



## Investigation the Effect of Lubricant Amount and Annealing of Powders on the Magnetic Properties of Sendust Magnetic Powder Cores

Maryam Amoohadi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Mohajer, Isfahan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 02.11.2020

**Revised:** 09.07.2020

**Accepted:** 01.20.2021

**Keyword:**

Sendust

Mechanical alloying

Effective permeability

Lubricant

Annealing

**\*Corresponding Author:**

Maryam Amoohadi

**Email:**

[M.Amoohadi@student.pnu.ac.ir](mailto:M.Amoohadi@student.pnu.ac.ir)

### ABSTRACT

In this study, Sendust alloy ( $Fe_{85}Si_{9.6}Al_{5.4}$ ) was fabricated by the mechanical alloy method. The obtained alloy was annealed for 2h at  $1100^{\circ}C$  in the Ar atmosphere. Phase identification and morphology analysis of the milled and annealed powders were performed by X-ray diffractometer and scanning electron microscope, respectively. The results showed that the Sendust nanostructure solid solution obtained after 10h milling and after annealing the grains grew. The resulting alloy was insulated with sodium silicate adhesive and then mixed with various percentages of Zn- stearates from 0.25 to 0.75wt. %. These composites were formed by PM-method at 1600 MPa to obtain magnetic powder cores. The real and imaginary part of effective permeability and quality factor of the cores were measured with an LCR-meter. In addition, the results indicated that the green density of the core with 0.5% Zn-Stearate was higher than that of 0.25% Zn-Stearate and then remained constant. The magnetic properties of the sample were also optimized with 0.5% stearate. A comparison of the real part of permeability for the core with the unannealed and annealed powders showed that annealing of the powders resulted in an increase in the permeability and increased the Q-factor to frequencies below 200 kHz.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

## بررسی اثر مقدار روان ساز و بازپخت پودرها بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های پودری مغناطیسی سندااست

مریم عموهادی\*<sup>۱</sup>

۱- استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲	در این پژوهش، آلیاژ سندااست (Fe <sub>85</sub> Si <sub>9.6</sub> Al <sub>5.4</sub> ) به روش آلیازسازی مکانیکی ساخته شد. آلیاژ به‌دست‌آمده در فضای آرگون و دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۲ ساعت بازپخت شد. فازبندی و بررسی ریخت پودرهای آسیاب‌شده و بازپخت‌شده به‌ترتیب با پراش‌سنج پرتوایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج نشان داد که محلول جامد نانو ساختار سندااست پس از ۱۰h آسیاب‌کاری به‌دست آمده است و پس از بازپخت، دانه‌ها رشد کرده‌اند. آلیاژ به‌دست‌آمده، با چسب سیلیکات سدیم، عایق‌بندی و سپس با درصدهای گوناگون استنارات روی از ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد وزنی مخلوط شد. برای به دست آوردن هسته‌های مغناطیسی پودری این کامپوزیت‌ها به روش متالورژی پودر در فشار ۱۶۰۰ MPa شکل داده شدند. بخش‌های حقیقی و انگاری تراوایی مؤثر و سازه‌ی کیفیت هسته‌ها با یک LCR سنج اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که چگالی خام هسته با ۰/۵ درصد استنارات روی از ۰/۲۵ درصد بیشتر است و پس‌از آن ثابت می‌ماند. هم‌چنین ویژگی‌های مغناطیسی هسته با ۵/۵ درصد استنارات بهینه شد. مقایسه‌ی بخش حقیقی تراوایی مؤثر برای هسته با آلیاژ بازپخت نشده و شده نشان داد که بازپخت پودرها به افزایش تراوایی مؤثر می‌انجامد و تا بسامدهای کمتر از ۲۰۰ کیلوهرتز سازه‌ی کیفیت را هم افزایش می‌دهد.
بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱	
کلید واژگان: سندااست آلیازسازی مکانیکی تراوایی مؤثر روان‌ساز بازپخت	
*نویسنده مسئول: مریم عموهادی پست الکترونیکی: M.Amoohadi@student.pnu.ac.ir	



