



A Review on the Various Solutions to Improve the Performance of the Solar Collector Absorber Tube by Using Turbulator and Hybrid Nanofluid

Seyedeh Mohadeseh Miri^{*1}, Farhad Vahidinia¹

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran.

Abstract

The absorber tube is the main part of the solar collectors which its appearance and operational characteristic can play key role in absorbing of solar irradiation amounts. Researchers have proposed various offers to improve the solar collector performance such as inserting a turbulator in the absorber tube and using of nanofluid (especially hybrid nanofluids) instead of simple working fluid. In present study, the various shapes of turbulators proposed by the researchers have been reviewed. Turbulators can be classified according to their shapes. In the first category, turbulence in fluid flow is made by providing ribs or corrugations on the inner wall of absorber tube. But in the second category, external obstacles can be inserted in the absorber tube to improve its performance. Most literatures discussed about the second category of turbulators. By comparing the hydrothermal performance between the smooth absorber tubes with the improved one, it can be concluded that addition of turbulator enhances the thermal properties of all collector types up to 82%. The turbulators can increase the pressure drop and friction factor due to its operation as an obstacle in the fluid flow. Also, the use of nanofluids (especially hybrid nanofluids) beside the turbulators can improve the collector's performance. However, several characteristics such as the concentration of nano particles, different kinds of hybrid nano fluid and collectors, the various shapes of the turbulator, etc., are all effective parameters on the collector performance.

Keywords

Solar Collector
Improvement Performance of Absorber Tube
Turbulator
Hybrid Nanofluid
Energy Optimization

Received: 07.07.2024

Revised: 10.26.2024

Accepted: 11.06.2024

*Corresponding Author

Seyedeh Mohadeseh Miri

Email

mhdsh.miri@uoaz.ac.ir

1- Introduction

Iran is one of the high solar potential regions in the world, which has 290 sunny days and received daily solar radiation up to 4.5 -5.5 kWh/m². Due to deterioration of fossil fuels, the use of renewable energy sources has been extensively taken into account. Solar energy is one kinds of renewable energies with widely extensive distribution in the world. The absorber tube is the essential part of solar collector that must absorbs the solar radiation and its performance quality can affect on solar collector operation. To improve the absorber tube performance, various solutions have been proposed in the literatures for example replacing numerous tubes instead of a large diameter tube, using various working fluid such as mono and hybrid nanofluids to solve the existing problems (e.g., absorbing the

whole of radiation band and overcoming to fluid instability at high temperatures). Sloping the solar collector to receive more solar radiation is another solution was performed by authors. One of the most frequent solutions is increasing the heat transfer surface by using turbulators, which can cause the turbulence in flow and so can improve the performance of the absorber tube in solar collectors. Turbulators have different types and cross section shapes. In the current study, various shapes of turbulator have been categories and numerous studies, which have worked on them, are reviewed. Next, the effect of nanofluids (especially hybrid kinds) beside the turbulator in improving the absorber tube performance has been investigated in previous studies.



2- Design and Methodology

Several studies have been focused on using the turbulators in absorber tubes of solar collectors. Turbulators are classified into two general types. In the first category, a type of turbulator is investigated, which waves, ribs, dimples or making corrugation in inner wall of tube are made. But in the second category, by placing an obstacle or foreign device inside the tube, vortex or disturbance is created in the fluid flow. Researchers have studied various parameters including the effect of using turbulators with different shapes, various working fluids (simple working fluids, mono and hybrid nano fluids) in collectors, the range of different Reynolds numbers and Nusselt number or etc. In existed review articles on mentioned field, any of these parameters were discussed lonely. The research gap in this field is reviewing the simultaneous using of both turbulator and nanofluids (especially hybrid) effects on the absorber tube performance in literatures which current study pay attention to that. Another innovation of this study is presenting two overview tables with two parameters of performance evaluation criteria (PEC) and the range of investigated Reynolds number. It can be useful in the real applications of industries used solar collectors (e.g., seawater desalination, air heating, power plants, refrigeration, etc.) provide useful and accurate information to users.

The main detailed and extensive classification of turbulators used in the studies, could be represented as following bullets:

- Longitudinal turbulators with a rectangular, triangular, trapezoidal cross-section, etc.. As the results in this category, the fins with a rectangular cross-section had caused more improvement on heat transfer.
- Creating dimples or protrusion to make turbulency in the flow. The results indicated the turbulator of dimple kind has a better performance than protrusion kind.
- Ribbed, pin-shaped and circular turbulators. In general, placing the turbulator in the lower half

of the absorber tube produces more flow turbulence and improves performance.

- Twist or screw taps or coil-wire inserts, which occupied a large group of studies. It was proved that the coil type turbulator was better than the twist/screw type to improve the performance. The effectiveness of twist inserts depends on several characteristics, such as spiral angle, screw ratio, etc. which can improve the collector performance by 45.04% and 74.42%.
- Turbulators from the porous disks and porous medium kinds, with effective parameters such as the distance and dimensions of the disks, the number of holes which have also been effective in the amount of their impact on the collector performance.

3- Discussion and Results

Recently, hybrid nanofluids have been taken into account due to their ability to act in wide temperature range and solving the mono nanofluid's instability problems. Many studies showed that replacing the simple working fluid with nanofluids, both single and hybrid nanofluids, can lead to an increase in the thermal efficiency of the collector up to 26.3%. Various parameters such as the nanofluid kind, concentration and mixing percentage of nanoparticles have been evaluated on the solar collector performance. In general, enhancing the volume fraction of nanoparticles and Reynolds number caused increases in Nusselt number, friction coefficient and PEC. According to the researchers' results, increasing the concentration of nanoparticles and its hybridization and increasing the penetration depth improved the radiation properties and its absorption efficiency up to 90%. On the other hand, using of both nanofluid and the turbulator in absorber tube could improve the Nusselt number and of course increased the friction coefficient. Also, they caused the placement of the vortex generators (horizontal, vertical and cross) changed in the PEC. The improved performance rate by using the hybrid nanofluid, the shape of the turbulator, and the hydrodynamic conditions are investigated in current study. As the results, not only

the use of hybrid nanofluid can improve the thermal and optical properties (improving optical efficiency by 78.1% and increasing the temperature difference between the inlet and outlet of the fluid by 56%), but also it leads to economic savings and reducing the collector surface by 36% as well as the emissions carbon dioxide and payback period up to 36.2%.

To evaluate the solar collector performance, a balance should be established between the thermal characteristics improvement and the energy required for pumping fluid. For this purpose, the Performance Evaluation Criterion Index (PEC) has been used to examine the solar heat exchanger performance and to determine the actual heat transfer development in previous studies using turbulator and with/without nanofluid. In practice, this power is related to the work required to pump the fluid (W_p) to the third power of the volumetric flow rate (W^3). In the reference condition, PEC is equal to one. For other states, it can have values greater or less than one. When it is higher than one, the investigated condition is assumed to be beneficial and the thermal enhancement is higher than the previous value. When PEC is less than one, the pressure drop is less than one. In present study, PEC is listed in a table by changing in the other parameters namely the shape and type of the turbulator and the working fluid kind. Also, another table is presented in which studies, considered the types of turbulators with nano fluid in the absorber tube of solar collectors, are listed. In this table, in addition to the collector and turbulator kinds, used, the nanofluid kind are also mentioned as well as the studied Reynolds number range and the results of the research are also briefly presented.

4- Conclusion

In general, it can be concluded that the improvement amount of the collector's performance by using the turbulator and hybrid nanofluid depends on several factors such as the collector type, the mass flow rate range of the fluid flow and the Reynolds number, the shape of the turbulator, the nanofluid kinds and its volume fraction. As the results, by increasing the

fin's numbers, a more effective improvement is achieved in thermal and exergy performance criteria and PEC, until about 234.7% and 19.7%. Likewise, the decrease in entropy production had also reached up to 311.7%.

5- References

- [1] Yadegari, M. and M. Ghassemi, Investigation of the Effects of Temperature, Mass flow rate of the injected fuel, pore diameter, porosity and ambient pressure on the amount of pollutants in the combustion chamber. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, 2022. 23(1): p. 122-146.
- [2] Pal R. K. and Ravi Kumar K., Coupled Thermo-Structural analysis of absorber tube for direct steam generation in parabolic trough solar collector, *Sol. Energy*, 2023, 266: p. 112148.
- [3] Gong J. hu, Yang C., Wang J., and Lund P. D., Comparative study of optical and thermal model for a large-aperture parabolic trough concentrator with smaller diameter absorber tube bundle, *Energy Reports*, 2023, 9(S12): p. 435–443.
- [4] Anand S. and Kumar S., Optimization of gaseous working fluid and internally finned absorber tube for enhancing the thermal performance of parabolic trough solar collector, *Appl. Therm. Eng.*, 2024, 239: p. 122078.
- [5] Abbasian A. A. and Monfaredi F., Insulator roof, acentric absorber tube and nanofluid effect on parabolic trough collector efficiency via two-phase flow simulation, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2023, 148(22): p. 12481–12499.
- [6] Chen Z., Han X., and Ma Y., Performance analysis of a novel direct absorption parabolic trough solar collector with combined absorption using MCRT and FVM coupled method, *Renew. Energy*, 2023, 220: p. 119727.
- [7] Azimy N., Saffarian M. R., Investigation of thermal characteristics and entropy generation in a solar collector including Fly Ash-Cu hybrid nanofluids: Numerical approach using mixture model, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 152: pp. 169–184.

-
- [9] Amar M., Akram N., Chaudhary G.Q., Kazi S. N., M. Soudagar M.E., Mubarak N.M., Kalam M.A, Energy, exergy and economic (3E) analysis of flat-plate solar collector using novel environmental friendly nanofluid, *Sci. Rep.*, 2023, 13(1), p. 1–21, 2023.
- [10] Esfahani A.H., Aliehyaei M., Hassani Joshaghani A., Najafizadeh M.M., Economic, Exergy, and Environmental Analyses of Parabolic Trough Solar Collector with Turbulator Containing Polymer Hybrid Nanofluid, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2023, 12(4): p. 80-99.



مروری بر روش‌های بهبود عملکرد لوله جاذب جمع‌کننده‌های خورشیدی با استفاده از

توربولاتور و نانو سیالات هیبریدی

سیده محدثه میری^{۱*}، فرهاد وحیدی^۱

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، ایران.

چکیده

لوله جاذب بخش اصلی جمع‌کننده‌های خورشیدی است که ظاهر و ویژگی عملکردی آن می‌تواند نقش کلیدی در جذب مقادیر تابش خورشید داشته باشد. محققان پیشنهادها مختلفی را برای بهبود عملکرد جمع‌کننده خورشیدی ارائه کرده‌اند، مانند قرار دادن توربولاتور در لوله جاذب و استفاده از نانوسیال (به‌ویژه نانوسیالات هیبریدی) به جای سیال کار ساده. در مطالعه حاضر، اشکال مختلف توربولاتورهای پیشنهادشده توسط محققین بررسی شده است. توربولاتورها را می‌توان بر اساس شکل آنها طبقه‌بندی کرد. در دسته اول، با ایجاد دنده یا موج روی دیواره داخلی لوله جاذب تلاطم در جریان سیال ایجاد می‌شود؛ اما در دسته دوم می‌توان موانع خارجی را در لوله جاذب قرارداد تا عملکرد آن را بهبود بخشد. بیشتر متون در مورد دسته دوم توربولاتور بحث کردند. با مقایسه عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات بین لوله‌های جاذب صاف با لوله‌های بهبودیافته، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن توربولاتور خواص حرارتی انواع جمع‌کننده‌ها را تا ۸۲ درصد افزایش می‌دهد. توربولاتورها به دلیل عملکرد خود به‌عنوان مانعی در جریان سیال می‌توانند افت فشار و ضریب اصطکاک را افزایش دهند. همچنین استفاده از نانوسیالات (به‌ویژه نانوسیالات هیبریدی) در کنار توربولاتورها می‌تواند عملکرد جمع‌کننده‌ها را بهبود بخشد. با این حال، چندین ویژگی مانند غلظت نانو ذرات، انواع مختلف نانو سیال و جمع‌کننده‌های هیبریدی، اشکال مختلف توربولاتور و غیره، همگی پارامترهای مؤثر بر عملکرد جمع‌کننده هستند.

کلمات کلیدی

جمع‌کننده خورشیدی
بهبود عملکرد لوله جاذب
توربولاتور
نانو سیال هیبریدی
بهینه‌سازی انرژی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

*نویسنده مسئول

سیده محدثه میری

ایمیل

mhdsh.miri@uoz.ac.ir

۱- مقدمه

در منابع پیشنهادشده است که برخی از آنها جایگزینی دسته لوله‌ها با قطر کوچک‌تر به جای یک لوله جاذب با قطر بزرگ [۴]، استفاده از سیال عامل مختلف [۵] مانند نانو سیالات [۶] یا ترکیب دو نانو سیال تحت عنوان نانو سیال هیبریدی برای حل مشکل عدم جذب کامل پهنای باند یا حل ناپایداری در دماهای بالا [۷]، اعمال شیب در جمع‌کننده سهموی برای دریافت بهتر و بیشتر اشعه خورشید [۸] می‌باشد. یکی از راهکارهای پرتکرار در مطالعات، افزایش سطح انتقال حرارت توسط توربولاتورها بوده که می‌تواند باعث بهبود عملکرد لوله جاذب در جمع‌کننده‌های خورشیدی شود. در این راستا استفاده از باله‌های داخلی ضمن افزایش سطح انتقال حرارت، می‌تواند به‌عنوان توربولاتور یا مغشوش‌کننده جریان، عملکرد جمع‌کننده‌ها را بهبود بخشد [۹].

