



## Experimental Study of the Magnetic Field on the Thermal Performance of the Parabolic Solar Collector System

Sara Vaghf<sup>1</sup>, Shahaboddin Kharazmi \*<sup>2</sup> , Mohammad Sadegh Valipour<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Faculty of Science and New Technologies, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>2</sup> Department of Automotive, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>3</sup> Department of Thermal Engineering, Fluid Mechanics, and Energy Conversion, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

**ABSTRACT:** In the present study, to enhance the heat transfer of a linear parabolic solar collector, iron nanoparticles were added to the base fluid (distilled water) once without a magnet on the absorber tube and again with a magnet on the absorber tube. For this experiment, the working fluid of water and magnetic fluid at 4 volume percent of 2, 2.5, 3, and 3.5% for a simple absorber tube and an absorber tube with a permanent neodymium magnet in turbulent flow, and based on the Asher 93 standard, were experimentally performed. The thermal efficiency for the working fluid of water and magnetic fluid at four volume percent of 2, 2.5, 3, and 3.5%, with average Reynolds numbers of 5643, 12987, 13918, and 14845, for the simple tube, respectively, was measured and calculated experimentally. Also, at the average Reynolds numbers of 5643, 12987, 13918, and 14845 for the tube with a permanent magnet, the thermal efficiency for the working fluid water and magnetic fluid at four volume percentages of 2, 2.5, 3, and 3.5 percent, respectively, was experimentally measured and calculated to be 94.52, 69.57, 79.62, 68.01, and 73.02. As observed, the thermal efficiency increased significantly with increasing the volume percentage of magnetic fluid. Also, by creating a magnetic field, heat absorption increased, and the thermal efficiency of the linear parabolic solar collector system increased.

### Review History:

Received:

Revised:

Accepted:

Available Online:

### Keywords:

Experimental Investigation

Linear Parabolic Collector System

Thermal Performance

Ferro fluid

Magnetic Field

### 1- Introduction

Simulation-based optimization was used to optimize the solar system design to maximize solar energy benefits and relate energy performance to investment and operating costs. The optimized design reduced non-renewable energy demand by 48% and increased renewable energy consumption by 83% [1,2]. Zhang et al. [3] used magnetic nanofluids (iron-water) in a solar collector for direct absorption of sunlight. The nanofluids have a nanoparticle concentration of 0.01 to 0.4 wt% and a flow rate of 50 to 100 l/h. According to the experimental results, the optimal concentration of nanoparticles of 0.20 wt% compared to distilled water was reported to achieve a better heat transfer performance of 226%, exergy efficiency of 4%, and thermal efficiency of 40.2%, respectively, in the presence of a magnetic field. The combination of magnetic fluid with magnetic fields is promising for efficient and optimal use of solar energy.

An experimental study using magnetic fluid and a permanent magnet to improve the heat transfer of parabolic solar collectors has not been conducted in Iran and Semnan. Therefore, considering the research gaps, in this paper, magnetic fluid and magnetic field were used to improve the thermal performance of parabolic solar collectors.

### 2- Thermal performance of the parabolic trough solar collector

$$\text{Thermal Efficiency of the Collector [4]} \quad \eta = \frac{m c_p (T_o - T_i)}{A_s D_s} \quad (1)$$

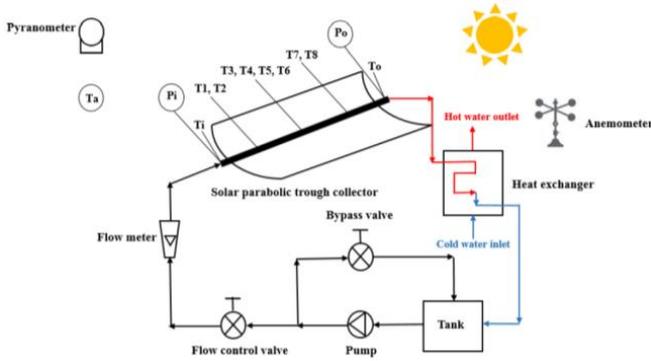
$$\text{Hartmann Number (effect of magnetic field on fluid flow) [5, 6]} \quad Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_p}} \quad (2)$$

### 3- Materials and methods

In this research, the experiments were conducted based on the ASHRAE 93 standard. Hence, the solar noon time also changes. The experiments were conducted on clear and sunny days, due to the conditions of the ASHRAE standard. The wind speed was less than 4 meters per second, and the heat flux was above 800 watts per square meter during the experiment. The experiments were conducted in Semnan city, in the Energy and Porous Environment Laboratory of Semnan University. The location was latitude 35 ° 14' 3.00" North, and longitude 53° 55' 8.99" East. The mirror axis of

\*Corresponding author's email: kharazmi@semnan.ac.ir





**Fig. 1. Test equipment layout: Components of the parabolic solar collector system [7].**

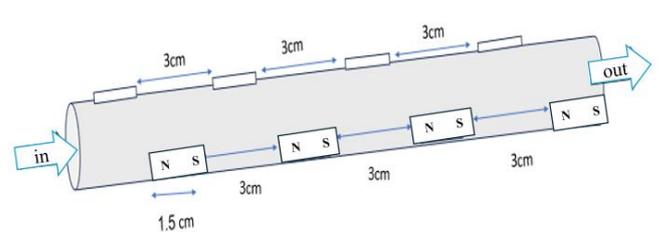
**Table 1. Dimensions of the steel reflector and dimensions of the copper and glass absorber tube [7].**

Specifications	Dimension
Parabolic length	2m
Parabolic aperture	1m
Focal length	0.25m
Aperture area	1.83m <sup>2</sup>
Edge angle	90°
Inner diameter of copper tube	25mm
Outer diameter of copper tube	28mm
Inner diameter of glass tube	40mm
Outer diameter of glass tube	44mm
Length of absorber tube	1.83m

the parabolic collector follows the solar radiation in the north-south direction and is oriented in the east-west direction, because in this direction the thermal efficiency of the linear parabolic solar collector is higher. To experiment, first, the source was completely filled with working fluid (water or magnetic fluid), and the parabolic reflector was placed in the direction of solar radiation, and the fluid pump was rotated in a closed cycle. 20 minutes were allowed to reach equilibrium, then the data of ambient temperature, solar flux, and wind speed were recorded every 5 minutes. To calculate the pressure drop, a gradient mercury barometer (also known as a manometer or barometer) was used to measure the pressure of the liquid fluid. The surface temperature of the absorber tube was recorded once every minute by the RTD (PT100) temperature sensor.

Figure 1 shows the equipment layout of the parabolic collector. Table 1 shows the dimensions of the collector. Figure 2 shows the magnet placement.

The ferrofluid powder used in this experiment was



**Fig. 2. Neodymium magnet and how the magnets are placed on the absorber tube.**

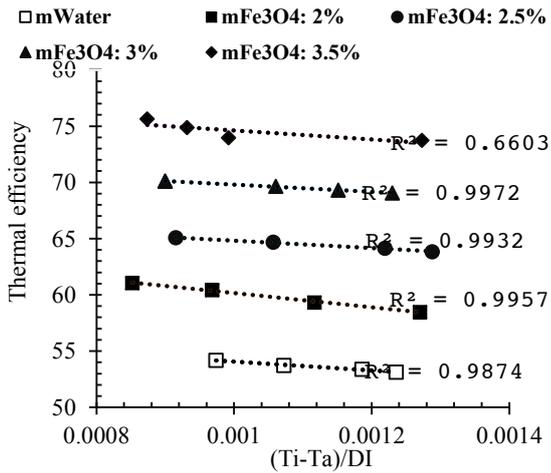
obtained from the US Nanomaterials Research Company with a particle size of 20-30 nm, a purity of +98%, and 2% surfactant. To prepare the required ferrofluid at the Semnan University Science and Technology Park, first, the base fluid is placed on a magnetic stirrer, and then a certain amount of nanoparticles, ferrofluid according to the volumetric percentage of the required fluid, along with 10% surfactant (gum Arabic), Magnetic fluid was added for stability and no sedimentation is added, mixed in distilled water, and placed in a magnetic stirrer.

By placing 80 permanent magnets with a length of 1.5, a width of 0.7 and a diameter of 0.2 cm, 40 permanent magnets were installed at the top of the absorber tube at a distance of 3 cm starting from the beginning of the absorber tube, and in the south to north direction, with poles S to N at the top of the absorber tube of the parabolic trough solar collector in the direction of the working fluid flow due to increased turbulence and conduction heat transfer to improve the thermal efficiency of the parabolic solar collector.

#### 4- Results and discussion

The magnetic field can lead to a reduction in the thermal boundary layer. In this region of the boundary layer, heat transfer is severely reduced. The use of magnetic fluid and a magnetic field caused the movement of iron nanoparticles ( $Fe_3O_4$ ), and, on the other hand, placing iron nanoparticles near the surface of the absorber tube led to a reduction in the thickness of the boundary layer. Iron nanoparticles in the magnetic fluid were more turbulent due to the presence of the neodymium magnet and magnetic field. Turbulence caused a more uniform distribution of nanoparticles in the base fluid, and increased mixing led to improved heat transfer. Therefore, this trend led to an increase in the thermal efficiency of the collector. The thermal properties of magnetic nanoparticles are usually better than water. Increasing the volume percentage and concentration of magnetic fluid (volume percentages of 2%, 2.5%, 3% and 3.5%) led to an increase in the effective thermal conductivity in the working fluid. The improvement in thermal conductivity increased the transfer of thermal energy to the working fluid and increased thermal efficiency.

Figure 3 Shows the thermal efficiency changes of the magnetized tube collectors.



**Fig. 3. Performance Curve of parabolic collector for magnetized tube with working fluid water and ferrofluid at four volumetric percentages of 3.5% at Reynolds numbers of (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845.**

### 5- Conclusion

- The average Nusselt number of the tube with a magnet for the ferrofluid at four volumetric percents of 2%, 2.5%, 3%, and 3.5% and water was: 1.51, 1.61, 1.72, 1.76, and 1.42, respectively, compared to the plain tube.
- The average friction coefficient of the magnetized tube for ferrofluid at four volumetric percentages of 2%, 2.5%, 3% and 3.5% and water was: 1.49, 1.62, 1.73, 1.78, and 1.40, respectively, compared to the plain tube.
- The average thermal performance coefficient of the magnetized tube for ferrofluid at four volumetric percentages of 2%, 2.5%, 3%, and 3.5% and water was:

1.57, 1.72, 1.83, 2.07, and 1.38, respectively, compared to the plain tube.

### References

- [1] A. Awasthi, A.K. Shukla, M.M. SR, C. Dondariya, K. Shukla, D. Porwal, G. Richhariya, Review on sun tracking technology in solar PV system, Energy Reports, 6 (2020) 392-405.
- [2] M. Bilardo, M. Ferrara, E. Fabrizio, Performance assessment and optimization of a solar cooling system to satisfy renewable energy ratio (RER) requirements in multi-family buildings, Renewable Energy, 155 (2020) 990-1008.
- [3] D. Zheng, J. Yao, H. Zhu, J. Wang, C. Yin, Optimizing photothermal conversion efficiency in a parabolic trough direct absorption solar collector through ferrofluid and magnetic field synergy, Energy Conversion and Management, 285 (2023) 117020.
- [4] A.V. Arasu, T. Sornakumar, Design, manufacture and testing of fiberglass reinforced parabola trough for parabolic trough solar collectors, Solar Energy, 81(10) (2007) 1273-1279.
- [5] R. Akhmedagaev, O. Zikanov, Y. Listratov, Magnetoconvection in a horizontal duct flow at very high Hartmann and Grashof numbers, Journal of Fluid Mechanics, 931 (2022) A29.
- [6] H. Sajjadi, A. Amiri Delouei, M. Atashafrooz, Effect of magnetic field on particle deposition in a modeled room, Particulate Science and Technology, 41(3) (2023) 361-370.
- [7] S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, The thermo-hydraulic performance of a parabolic trough collector with helically corrugated tube, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 44 (2021) 101013.



## بررسی، تحلیل و ارزیابی تجربی میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی سیستم گردآورنده‌ی خورشیدی سهموی خطی

سارا وقف<sup>۱\*</sup>، شهاب الدین خوارزمی<sup>۲\*</sup>، محمدصادق ولی‌پور<sup>۳</sup>

۱ پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
۲ گروه خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
۳ گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱  
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۱۸

### کلمات کلیدی:

بررسی تجربی  
گردآورنده‌ی سهموی خطی  
عملکرد حرارتی  
سیال مغناطیسی  
میدان مغناطیسی

**خلاصه:** در پژوهش حاضر، برای بهبود انتقال حرارت گردآورنده‌ی سهموی خطی خورشیدی، یک بار از نانو ذرات آهن در سیال پایه (آب مقطر) بدون آهنربا روی لوله جاذب و بار دیگر به همراه آهنربا روی لوله جاذب استفاده شد. برای این آزمایش، از سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در ۴ درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد برای لوله جاذب ساده و لوله جاذب با آهنربای دائمی نئودیمیم در جریان آشفته و بر اساس استاندارد اشری ۹۳، به صورت تجربی انجام شد. راندمان حرارتی برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد، با میانگین رینولدزهای ۵۶۴۳، ۱۲۹۸۷، ۱۳۹۱۸ و ۱۴۸۴۵، برای لوله‌ی ساده به ترتیب، ۵۰/۶، ۵۵/۵، ۶۰/۵۵، ۶۵/۲۹ و ۷۰/۷۳ به صورت تجربی اندازه‌گیری و محاسبه شد. همچنین در میانگین رینولدزهای ۵۶۴۳، ۱۲۹۸۷، ۱۳۹۱۸ و ۱۴۸۴۵ برای لوله با آهنربای دائمی راندمان حرارتی برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد، به ترتیب، ۵۲/۹۴، ۵۷/۶۹، ۶۲/۷۹ و ۶۸/۰۱ به صورت تجربی اندازه‌گیری و محاسبه شد. همانگونه که مشاهده شد با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی به طور قابل ملاحظه راندمان حرارتی افزایش یافت. همچنین با ایجاد میدان مغناطیسی جذب حرارت افزایش یافت و راندمان حرارتی سیستم گردآورنده‌ی سهموی خطی خورشیدی افزایش یافت.

