

## Research Paper

# Constructing a Study of the Properties and Feasibility of Using Cobalt and Iron Based Heusler Alloys in the Generator of the Micro\_CHP<sup>1</sup>

Fatemeh Arami<sup>2\*</sup> and Mohsen Hakimi<sup>3</sup>

Received: 2024.10.17

Revised: 2025.03.17

Accepted: 2025.05.10

## 1. Introduction

Energy consumption management in industrial and household applications is a critical global issue, driving the development of Micro Combined Heat and Power (MCHP) systems. MCHPs generate thermal and electrical energy but face challenges such as operating frequency variations, which cause voltage instability and reduced generator efficiency. Addressing these challenges requires generators that maintain high efficiency across varying frequencies. A key component influencing generator performance is the magnetic core. Magnetic materials, particularly ferromagnets and ferrimagnets, are widely used in motors, generators, and transformers due to their aligned magnetic moments and permanent magnetization. In 1903 Heusler compounds were discovered, exhibiting desirable magnetic properties despite their non-magnetic constituent elements. Their properties are governed by the Slater-Pauling model:

$$[M = Z - 24]$$

where (Z) is the number of valence electrons per formula unit. Heusler compounds typically have a cubic crystal structure, with predictable magnetic moments based on valence electrons.

Heusler compounds are magnetically soft, making them ideal for use as magnetic cores in electrical equipment. Recent research focuses on optimizing their properties through element substitution, crystal structure modifications, and advanced fabrication methods to enhance their performance in high-efficiency generators and motors.

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2025.48630.1430>

<sup>2</sup> PhD Student, Department of physics, University of Yazd, Yazd, Iran. (Corresponding Author). Email: fatemeharamy@stu.yazd.ac.ir

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of physics, University of Yazd, Yazd, Iran. Email: hakimi.m@yazd.ac.ir



This study investigates the feasibility of using Heusler compounds as magnetic cores in generators, focusing on improving efficiency and stability across varying operating frequencies. Cobalt-based Heusler compounds, such as  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ , exhibit strong agreement with the Slater-Pauling model, making them promising candidates for magnetic cores due to their high saturation magnetization and low coercivity. The study also examines  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$ , where cobalt is replaced by iron, to evaluate the impact of this substitution [3].

The project culminated in the design and construction of a micro-CHP system, incorporating the developed magnetic material as the generator core. Recent advancements in magnetic materials include the use of soft magnetic composites in synchronous PM motors [4], innovative fabrication methods for permanent magnet motors in compressors [5], and improved rotor core efficiency through dynamic heating conditions [6]. Additionally, high-speed permanent magnet generators with amorphous alloy cores have been developed for aerospace applications [7], and high-efficiency linear generators using high-temperature superconducting coils are being explored for ocean wave energy conversion [8].

This study aims to identify the optimal magnetic core for conventional coil-based generators to achieve a stronger magnetic field, contributing to the advancement of micro-CHP systems and global energy efficiency technologies.

## 2. Methodology

The cobalt-based Heusler compound  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  was selected as the primary material, while  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  (with cobalt replaced by iron) was also studied to evaluate the impact of this substitution. Samples were synthesized using arc melting, followed by annealing and milling to enhance magnetic properties. A sample was also produced via mechanical alloying.

The project culminated in the design of a micro-CHP system, incorporating the produced magnetic material as the generator core. A setup was developed to test the effect of different cores on output voltage at varying frequencies, ensuring repeatable and reliable measurements. The system includes components for generating an alternating magnetic field, a generator for core placement, and a container for the core.

The micro-CHP system consists of a steam generator, turbine, and generator. Waste heat from industrial processes (e.g., a thermal furnace or bakery oven) evaporates water in a boiler, producing steam that drives the turbine. The rotational motion is transferred to the generator, producing electricity. The steam is then cooled and recycled back to the boiler. A prototype was designed to generate electricity using a steam-powered turbine. Three models were evaluated, focusing on high-pressure steam generation and efficient delivery to the turbine. The first model used a pressure cooker for steam, connected via a gas hose, with a pressure gauge to monitor steam pressure. Magnetic cores were integrated into a hydroelectric generator for testing.

<https://jap.alzahra.ac.ir>



Initial designs included a Teflon turbine with 20 blades, capable of rotating under 2 bar steam pressure. However, Teflon's thermal expansion limited its performance. A second design used galvanized steel blades, with alternating moving and fixed blades to direct steam flow. This reaction turbine had a 40 cm shaft and 9.5 cm diameter plates.

Further modifications replaced hoses with water pipes and used steel adhesive to minimize steam loss. Despite challenges like heavy blades, pressure loss, and steam leakage, the design shows potential for improvement and successful operation in micro-CHP systems. A third turbine design was pursued, focusing on the use of high-pressure water instead of steam, addressing the need for a condenser. The setup included two barrels: one for pressurized water input and the other for collecting water output. Water in the input barrel was heated to generate pressure, which drove the turbine. A pressure gauge monitored pressure levels, and gas hoses connected the barrels to the turbine. The turbine's rotation was transferred to a bicycle dynamo acting as a generator, capable of powering 12 small LEDs (6 W total) at 60 RPM. However, the system faced challenges:

1. Insufficient water pressure to effectively rotate the turbine.
2. Intermittent electricity generation.
3. Inability to utilize the generated heat, making it unsuitable as a micro-CHP system.

Despite these limitations, the project achieved:

1. A functional water turbine powered by high-pressure water.
2. Independent electricity generation, albeit inefficient for micro-CHP applications.

### 3. Results and Discussion

The alloys  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  ( $\text{Sm}_1$ ) and  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  ( $\text{Sm}_2$ ) were produced via mechanical alloying. XRD analysis confirmed a face-centered cubic (FCC) structure for  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ , with nanocrystalline grains ( $\sim 7$  nm).  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  showed broader peaks, indicating smaller crystallites ( $\sim 3$  nm) and potential directional growth. SEM revealed micron-sized particles, with  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  exhibiting a bimodal grain distribution, suggesting a two-phase structure.

VSM measurements showed soft magnetic behavior, with  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  having a higher saturation magnetization ( $113 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ) compared to  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  ( $6 \text{ Am}^2/\text{kg}$ ). Experimental  $M_s$  values deviated from Slater-Pauling predictions, likely due to polycrystallinity in  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  and a two-phase structure in  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$ , where one phase displayed paramagnetic behavior. This aligns with the Bethe-Slater curve, linking magnetic interactions to atomic spacing [2].  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  shows paramagnetic behavior due to near-zero Mn-Fe exchange constants (Bethe-Slater curve), confirmed by Mössbauer analysis [1].  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  has higher coercivity (86 Oe) than  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  (15 Oe), attributed to cobalt's magnetic anisotropy [59]. Adding an  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  core to a generator increased output voltage by 0.07% (10-11 V to 11.8 V). Frequency-voltage



tests (Figure 8) show that frequency significantly impacts voltage due to small  $\lambda$  relative to coil diameter [9].

#### 4. Conclusion

Micro-CHP systems improve energy efficiency, with Fe<sub>2</sub>MnSi cores boosting generator voltage by 0.07%. However, iron filings are more cost-effective. A natural gas-powered micro-CHP system can achieve a 3.5-month payback period, making it economically viable for residential use, especially with rising electricity prices. Future optimizations can further enhance performance and adoption.

