

# آهنربای کامپوزیتی پلیمری دائمی NdFeB-PEG

## NdFeB-PEG Permanent Polymeric Composite Magnet

مهرداد کوبی<sup>۱\*</sup>، فاطمه عربگل<sup>۱</sup>، مهرداد منطقیان<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی پلیمر؛ ۲- گروه مهندسی شیمی؛

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، صندوق پستی ۱۴۱۵۵/۱۱۱

دریافت: ۸۱/۱۰/۲۱، پذیرش: ۸۲/۳/۲۸

### چکیده

ساخت آهنرباهای کامپوزیتی پلیمری دائمی با خواص مناسب نظیر مقاومت خوردگی، سهولت شکل پذیری و تولید انبوه با استفاده از پودرهای مغناطیسی نسل جدید از موضوعات جالب پژوهشی روز است. در این پژوهش، آهنرباهای کامپوزیتی پلیمری دائمی با استفاده از پودر همسانگرد NdFeB در ماتریس گرما نرم پلی اتیلن گلیکول ساخته شد. پودر مغناطیسی به روش مکانیکی خرد و در محدوده اندازه‌های کوچکتر یا مساوی ۱ تا ۲۰ و ۷۴ تا ۱۰۰  $\mu\text{m}$  جداسازی گردید. پودر نانومتری پلی اتیلن گلیکول نیز به روش حلال - غیرحلال تهیه شد. اثر اندازه ذرات پودر مغناطیسی و مقدار پلیمر PEG بر خواص مغناطیسی آهنرباهای کامپوزیتی پلیمری حاصل، نظیر القای مغناطیسی باقیمانده ( $B_r$ )، شدت میدان مغناطیسی بازدارنده ( $H_c$ )، بیشترین تولید انرژی  $(BH)_{\text{max}}$  و چگالی نهایی بررسی و مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد که در بین نمونه‌های ساخته شده، آهنربای کامپوزیتی پلیمری NdFeB-PEG متشکل از ذرات پودر مغناطیسی NdFeB با اندازه ۷۴-۱۰۰  $\mu\text{m}$  و نسبت پلیمر PEG به پودر برابر ۵ phr مطلوبترین خواص مغناطیسی را به شرح زیر دارد:

چگالی نهایی  $5/444 \text{ g/cm}^3$ ،  $B_r = 3/82 \text{ kG}$ ،  $H_c = 8/415 \text{ kOe}$  و  $(BH)_{\text{max}} = 14/454 \text{ MGOe}$ .

### واژه‌های کلیدی

NdFeB، PEG، پودر مغناطیسی،

پلیمر گرمانرم، آهنربای کامپوزیتی دائمی

### مقدمه

و بیشترین انرژی تولیدی  $(BH)_{\text{max}}$ . مشخصه اخیر از اهمیت بیشتری برخوردار است، بطوری که حجم کوچکی از آهنربای با  $(BH)_{\text{max}}$  زیاد، کارایی مطلوبی نشان می‌دهد [۱]. آهنرباهای بر پایه NdFeB اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط کروت، هریست و ساگاوا

آهنرباهای دائمی بطور وسیع در کاربردهای مختلف برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی و برعکس بکار می‌روند. سه مشخصه بسیار مهم که بازده آهنرباهای دائمی را معین می‌کند، عبارتند از: القای مغناطیسی باقیمانده ( $B_r$ )، شدت میدان مغناطیسی بازدارنده ( $H_c$ )

### Key Words

NdFeB, PEG, magnetic powder, thermoplastic polymer, permanent composite magnet

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: mehrir@modares.ac.ir

محدودی درباره تهیه پودر میکرو و نانومتری آلیاژ مغناطیسی کمیاب  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  به کمک روش جدید مکانیکی و گرمایی به نام آسیاب شیمیایی - مکانیکی (mechano-chemical milling) و خواص آن گزارش شده است [۱۲، ۱۳].

در این پژوهش، با انتخاب ماتریس پلیمری گرمانرم PEG و پودر همسانگرد Nd(FeCo)B در مقیاس کوچکتر یا مساوی ۱ تا ۲ و ۱۰ تا ۷۴  $\mu\text{m}$ ، اثر عوامل مختلف نظیر اندازه ذرات پودر مغناطیسی و مقدار ماتریس پلیمری در آهنربای کامپوزیتی بر خواص مغناطیسی نظیر القای مغناطیسی باقیمانده ( $B_r$ )، شدت میدان مغناطیسی بازدارنده ( $H_c$ )، بیشترین تولید انرژی ( $BH$ ) max و چگالی آهنربای کامپوزیتی بررسی می شود.