### ۱- مقدمه

تولید انرژی در دمای بسیار بالا (بر حسب درجه سانتی‌گراد) می‌شود. تنها سهم کمی از این انرژی به دلیل جذب و انتشار در جو به زمین می‌رسد. بنابراین، پژوهشگران و مهندسان با طراحی و ساخت سیستم‌های خورشیدی، این نوع انرژی را به انرژی‌های مفید دیگری تبدیل می‌کنند [۵-۷]. زو و همکاران [۸] بر این باورند که، پارامترهای دمای ورودی، دمای محیط، دبی حجمی آب، تابش مستقیم خورشیدی و سرعت باد می‌توانند بر عملکرد گردآورنده‌ی خورشیدی سهموی تأثیر بگذارند. بررسی تأثیر این پارامترها بر افت فشار، انتقال حرارت و راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی ضروری است. علاوه بر این، اتلاف انرژی در گردآورنده‌ی خورشیدی سهموی شامل اتلاف نوری و اتلاف حرارتی است. اتلاف نوری عمدتاً توسط مواد آینه و پوشش شیشه‌ای ایجاد می‌شود. اختلاف دما بین لوله جاذب و محیط باعث اتلاف حرارتی می‌شود. کومار و همکاران [۹] معتقدند که، سیال مغناطیسی به عنوان سیال قادر است خواص استحکام برشی خود را به طور دینامیک و در پاسخ به تغییرات میدان مغناطیسی اعمال شده، تنظیم کند. سیالات

استفاده از سوخت‌های فسیلی منجر به تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی شده است. لذا منابع انرژی تجدیدپذیر، جایگزین انرژی تجدیدناپذیر شدند. انرژی تجدیدپذیر سازگار با محیط زیست هستند [۱، ۲]. انرژی خورشیدی یک منبع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که، بدون هزینه، فراوان، وسیع و سبز است [۳]. بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی طراحی سیستم خورشیدی، برای به حداکثر رساندن مزایای انرژی خورشیدی و مرتبط کردن عملکرد انرژی با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی استفاده شد. طراحی بهینه، تقاضای انرژی تجدیدناپذیر را تا ۴۸ درصد کاهش داده است، و مصرف انرژی تجدیدپذیر را تا ۸۳ درصد افزایش داده است [۴]. انرژی خورشیدی یک انرژی جایگزین و تجدیدپذیر است که توسط خورشید تامین می‌شود. واکنش‌های شیمیایی که در داخل خورشید رخ می‌دهد منجر به

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kharazmi@semnan.ac.ir



محاسباتی شبیه‌سازی کردند. با توجه به اینکه شار حرارتی در اطراف لوله جاذب به صورت غیریکنواخت می‌باشد، لذا آنها از یک میدان مغناطیسی دوقطبی خطی چندگانه استفاده کردند. میدان مغناطیسی باعث بیشترین، مقدار کاهش اتلاف دیواره لوله جاذب به اندازه ۳/۲٪ شد. اگر چگالی شار مغناطیسی برابر با ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گاوس باشد، مقدار معیار ارزیابی عملکرد به ترتیب برابر با ۱/۳۹، ۱/۴۳ و ۱/۴۷ شد. حلمی و همکاران [۱۴]، عملکرد مواد مختلف پره متخلخل (آلومینیوم، برنز، مس و فولاد) با تخلخل‌های مختلف در یک گردآورنده خورشیدی سهموی که با استفاده از نانوسیال مغناطیسی هدایت می‌شود، بررسی کردند. نانوسیال در لوله جاذب گردش می‌کند و باعث کاهش افت فشار و افزایش انتقال حرارت می‌گردد. طبق یافته‌های آنها در حالت بهینه استفاده از پره متخلخل مسی با تخلخل ۹۷٪ در لوله جاذب با سرعت زاویه‌ای ۰/۶ رادیان بر ثانیه، افت فشار و نرخ انتقال حرارت به ترتیب ۲/۶ و ۰۳/۷ برابر افزایش می‌یابد. همچنین، عملکرد انرژی و انرژی به ترتیب از ۲۴/۲٪ به ۴۰/۵٪ و از ۷۱/۶٪ به ۸۷/۲٪ افزایش می‌یابد. طهماسی و همکاران [۱۵]، تولید آنتروپی جریان آشفته نانوسیال‌های مغناطیسی تک و هیبریدی، و اثر نوار پیچشی بر عملکرد ترموهیدرولیکی درون یک لوله جاذب گردآورنده خورشیدی سهموی مطالعه کردند. آنها از نانوسیال دو فاز آب/نانولوله‌های کربنی چند جداره-اکسید آهن با کسر حجمی ۱٪ و نانوسیال دو فاز آب/نانولوله‌های کربنی چند جداره به عنوان سیال عامل استفاده کردند. علاوه بر این، آنها اعداد رینولدز مختلف از ۶۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰ و نسبت‌های گام مختلف نوار پیچشی شامل ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵ بررسی کردند. همچنین، ضریب عملکرد ترموهیدرولیکی همیشه بزرگتر از ۱ است. طبق نتایج آنها، عملکرد حرارتی نانوسیال هیبریدی مغناطیسی و نانوسیال ساده، به ترتیب ۲۷٪، ۲۲٪ این مقدار شد. سینگ و همکاران [۱۶]، عملکرد حرارتی گردآورنده با ترکیب نانوذرات مغناطیسی و سیال عامل Therminol-66 که افزایش می‌یابد، را بررسی کردند. لوله جاذب، با ابعاد طول ۲۴ متر، قطر ۶۶ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر، در شرایط دما و سرعت یکنواخت قرار می‌گیرد. سیال عامل، روغن حرارتی (Therminol-66)، با نانوذرات مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) در غلظت‌های مختلف از ۱٪ تا ۴٪ ترکیب شد. طبق یافته‌های آنها، با افزودن نانوذرات به گردآورنده سهموی، ضریب انتقال حرارت همرفتی افزایش می‌یابد، به طوری که کسر حجمی نانوذرات بالاتر منجر به افت فشار و انتقال حرارت بیشتر می‌شود. طبق نتایج آنها، کسر حجمی نانوذرات ۴٪ و قدرت میدان مغناطیسی ۲۵۰ گاوسی، بالاترین ضریب انتقال حرارتی را نشان می‌دهد که نانوذرات مغناطیسی موجب بهبود

مغناطیسی متشکل از ذرات آهن با اندازه نانو با قابلیت مغناطیسی و یک سیال پایه غیرمغناطیسی برای مقابله با رسوب و تجمع هستند. سیالات مغناطیسی توانایی پاسخ‌دهی به محرک‌های خارجی از طریق تغییر در خواص فیزیکی خود دارند. این ویژگی‌ها امکان بهبود متعددی در فناوری‌های موجود را فراهم می‌آورد و به این ترتیب، تطبیق‌پذیری و کاربردهای آن‌ها را افزایش می‌دهد. به همین دلیل، سیالات مغناطیسی به عنوان سیال که ویسکوزیته آن‌ها تحت تأثیر میدان مغناطیسی به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند، به عنوان مواد هوشمند شناخته می‌شوند. نتایج بررسی ملکان و همکاران [۱۰] روی سیال مغناطیسی نشان می‌دهد که، کاهش اندازه ذرات و افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی، عدد ناسلت، راندمان حرارتی گردآورنده سهموی و ضریب عملکرد می‌شود. علاوه بر این، راندمان گردآورنده سهموی خطی در حضور میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. السعدی و همکاران [۱۱] بر این باورند که استفاده از نانوسیال‌های مغناطیسی در گردآورنده‌های سهموی خورشیدی با جذب مستقیم، باعث افزایش بازده حرارتی نسبت به گردآورنده‌های معمولی می‌شود. با اعمال شدت و جهت مناسب میدان مغناطیسی، هدایت حرارتی این سیالات بهبود می‌یابد و خواص نوری خوبی نیز از خود نشان می‌دهند. غلظت نانوذرات ۰/۰۵ درصد حجمی در دمای عملیاتی بین ۱۹ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بررسی و استفاده شد. نتایج نشان داد که سیال مغناطیسی به عنوان سیال انتقال حرارت، راندمان گردآورنده‌های خورشیدی را افزایش می‌دهد و در حضور میدان مغناطیسی، راندمان را به حداکثر ۲۵ درصد بیشتر از گردآورنده‌های معمولی می‌رساند. در دماهای بالاتر، این سیالات عملکرد بهتری نسبت به سیالات انتقال حرارت معمولی دارند. این مطالعه تأکید می‌کند که استفاده از نانوسیال‌ها، حتی با درصد حجمی کم، جذب خوبی از تابش خورشیدی دارند و می‌توانند دمای خروجی و کارایی سیستم‌های خورشیدی را بهبود بخشند. ژانگ و همکاران [۱۲]، در یک گردآورنده خورشیدی برای جذب مستقیم از نور خورشید از نانوسیال‌های مغناطیسی (آهن-آب) استفاده شد. نانوسیال‌ها دارای غلظت نانوذرات از ۰/۰۱ تا ۰/۴ درصد وزنی و سرعت جریان از ۵۰ تا ۱۰۰ لیتر بر ساعت می‌باشند. طبق نتایج تجربی گزارش شده غلظت بهینه نانوذرات ۰/۲۰ درصد وزنی نسبت به آب مقطر، در حضور میدان مغناطیسی عملکرد بهتری در انتقال حرارت ۲۲۶٪، راندمان انرژی ۴٪ و راندمان حرارتی ۲/۴۰٪ به ترتیب بدست آمد. ترکیب سیال مغناطیسی با میدان‌های مغناطیسی، نویدبخش استفاده کارآمد و بهینه از انرژی خورشیدی است. ژو و همکاران [۱۳]، یک گردآورنده خورشیدی با دینامیک سیالات

## ۲- عملکرد حرارتی گردآورنده‌ی سهموی خطی خورشیدی

راندمان گردآورنده شد.

همانطور که مشاهده شد، مطالعات کمی در زمینه بررسی میدان مغناطیسی در گردآورنده‌های سهموی در کشور ایران انجام شده است. از طرفی، مطالعه تجربی که از سیال مغناطیسی و آهنربای دائمی استفاده شود، برای بهبود انتقال حرارت گردآورنده سهموی خورشیدی در کشور ایران و شهر سمنان انجام نشده است. بنابراین، با توجه به خلاهای تحقیقاتی، در این مقاله از سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی جهت بهبود عملکرد حرارتی گردآورنده خورشیدی سهموی استفاده شد. آزمایش‌ها در فضای آزاد و با شرایط استاندارد اشری انجام شد. برای بهبود انتقال حرارت گردآورنده سهموی خطی خورشیدی، یک بار از سیال مغناطیسی در سیال پایه (آب مقطر) بدون آهنربا روی لوله جاذب گردآورنده سهموی و بار دیگر به همراه آهنربای دائمی نئودیمیم روی لوله جاذب گردآورنده سهموی استفاده شد. برای این آزمایش، علاوه بر سیال کاری آب از سیال مغناطیسی در ۴ درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد برای لوله جاذب ساده و لوله جاذب با آهنربای دائمی نئودیمیم در جریان آشفته و بر اساس استاندارد اشری ۹۳، به صورت تجربی در آزمایشگاه انرژی و محیط متخلخل دانشگاه سمنان واقع در شهرستان سمنان انجام شد. هدف این تحقیق، بررسی انتقال حرارت، افت فشار، بازده حرارتی و تعیین ضریب عملکرد حرارتی در سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در ۴ درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ برای لوله جاذب با آهنربا و مقایسه نتایج بدست آمده با حالتی که لوله جاذب ساده می‌باشد. از طرفی هدف این تحقیق، بررسی روشی نوین برای بهبود عملکرد حرارتی و افزایش راندمان گردآورنده سهموی می‌باشد. استفاده از میدان مغناطیسی جهت شناسایی شرایط بهینه سیستم گردآورنده سهموی بررسی می‌شود. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق به توسعه گردآورنده سهموی به کمک سیال مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) و میدان مغناطیسی به صورت قابل توجهی بهبود یابد.

نوآوری در این کار با انرژی‌های تجدیدپذیر یعنی انرژی خورشیدی، شامل سیال مغناطیسی و آهنربای خاص با چینش ویژه و استفاده از صمغ عربی به عنوان سیالی که مانع ته نشین شدن سیال مغناطیسی می‌شود، می‌باشد. در استان سمنان با این پهناوری و تابش مناسب خورشید، تنها در دانشگاه سمنان در این زمینه تحقیق می‌شود. مساحت این استان چندین برابر بسیاری از کشورها می‌باشد. ثبت تحقیقات در این زمینه با توجه به جغرافیای منحصر به فرد این استان می‌تواند راهگشای بخش تامین نیاز انرژی کشور در این منطقه با بیابان‌های وسیع در آینده نزدیک باشد.