ایران جزو مناطق با پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در جهان به حساب می‌آید که دارای ۲۹۰ روز آفتابی با تابش خورشیدی بالغ بر ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز می‌باشد [۱]. با توجه به افق کوتاه‌مدت برای دوام سوخت‌های فسیلی، امروزه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی خورشیدی می‌باشد که توزیع بسیار گسترده‌ای در سراسر جهان داشته و از جمله تجهیزات کاربردی برای استفاده از آن، جمع‌کننده‌ها هستند. لوله جاذب یکی از اجزاء کلیدی جمع‌کننده در بهره‌برداری از توان خورشیدی است و عملکرد آن تعیین‌کننده‌ی میزان تابش جذب‌شده از خورشید می‌باشد [۳]. برای بهبود عملکرد لوله جاذب، جمع‌کننده خورشیدی راهکارهای مختلفی



خورشیدی سهموی بشقابی بکار رفته را مورد بررسی و ارزیابی قراردادند. دسته‌بندی آنها برای ارزیابی مقالات شامل تغییر سیالات کاری برای انتقال حرارت، جایگزینی سیالات عامل با نانوسیالات (تک و هیبریدی)، قرار دادن توربولاتورها با پیکربندی‌های مختلف طراحی و در نهایت ترکیب مزایای نانوسیال و ابزار ایجاد چرخش سیال (ژنراتور) بوده است. آنها در مقاله خود توضیحات مبسوطی در مورد اجزای مختلف تشکیل‌دهنده جمع‌کننده سهموی، فرمولیشن حاکم بر عملکرد هر بخش و نحوه عملکرد آن را ارائه نمودند. مقالات متعددی که بر روی جمع‌کننده‌های سهموی کار کردند را مرور نموده و در هر یک از دسته‌بندی‌های ارائه‌شده فوق، تعدادی مقاله را مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. اگرچه به شکل جداگانه بخش کوتاهی از مقاله خود را به ارزیابی و مرور مطالعات موجود در زمینه استفاده از نانو سیالات و همین‌طور بکار بردن توربولاتور در جمع‌کننده سهموی پرداخته بودند اما به‌طور خاص به مطالعه بر روی استفاده هم‌زمان از توربولاتور و نانو سیال هیبریدی تمرکز نکرده بودند. اکبرزاده و ولی پور [۱۹] پارامترهایی مانند تأثیر جنس و نوع پوشش لوله جاذب و پارامترهای طراحی بر بهبود راندمان حرارتی جمع‌کننده‌های سهموی را در منابع موجود مرور نمودند. همچنین اثر استفاده از نانو سیالات را نیز بر بهبود عملکرد جمع‌کننده‌های سهموی بررسی کردند. آنها نیز تأثیر توربولاتور بر عملکرد جمع‌کننده‌ها را مرور نمودند. تأثیر نانو سیالات را نیز به شکل جداگانه‌ای بررسی نمودند؛ اما تمرکز بر استفاده هم‌زمان از این دو عامل علی‌الخصوص نانوسیال هیبریدی جهت بهبود عملکرد جمع‌کننده‌ها مورد توجه آنها نبوده است. عبدالحامد و همکاران [۲۰] به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد جمع‌کننده سهموی به لحاظ هندسی و حرارتی پرداختند. آنها مشخصات هندسی اجزای مختلف جمع‌کننده و اثر تغییرات آنها بر بازده حرارتی و نوری جمع‌کننده را بررسی نمودند. در ادامه تأثیر اشکال مختلف توربولاتور بر عملکرد جمع‌کننده با تمرکز بر کاربری‌های مختلف در موارد خانگی، صنعتی و ... را بررسی کردند. اگرچه به‌صورت محدود به بررسی اشکال دیگر توربولاتور نیز پرداختند اما بیشتر به بررسی مطالعات موجود بر روی توربولاتورهای مارپیچ تمرکز کردند و اشاره متمرکز و دقیقی به سیالات استفاده‌شده در آنها ننموده‌اند. در واقع مقایسه دقیقی برای عملکرد جمع‌کننده‌ها همراه با توربولاتور و سیال نانو (مونو و هیبریدی) و سیالات ساده انجام نداده‌اند. زابلی و همکاران [۲۱] نیز تأثیر انواع توربولاتور و نانو سیالات را بر عملکرد جمع‌کننده‌های صفحه تخت را مرور کردند که تمرکز آنها بیشتر بر بررسی پارامترهای مختلف

وجود گردابه‌ها و اغتشاشات در جریان می‌تواند باعث بهبود پارامترهای مربوط به انتقال حرارت سیال شود [۱۵-۱۰]. توربولاتورها انواع و اشکال مختلفی دارند که در مطالعه حاضر دسته‌بندی آنها بر اساس شکل بوده و مطالعات انجام‌شده بر روی هر دسته مرور شده‌اند. در ادامه، تأثیر استفاده از نانو سیالات (به‌ویژه نانو سیال هیبریدی) در کنار توربولاتور در بهبود عملکرد لوله جاذب در جمع‌کننده‌های خورشیدی در مطالعات پیشین بررسی شده است.

۲- انواع توربولاتور

توربولاتورها در لوله‌ها در دو نوع کلی دسته‌بندی می‌شوند. در دسته اول با ایجاد دندان، موج، فرورفتگی یا برآمدگی در دیواره داخلی لوله نوعی از توربولاتور یا مغشوش‌کننده جریان شکل می‌گیرد؛ اما در دسته دوم با قرار دادن مانع یا عضو خارجی در لوله، گردابه یا اغتشاش در جریان سیال ایجاد می‌شود. نذیر و همکاران [۱۶] مهم‌ترین یافته‌های مطالعات عددی و تجربی بر روی عملکرد و تأثیر توربولاتورها از هر دو گروه ذکر شده را بررسی نمودند. بر اساس مطالعه آنها، اگرچه عدد ناسلت در لوله‌های موج‌دار در مقایسه با لوله‌های معمولی کمی بالاتر ثبت شده بود، اما به دلیل افت فشار پایین‌تر مربوط به تغییرات موجی شکل، به‌کارگیری آنها بیشتر گزارش شده است. در مقابل وجود توربولاتورهای مختلف جریان به‌عنوان مانع، با بالا بردن اختلاط و مغشوش کردن جریان علی‌رغم تولید افت فشار بالا باعث دستیابی به اعداد ناسلت بالاتری می‌شوند. در کنار ایجاد اغتشاش و گردابه‌ای که توسط توربولاتور در لوله جاذب اتفاق می‌افتد، سیال کاری نیز باید توانمندی بالایی در انتقال این حرارت به مصرف‌کننده نیز داشته باشد؛ یعنی نقش سیال عامل در کنار توربولاتور موضوعی است که در مطالعه نذیر و همکاران بررسی نشده است.

آی سا و همکاران [۱۷] در بخش اعظم مقاله مروری خود، مطالعات متعددی که اثر استفاده از انواع نانو سیالات (عمدتاً مونو نانو سیالات) بر روی عملکرد حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی را مورد تحلیل قرار داده بودند را بررسی کردند. در ادامه به شکل بسیار مختصر چند نمونه توربولاتور (نوع میله‌ای و مارپیچ) استفاده‌شده در مطالعات موجود که در آنها نانو سیال نیز بکار رفته بود را مورد ارزیابی قرار دادند. در واقع آنها دسته‌بندی مشخصی بر روی اشکال مختلف توربولاتور به شکل گسترده انجام نداده و اثر نانوسیالات هیبریدی را توأم با توربولاتور بررسی ننموده‌اند. عابد و افغان [۱۸] راهکارهای مختلفی که در مقالات برای بهبود و افزایش بازده حرارتی و نوری جمع‌کننده‌های

آن مانند جنس نانو ذرات، نوع سیال پایه، کسر حجمی نانو ذرات و ... بر راندمان حرارتی جمع کننده صفحه تخت بوده است. تمرکز آنها بیشتر بر روی مونو نانوسیالات بوده که انواع پرکاربرد آن را شناسایی نمودند. همین‌طور اظهار داشته‌اند بیشترین نوع توربولاتور مورد استفاده در جمع کننده‌های صفحه تخت نوع ماریچ بوده که ۳۰٪ کاربردها را به خود اختصاص داده‌اند که بهبود بازده تا حدود ۸۶/۵٪ را به همراه داشته است. در نهایت به بررسی اثر کاربرد هم‌زمان اثر نانو سیال و توربولاتور در جمع کننده‌های صفحه تخت پرداختند. آنچه به‌طور واضح در مطالعه آنها به‌عنوان پیشنهاد ادامه بررسی‌ها برای محققین در آینده مطرح شده، بررسی و مرور بر روی مطالعات با کاربرد هم‌زمان توربولاتور و نانو سیالات هیبریدی و مونو به شکل مجزا می‌باشد. این موضوعی است که در مطالعه پیش رو به آن پرداخته شده است و وجه تمایز و نوآوری پژوهش حاضر با مطالعه آنها می‌باشد.

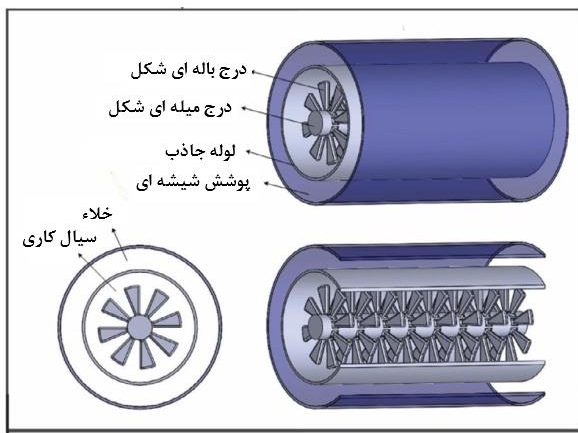
در پژوهش حاضر به بررسی انواع توربولاتورهای بکار رفته در لوله‌های جاذب جمع کننده‌های خورشیدی و تحلیل اثر آنها بر عملکرد جمع کننده پرداخته می‌شود. هم‌زمان استفاده از نانو سیالات (مونو یا هیبرید) نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. البته تمرکز بر تحلیل رفتار جمع کننده‌های خورشیدی با نانو سیالات هیبریدی همراه با توربولاتور می‌باشد. اگرچه بررسی توربولاتورها و نانو سیالات در جمع کننده‌های خورشیدی در مطالعات پیشین نیز وجود دارد اما وجه تمایز پژوهش حاضر با آنها در این است که در آنها دسته‌بندی دقیق و گسترده‌ای بر روی اشکال مختلف توربولاتور کمتر مشاهده می‌شود. در ضمن تمرکز هم‌زمان بر روی توربولاتور و بررسی نوع نانو سیال استفاده شده علی‌الخصوص نانو سیالات هیبریدی در هیچ از یک مقالات قبل دیده نمی‌شود. به‌عنوان نوآوری بعدی پژوهش حاضر باید به دو جدول ارائه شده در بخش ۳ اشاره نمود که دو پارامتر شاخص معیار ارزیابی عملکرد (PEC) و محدوده عدد رینولدز مورد ارزیابی در مقالات ارائه نموده است که از این جهت می‌تواند مهم و مفید باشد که در کاربردهای واقعی جمع کننده‌های خورشیدی و صنایع وابسته به انرژی خورشیدی (صنایع نمک‌زدایی آب دریا، گرمایش هوا، نیروگاه‌ها، تبرید و ...) اطلاعات مفید و دقیقی را برای استفاده‌کنندگان در اختیار قرار می‌دهد.

۱-۲- به‌کارگیری توربولاتورها با ایجاد تغییر در ساختار لوله جاذب (دسته اول)

در معرفی انواع توربولاتور بکار رفته در مطالعات پیشین می‌توان به ایجاد شیار، موج‌دار کردن لوله و یا ایجاد سوراخ در دیواره لوله اشاره

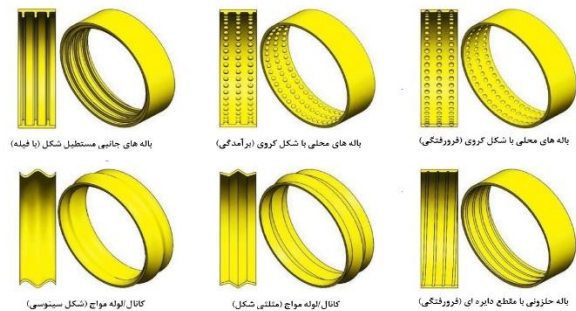
نمود که با اعمال این تغییرات در دیواره لوله جاذب، اغتشاش بیشتری در جریان ایجاد می‌شود. برخی از انواع این توربولاتورها در شکل (۱) قابل مشاهده است. در مطالعه ردی و ساتیانارایانا [۲۲] این نوع توربولاتور یافت شد. آنها با ایجاد اشکال موج‌دار با سطح مقطع‌های متفاوت (دایروی، دوزنقه‌ای، مثلثی و مربعی) در دیواره لوله، اثر آنها را بر عملکرد جمع کننده خورشیدی سهموی بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که باله‌های دوزنقه‌ای بیشتر از سایر اشکال، انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. مقایسه نتایج حاصل از بکار بردن لوله جاذب موج‌دار همراه با فرورفتگی و یا برآمدگی روی دیواره داخلی لوله با حالت وجود پره‌های ماریچ در لوله جاذب جمع کننده سهموی، بیانگر عملکرد بهتر در افزایش انتقال حرارت برای لوله جاذب با فرورفتگی در مقایسه با لوله با برآمدگی و یا با باله‌های ماریچ بوده است. از طرفی گودی با عمق بیشتر و گام باریک‌تر در جهت محیطی برای بهبود عملکرد افزایش انتقال حرارت مفید بوده است [۲۳]. موج‌های پره‌ای شکل داخلی و بررسی پارامترهای مرتبط با آن از جمله خستگی حرارتی، تلفات فشار، تنش‌های حرارتی-مکانیکی و تلفات حرارتی در مطالعه مونوز و آبانادر [۲۴] یافت شد که اثراتی برابر با ۱۸٪ و ۱۰٪ تغییر به ترتیب در انتقال حرارت و افت فشار را باعث شده بودند. در عمل برخی جمع کننده‌ها علی‌رغم داشتن نرخ جریان هوای کمتر، به دماهای بالاتری باید برسند. با افزودن برآمدگی‌های پین شکل به دیواره لوله جاذب می‌توان چنین دماهای بالایی را تولید نمود که مطالعه آزمایشگاهی توسط ژائو و همکاران [۲۵] در این زمینه انجام شده است و نتایج برای سه نوع جمع کننده مختلف باهم مقایسه شدند. دمای خروجی جمع کننده‌های هوایی خورشیدی به‌طور قابل توجهی به سه عامل تابش خورشیدی، سرعت جریان هوا و پارامترهای هندسی باله پین بستگی دارد. بر اساس نتایج آنها هر چه نرخ جریان هوا کمتر باشد، استفاده از لوله‌های جاذب با پره داخلی مفیدتر است. از طرفی در جمع کننده‌های با نرخ جریان هوای بالاتر، افزایش افت فشار بیشتر از افزایش مقدار گرما بوده که در نتیجه جمع کننده‌های خورشیدی با لوله‌های صاف راندمان حرارتی-هیدرولیکی بالاتری را نشان داده‌اند. راندمان مؤثر جمع کننده در نرخ جریان هوا ۵۰ تا ۱۲۰ نیوتن‌متر مکعب در ساعت با و بدون استفاده از پره‌های پین شکل به ترتیب از ۴۲/۱۸، ۵۶٪ و از ۳۲/۴٪ تا ۴۱/۵٪ متغیر بود. بازده انرژی ابتدا با سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد و قبل از کاهش بیشتر با سرعت جریان هوا به حداکثر می‌رسد.