## مقدمه

مواد مغناطیسی در بخش‌های گوناگون صنعت وارد شده‌اند. این مواد در صنعت الکترونیک، کامپیوتر و مخابرات کاربرد وسیعی دارند. این مواد به دو دسته کلی مواد مغناطیسی نرم و سخت، دسته‌بندی می‌شوند به‌طور کلی مواد مغناطیسی که در یک میدان کاربستی کوچک (کمتر از  $50 \text{ Oe}$ ) [۱]، گشتاورهای مغناطیسی آنها با یکدیگر هم‌راستا می‌شوند و پس از برداشتن میدان، مقدار چشم‌گیری از مغناطش باقیمانده در آنها از میان می‌رود را مواد مغناطیسی نرم و مواد مغناطیسی که پس از برداشتن میدان کاربستی، بیشتر مغناطش ایجادشده در خود را نگه می‌دارند مواد مغناطیسی سخت می‌نامند [۱]. چرخه پسماند برای مواد مغناطیسی نرم باریک و کشیده و برای مواد مغناطیسی سخت پهن است [۲]. آهن‌رباهای همیشگی، منحنی پسماند و میدان وادارنده (میدانی که در آن مغناطش در جهت وارون برابر صفر می‌شود و گشتاورهای مغناطیسی دوباره نظم کاتوره‌ای پیدا می‌کنند) بزرگ دارند تا بتوانند مغناطش باقیمانده را در خود نگه دارند، برای این منظور در ساخت آنها می‌توان ترکیب‌هایی را که دارای کسری از موادی نامغناطیسی هستند، به کاربرد. برای نمونه می‌توان برای آهن با خلوص بالا که در آن غلظت ناخالصی کربن و نیتروژن  $10-20 \text{ ppm}$  است میدان وادارنده را از  $1 \text{ A/m}$  در غلظت ناخالصی کربن و نیتروژن  $100 \text{ ppm}$ ، به چند صد آمپر بر متر رساند [۳]. مواد مغناطیسی نرم مانند فریت‌های منگنز-روی و نیکل-روی و مواد مغناطیسی فلزی مانند آهن خالص و برخی از آلیاژهای آن مانند آلیاژ آهن-نیکل، آهن-سیلیسیم، آهن-سیلیسیم-آلومینیوم به‌آسانی مغناطیده و وامغناطیده می‌شوند. این مواد مغناطیسی به‌صورت هسته‌های برگه‌برگه‌ای برای موتورهای الکتریکی به‌عنوان آهن‌رباهای موقت، ترانسفورماتورها و مدارهای کلیدزنی و به‌صورت هسته‌های پودری در کاربردهای بسامد بالا برای تغذیه مدارها به کار می‌روند. هسته‌های فریتی تراوایی مغناطیسی بالا و تلفات پایین در گستره بسامدهای بالا دارند ولی القای مغناطیسی اشباعی ( $B_m$ ) پایین آنها موجب می‌شود که هسته‌های بزرگی از آنها برای یک منبع تغذیه لازم باشد. هسته‌های فولادی ورقه‌ای که هر برگه نسبت به دیگری عایق‌بندی شده است مغناطش اشباعی بالایی دارد اما به دلیل تلفات جریان گردابی بالا نمی‌تواند در بسامدهای بالا به کار رود. هسته‌های پودری مغناطیسی در بخش‌هایی از گستره بسامدی که دو دسته هسته گفته‌شده در بالا کارایی ندارند به کار می‌روند [۴]. هسته‌های پودری به‌دست‌آمده با مواد فرومغناطیسی نرم که در جریان‌های متناوب و مستقیم به کار می‌روند، به روش‌های متالورژی پودر ساخته می‌شوند. در ساخت هسته‌های مناسب برای کاربرد در جریان‌های مستقیم، پودرها به شکل دلخواه فشرده و پس‌از آن پخت می‌شوند. در این هسته‌ها گزینش مناسب آلیاژ و فرایند تفجوشی<sup>۱</sup> بیشترین اثر را روی ویژگی‌های مغناطیسی دارد [۵]. این هسته‌ها برای کاربرد در جریان‌های متناوب مناسب نیستند چون گرمای تولیدشده در آنها در میدان‌های متغیر بر ویژگی‌های مغناطیسی‌شان اثری ویرانگر دارد. این گرما بیشتر برآمده از تلفات هیستریسیس و جریان‌های گردابی است که به ترتیب با بسامد و مجذور بسامد متناسب هستند. هسته‌های پودری مغناطیسی نرم<sup>۲</sup> که با پودر آهن عایق‌بندی الکتریکی شده یا آلیاژهای فرومغناطیسی عایق الکتریکی شده آن ساخته می‌شوند، افق گسترده‌ای در کاربرد برای جریان‌های متناوب در بسامدهای چند ده کیلوهرتز تا یک مگاهرتز باز کرده‌اند [۶] عایق‌بندی مواد مغناطیسی با مواد نالئی مانند فریت‌ها [۷]، اکسیدهای فلزی گوناگون [۸] و ... و مواد آلی مانند چسب‌های رزینی به دست می‌آید. در این هسته‌ها که پودرهای عایق‌بندی شده بدون نیاز به تفجوشی در فشارهای بالا با کاربرد یک‌گونه چسب پایدار در برابر گرما شکل‌دهی می‌شوند، لایه عایقی که روی ذرات فرومغناطیسی نشاندن می‌شود مقاومت الکتریکی را افزایش داده و بدین ترتیب موجب کاهش تلفات جریان گردابی و به دنبال آن کاهش اتلاف کل در بسامدهای چندین کیلوهرتز می‌شود. برای برداشتن تنش‌های به‌وجودآمده به هنگام فشردن سرد، هسته‌های پرس شده در دمای مناسب (بالتر از  $200^\circ \text{C}$ ) بازپخت می‌شوند. به‌طور کلی گونه ماده