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

معادله (۱) انرژی مفید که به آب داخل لوله جاذب جریان دارد منتقل می‌شود را نشان می‌دهد.  $Q_u$  برحسب kW،  $\dot{m}$  برحسب kg/s،  $c_p$  برحسب kJ/kg°C

فاکتور عملکردی حرارتی لوله‌ی با آهنربا نسبت به لوله‌ی ساده [۱۷]

$$\eta = \left( \frac{Nu_m}{Nu_0} \right) / \left( \frac{f_m}{f_0} \right)^{\frac{1}{3}} > 1 \quad (2)$$

بازده حرارتی گردآورنده [۱۸]

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_a D_t} \quad (3)$$

عدد هارتمن (شرح اثر میدان مغناطیسی بر روی جریان سیال) [۱۹، ۲۰]:

$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_p}} \quad (4)$$

که Ha عدد هارتمن می‌باشد که کمیت بدون بعد است و به صورت نسبت نیروی الکترومغناطیس به نیروی ویسکوزیته تعریف می‌شود. عدد هارتمن یکی از پارامترهای مهم در مطالعه و بررسی جریان‌های مغناطیسی می‌باشد که به تأثیر میدان مغناطیسی بر روی انتقال حرارت حرکت و رفتار سیالات اشاره دارد.  $B_0$  مقدار شدت میدان مغناطیسی  $\sigma$  رسانایی الکتریکی،  $\mu$  لزجت دینامیکی و L طول مشخصه می‌باشند.

## ۳- مواد و روش‌ها

در این بخش به شرح سیستم گردآورنده سهموی مورد آزمایش و روند آزمایش‌های تجربی و شرح آزمایش پرداخته خواهد شد.



شکل ۱. گردآورنده‌ی خورشیدی سهموی خطی [۲۱].

Fig. 1. Linear parabolic solar collector [21].

است. سپس، داده‌های، دمای محیط، شار خورشیدی، و سرعت باد هر ۵ دقیقه یادداشت شد. لوله جاذب، توسط بازتابنده و تحت تشعشع خورشید گرم شده و حرارت را به سیال عامل انتقال می‌دهد. برای محاسبه‌ی افت فشار، از فشارسنج جیوه‌ای شیب‌دار (مانومتر یا فشارسنج) که فشار سیال مایع را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده شد. مشخصات گردآورنده‌ی سهموی خطی و دستگاه‌های اندازه‌گیری در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، شماتیک سیستم آزمایشگاهی گردآورنده‌ی سهموی خطی خورشیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. تکرار بر اساس شرایط آب و هوایی یکسان و زاویه تابش انجام شده است. این کار با آب خالص شش بار تکرار شده است و نتایج کاملاً تکرار پذیر بوده است [۲۱، ۲۲].

### ۳-۲- آنالیز عدم قطعیت

عدم قطعیت نتایج محاسبه شده در آزمایش، می‌تواند با دقت خوبی از رابطه کلین و مکینتاک<sup>۲</sup> (۵) بدست آید [۲۳].

$$\delta R = \left\{ \left( \sum_{i=1}^N \frac{\delta R}{\delta X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

### ۳-۱- شرح آزمایش‌ها و سیستم آزمایشگاهی

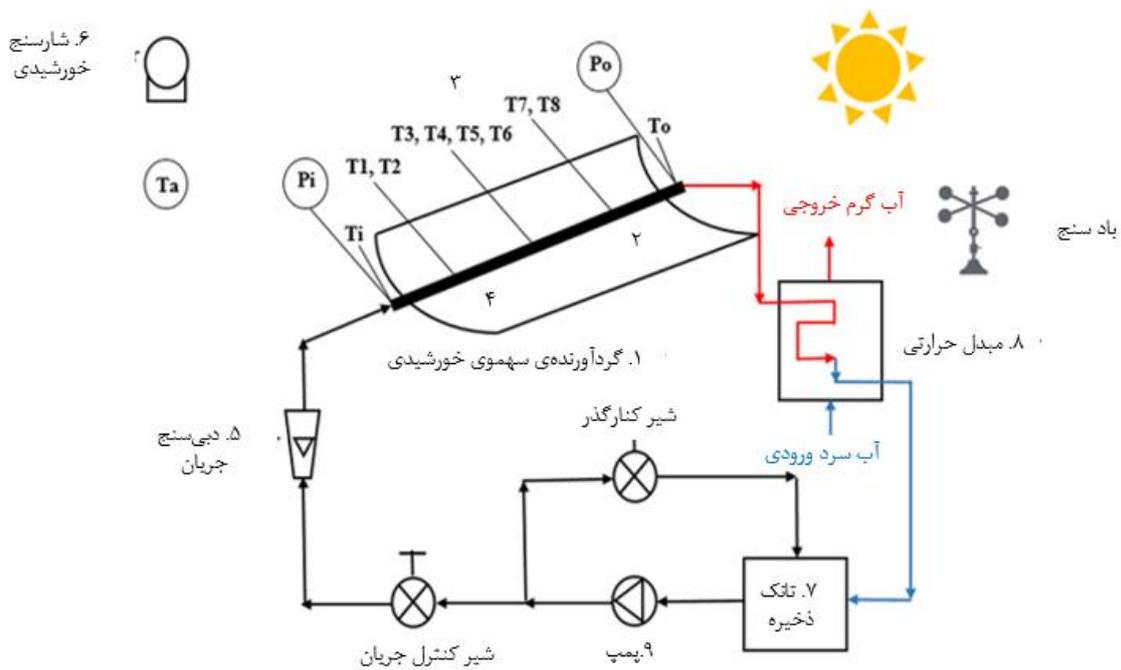
در این تحقیق، آزمایش‌های انجام شده بر اساس استاندارد اشری<sup>۱</sup> ۹۳ انجام شد. شکلی از چیدمان ابزار و دستگاه‌های آزمایش در شکل (۱) نشان داده شد. یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر این است که، آزمایش‌ها در دو بازه زمانی مختلف، تست در دو فصل تابستان و پاییز، در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و آبان ماه انجام شد. از این رو زمان ظهر خورشیدی نیز تغییر می‌کند. آزمایش‌ها در روزهای صاف و آفتابی، به دلیل برقراری شرایط استاندارد اشری انجام شد. سرعت باد کمتر از ۴ متر بر ثانیه و شار حرارتی بالای ۸۰۰ وات بر متر مربع باید در حین آزمایش برقرار باشد. آزمایش‌ها در شهر سمنان، در آزمایشگاه انرژی و محیط متخلخل دانشگاه سمنان انجام شد. با موقعیت، عرض جغرافیایی «۳۵° ۱۴' ۳۰.۰۰ شمالی، و طول جغرافیایی " ۸/۹۹' ۵۵" ۵۳° شرقی، انجام شد. محور آینه گردآورنده سهموی، تشعشع خورشید را در جهت شمال به جنوب تعقیب می‌کند و در جهت شرق به غرب قرار می‌گیرد، زیرا در این جهت راندمان حرارتی گردآورنده سهموی خطی خورشیدی بیشتر است. برای انجام آزمایش در ابتدا، منبع را کاملاً از سیال کاری (آب، یا سیال مغناطیسی) پر کرده، و بازتابنده سهموی را در جهت تشعشع خورشید قرار داده، تلمبه سیال را در سیکل بسته چرخش می‌کند. ۲۰ دقیقه جهت رسیدن به تعادل زمان لازم

جدول ۱. سیستم آزمایشگاهی و دستگاه‌های اندازه‌گیری [۲۲].

Table 1. Laboratory system and measuring devices [22].

دقت تجهیزات	واحد تجهیزات	کاربرد	نام دستگاه
$\pm 2/0.5$	W/m <sup>2</sup>	اندازه‌گیری شار حرارتی خورشید	تابش سنج
$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	اندازه‌گیری دمای سطح لوله جاذب	ترموکوپل سیمی
$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	اندازه‌گیری دمای ورودی و خروج سیال عامل	سنسور دمای RTD(PT100)
$\pm 34$	Pa	اندازه‌گیری افت فشار	مانومتر جیوه‌ای شیب‌دار
$-0.25$	kg/s	اندازه‌گیری نرخ دبی جریان	دبی‌سنج
$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	نشانگر دمای سطح	دماسنج ترموکوپل سیمی
$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	نشانگر دمای ورود و خروج سیال عامل	دماسنج RTD مدل TES-۱۳۱۷
$0.37$	L/min	تلمبه آب	تلمبه پدرولو <sup>۱</sup> مدل PK m ۶۰
$0.2 - 0.3$ m/s	m/s	اندازه‌گیری سرعت باد	سرعت بادسنج، ترموبادسنج AVM ۳۰۵

<sup>۱</sup> Pedrollo



شکل ۲. چیدمان تجهیزات آزمایش: اجزاء سیستم گردآورنده‌ی خورشیدی سهموی: ۱- آینه سهموی، ۲- لوله جاذب مسی با پوشش رنگ مخصوص، ۳- سنسور دمای سطح، ۴- لوله شیشه‌ای پیرکس، ۵- دبی‌سنج، ۶- دستگاه تشعشع سنج خورشیدی، ۷- تانک ذخیره، ۸- رادیاتور و ۹- تلمبه آب [۲۲].

Fig. 2. Layout of test equipment: Components of parabolic solar collector system: 1- Parabolic mirror, 2- Copper absorber tube with special paint coating, 3- Surface temperature sensor, 4- Pyrex glass tube, 5- Flowmeter, 6- Solar radiation meter, 7- Storage tank, 8- Radiator and 9- Water pump [22]

برای رینولدز

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[ \left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_H}{D_H} \right)^2 + \left( \frac{-\delta \nu}{\nu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن معادلات بالا، مقدار عدم اطمینان نسبی عدد رینولدز محاسبه شده برابر با ۲ درصد می‌باشد. برای ضریب اصطکاک:

$$\frac{\delta f}{f} = \left[ \left( \frac{\delta P}{P} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_H}{D_H} \right)^2 + \left( \frac{\delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{2\delta V}{V} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

مقدار عدم اطمینان نسبی ضریب اصطکاک محاسبه شده برابر ۴/۱۷٪ می‌باشد. برای بازده حرارتی گردآورنده:

$$\frac{\delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \left[ \left( \frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{\delta (T_o - T_i)}{(T_o - T_i)} \right)^2 + \left( \frac{-\delta D_I}{D_I} \right)^2 + \left( \frac{-\delta A}{A} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

مقدار محاسبه شده عدم اطمینان بازدهی گردآورنده برابر با ۱/۱٪ می‌باشد. و برای عدد ناسلت:

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[ \left( \frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_H}{D_H} \right)^2 + \left( \frac{\delta k}{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

. پس از جایگذاری و محاسبه، عدم اطمینان ناسلت ۲/۹۵٪ است [۲۳].

### ۳-۳- سیال مغناطیسی

مقدار قابل توجهی انرژی در گردآورنده‌ی خورشیدی سهموی به دلیل توانایی ضعیف سیال کاری در جذب کامل تابش متمرکز خورشید در سراسر لوله جاذب از دست می‌رود. در اینجا یک روش ترکیبی جدید برای پوشاندن چنین کمبودی با استفاده همزمان از یک لوله جاذب دوار و القاکننده میدان مغناطیسی با نانوسیال توصیه می‌شود. نتایج نشان داد که اثرات ترکیبی

چرخش گیرنده و میدان مغناطیسی مکانیسم همرفت را در جاذب بهبود می‌بخشد و عملکرد انرژی و انرژی‌گردآورنده‌ی سهموی را افزایش می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که سرعت چرخشی بهینه در هر شدت میدان مغناطیسی برای پارامترهای مختلف هیدروترمال و ترمودینامیکی وجود دارد. یعنی در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی و استفاده از لوله چرخشی، در هنگام استفاده از میدان مغناطیسی ۱۰۰۰ گاوس و یک لوله دوار با سرعت ۰/۴ رادیان بر ثانیه، در کل اتلاف حرارت، در گردآورنده‌ی سهموی تا ۳۷/۴ درصد صرفه جویی می‌شود. به طور همزمان در این مقایسه، حداکثر بهبود در معیارهای ارزیابی عملکرد ۱۰۱٪ و بازده انرژی سیستم ۲۴٪ با استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی به دست می‌آید. نتایج همچنین نشان داد که در هر شدت میدان مغناطیسی یک سرعت چرخشی بهینه وجود دارد که در آن استفاده از یک میدان مغناطیسی در این سرعت چرخشی باعث افزایش افت فشار به منظور بهبود بازده انرژی و انرژی‌گردآورنده‌ی سهموی خورشیدی می‌شود [۲۴]. کالیبراسیون حسگرها قبل از شروع آزمون‌ها صورت گرفته است.

### ۳-۴- روش تهیه سیال مغناطیسی

نانوسیال هیبریدی با پراکندگی نانوذرات سیال مغناطیسی در آب تهیه شد. روش دو مرحله‌ای که کارآمدترین و مؤثرترین تکنیک برای تولید نانوسیال است، استفاده شد. محلول به مدت ۱:۱۵ ساعت و به دنبال آن ۲:۳۰ ساعت بصورت فراصوت بدون پروانه هم زده شد. به مدت ۳۰ روز هیچ گونه رسوب گذاری ذرات مشاهده نشد. نانوسیال با مخلوط کردن نانوذرات در نسبت ۱:۱ با آب به عنوان سیال پایه با ماده‌ی فعال سطحی<sup>۲</sup> صمغ عربی تهیه شد. نانوسیال در چهار درصد حجمی ۰/۱٪، ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۲٪ تهیه شد. جدول ۲ خواص فیزیکی نانو ذرات سیال مغناطیسی را نشان می‌دهد. از پراش اشعه ایکس<sup>۳</sup> برای بررسی خواص فیزیکی نانوذرات سیال مغناطیسی استفاده شد [۲۵].