## تجربی

### مواد

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل پودر مغناطیسی Nd(FeCo)B با کد NQP-B محصول شرکت چینی Xiamen Yuxiang Magnetic Materials مطابق مشخصات آمده در جدول ۱ و ماتریس پلیمر گرمانرم PEG محصول شرکت مرک با دمای ذوب  $65-60^\circ\text{C}$ ، جرم مولکولی ۳۵۰۰۰ و چگالی  $1/05 \text{ g/cm}^3$  است.

### دستگاهها

دستگاههای مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای (planetary ball mill)، هاون فولادی و آسیاب گلوله‌ای سرامیکی (ceramic ball mill)، دستگاه مغناطیس سنج (B-H loop tracer) موجود در گروه فیزیک دانشگاه اصفهان، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ساخت زیس آلمان مدل ۹۰۰ و میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) مدل XLC ساخت شرکت فیلیپس با بزرگنمایی ۱۰۵.

### روشها

#### خرد کردن پودر آلیاژ مغناطیسی NdFeB

خرد کردن پودر مغناطیسی به روش مکانیکی در دو مرحله یک ساعته به وسیله آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، هاون فولادی و آسیاب گلوله‌ای سرامیکی صورت گرفت.

#### تهیه پودر بسیار ریز پلیمر PEG در اندازه‌های نانومتری

خرد کردن گرانولها و پولکهای میلی متری پلیمر PEG و تهیه پودر آن در

مطرح شد. این نوع آهنربا دارای خواص مغناطیسی بسیار مطلوب است [۲، ۳] و حجم وسیعی از کارهای پژوهشی را به منظور بهبود خواص ذاتی و روشهای ساخت به خود اختصاص داده است [۱].

آهنرباهای NdFeB را می توان به دو دسته کلی فلزی و پلیمری تقسیم کرد. آهنرباهای پلیمری نوع NdFeB به دلیل مزایای متعددشان در مقایسه با آهنرباهای NdFeB تف جوش یا ریخته گری شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این مزایا عبارتند از: کاهش شکست و ترک در آهنربا به دلیل ویژگی ارتجاعی و انعطاف پذیری پلیمر، جهتگیری شعاعی و قطبی که از جهتگیری پودر در زمینه ارتجاعی پلیمر ناشی می شود [۴]، امکان تطابق خواص شیمیایی با شرایط محیطی با انتخاب پلیمر مناسب، امکان تهیه فیلم نازک مغناطیسی و آهنرباهایی با اشکال پیچیده هندسی و دقت ابعادی زیاد، سرعت تولید زیاد و کاهش قابل ملاحظه هزینه ها با توجه به فناوریهای جدید و مختلف قالبگیری پلیمرها [۵].

کاربرد این آهنرباها همراه با رشد سریع صنایع الکترونیکی، رایانه های شخصی (PC)، ارتباطات، سیستمهای میکروالکترونیکی - مکانیکی (MEMS) و خودرو، حسگرها و موتورهای DC و VCM (Voice-Coil-Motor) در سالهای اخیر توسعه فراوانی یافته است [۶-۸].

آهنرباهای کامپوزیتی پلیمری گوناگونی متشکل از پودر مغناطیسی دائمی NdFeB و حاملهای پلیمری متفاوت نظیر پلی اولفینها، PPS، HDPE، PE، PVC، رزین اپوکسی و الاستومر NBR برای اهداف مختلف با روشهای مرسوم شکل دهی پلیمرها تهیه شده است [۹، ۱۰]. در این پژوهش، پلیمر گرمانرم پلی اتیلن گلیکول (PEG) که در اثر سوختن باقیمانده جامد برجای نمی گذارد و به راحتی در آب حل می شود، انتخاب شده و برای شکل دهی قطعه های مغناطیسی نمونه، روش پرس گرم بکار رفته است. استفاده از PEG نه تنها تهیه آهنربای کامپوزیتی پلیمری دائمی NdFeB-PEG را میسر می سازد، بلکه دستیابی به آهنربای NdFeB کاملاً چگال و متراکم را سهولت می بخشد.

شکل دهی در میدان مغناطیسی موجب جهتگیری بهتر ذرات می گردد و خواص مغناطیسی دائمی مطلوبتری به قطعه می دهد. اندازه ذرات پودر مغناطیسی و حامل پلیمری PEG نیز نقش مهمی در تعیین نسبت اختلاط پلیمر و پودر، میزان جهتگیری ذرات مغناطیسی و خواص مغناطیسی و مکانیکی آهنربای کامپوزیتی پلیمری دائمی دارد [۱۱]. ترکیبات بین فلزی (intermetallic) متشکل از فلزات واسطه و عناصر خاکی کمیاب، مانند  $\text{SmCo}_5$ ،  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ،  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  ناهمسانگردی مغناطیسی بلوری زیادی دارند که آنها را برای مطالعه اثر اندازه ذرات سیستمهای مناسبی می سازد. تاکنون، تنها مطالعات

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی پودر NQP-B.