<sup>1</sup> Sintering<sup>2</sup> Soft Magnetic Powder Core(SMCP)

فرومغناطیسی، گونه و میزان ماده عایق‌ساز، دمای بازیخت، فشار شکل‌دهی، اندازه ذرات فرومغناطیسی، گونه و میزان چسب و ماده روان‌ساز بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های پودری مغناطیسی اثر می‌گذارد [۹]. برخی آلیاژهای آهن که در ساخت هسته‌های پودری به کار می‌روند عبارتند از: آهن ۱۷ درصد - نیکل ۸۵ درصد - مولیبدن ۲ درصد با نام تجاری مولی پرآلوی<sup>۱</sup> و ویژگی بارز مغناطش اشباعی بالا، آلیاژ آهن-۵ درصد سلنیوم یا نام تجاری ایکس-فلاکس<sup>۲</sup> و ویژگی اتلاف توان پایین، آلیاژ آهن درصد و نیکل ۵۰ درصد با نام تجاری های-فلاکس<sup>۳</sup> و ویژگی مغناطش اشباعی بسیار بالا و سنداست<sup>۴</sup> با درصدهای وزنی ۸۵، ۹۱/۶ و ۵/۴ به ترتیب برای آهن، سلنیوم و آلومینیوم که هسته‌های پودری ساخته‌شده با آن به نام تجاری کول‌مو<sup>۵</sup> شناخته می‌شود [۱۰]. هسته‌های ساخته شده با آلیاژ سنداست به دلیل تلفات هسته پایین و مغناطش اشباعی نسبی بالا (کمتر از آهن و بیش از فریت‌ها) برای کاربرد منبع‌های تغذیه‌ی کلید زنی و ترانسفورماتورهای پالسی<sup>۶</sup>، فلائی‌بک<sup>۷</sup> و روتاری<sup>۸</sup> مناسب هستند [۱۱]. در این پژوهش این آلیاژ به روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شد [۱۲]. هم‌چنین پژوهش‌هایی بر روی مقدار و نوع روان‌ساز برای ساخت هسته‌های آهنی انجام شده [۱۳؛ ۱۴] ولی این مقدار با توزیع اندازه ذرات تغییر می‌کند. در این مقاله اثر مقدار ماده روان‌ساز استتارات-روی بر روی چگالی و ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌های به‌دست‌آمده با آلیاژی که با روش آلیاژسازی مکانیکی با اندازه توزیع ذرات کمتر از ۱۰ میکرون به دست آمده است، پژوهش شد. معمولاً در ساخت هسته‌های مغناطیسی مقدار روان‌ساز کمتر از یک درصد وزنی گزینش می‌شود چون مقادیر بیشتر روی مواد مغناطیسی باقی می‌ماند و افزایش فاز نامغناطیسی به ضعیف شدن ویژگی‌های مغناطیسی کامپوزیت می‌انجامد [۱۷]. در این پژوهش درصدهای وزنی روان‌ساز ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد انتخاب شدند. هم‌چنین اثر بازیخت پودرها بر ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌ها بررسی شد.

## روش شناسی

مواد اولیه شامل پودر آهن (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴۵ میکرون) از شرکت آلمانی «تال پاور»، پودر سلنیوم (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴۴ میکرون) از شرکت «آلدریج» و پودر آلومینیوم (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات ۱۰۰-۲۰۰ میکرون) از شرکت «فلوکا» بودند که با درصدهای وزنی به ترتیب ۸۵ و ۹/۶ و ۵/۴ باهم مخلوط شدند. سپس این مواد با شماری گلوله فولادی به قطرهای ۷ و ۱۲ میلی‌متر در یک محفظه از همان جنس ریخته شد، به‌گونه‌ای که نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰ به ۱ شود. آلیاژسازی مکانیکی با یک دستگاه آسیاب سیاره‌ای فریتش (FRITTSCH Pulverisette 6) در زمان ۱۰ ساعت و با سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه در اتمسفر آرگون انجام شد. برای تنش‌زدایی از پودرهای آسیاب شده، آنها در یک دستگاه کوره لوله‌ای الکتریکی ساخت شرکت اکسایتون و در فضای آرگون در دمای ۱۱۰۰ °C (دمای بالاتر از رشد سریع دانه برای آلیاژ سنداست [۱۵]) به مدت ۲ ساعت بازیخت شدند. الگوهای XRD در این پژوهش با یک دستگاه XRD مدل Philips X'Pert Pro با لامپ مسی با طول‌موج ۱/۵۴۰۶ آنگستروم، گرفته شده است. پس‌از آن فازبندی با نرم‌افزار X'Pert High Score و تعیین پارامتر شبکه، میانگین اندازه بلورکها با نرم‌افزار MAUD انجام شد. بررسی ریخت پودرها و اندازه ذرات پودر با یک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM, VEGA\TESCA که مجهز به بیناب‌سنج پراکندگی انرژی پرتوایکس EDS, VEGA\TESCAN انجام

