت مربوط به نمونه ساخته شده در دمای ۵ °C و با زمان ۱۰ h دیده می‌شود که نانو ذرات به طور کامل شکل نگرفته‌اند و در کنار آن‌ها نانوذرات درشت نیز وجود دارد و اندازه نانوذرات در این نمونه حدود ۸۹nm است. تصویر ۵. ث ریخت نمونه تهیه شده در دمای ۱۰۰ °C و با زمان ۱۰ h را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نانو ذرات کاملاً یکنواخت تشکیل شده‌اند و اندازه متوسط ذرات ۸۱nm است.

به منظور ریخت‌شناسی نمونه‌ها، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی به همراه نمودارهای توزیع فراوانی ذرات بر حسب اندازه آن‌ها در شکل ۵ آورده شده است. گفتنی است که نمودارهای ستونی اندازه ذرات با محاسبه اندازه ۴۰ ذره تصادفی از هر نمونه با نرم‌افزار Digimizer رسم گردیدند. چنان که از تصویر ۵. الف مشخص است، نمونه تهیه شده به روش گرمابی با زمان ۵ h و دمای ۱۰۰ °C یکنواخت نبوده و شامل از ذرات ریز و درشت است که متوسط اندازه ذرات این نمونه ۱۰۴ nm به دست آمد. این درحالی است که ریختار نمونه‌ی با زمان ۱۰ h و دمای ۱۰۰ °C (شکل ۵ ب) بهتر شده و یکنواختی و چسبندگی بین ذرات کمتر شده است.



شکل ۵ تصاویر FESEM نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به روش گرمایی با (الف) $100^{\circ}\text{C}-1\text{h}$ ، (ب) $100^{\circ}\text{C}-5\text{h}$ ، (ج) $100^{\circ}\text{C}-10\text{h}$ ، (د) $100^{\circ}\text{C}-10\text{h}$ با ۳ml هیدرایزین، (ه) $100^{\circ}\text{C}-10\text{h}$ با ۱ml هیدرایزین، (ت) $120^{\circ}\text{C}-1\text{h}$ و (پ) $120^{\circ}\text{C}-10\text{h}$ تهیه شده به (ج) روش همروبوی.

میانگین ذرات برای این نمونه 71nm به دست آمد. شکل ۵ ج مربوط به نمونه تهیه شده به روش همروبوی است که متوجه ذرات در این روش 89nm به دست آمد؛ مشخص است که

ریخت ذرات در نمونه ساخته شده با دمای 120°C و زمان 10h در تصویر ۵. ج نشان شده است؛ دیده می‌شود که نانوذرات FeNi_3 با یکنواختی خوبی تشکیل شده‌اند. همچنین

(M_r)، از حلقه پسماند و میدان ناهمسانگردی بلوری (M_s) میدان وامغناطیدگی (H_d) و ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین (K) از روابط زیر [۱۶، ۱۵]، محاسبه شده‌اند و نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