ردیف	مشخصه	واحد	مقدار
۱	چگالی ظاهری	g/cm <sup>۳</sup>	۲/۴
۲	چگالی نظری	g/cm <sup>۳</sup>	۷/۴
۳	سیالیت پودر	g/s	۲/۱
۴	توزیع اندازه ذرات		
	مش ۸۰+	%w	۴/۷۲
	۱۰۰+	%w	۴/۷۲
	۱۶۰+	%w	۵/۷۶
	۲۰۰+	%w	۲۱/۶۶
	۲۰۰-	%w	۷/۳
۵	تحلیل شیمیایی پودر		
	عنصر Nd	%w	۲۵
	عنصر Fe	%w	۶۶
	عنصر Co	%w	۷
	عنصر B	%w	۷۴
۶	القای مغناطیسی باقیمانده، B <sub>r</sub>	kG	۸/۰۴
۷	شدت میدان مغناطیسی، H <sub>c</sub>	kOe	۹/۱۶
۸	بیشترین تولید انرژی، (BH) <sub>max</sub>	MGOe	۱۲/۲
۹	القای مغناطیسی در B <sub>d</sub> ، (BH) <sub>max</sub>	kG	۴
۱۰	شدت میدان مغناطیسی در H <sub>d</sub> ، (BH) <sub>max</sub>	kOe	۳/۰۳
۱۱	بیشترین شدت میدان مغناطیسی، H <sub>m</sub>	kOe	۱۴/۶۱
۱۲	ضریب دمایی B <sub>r</sub>	%/°C	-۰/۱
۱۳	ضریب دمایی H <sub>c</sub>	%/°C	-۰/۴
۱۴	دمای کوری، T <sub>c</sub>	°C	۳۹۰

می شود و سطح ویژه تماس پلیمر با پودر مغناطیسی افزایش می یابد.

## جداسازی پودر مغناطیسی در اندازه های مناسب کوچکتر

ذرات ۷۴ تا ۱۰۰ μm به کمک الک با مشهای ۱۴۰ و ۲۰۰ به شکل خشک جدا گردید. جداسازی ذرات ۲ تا ۱۰ μm نیز به کمک الک مش ۸۰۰ به حالت تر (در الک اتیلیک طبی با خلوص ۹۶ درصد) انجام گرفت. ذرات کوچکتر یا مساوی ۱ μm نیز به روش محلول در اثر ته نشینی، مطابق معادله استوکس با کنترل دقیق زمان جدا شد.

## اختلاط پلیمر و پودر و شکل دهی قطعه های نمونه

اختلاط پودر بسیار ریز پلیمر PEG با پودر مغناطیسی بطور دستی تا حصول اختلاط کامل (معمولاً ۲۰ min) انجام گرفت و سپس نمونه ها با مشخصات مندرج در جدول ۲ با استفاده از قالبهای استوانه ای شکل به قطر ۱۳ mm و فشار پرس معادل ۱۰۰ bar در دمای ۶۵ °C تهیه شد.

## اندازه گیری خواص نمونه ها

چگالی: تعیین چگالی از تقسیم وزن بر حجم بدست می آید. وزن نمونه ها از راه توزین به وسیله ترازو (با دقت ±۰/۱ g) و حجم نمونه ها نیز از طریق اندازه گیری ابعادی به کمک میکرومتر و کولیس (با دقت ±۰/۱ mm) حاصل می شود.

خواص مغناطیسی: اندازه گیری خواص مغناطیسی و ترسیم حلقه پسماند مغناطیسی به کمک دستگاه مغناطیس سنج انجام شد. ویژگیهای مغناطیسی شامل H<sub>c</sub>، B<sub>r</sub> و (BH)<sub>max</sub> از حلقه پسماندی که به کمک دستگاه یاد شده ترسیم می شود، قابل نتیجه گیری است. حلقه پسماند مغناطیسی و پارامترهای یاد شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲ - مشخصات نمونه های تهیه شده با توجه به عوامل مؤثر.