در مقادیر بالاتر رینولدز باعث اختلال در عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات^۲ جمع کننده سهموی می‌گردد. علاوه آنها بر اساس نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی ۱۴٪ صرفه‌جویی در مصرف مواد داشته‌اند. مقایسه عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات برای لوله‌های جاذب صاف با پره‌های طولی شکل پر شده از سیال گازی توسط بلووس و همکاران انجام شده که بر اساس نتایج آنها طول پره بارانمان جمع کننده و افت فشار نسبت مستقیم داشته است. همچنین نوع پره‌دار بهبودی در راندمان برابر با ۸۲٪ نسبت به نوع صاف داشته [۲۹] و البته عدد ناسلت افزایش ۶۵/۲ برابری را نشان داده بود [۳۰].



شکل ۲: توربولاتور استفاده شده توسط راشد و همکاران [۲۸]

برخی از منابع موجود، پره‌های طولی میله‌ای با سطح مقطع‌های متفاوت را بررسی نمودند که شکل سطح مقطع در عملکرد کلی پره مؤثر بوده است و لذا میزان اغتشاش تولید شده و خصوصیات حرارتی جمع کننده را تحت الشعاع قرار می‌دهند. سطح مقطع توربولاتورهای میله‌ای اشکال مختلفی از جمله مستطیلی، مثلثی و مخروطی داشته‌اند که محققین، اثر آنها را در ایجاد اغتشاش و بهبود راندمان حرارتی بررسی نمودند. جمع کننده‌هایی که سیال عامل آنها در فاز گازی هستند معمولاً ضرایب انتقال حرارت پایینی دارند که برای جبران آن می‌توان از پره‌های میله‌ای شکل استفاده کرد. آناند و کومار [۵] از پره با سطح مقطع‌های مختلف مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای، T شکل و Y شکل برای بهبود عملکرد حرارتی جمع کننده سهموی استفاده کرده و با بررسی خصوصیات حرارتی آنها، بهترین شکل برای سطح مقطع را از بین آنها انتخاب نمودند. بر اساس گزارش آنها، بهترین نوع پره با پروفیل مستطیل شکل بوده که افزایش ضریب انتقال حرارت آن در مقایسه با لوله جاذب صاف ۲۳/۸۱٪ بوده است. انواع توربولاتور



شکل ۱: تغییرات ایجاد شده در دیواره لوله به عنوان توربولاتور [۱۶]

۲-۲- به کارگیری توربولاتور به شکل افزونه در لوله جاذب

قرار دادن افزونه‌های اضافی در لوله جاذب جمع کننده‌ها که جزو دسته دوم توربولاتورها می‌باشند، بیشتر مورد توجه محققین بوده است [۱۶]. این توربولاتورها اشکال مختلف با سطح مقطع‌های متفاوتی داشتند از جمله می‌توان به توربولاتورهای میله‌ای شکل با سطح مقطع‌های مختلف اشاره نمود. دسته دیگر شامل توربولاتورهای مارپیچ یا سیم پیچ شکل و دسته آخر توربولاتور، شامل صفحات سوراخ‌دار و محیط متخلخل می‌باشد که در ادامه به تفصیل به مرور مطالعات انجام شده در این زمینه‌ها پرداخته خواهد شد.

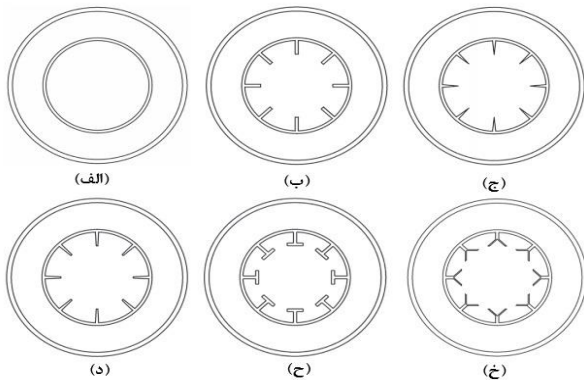
۲-۲-۱- توربولاتورهای میله‌ای و دنده‌ای شکل

یکی از انواع پر کاربرد توربولاتورها، نوع میله‌ای شکل آن است که برای بهبود خصوصیات حرارتی جمع کننده‌ها استفاده شده است [۲۶]. تغییر هندسه سطح مقطع پره میله‌ای شکل مانند افزایش طول و ضخامت آن باعث بهبود عدد ناسلت، راندمان حرارتی و همین‌طور افزایش ضریب اصطکاک جمع کننده شده بود. محل قرارگیری پره نیز مهم است. بر اساس مطالعات انجام شده قرار گرفتن پره در نیمه پایینی لوله جاذب باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود [۲۷]. الراشد و همکاران [۲۸] با به کارگیری یک توربولاتور میله‌ای پره‌دار (شکل ۲) در لوله جاذب یک جمع کننده متمرکز بشقابی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی و اقتصادی آن را بررسی نمودند. متغیرهای مورد بررسی آنها شامل تغییرات زاویه و گام پره، قطر میله و عدد رینولدز بوده است. طبق یافته‌های آنها زاویه‌های مختلف گام باله‌ها بر شاخص^۱ PEC پیش‌بینی شده در داخل جمع کننده سهموی، تأثیر معنی‌داری داشته که این شاخص تقریباً با افزایش گام باله‌ها تشدید می‌شود. همچنین مشاهده شد که شاخص PEC پیش‌بینی شده با افزایش عدد رینولدز کاهش یافته است. نتایج آنها حاکی از آن است که استفاده از توربولاتور میله‌ای پره‌دار در اعداد رینولدز کمتر از ۱۲۰۰۰ مناسب بوده است و

² Hydrothermal

¹ Performance Evaluation Criteria

عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات و ترمودینامیکی لوله جاذب بهبود یافته بود. همین‌طور در مقایسه با لوله صاف، عدد ناسلت $۰.۲۵۶/۳ - ۰.۸۳۸/۷$ و ضریب اصطکاک $۰.۴۴۰/۳ - ۰.۷۸۸/۸$ افزایش داشته و در معیارهای ارزیابی عملکرد، کاهش تولید کل آنتروپی و بازده اگزرتیک حداکثر مقدار $۰.۳۶۰/۳$ ، $۰.۹۳۳/۳$ افزایش را نشان داده بودند. آنها به‌طور کلی نتیجه گرفتند که درج ساختار هیبریدی فوم فلزی نیمه حلقوی و باله‌ای شکل ($SAFM^1$) گزینه خوبی برای بهبود عملکرد مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات و ترمودینامیکی لوله جاذب در مقایسه با فوم فلزی نیمه حلقوی تک (SAM^2) یا فوم فلزی شکل باله (FM^3) است. درجه افزایش PEC بین $۱۹/۷ - ۲۳۴/۷$ ، راندمان اگزرتی بین $۱۱/۸ - ۱/۱$ و درجه کاهش تولید آنتروپی $۳۱۱/۷ - ۲۱/۵$ است.



شکل ۳: انواع توربولاتور میله‌ای با سطح مقطع‌های متفاوت الف) بدون توربولاتور ب) مستطیلی ج) مثلثی د) دوزنقه‌ای ح) Y شکل خ) T شکل [۵]

توربولاتورهای دنده‌ای نیز نوع دیگری از مغشوش کننده‌های جریان هستند که توسط محققینی از جمله ژو و همکاران [۳۷] در دو شکل دنده‌ای W و C در دیواره‌های لوله جاذب جایگذاری شدند. این نوع توربولاتورها اگرچه باعث بهبود عملکرد حرارتی می‌گردند اما افت فشار را نیز افزایش می‌دهند. همچنین شیانگتائو و همکاران [۳۸] با تعبیه پره پین شکل در نیمه پایینی لوله جاذب خصوصیات حرارتی و توزیع جریان سیال را داخل لوله جاذب جمع کننده سهموی بررسی کردند. آنها سه حالت تک پین، سه پین و تعبیه پین در نیمه پایینی لوله را باهم مقایسه نمودند که دریافتند با افزایش تعداد پین بازده حرارتی سیستم و البته افت فشار نیز افزایش می‌یابد. نتایج آنها بیانگر بهبود عدد ناسلت و عملکرد حرارتی جاذب به ترتیب تا $۹/۰$ و $۱۲/۰$ بوده است. یکی دیگر از اشکال توربولاتورهای استفاده‌شده در مطالعات نوع

استفاده‌شده در مطالعه مذکور در شکل (۳) نشان داده شده است. پره‌های طولی مستطیلی شکل به همراه یک محافظ داخلی بازتابنده کمکی در لوله جاذب در جمع کننده سهموی در مطالعه بلووس و تزیوانیدیس [۳۱] نیز مطالعه شده بود. دلیل استفاده از این دو امکان در کنار هم افزایش راندمان حرارتی با دمای عملیاتی بالاتر بوده است چراکه لایه محافظ باعث انعکاس تلفات حرارتی به سطح جاذب می‌شود. افزایش راندمان حرارتی و اگزرتی در سطوح دمای عملیاتی بالاتر و در نرخ‌های جریان حجمی پایین‌تر شدیدتر است. در همین راستا آنها بهبودی معادل $۰/۹$ را در نتایج مربوط به افزایش حرارتی ثبت کردند. دبی جرمی ورودی به لوله جاذب نیز از جمله پارامترهایی است که تغییرات آن بر روی عملکرد جمع کننده‌ها با و بدون پره داخلی طولی در لوله جاذب [۳۲] و همراه با ارتفاع‌های مختلف پره [۳۳] توسط بلووس و همکاران با احتساب معیارهای ارزیابی بر پایه مفاهیم انرژی و اگزرتی بررسی شده بود. طبق نتایج آنها، حداکثر راندمان اگزرتی مربوط به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر بوده که برابر با مقدار $۴۵/۹۵$ گزارش شده است. از طرفی تعداد و مکان مناسب پره‌های داخلی در لوله جاذب نیز بر عملکرد جمع کننده‌های سهموی مؤثر بوده است. با کمک معیار افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، مشخص شده که قرارگیری پره‌های مستطیلی در قسمت پایینی جاذب جایی که شار گرمای خورشیدی متمرکز است عملکرد بهتری را نشان داده است. آنها به‌طور کلی نتیجه گرفتند که استفاده از باله در قسمت فوقانی افزایش قابل توجهی در عملکرد ارائه نمی‌دهد. همچنین تعداد بیشتر پره‌ها منجر به بازده حرارتی بالاتر و افت فشار بیشتر شده و علاوه بر این، معیار ارزیابی عملکرد (PEC) با افزایش تعداد باله بالاتر رفته بود [۳۴].

فیلیپ و همکاران [۳۵] بر روی توربولاتورهای با مقطع مثلثی و مستطیلی در لوله جاذب جمع کننده صفحه تخت کار کردند. طبق تحقیقات آنها افزایش زاویه حمله صفحه توربولاتور باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. عملکرد پره‌های مختلف با مقاطع متفاوت مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای در بستر یک ساختار نیمه حلقوی فوم فلزی جانمایی شده در نیمه پایینی لوله جاذب یک جمع کننده سهموی توسط پنگ و همکاران [۳۶] مطالعه شده بود. آنها تغییرات در انتقال حرارت جابجایی اجباری آشفته و جریان تحت شار حرارتی غیریکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج گزارش شده،

² Semi-Annular Metal foam

³ Fin shape Metal foam

¹ Semi-Annular and Fin shape Metal foam

استفاده از تکنولوژی‌هایی چون سیم‌پیچ یا سیم مارپیچ در دیواره داخلی لوله، لوله با فرورفتگی و ... نیز توسط تو و بنیتو [۴۹] بررسی شده بودند. عملکرد توربولاتور به شکل سیم‌پیچ و نوار مارپیچ بر روی رفتار حرارتی جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت توسط کارسیا و همکاران [۵۰] مطالعه شده بود. بر اساس یافته‌های آنها، نوار پیچ‌خورده باعث افزایش افت فشار شده اما این موضوع برای سیم‌پیچ به‌شدت وابسته به هندسه آن بوده است که در صورت مقدار افت فشار آن کمتر از نوار تاب‌خورده بوده است؛ اما در مورد بهبود عملکرد حرارتی، همه انواع توربولاتورها باعث بهبود عملکرد لوله جاذب نسبت به لوله صاف‌شده بودند اما در کل سیم‌پیچ‌ها نسبت به توربولاتورهای مارپیچ بهبود بیشتری را به همراه داشتند. استفاده از سیم‌پیچ با مقطع مثلثی به‌عنوان توربولاتور برای بهبود عملکرد لوله جاذب جمع‌کننده سهموی توسط یلماز و همکاران [۵۱] مورد توجه بوده است. نتایج آنها بهبود قابل توجهی را در عملکرد حرارتی گیرنده با استفاده از میله تاب‌خورده سیم‌پیچ شکل در کل لوله، به دلیل افزایش اختلاط سیال، اختلال در لایه‌مرزی حرارتی و کاهش دمای لوله جاذب، نشان داده بود که انتقال حرارت تا 183% و راندمان حرارتی بین $0/4 - 1/4\%$ بهبود داشته‌اند. از آنجایی که استفاده از درج به‌ویژه با افزایش اعداد رینولدز باعث افت فشار قابل توجهی می‌شود، نرخ‌های تولید آنتروپی با استفاده از درج‌ها برای محدوده پارامترهای در نظر گرفته‌شده همچنان کاهش یافته است. همچنین در کمترین نرخ جریان، افزایش راندمان حرارتی قابل توجهی مشاهده شده بود، با این حال، انرژی خروجی بسیار کمتر بوده و گرادیان دما در لوله جاذب قابل توجه گزارش شده بود؛ بنابراین، استفاده از درج‌ها در نرخ‌های پایین جریان سیال عامل برای عملکرد ایمن گیرنده طی سال‌ها بدون از دست دادن عملکرد، ضروری به نظر می‌رسد. قاسمی [۵۲] از یک توربولاتور نواری پیچ‌خورده در لوله جاذب استفاده کرد. او با تغییر زاویه تاب خوردگی عملکرد هیدرودینامیکی جمع‌کننده را بررسی نمود که حداکثر بهبود راندمان حرارتی و ضریب اصطکاک را به ترتیب برابر با $45/04\%$ و $91/11\%$ به دست آورد. همچنین تعداد پیچ‌های داخلی یک لوله مارپیچ نیز بر میدان جریان و انتقال حرارت تأثیر دارد که توسط وانگ و همکاران [۵۳] مطالعه شد. شیخ‌الاسلامی و همکاران [۵۴] با در نظر گرفتن یک توربولاتور مارپیچی داخل مجرای دایره‌ای لوله جاذب یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت، اثر عدد رینولدز و زاویه مارپیچ را بر رفتار گرمایی نانو سیال داخل لوله مطالعه نمودند. همان نویسندگان [۵۵] تأثیر نوار مارپیچ در جریان آشفته نانو سیال را نیز با کمک قانون دوم