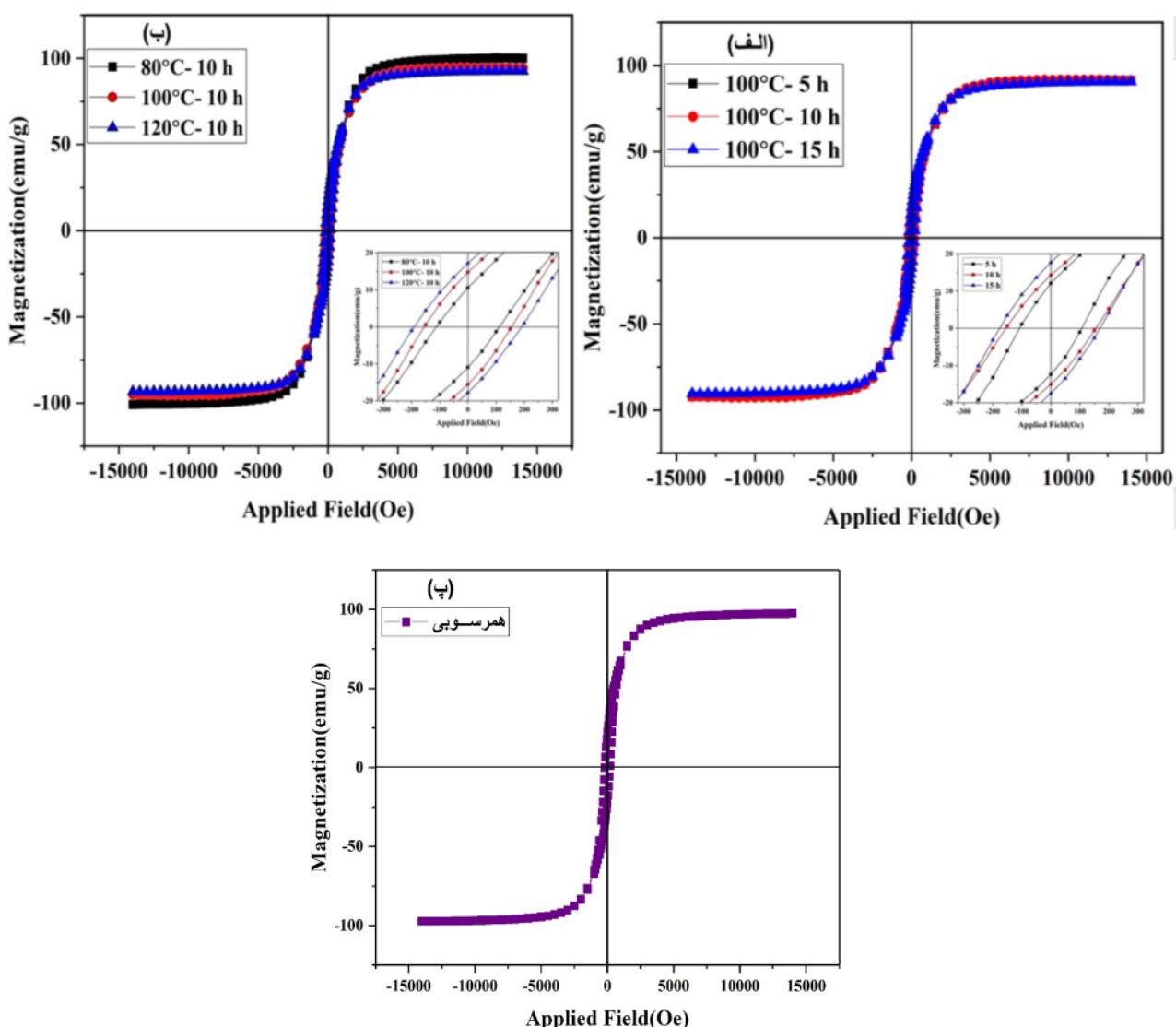
$$\vec{M} = \vec{M}_s \left(1 - \frac{\vec{H}_a}{15\vec{H}^2} \right) \quad (1)$$

$$\vec{H}_a = \frac{2K}{\vec{M}_s} \quad (2)$$

$$\vec{H}_c = 0.48(\vec{H}_a - \vec{H}_d) \quad (3)$$

نانوذرات با یکنواختی خوبی تشکیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته شده بهروش گرمابی در دماهای ۱۰۰ و ۱۲۰ °C با زمان ۱۰ h و همچنین به روشنی همروسوی از نظر ریخت‌شناسی و یکنواختی نانوذرات نسبت به سایر نمونه‌ها مطلوبتر هستند [۱۴، ۱۳، ۱۰].