ردیف	کد نمونه	اندازه ذرات پودر مغناطیسی (μm)	نسبت وزنی پلیمر به پودر مغناطیسی (php)
۱	A <sub>۱</sub>	۷۴-۱۰۰	۵
۲	A <sub>۲</sub>	۷۴-۱۰۰	۵۰
۳	A <sub>۳</sub>	۷۴-۱۰۰	۸۰
۴	B <sub>۱</sub>	۲-۱۰	۵
۵	B <sub>۲</sub>	۲-۱۰	۸۰
۶	C <sub>۱</sub>	≤ ۱	۵
۷	C <sub>۲</sub>	≤ ۱	۸۰

اندازه نانومتری به علت عدم شکنندگی پلیمر به روشهای مکانیکی امکان پذیر نیست. به همین سبب، از روش حلال - غیر حلال برای تهیه پودر نانومتری این پلیمر استفاده شده است. بدین ترتیب که در آغاز پلی اتیلن گلیکول در حلالی مانند تتراکلرید کربن تا حد سیرشدگی حل می شود، سپس در غیر حلالی مانند بنزین (بدون سرب) در حین همزدن با دور مناسب رسوب داده می شود تا ذرات بسیار ریز (کمتر از ۱۰۰ μm) PEG تشکیل شود. تهیه پودر نانومتری این پلیمر موجب اختلاط اولیه مطلوبتر پودر مغناطیسی با پودر پلیمر و توزیع بهتر آن در ماتریس پلیمری

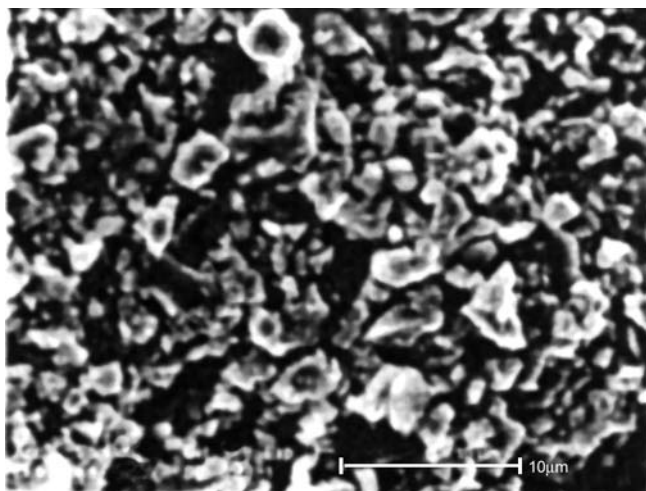


شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترون پوششی ذرات آلیاژ مغناطیسی کوچکتر از  $100 \mu\text{m}$ .

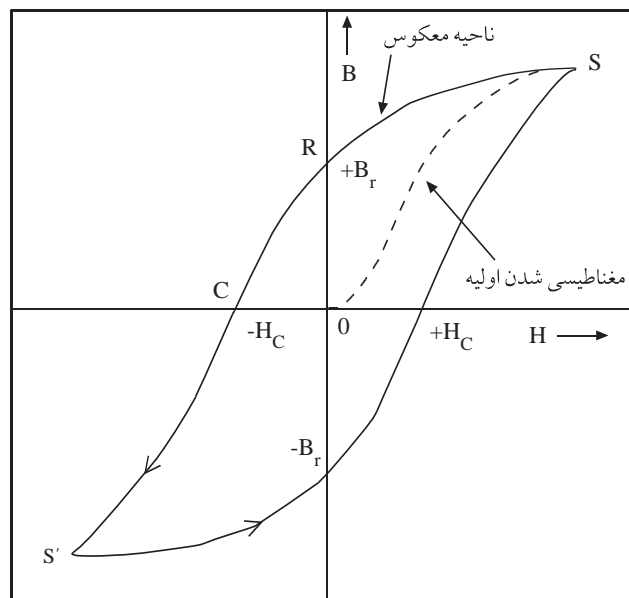
می دهند. در این تصاویر ملاحظه می شود که ذرات  $74 \mu\text{m}$  تا  $100 \mu\text{m}$  صفحه ای شکل اند و ذرات  $2 \mu\text{m}$  تا  $10 \mu\text{m}$  در اثر خرد شدن به شکل نامنظمی در آمده اند. همچنین، ذرات کوچکتر یا مساوی  $1 \mu\text{m}$  نیز در اثر خرد شدن بیشتر در زمانی طولانی تر به حالت کروی نزدیک شده اند. با توجه به اثر شکل و اندازه ذرات در تراکم پذیری پودر، چگالی نهایی بسیار متأثر از این دو عامل است. ذرات صفحه ای شکل زیر فشار پرس با جهتگیری خاصی که پیدا می کنند، موجب تراکم بیشتر در نمونه ها می گردند.

#### اثر اندازه ذرات پودر مغناطیسی

چگالی نمونه ها به میزان تراکم پذیری پودر وابسته است. تراکم پذیری پودر نیز متأثر از اندازه ذرات و توزیع آن است. برخلاف انتظار، با کاهش



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترون پوششی ذرات آلیاژ مغناطیسی کوچکتر از  $10 \mu\text{m}$ .