مخروطی شکل بوده است که بر اساس مطالعه ایزدی و همکاران [۳۹] استفاده از آن می‌تواند انتقال حرارت را $11/91\%$ بهبود دهد. مطالعه بر روی باله‌های ستاره‌ای شکل در لوله جاذب جمع‌کننده‌های سهموی توسط بلووس و تزیوانیدیس [۴۰] انجام شده بود. آنها محدوده دمای ورودی بین $400 - 600$ کلوین با دبی حجمی 150 لیتر بر ثانیه را برای ابعاد مختلف باله‌ها بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که باله با ابعاد بزرگ‌تر باعث بهبود عملکرد از منظر معیارهای راندمان حرارتی، راندمان انرژی و راندمان کلی جمع‌کننده شده به قسمی که افزایش در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت تا 60% بوده است. این پیشرفت‌ها منجر به کاهش تلفات حرارتی تا 14% شده بود. افزایش قابل توجهی در افت فشار و در نتیجه در تقاضای کار پمپاژ وجود داشته که تا 900% می‌رسید. بعلاوه درج‌های ستاره‌ای بهینه دارای باله‌هایی با ضخامت 5 میلی‌متر بودند. طول باله بهینه درج ستاره بین 20 میلی‌متر تا 30 میلی‌متر است. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند زمانی که سیستم در دماهای بالاتر کار می‌کند، طول باله بهینه بیشتر بوده است. عملکرد توربولاتور ستاره‌ای همراه با لوله جاذب با پره‌های طولی داخلی با مقطع مستطیل شکل در جمع‌کننده‌های خورشیدی سهموی توسط وحیدی نیا [۴۱] بررسی شد. وی به این نتیجه رسید که هر چه ابعاد پره داخلی بزرگ‌تر باشد، اختلاط جریان بیشتر بوده و بازده انرژی و انرژی جمع‌کننده بهبود بیشتری می‌یابد که حداکثر مقدار این بهبود را برای بازده انرژی و انرژی برابر با $5/96\%$ و $6/76\%$ گزارش نمود. همین‌طور حداکثر معیار ارزیابی عملکرد نیز $1/62$ بوده است. علاءالدین و همکاران [۴۲] نیز دو نوع توربولاتور دنده‌ای پین شکل با مقطع دایره‌ای و توربولاتور دنده‌ای مایل محیطی را بررسی نمودند. بر اساس تحقیق آنها، توربولاتور شیب‌دار دنده‌ای به مقدار قابل توجهی عملکرد ترموهیدرولیک جمع‌کننده را بهبود داده است و عدد PEC آن به مقدار $1/46$ رسیده بود.

۲-۲-۲- توربولاتورهای مارپیچ و سیم‌پیچ

افزونه‌های مارپیچ به‌عنوان موانع بکار رفته در مسیر جریان اگرچه افت فشار را افزایش می‌دهند اما با تولید مولدهای گردابی باعث افزایش عملکرد حرارتی سیستم‌های انتقال‌دهنده حرارت می‌شوند [۴۸-۴۳]. در کاربرد موج‌های پره‌ای شکل داخلی، ویژگی‌هایی چون خستگی حرارتی، تلفات فشار، تنش‌های حرارتی-مکانیکی و تلفات حرارتی را می‌توان مدنظر قرارداد. در این راستا در مطالعه انجام‌شده بر روی لوله‌های باله‌دار مارپیچ که توسط مونوز و آبانادز [۲۴] انجام شده، مقدار 18% بهبود در انتقال حرارت و 10% افزایش افت فشار گزارش شده است.

ترمودینامیک ارزیابی کردند. شیخ‌الاسلامی و فرشاد [۵۶] یک لوله شش‌ضلعی را جایگزین لوله دایره‌ای دارای توربولاتور مارپیچ کردند که باعث اتلاف انرژی ۱۸٪ کمتر شده بود. همچنین آنها اثرات توربولاتور بر انرژی تولیدشده و خصوصیات انتقال حرارت لوله جاذب پر شده با نانو سیال آب/آلومینیوم را بررسی نمودند [۵۷]. مقایسه نتایج عملکرد بین جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت با لوله جاذب پره‌دار و توربولاتور مارپیچ با جمع‌کننده معمولی توسط کومار و چاند [۵۸] انجام شد. آنها با تغییر در نسبت پیچش از ۸ به ۲ دریافتند که با کاهش نسبت پیچش مقدار راندمان حرارتی از ۷۲/۵۳٪ به ۷۴/۴۲٪ افزایش می‌یابد؛ یعنی نوار پیچ‌خورده با حداقل نسبت پیچش از نظر حرارتی بهتر عمل می‌کند. از طرفی کاهش نسبت پیچش منجر به افزایش افت فشار در مجرا شده بود؛ بنابراین راندمان مشخصه‌های انتقال حرارت و مکانیک سیالات پایین‌تر در نرخ جریان جرمی بالاتر و نسبت پیچش حداقل مشاهده شده بود. پرامانگ و ایامسا [۵۹] از توربولاتور حلقوی مارپیچ مخروطی در لوله جاذب جمع‌کننده صفحه تخت استفاده نمودند. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها تجربی، استفاده از این نوع توربولاتور باعث بهبود عدد ناسلت و راندمان حرارتی به میزان ۱۰-۴٪ و ۸-۴٪ شده بود.

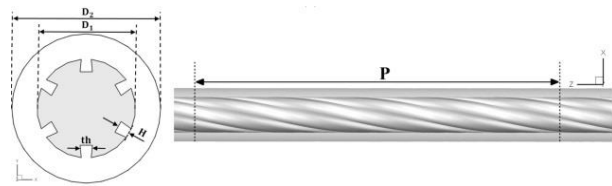
پره محوری مارپیچ داخلی با هندسه‌های مختلف و گام‌های متفاوت (شامل ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متر) می‌تواند به‌عنوان توربولاتور بکار رود که باعث ۲۳/۱٪ بهبود در عملکرد حرارتی جمع‌کننده سهموی در مقایسه با نمونه ساده شده بود (شکل (۴)) [۶۰]. کاربرد پره‌های داخلی طولی سینوسی شکل در جمع‌کننده‌های سهموی با هدایت جریان به جهات مختلف و افزایش انتقال حرارت همرفت در نزدیک باله‌ها نیز توزیع یکنواخت دمای سیال را فراهم کرده و دمای محیطی گیرنده را کاهش داده بود. همچنین مشاهده شد که مهم‌ترین عاملی که باعث افزایش انتقال حرارت و ضریب اصطکاک می‌شود، مقدار دامنه برای باله با سطح جانبی سینوسی بوده است. علاوه تغییر دامنه هندسه سینوسی بر اختلاف دمای محیطی گیرنده مؤثرتر بوده است. در این مطالعه حداکثر بهبود عدد ناسلت به مقدار ۷۸٪ ایجاد شد [۶۱]. در پژوهشی دیگر، عملکرد یک نوار مارپیچ داخل جمع‌کننده سهموی در فرایندهای آنتالپی کم و بدون تغییر فاز در سیال حرارتی، مورد ارزیابی قرار گرفت. در حضور یک نوار پیچ‌خورده، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و راندمان حرارتی نسبت به موارد مرتبط با یک لوله خالی افزایش می‌یابد، زیرا هر دو نسبت پیچش (y/w) و عدد رینولدز کاهشی بوده‌اند. همچنین تجزیه و تحلیل بر اساس قانون

دوم ترمودینامیک نشان داده بود که افزایش بازده انرژی تنها در شرایط خاصی صورت می‌گیرد. علاوه بر این، حداقل نرخ برگشت‌ناپذیری ممکن است برای ترکیب خاصی از نسبت پیچش y/w و عدد رینولدز وجود داشته باشد [۶۲]. مشخصات هندسی نوار مارپیچ (شامل حالات مختلف برای پیچ‌وتاب نوار و نسبت عرض نوار مارپیچ) جزو پارامترهای تأثیرگذار بر ایجاد اغتشاش و بهبود خصوصیات حرارتی جمع‌کننده‌ها گزارش شده که بر اساس نتایج ام‌وسگی و همکاران [۶۳] بهبود قابل‌توجهی در حدود ۱۶۹٪ را در عملکرد حرارتی جمع‌کننده نسبت به لوله ساده ایجاد کرده بود. همچنین کاهش اختلاف دمای محیطی لوله جاذب به مقدار ۶۸٪ و افزایش راندمان حرارتی به مقدار ۱۰٪ نسبت به لوله جاذب ساده گزارش شده بود. علاوه، هم انتقال حرارت و هم اصطکاک سیال با کاهش نسبت پیچش و با افزایش نسبت عرض، افزایش یافتند. انتقال حرارت در محدوده ۶۹/۰۵-۲/۱ برابر، افزایشی بوده در حالی که اصطکاک سیال در محدوده ۵/۶-۱۴/۱ در مقایسه با گیرنده با یک لوله جاذب ساده افزایش یافته بود. فاکتورهای تقویت حرارتی برای مقایسه توان پمپاژ ثابت در محدوده ۷۴-۰/۲۷-۱۷ بوده است. استفاده از نوارهای با پیچ حلزونی برای همگن کردن توزیع دمای لوله جاذب و بهبود راندمان حرارتی جمع‌کننده توسط سانگ و همکاران [۶۴] پیشنهاد شد. بر اساس نتایج آنها در محدوده رینولدز مورد مطالعه، استفاده از این نوع توربولاتور به میزان زیادی افت گرما، دمای ماکزیمم و گرادیان دما را کاهش داده به قسمی که نشان از عملکرد مناسب توربولاتورهای حلزونی شکل (شکل (۵)) برای بهبود انتقال حرارت در لوله‌های جاذب جمع‌کننده‌های خورشیدی می‌باشد. همچنین آنها اثر زاویه تابش خورشیدی بر توزیع شار حرارتی در اطراف سطح خارجی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و دریافتند که تأثیر زاویه عرضی بر توزیع شار بیشتر از زاویه طولی است. همچنین زاویه عرضی برابر با ۱۱/۵۶ میلی رادیان باعث تغییر نسبی اتلاف حرارت با افزایش دمای ورودی شده بود و حداکثر اختلاف دمای محیطی نیز افزایش یافته که اثر آن با افزایش عدد رینولدز کاهشی بوده است (شکل (۶)).

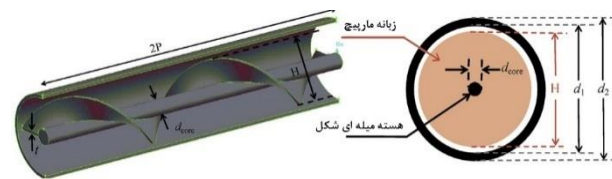
یکی دیگر از انواع مغشوش‌کننده‌های جریان موانع سوراخ‌دار هستند که مانند بافل‌ها در مبدل‌های حرارتی عمل می‌کنند. به دلیل برخورد سیال با این موانع و عبور از داخل سوراخ‌های موجود، اغتشاشاتی در داخل جریان ایجاد شده که باعث بهبود خصوصیات حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی می‌شود که برای لوله‌های با موانع دارای ۳ و ۱ سوراخ بهبودی به ترتیب برابر با ۱۱۵٪، ۱۰۸٪ نسبت

برای ایجاد اغتشاش در جریان داخل لوله جاذب بوده که توسط ردی و همکاران [۶۷] بکار گرفته شد. آنها با تغییر در نسبت‌های مختلف غلظت روغن ترمینول VP-1، سرعت جریان و پارامترهای هندسی را مورد بررسی قرار دادند. بررسی انتقال حرارت ترکیبی رسانش-همرفت-تابش با اعمال محیط‌های متخلخل نیز در جمع‌کننده‌های خورشیدی به‌عنوان یک مبدل حرارتی امکان‌پذیر است. دهقان و همکاران [۶۸] اثرات تغییر در پارامتر شکل محیط متخلخل و پارامترهای تابش بر عملکرد حرارتی را با روش تفاضل محدود تجزیه و تحلیل نمودند. آنها دریافتند که با گنجاندن تعریف هدایت تابش، انتقال حرارت کلی افزایش یافته و عدد ناسلت با پارامتر شکل محیط متخلخل نیز تغییر می‌کند به این معنی که اگر جریان در سطح مقطع یکنواخت‌تر باشد، انتقال حرارت بهبود می‌یابد. تأثیر فوم فلزی متخلخل بر عملکرد یک جمع‌کننده صفحه تخت توسط سعدالدین و همکاران [۶۹] به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد. آنها ضخامت بهینه محیط متخلخل همچنین عملکرد حرارتی و افت فشار در جمع‌کننده با کانال متخلخل را به دست آوردند که باعث بهبود ۸۲٪ عدد ناسلت شده بود. بر اساس حل عددی، با افزایش سرعت جریان، گرادیان دمایی بدون بعد در دیواره بالایی کانال افزایش یافته و اختلاف دمای کمتری بین دیواره و سیال ایجاد شده که در نتیجه منجر به عدد ناسلت بیشتر شده بود. با وجود افزایش افت فشار بدون ابعاد در هنگام استفاده از محیط متخلخل، اما این رشد آن قدر چشمگیر نیست که نشان‌دهنده نیاز به منبع انرژی بیشتر باشد. بر اساس تعریف PEC، با افزایش نرخ جریان از ۰/۵ به ۲ لیتر بر دقیقه، عملکرد جمع‌کننده از ۰/۶ به ۰/۳۹ کاهش می‌یابد. ضمناً آنها با ترکیب نتایج عددی و آزمایشگاهی توانستند حداکثر بازده حرارتی و عدد ناسلت را به مقدار ۱۸/۵٪ و ۸۲٪ بهبود بخشند. عملکرد حرارتی دو جمع‌کننده صفحه تخت مشابه با جاذب‌تر توسط جویباری و همکاران [۷۰] مقایسه شده بود. آنها کانال اولی را با محیط متخلخل پر نموده در حالی که دومی کاملاً خالی بوده است. بر اساس نتایج آنها، تخلخل در دی‌های کم تأثیر بسیاری بر روی منحنی‌های مشخصه جمع‌کننده داشته و محیط متخلخل باعث کاهش فشار معمولی شده که با افزایش عدد رینولدز به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد. همین‌طور عدد ناسلت در جمع‌کننده کانال متخلخل ارزش بیشتری دارد و مقدار آن با استفاده از رسانه متخلخل نسبتاً تا ۸۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین از تجزیه و تحلیل آنتروپی متوجه شدند که افت فشار بیشتر تأثیر زیادی بر تولید آنتروپی ندارد.