**Keywords:** CHP, MCHP, Fe<sub>2</sub>MnSi, Co<sub>2</sub>MnSi, Heusler Alloy.

#### References

- [1] Buschow, K.H.J. and Boer, F.R., "Physics of magnetism and magnetic materials", 1934. (Translated from English to Persian by Mohsen Hakimi and Mozhgan Shahidani) Yazd: Yazd university, 1395. [In Persian]
- [2] Asadian, A., Hakimi, M., "Comparison of the effect of production processes on the magnetic, crystalline and microstructural properties of Heusler MN<sub>2</sub>CoGe alloy", *7th National Conference on Superconductivity and Magnetism*, 131-133, 2022. [In Persian]
- [3] Arami, F., Khalf. Khan., A, Hakimi, M., "Unusual weakening of the magnetic property by replacing iron instead of cobalt in the composition of Co<sub>2</sub>MnSi", *The first national conference of materials engineering and interdisciplinary sciences*, Tehran, 2022. <http://civilica.com/doc/1593835>. [In Persian]
- [4] Akita, H., Nakahara, Y., Miyake, N., & Oikawa, T., "A new core", *IEEE Industry Applications Magazine*, 11(6), 38-43, 2005. <http://doi.org/10.1109/MIA.2005.1524735>.
- [5] Tavares, S., Yang, K., & Meyers, M. A., "Heusler alloys: Past, properties, new alloys, and prospects", *Progress in Materials Science*, 132, 101017, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101017>
- [6] Petryshynets, I., Kováč, F., Petrov, B., Falat, L., & Puchý, V., "Improving the magnetic properties of non-oriented electrical steels by secondary recrystallization using dynamic heating conditions", *Materials*, 12(12), 1914, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12121914>.
- [7] Ismagilov, F. R., Papini, L., Vavilov, V. E., & Gusakov, D. V., "Design and performance of a high-speed permanent magnet generator with amorphous alloy magnetic core for aerospace applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 1750-1758, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2905806>.
- [8] Molla, S., Farrok, O., Islam, M. R., & Muttaqi, K. M., "Analysis and design of a high-performance linear generator with high grade magnetic cores and high temperature superconducting coils for oceanic wave energy

conversion", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-5, 2019. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2895529>.

- [9] Alkasir, A., Abdollahi, S. E., & Abdollahi, S., "An Analytical Calculation of Self-and Mutual Inductances of Rectangular Flat Polarized Coils with Displacement in the Vertical Direction", *Applied Electromagnetics*, 10(1), 1-13, 2022.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



# ساخت و مطالعه ویژگی‌ها و امکان‌سنجی به کارگیری آلیاژهای هویسلر پایه کبالت و پایه آهن در هسته ژنراتور سامانه میکرو سی‌اچ‌پی<sup>۱</sup> فاطمه آرامی<sup>۲\*</sup> و محسن حکیمی<sup>۳</sup>

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال پانزدهم، پیاپی ۴۱، تابستان ۱۴۰۴

صص ۷ - ۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

## چکیده:

با توجه به اهمیت چگونگی مصرف و مدیریت انرژی، بشریت به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر چون خورشید و یا استفاده دوباره از انرژی هیدررفت تمایل دارد. میکرو سی‌اچ‌پی‌ها سامانه‌های در حال رشدی هستند که در جهت استفاده از انرژی هیدر رفت طراحی و تولید می‌شوند. در این پروژه طراحی جدیدی برای میکرو سی‌اچ‌پی‌ها در نظر گرفته شد. همچنین، تلاش برای ساخت یک نمونه‌ی اولیه که امکان تولید برق از ژنراتور با استفاده از نیروی بخار را دارد، مورد نظر قرار گرفت. جهت پایداری برق خروجی ژنراتور این نمونه‌ی ساخته شده روش تقویت هسته ژنراتور با ترکیبات هویسلر مورد بررسی قرار گرفت. دو نمونه از ترکیبات هویسلر ساخته شده به روش‌های ذوب قوسی و آلیاژسازی مکانیکی به عنوان هسته‌ی ژنراتور میکرو سی‌اچ‌پی‌ها جایگذاری شد. برای بررسی هسته‌های سنتز شده دو ترکیب  $Co_2MnSi$  و  $Fe_2MnSi$  مورد آنالیزهای  $VSM$ ,  $XRD$ ,  $SEM$  قرار گرفتند. که در نتیجه تشکیل فاز بلوری و دستیابی به ویژگی‌های مغناطیسی مطلوب مشاهده گشت. در کنار این دو ترکیب هسته‌های دیگری چون براده آهن، پودر آهن و کبالت مورد بررسی قرار گرفتند. در مقایسه با هسته‌های آزمایش شده، براده آهن افزایش ولتاژ بیشتری داشت. در نهایت هسته  $Fe_2MnSi$  درون توربین ژنراتور سامانه میکرو سی‌اچ‌پی‌ها قرار گرفت و دوباره بررسی شد که افزایش ۰/۰۷ درصدی ولتاژ مشاهده شد.

**واژگان کلیدی:**  $Co_2MnSi$ ,  $Fe_2MnSi$ ، میکرو سی‌اچ‌پی، سی‌اچ‌پی و آلیاژهای هویسلر.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2025.48630.1430>

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران. (نویسنده مسئول). Email: fatemeharamy@stu.yazd.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران. Email: hakimi.m@yazd.ac.ir



## ۱. مقدمه

مساله مدیریت مصرف انرژی در صنعت و کاربردهای خانگی یکی از دغدغه‌های جهان معاصر است. این موضوع یکی از دلایل توسعه ابزارهایی تحت عنوان میکرو سی‌اچ‌پی<sup>۱</sup> می‌باشد. میکرو سی‌اچ‌پی‌ها مبدل‌های انرژی هستند که هم‌زمان توانایی تولید انرژی گرمایی و الکتریکی را نیز دارند. یکی از چالش‌های استفاده از میکرو سی‌اچ‌پی‌ها تغییر بسامد کاری چرخنده با زمان است که به ناپایداری ولتاژ ژنراتور و کاهش بازده تولید انرژی الکتریکی می‌انجامد. این در صورتی است که معمولاً ژنراتورها برای بسامدهای کاری مشخصی طراحی شده‌اند و کاهش بازده با تغییر بسامد چرخش امری دوری‌ناپذیر است. تولید ژنراتورهایی که بتواند در بسامدهای کاری مختلف کارآمدی بالایی داشته باشد، یکی از روش‌های بهبود خروجی میکرو سی‌اچ‌پی است. یکی از بخش‌های مهم تاثیرگذار بر کیفیت عملکرد ژنراتور، هسته مغناطیسی است که در ساختار آن به کار گرفته شده است.

مواد مغناطیسی یکی از مهمترین گونه‌های مواد موجود در طبیعت به شمار می‌رود. شاید بتوان گفت شناخته‌شده ترین و پرکاربردترین دسته از مواد مغناطیسی فرومغناطیس‌ها و فری مغناطیس‌ها هستند. فرومغناطیس‌ها دسته‌ای از مواد مغناطیسی هستند که شکل گشتاورهای مغناطیسی در هر بخش یکسان و هم‌جهت است. به عبارتی دارای گشتاور مغناطیسی دائمی هستند و با اعمال میدان مغناطیسی کوچک به راحتی تمام گشتاورها در جهت میدان قرار می‌گیرند و ماده مغناطش می‌شود. همچنین با حذف میدان، مغناطش به صورت کامل از بین نمی‌رود. در ادامه نوع دیگری از مواد مغناطیسی هستند که دو گشتاور مغناطیسی با جهت و اندازه‌ی متفاوت دارند. این دسته از مواد از نظر رفتار مغناطیسی بسیار شبیه به فرومغناطیس‌ها هستند. هر دودسته از مواد مغناطیسی معرفی شده در تولید آهنرباها و همچنین به عنوان هسته مغناطیسی برای موتورهای الکتریکی ژنراتورها و ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار گرفته اند.