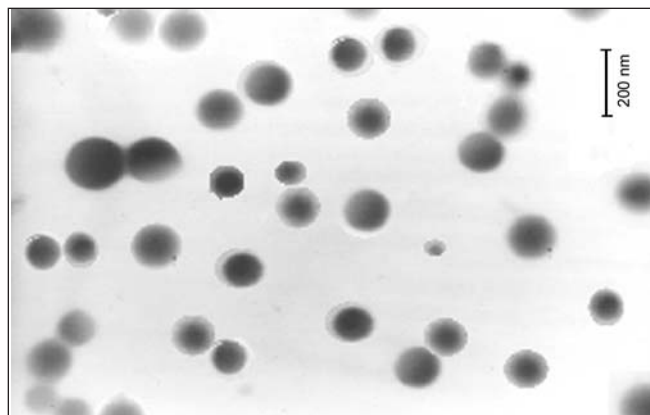
شکل ۱- حلقه پسماند مغناطیسی و مشخصه های مغناطیسی شامل  $B_r$ ،  $H_C$  و  $(BH)_{\text{max}}$ .

## نتایج و بحث

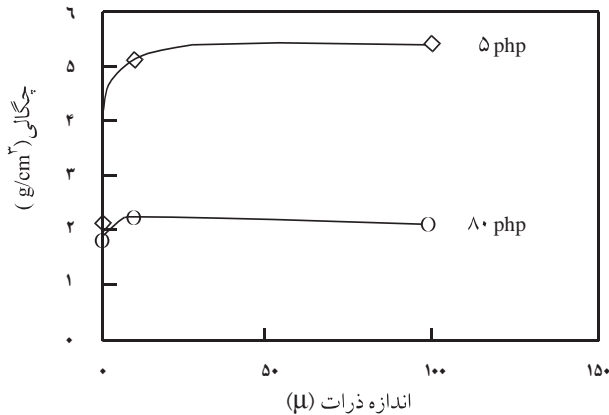
### چگالی نمونه ها

#### اثر شکل ذرات پودر مغناطیسی

شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر PEG تهیه شده به روش حلال - غیر حلال را با بزرگنمایی  $30000\times$  نشان می دهد. مشاهده می شود که ذرات کاملاً کروی هستند. شکل های ۳ تا ۵ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترون پوششی (SEM) ذرات مغناطیسی خرد و جدا شده در اندازه های کوچکتر یا مساوی  $10 \mu\text{m}$ ،  $2 \mu\text{m}$  تا  $74 \mu\text{m}$  را نشان



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر پلیمر PEG تهیه شده به روش حلال - غیر حلال.



شکل ۶- اثر اندازه ذرات پودر مغناطیسی بر چگالی آهنربا.

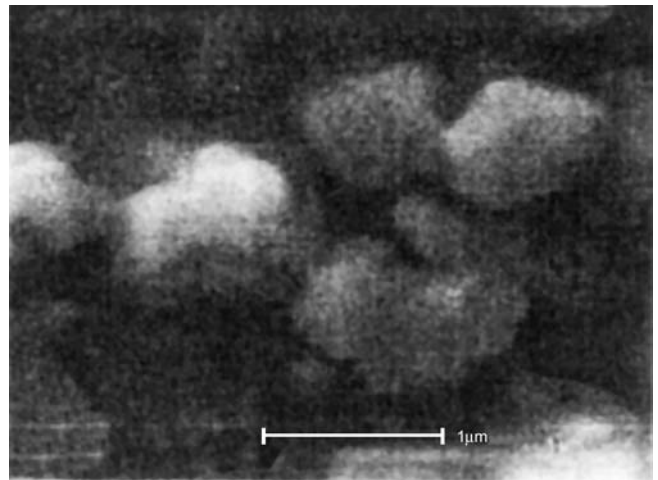
طور که انتظار می رود با توجه به قانون مخلوطها، به علت چگالی کمتر حامل پلیمری در مقایسه با پودر مغناطیسی، افزایش مقدار پلیمر موجب کاهش چگالی نهایی نمونه می گردد.

#### خواص مغناطیسی نمونه‌ها

با توجه به نتایج مربوط به خواص مغناطیسی نمونه‌ها که در جدول ۳ آمده است اثر هر یک از عوامل مؤثر بر این خواص مورد بحث قرار می گیرد.

#### اثر مقدار پلیمر بر خواص مغناطیسی

شکل ۸ اثر مقدار پلیمر را بر  $B_r$  و  $H_c$  در نمونه‌های آهنربایی متشکل از اندازه ذرات مغناطیسی مختلف در مقیاس کوچکتر یا مساوی ۱، ۲ تا ۱۰ و ۷۴ تا ۱۰۰  $\mu\text{m}$  نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود،  $B_r$  با کاهش مقدار پلیمر افزایش می یابد، زیرا  $B_r$  بشدت متأثر از ترکیب و



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترون پویشی ذرات آلیاژ مغناطیسی کوچکتر از  $1 \mu\text{m}$ .