به لوله بدون مانع سوراخ‌دار ثبت کرده بودند. همچنین مقادیر ضریب اصطکاک با افزایش تعداد سوراخ‌های روی موانع کاهش می‌یابد.



شکل ۴: لوله ماریچج بررسی شده در مطالعه زابلی و همکاران [۶۰]



شکل ۵: شماتیک لوله جاذب با توربولاتور ماریچج حلزونی [۶۴]

۲-۲-۲- توربولاتورهای سوراخ‌دار و متخلخل

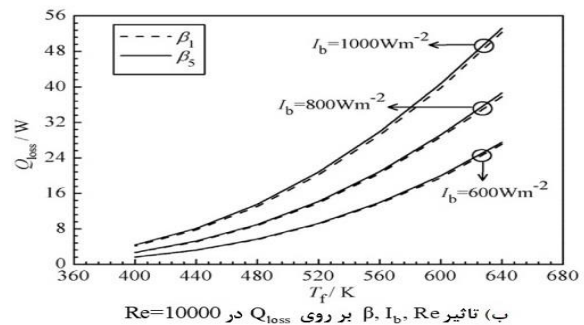
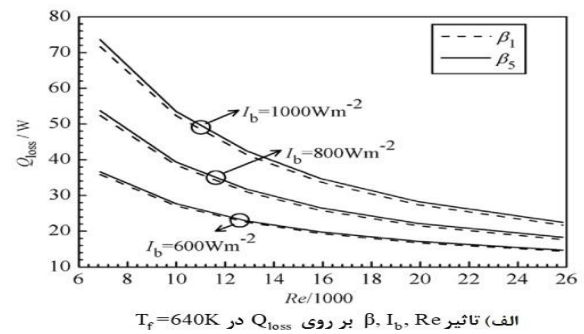
در مورد لوله بدون موانع سوراخ‌دار، مقادیر ضریب اصطکاک کمتر از تمام مقادیر مربوط به حالت درج موانع سوراخ‌دار بوده است [۶۵]. اموسگی و همکاران [۶۶] نیز در این راستا خصوصیات هندسی موانع سوراخ‌دار از جمله زاویه و جهت صفحه، فاصله و قطر صفحه را بر عملکرد حرارتی و ترمودینامیکی جمع‌کننده سهموی خورشیدی بررسی نمودند. آنها دریافتند عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به شدت به فاصله و اندازه درج و همچنین عدد رینولدز جریان بستگی دارد. برای محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی آنها، دما و پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده، افزایش عدد ناسلت ۱۳۳/۵-۸٪ برابر و افت ضریب اصطکاک ۹۵-۱/۴ برابر بوده است در حالی که ضریب افزایش حرارتی از ۱۰/۵-۰/۴۴ برابر گزارش شد. همچنین آنها بیان داشتند که استفاده از راندمان حرارتی اصلاح‌شده جمع‌کننده برای ارزیابی عملکرد، مناسب‌تر است زیرا بهره واقعی در عملکرد گیرنده و افزایش متناظر در قدرت پمپاژ را در نظر می‌گیرد. همین‌طور کاهش گرادیان دمای لوله جاذب برای کاربردهایی که به سرعت جریان پایین نیاز دارند، جایی که گرادیان دما بالاتر از ۵۰ کلوین است، مفید بوده است. کاهش دمای لوله جاذب نیز نقش مهمی در کاهش تلفات تابش داشته است؛ بنابراین کاهش گرادیان دما به مقادیر کمتر از ۵۰ کلوین عملکرد گیرنده را بیشتر بهبود بخشیده مشروط بر اینکه عملکرد به دست آمده کمتر از افزایش قدرت پمپاژ نباشد. همین‌طور آنها با تغییر در نوع سیال مورد استفاده در محدوده اعداد رینولدز مختلف و دمای متفاوت، شرایط هندسی بهینه با بهترین راندمان حرارتی اصلاح‌شده را بین ۸-۱/۲٪ گزارش کردند. استفاده از پرها یا محیط متخلخل نیز روش دیگری

متخلخل تحت جابجایی اجباری بررسی نمودند. نتایج آنها حاکی از افزایش عدد ناسلت با کاهش عدد لوئیس بوده و همچنین روند مشابهی را نیز برای عدد اشمیت گزارش نمودند.

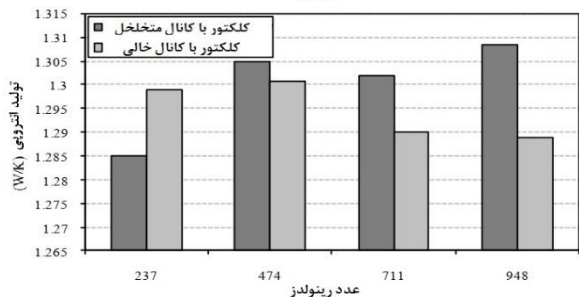
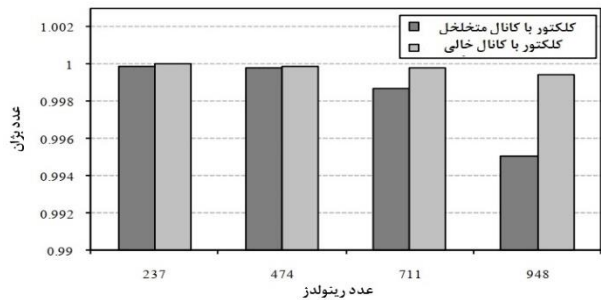
۳- تأثیر نانو سیال در عملکرد جمع‌کننده‌ها با و بدون توربولاتور

برای افزایش اثربخشی کلی جمع‌کننده خورشیدی، بهبود عوامل طراحی و ضریب انتقال حرارت جابجایی بین لوله‌های جاذب و سیال، راهکارهای مختلفی از سوی محققین پیشنهاد شده است. یکی از آنها استفاده از نانو سیال به جای سیال پایه ساده می‌باشد. اکثر تحقیقات نشان می‌دهد جایگزین کردن سیال کاری ساده با نانو سیالات اعم از نانو سیال تک یا هیبریدی می‌تواند منجر به افزایش راندمان حرارتی جمع‌کننده شود [۷۲]. وحیدی نیا و همکاران [۷۳] عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک جمع‌کننده سهموی خورشیدی را با نانو سیال هیبریدی نانولوله کربنی چند دیواره/اکسید آهن/ترمینول وی پی ۱ مطالعه کردند که باعث بهبود راندمان انرژی جمع‌کننده در حدود ۲/۵٪ و بهبود راندمان انرژی آن را نیز در حدود ۲٪ بهبود گزارش نمودند.

فتبری و هیهات [۷۴] تأثیر نوع، غلظت و درصد اختلاط نانو ذرات اکسید منیزیم و نانولوله‌های کربنی را بر خواص تابشی و راندمان جذب جمع‌کننده خورشیدی به صورت تجربی مطالعه نمودند. بر اساس مشاهدات آنها، افزایش غلظت نانو ذرات و هیبریدی شدن آن و افزایش عمق نفوذ، خواص تابشی و راندمان جذب تابش را تا ۹۰٪ بهبود داده بود. نانو سیال هیبریدی $Cu-TiO_2/H_2O$ همراه با مولدهای تولید گردابه در جمع‌کننده خورشیدی توسط نیک‌نژادی و همکاران [۷۵] مورد توجه قرار گرفته بود. بر اساس نتایج حاصله آنها، افزودن نانو سیال در کنار توربولاتور باعث بهبود عدد ناسلت و البته افزایش ضریب اصطکاک شده و نحوه قرارگیری مولدهای گردابی (افقی، عمودی و ضربدری) باعث تغییر در مقدار شاخص ارزیابی عملکرد شده بود. عملکرد نانو سیال و محیط متخلخل به شکل توأم و تأثیر آن بر راندمان جمع‌کننده خورشیدی توسط پنجا و همکاران [۷۶] مطالعه شده است. با اعمال شار حرارتی ثابت به مقدار $800-1000 \text{ W/m}^2$ بر روی سطح داخلی دیواره بیرونی لوله جاذب و تغییر در کسر حجمی نانو ذرات ۷-۲٪ در سرعت‌های جریان جرمی متفاوت باعث ثبت ضریب عملکردی برابر با ۱/۹۹ و ۱/۹۷ و بازده حرارتی برابر با ۷۹/۰۳٪ و ۷۷/۹۳٪ برای دو نانو سیال Al_2O_3 و CuO شده بود. ترکیب هیبریدی



شکل ۶: تغییرات زاویه عرضی و شدت تابش خورشیدی بر گرمای اتلافی از لوله جاذب و توربولاتور حلزونی ماریچی استفاده‌شده در مطالعه سانگ و همکاران [۶۴]



شکل ۷: تأثیر محیط متخلخل بر الف) عدد بژان و ب) تولید انرژی [۷۰] تأثیر محیط متخلخل بر روی عدد بژان و تولید انرژی در شکل (۷) قابل نشان داده شده است. استفاده از محیط متخلخل به دلیل بهبود پتانسیل جذب انرژی خورشیدی توسط سیال عامل، بازده نوری را افزایش داده و تلفات حرارتی را در مقادیر کمتر عدد رینولدز کاهش داده بود. در اعداد رینولدز بزرگ‌تر، سهم بیشتری از تابش رسیده به جمع‌کننده به محیط تلف‌شده و منجر به رشد اتلاف حرارت شده بود. ارمغانی و همکاران [۷۱] تأثیر انتقال حرارت نانو سیال را در کانال

مرکب حاوی یک سیم پیچ با سطح مقطع شش ضلعی و یک توربولاتور مارپیچ داخل سیم پیچ مذکور در لوله جاذب جمع کننده سهموی بشقابی پر شده با نانو سیال هیبریدی CuO-SWCNT/Water توسط حسینی اصفهانی و همکاران [۸۳] بکار رفته است. نرخ انتقال حرارت جمع کننده سهموی با توربولاتور مذکور بین ۶۰-۲۰٪ بهبود داشته است. معیار ارزیابی عملکرد نیز بهبود قابل توجهی (حدود ۲۰٪) را نسبت به نمونه بدون توربولاتور نشان داده است. در ضمن بازده انرژی با سیال نانو هیبریدی با کسر حجمی ۲٪ به مقدار ۳۱/۷٪ بهبود داشته است.

در مطالعه آجینا و همکاران [۸۴] افزودن نانوسیال سیلیکون کاربید بر پایه آب مقطر باعث بهبود رسانایی حرارتی سیال تا ۳۰/۳٪، راندمان حرارتی جمع کننده صفحه تخت تا ۳۵/۵۳٪ و راندمان انرژی تا ۳۷/۴٪ شده بود. بعلاوه با افزایش سرعت جریان جرمی، بازده انرژی کاهش می‌یابد. باین حال، افزایش غلظت نانوسیال منجر به افزایش بازده انرژی شده بود. بعلاوه با فرض ثابت ماندن سرعت جریان ثابت، در مقایسه با آب مقطر، بازده انرژی نانوسیالهای SiC/DW بالاتر بود. بالاترین راندمان اکسرژی در ۰/۱٪ نانوسیال SiC ثبت شد. استفاده از نانو سیال TiO₂/Water در کنار توربولاتور باعث کاهش اتلاف حرارتی در حدود ۲۸/۲۶٪ شده در حالی که راندمان حرارتی را به مقدار ۳۸/۸٪ بهبود داده بود [۸۵]. مقایسه عملکرد توربولاتور ستاره‌های ۴ و ۸ پره با توربولاتور میله‌ای و لوله جاذب بدون توربولاتور در مطالعه بیبرینگرو و همکاران [۸۶] یافت شد. آنها از نانو سیال هیبریدی MWCTN-TiO₂/Syltherm800 استفاده نمودند که مقایسه نتایج با سیال ساده Syltherm800 حاکی از عملکرد بهتر نانو سیال هیبریدی بوده است که توانسته راندمان حرارتی را تا ۲/۷٪ بهبود دهد. از بین توربولاتورهای بررسی شده توسط آنها، نوع ستاره‌ای ۸ پره بیشترین عملکرد حرارتی را داشته که عدد ناسلت ۱۴۹٪، راندمان حرارتی ۵/۱۲٪ و ضریب اصطکاک نیز به مقدار ۶/۵ برابر نسبت به لوله بدون توربولاتور افزایش داشته است.