در سال ۱۹۰۳ ترکیبی کشف شد که با وجود این که هیچ یک از عناصر سازنده نظم مغناطیسی خودبه‌خودی نداشتند اما ترکیب بدست آمده ویژگی‌های مغناطیسی مطلوبی داشت [۱]. این کشف مقدمه‌ای برای آشنایی بشر با دسته‌ای از ترکیبات مغناطیسی شد که بعدها ترکیبات هویسler نام گرفتند. یکی از جذابیت‌های این ترکیبات فیزیک ساده حاکم بر آنها است. بسیاری از ویژگی‌های این مواد با تعداد الکترون ظرفیت عناصر تشکیل‌دهنده ترکیب رابطه خطی دارند. به عنوان نمونه

<sup>۱</sup> CHP: Combined Heat and Power



الگوی اسلیتر - پائولینگ گشتاور مغناطیسی ترکیبات هویسلر را به ازای تعداد الکترون ظرفیت آن‌ها ( $Z$ ) به صورت ( $Z-24=M$ ) تخمین می‌زند. در این رابطه  $Z$  به تعداد الکترون ظرفیت واحد فرمول شیمیایی ترکیب اشاره دارد. با استفاده از این رابطه گشتاور مغناطیسی با واحد، بر واحد مگنتون بوهر فرمول شیمیایی بدست می‌آید. بر این اساس تلاش‌های زیادی صورت می‌گیرد که با جاگزینی عناصر مختلف ویژگی‌های مغناطیسی با توجه به کاربرد مورد نظر بهبود یابد. افزون بر این، مشابه دیگر ترکیبات مغناطیسی، در ترکیبات هویسلر نیز تغییر در ساختار بلوری، روش شکل‌گیری فازهای بلوری، وجود رسوبات فازهای مختلف در زمینه بلوری ترکیب و چند فازی شدن می‌تواند ویژگی‌های مغناطیسی را تغییر دهد. از این‌رو، حجم قابل توجهی از پژوهش‌های تجربی در زمینه ترکیبات هویسلر به بررسی اثر به کارگیری روش‌های مختلف ساخت در تولید این مواد می‌پردازد و تلاش پژوهشگران بر روی بهینه کردن ویژگی‌ها با بهبود فرآیندهای تولید متمرکز شده است.

در حالت ایده‌آل ترکیبات هویسلر ساختار بلوری مکعبی دارند. در این ساختار سلول واحد از چهار شبکه مکعبی مرکز وجه‌دار (FCC) تشکیل شده است که هر کدام به اندازه یک چهارم قطر مکعب در راستای قطر اصلی جابه‌جا شده‌اند. با توجه به الگوی اسلیتر - پائولینگ گشتاور مغناطیسی هویسلر بر اساس تعداد الکترون‌های ظرفیت آن‌ها NV به ازای واحد فرمول شیمیایی از رابطه‌ی بالا قابل تخمین است. گشتاور مغناطیسی ترکیبات هویسلر بر پایه کبالت، هماهنگی خوبی با رابطه‌ی خطی بدست آمده توسط اسلیتر - پائولینگ دارد [۲].

همانطور که پیش‌تر اشاره شد یکی از کاربردهای مواد مغناطیسی استفاده از آن‌ها به عنوان هسته در تجهیزات الکتریکی است. در این کاربرد رفتار ماده از نظر نرمی و سختی مغناطیسی دارای اهمیت است. افزون بر دارا بودن مغناطش اشباع بزرگ، یک معیار اساسی برای مستعد بودن ماده در نقش آفرینی به عنوان هسته مغناطیسی میزان پهنای حلقه پسماند است. ترکیبات هویسلر بر پایه کبالت همزمان با دارا بودن مغناطش اشباع بزرگ، واداردگی کمی نیز دارند. بر این اساس بررسی امکان استفاده از این ترکیبات به عنوان هسته مغناطیسی می‌تواند جذاب باشد.

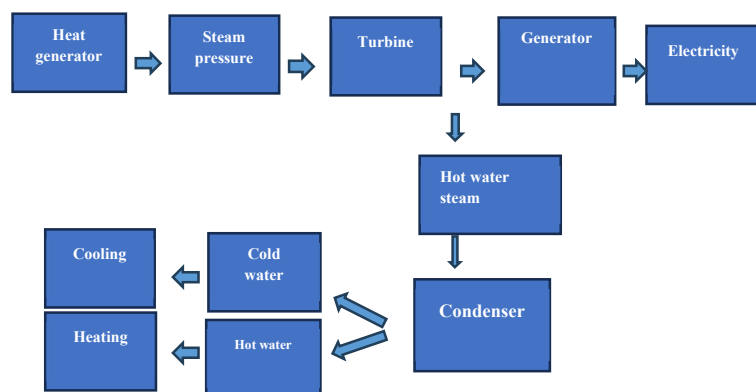
در این پژوهش امکان استفاده از ترکیبات هویسلر به عنوان هسته در یک ژنراتور مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان شبیه‌ساز، یک ژنراتور از یک سیم‌لوله استفاده شده است. تاثیر حضور هسته از جنس نمونه‌های هویسلر بر اختلاف پتانسل تولیدی ژنراتور در بسامد - کاری مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده با اختلاف پتانسیل تولید شده با استفاده از ژنراتور در شرایط بدون هسته و همچنین شرایطی که از هسته‌هایی از جنس کبالت، آهن خالص و براده آهن استفاده