اندازه ذرات، چگالی کاهش یافته است. این مسأله می تواند ناشی از شکل کروی ذرات بسیار ریز باشد که تراکم پذیری آنها را تحت تأثیر قرار می دهد (شکل ۶) و امکان قرارگیری ذرات را به نحوی که بیشترین تراکم صورت پذیرد ناممکن می سازد.

تراکم پذیری ذرات ۷۴ تا  $100 \mu\text{m}$  به علت بالاتر بودن قدرت تراکم پذیری ذرات صفحه ای شکل بیشتر است. بنابراین، چگالی ظاهری را به  $5/444 \text{ g/cm}^3$  افزایش داده است. در حالی که ذرات کوچکتر کروی شکل قدرت تراکم پذیری کمتری نشان می دهند.

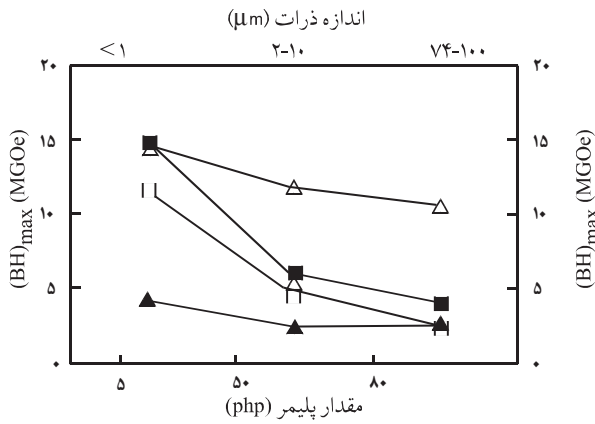
#### اثر مقدار پلیمر

اثر مقدار پلیمر از ۵ تا ۸۰ php بر چگالی در شکل ۷ نشان داده شده است که در آن php، پلیمر به ازای صد قسمت پودر مغناطیسی است. همان

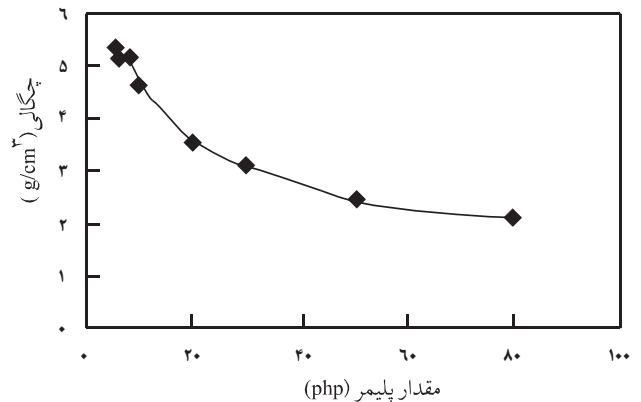
جدول ۳- مشخصه های مغناطیسی نمونه ها.

ردیف	کد نمونه	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	$B_r$ (kG)	$H_c$ (kOe)	$(BH)_{\text{max}}$ (MGOe)	$(BH)_{\text{max}}/\rho$ (MGOecm <sup>3</sup> /g)	$(BH)_{\text{max}}/m$ (MGOe/g)
۱	A <sub>۱</sub>	۵/۴۴۴	۳/۸۲۰	۸/۴۱۵	۱۴/۴۵۴	۲/۶۵۵	۳/۸۹۶
۲	A <sub>۲</sub>	۲/۴۸۷	۷۵۰۹	۸/۴۱۵	۵/۷۷۰	۲/۳۲	۳
۳	A <sub>۳</sub>	۲/۱۱۱	۷۰۴۴	۸/۴۱۵	۳/۹۹۴	۷/۸۹	۲/۲۸
۴	B <sub>۱</sub>	۵/۱۲۶	۳/۶۹۹	۷/۹۰۵	۱۷/۶۴۴	۲/۲۷	۲/۷۴
۵	B <sub>۲</sub>	۲/۲۳۳	۰/۹۰۸	۷/۶۵۰	۲/۳۱۵	۷۰۴	۷/۷۴
۶	C <sub>۱</sub>	۲/۱۲۷	۳/۳۳۲	۷/۹۰۵	۱۰/۵۵۵	۴/۹۶۳	۷
۷	C <sub>۲</sub>	۱/۷۵	۰/۸۴۳	۷/۶۵۰	۲/۵۰۳	۱/۴۳	۲





شکل ۹- اثر مقدار پلیمر و اندازه ذرات بر  $(BH)_{max}$ : (□)  $100 \mu m$ ، (○)  $10 \mu m$ ، (△)  $5 \text{ php}$  و (▲)  $80 \text{ php}$ .