<sup>1</sup> Molypermalloy

<sup>2</sup> X-Flux

<sup>3</sup> Hi-Flux

<sup>4</sup> Sendust

<sup>5</sup> Kool Mμ

<sup>6</sup> Pulse

<sup>7</sup> Fly back

<sup>8</sup> Rotary

شد. آلیاژ به دست آمده با ۴ درصد ماده عایق ساز سیلیکات سدیم ( $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Na}_2\text{O}$ ) محلول در ۴۰ درصد وزنی آب [۱۶] و استئارات روی با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد در یک هاون چینی به خوبی مخلوط شدند. سپس کامپوزیت به دست آمده با یک دستگاه پرس هیدرولیکی و با فشار ۱۶۰۰ MPa در یک قالب چنبره‌ای شکل به قطر درونی ۹/۸۵، قطر بیرونی ۱۸/۸۰ و بلندی حدود ۵ میلی‌متر، شکل داده شدند. این نمونه‌ها در دمای اتاق در هوا خشک شد. برای مقایسه یک هسته با پودرهای بازپخت نشده هم ساخته شد. این هسته‌ها با سیم مسی روکش‌دار با قطر (۰/۷ میلی‌متر) ۳۰ دور سیم‌پیچی و کمیت‌های  $L_S$  و  $R_S$  آنها با یک دستگاه LCR سنج مدل (Fluke, PM6306) در بازه بسامدی ۴ تا ۱۰۰۰ kHz در چگالی شار مغناطیسی پایین اندازه‌گیری شد. سپس بخش حقیقی تراوایی مؤثر اولیه ( $\mu'_r$ ) و بخش انگاری تراوایی مؤثر اولیه ( $\mu''_r$ ) (که معیاری از تلفات کل هسته است) و سازه کیفیت (Q) از رابطه‌های زیر محاسبه شدند [۱۷]:

$$\mu'_r = \frac{L_S I_m}{\mu_0 A_e N^2} \quad (1)$$

$$\mu''_r = \frac{R_S I_m}{\mu_0 A_e N^2 \omega} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\omega L_S}{R_S} \quad (3)$$

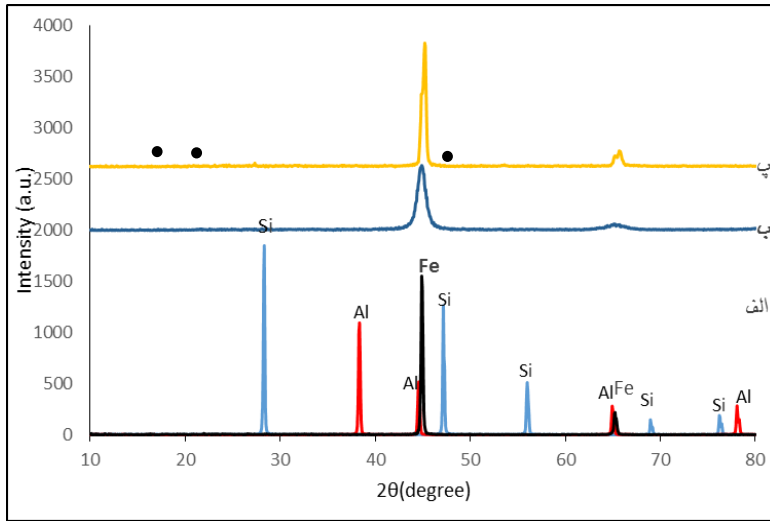
که در آن  $\omega$  بسامد زاویه‌ای،  $L_S$  و  $R_S$  خودالقایی و مقاومت DC هسته در حالت سری،  $A_e$  سطح مقطع مؤثر،  $N$  تعداد دورها و  $I_m$  طول میانگین مسیر شار مغناطیسی است [۱۷].

شکل ۱، الگوهای XRD مخلوط مواد اولیه Fe, Si, Al و پودرهای آسیاب کاری شده پس از ۱۰ ساعت و پودرهای بازپخت شده در دمای ۱۱۰۰ °C را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود الگوی XRD مواد خام شامل قله‌های سه عنصر اصلی است، اما پس از ۱۰ ساعت آسیاب کاری تنها قله‌های  $\alpha$ -Fe دیده می‌شوند که تشکیل فاز بانظم و/یا بی‌نظم آلیاژ Fe-Si-Al را نشان می‌دهد [۱۲]. با استفاده از نرم‌افزار MAUD و محاسبات بر پایه روش ریتولد [۱۸] میانگین اندازه بلورک‌ها برای پودرهای ۱۰ ساعت آسیاب شده ۱۹/۵ nm و ریزتنش ۰/۰۰۶۸ و برای نمونه‌های بازپخت شده ۱۲۵ nm و ریزتنش ۰/۰۰۰۶ به دست آمد که نشان می‌دهد پس از بازپخت دانه‌ها رشد کرده و ریزتنش‌ها حذف شده‌اند. هم‌چنین قله‌های فاز بانظم این آلیاژ (محل دایره‌های سیاه‌رنگ) در الگوی XRD پدیدار شده که نشان‌دهنده این است که پس از بازپخت آلیاژ به سمت فاز بانظم حرکت کرده است [۱۲].