شده مقایسه شده است با این رویکرد ترکیب پایه کبالت  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  به عنوان ترکیب هویسلر اصلی انتخاب شد و ترکیب دوم  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  که از جایگزینی کبالت با آهن بدست خواهد آمد نیز به عنوان ترکیب دوم، جهت بررسی تاثیر این جایگزینی بر ویژگی‌های محصول مورد توجه قرار گرفت [۳]. بخش پایانی پروژه، طراحی و ساخت یک میکرو سی‌اچ‌پی و به کارگیری ماده مغناطیسی تولید شده به عنوان هسته ژنراتور استفاده شده در این دستگاه است. ترکیبات هویسلر بیشتر از نظر مغناطیسی نرم هستند. بررسی منابع نشان می‌دهد به توانایی این ترکیبات به عنوان هسته استفاده از هسته مغناطیسی به عنوان هسته ژنراتور قدمتی معادل عمر ژنراتور دارد. پژوهش‌های زیادی برای رشد ویژگی‌های مغناطیسی هسته‌ها صورت گرفته است. به ویژه در سال‌های کنونی با گسترش دانش مربوط به ساخت تجهیزاتی چون موتورهای الکتریکی بر این موضوع تاکید ویژه‌ای شده است. به عنوان مثال، پژوهش‌هایی برای بهبود رفتار مغناطیسی هسته منجر به بهبود عملکرد موتور سنکرون PM با استفاده از مواد کامپوزیت مغناطیسی نرم گردیده است [۴]. در کاری دیگر با بکارگیری یک روش ساخت نوآورانه هسته بازده موتورهای آهنربای دائم به کار گرفته شده در یک کمپرسور افزایش داده شده است [۵]. افزایش بازده هسته رتور با بهبود ویژگی‌های مغناطیسی فولادهای الکتریکی غیرجهت‌دار، دستاوردی دیگر در این زمینه است که با تبلور ثانویه هسته در طول فرآیند گرمادهی ویژه موسوم به شرایط گرمایش پویا بدست آمده است [۶]. در دهه‌ی کنونی به عنوان یک دستاورد فناورانه نوین یک ژنراتور آهنربای دائمی با سرعت بالا با هسته مغناطیسی آلایژی آمورف برای کاربردهای هوافضا طراحی شده است [۷]. همچنین تحلیل و طراحی یک ژنراتور خطی با کارایی بالا از سال ۲۰۱۹ در حال بررسی است، که در این پروژه از هسته‌های مغناطیسی با کیفیت و سیم‌پیچ‌های ابررسانای دمای بالا برای تبدیل انرژی امواج اقیانوسی استفاده می‌گردد [۸]. در پروژه جاری به مساله‌ی طراحی و ساخت میکرو سی‌اچ‌پی از زاویه‌های مختلف ورود شده است. استفاده از دیگ بخار، شبکه‌های آب گرم، طراحی رابط‌های انتقال بخار آب، طراحی توربین‌های مختلف، طراحی سامانه اندازه‌گیری تاثیر هسته مغناطیسی به ژنراتور و همچنین ساخت مواد مغناطیسی و بررسی ویژگی‌های آن به ویژه امکان استفاده از آن به عنوان هسته از مواردی است که در این پروژه دنبال شده است. رویکرد این مقاله نیز یافتن بهترین هسته مغناطیسی برای سیم‌پیچ معمولی به عنوان ژنراتور برای بدست آوردن میدان قوی‌تر است.



## ۲. روش کار

ترکیب پایه کبالت  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  به عنوان ترکیب هویسلر اصلی انتخاب شد و ترکیب دوم  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  که از جایگزینی کبالت با آهن بدست آمده است، نیز به عنوان ترکیب دوم جهت بررسی تاثیر این جایگزینی بر ویژگی‌های محصول مورد توجه قرار گرفت. رایج‌ترین روش برای ساخت ترکیبات هویسلر استفاده از روش ذوب قوسی است. این روش در این پژوهش برای تولید نمونه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در کنار انجام فرآیند ذوب عملیات تکمیلی همچون بازپخت و آسیاب‌کاری با هدف بهبود ویژگی‌های مغناطیسی دنبال شده است. نمونه‌ای نیز به روش آلیاژسازی مکانیکی تولید شده است. بخش پایانی پروژه طراحی و ساخت یک میکروسی‌اچ‌پی همچنین بکارگیری ماده مغناطیسی تولید شده به عنوان هسته ژنراتور استفاده شده در این دستگاه است. با توجه به هدف این پروژه که مقایسه‌ی تاثیر هسته‌های مختلف بر ولتاژ خروجی با تغییر بسامد بود و با توجه به ضرورت قابل تکرار بودن آزمون برای اطمینان و داشتن تاییدیه‌ی علمی، نیاز به طراحی چیدمانی برای ایجاد بسامد و امکان تغییر آن به شکل قابل تکرار مطرح شد. این چیدمان از بخش‌های مختلف جهت تولید میدان مغناطیسی متناوب و ژنراتوری جهت جایگذاری هسته و ظرف برای جایگذاری هسته تشکیل شده است. بخش‌های اصلی یک میکروسی‌اچ‌پی‌ها متشکل از مولد نیرو، توربین و ژنراتور می‌باشد. در این پژوهش فرض بر این است که یک مولد بخار در محیط وجود دارد. به عنوان مثال، در یک کارخانه کوره حرارتی می‌تواند نقش مولد بخار را ایفا کند. و یا یک تنور در یک نانویی را می‌توان به عنوان مولد بخار در نظر گرفت. در این نگاه گرمای اتلافی در فرآیند هدایت و آب را تبخیر می‌کند. فرآیند تبخیر داخل یک دیگ بخار انجام گرفته و از راه اتصالات بخار حاصل به توربین منتقل و منجر به حرکت دورانی شده و این حرکت از راه رتور به ژنراتور منتقل می‌گردد. پس از چرخش ژنراتور و تولید برق، بخار آب سرد شده و در طول یک فرآیند به دیگ بخار برمی‌گردد. طرحواره‌ی از دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است.



**Fig. 1** Operation mechanism of the micro-CHP system.

شکل ۱ روش کارکرد سامانه میکرو سی اچ پی.

## ۱.۲. طراحی میکرو سی اچ پی

در طراحی یک نمونه‌ی اولیه که با استفاده از قدرت بخار توربین شروع به فعالیت کند و منجر به حرکت ژنراتور و تولید برق شود، سه الگو در نظر قرار گرفت که هر طراحی متناسب با مزایا و نقص‌هایی که دارد مورد بررسی قرار می‌گیرد. با وجود یک هیدرو الکتریک ژنراتور با مدل DB\_268 و ولتاژ خروجی ۱۲ ولت با حداقل دبی ورودی  $5/2 \text{ L/Min}$  و جریان خروجی ۰-۱۵۰ میلی آمپر کار طراحی و ساخت شروع شد. برای راه‌اندازی توربین عموماً نیاز به تولید بخار فشار بالا و هدایت شده وجود دارد. در الگوی اول این فشار را از دیگ زودپز دریافت کردیم اما برای هدایت نمودن این فشار و منتهی کردن آن به نازل ورودی توربین، اقداماتی انجام گرفت. برای ارتباط بهتر نازل و مسیر خروجی بخار دیگ، از شیلنگ گاز استفاده شد. به کمک بست‌ها سعی بر حذف اتلافات داشتیم. در مسیر عبور بخار یک فشارسنج جهت اندازه‌گیری فشار در حین کار قرار گرفته شد. هسته‌های مغناطیسی انتخابی جهت آزمایش باید درون ژنراتور هیدرو الکتریک جاسازی میشد که با توجه به فاصله‌ی بین صفحات ژنراتور این امر امکان‌پذیر بود.