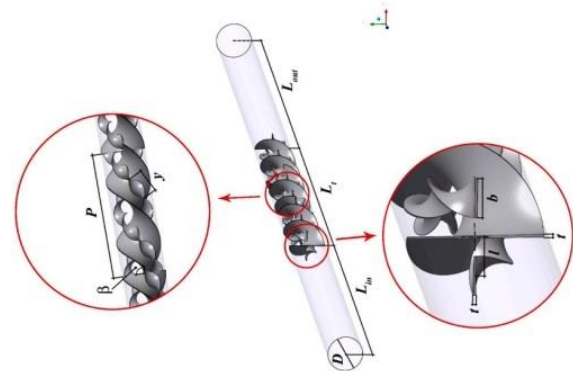
مصطفی و همکاران [۸۷] بر روی دو نوع توربولاتور با شکل نواری مارپیچ با تعداد کانال‌های مختلف داخل لوله جاذب جمع کننده سهموی مطالعه کردند. آنها دریافتند افزایش تعداد کانال‌های نواری مارپیچ باعث بهبود بازده جمع کننده خورشیدی به‌ویژه در رینولدزهای بالا می‌شود. آنها با اعمال شار ثابت ۱۲۰۰ وات بر دیواره لوله جاذب، بر اساس معیارهای عدد ناسلت و بازده جمع کننده، بهترین نوع توربولاتور را انتخاب نمودند. چراکه افزایش غلظت نانو ذرات و عدد

دو نانو سیال Al₂O₃/Syltherm800 و TiO₂/Syltherm800 با درصد‌های اختلاط مختلف در لوله جاذب یک جمع کننده خورشیدی با توربولاتورهای از نوع فرورفتگی‌های بیضی شکل نیز باعث بهبودی حدود ۳۸٪ در عدد ناسلت نسبت به حالت بدون توربولاتور شده بود. همین‌طور معیار ارزیابی عملکرد نیز برابر با ۱/۸۱ و راندمان حرارتی نیز ۶٪ افزایش داشته است [۷۷]. وحیدی نیا و همکاران [۷۸] نیز عملکرد جمع کننده سهموی با جاذب پره‌دار میله‌ای به‌عنوان توربولاتور و پر شده با نانو سیال هیبریدی MWCTN-Fe₂O₃/Therminol VP-1 را از منظر مفاهیم انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی مطالعه نمودند. بر اساس نتایج آنها، استفاده از نانو سیال هیبریدی باعث بهبود در راندمان انرژی و انرژی جمع کننده شده بود. اگرچه الحاق پره‌ها به لوله جاذب باعث افزایش هزینه جمع کننده شده اما به لحاظ انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی به مقدار ۱۸٪ صرفه‌جویی شده بود.

کرمی و همکاران [۷۹] نیز عملکرد جمع کننده خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانو سیال با نانولوله‌های کربنی را با جمع کننده صفحه تخت به‌طور تجربی مقایسه نمودند. آنها بازده جمع کننده خورشیدی جذب مستقیم با سیال پایه و نانولوله کربنی را به ترتیب ۴/۷٪ و ۲۲٪ بیشتر از جمع کننده صفحه تخت گزارش نمودند. محمد و همکاران [۸۰] نیز از توربولاتورهای مخروطی در لوله جاذب جمع کننده سهموی بشقابی برای ایجاد اغتشاش و بهبود عملکرد حرارتی آن استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند بکار بردن توربولاتور مخروطی و استفاده از روغن سیلیکونی و نانولوله کربنی به‌جای روغن خالص عملکرد حرارتی جمع کننده را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین بهبود راندمان حرارتی و راندمان انرژی را ۱۱/۵ و ۱۸/۲ درصد گزارش نمودند. نتایج بررسی اثر توربولاتور ترکیبی مارپیچ (نشان داده شده در شکل (۸)) در لوله جاذب جمع کننده با کمک نانو سیال اکسید مس-آب بیانگر کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز است. در ضمن آنها دریافتند که توربولاتور ترکیبی باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی شده بود [۸۱]. دزفولی زاده و همکاران [۸۲] عملکرد یک توربولاتور مارپیچی را در لوله جاذب با سه سطح مقطع مختلف دایره‌ای، بیضی عمودی و بیضی افقی بررسی پر شده با نانو سیال هیبریدی MWCTN-GO/Syltherm800 بررسی کردند. آنها دریافتند که تغییر سطح مقطع گیرنده تأثیر زیادی بر عملکرد هیدرودینامیکی جمع کننده دارد تا جاییکه شاخص ارزیابی عملکرد PEC در تمام حالات مورد بررسی بزرگ‌تر از یک بوده است. توربولاتور

رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب PEC شده بود. اخیراً، نانو سیالات هیبریدی به دلیل عملکرد در محدوده وسیع‌تری از دما و رفع مشکلات ناپایداری مربوط به اغلب نانو سیالات مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس نتایج ارائه شده در تحقیقات، استفاده از نانو سیالات هیبریدی مانند $MWCNT+Fe_3O_4$ بهبود قابل توجهی تا ۲۶/۳٪ را در عملکرد جمع کننده صفحه تخت موجب شده است. همچنین استفاده از نانوسیال هیبریدی علی‌رغم کاهش اندک در ضریب اصطکاک (۱۸٪/۹۱) باعث افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت به میزان ۲۶/۲۹٪ نیز شده است [۸۸].

استفاده از توربولاتورهای مارپیچ محوری همراه با یک نانو سیال هیبریدی $Cu-Al_2O_3$ با سیال پایه آب به عنوان سیال عامل داخل لوله جاذب جمع کننده در تحقیق القاعد و همکاران [۹۱] یافت شد. آنها اثر توربولاتور را در کسرهای حجمی متفاوت در محدوده اعداد رینولدز ۶۰۰۰-۱۸۰۰۰ بر روی معیارهای ارزیابی راندمان حرارتی، راندمان آگرژی و افت فشار جمع کننده محاسبه نمودند. بعلاوه بهبود کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و PEC می‌شود. نانو سیال هیبریدی $GAMWCNT$ با نانولوله‌های کربنی چند جداره بر اساس تکنیک‌های تجزیه و تحلیل پایداری، از جمله طیف‌سنجی فرابنفش مرئی و پتانسیل زتا، در سیال پایه بسیار پایدار هستند. در مطالعات آمر و همکاران [۹۲] اگرچه بازده آگرژی با افزایش غلظت وزنی این نانو سیال هیبریدی بهبود داشته، اما با افزایش نرخ جرمی جریان کاهش یافته بود. همین‌طور افزایش غلظت نانوسیال $GAMWCNT$ باعث بهبود شاخص عملکرد شده بود به قسمی که دوره بازپداخت ۱/۸۹۷ سال برای جمع کننده صفحه تخت با نانوسیال هیبریدی به دست آمد که ۶/۲۲۸٪ کوتاه‌تر از شرایط استفاده از آب به عنوان سیال عامل انتقال حرارت بوده است. آنها نتیجه گرفتند که جمع کننده‌های خورشیدی صفحه تخت با نانوسیال $GAMWCNT$ به عنوان سیال انتقال حرارت مؤثرتر هستند و نسبت به جمع کننده‌های با سیال عامل آب در مصرف انرژی صرفه جویی می‌کنند. استفاده از نانوسیالات هیبریدی چند جداره-ای/آب، گرافن/آب، آب اکسید مس، اکسید آلومینیوم/آب، اکسید تیتانیوم/آب و اکسید سیلیکون/آب در جمع کننده‌های صفحه تخت



شکل ۸: توربولاتور مارپیچ مرکب استفاده شده در مطالعه زیانگ و همکاران [۸۱]

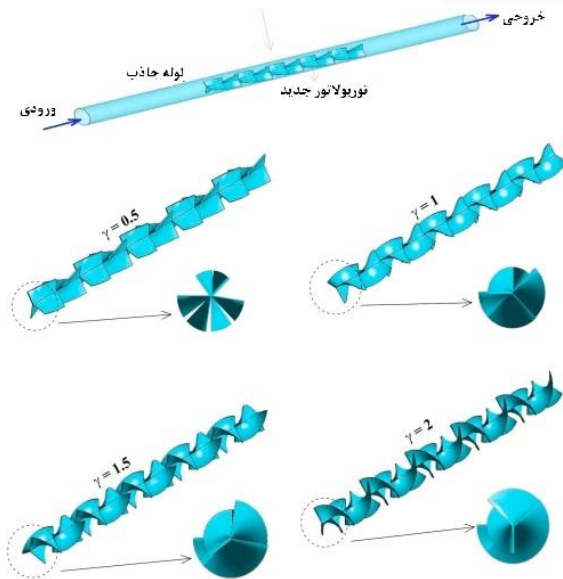
عظیمی و صفاریان [۸۹] عملکرد دو سیال کاری مختلف آب و نانو سیال هیبریدی $Fly-Ash-Cu/Water$ (۸۰:۲۰ حجم درصد) در جمع کننده صفحه تخت با لوله جاذب زیگزاگ را بررسی کردند. آنها علاوه بر محاسبه خصوصیات حرارتی و هیدرودینامیکی (از جمله عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی، ضریب اصطکاک و دمای خروجی در غلظت‌های مختلف نانوذرات، دماهای مختلف سیال ورودی و نرخ جریان جرمی متغیر) مقدار آنتروپی تولید شده را نیز محاسبه و گزارش نمودند. بر اساس نتایج آنها، استفاده از نانوذرات منجر به افزایش دمای خروجی در نرخ جریان جرمی خاص می‌شود. همچنین افزایش غلظت نانوذرات دمای خروجی را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نداده اما باعث افزایش تولید آنتروپی اصطکاک می‌شود. علاوه بر این، پمپاژ سیال کاری با دبی جرمی بالاتر، دمای خروجی را کاهش داده و تولید آنتروپی را به دلیل وجود اصطکاک افزایش می‌دهد. مقادیر افزایش عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و تولید آنتروپی اصطکاک با افزایش دبی سیال به ترتیب برابر با ۳۳/۳۳٪، ۴۱٪ و ۸۱٪ شده بود. سمیعی‌زاده و همکاران [۹۰] رفتار حرارتی یک جمع کننده سهموی با توربولاتور میله‌ای با استفاده از سیال هیبریدی نانو

که نانوسیالات هیبریدی ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهند. هم‌زمان استفاده از نانوسیال هیبریدی $Cu-GO/Water$ دو فازی در کنار توربولاتور با اشکال هندسی مختلف (شکل (۹)) در لوله جاذب یک جمع‌کننده صفحه تخت توسط نقید و همکاران [۹۹] مورد توجه قرار گرفته بود. آنها دریافتند که راندمان انرژی جمع‌کننده تحت تأثیر کسر حجمی نانو ذرات، سرعت ورودی، شکل هندسی توربولاتور و شرایط مرزی جمع‌کننده می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه آنها برای تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر در نسبت شکل^۱ توربولاتور (۷) در کسر حجمی‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بر اساس شکل، استفاده از توربولاتور در لوله جاذب جمع‌کننده صفحه تخت منجر به عملکرد حرارتی-هیدرولیکی بهتری نسبت به لوله جاذب‌کننده بدون توربولاتور می‌شود همچنین، افزایش زاویه انحنا (۷) به‌طور قابل توجهی بر سرعت انتقال حرارت و افزایش افت فشار (Δp) تأثیر گذاشته بود. در ضمن پراکندگی نانوذرات مس و گرافن در آب باعث بهبود خواص حرارتی و افزایش عملکرد حرارتی شده بود. مصطفی و همکاران [۱۰۰] تأثیر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک جمع‌کننده صفحه تخت را با سه سیال کاری از جمله آب، اکسید آلومینیوم/HYBN-مس-آب، و ن و سیال مونواکسید آلومینیوم-آب مورد ارزیابی قرار دادند. طبق نتایج، استفاده از نانوسیال بجای سیال پایه آب باعث کاهش دمای سطح جاذب شده و همین‌طور مناسب‌ترین سیال عامل جمع‌کننده، نانوسیال هیبریدی است. علاوه بر این، انرژی جمع‌کننده با استفاده از نانوسیال هیبریدی بیشتر از سایر سیالات عامل بوده و حداکثر افزایش آن با استفاده از نانوسیالات مونو و هیبریدی نسبت به آب به ترتیب $3/86$ و $4/23$ درصد بوده است. عملکرد ارزیابی معیار جمع‌کننده همین‌طور در حضور نانوسیال هیبریدی بزرگ‌تر از مونو سیال اکسید آلومینیوم-آب گزارش شد. آنها دریافتند که حداکثر تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی شامل دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و اکسیدهای گوگرد در جمع‌کننده پنل خورشیدی زمانی رخ می‌دهد که آب به‌عنوان سیال عامل اعمال شود و کمترین مقدار این آلاینده‌ها در هنگام استفاده از نانو سیال هیبریدی رخ داده بود. شیخ زاده و همکاران [۱۰۱] عملکرد یک توربولاتور در داخل یک کانال دما ثابت را بررسی نمودند. آنها عملکرد نانو سیال هیبریدی آب-مس-اکسید سیلیسوم با کسر حجمی $1-3\%$ را/ه صورت دوفازی شبیه‌سازی نموده و تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سیال را در کانال مذکور بررسی نمودند. آنها با تغییر در زاویه

توسط ورما و همکاران [۹۳] مطالعه شد که به ترتیب می‌تواند باعث بهبود راندمان انرژی آن نسبت به سیال پایه به مقدار $29/32\%$ ، $21/46\%$ ، $16/67\%$ ، $10/86\%$ و $6/97\%$ شود. همچنین نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله‌های کربنی چند جداره علاوه بر بهبود خصوصیات حرارتی و اپتیکی (بهبود راندمان نوری به مقدار $78/1\%$ و افزایش اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال تا 56%) باعث صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش سطح جمع‌کننده تا 36% و کاهش انتشار CO_2 شده و دوره بازپرداخت کربن را تا $36/2\%$ کاهش داده بود [۹۴]. اثر استفاده از نانولوله‌های کربنی چند جداره‌ای کووالانسی CF-MWCNTs و نانو پلاکت‌های گرافن عامل‌دار کووالانسی (CF-GNPs) با نیتريد بور شش‌ضلعی (h-BN) نیز در آب مقطر در جمع‌کننده‌های صفحه تخت در نرخ جریان جرمی مختلف توسط حسین و همکاران [۹۵] مطالعه شده است. آنها دریافتند که عملکرد جمع‌کننده تخت با استفاده از نانوسیال هیبریدی بهتر از نانوسیال تک به نظر می‌رسد که بیشترین بهبود جمع‌کننده را تا 85% گزارش کردند. الشازلی و همکاران [۹۶] اثر نانو سیالات MWCNT حالت هیبریدی $50-50$ برای $MWCNT/Al_2O_3$ را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند که نتایجشان حاکی از تأثیر مستقیم غلظت نانو ذرات و سرعت جریان سیالات بر عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت بوده است. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از نانوسیال هیبریدی $MWCNT/Al_2O_3$ افزایش راندمان را به ترتیب 26 ، 29 و 18% برای $1/5$ ، $2/5$ و $3/3$ لیتر در متر ارائه می‌دهد؛ بنابراین جایگزینی 50% از MWCNT با Al_2O_3 اقتصادی‌تر و کم‌خطرتر می‌باشد. بررسی تأثیر نانو سیال هیبریدی $MWCNT+Fe_3O_4/Water$ بر روی عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت در غلظت‌های مختلف نانو سیال و نرخ‌های متفاوت جریان بیانگر افزایش $26/3\%$ در ضریب انتقال حرارت بوده در حالی که افت فشار ناشی از ضریب اصطکاک نیز حدود 19% کاهش داشته است [۹۷]. در مطالعه نبی و همکاران [۹۸] استفاده از المان‌های تولیدکننده اغتشاش در تمامی موارد مطالعه شده به دلیل ایجاد جریان چرخشی، اختلاط بهتر و سطح تماس بیشتر بین جریان سیال و دیواره داغ جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت، ضریب انتقال حرارت را بیش از حالت پایه افزایش داده بود. آنها حالت بهینه توربولاتور را نیز تعیین نمودند. سپس با بررسی اثر نانوسیال هیبریدی SWCNT-CuO/ H_2O در جمع‌کننده با بهترین حالت القاکننده تعیین شده در مرحله قبل و مقایسه نتایج با آب خالص نتیجه گرفتند