### ۳-۵- آماده‌سازی سیال مغناطیسی

پودر سیال مغناطیسی استفاده شده در این آزمایش با اندازه‌ی ذره ۲۰ تا ۳۰ نانومتر و خلوص ۹۸٪+ و ۲ درصد ماده‌ی فعال سطحی، از شرکت نانومواد تحقیقاتی ایالات متحده، با نمایندگی شرکت «پیشگامان نانو مواد

1. Exergy
2. Surfactant
3. XRD

جدول ۲. خواص نانو ذره سیال مغناطیسی

Table 2. Properties of magnetic fluid nanoparticles.

۴۰-۶۰ m <sup>2</sup> /g	سطح خاص	۹۸٪	خلوص
کروی	ریخت شناسی <sup>۲</sup>	قهوه‌ای سوخته	رنگ
۵/۱ g/cm <sup>3</sup>	چگالی واقعی	۲۰-۳۰ nm	اندازه ذره
۰/۸۴g/cm <sup>3</sup>	چگالی ظاهری (حجم یک جسم که دارای حفره یا سوراخ در داخل خود است)		

<sup>2</sup> Morphology

مفید باشد. نانوذرات آهن از «شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان» که مرجع تامین و فروش نانو اکسید آهن مغناطیسی می‌باشد تهیه شده است. آهنربای نئودیمیم<sup>۲</sup> پرکاربردترین نوع آهنربا<sup>۲</sup> از عناصر کمیاب خاکی شامل آهن و بور ساخته شده و ساختار کریستالی چهار ضلعی را تشکیل می‌دهد. این آهنرباهای در سال ۱۹۸۴ توسط دو شرکت مطرحی بنام جنرال موتورز و سومیتومو فلزات ساخته شده که قوی‌ترین آهنربای دائمی صنعتی است. به دلیل فرآیندهای مختلف تولید، آنها به دو زیر شاخه آهنرباهای نئودیمیم متخلخل و آهنرباهای پیوندی نئودیمیم تقسیم می‌شوند که در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

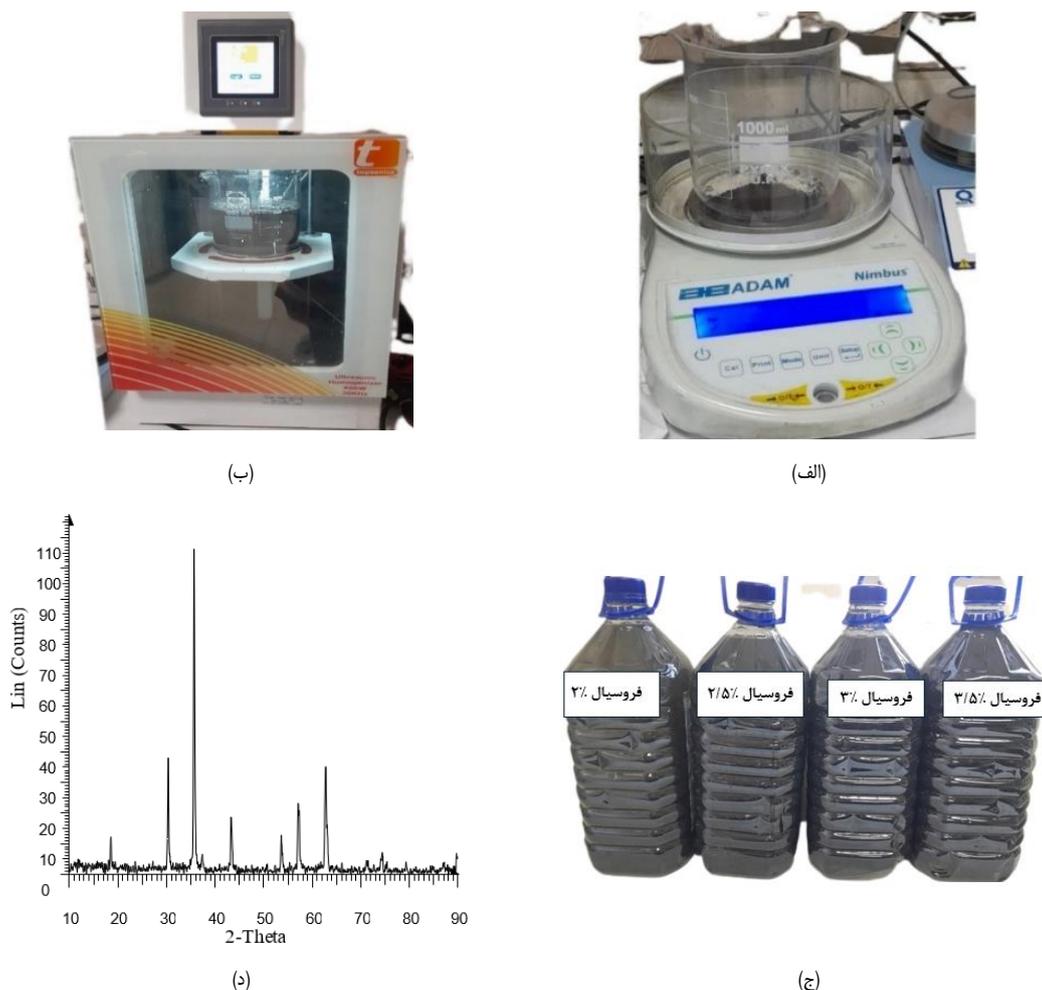
با قرار دادن ۸۰ عدد آهنربا دائمی با طول ۱/۵، عرض ۰/۷ و قطر ۰/۲ سانتی‌متر، ۴۰ عدد آهنربای دائمی در بالای لوله‌ی جاذب با فاصله‌ی ۳ سانتی‌متر که از ابتدای لوله‌ی جاذب شروع، و به ترتیب در جهت شمال به جنوب، با قطب‌های N به S در بالای لوله‌ی جاذب گردآورنده‌ی سهموی در جهت جریان سیال کاری به دلیل افزایش آشفستگی و انتقال حرارت هدایت برای بهبود راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی خورشیدی نصب شد. به همین ترتیب، ۴۰ عدد آهنرباها از قطب N به S در پایین در فاصله وسط از آهنربای بالا از دوطرف به فاصله‌ی ۷۵ میلی‌متر نصب شد. به دلیل تبدیل انرژی خورشید به انرژی حرارتی، از آهنربای نئودیمیم استفاده شد. از طرفی آهنرباهای نئودیمیم منجر به افزایش دریافت انرژی حرارتی خورشید و انتقال حرارت هدایت به سیال کاری شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. هدف از این کار، بالا بردن دمای سیال کاری، آب و سیال مغناطیسی، و افزایش بهبود راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی خورشیدی می‌باشد. ۸۰ عدد

ایرانیان» مرجع تامین و فروش نانو اکسید آهن مغناطیسی در کشور ایران می‌باشد، تهیه شده است. برای آماده سازی سیال مغناطیسی مورد نیاز در پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان، ابتدا سیال پایه بروی همزن مغناطیسی قرار داده و سپس مقدار معینی از نانوذره، سیال مغناطیسی مطابق درصد حجمی سیال مورد نیاز، به همراه ۱۰٪ درصد ماده‌ی فعال سطحی (صمغ عربی) جهت پایداری و عدم رسوب سیال مغناطیسی اضافه شد و در آب مقطر ترکیب نموده و در همزن مغناطیسی قرار می‌گیرد. هدف از این کار، جلوگیری از کلوخه شدن نانوذره به سبب دریافت رطوبت سیال پایه است. برای بهتر پخش شدن و جلوگیری از چسبندگی نانوذره به یکدیگر، سرعت همزن مغناطیسی نباید بسیار زیاد یا کم باشد که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۳ (ب) نشان داده شده، پس از گذشت ۲۰ دقیقه از همزدن محلول، آن را به دستگاه آتراسونیک منتقل کرده و محلول تحت ارتعاش توسط سونیک ویبرا-سل<sup>۱</sup> با امواج ۱۵ کیلوهرتز و قدرت ۴۰۰ وات به مدت ۱ ساعت قرار گرفت مشاهده می‌شود. بعد از گذشت زمان مورد نظر، نانوذرات سیال مغناطیسی به صورت معلق و پایدار به طوری که با چشم قابل رویت نیست. در شکل ۳ (ج) سیال مغناطیسی در چهار در صد حجمی ۲٪، ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ آماده انجام آزمایش تجربی نشان داده شد. در شکل ۳ (د) تحلیل نمودار XRD نانوذرات سیال مغناطیسی Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> اطلاعات با ارزش درباره خلوص، ساختار بلوری، کیفیت مواد و اندازه دانه ارائه را می‌دهد. این اطلاعات بدست آمده می‌تواند در بهینه‌سازی و بهبود عملکرد نانوذرات آهنی در کاربردهای مختلف، از جمله سیستم گردآورنده‌ی سهموی و مغناطیسی،

2. NIB or Neo magnet  
3. Magnet

1. Sonic Vibra-cell



شکل ۳. الف) ترکیب سیال مغناطیسی با صمغ عربی به همراه آب مقطر، ب) قرار دادن سیال مغناطیسی در دستگاه آلتراسونیک، ج) سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی، ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ و د) نمودار XRD سیال مغناطیسی.

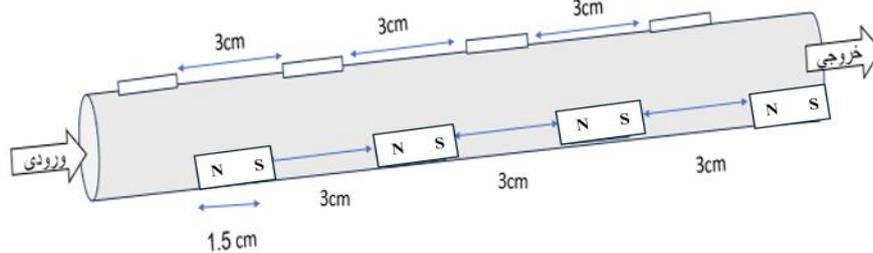
Fig. 3. a) Mixing magnetic fluid with gum arabic and distilled water, b) Placing magnetic fluid in ultrasonic device, c) magnetic fluid at four volume percent, 2%, 2.5%, 3% and 3.5% and d) XRD diagram of magnetic fluid

### جدول ۳. ویژگی‌های آهنربای نئودیمیم

Table 3. Characteristics of neodymium magnet

ویژگی‌ها	اندازه	ویژگی‌ها	اندازه
ابعاد	۲×۷×۱۵ میلی‌متر	آبکاری	نیکل مس نیکل
وزن	۱/۵۷ گرم	شاخص و چارچوب ۳	۳۵ قطب بندی محوری
جنس بدنه	آبکاری نیکل مس	حداکثر مقاومت کششی	۱۲۲۰ MPa (تخمینی)
آهنربای نئودیمیم	با طول ۱۵ میلی‌متر و عرض ۷ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر	حداکثر مقاومت برشی	۴۰۰ MPa (تخمینی)
اندازه شار	شار در مرکز آهنربا حدود ۱۷۶۰ گاوس و در گوشه ۲۲۰۰ گاوس	حداکثر دمای کاری	۸۰°C (درجه سانتی‌گراد)

<sup>3</sup> Grid



شکل ۴. آهنربای نئودیمیم و نحوه قرار گرفتن آهنرباها بر روی لوله‌ی جاذب.

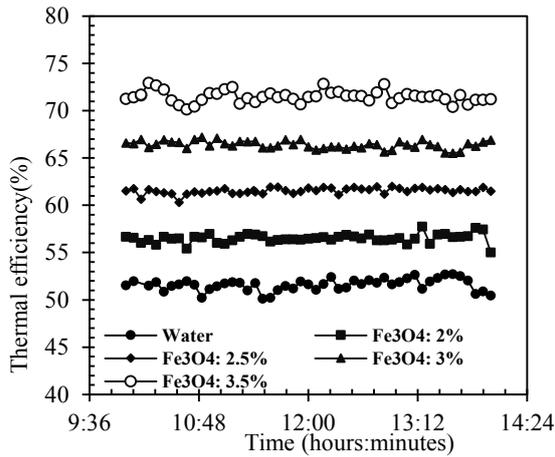
Fig. 4. Neodymium magnet and how the magnets are placed on the absorber tube.

شود. در این ناحیه از لایه مرزی، انتقال حرارت به شدت کم می‌شود. استفاده از سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی باعث حرکت نانوذرات آهن ( $Fe_3O_4$ ) شده، از طرفی با قرار گرفتن نانوذرات آهن در نزدیکی سطح لوله جاذب، منجر به کاهش ضخامت لایه مرزی شد. نانوذرات آهن در سیال مغناطیسی به دلیل وجود آهنربای نئودیمیموم و میدان مغناطیسی دچار آشفتگی بیشتری شد. آشفتگی باعث پخش یکنواخت‌تر نانوذرات در سیال پایه شد و افزایش اختلاط، منجر به بهبود انتقال حرارت شد. بنابراین این روند منجر به افزایش راندمان حرارتی گردآورنده شد. خواص حرارتی نانوذرات مغناطیسی نسبت به آب معمولاً بهتر می‌باشد. با افزایش درصد حجمی و غلظت سیال مغناطیسی (درصدهای حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪)، منجر به افزایش هدایت حرارتی مؤثر در سیال کاری شد. بهبود هدایت حرارتی باعث افزایش انتقال انرژی حرارتی به سیال کاری شد و باعث افزایش راندمان حرارتی شد.