شکل ۶ حلقه‌های پسماند نمونه‌های FeNi₃ تهیه شده در زمان و دماهای مختلف به روشن گرمابی و روشن همروسوی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های مغناطیسی از قبیل وادارندگی مغناطیسی (H_c)، مغناطش اشباع (M_s) مغناطش پسماند



شکل ۶ حلقه پسماند نانوذرات FeNi₃ تهیه شده به (الف) روش گرمابی در دما ۱۰۰ و ۱۲۰ °C و زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ ساعت با ۱ml هیدرازین، (ب) روش گرمابی با زمان ۱۰ h در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ °C با ۳ml هیدرازین و (پ) روش همروسوی.

جدول ۱ ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی با دمای 100°C در زمان‌های ۵، ۱۰ و 15 h با 1 ml هیدرازین، با زمان 10 h در دماهای 100°C و 120°C با 3 ml هیدرازین و روش همرسوبی.

دما و زمان	$H_a(\text{Oe})$	$M_s(\frac{\text{emu}}{\text{g}})$	$M_r(\frac{\text{emu}}{\text{g}})$	$H_a(\text{Oe})$	$H_d(\text{Oe})$	$(\frac{\text{emu}}{\text{g}} k\text{Oe})$
$100^{\circ}\text{C}-5\text{h}$	۱۰۲	۹۱,۳۸	۱۲,۱۰	۳۰۶۸,۸۹۱	۲۸۵۶,۳۹۱	۱۴۰,۲۱۷۶
$100^{\circ}\text{C}-10\text{h}$	۱۵۲	۹۱,۳۳	۱۴,۲۸	۳۰۳۳,۴۰۱	۲۷۱۶,۷۳۴	۱۳۸,۲۵۰۳
$100^{\circ}\text{C}-15\text{h}$	۱۷۳	۹۰,۶۴	۱۷,۶۹	۲۹۱۵,۶۱۳	۲۵۵۵,۱۹۶	۱۳۲,۱۳۵۶
$80^{\circ}\text{C}-10\text{h}$	۱۰۳	۱۰۰	۱۰,۵۷	۳۱۱۱,۱۸۹	۲۸۹۶,۶۰۶	۱۵۵,۵۵۹۵
$100^{\circ}\text{C}-10\text{h}$	۱۹۴	۹۴,۳۳	۱۴,۵	۳۰۳۸,۲۳۸	۲۶۳۴,۰۷۲	۱۴۳,۲۹۸۵
$120^{\circ}\text{C}-10\text{h}$	۱۹۴	۹۲,۵۹	۱۷,۲۲	۲۸۲۳,۴۴۴	۲۴۱۹,۲۷۸	۱۳۰,۷۱۱۴
همرسوبی	۱۹۹	۹۷,۴۶	۲۴,۵	۲۷۰,۱,۸۳۶	۲۲۸۷,۲۵۳	۱۳۱,۶۶۰۵

مغناطش خودبُخودی نمونه‌ها ناشی می‌شود. از ضرایب A و χ بهدلیل ناچیز بودن چشم‌پوشی می‌شود [۲۰].

شکل ۷ نمودار M بر حسب $\frac{1}{H}$ برای همه نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. با محاسبه عرض از مبدأ هر یک از خط‌ها، مغناطش اشباع (نظری) برای همه نمونه‌ها محاسبه گردید. مغناطش اشباع تحریبی به دست آمده از حلقه پسماند با مغناطش اشباع نظری محاسبه شده براساس نمودارهای شکل ۷ به همراه اختلاف آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

نمودار پذیرفتاری مغناطیسی (χ) به صورت تابعی از شدت میدان مغناطیسی (H)، با استفاده از مشتق M نسبت به H $\chi = \frac{dM}{dH}$ [۲۱] برای نمونه‌های تهیه شده به دو روش گرمابی و همرسوبی در شکل ۸ آورده شده است. هر چه قله‌ها تیزتر باشند نشان‌دهنده آن است که نمونه‌ها از نظر مغناطیسی تک فازی بوده و دارای مغناطش بالایی هستند. فازها را می‌توان به توزیع ناهمگن کاتیونی، نقص‌ها و تهی جاهایی که از نواحی با ناهمسانگردی مغناطیسی بیشتر ناشی می‌شود نسبت داد [۲۲، ۲۳]. چنان که از نمودارهای شکل ۸ الف مشخص است

همه نمونه‌ها تقریباً تک فاز مغناطیسی هستند.