شکل ۷- اثر مقدار پلیمر بر چگالی آهنربا.

### نتیجه گیری

چگالی نمونه‌ها به مقدار پلیمر، اندازه و شکل ذرات مغناطیسی و تراکم پذیری آنها وابسته است، بطوری که نمونه دارای  $5 \text{ php}$  ماتریس پلیمری PEG و ذرات مغناطیسی با اندازه  $74$  تا  $100 \mu m$  دارای بیشترین چگالی ظاهری  $5/444 \text{ g/cm}^3$  است.

خواص مغناطیسی نمونه شامل  $B_r$ ،  $H_c$  و  $(BH)_{max}$  تا حد زیادی تحت تأثیر اکسایش ذرات قرار گرفته است. با توجه به اکسایش و خوردگی شدید این ذرات، کاهش اندازه ذرات به روش مکانیکی اثر نامطلوبی بر خواص مغناطیسی نمونه‌ها می‌گذارد.

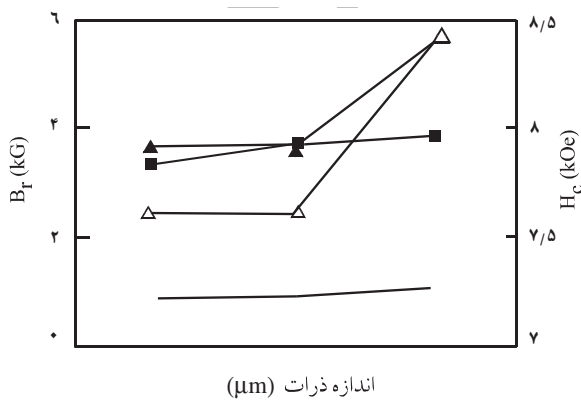
نتایج نشان می‌دهد که نمونه آهنربای کامپوزیتی دارای ذرات مغناطیسی با اندازه  $100 \mu m$  و  $5 \text{ php}$  پلیمر PEG در بین همه نمونه‌ها بیشترین خواص مغناطیسی را دارد  $(BH)_{max} = 14/454 \text{ MGOe}$ ،  $H_c = 8/415 \text{ kOe}$  و  $B_r = 3/820 \text{ kG}$ . مشاهده می‌شود که مقادیر  $H_c$

ساختار ماده است. ولی،  $H_c$  با تغییر مقدار پلیمر یا پودر مغناطیسی چندان تفاوتی نمی‌کند. زیرا،  $H_c$  به مقدار ماده وابسته نیست بلکه بیشتر تابع شکل و نظم بلوری ذرات پودر مغناطیسی و روشی است که مواد را به نواحی میکروسکوپی تقسیم می‌کند.

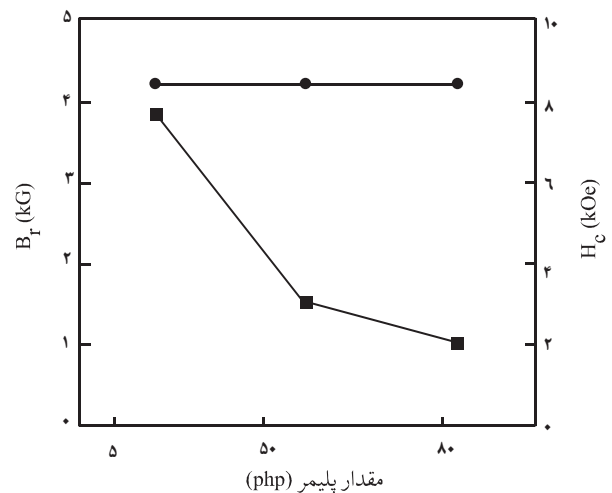
همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود،  $(BH)_{max}$  نیز، با افزایش مقدار پلیمر کاهش می‌یابد. زیرا،  $(BH)_{max}$  تلفیقی از  $B_r$  و  $H_c$  است و متأثر از هر دو عامل یعنی مقدار و ساختار ماده خواهد بود. همچنین،  $(BH)_{max}$  به علت پدیده اکسایش، در اثر کاهش ذرات، به صورت غیر خطی دچار کاستی می‌شود.

### اثر اندازه ذرات بر خواص مغناطیسی

با توجه به اکسایش سریع این ماده، با کاهش اندازه ذرات به علت افزایش سطح ویژه، سرعت اکسایش بیشتر شده، خواص مغناطیسی شامل  $B_r$  و  $H_c$  کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل ۱۰ دیده می‌شود.



شکل ۱۰- اثر اندازه ذرات بر  $B_r$ : (□)  $5 \text{ php}$ ، (○)  $80 \text{ php}$  و  $H_c$ : (▲)  $80 \text{ php}$ ، (△)  $5 \text{ php}$ .