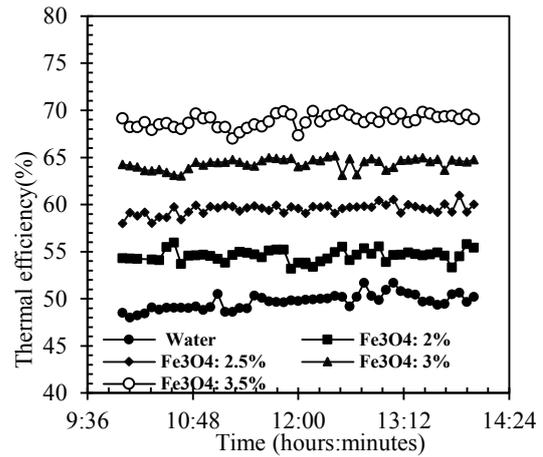
آهنربای نئودیمیم تهیه شد، که ۴۰ عدد آن را با فاصله ۳ سانتی متر در بالای لوله جاذب گردآورنده در جهت شمال به جنوب با قطب‌های N به S که در جهت جریان می‌باشد، قرار دادیم. همین طور ۴۰ عدد آهنربا را با فاصله ۳ سانتی متر در پایین لوله‌ی جاذب به حالتی که آهنربای پایین لوله جاذب دقیقاً در وسط فاصله آهنرباهای بالا باشند، قرار دادیم نحوه قرار گرفتن آهنرباها در لوله جاذب موجب، کاهش لایه مرزی حرارتی، بهبود حرکت نانوذرات، و افزایش هدایت حرارتی شده و لذا عملکرد گردآورنده سهموی بهبود می‌یابد و بهینه می‌شود.

#### ۴- نتایج و بحث

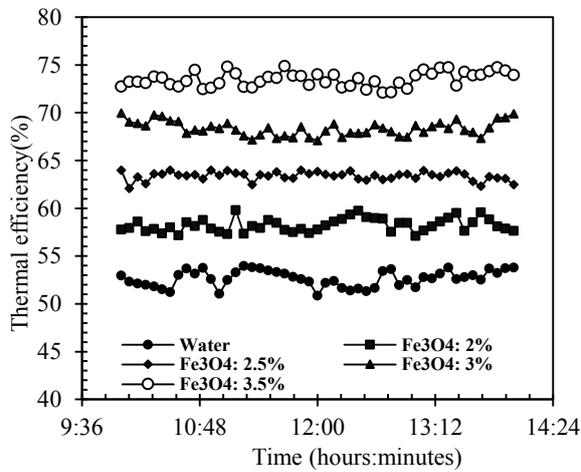
در این بخش، نتایج تحقیق در دو بخش لوله‌ی جاذب ساده و لوله‌ی جاذب با آهنربا به صورت نمودارها و مقادیر راندمان محاسبه شده ارائه می‌گردد. میدان مغناطیسی می‌تواند منجر به کاهش لایه مرزی حرارتی



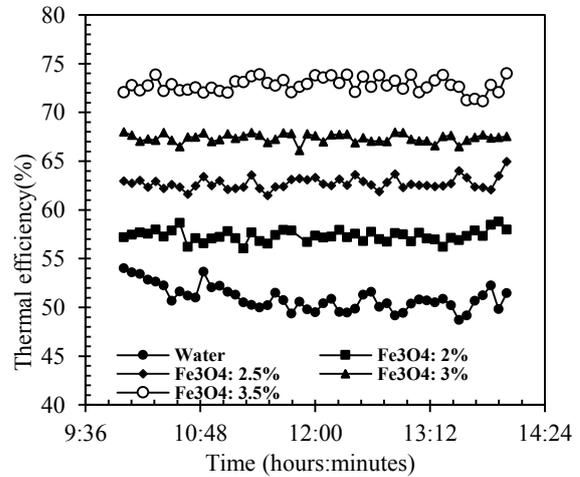
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

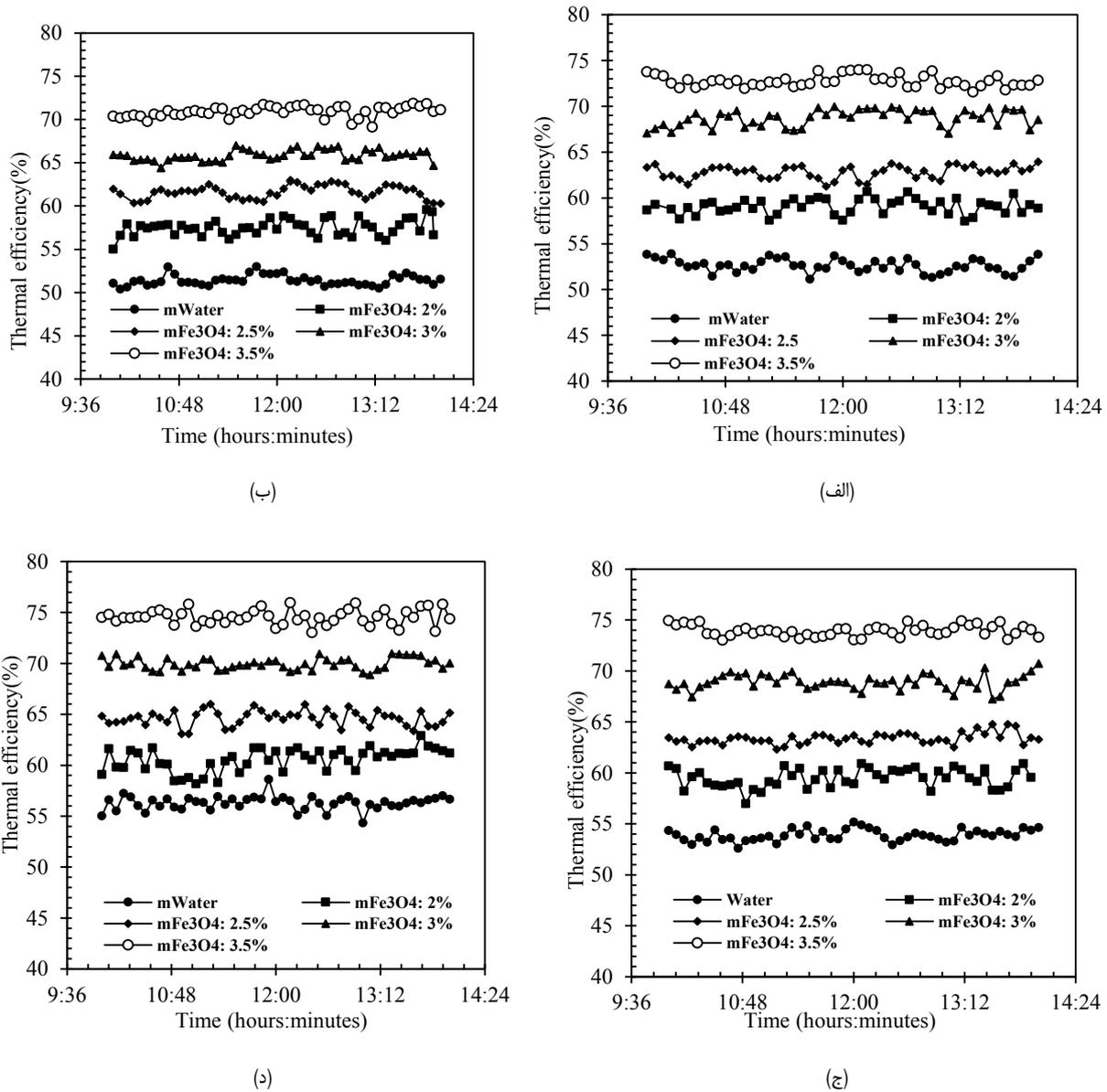
شکل ۵. نمودار راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی برای لوله ساده با سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲٫۵٪، ۳٪ و ۳٫۵٪، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵.

Fig. 5. Thermal efficiency diagram of the parabolic collector for a simple tube with water and magnetic fluid working fluids at four volume percentages of 2%, 2.5%, 3% and 3.5%, at Reynolds numbers (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845

با توجه به شکل ۵ راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی خورشیدی برای لوله‌ی جاذب ساده با سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲٫۵٪، ۳٪ و ۳٫۵٪، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵ آزمایش شد. نتایج نشان می‌دهد که میانگین راندمان به ترتیب در سیال آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲٫۵٪، ۳٪ و ۳٫۵٪، (الف) ۴۷/۶۹، ۵۳/۴۸، ۵۸/۳۲، ۶۸/۹۲ (ب) ۵۰/۵۴، ۵۵/۳۸، ۶۰/۳۳، ۶۳/۰۵، ۷۰/۰۹ (ج) ۵۱/۰۱، ۵۶/۱۴، ۶۱/۵۰، ۶۵/۰۷ (د) ۵۲/۱۶، ۵۷/۲۴، ۶۲/۱۱، ۶۷/۳۲ و ۷۲/۰۱ به صورت تجربی

۴-۱- نمودار راندمان حرارتی برحسب زمان برای لوله‌ی ساده و لوله با آهنربا

راندمان گردآورنده‌ی سهموی در شکل‌های ۵ و ۶ با توجه به شرایط دمایی ورودی، دمایی محیط و تابش خورشیدی ارائه شده است که با استفاده از رابطه (۴) (رابطه عدد هارتمن) محاسبه شده است. شکل‌های زیر عملکرد، گردآورنده‌ی سهموی به عنوان تابعی از دما، با استفاده از غلظت‌های حجمی مختلف نشان می‌دهد. راندمان گردآورنده‌ی سهموی با افزایش غلظت حجمی افزایش می‌یابد.



شکل ۶. نمودار راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی برای لوله با آهنربا برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵.

**Fig. 6. Thermal efficiency diagram of the parabolic collector for a tube with magnets for water and magnetic fluid working fluids at four volume percentages of 2, 2.5, 3 and 3.5%, at Reynolds numbers (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845**

از طرفی، با افزایش عدد رینولدز، آشفتگی و اختلاط افزایش پیدا می‌کند و باعث بهبود راندمان حرارتی می‌شود.

شکل ۶ راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی خورشیدی را برای لوله جاذب با آهنربا برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵ به صورت تجربی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد

بدست آمد. با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی منجر به پخش بیشتر ذرات مغناطیسی در آب می‌شود. لذا جذب انرژی گرمایی در گردآورنده‌ی سهموی، موجب افزایش بهبود راندمان حرارتی سیال مغناطیسی نسبت به آب شد. با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی به علت زیاد شدن نانوذرات سیال مغناطیسی، که باعث زیاد شدن میدان مغناطیسی و پخش شدن در آب مقطر که میدان مغناطیسی می‌شود، راندمان را افزایش می‌دهد.

نواحی مرکزی لوله، تلفات حرارتی با محیط کاهش می‌یابد.

عملکرد گردآورنده‌ی سهموی بر اساس استاندارد اشری ۹۳ برای معادله عملکرد گردآورنده‌ی در حالت لوله ساده، همراه با آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی حجمی ۲، ۳/۵، ۳ و ۳/۵ درصد، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵ بررسی شد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شد. نمودار راندمان حرارتی بر حسب دمای کاهیده برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در لوله ساده با شیب نمودار معادل  $\frac{F_R U_L}{C}$  و عرض از مبدا آن برابر  $F_R \eta_0$  می‌باشد. با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی نسبت به آب در لوله‌ی جاذب ساده شیب کمتر نشان دهنده‌ی ضریب افت حرارتی کمتر و عرض از مبدا بیشتر، که منجر به جذب انرژی بیشتر شد. با افزایش عدد رینولدز، آشفستگی جریان در لوله‌ی ساده، به دلیل کاهش دمای دیواره و انتقال حرارت بیشتر از دیواره به نواحی مرکزی لوله، تلفات حرارتی با محیط کاهش می‌یابد. این امر باعث افزایش تبادل حرارتی و سطح تماس دوجنسی با دیواره لوله جاذب شده و جذب انرژی حرارتی بیشتر می‌شود. DI کل تشعشع خورشیدی در صفحه گردآورنده بر حسب  $(W/m^2)$  می‌باشد.

عملکرد گردآورنده‌ی سهموی بر اساس استاندارد اشری ۹۳ برای معادله عملکرد گردآورنده‌ی در حالت لوله با آهنربا، همراه با آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی حجمی ۲، ۳/۵، ۳ و ۳/۵ درصد، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵ بررسی شد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شد، همانند حالت بدون آهنربا، نمودار راندمان حرارتی بر حسب دمای کاهیده برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در لوله ساده با شیب نمودار معادل  $\frac{F_R U_L}{C}$  و عرض از مبدا آن برابر  $F_R \eta_0$  می‌باشد. با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی نسبت به آب در لوله‌ی ساده، شیب کمتر شد که باعث ضریب افت حرارتی کمتر می‌شود. با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی نسبت به آب در لوله‌ی ساده عرض از مبدا بیشتر شد که باعث جذب انرژی بیشتر می‌شود. به دلیل افزایش آشفستگی جریان در حالت لوله‌ی با آهنربا نسبت به لوله‌ی ساده، به دلیل انتقال حرارت بیشتر از دیواره به نواحی مرکزی لوله و کاهش دمای دیواره، تلفات حرارتی با محیط کاهش می‌یابد، سیال کاری انتقال حرارت، سطح تماس بیشتر و دوجنسی داشته و بنابراین تبادل حرارتی با دیواره لوله جاذب بیشتر می‌شود، انرژی حرارتی بیشتری از جدار لوله جذب می‌کند، همچنین، به دلیل کاهش دمای دیواره و انتقال حرارت بیشتر از دیواره به نواحی مرکزی لوله، تلفات حرارتی با محیط کاهش می‌یابد.