نفوذپذیری مغناطیسی (μ) نمونه‌ها از داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی و با رابطه زیر [۲۴] به دست آمد:

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (5)$$

نمودار نفوذپذیری مغناطیسی به صورت تابعی از شدت میدان مغناطیسی (H)، برای نمونه‌های تهیه شده به روش‌های گرمابی و همرسوبی در شکل ۹ آورده شده است. چنان که دیده می‌شود، این نمودارها شبیه نمودارهای پذیرفتاری هستند.

با توجه به این نتایج، ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده با این دو روش تفاوت چندانی با هم ندارند، ولی وارداندگی مغناطیسی در روش همرسوبی بهبود یافته است. برای مثال، مغناطش اشباع در این پژوهش (100 emu/g) از کارهای انجام شده توسط مینگ لیانگ یوان و همکاران ($85,2\text{ emu/g}$) [۷] و لواکسیوگنگ اس. جی. یان و همکاران (75 emu/g) [۱۸] بیشتر است. هر چند مغناطش اشباع در همه نمونه‌های تهیه شده مطلوب است، ولی بعضی از آنها مغناطش اشباع بالاتری دارند. علت این امر بالا بودن درصد فاز اصلی (FeNi_3) است که مغناطش اشباع بالاتری نسبت به فاز دیگر (Fe_3O_4) دارد. همچنین بیشتر بودن مغناطش اشباع در نمونه تهیه شده با دمای 100°C و زمان 10 h افزون بر غالب بودن فاز اصلی به دلیل ریخت شناسی این نمونه و بزرگ بودن اندازه نانو ذرات آن است، زیرا هرچه اندازه نانوذرات مغناطیسی بیشتر شود نسبت سطح به حجم کاهش و میدان وامغناطش کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش مغناطش آن‌ها می‌شود [۱۹].

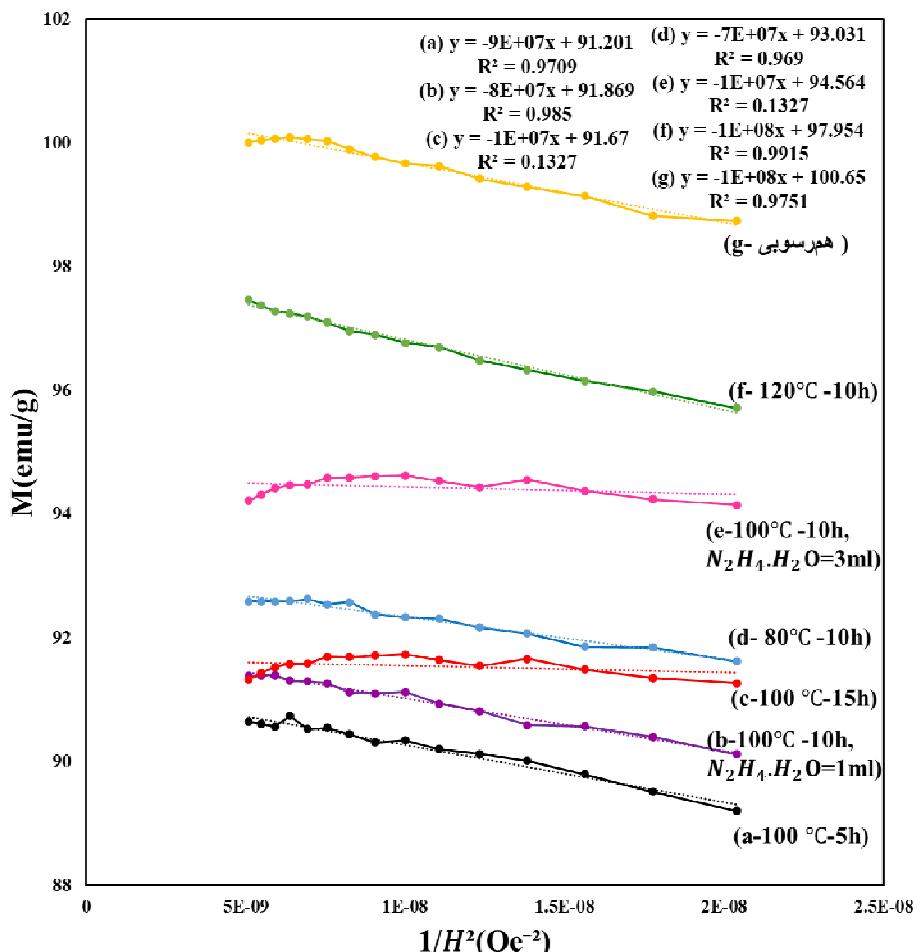
اندازه مغناطش اشباع نمونه‌ها، برای اطمینان از دقت افزون بر حلقه‌های پسماند، از قانون نزدیکی به اشباع (اغلب برای نمونه‌هایی که میدان مغناطیسی اعمالی کافی برای اشباع کافی نباشد) نیز محاسبه شد:

$$M = M_s \left(1 - \frac{A}{H} - \frac{B}{H^2} \right) + \chi H \quad (4)$$

اینجا A ، B و χ به ترتیب مقادیر ثابت و پذیرفتاری مغناطیسی هستند که از ناهمگنی نمونه، ناهمسانگردی مغناطوبلورین و

نمونه‌ها در میدان‌های مغناطیسی اعمالی کم است؛ در نتیجه این نمونه‌ها در میدان مغناطیسی کم دارای مغناطش اشباع بالایی هستند و می‌توانند در میدان‌های مغناطیسی کم شار مغناطیسی زیادی را به خوبی از خود عبور دهند.

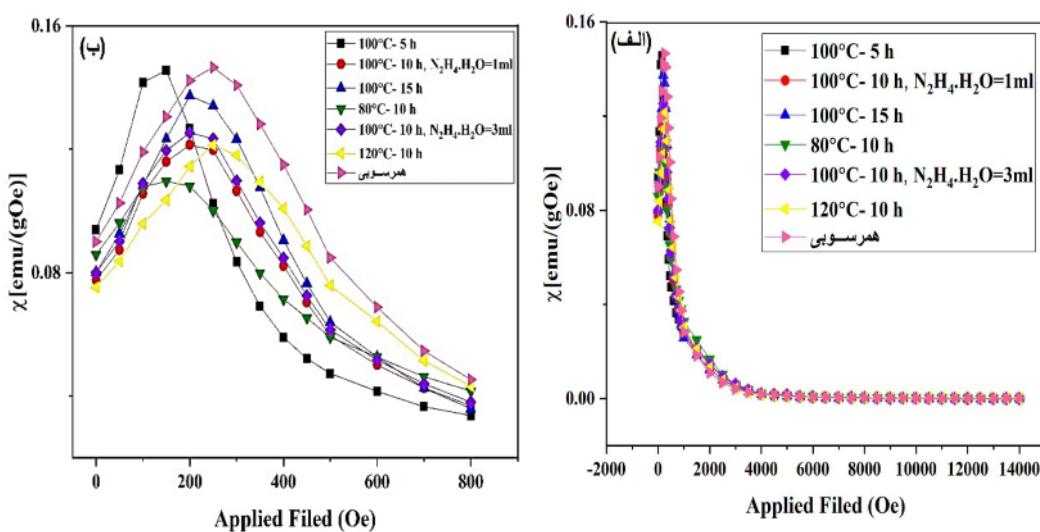
مقادیر پذیرفتاری و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. دیده می‌شود که پذیرفتاری و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌ها اختلاف چندانی با هم ندارند، زیرا مغناطش این نمونه‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند. براساس شکل-های ۸.ب و ۹.ب، بیشترین پذیرفتاری و نفوذپذیری مغناطیسی