شکل ۸- اثر مقدار پلیمر بر  $B_r$  و  $H_c$ :  $H_c$  (●) و  $B_r$  (■).

مقدار خاصیت ویژه  $(BH)_{max} / \rho$  و نیز  $(BH)_{max} / m$  نمونه آهنربایی با اندازه ذرات کوچکتر یا مساوی  $1 \mu m$  و مقدار  $5 \text{ php}$  پلیمر PEG از همه بیشتر است که برای کاربردهای مغناطیسی قوی با وزن و حجم کم مناسب است. مقدار  $B_r$  نیز شدت متأثر از مقدار ماده (پلیمر یا پودر مغناطیسی) است. ولی،  $H_c$  به آن چندان وابستگی ندارد و متأثر از ساختار ماده است.

و  $(BH)_{max}$  این نمونه، بسیار بیشتر از آهنرباهای سرامیکی دائمی است و خواص مغناطیسی آن با خواص برخی از آهنرباهای پلیمری NdFeB موجود در بازار جهانی قابل قیاس است ( $(BH)_{max} = 3-12 \text{ MGOe}$ )، همچنین،  $(\rho = 4/5-6/4 \text{ g/cm}^3$  و  $B_r = 5-8 \text{ kG}$ ،  $H_c = 3-11 \text{ kOe}$ ). خواص مغناطیسی نمونه کامپوزیتی ساخته شده در این پژوهش، بسیار بیشتر از آهنرباهای دائمی NdFeB تف جوش شده تولیدی در کشور است [۱۴، ۱۵].

## مراجع

1. Ma B.M., Herchenroeder J.W., Smith B., Suda M., Brown D.N. and Chen Z., Recent Development in Bonded Magnets, *J. Magnetism Magn. Mater.*, **239**, 418-423, 2002.
2. Croat J. J., Herbst J. F., Lee R. W. and Pinkerton F. E., Pr-Fe and Nd-Fe-Based Materials: A New Class of High-Performance Permanent Magnets, *J. Appl. Phys.*, **55**, 2078-2082, 1984.
3. Sagawa M., Fujimura S., Togawa N., Yamamoto H. and Mitsuura Y., New Material for Permanent Magnets on a Base of Nd and Fe, *J. Appl. Phys.*, **55**, 2083-2087, 1984.
4. Campbell P., The Properties Required of Neodymium-Iron-Boron Magnets for their Major Applications, *Rare Earth Magnets Appl.*, **2**, 681-687, 1998.
5. Shune T., Permanent Magnet Films for Applications in Micro-Electromechanical Systems, *J. Magnetism Magn. Mater.*, **209**, 39-75, 2000.
6. Hono K. and Ping D.H., Atom Probe Studies of Microstructural Evolution in Nd-Fe-B Based Nanocomposite Magnets, *Mater. Sci. Eng., A*, 304-306, 81-87, 2001.
7. Slusarek B. and Dudzikowski J., Application of Permanent Magnets Made from NdFeB Powder and from Mixtures of Powders in DC Motors, *J. Magnetism Magn. Mater.*, **239**, 597-599, 2002.
8. Panchanathan V., *Proceeding of the 16th International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications*, 431, Sendai, Japan, 2000.
9. Ying L., Effect of Plastic on the Properties of Bonded NdFeB Permanent Magnet, *Func. Mater.*, **26**, 170-172, 1995.
10. Ying L. and Jing T.M., Properties of Bonded NdFeB Permanent Magnet by Magnetic Polymer, *Compos. Sinica*, **16**, 11-14, 1999.
11. Gong W., Ma B.M. and Bounds C.O., The Effects of Particle Size and Distribution on the Magnetic Properties of Coercive  $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_2$  Alloy Powders for Bonded Magnet Applications, *J. Appl. Phys.*, **81**, 5640-5642, 1997.
12. Liu W. and McCormick P.G., Synthesis of  $\text{Sm}_2\text{Co}_{12}$  Alloy Nanoparticles by Mechanochemical Processing, *J. Magnetism Magn. Mater.*, **195**, 283-297, 1999.
13. Liu W. and McCormick P.G., Formation and Magnetic Properties of Nanosized  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  Magnetic Particles Via Mechanochemical / Thermal Processing, *Nonstruc. Mater.*, **12**, 187-190, 1999.
14. Sadi M., *Manufacture and Investigation of Nd-Fe-B Permanent Magnet Properties*, MS Thesis, Material Engineering, Tarbiat Modarres University, 2000.
15. Maddah Hosseini S.H.R., *Modification of Nd-Fe-B Magnet by Binary Sintering*, PhD Thesis, Metallurgy and Material Engineering, Sharif University of Technology, 1999.