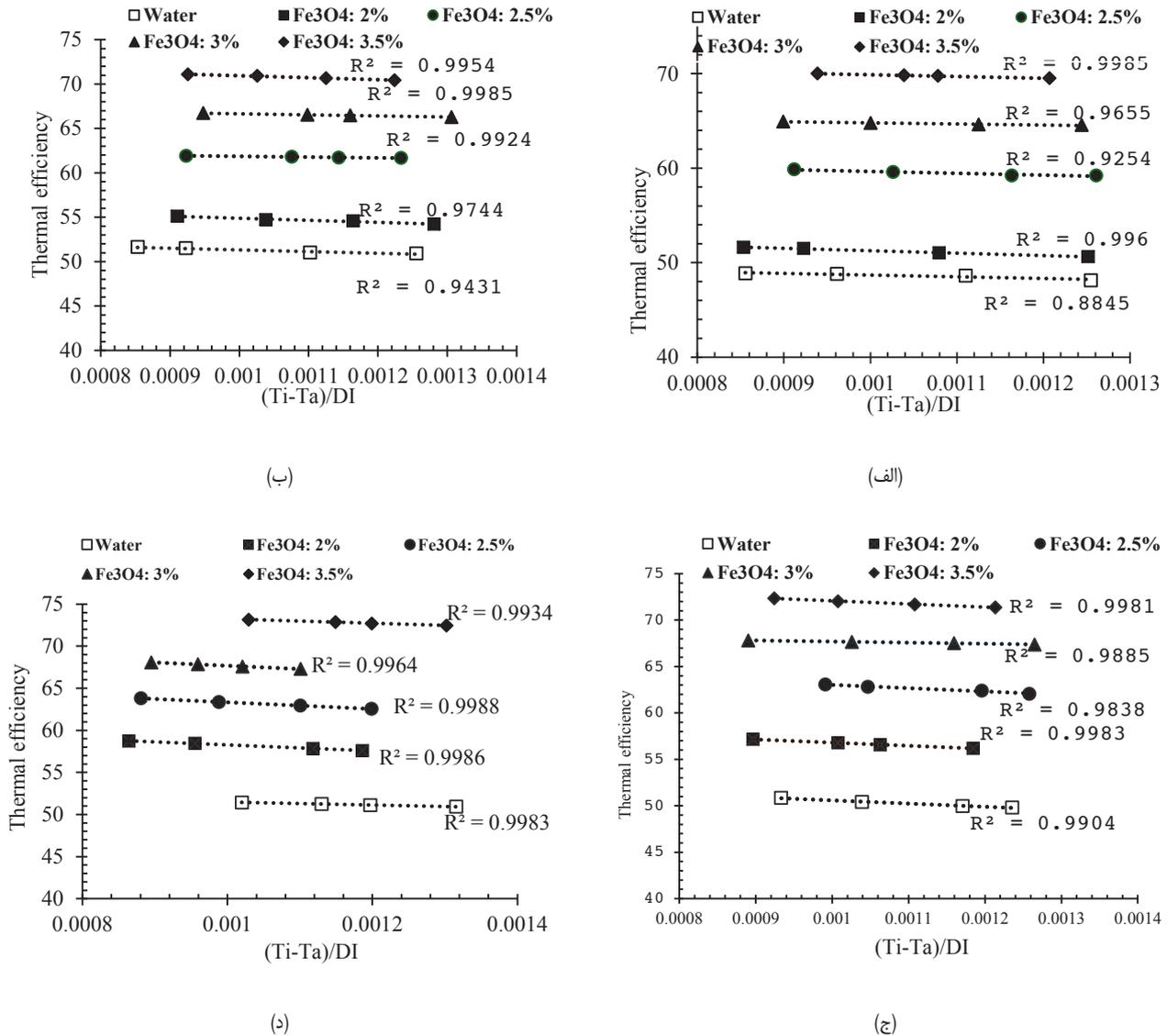
که میانگین راندمان به ترتیب در سیال آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۳/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ (الف) ۵۰/۳۷، ۵۵/۲۲، ۶۰/۳۹، ۶۵/۸۳، ۷۰/۸۷ (ب) ۵۲/۶۲، ۵۷/۸۹، ۶۲/۸۱، ۶۷/۳۴، ۷۲/۷۴ (ج) ۵۳/۸۷، ۵۸/۳۱، ۶۳/۳۷، ۶۸/۹۲، ۷۳/۹۴ و (د) ۵۴/۹۲، ۵۹/۳۴، ۶۴/۶۲، ۶۹/۹۶، ۷۴/۵۵ به صورت تجربی بدست آمد. با افزایش عدد رینولدز و با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی، نتایج نشان داد که لوله‌ی با آهنربا نسبت به لوله‌ی ساده، شاهد آشفستگی زیاد سیال کاری می‌شود. راندمان حرارتی سیال مغناطیسی از آب بیشتر است. با توجه به لوله‌ی جاذب با آهنربا، با افزایش درصد حجمی نانوذرات سیال مغناطیسی، که باعث زیاد شدن میدان مغناطیسی و پخش شدن در آب مقطر که میدان مغناطیسی می‌باشد، باعث افزایش راندمان می‌شود. از طرفی، با افزایش عدد رینولدز آشفستگی افزایش پیدا می‌کند و راندمان حرارتی بهبود می‌یابد. در گردآورنده سهموی خورشیدی با جذب مستقیم، استفاده از آهنربای نئودیموم و نانوسیال مغناطیسی باعث افزایش بازده حرارتی نسبت به گردآورنده سهموی خورشیدی با لوله‌ی جاذب ساده می‌شود. از طرفی با اعمال میدان مغناطیسی در جهت جریان و با شدت مناسب، هدایت حرارتی این سیالات بیشتر شد.

#### ۴-۲- تاثیر آب، سیال مغناطیسی و آهنربا بر روی بازده حرارتی گردآورنده‌ی سهموی خطی

عملکرد گردآورنده‌ی سهموی بر اساس استاندارد اشری بررسی شد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شد، بازده از رابطه (۹) بدست می‌آید:

$$\eta_{th} = \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{C D_i} - F_R \eta_0 \quad (10)$$

که  $\frac{F_R U_L}{C}$  معادل شیب نمودار و عرض از مبدا آن برابر  $F_R \eta_0$  می‌باشد، استفاده شد. استفاده از لوله جاذب با آهنربا، در مقایسه با لوله جاذب ساده برای سیال کاری، آب و سیال مغناطیسی، شیب کمتری دارد، که به معنای ضریب افت حرارتی کمتر می‌باشد. عرض از مبدا بیشتر، یعنی جذب انرژی بیشتر لوله جاذب با آهنربا نسبت به لوله‌ی ساده با سیال‌های کاری را، نشان می‌دهد. دلیل افزایش آشفستگی جریان در حالت لوله‌ی با آهنربا نسبت به لوله‌ی ساده، سیال کاری انتقال حرارت، تبادل حرارتی بیشتر و سطح تماس بیشتر با دیواره لوله جاذب می‌باشد، انرژی حرارتی بیشتری جذب می‌شود، همچنین، به دلیل کاهش دمای دیواره و انتقال حرارت بیشتر از دیواره به

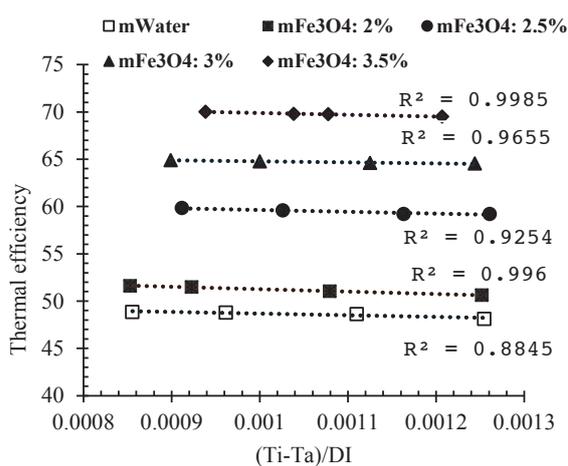


شکل ۷. منحنی عملکرد گردآورنده‌ی سهموی برای لوله ساده با سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵.

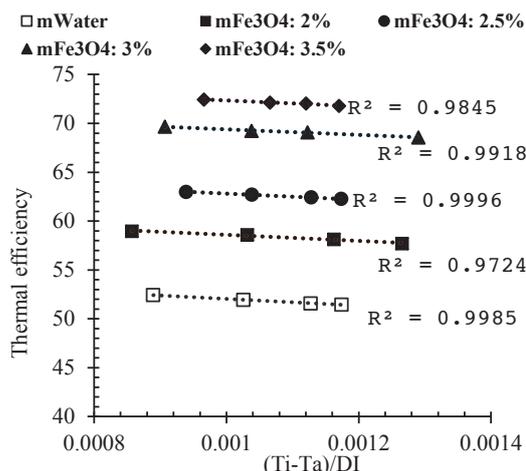
Fig. 7. Performance curve of the parabolic collector for a simple tube with water and magnetic fluid working fluids at four volume percentages of 2, 2.5, 3 and 3.5, at Reynolds numbers of (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845

۴-۳- بررسی تغییرات بهبود انتقال حرارت در لوله‌ی جاذب ساده و با آهنربا در لوله جاذب با آهنربا، افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی باعث افزایش راندمان حرارتی شد. عدد هارتمن در لوله‌ی جاذب سهموی با آهنربا، تأثیر قابل توجهی بر روی انتقال حرارت و رفتار جریان دارد. افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش آشفتگی و افزایش پایداری جریان شد. این اتفاق به دلیل اثر میدان مغناطیسی بر روی حرکت ذرات مغناطیسی در سیال مغناطیسی است. میدان مغناطیسی باعث توزیع یکنواخت ذرات مغناطیسی

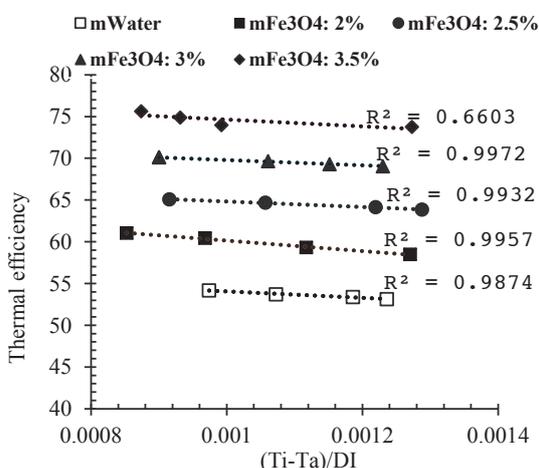
نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، که سیال کاری سیال مغناطیسی موجب جذب انرژی بیشتر خورشید شد، و بهبود عملکرد بهتری نسبت به سیال کاری آب داشت. افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی، موجب افزایش میزان جذب انرژی و کاهش میزان تلفات حرارتی در درصد حجمی‌های ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ شد. با افزایش میزان سیال مغناطیسی و ترکیب با میدان مغناطیسی لوله جاذب با آهنربا، آشفتگی و انتقال حرارت افزایش می‌یابد، که باعث کاهش دمای لوله جاذب و کاهش تلفات حرارتی دیواره لوله با محیط اطراف می‌شود.



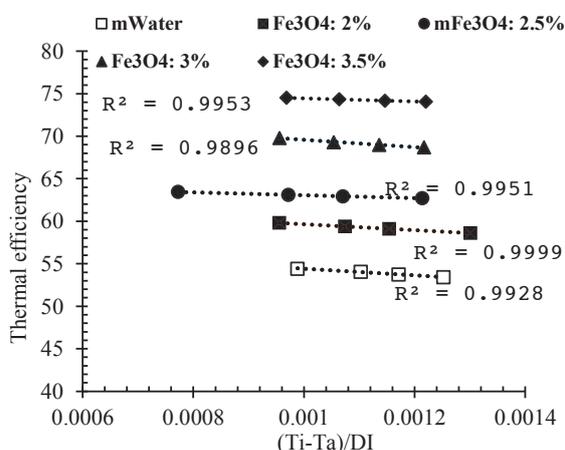
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

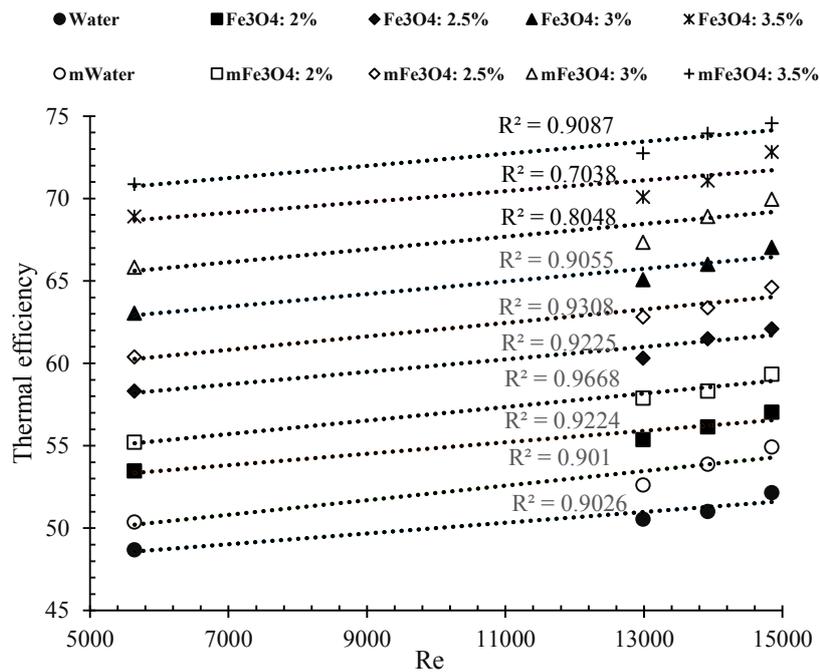
شکل ۸. نمودار عملکرد گردآورنده‌ی سهموی برای لوله با آهنربا با سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲٫۵٪، ۳٪ و ۳٫۵٪ در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵.