در جدول ۱، چگالی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای گوناگون روان‌ساز آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود نخست چگالی افزایش و پس از آن، ثابت است.

جدول ۱. چگالی هسته‌ها بر حسب افزایش درصد روان‌ساز

درصد روان‌ساز	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵
چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	۴/۵۸±۰/۱	۴/۸۰±۰/۱	۴/۸۲±۰/۱

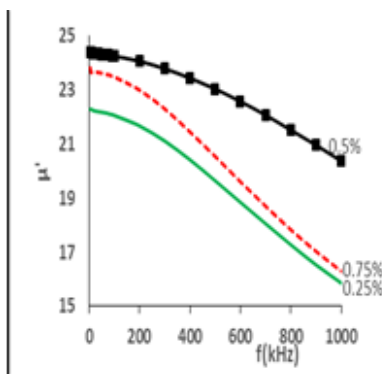


شکل ۱. الگوهای XRD (الف) پودرهای خام (ب) پودرهای ۱۰ ساعت آسیاب شده (پ) پودرهای بازپخت شده پس از آسیاب، دایره‌های سیاه محل قله‌های فاز بانظم آلیاژ است [۹].

## نتایج و بحث

روان‌ساز با کاهش اصطکاک بین دیواره قالب و سطح مشترک نمونه با قالب بیرون راندن نمونه از قالب را آسان می‌کند و از خراب شدن دیواره قالب جلوگیری می‌کند. هم‌چنین با کاهش اصطکاک میان ذره با ذره و ذره با دیواره قالب، نیروی لازم برای فشردن کامپوزیت را کاهش می‌دهد و لغزیدن ذرات را روی همدیگر به هنگام فشردن آسان می‌کند [۱۴]. لغزش بهتر ذرات روی همدیگر منجر به پر شدن حفره‌های بین ذرات و افزایش کسر به هم‌پکیدگی و افزایش چگالی می‌شود. اما این افزایش چگالی به صورت خطی نیست و نقطه گذاری وجود دارد که روان‌ساز از چگال‌تر شدن بیشتر نمونه جلوگیری می‌کند [۱۹]. روان‌ساز اضافه‌شده در این پژوهش نخست موجب افزایش و پس‌از آن ثابت ماندن چگالی شده است.

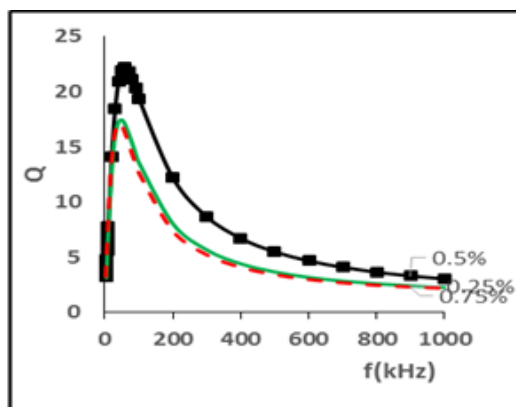
شکل ۲، منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود برای نمونه ۰/۵ درصد بخش حقیقی تراوایی مؤثر از نمونه ۰/۲۵ درصد بیشتر است. چون در هسته‌های مغناطیسی چگالی بیشتر به معنی نزدیک‌تر شدن ذرات فرومغناطیسی به همدیگر و در نتیجه کاهش طول گاف‌های هوایی بین ذرات فرومغناطیسی و افزایش تراوایی مؤثر بر اساس رابطه  $\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_g}{l} \mu_r}$  [۱] است (در این رابطه  $\mu_r$  تراوایی نسبی و  $l_g$  طول گاف هوایی و  $l$  طول مسیر میانگین شار مغناطیسی است). هم‌چنین تراوایی آن از نمونه ۰/۷۵ درصد بیشتر است. دلیل این رفتار را می‌توان به افزایش فاز نامغناطیسی نسبت به فاز مغناطیسی در کامپوزیت و کاهش تراوایی نسبت داد [۲۰].



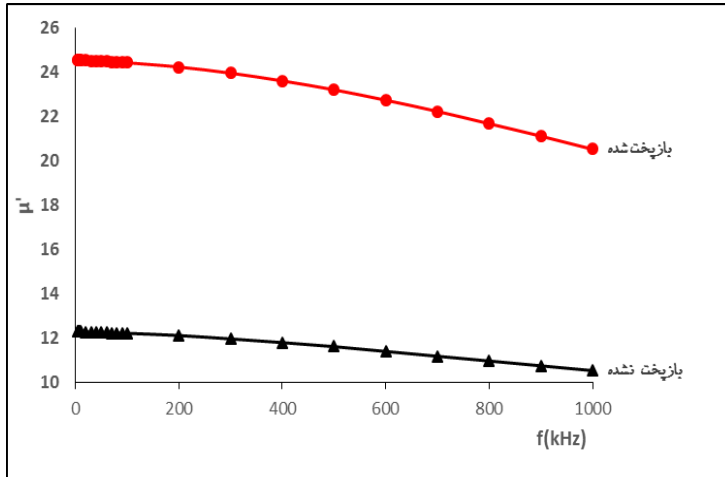
شکل ۲. منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد

شکل ۳. منحنی‌های تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود سازه کیفیت که به تراوایی و تلفات هسته وابسته است برای نمونه با ۰/۵ درصد استئارات روی از همه بیش‌تر است. پس برای اندازه‌گیری بعدی درصد روان‌ساز استئارات روی را ۰/۵ گزینش می‌کنیم.

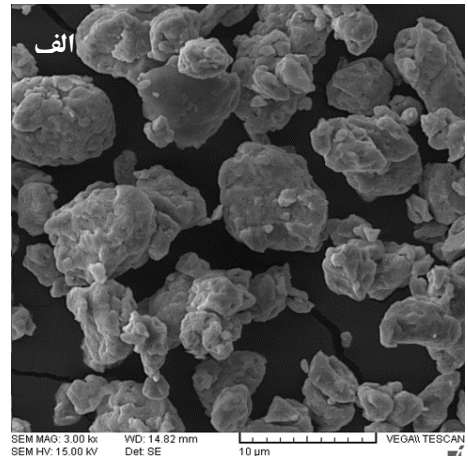
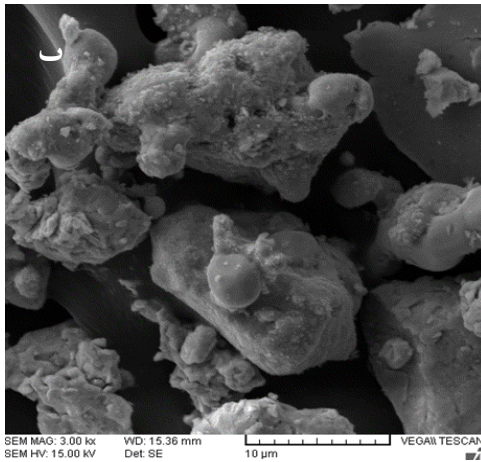
شکل ۴. منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها با پودرهای بازپخت‌شده و بازپخت نشده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود تراوایی مؤثر برای هسته‌های ساخته‌شده با پودرهای بازپخت شده بیش‌تر از هسته‌ها با پودرهای بازپخت نشده است. با توجه به رشد دانه که در عکس‌های SEM پودرها پیش و پس از بازپخت به‌روشنی دیده می‌شود (شکل ۵). افزایش تراوایی برای هسته‌های ساخته‌شده با پودرهای بازپخت شده را می‌توان به اثر بزرگ‌تر شدن ذرات فرومغناطیسی نسبت داد چون تراوایی نسبی رابطه مستقیم با اندازه دانه دارد [۲۱].



شکل ۳. منحنی‌های تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ درصد روان‌ساز نسبت به بسامد



شکل ۴. منحنی‌های تغییرات بخش حقیقی تراوایی موثر هسته‌ها با پودرهای بازیخت شده و بازیخت نشده بر حسب بسامد