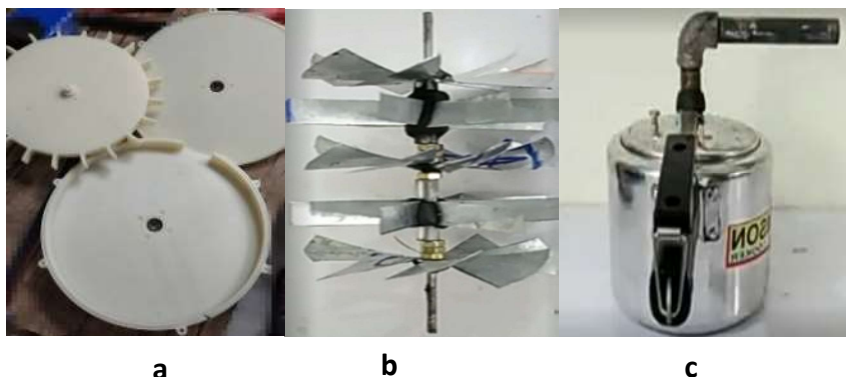
در ادامه تلاش برای مهندسی معکوس هیدرو الکتریک و ساخت و آزمودن چند نمونه توربین برای راه‌اندازی میکرو سی اچ پی صورت گرفت که منجر به تغییر شکل اتصالات از دیگ به توربین شد. در ابتدای طراحی میکرو سی اچ پی به الگوی ابتدایی از یک سیکل نه چندان کامل (بدون کندانسور)



تولید بخار رسیدیم و بر اساس یافته‌ها و مطالعات اولیه تصمیم بر ساخت گرفته شد. در ابتدای این مسیر توربین بخار به عنوان اولین دستاورد و قطعه‌ی کوچکی از سامانه اصلی در نظر گرفته شد. بر اساس تجربه‌ی قبلی جهت ساخت یک نوع توربین بخار از جنس تفلون اقدامات لازم انجام گرفت. یک توربین ضربه‌ایی با قطر خارجی ۲۵ سانت و قطر داخلی ۲۴/۸ و تعداد پره‌های ۲۰ که توانایی چرخش با فشار بخار ۲ بار را به راحتی داشت (شکل (۲-الف)). با استفاده از طراحی هدایت بخار به توربین که برای هیدروالکتریک استفاده کردیم این نمونه نیز مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به انبساط تفلون در مقابل حرارت بخار انتظار متوقف شدن توربین می‌رفت. هر چند با فشاربخار اندکی سرعت چرخش بسیار مناسب بود اما جنس توربین مانع از پیشرفت کار می‌شد. در طراحی بعدی جنس توربین و شکل پره‌ها و روش کارکرد آن تغییر کرد. برحسب انتظار روش اتصال به دیگ نیز متفاوت بود. برای ساخت پره از صفحات گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. در نهایت چهار پره که به شکل یک درمیان پره متحرک و ثابت در نظر گرفته شدند، بر روی یک محور قرار گرفتند. پره‌های متحرک حکم پره‌هایی را دارند که کار اصلی بر روی آن‌ها انجام می‌شود و پره‌های ثابت حکم نازل را دارند و جهت حرکت بخار را مشخص می‌کنند. به نوعی در توربین‌هایی عکس‌العملی نازل‌ها کارایی کمتری دارند و بر همین اساس توربین ساخته‌شده از نوع عکس‌العملی در نظر گرفته شد. طول شفت توربین ۴۰ سانت در نظر گرفته شد. صفحه‌های اصلی با قطر ۹.۵ سانتی‌متر بریده شدند و تعداد ۸ پره در زاویه‌های ۴۵ درجه بر روی هر صفحه ایجاد شد. پره‌های ثابت بر روی حلقه‌ایی با چسب محکم شدند (شکل (۲-ب)). هر پره مستطیلی به ابعاد ۲ در ۳ بریده شد.

در الگوی دوم، به جهت تغییر شکل نازل باید شکل اتصال دیگ به توربین تغییر می‌کرد. به عبارتی، لازم بود که اتصالات سطح مقطع کمتری داشته باشند. برای این منظور شیلنگ حذف و به جای آن از لوله‌های آب استفاده شد. لوله‌ی آب بر سر نازل خروجی (سوت زودپز) قرار گرفت. برای حذف اتلافات از چسب فولاد برای دهانه‌ی خروجی بخار از دیگ استفاده شد (شکل (۲-ج)). برای ساخت بدنه نیز از صفحات گالوانیزه استفاده شد. قطر بدنه ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. و به عنوان نازل لوله‌ایی جداگانه بر سر بدنه قرار گرفت. همچنین، در قسمت داخلی که لوله به خود اختصاص داده بود، چند سوراخ ایجاد شد تا فشار و سرعت برخورد بخار به پره اول بیشتر شود. وزن بالای پره‌ها و محور مرکزی، از دست دادن فشار بخار و برخورد بخار بر فشار به نقاط نزدیک به محور

روی پره‌ها به جای رأس و نهایتاً نشت بخار به دلیل فاصله‌ی زیاد بین پره‌ها و بدنه نقص‌هایی از توربین ساخته شده بود. همین الگو با تنظیمات درست منجر به توربین موفق‌ی خواهد شد.



**Fig. 2** (a) Appearance of the Teflon impulse turbine, (b) Appearance of the galvanized reaction turbine, and (c) Modification of connections from the boiler to the turbine.

**شکل ۲** (الف) شکل ظاهری توربین ضربه‌ای از جنس تفلون، (ب) شکل ظاهری توربین عکس‌العملی از جنس گالوانیزه و (ج) روش تغییر اتصالات از دیگ به توربین.

در ادامه با توجه به اهمیت وجود کندانسور، طرح سوم برای ساخت توربین دنبال شد. این ایده همزمان با پیشبرد کار قوت گرفت، که توربینی طراحی شود که توانایی کار با آب پر فشار به جای بخار را دارا باشد. از این‌رو، مسیر بعدی طراحی و ساخت یک توربین آبی بود. با توجه به روش کارکرد این توربین نیاز به طراحی جدیدی داشتیم تا همزمان از حرارت برای تولید برق استفاده کند، بنابراین، ساختار دیگ نیز تغییر کرد (شکل ۳-الف). در این چیدمان جدید به جای دیگ از دو بشکه استفاده شد. به این دلیل که این توربین یک نازل ورودی و یک نازل خروجی آب داشت یک بشکه برای ورودی آب به توربین و دیگری برای آب خارج شده از توربین مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه برای چرخش توربین نیاز به آب پر فشار بود، در بشکه‌ی برای ورودی آب توربین، آب ریخته شد و بر روی حرارت قرار گرفت. از طرفی سطح این بشکه کاملاً بسته شد و تنها یک فشارسنج روی آن برای مشاهده‌ی میزان افزایش فشار قرار گرفت. پس از اینکه فشار بخار بالای آب به حدی رسید که با باز کردن شیر آب پر فشار پره‌های توربین را بچرخاند، شیر باز شده و آبی که از نازل خروجی بیرون می‌آید به داخل بشکه‌ی دوم ریخته می‌شود. شیلنگ‌های گاز ارتباط با دو نازل توربین را امکان‌پذیر کردند. پس از اتمام آب بشکه‌ی اول، بشکه‌ها جابه‌جا شدند



و کار در این چرخه ادامه پیدا می‌کند. طرحی از روش اتصال بشکه به توربین ساخته شده در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. در این طرح چرخش توربین به یک دینام دوچرخه که در اینجا نقش ژنراتور را بازی می‌کند، منتقل و تولید انرژی الکتریکی امکان‌پذیر می‌شد. این دینام می‌توانست در سرعت چرخش ۶۰ دور در دقیقه ۱۲ LED کوچک با توان کل ۶ وات را روشن کند. مشکل اساسی در این ژنراتور گشتاور نیروی نسبتاً بزرگی بود که برای چرخش دینام مورد نیاز بود. یک راهکار این بود که با استفاده از یکسری چرخنده گشتاور نیرو کاهش یابد. با این وجود از آنجا که استفاده از چرخنده نیاز به یک ساختار مکانیکی جداگانه داشت و افزون بر پیچیدگی ساختار، بازده نهایی را در حد معنی داری کاهش می‌داد از ادامه مسیر خودداری شده است. شکل (۳) تصویری از دینام بکار گرفته شده را نشان می‌دهد.