**Fig. 8. Performance diagram of parabolic collector for tube with magnet with working fluid water and magnetic fluid at four volume percentages of 2, 2.5, 3 and 3.5% at Reynolds numbers of (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845**

کاهش راندمان حرارتی منجر شود. در غیاب آهنربا، اثر سیال مغناطیسی بر روی توزیع حرارت و دما کمتر محسوس است [۲۶].

شکل ۹ به طور کامل تمام ۴۰ آزمایش تجربی انجام شده را به صورت یکجا ارائه می‌کند و امکان مقایسه‌ی دقیق و آسان را برای مطالعه خواننده فراهم می‌کند. با توجه به شکل ۹ افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش دریافت حرارت و بهبود راندمان حرارتی در سیال مغناطیسی با درصد حجمی ۲، ۲٫۵، ۳ و ۳٫۵ نسبت به سیال کاری آب شد. با افزایش عدد رینولدز و تغییر

شد، که این امر منجر به بهبود انتقال حرارت و افزایش سطح تماس می‌شود. افزایش عدد هارتمن باعث کاهش نوسانات جریانی شد، که منجر به بهبود عملکرد سیستم شد [۲۶]. در لوله‌ی جاذب ساده، تاثیر عدد هارتمن به صورت متفاوت مشاهده شد. در این حالت، میدان مغناطیسی می‌تواند به تقویت جریان و افزایش انتقال حرارت کمک کند، اما به دلیل عدم وجود آهنربا، تاثیر آن به اندازه لوله‌های جاذب با آهنربا نیست. در این نوع لوله جاذب، افزایش عدد هارتمن ممکن است منجر به کاهش اختلاط سیال شود، که می‌تواند به



شکل ۹. تغییرات بازده حرارتی گردآورنده‌ی سهموی با عدد رینولدز برای لوله ساده و با آهنربا برای سیال کاری، آب و سیال مغناطیسی در رینولدزهای ۱۳۹۱۸، ۱۲۹۸۷، ۱۴۸۴۵ و ۱۳۹۱۸.

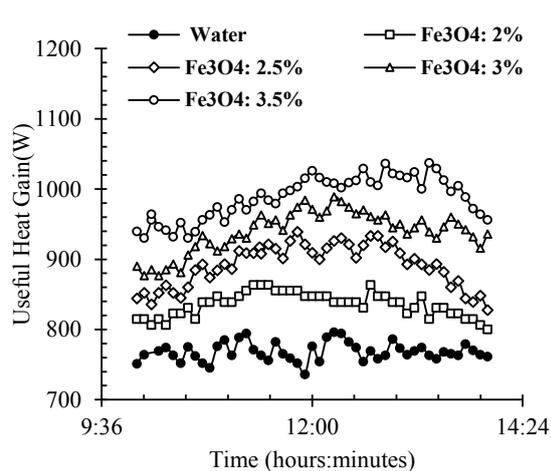
Fig. 9. Variations of thermal efficiency of parabolic collector with Reynolds number for plain tube and with magnet for working fluid, water and magnetic fluid at Reynolds numbers of 5643, 12987, 13918 and 14845.

سیال مغناطیسی با درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ در لوله با آهنربا، راندمان حرارتی بیشتر از لوله‌ی ساده شد، در رینولدزهای بالای ۵۰۰۰، این افزایش دبی بیشتر مشخص شد. هر چقدر درصد حجمی سیال مغناطیسی افزایش پیدا کند، ذرات مغناطیسی در آب افزایش پیدا می‌کنند. ترکیب سیال مغناطیسی با میدان مغناطیسی به دلیل جذب انرژی حرارتی بیشتر موجب بهبود دریافت و جذب حرارت شد. در لوله جاذب با آهنربا، افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی باعث افزایش راندمان حرارتی شد.

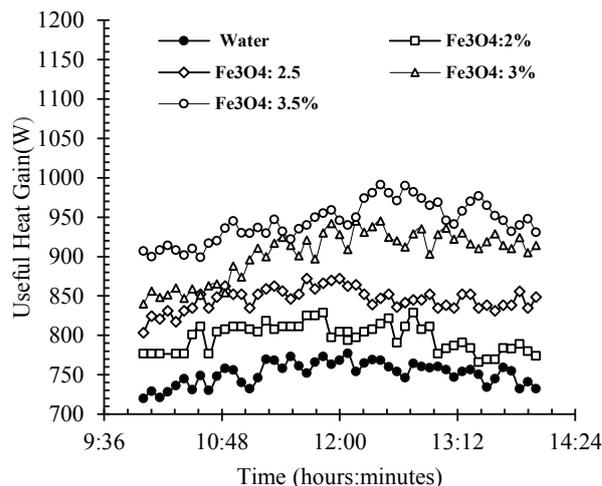
#### ۴-۴- گرمای مفید برای لوله‌ی ساده و همراه با آهنربا برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی

گرمای داده شده به سیال کاری به دست آمده از گردآورنده‌ی سهموی را می‌توان با استفاده از معادله (۱) بدست آورد، که به جریان سیال کاری و اختلاف دمای خروجی و ورودی درون لوله جاذب بستگی دارد. برای لوله ساده، با سیال کاری، آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد تغییرات نسبتا کمی دارد که در شکل ۱۰ آورده شده است.

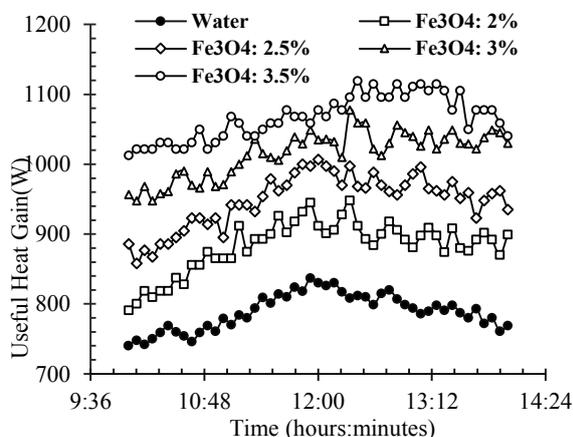
سیال کاری از آب به سیال مغناطیسی به دلیل پخش شدن ذرات مغناطیسی باعث جذب گرما شده و باعث افزایش آشفتنگی می‌شود. در لوله‌ی با آهنربا به دلیل وجود میدان مغناطیسی و جهت دهی به حرکت سیال، جذب انرژی بیشتر شد. در لوله‌ی با آهنربا نسبت به لوله‌ی ساده به دلیل بهبود جذب بیشتر گرما، راندمان حرارتی بیشتر شد. از طرفی، با افزایش درصد حجمی سیال مغناطیسی به دلیل بیشتر پخش شدن ذرات مغناطیسی نسبت به آب، باعث کاهش تلفات حرارتی شد. سیال مغناطیسی، با درصد حجمی کم، باعث جذب حرارت خورشید شد. از طرفی باعث بهبود کارایی سیستم‌های خورشیدی و دمای خروجی شد. علاوه بر این، با افزایش عدد رینولدز، دبی جریان بیشتر شد. در نتیجه سیال کاری با سرعت بیشتری از درون لوله عبور کرده و تلفات حرارتی با محیط اطراف کمتر شد. از طرفی، باعث کاهش اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال کاری شد. نرخ جریان بزرگتر بوده و بر بهبود بازده حرارتی و پارامتر جذب انرژی غلبه می‌کند. بیشترین راندمان حرارتی برای لوله‌ی ساده و لوله با آهنربا، در رینولدز ۱۴۸۴۵ با سیال مغناطیسی ۳/۵٪ به ترتیب، ۷۲/۰۱٪ و ۷۴/۵۵٪ شد. در همه‌ی دبی‌ها، برای سیال کاری آب و



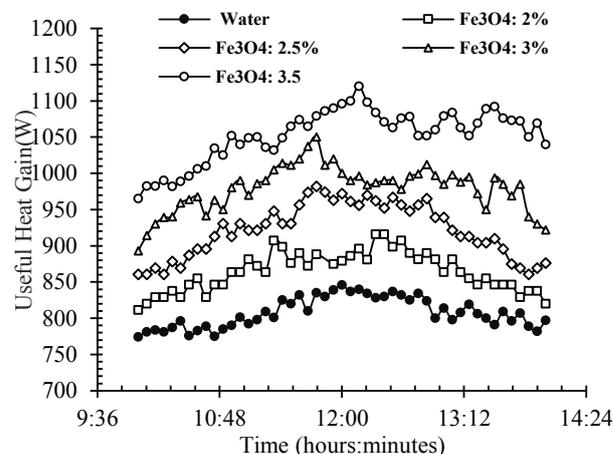
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

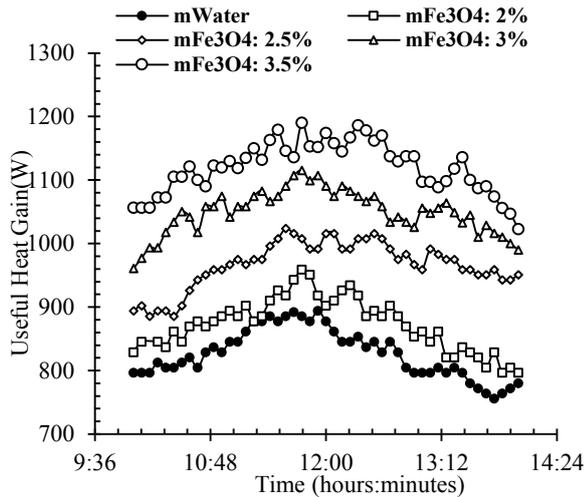
شکل ۱۰. نمودار گرمای داده شده به سیال کاری گردآورندهی سهموی برای لوله ساده با سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵.

**Fig. 10. Heat transfer diagram to working fluid of parabolic collector for plain tube with working fluid water and magnetic fluid at four volume percentages of 2, 2.5, 3 and 3.5% at Reynolds numbers of (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845 Volume percentages of 2, 2.5, 3 and 3.5%, at Reynolds numbers of (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845**

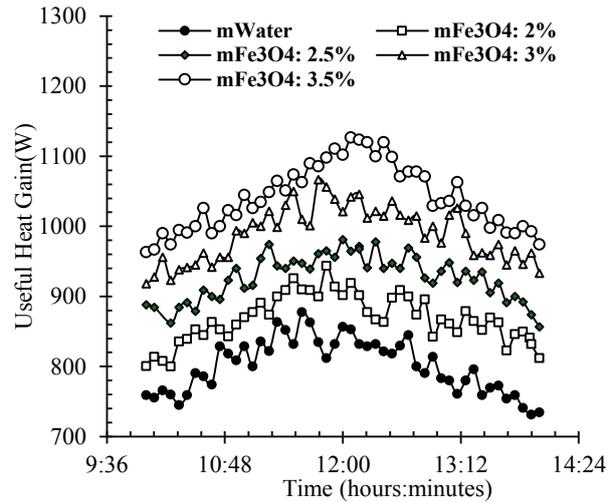
به سیال کاری به بیشترین حالت خود می‌رسد. سپس، با گذشتن از ظهر خورشیدی گرمای داده شده به سیال کاری کاهش پیدا می‌کند که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. گرمای داده شده به سیال کاری بستگی به میزان تابش خورشید، نوع لوله ساده یا، با آهنربا و نیز نوع سیال کاری آب و یا سیال مغناطیسی با چهار درصد حجمی ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد، رینولدزهای ۵۶۴۳، ۱۲۹۸۷، ۱۳۹۱۸ و ۱۴۸۴۵ و زمان آزمایش دارد [۲۴].

در این شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، سیال مغناطیسی به دلیل جذب گرمای بیشتر نسبت به آب جذب انرژی مفید بیشتری داشت. از طرفی با افزایش درصد حجمی با پخش شدن بیشتر سیال مغناطیسی دریافت و جذب گرما بیشتر شد.