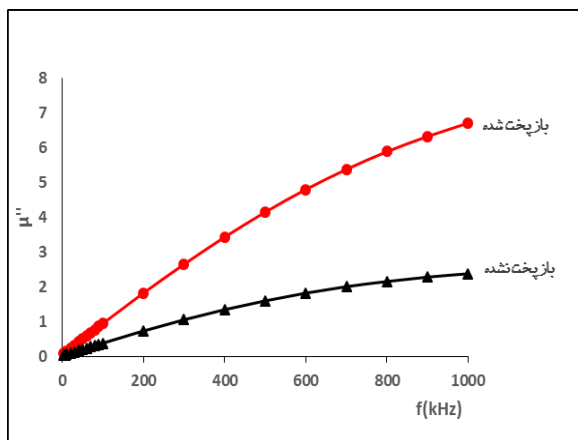


شکل ۵. عکس‌های SEM پودرهای الف) پیش و ب) پس، از بازیخت

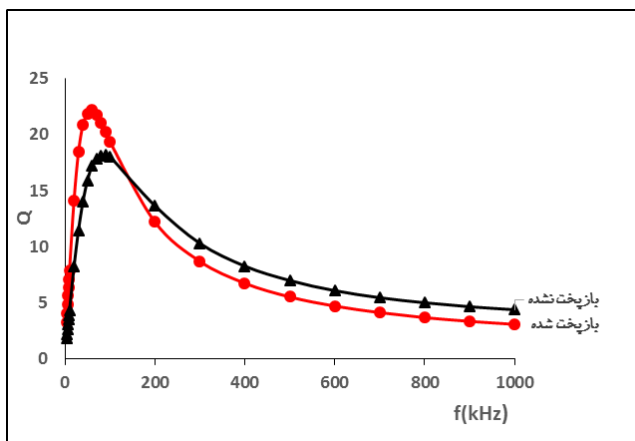
در واقع به دلیل افزایش تراوایی تک‌تک دانه‌های مغناطیسی تراوایی مؤثر کل هسته افزایش یافته است. با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها مسیر جریان‌های گردابی بزرگ‌تر شده تلفات جریان‌های گردابی افزایش یافته و در نتیجه تلفات کل هسته که برابر است با  $P_c = P_h + P_e + P_r$  (تلفات هیستریسیس،  $P_e$  تلفات جریان گردابی و  $P_r$  تلفات باقیمانده است) افزایش می‌یابد [۲۲]. بررسی تغییرات بخش موهومی تراوایی مؤثر (شکل ۶) که با تلفات رابطه مستقیم دارد این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند. در شکل ۵ می‌توان توزیع اندازه ذرات زیر ۱۰ میکرون را به‌خوبی دید.



شکل ۷، تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با پودرهای بازپخت شده و نشده را نشان می‌دهد. بررسی این تغییرات نشان می‌دهد که در بسامدهای بیش از ۲۰۰ kHz سازه کیفیت برای هسته با پودرهای بازپخت شده کمتر از هسته‌ها با پودرهای بازپخت نشده است چون در بسامدهای بالا تلفات ناشی از جریان گردابی که با مجذور بسامد متناسب است بر سهم مربوط به تلفات هیستریسیس و تلفات باقی‌مانده که با بسامد متناسب است چیره می‌شود. [۲۳] و با افزایش اندازه دانه این تلفات بزرگ‌تر می‌شود. بزرگ‌تر شدن تلفات منجر به کاهش سازه کیفیت می‌شود.



شکل ۶. منحنی‌های تغییرات بخش موهومی تراوایی مؤثر هسته‌ها با پودرهای بازپخت شده و بازپخت نشده بر حسب بسامد



شکل ۷. منحنی‌های تغییرات سازه کیفیت هسته‌ها با پودرهای بازپخت شده و بازپخت نشده بر حسب بسامد

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آلیاژ سنداست ( $Fe_{85}Si_{9.6}Al_{5.4}$ ) با ۱۰ ساعت آسیاب مواد خام اولیه به دست آمد. پس از بازیخت در دمای  $1100^{\circ}C$  رشد دانه‌ها رخ داده است و ریزتنش‌های وارد شده به ذرات پودر به میزان چشمگیری برداشته شده است. هم‌چنین قله‌های پدیدار شده در الگوی پراش ایکس نشان‌دهنده‌ی انتقال فاز از بی‌نظم به بانظم است. چگالی خام هسته‌های پودری ساخته شده با آلیاژ برای  $0.5$  درصد وزنی روان‌ساز استنارات روی بیش از  $0.25$  درصد و پس از آن ثابت می‌ماند. هم‌چنین تراوایی مؤثر و سازه کیفیت برای این درصد از روان‌ساز استنارات روی، بهینه است. بازیخت پودرها به افزایش صددرصدی بخش حقیقی تراوایی مؤثر هسته‌ها انجامید. ولی بخش موهومی تراوایی هم افزایش یافت. در نهایت بیشینه سازه کیفیت تنها  $20$  درصد افزایش داشت. هم‌چنین برای بسامدهای بالا (بیش از  $200\text{ kHz}$ ) به دلیل افزایش تلفات ناشی از جریان‌های گردابی و افزایش بخش موهومی تراوایی سازه کیفیت این هسته‌ها کاهش یافته و کمتر از پودرهای بازیخت نشده می‌شود. بنابراین در گستره‌ای از بسامدها که افزایش تلفات موجب فرونشانی سازه کیفیت می‌شود کاربرد هسته‌ها با پودرهای بازیخت نشده برتری دارد.

## فهرست علائم

بخش حقیقی تراوایی مؤثر اولیه	$\mu_r'$
بخش انگاری تراوایی مؤثر اولیه	$\mu_r''$
سازه‌ی کیفیت	Q
بسامد زاویه‌ای	$\omega$
خودالقایی هسته در حالت سری	$L_S$
مقاومت DC هسته در حالت سری	$R_S$
تعداد دورها	N
طول میانگین مسیر شار	$l_m$
تراوایی نسبی	$\mu_r$
تلفات هیستریسیس	$P_h$
تلفات جریان گردابی	$P_e$
تلفات باقیمانده	$P_r$

## تقدیر و تشکر

نویسنده از مرکز تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و سرپرستی آزمایشگاه‌های حالت جامد و ساخت مواد، در گروه فیزیک این دانشگاه جناب آقای دکتر مظفری برای استفاده از تجهیزات ساخت مواد و برخی از اندازه‌گیری‌ها کمال تشکر را دارد.