¹ Pitch Ratio

شده درحالی‌که مقدار افت فشار را نیز افزایش داده بود. همان نویسندگان [۱۰۷] در پژوهشی دیگر از یک توربولاتور پیچشی کنگره‌دار همراه با نانو سیال هیبریدی برای بهبود عملکرد مبدل حرارتی استفاده کردند که نتایج آنها بهبود در عملکرد حرارتی را نشان داده بود. فرشاد و شیخ‌الاسلامی [۱۰۸] نیز با افزودن توربولاتور پیچشی و نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم سعی در بهبود عملکرد حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت داشتند. محدوده عدد رینولدز موردبررسی آنها بین ۴۰۰۰-۲۰۰۰۰ بوده است. آنها نتیجه گرفتند افزایش در نسبت قطر و نسبت پیچش نوار، باعث بهبود نرخ انتقال شده و همین‌طور افت فشار را نیز افزایش می‌دهد به طوری‌که بیشترین مقدار ضریب عملکرد برابر با ۱/۰۸ در نسبت قطر ۰/۱۴ و نسبت پیچش ۷ در عدد رینولدز ۴۰۰۰ گزارش شده بود. عملکرد یک جمع‌کننده سهموی خورشیدی با توربولاتور نواری پیچ‌خورده و نانو سیال هیبریدی CuO/SWCNT بر پایه آب توسط اصفهانی و همکاران [۱۰۹] بررسی شد. حداکثر مقدار مربوط به معیار ارزیابی عملکرد (PEC) را برابر ۳/۵۲ در شرایط عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ و کسر حجمی ۲٪ گزارش نمودند.

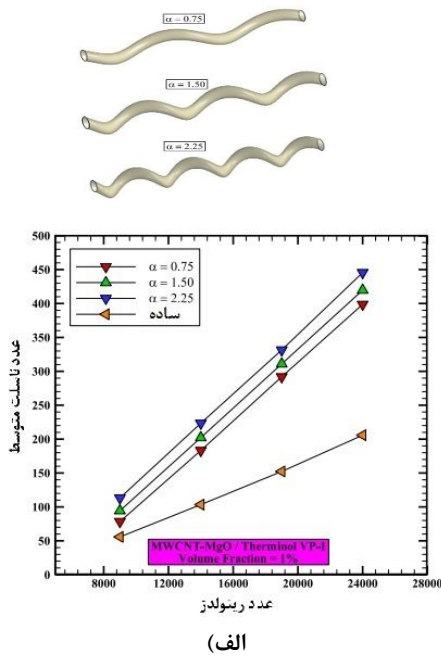


شکل ۹: توربولاتور مورد استفاده توسط نقید و همکاران [۹۹]

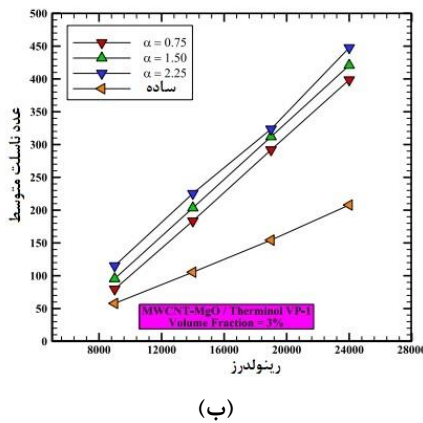
در مطالعه دیگری، استفاده از توربولاتور مارپیچی در لوله‌های جاذب حاوی نانو سیال هیبریدی MgO-MWCNT/Therminol VP-1 توسط الصراف و همکاران [۱۱۰] پیشنهاد شده بود. آنها با تغییر شرایط هندسی توربولاتور مارپیچ در اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی‌های متفاوت، تغییرات عدد ناسلت را بررسی نموده که در شکل (۱۱) نشان داده شده

توربولاتور متوجه افزایش در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک شدند. بیشترین افزایش عدد ناسلت مربوط به کسر حجمی ۳٪ در عدد رینولدز ۹۰۰۰ با زاویه توربولاتور ۶۰ درجه بوده که مقدار آن برابر با ۸۳/۱۴۵٪/گز/ش شده است. ترکیب هم‌زمان توربولاتور و مولد گرداب و عملکرد آنها در مبدل حرارتی در مطالعه‌ای دیگر شیخ زاده و همکاران [۱۰۲] مورد بررسی قرار گرفته بود. آنها از نانو سیال هیبریدی با نانولوله کربنی-مس/آب استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها، استفاده هم‌زمان از توربولاتور و مولد گرداب باعث بهبود شاخص ارزیابی حرارتی-هیدرولیکی به مقدار بیشتر از ۱ شده بود. عسکریان و همکاران [۱۰۳] نیز اثرات هم‌زمان توربولاتور و ورتکس ژنراتور را بر عملکرد مبدل حرارتی با نانو سیال هیبریدی آب/مس-نانولوله کربنی مطالعه نمودند. آنها با افزایش سرعت جریان ورودی به مبدل، بهبود عملکرد حرارتی و افزایش در افت فشار مبدل را مشاهده نمودند که بیشترین مقادیر گزارش شده مربوط به کسر حجمی ۴٪ در عدد رینولدز جریان ۳۲۰۰۰ بوده است. تحلیل انرژی، اقتصادی-زیست‌محیطی یک جمع‌کننده خورشیدی سهموی با نانو سیال هیبریدی نانولوله کربنی چندجداره-اکسید مس/آب در کسر حجمی ۲-۶٪ همراه با توربولاتور پیچ‌خورده توسط حسنی و همکاران [۱۰۴] انجام شد. بر اساس نتایج آنها، حداکثر عملکرد حرارتی برای نوار پیچ‌خورده در نسبت پیچش ۱ در عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ و کسر حجمی ۲٪ حاصل شده که برابر با ۳/۵۲/۵ برابر ۳/۳ گزارش شده بود. رحمتی و همکاران [۱۰۵] عملکرد یک مبدل حرارتی را لوله مارپیچ و لوله مستقیم را به صورت تجربی باهم مقایسه نمودند. آنها مخلوطی از نانو ذره اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم را سیال پایه آب باهم ترکیب نموده و نانو سیال هیبریدی خود را با قطر متوسط ذرات ۲۰-۳۰ نانومتر ساختند. بر اساس نتایج آنها، لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم باعث بهبود عدد ناسلت به مقدار ۶/۶٪ شده بود. همین‌طور مقدار افزایش اختلاف دمای بهینه نانو سیال هیبریدی در لوله مارپیچ نسبت به لوله مستقیم ۱۰٪ بوده است. جمعیتی و پور محمدیان [۱۰۶] دو نوار تابیده متقاطع را به عنوان توربولاتور به یک جمع‌کننده خورشیدی سهموی پر شده با نانوسیال هیبریدی آب-نانولوله کربنی چند جداره-اکسید آلومینیوم جهت تقویت انرژی تشعشعی اضافه نمودند. آنها با تغییر در تعداد نوارهای تابیده شده، مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک را ارزیابی نمودند. اندازه‌گیری‌های آنها حاکی از این بود که افزایش درصد نانو ذرات در سیال پایه باعث بهبود خصوصیات حرارتی جمع‌کننده

باشد، حالت مورد بررسی سودمند فرض می‌شود و افزایش حرارتی بالاتر از مقدار است. از سوی دیگر کاهش در افت فشار، زمانی که PEC کمتر از یک باشد،



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: هندسه مارپیچ استفاده شده برای توربولاتور توسط الصراف و همکاران و تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی الف) $\phi = 1\%$ و ب) $\phi = 3\%$ مربوط به نانو سیال هیبریدی با تغییر هندسه [۱۱۰]

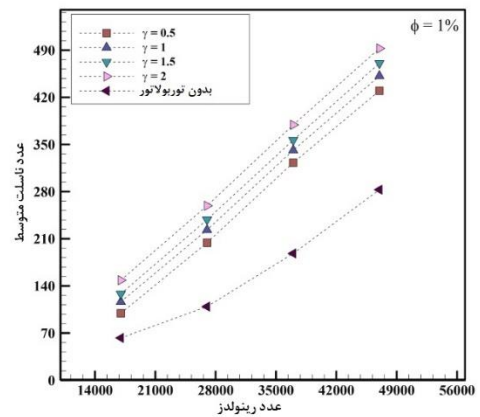
برای حالت مورد بررسی بهتر از مقدار بررسی شده در مرجع [۳۴] نمی‌باشد. مقدار PEC با کمک فرمول زیر بیان می‌گردد:

$$PEC = \left(\frac{Nu_{av}}{Nu_{av,0}} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (1)$$

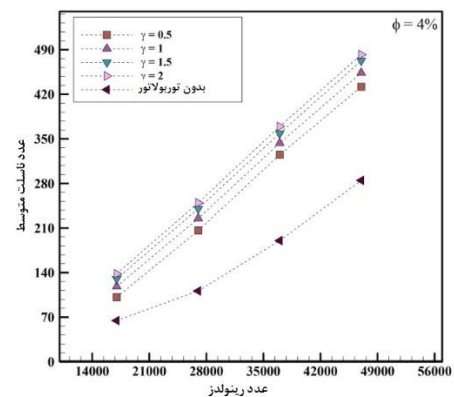
که در آن مقادیر Nu_{av} و $Nu_{av,0}$ به ناسلت اندازه‌گیری شده و ناسلت حالت مرجع و البته f و f_0 به فاکتور اصطکاک اندازه‌گیری شده و

است. طبق گزارش ارائه شده، استفاده از لوله مارپیچی در مقایسه با لوله ساده در جمع کننده خورشیدی، عدد ناسلت و افت فشار را به ترتیب به میزان $11/121\%$ و $52/309\%$ افزایش داده و باعث بهبود معیار PEC می‌شود.

برای ارزیابی عملکرد جمع کننده‌های خورشیدی باید بالانسی بین بهبود مشخصات حرارتی و انرژی مورد نیاز برای پمپاژ برقرار باشد [۶۹]. به این منظور شاخص معیار ارزیابی عملکرد (PEC) برای بررسی عملکرد مبدل حرارتی خورشیدی برای ارزیابی توسعه انتقال حرارت



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر در شکل توربولاتور مارپیچ در کسر حجمی الف) $\phi = 1\%$ و ب) $\phi = 4\%$ در مطالعه نقید و همکاران [۹۹]

واقعی در اکثر مطالعات پیشین که بر روی جمع کننده‌های خورشیدی با توربولاتور و با/بدون نانو سیال مطالعه کردند استفاده شده است. در عمل، این توان باکار لازم برای پمپاژ سیال (W_p) به توان سوم نرخ جریان حجمی (V^3) مرتبط است. برای حالت مرجع، این شاخص برابر با یک است. برای سایر موارد، این شاخص می‌تواند مقداری بیش از یک یا کمتر از آن داشته باشد. هنگامی که مقادیر بالاتر از یک داشته

این جدول ضمن بیان نوع جمع کننده و نوع توربولاتور استفاده شده، نوع و جنس نانو سیال نیز ذکر شده است. متغیرهای مورد بررسی، محدوده عدد رینولدز مورد مطالعه و نتایج حاصل از تحقیق نیز به طور خلاصه آورده شده است.

حالت مرجع برمی‌گردد. در این راستا بررسی‌های انجام شده پیرامون این شاخص با حضور توربولاتور و افزودن نانو سیال که توسط محقق ارائه شده است، در جدول (۱) قابل دستیابی است. در جدول (۲) مطالعاتی لیست شده‌اند که انواع توربولاتور همراه با نانو سیال را در لوله جاذب جمع کننده‌های خورشیدی در نظر گرفتند. در

جدول ۱: محدوده تغییرات شاخص عملکرد جمع کننده (PEC) با توربولاتور و نانو سیال

نویسندگان	نوع جمع کننده	نوع و شکل توربولاتور	نوع سیال کاری	پارامتر مورد بررسی و اثر آن بر مقدار شاخص PEC	محدوده تغییرات شاخص PEC
سعدالدین و همکاران [۶۹]۲۰۱۷	صفحه تخت	محیط متخلخل 	فوم فلزی مس به همراه آب به عنوان محیط متخلخل	نرخ جریان حجمی سیال (۲-۰/۵ لیتر بر دقیقه)	با افزایش نرخ جریان جرمی شاخص PEC کاهشی در محدوده ۰/۶-۰/۴
بلووس و همکاران [۳۲]۲۰۱۸	سه‌موی بشقابی	فین داخلی (۱، ۲، ۸ عدد) 	-	تغییر در تعداد و جانمایی فین‌ها در لوله	۱ فین: ۱/۰۸۴-۱ ۲ فین: ۱/۱۴۱-۱ چند فین: ۱/۳۱۷-۱ (ماکزیمم مقدار برای تعداد ۸ فین)
پنگ و همکاران [۳۶]۲۰۲۱	سه‌موی بشقابی	فین داخلی 	محیط متخلخل فوم فلزی	تغییر در سطح مقطع فین (مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای) با تغییر در اعداد رینولدز	روند کاهشی با افزایش عدد رینولدز محدوده تغییرات ۴/۷-۲/۵ افزایش PEC تا مقدار ۴/۷ با فین مثلثی شکل
الراشد و همکاران [۲۸]۲۰۲۱	سه‌موی بشقابی	فین ستاره‌ای داخلی 	نانو سیال هیبریدی (20%-80%) Oil-Al ₂ O ₃ -MWCNT	تغییرات در زاویه فین‌ها و قطر میله وسط تغییرات در مقدار پیچ فین با اعداد رینولدز مختلف	با افزایش متغیرهای زاویه فین و عدد رینولدز مقادیر PEC کاهشی محدوده تغییرات ۰/۷-۱/۳
آرانی و منفردی [۶]۲۰۲۳	سه‌موی بشقابی	دو لوله غیر هم‌مرکز 	نانو سیال Syltherm 800 oil/γ-AlOOH	تغییرات در زوایای قوس عایق، مقدار معرف خارج مرکز بودن دو لوله و کسر حجمی و قطر نانو سیال با اعداد رینولدز	با افزایش عدد رینولدز تغییرات PEC افزایشی در محدوده تغییرات بین ۵-۱ برای متغیرهای مختلف بیشترین تغییرات PEC با تغییر در قطر نانو ذرات اتفاق می‌افتد