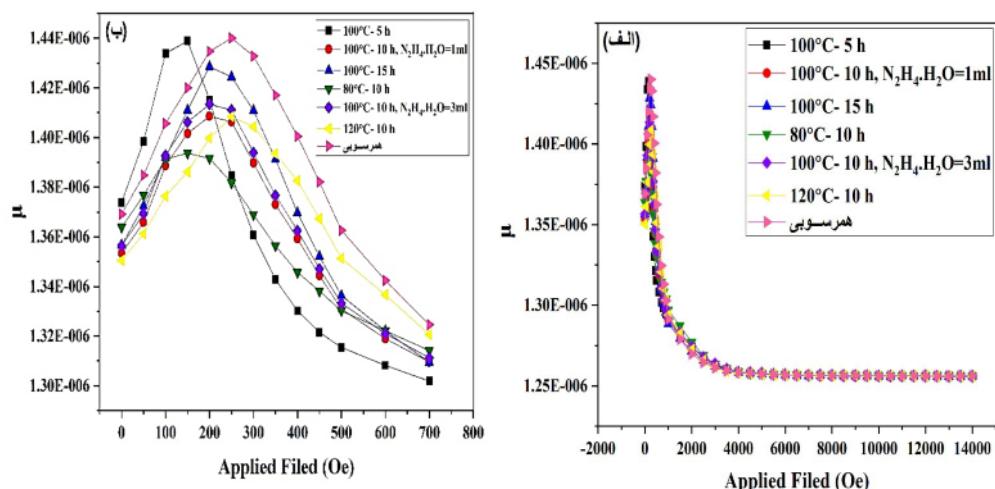
شکل ۷ نمودار $M - \frac{1}{H^2}$ نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به روش‌های گرمابی و هم‌رسوبی.

جدول ۲ مغناطش اشباع تجربی و نظری، مقدار اختلاف آن‌ها، پذیرفتاری مغناطیسی (χ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی با دمای 100°C در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ h با ۱ ml هیدرازین، با زمان ۱۰ h در دماهای 100°C و 120°C با ۳ ml هیدرازین و روش هم‌رسوبی.

دما و زمان	M_s تجربی	M_s نظری	مقدار اختلاف	χ	μ
$100^\circ\text{C}-5\text{h}$	۹۱.۳۸	۹۱.۸۶	۰.۵۲	۰.۱۴۵	۰.۰۰۰۴۳۸
$100^\circ\text{C}-10\text{h}$	۹۱.۳۳	۹۱.۶۷	۰.۳۷	۰.۱۲۱	۰.۰۰۰۴۰۸
$100^\circ\text{C}-15\text{h}$	۹۰.۶۴	۹۱.۲	۰.۶۱	۰.۱۳۷	۰.۰۰۰۴۲۴
$80^\circ\text{C}-10\text{h}$	۱۰۰	۱۰۰.۶۵	۰.۶۴	۰.۱۰۹	۰.۰۰۰۳۹۳
$100^\circ\text{C}-10\text{h}$	۹۴.۳۳	۹۴.۵۶	۰.۲۴	۰.۱۲۵	۰.۰۰۰۴۱۳
$120^\circ\text{C}-10\text{h}$	۹۲.۵۹	۹۳.۰۳	۰.۴۷	۰.۱۲۱	۰.۰۰۰۴۰۸
هم‌رسوبی	۹۷.۴۶	۹۷.۹۵	۰.۵	۰.۱۴۶	۰.۰۰۰۴۴۰



شکل ۸ نمودار پذیرفتاری مغناطیسی نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به روش‌های گرمابی و همرسوبی.