**Fig. 3** Connection method of the turbine to the generator in the new structure.

**شکل ۳** روش اتصال توربین به ژنراتور در ساختار جدید.

از مهم‌ترین نقص‌های این چیدمان می‌توان به سه مورد زیر اشاره نمود. اول، فشار آب کافی برای چرخاندن توربین بدست نیامد. دوم، برق تولید شده از این چرخه ادامه‌دار نبود. و سوم، گرمای بدست آمده از این چیدمان قابل استفاده نبود. از این‌رو، این چیدمان میکروسی‌اچ‌پی را به خوبی تعریف نمی‌کرد. با این وجود این مسیر دستاوردهای زیر را داشت.

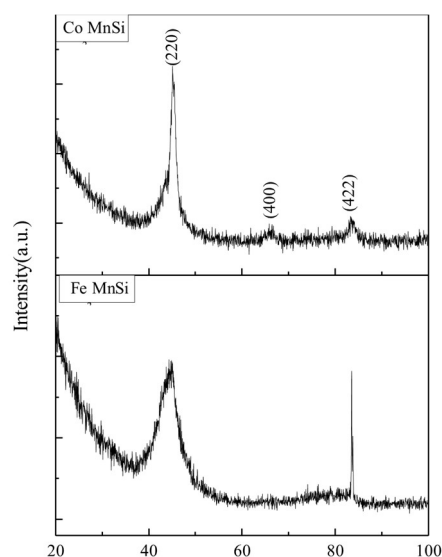
۱- ساخت توربین آبی که توانایی چرخش با آب پر فشار را داشت.

۲- این طراحی با وجودیکه به عنوان میکرو سی اچ پی ناکارآمد بود اما به شکل جداگانه توانایی تولید برق را داشت.

### ۳. نتایج و بحث

برای ساخت این آلیاژها از روش آلیاژسازی مکانیکی استفاده شده است. نمونه آلیاژ  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$ ،  $\text{Sm}_1$  و نمونه ی آلیاژ  $\text{Sm}_2, \text{Co}_2\text{MnSi}$  نامگذاری شدند. شکل (۴) نتایج بررسی پراش پرتو X دو نمونه  $\text{X}_2\text{MnSi}$  ( $\text{X} = \text{Fe}, \text{Co}$ ) را نشان می دهد. قله های مشاهده شده در طیف XRD نمونه  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  به ساختار بلوری مکعبی مرکز سطحی با گروه فضایی  $\text{Fm}3m$  مربوط می شود. قله های مشخص شده با طیف استاندارد ترکیب  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  با کد مرجع ۰۱-۰۷۰-۲۸۰۸ هماهنگی دارد و بر این اساس اندیس گذاری شده است. پهنای قابل توجه قله ها از تولید محصولی با اندازه بلورک های نانومتری حکایت می کند. با استفاده از رابطه دبای شرر، اندازه بلورک ها برای این نمونه برابر با ۷ نانومتر بدست آمد. طیف XRD نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  نیز شباهت هایی با نمونه پیشین دارد، با این تفاوت که قله (۲۲۰) در این نمونه به مراتب پهن تر است. پهنای بیشتر به معنی اندازه بلورک کوچک تر بوده و مقدار اندازه بلورک در این نمونه ۳ نانومتر بدست آمد. نکته دیگر اینکه در این نمونه ارتفاع قله (۴۴۰) تا مرتبه نوفه زمینه کاهش یافته و در مقابل در قله (۴۲۲) ضمن افزایش ارتفاع پهنای نیز به شدت کاهش یافته است. تفاوت اختلاف ارتفاع نسبی قله ها در دو نمونه را می توان به تفاوت در نظم بلوری نمونه ها و موقعیت انتخابی اتم ها در شبکه بلوری نسبت داد. معمولاً در نمونه های تک فاز پهنای قله های موجود مشابه بوده و به هم نزدیک است. اما در نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  تفاوت چشمگیری در پهنای قله های (۲۲۰) و (۴۲۲) به چشم می خورد. شاید بتوان این رفتار را به شکل گیری نوعی رشد جهت دار بلوری در این نمونه نسبت داد. بدین معنی که ساختار بلوری نمونه در راستای (۴۲۲) رشد قابل توجهی داشته است و این رشد به صورت تیز شدن قله در طیف XRD بروز کرده است. چنانچه در رابطه دبای شرر این قله مبنای محاسبه در نظر گرفته شود، اندازه بلورک در محدوده ۱۰۰ نانومتر بدست می آید. کمیت شبکه بلوری این دو نمونه با استفاده از قانون براگ محاسبه شده و به همراه سایر کمیت ها در جدول (۱) گزارش شده است. با توجه به شعاع اتمی بزرگتر آهن نسبت به کبالت این تفاوت قابل انتظار است.

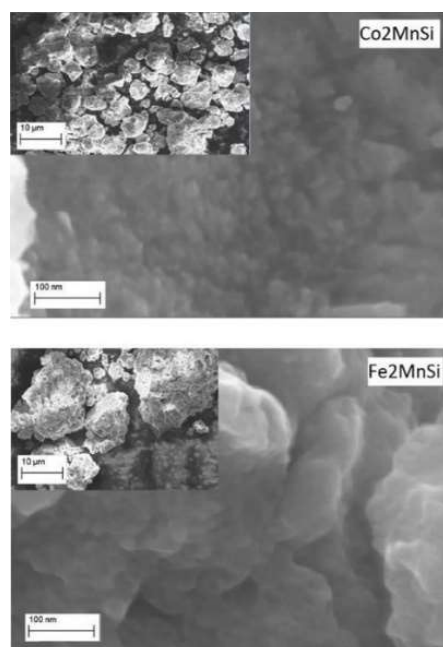




**Fig. 4** Results of X-ray diffraction (XRD) analysis for the two samples  $X_2\text{MnSi}$  ( $X = \text{Fe, Co}$ ).

**شکل ۴** نتایج بررسی پراش پرتو  $X$  دو نمونه  $X_2\text{MnSi}$  ( $X = \text{Fe, Co}$ ).

تصویر SEM نمونه‌ها در دو بزرگنمایی مختلف در شکل (۵) مشاهده می‌شود. تصاویر نشان می‌دهد ذراتی از مرتبه چند میکرومتر بدست آمده است. اندازه ذرات در نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  نسبتاً بزرگتر و در مواردی از ابعاد ده میکرومتری تجاوز می‌کند. شکل ذرات نسبتاً متقارن بوده و جهت‌گیری ویژه‌ای مشاهده نمی‌شود. در تصاویر با بزرگنمایی بیشتر پستی بلندی‌هایی در سطح ذرات مشاهده می‌شود. این وضعیت می‌تواند به دلیل تک بلور نبودن ذرات باشد. در حقیقت، هر ذره از ریزدانه-هایی تشکیل شده است که به هم چسبیده و در هم تنیده‌اند. ظاهر تصاویر این برداشت را القا می‌کند که اندازه این ریزدانه‌ها در نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  در مقایسه با ترکیب  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  بزرگتر است. در حقیقت افزون بر بر دانه‌های ریز، دانه‌هایی از مرتبه ۱۰۰ نانومتر در تصویر SEM این نمونه قابل مشاهده است و به نظر می‌رسد به نوعی ترکیب  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  دو فازی شده است. این تحلیل با رفتار مشاهده شده در بروز قله‌های XRD با پهنای متفاوت در این نمونه هماهنگی دارد.