## References

- [1] Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2011). *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley. [https://books.google.com/books?id=fh\\_F0G9KuSgC](https://books.google.com/books?id=fh_F0G9KuSgC)
- [2] Goldman, A. (2012). *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*. Springer US. <https://books.google.com/books?id=StbgBwAAQBAJ>
- [3] Fiorillo, F., & Mayergoz, I. D. (2005). *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. ACADEMIC PressINC. <https://books.google.com/books?id=1dwXogEACAAJ>
- [4] Liu, Y., Yi, Y., Shao, W., & Shao, Y. (2013). Microstructure and magnetic properties of soft magnetic powder cores of amorphous and nanocrystalline alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 330, 119-133. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.10.043>
- [5] Rutz, H., Hanejko, F., & Ellis, G. (1997). The manufacture of electromagnetic components by the powder metallurgy process. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 1, 1-10.
- [6] Chao, A. W., & Tigner, M. (1999). *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*. World Scientific. <https://books.google.com/books?id=XOAI moE0u2wC>
- [7] Yasemian, A. R. (2018). Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles and Evaluation of the Effect of Concentration on Magnetic Hyperthermia. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 15(44), 127-136. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_100528.html?lang=en](https://karafan.tvu.ac.ir/article_100528.html?lang=en)
- [8] Faal Hamedani, N., & Shemshadi, R. (2018). Ultrasound –assisted Green Synthesis of ZnO Nanoparticles with Various Morphologies. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 15(44), 37-48. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_100521.html?lang=en](https://karafan.tvu.ac.ir/article_100521.html?lang=en)
- [9] Iyoda, Y., Kamiya, N., Arita, I., & Maruyama, K. (2004). Soft magnetic green compact, manufacturing method for soft magnetic green compact, and soft magnetic powder material. 1-10.
- [10] Magnetic-Inc. (2013). *Magnetics 2013 Ferrite Catalog*. Magnetic-Inc. <https://www.mag-inc.com/Media/Magnetics/File-Library/Product%20Literature/Ferrite%20Literature/Magnetics2013FerriteCatalog.pdf>
- [11] Wohlfarth, E. P., Buschow, K. H. J., & Brück, E. (1980). *Ferromagnetic Materials: A Handbook on the Properties of Magnetically Ordered Substances*. North-Holland Publishing Company. [https://books.google.com/books?id=Od\\_vAAAAMAAJ](https://books.google.com/books?id=Od_vAAAAMAAJ)
- [12] Amoohadi, M., Mozaffari, M., Gharaati, A., & Rezaadeh, M. (2018). Structural and Magnetic Properties of Ordered/Disordered Sendust Powders Prepared by Mechanical Alloying. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 31(8), 2547–2552. <https://doi.org/10.1007/s10948-017-4473-y>
- [13] Gegel, G. A., & Luk, S. (2002). Test Device and Method for Evaluation of Lubricants for P/M Compaction. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*(3), 3-12.
- [14] Rutz, H., Khanuja, J., & Kassam, S. (1996). Single compaction to achieve high density in ferrous P/M materials in automotive applications. *Metal Powder Industries Federation (USA)*, 13. <https://www.gknpm.com/globalassets/downloads/hoeganae/technical-library/technical-papers/test-papers/43.-single-compaction-to-achieve-high-density-in-ferrous-pm-materials-in-automotive-applications.pdf/>

- [15] Zuo, B., Sriharan, T., Teo, Y., & Damayanti, M. (2005). Effects of ternary alloying on mechano-synthesis and nano-crystal stability of an iron-silicon alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 390(1), 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.08.029>
- [16] Amoohadi, M., Mozaffari, M., Gharaati, A & Rezazadeh, M. (2018). A Comparative Study of Insulators on Magnetic Properties of Sendust Based Nanocomposite Powder Cores. *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, 3(4), 1-14. [http://jopn.miau.ac.ir/article\\_3249.html](http://jopn.miau.ac.ir/article_3249.html)
- [17] Snelling, E. C., & Giles, A. D. (1983). *Ferrites for Inductors and Transformers*. Research Studies Press. <https://books.google.com/books?id=24CzAAAAIAAJ>
- [18] Lutterotti, L. (2010). Total pattern fitting for the combined size-strain-stress-texture determination in thin film diffraction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(3), 334-340. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.053>
- [19] James, W. B. (2015). Powder metallurgy methods and applications. In *ASM Handbook* (Vol. 7, pp. 9-19). <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v07.a0006022>
- [20] Pittini-Yamada, Y., Périgo, E. A., de Hazan, Y., & Nakahara, S. (2011). Permeability of hybrid soft magnetic composites. *Acta Materialia*, 59(11), 4291-4302. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.053>
- [21] Shokrollahi, H., & Janghorban, K. (2006). The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites. *Materials Science and Engineering: B*, 134(1), 41-43. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.07.015>
- [22] Snelling, E. C. (1988). *Soft Ferrites: Properties and Applications*. Butterworths. <https://books.google.com/books?id=yRNTAAAAMAAJ>
- [23] Shokrollahi, H., & Janghorban, K. (2007). Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034>