شکل ۹ نمودار نفوذپذیری مغناطیسی نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به روش‌های گرمابی و همرسوبی.

نمونه‌ها بیشتر است. نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی در دماهای 100°C و 120°C با زمان 10 h و نمونه تهیه شده به روش همرسوبی و ادارنده‌گی مغناطیسی بیشتری دارند. بررسی‌ها نشان داد که فاز، ریختار، ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات FeNi_3 تهیه شده به روش همرسوبی بدون نیاز به بهینه سازی دما و زمان نسبت به روش گرمابی مطلوب‌تر است.

مراجع

- [1] Chen H., Xu C., Zhao G., Liu Y., "Template-free formation of urchin-like FeNi_3 microstructures by hydrothermal reduction", *Materials Letters*, 91 (2013) 75-77.
- [2] Tang N. J., Zhong W., Jiang H. Y., Han Z. D., Zou W. Q., Du Y. W., "Complex permeability of $\text{FeNi}_3/\text{SiO}_2$ core-shell nanoparticles", *Solid state communications*, 132 (2004) 71-74.

برداشت نانوذرات FeNi_3 به دو روش گرمابی و همرسوبی تهیه شدند. نمونه‌ها در روش گرمابی در زمان‌ها و دماهای مختلف با دو مقدار ۱ و ۳ میلی‌لیتر از هیدرایت هیدرازین ساخته شدند. بررسی ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها نشان داد که مقدار عامل کاهنده (هیدرایت هیدرازین) در تک فاز شدن نمونه‌ها بسیار موثر است. براساس تصاویر FESEM، نمونه تهیه شده به روش گرمابی با زمان 15 h و دمای 100°C دارای ذوب‌شدگی کمی است و نانوذرات FeNi_3 تهیه شده در دمای 80°C و زمان 10 h به خوبی تشکیل نشده‌اند. نانوذرات FeNi_3 نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی در سایر دماها و زمان‌ها و همچنین نمونه تهیه شده به روش همرسوبی ریختار دارند. مغناطش اشباع برای نمونه تهیه شده به روش گرمابی در دمای 80°C و با زمان 10 h نمونه تهیه شده به روش همرسوبی نسبت به سایر