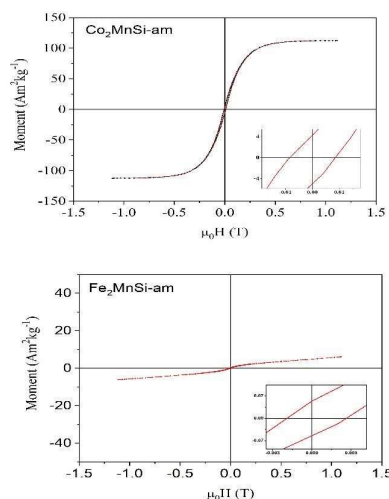
**Fig. 5** SEM images of the two samples  $X_2\text{MnSi}$  ( $X = \text{Fe}, \text{Co}$ ) at two different magnifications.

**شکل ۵** تصاویر SEM دو نمونه  $X_2\text{MnSi}$  ( $X = \text{Fe}, \text{Co}$ ) در دو بزرگنمایی مختلف.

نتایج بررسی VSM نمونه‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. بخش مرکزی حلقه پسماند در بزرگنمایی بیشتر در الحاقی تصاویر ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نمونه به لحاظ مغناطیسی رفتاری نرم از خود نشان می‌دهند. مغناطش اشباع در نمونه  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  برابر  $113 \text{ Am}^2/\text{Kg}$  بوده و به مراتب بزرگتر از مقدار این کمیت در نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  برابر  $6 \text{ Am}^2/\text{Kg}$  می‌باشد. الگوی اسلیتر-پائولینگ مقادیر مغناطش اشباع را برای نمونه‌های  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  و  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  به ترتیب برابر ۵ و ۳ مگنتون بوهر به ازاء واحد فرمول شیمیایی پیش‌بینی می‌کند. در نمونه‌های ساخته شده در اینجا این مقادیر به ترتیب برابر  $4/07$  و  $21/0$  مگنتون بوهر به ازاء واحد فرمول شیمیایی بدست آمده است. در رابطه با نمونه  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  مغناطش اشباع نسبت به پیش‌بینی اسلیتر-پائولینگ حدود ۱۹ درصد کمتر است که می‌توان این تفاوت را به تک بلور نبودن نمونه در بلور نسبت داد. اما تفاوت مغناطش اشباع در نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  نسبت به پیش‌بینی اسلیتر-پائولینگ بسیار شدید و نامتعارف می‌باشد. شاید بتوان بروز این رفتار را به دو فازی شدن



نمونه نسبت داد به صورتی که فاز غالب رفتار پارامغناطیسی و فاز دوم ماهیتی فرو/فری مغناطیسی از خود نشان می‌دهد. توضیحی که به عنوان دلیل شکل‌گیری رفتار پارامغناطیسی قابل بیان است به منحنی بته-اسلیتر برمی‌گردد. اسلیتر متوجه شد یک همبستگی بین نوع برهمکنش تبادلی و نسبت فاصله بین دو اتم به شعاع پوسته کامل نشده وجود دارد [۲]. بر اساس منحنی بته-اسلیتر پیوند Fe-Fe ثابت تبادل مثبت و برهمکنش فرومغناطیسی و در مقابل پیوند Mn-Mn ثابت تبادل منفی و برهمکنش پادفرومغناطیسی دارد. از این رو، بر اساس این منحنی در حالت بینابینی پیوند Mn-Fe ثابت تبادل نزدیک به صفر خواهد داشت و می‌توان با صرف نظر از اثرات برهمکنشی رفتار پارامغناطیسی را توجیه کرد. شکل‌گیری ساختار بلوری با رفتار پارامغناطیس در ترکیباتی مشابه متشکل از عناصر Fe، Mn و Si بیشتر نیز گزارش شده است. در پژوهشی که توسط زیووتسکی و همکارانش صورت گرفت رفتار پارامغناطیس در نمونه  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  با آنالیز موسباتر تایید شده است [۱]. مقادیر وادارندگی دو نمونه  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  و  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  به ترتیب برابر ۸۶ و ۱۵ اوستد بدست آمد. عموماً ترکیبات با محتوای کبالت ناهمسانگردی مغناطیسی بیشتری از خود نشان می‌دهند [۵] و شاید بتوان بیشتر بودن وادارندگی در نمونه پایه کبالت را به بالاتر بودن ناهمسانگردی به واسطه حضور کبالت نسبت داد. کمیت‌های مغناطیسی مربوط به دو نمونه در جدول یک گزارش شده است.



**Fig. 6** Results of VSM analysis for (X = Fe, Co)  $\text{X}_2\text{MnSi}$  samples. The central region is shown at higher magnification in the corner of the image.

**شکل ۶** نتایج بررسی VSM نمونه‌های  $\text{X}_2\text{MnSi}$  (X= Fe, Co) بخش مرکزی در یک بزرگمایی بالاتر در گوشه تصویر نشان داده شده است.

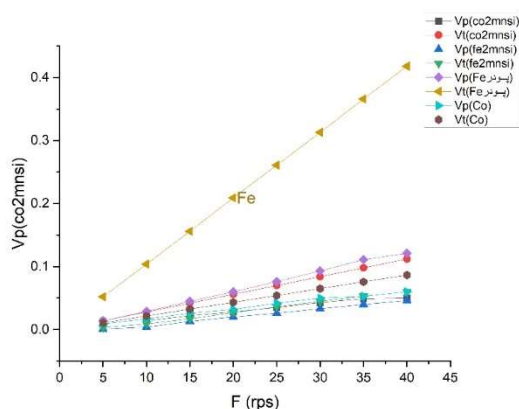
برای آزمون میزان ولتاژ خروجی توربین ژنراتور به یک مولتی متر اتصال داده شد و در جریان آب لوله کشی آزمایشگاه قرار گرفت. با توجه به اینکه ولتاژ خروجی از ژنراتور به سرعت آب ورودی توربین بستگی دارد و برای اینکه مقایسه‌ی ولتاژ خروجی توربین ژنراتور ساده با توربین ژنراتور با هسته در شرایط آزمایشگاهی انجام پذیرد، مبنای مقایسه داده‌های از پیش مشخص شده دستگاه قرار نگرفت. بلکه قبل از جایگذاری هسته یکبار این آزمون با جریان آب لوله کشی محیط آزمایشگاه انجام شد. هماهنگ با داده‌های درج شده، ولتاژ خروجی این دستگاه ۱۲ ولت با سرعت آب ۲۵ لیتر بر دقیقه است. اما بر اساس نتیجه‌ی نشان داده شده بر روی مولتی متر این عدد در محیط آزمایشگاه ۱۰-۱۱ ولت دیده شد و این عدد پس از جایگذاری هسته و اندازه گیری به ۱۱/۸ رسید. در نتیجه با اضافه کردن هسته‌ی  $Fe_2MnSi$  به ژنراتور، ولتاژ به میزان ۰/۰۷ درصد افزایش داشت. که البته به دلیل حضور هسته‌ی اصلی ژنراتور، درصد افزایش ولتاژ بدست آمده از نمونه‌ی  $Fe_2MnSi$  خالص نبود اما می‌توان افزایش ولتاژ را از همین آزمون نیز نتیجه گرفت. هرچند که از نگاه اقتصادی همانطور که پیش تر گفته شد، بهتر است از هسته‌ی براده‌ی آهن استفاده شود. برای هر یک از مواد مغناطیسی آزمایش شده نمودار بسامد- ولتاژ با توجه به داده‌های آزمون بررسی هسته رسم و با یکدیگر مقایسه شده است (شکل (۷)).