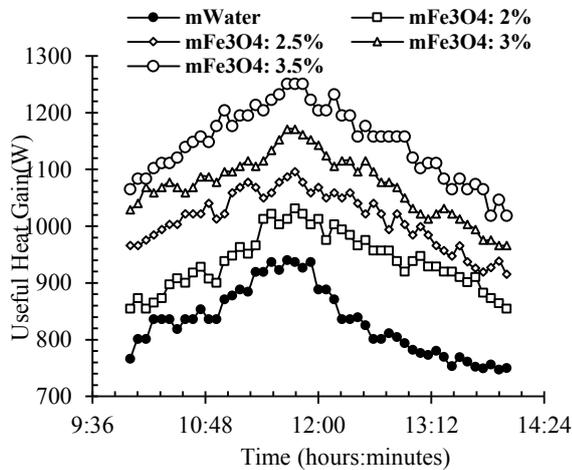
برای لوله با آهنربا، در ابتدای آزمایش به دلیل تابش کم خورشید، انرژی مفید کم می‌باشد و با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی گرمای داده شده



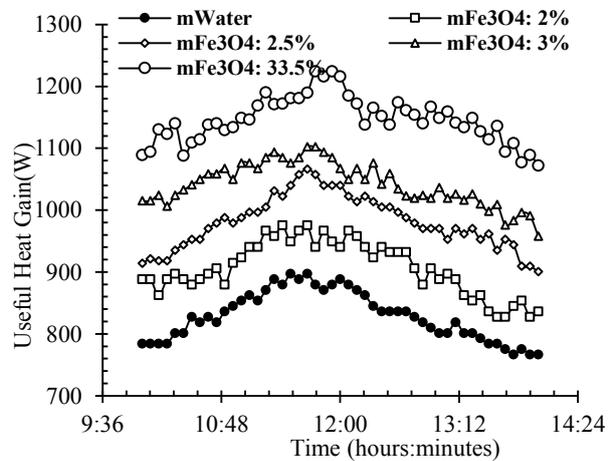
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱. نمودار گرمای داده شده به سیال کاری گردآورنده‌ی سهموی برای لوله با آهنربا برای سیال کاری آب و سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲٫۱۵٪، ۳٪ و ۳٫۱۵٪، در رینولدزهای (الف) ۵۶۴۳، (ب) ۱۲۹۸۷، (ج) ۱۳۹۱۸، (د) ۱۴۸۴۵.

**Fig. 11. Heat transfer diagram of the working fluid of the parabolic collector for the tube with magnet for the working fluid water and magnetic fluid at four volume percentages of 2, 2.5, 3 and 3.5%, at Reynolds numbers of (a) 5643, (b) 12987, (c) 13918, (d) 14845.**

انتقال حرارت باعث دمای کمتر لوله جاذب شده که به معنای کاهش تلفات حرارتی شد.

✓ نسبت ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد، در حالیکه نسبت عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد، در اعداد رینولدز پایین ضخامت لایه مرزی بزرگتر و لذا استفاده لوله با آهنربا

## ۵- نتیجه‌گیری

تلفات حرارتی و راندمان حرارتی با استفاده از لوله، با آهنربا به ترتیب کاهش و افزایش یافت. افزایش آشفتگی جریان توسط میدان مغناطیسی، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت شد. انتقال حرارت از لوله جاذب به سیال کاری به ضریب انتقال حرارت همرفت بستگی دارد. افزایش این ضریب

## ۶- فهرست علائم و اختصارات

مساحت دهانه	$m^2$	$A_a$	در این ناحیه تاثیر بیشتری دارد.
نسبت تمرکز		$C$	متوسط عدد ناسلت لوله‌ی با آهنربا برای، سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ درصد و آب به ترتیب: ۱/۵۱، ۱/۶۱، ۱/۷۲، ۱/۷۶ و ۱/۴۲ برابر لوله‌ی ساده شد.
ظرفیت گرمایی ویژه	$kJ/kg. ^\circ C$	$C_p$	متوسط ضریب اصطکاک لوله‌ی با آهنربا برای، سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ درصد و آب به ترتیب: ۱/۴۹، ۱/۶۲، ۱/۷۳، ۱/۷۸ و ۱/۴۰ برابر لوله‌ی ساده شد.
کل تشعشع خورشیدی در صفحه گردآورنده	$W/m^2$	$DI$	متوسط ضریب عملکرد حرارتی لوله‌ی با آهنربا برای، سیال مغناطیسی در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ درصد و آب به ترتیب: ۱/۵۷، ۱/۷۲، ۱/۸۳، ۱/۰۷ و ۱/۳۸ برابر لوله‌ی ساده شد.
سیال مغناطیسی		$Fe_3O_4$	میانگین بیشترین راندمان حرارتی در میانگین چهار رینولدز برای لوله با آهنربا ۷۳/۰۲ شد.
عامل حرف گرمایش		$F_R$	میانگین بیشترین راندمان حرارتی در میانگین چهار رینولدز برای لوله ساده ۷۰/۷۳ شد.
ضریب اصکاک لوله با آهنربا		$f_m$	راندمان حرارتی برای سیال کاری آب و فرو سیال در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ درصد، در میانگین چهار رینولدزهای ۵۶۴۳، ۱۲۹۸۷، ۱۳۹۱۸ و ۱۴۸۴۵، به صورت تجربی بدست آمد: لوله‌ی ساده به ترتیب: ۵۰/۶، ۵۵/۵۰، ۶۰/۵۵، ۶۵/۲۹ و ۷۰/۷۳ و برای لوله با آهنربا به ترتیب: ۵۲/۹۴، ۵۷/۶۹، ۶۲/۷۹، ۶۸/۰۱ و ۷۳/۰۲ این مقادیر شد.
ضریب اصطکاک لوله ساده		$f_o$	بهبود راندمان حرارتی برای گردآورنده‌ی سهموی خطی خورشیدی، سیال مغناطیسی نسبت به سیال کاری آب در چهار درصد حجمی ۲٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۳/۵٪ درصد، در میانگین چهار رینولدزهای ۵۶۴۳، ۱۲۹۸۷، ۱۳۹۱۸ و ۱۴۸۴۵، به ترتیب ۱/۰۴۶، ۱/۰۳۹، ۱/۰۴۳، ۱/۰۳۶ و ۱/۰۳۲ این مقادیر بود.
ضریب انتقال حرارت درون لوله جاذب	$W/m^2$	$h_{fI}$	نتایج بدست آمده نشان داد که، استفاده از سیال مغناطیسی برای گردآورنده سهموی در مقایسه با آب منجر به افزایش قابل توجه در راندمان حرارتی شد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی بر بهبود انتقال حرارت و کاهش لایه مرزی است.
ضریب هدایت حرارتی سیال	$W/mK$	$k_f$	ترکیب همزمان میدان مغناطیسی با نانوسیال‌ها منجر به بهبود چشمگیر در راندمان حرارتی گردآورنده‌ی سهموی شد و این نتایج می‌تواند به بهینه‌سازی گردآورنده سهموی خورشیدی کمک کند.
آهنربا		$m$	
دبی جریان سیال	$kg/s$	$\dot{m}$	
Nu	ناسلت (-)	Nu	
Nu <sub>m</sub>	ناسلت لوله با آهنربا	Nu <sub>m</sub>	
Nu <sub>0</sub>	ناسلت لوله ساده	Nu <sub>0</sub>	
T	دما (°C)	T	
U <sub>L</sub>	ضریب تلفات حرارتی (-)	U <sub>L</sub>	
$\eta_{th}$	بازدهی حرارتی (-)	$\eta_{th}$	
$\eta_o$	بازده نوری	$\eta_o$	
i	ورودی	i	
o	خروجی	o	
$\sigma$	رسانایی الکتریکی	$\sigma$	
$\mu_p$	لزجت دینامیکی (Pa.s)	$\mu_p$	

- of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and CuO/Therminol 66 nanofluids under magnetic field, *Applied Thermal Engineering*, 163 (2019) 114435.
- [11] M. Alsaady, R. Fu, Y. Yan, Z. Liu, S. Wu, R. Boukhanouf, An experimental investigation on the effect of ferrofluids on the efficiency of novel parabolic trough solar collector under laminar flow conditions, *Heat Transfer Engineering*, 40(9-10) (2019) 753-761.
- [12] D. Zheng, J. Yao, H. Zhu, J. Wang, C. Yin, Optimizing photothermal conversion efficiency in a parabolic trough direct absorption solar collector through ferrofluid and magnetic field synergy, *Energy Conversion and Management*, 285 (2023) 117020.
- [13] Z. Zhu, E. Nadimi, M. Asadollahzadeh, M. Bahari, M.Z.M. Abad, M. Aliehyaei, Investigation into the effect of multiple line dipoles magnetic field through LS-3 parabolic trough solar system, *Applied Thermal Engineering*, 235 (2023) 121332.
- [14] A. Tahmasebi, A.M. Abed, A. Aghaei, F. Izadi, E.H. Malekshah, H.Ş. Aybar, Investigation into the effect of twisted tape on the thermo-hydraulic performance and entropy generation of turbulent flow of mono and hybrid magnetic nanofluids inside a parabolic solar collector absorber tube by applying two-phase analysis, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 150 (2023) 318-328.
- [15] R. Singh, A. Gupta, A.R. Paul, B. Paul, S.C. Saha, Improving Heat Transfer in Parabolic Trough Solar Collectors by Magnetic Nanofluids, *Energy Engineering*, 121(4) (2024).
- [16] N. Helmi, A. Nazari, M. Bezaatpour, S. Nateghi, H. Ghaebi, Investigation of energy storage in parabolic rotary trough solar collectors using various porous fins with magnetic nanoparticles, *Energy for Sustainable Development*, 70 (2022) 194-204.
- [17] W. Fuqiang, T. Zhexiang, G. Xiangtao, T. Jianyu, H. Huaizhi, L. Bingxi, Heat transfer performance enhancement and thermal strain restrain of tube receiver for parabolic trough solar collector by using asymmetric outward convex corrugated tube, *Energy*, 114 (2016)
- [1] E.T. Sayed, A.G. Olabi, A.H. Alami, A. Radwan, A. Mdallal, A. Rezk, M.A. Abdelkareem, Renewable energy and energy storage systems, *Energies*, 16(3) (2023) 1415.
- [2] A. Noorani, M. Rahimi, M. Mirbagheri Jam, Investigating the Impact of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption on Economic Welfare in Iran. *Journal of Renewable and New Energy*. 2022; 9(1): 61-8. in Persian.
- [3] A. Awasthi, A.K. Shukla, M.M. SR, C. Dondariya, K. Shukla, D. Porwal, G. Richhariya, Review on sun tracking technology in solar PV system, *Energy Reports*, 6 (2020) 392-405.
- [4] M. Bilardo, M. Ferrara, E. Fabrizio, Performance assessment and optimization of a solar cooling system to satisfy renewable energy ratio (RER) requirements in multi-family buildings, *Renewable Energy*, 155 (2020) 990-1008.
- [5] K. Amani, M. Ebrahimpour, S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, The utilization of conical strip inserts in a parabolic trough collector, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(3) (2020) 1625-1631.
- [6] K. Anirudh, S. Dhinakaran, Performance improvement of a flat-plate solar collector by inserting intermittent porous blocks, *Renewable Energy*, 145 (2020) 428-441.
- [7] E. Bellos, C. Tzivanidis, D. Tsimpoukis, Enhancing the performance of parabolic trough collectors using nanofluids and turbulators, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91 (2018) 358-375.
- [8] B. Zou, Y. Jiang, Y. Yao, H. Yang, Thermal performance improvement using unilateral spiral ribbed absorber tube for parabolic trough solar collector, *Solar Energy*, 183 (2019) 371-385.
- [9] J.S. Kumar, P.S. Paul, G. Raghunathan, D.G. Alex, A review of challenges and solutions in the preparation and use of magnetorheological fluids, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 14(1) (2019) 13.
- [10] M. Malekan, A. Khosravi, S. Syri, Heat transfer modeling of a parabolic trough solar collector with working fluid

- [23] M. Babapour Sorkhan, M.S. Valipour, Experimental investigation of the use of nanofluid and spiral wave absorber tube on the performance of parabolic solar collector. Master's thesis, Semnan: Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University; 2021. 104 pages. in Persian
- [24] M. Bezaatpour, H. Rostamzadeh, J. Bezaatpour, Hybridization of rotary absorber tube and magnetic field inducer with nanofluid for performance enhancement of parabolic trough solar collector, *Journal of Cleaner Production*, 283 (2021) 124565.
- [25] A.Y. Al-Rabeeah, I. Seres, I. Farkas, Experimental and numerical investigation of parabolic trough solar collector thermal efficiency enhanced by graphene-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water hybrid nanofluid, *Results in Engineering*, 21 (2024) 101887.
- [26] H.J. Jouybari, S. Saedodin, A. Zamzamian, M.E. Nimvari, Experimental investigation of thermal performance and entropy generation of a flat-plate solar collector filled with porous media, *Applied Thermal Engineering*, 127 (2017) 1506-1517.
- 275-292.
- [18] A.V. Arasu, T. Sornakumar, Design, manufacture and testing of fiberglass reinforced parabola trough for parabolic trough solar collectors, *Solar Energy*, 81(10) (2007) 1273-1279.
- [19] R. Akhmedagaev, O. Zikanov, Y. Listratov, Magnetoconvection in a horizontal duct flow at very high Hartmann and Grashof numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 931 (2022) A29.
- [20] H. Sajjadi, A. Amiri Delouei, M. Atashafrooz, Effect of magnetic field on particle deposition in a modeled room, *Particulate Science and Technology*, 41(3) (2023) 361-370.
- [21] S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, Energy and exergy analysis of a parabolic trough collector using helically corrugated absorber tube, *Renewable Energy*, 155 (2020) 735-747.
- [22] S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, The thermo-hydraulic performance of a parabolic trough collector with helically corrugated tube, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44 (2021) 101013.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S. Vaghf, Sh. Kharazmi, M. S. Valipour, Experimental Study of the Magnetic Field on the Thermal Performance of the Parabolic Solar Collector System, Amirkabir J. Mech Eng., 57(8) (2025) 1013-1036.*

DOI: [10.22060/mej.2026.24875.7906](https://doi.org/10.22060/mej.2026.24875.7906)