- hydrothermal method for application in high frequency”, Ferroelectrics 521 (2017) 116-125.*
- [15] Amir M., Gungunes H., Slimani Y., Tashkandi N., El Sayed H. S., Aldakheel F., Baykal A., “*Mössbauer studies and magnetic properties of cubic CuFe₂O₄ nanoparticles*”, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 32 (2019) 557-564.
- [16] Sharifi Z., “*Fabrication and investigation of magnetic and structural properties of lead spinel nanoparticles*”, Master Thesis, Faculty of Science Department of Physics, Shahid Chamran University of Ahvaz (1395).
- [17] Yan S. J., Zhen L., Xu C. Y., Jiang J. T., Shao W. Z., “*Microwave absorption properties of FeNi₃ submicrometre spheres and SiO₂@FeNi₃ core-shell structures*”, Journal of Physics D: Applied Physics 43 (2010) 245003.
- [18] Lu X., Wu J., Huo G., Sun Q., Huang Y., Han Z., Liang G., “*Protein-passivated FeNi₃ particles with low toxicity and high inductive heating efficiency for thermal therapy*”, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 414 (2012) 168-173.
- [19] Patil R P., Waghmare M B., Chikalkar M G., Delekar S D., “*Effect of Sintering Temperature on Structural, Morphological, and Magnetic Properties of Nickel Ferrite Prepared via a Polyol Method*”, Macromol. Symp 393 (2020) 2000178.
- [20] Mousavi Ghahfarokhi S. E., Ahmadi M., Kazeminezhad I., “*Effects of Bi³⁺ Substitution on Structural, Morphological, and Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles*”, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 32 (2019) 3251-3263.
- [21] Mousavi Ghahfarokhi S. E., Hosseini S., Zargar Shoushtari M., “*Fabrication of SrFe_{1-x}Ni_xO₉ nanoparticles and investigation on their structural, magnetic and dielectric properties*”, International Journal of Minerals Metallurgy and Materials 22 (2015) 876-883.
- [22] Jacobo S. E., Herme C., Bercoff P. G., “*Influence of the iron content on the formation process of substituted Co-Nd strontium hexaferrite prepared by the citrate precursor method*”, Journal of Alloys and Compounds 495 (2010) 513-515.
- [23] Mousavi Ghahfarokhi S. E., Hosseini S., Zargar Shoushtari M., “*Fabrication and study of magnetic and dielectric properties of strontium hexaferrite nanoparticles type M*”, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 2 (1394) 359-372.
- [24] Cullity B. D, Graham C. D, “*Introduction to magnetic materials*”, John Wiley & Sons (2011).
- [3] Hongxia G., Hua C., Fan L., Zhenping Q., Suping C., Zuoren N., “*Shape-controlled synthesis of FeNi₃ nanoparticles by ambient chemical reduction and their magnetic properties*”, Journal of Materials Research 27 (2012) 1522-1530.
- [4] Oleksakova D., Kollár P., Füzer J., “*Structure and magnetic properties of powdered and compacted FeNi alloys*”, Materials Letters 91 (2013) 75-77.
- [5] Ma T., Yuan M., Islam, S. M., Li H., Ma S., Sun G., Yang X., “*FeNi₃ alloy nanocrystals grown on graphene: Controllable synthesis, in-depth characterization and enhanced electromagnetic performance*”, Journal of Alloys and Compounds 678 (2016) 468-477.
- [6] Nirouei M., Jafari A., Boustani K., “*Magnetic and structural study of FeNi₃ nanoparticles: effect of calcination temperature*”, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 27 (2014) 2803-2811.
- [7] Yuan M. L., Tao J. H., Yu L., Song C., Qiu G. Z., Li Y., Xu Z. H., “*Synthesis and magnetic properties of Fe-Ni alloy nanoparticles obtained by hydrothermal reaction*”, In Advanced Materials Research 239 (2011) 748-753.
- [8] Dang M. Z., Rancourt D. G., “*Simultaneous magnetic and chemical order-disorder phenomena in Fe₃Ni, FeNi, and FeNi₃*”, Physical Review B 53 (1996) 2291.
- [9] Liao Q., Tannenbaum R., Wang Z. L., “*Synthesis of FeNi₃ alloyed nanoparticles by hydrothermal reduction*”, The Journal of Physical Chemistry B 110 (2006) 14262-14265.
- [10] Han T., Xu C., Chen H., “*Simple synthesis of novel mushroom-like FeNi₃ microstructures by a hydrothermal reduction*”, Materials Research Innovations 23 (2019) 39-42.
- [11] Lu X., Liang G., Sun O., Yang C., “*High-frequency magnetic properties of FeNi₃-SiO₂ nanocomposite synthesized by a facile chemical method*”, Journal of alloys and compounds 509 (2011) 5079-5083.
- [12] Lu X., Liang G., Zhang Y., “*Synthesis and characterization of magnetic FeNi₃ particles obtained by hydrazine reduction in aqueous solution*”, Materials Science and Engineering: B 139 (2007) 124-127.
- [13] Abellán G., Carrasco J. A., Coronado E., Prima-García H., “*Synthesis of FeNi₃ nanoparticles in benzyl alcohol and their electrical and magnetic properties*”, Journal of sol-gel science and technology 70 (2014) 292-299.
- [14] Li G., Mei Y., Hou F., “*Magnetic properties of FeNi₃/NiZn-ferrite nanocomposite prepared by*