#### جدول ۱. کمیت‌های بلوری و مغناطیسی ترکیبات.

Table 1. Crystalline and Magnetic properties of compounds.

| Parameters               | $Co_2MnSi$ | $Fe_2MnSi$ |
|--------------------------|------------|------------|
| Saturation Magnetization | 113        | 6          |
| Coercivity               | 86         | 15         |
| Remanence                | 4.70       | 0.06       |
| Crystal Structure        | FCC        | FCC        |
| Lattice Parameters       | 5.662      | 5.752      |
| Cristallite Size         | 7nm        | 3nm        |





**Fig. 7** Comparison of experimental and calculated voltages for magnetic cores at different field frequencies.

**شکل ۷** مقایس ولتاژهای عملی و محاسباتی هسته‌های مغناطیسی در مقابل بسامدهای مختلف میدان. مطابق با مشاهدات دریافت شده از شکل (۷)، تاثیر بسامد بر روی ولتاژ خروجی به دلیل کوچک بودن  $\lambda$  از قطر حلقه سیم‌پیچ قابل ملاحظه است [۹].

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش قیمت انرژی و نیاز به بهینه‌سازی مصرف آن، استفاده از سامانه‌های میکرو سی‌اچ‌پی به عنوان یک راهکار مؤثر مورد توجه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن هسته‌ی  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  به ژنراتور، ولتاژ خروجی به میزان ۰/۰۷ درصد افزایش می‌یابد. هرچند به دلیل وجود هسته‌ی اصلی ژنراتور، این مقدار نمی‌تواند به صورت کامل بیانگر تأثیر خالص نمونه‌ی  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  باشد، اما اختلاف ولتاژ بین دو حالت بدون هسته و با هسته‌ی  $\text{Fe}_2\text{MnSi}$  تأثیر مثبت آن را تأیید می‌کند.

آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از این هسته، افزون بر بهبود عملکرد ژنراتور، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در افزایش بازده کلی سامانه میکرو سی‌اچ‌پی داشته باشد. از سوی دیگر، ارزیابی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری، در مقایسه با منابع انرژی سنتی، می‌تواند مقرون به صرفه باشد. با این حال، از منظر اقتصادی، گزینه‌ی بهینه‌تر برای این کاربرد، استفاده از هسته‌ی براده‌ی آهن است. این جایگزین نه تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد، بلکه امکان بهره‌گیری از مواد بازیافتی را نیز فراهم می‌کند، که به بهبود بهره‌وری اقتصادی و کاهش هزینه‌های نهایی منجر می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های میکرو

سی‌اچ‌پی می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش بازده سامانه‌های تولید پراکنده ایفا کند. در آینده، بررسی مواد جایگزین دیگر و بهینه‌سازی ساختار هسته‌ی ژنراتور می‌تواند به افزایش بازدهی این سامانه‌ها کمک کند و راه را برای استفاده‌ی گسترده‌تر از آن‌ها هموار سازد. با توجه به یکسری داده‌های بدست آمده از طرح‌های توجیهی ساخت یک واحد میکرو سی‌اچ‌پی می‌توان اشاره کرد که چنانچه نوع سوخت را گاز طبیعی، ظرفیت تولید برق را ۲۰ کیلو وات ساعت، ظرفیت کلی (برق + حرارت) را ۵۰ کیلو وات، مدت زمان راه اندازی سه ماه و هزینه راه اندازی ۱۰۰۰۰ دلار در نظر می‌گیریم. چنانچه کاربرد را برای منازل مسکونی و در کشور ایران در نظر داشته باشیم، با در نظر داشتن یکسری فرضیات (به عنوان مثال: قیمت برق شبکه در ایران برای مشترکین داخلی ۸۰۰ تومان به ازای هر کیلووات ساعت، قیمت گاز طبیعی حدود ۵۰ تومان به ازای هر متر مکعب، میزان مصرف گاز برای تولید ۲۰ کیلو وات برق، حدود ۷ متر مکعب گاز در ساعت، مدت کارکرد روزانه: ۱۰ ساعت) سود خالص روزانه حدوداً ۱۵۰ هزار تومان و مدت بازگشت سرمایه حدود ۳/۵ ماه محاسبه می‌شود. بنابراین، با توجه به هزینه اولیه و درآمد بدست آمده از فروش برق تولیدی، این سامانه می‌تواند هزینه خود را در حدود ۳/۵ ماه جبران کند. این بازه نشان می‌دهد که میکرو سی‌اچ‌پی یک گزینه اقتصادی مناسب برای تأمین انرژی در منازل مسکونی، به‌ویژه با افزایش قیمت برق شبکه‌ای است. چنانچه بازدهی حرارتی را در نظر بگیریم (مثلاً کاهش هزینه‌های گرمایش خانه با استفاده از گرمای تولیدی)، زمان بازگشت سرمایه بی‌گمان کمتر هم خواهد شد.

## منابع

- [1] Buschow, K.H.J. and Boer, F.R., "Physics of magnetism and magnetic materials", 1934. (Translated from English to Persian by Mohsen Hakimi and Mozhgan Shahidani) Yazd: Yazd university, 1395. [In Persian]
- [2] Asadian, A., Hakimi, M., "Comparison of the effect of production processes on the magnetic, crystalline and microstructural properties of Heusler  $MN_2CoGe$  alloy", *7th National Conference on Superconductivity and Magnetism*, 131-133, 2022. [In Persian]
- [3] Arami, F., Khalf. Khan., A, Hakimi, M., "Unusual weakening of the magnetic property by replacing iron instead of cobalt in the composition of  $Co_2MnSi$ ", *The first national conference of materials engineering and interdisciplinary sciences*, Tehran, 2022. <http://civilica.com/doc/1593835>. [In Persian]
- [4] Akita, H., Nakahara, Y., Miyake, N., & Oikawa, T., "A new core", *IEEE Industry Applications Magazine*, 11(6), 38-43, 2005. <http://doi.org/10.1109/MIA.2005.1524735>.
- [5] Tavares, S., Yang, K., & Meyers, M. A., "Heusler alloys: Past, properties, new alloys, and prospects", *Progress in Materials Science*, 132, 101017, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101017>



- [6] Petryshynets, I., Kováč, F., Petrov, B., Falat, L., & Puchý, V., "Improving the magnetic properties of non-oriented electrical steels by secondary recrystallization using dynamic heating conditions", *Materials*, 12(12), 1914, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12121914>.
- [7] Ismagilov, F. R., Papini, L., Vavilov, V. E., & Gusakov, D. V., "Design and performance of a high-speed permanent magnet generator with amorphous alloy magnetic core for aerospace applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 1750-1758, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2905806>.
- [8] Molla, S., Farrok, O., Islam, M. R., & Muttaqi, K. M., "Analysis and design of a high-performance linear generator with high grade magnetic cores and high temperature superconducting coils for oceanic wave energy conversion", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-5, 2019. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2895529>.
- [9] Alkasir, A., Abdollahi, S. E., & Abdollahi, S., "An Analytical Calculation of Self-and Mutual Inductances of Rectangular Flat Polarized Coils with Displacement in the Vertical Direction", *Applied Electromagnetics*, 10(1), 1-13, 2022.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).