		ایجاد فرورفتگی، برآمدگی و موج			
با افزایش رینولدز مقادیر کاهشی برای PEC در محدوده ۱-۱/۴۲	تغییر در شکل توربولاتورها در اعداد رینولدز مختلف	-	مارپیچ در لوله	سه‌موی بشقابی	هوآنگ و همکاران ۲۰۱۵ [۲۳]
روند کاهشی برای PEC در محدوده تغییرات ۰/۶ - ۲/۱	تغییر در شکل توربولاتور مارپیچ و تغییر در کسر حجمی نانو ذرات در اعداد رینولدز مختلف	نانو سیال هیبریدی $SiO_2 - MWCNT$	توربولاتورهای نواری پیچ‌خورده	سه‌موی بشقابی	مصطفی و همکاران ۲۰۲۲ [۸۷]
روند افزایشی برای PEC در محدوده ۰/۸ - ۰/۹۷	تغییر در کسر حجمی نانو ذرات و شکل توربولاتور با اعداد رینولدز مختلف	نانو سیال هیبریدی $Cu-Al_2O_3/Water$	توربولاتور مارپیچ جدید	سه‌موی بشقابی	القاعد و همکاران ۲۰۲۲ [۹۱]
روند کاهشی برای PEC در محدوده ۱/۳۵ - ۱/۴۵۵	تغییر در عدد هارتمن در اعداد رینولدز مختلف	نانو سیال هیبریدی $MgO-MWCNT /Therminol VP-1$	لوله‌های مارپیچ	صفحه تخت	الصراف و همکاران ۲۰۲۳ [۱۱۰]

جدول ۲: مروری بر مطالعات انجام‌شده بر روی لوله جاذب با توربولاتور و پرشده با نانو سیال

نویسندگان	نوع جمع‌کننده خورشیدی	نوع سیال مورد استفاده معمولی-نانوسیال	شکل توربولاتور	محدوده رینولدز مورد مطالعه	نتایج
سراسر و همکاران ۲۰۲۲ [۸۵]	صفحه تخت	نانو سیال $TiO_2/Water$	صفحه‌ای با مقطع مستطیلی	۱۳۰۰-۱۹۰۰	کاهش نرخ انتقال حرارت جمع‌کننده با استفاده از نانو سیال افزایش ۳۹٪ راندمان حرارتی با استفاده از توربولاتور و نانو سیال
نبی و همکاران ۲۰۲۲ [۹۸]	صفحه تخت	نانوسیال هیبریدی $CNTs/CuO$	مبلاه‌ای با مقطع مربعی به شکل فرورفتگی و برآمدگی در محیط دایره	۰-۲۰۰۰۰	افزایش ضریب انتقال حرارت به مقدار حداکثر ۹۹٪ افزایش ضریب اصطکاک به مقدار حداکثر ۱۲٪ نانو سیال هیبریدی باعث افزایش ۱۶٪/۵ بازده حرارتی شده
نقید و همکاران ۲۰۲۳ [۹۹]	صفحه تخت	نانو سیال هیبریدی مس-گرافن	پره‌ای مارپیچ نوآورانه	۱۴۰۰۰-۵۶۰۰۰	افزایش افت فشار به علت وجود توربولاتور، بهبود راندمان انرژی با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز به مقدار ۱۶٪

الصراف و همکاران ۲۰۲۳ [۱۱۰]	صفحه تخت	نانو سیال هیبریدی MgO-MWCNT /Therminol VP-1	مارپیچ ایجاد شده در لوله جاذب	۰-۲۰۰۰۰۰	بهبود عدد ناسلت به مقدار ۱۲۱٪، افزایش ضریب اصطکاک به مقدار ۳۱۰٪ به علت استفاده از لوله مارپیچ و بهبود راندمان انرژی و آگزرژی با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات
ژیانگ و همکاران ۲۰۱۹ [۸۱]	-	CuO/H ₂ O	توربولاتور پیچیده مرکب مارپیچ	۵۰۰۰،۱۵۰۰۰	کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز وجود توربولاتور باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی شده
الراشد و همکاران ۲۰۲۱ [۲۸]	سهموی بشقابی	نانو سیال هیبریدی MWCNT / Al ₂ O ₃	لوله میانی دایره‌ای همراه با فین ستاره‌ای	۰-۱۰۰۰۰۰	بهترین محدوده عدد رینولدز برای کاربرد توربولاتور معرفی شده و صرفه اقتصادی ۱۴٪ حاصله از آن
سمعی زاده و همکاران ۲۰۲۲ [۹۰]	پارابولیک بشقابی	نانو سیال هیبریدی Oil-Cu-Al ₂ O ₃	فین طولی با مقطع مستطیل در نیمه پایین لوله جاذب	5000-500000	بهبود ۱۲٪ در راندمان حرارتی و افزایش ۵٪ در ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز پایین مؤثرتر بودن ذرات مس سه برابر ذرات اکسید آلومینیوم
ساجید خان و همکاران ۲۰۲۰ [۱۱۱]	سهموی بشقابی	Al ₂ O ₃ /Water	فین طولی با مقطع مستطیل نوار پیچ خورده	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	بهبود راندمان جمع کننده و ضریب انتقال حرارت به ترتیب با توربولاتور پیچ خورده ۱۷۵٪ و ۲۳٪/۱۱۸ با توربولاتور طولی ۱۰٪/۴ و ۲۶٪/۱۰۳
بن عبد الرحمن و همکاران ۲۰۱۶ [۲۶]	سهموی بشقابی	نانو ذرات مختلف با سیال پایه DOWTHERM A شامل Cu، C، Al ₂ O ₃ ، Sic	فین طولی با مقاطع مختلف	۲۵۷۰۰-۲۵۷۰۰۰	بهبود عدد ناسلت نسبت به حالت بدون توربولاتور بین ۱/۳-۱/۸ برابر
محمد و همکاران [۸۰]	سهموی بشقابی	روغن سیلیکونی و نانولوله کربنی (Ag-SWCNT, Ag-MWCNT, Ag-MgO)	توربولاتور میله‌ای با مقطع مخروطی	۰-۱۰۰۰۰۰	بهبود راندمان حرارتی و راندمان آگزرژی تا ۱۱/۵٪ و ۱۸/۲٪ حداکثر کاهش نرخ تولید انترویی ۴۲٪/۷
شیخ‌الاسلامی و همکاران ۲۰۱۸ [۵۴]	صفحه تخت	CuO	توربولاتور مارپیچ	رینولدز بی‌بعد ۰/۵-۱/۵	افزایش عدد ناسلت با زیاد شدن مقدار نرخ اندازه عرضی و عدد رینولدز
مصطفی و همکاران	سهموی بشقابی	SiO ₂ - MWCNT	نواری مارپیچ	۵۰۰۰-۲۵۰۰۰	مقایسه عملکرد دو نوع توربولاتور و انتخاب بهترین نوع آن

۲۰۲۲					
[۸۶]					
القاعد و همکاران	سهموی بشقابی	نانو سیال هیبریدی	مارپیچ محوری	۶۰۰۰-۱۸۰۰۰	مقایسه عملکرد لوله با دو مارپیچ متفاوت در اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی‌های متفاوت نانو سیال حداکثر فاکتور عملکرد برابر ۰/۹۹
۲۰۲۲					
[۹۱]					
عظیمی و صفاریان	صفحه تخت	نانو سیال هیبریدی	لوله جاذب زیگزاگ	۸۰۰-۱۶۰۰	افزایش دبی سیال بالاتر باعث افزایش عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابجایی و تولید آنتروپی اصطکاکی به ترتیب حدود ۳۳/۳۳٪، ۴۱٪ و ۸۱٪
۲۰۲۳					
[۸۹]					

۴- نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای پیشنهادشده توسط محققین بهبود راندمان جمع‌کننده‌های خورشیدی، استفاده از توربولاتورهای به‌منظور ایجاد اغتشاش و بهبود خصوصیات حرارتی آنها بوده است. همچنین استفاده از نانو سیال (مونو یا هیبریدی) بجای سیال پایه نیز در شرایط با و بدون توربولاتور در لوله‌های جاذب جمع‌کننده‌های خورشیدی توسط محققین بررسی شده بود. در پژوهش حاضر مروری بر مطالعات انجام‌شده در این دو حوزه با استفاده از نانو سیال هیبریدی در کنار توربولاتور ارائه شده است. اگرچه میزان ایجاد بهبود در خصوصیات عملکردی جمع‌کننده‌ها باوجود توربولاتور و استفاده از نانو سیال هیبریدی به عوامل متعددی چون نوع جمع‌کننده، محدوده دبی جرمی جریان سیال و عدد رینولدز موردبررسی، شکل توربولاتور، نوع نانو سیال و کسر حجمی آن و ... بستگی دارد، اما می‌توان نتایج کلی زیر را از پژوهش‌های پیشین استنباط نمود که در ذیل به آنها اشاره می‌گردد:

- در توربولاتورهای نوع اول که شامل ایجاد تغییراتی در ساختار لوله جاذب می‌باشد، ایجاد فرورفتگی نسبت به برآمدگی باعث بهبود بیشتری در ضرایب انتقال حرارت شده که عمق بیشتر، گام باریک‌تر و اعداد بیشتر در جهت محیطی در میزان بهبودها مؤثر بوده‌اند. از طرفی ایجاد امواج در سطح لوله با سطوح مقطع مختلف، نوع ذوزنقه‌ای نسبت به سایر اشکال بیشترین تأثیر را در بهبود راندمان حرارتی داشته است.
- در توربولاتورهای دسته دوم که قرار دادن یک افزونه داخل لوله جاذب می‌باشد، وجود باله‌ها و سایر تجهیزات مانند فوم فلزی حلقوی به شکل مجزا و توأم در نیمه تحتانی لوله جاذب اثر بیشتری بر بهبود

عملکرد لوله جاذب داشته است. همین‌طور هر چه تعداد فین‌ها بیشتر باشد، بهبود مؤثرتری در معیارهای عملکردی حرارتی و آگزژی و شاخص PEC حاصل می‌شود تا جایی که مقادیر بهبود برای PEC و راندمان آگزژی در حدود ۱۹/۷٪ و ۲۳۴/۷٪ گزارش شده است. همین‌طور کاهش در تولید آنتروپی نیز به میزان ۳۱۱/۷٪ نیز رسیده بود.

- در مقایسه بین توربولاتور سیم‌پیچ شکل یا نوار تابیده و پیچ‌خورده نقش سیم‌پیچ در ایجاد اغتشاش و بهبود معیارهای عملکردی جمع‌کننده بسیار مؤثرتر برآورد شده بود. میزان تأثیر افزونه‌های مارپیچ به مشخصات متعددی از جمله زاویه تاب خوردگی، نسبت پیچ و ... بستگی داشته که تغییرات آنها می‌تواند باعث بهبود عملکرد تا ۴۵/۰۴٪ و ۷۴/۴۲٪ شود. همچنین اعمال تغییرات هم‌زمان در حالات مختلف نوار پیچ‌خورده و نسبت عرض آن توانسته بود بهبودی تا ۱۶۹٪ را در عملکرد جمع‌کننده خورشیدی نسبت به حالت بدون توربولاتور ایجاد کند.

- در توربولاتورهای نوع سوراخ‌دار و محیط‌های متخلخل مشخصاتی چون فاصله و ابعاد صفحه سوراخ‌دار، تعداد سوراخ و تغییر در پارامترهای شکل محیط متخلخل نیز در مقدار تأثیر آنها بر عملکرد جمع‌کننده مؤثر بوده است. این تغییرات برای توربولاتور از نوع صفحه سوراخ‌دار با ۳ سوراخ تا ۱۱۵٪ و برای محیط متخلخل تا ۱۸/۵٪ در راندمان حرارتی گزارش شده بود.

- استفاده از نانو سیال در کنار توربولاتور باعث بهبود عملکرد جمع‌کننده خورشیدی می‌شود. علاوه بر آن جایگزینی نانو سیال هیبریدی نیز باعث بهبود مضاعفی در عملکرد خواهد شد؛ اما مشخصات متعددی

- [2] Yadegari, M. and M. Ghassemi, Investigation of the Effects of Temperature, Mass flow rate of the injected fuel, pore diameter, porosity and ambient pressure on the amount of pollutants in the combustion chamber. Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME, 2022. 23(1): p. 122-146.
- [3] Pal R. K. and Ravi Kumar K., Coupled Thermo-Structural analysis of absorber tube for direct steam generation in parabolic trough solar collector, Sol. Energy, 2023, 266: p. 112148.
- [4] Gong J. hu, Yang C., Wang J., and Lund P. D., Comparative study of optical and thermal model for a large-aperture parabolic trough concentrator with smaller diameter absorber tube bundle, Energy Reports, 2023, 9(S12): p. 435–443.
- [5] Anand S. and Kumar S., Optimization of gaseous working fluid and internally finned absorber tube for enhancing the thermal performance of parabolic trough solar collector, Appl. Therm. Eng., 2024, 239: p. 122078.
- [6] Abbasian A. A. and Monfaredi F., Insulator roof, acentric absorber tube and nanofluid effect on parabolic trough collector efficiency via two-phase flow simulation, J. Therm. Anal. Calorim., 2023, 148(22): p. 12481–12499.
- [7] Chen Z., Han X., and Ma Y., Performance analysis of a novel direct absorption parabolic trough solar collector with combined absorption using MCRT and FVM coupled method, Renew. Energy, 2023, 220: p. 119727.
- [8] Shyam A., Ahmed K. R. A., Christopher S. S., Iniyan S., Thermal performance enhancement in a solar parabolic trough collector with optimized secondary optics, Clean Technol. Environ. Policy, 2023, no. 0123456789, doi: 10.1007/s10098-023-02649-2.
- [9] Mahmoud MS, Abbas AS, Khudheyer AF., Solar parabolic trough collector tube heat transfer analysis with internal conical pin fins, J Green Eng 2020, 10: p.7422–36.
- [10] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis., Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in

چون غلظت نانو ذرات، نوع نانو سیال هیبریدی، نوع جمع کننده و شکل توربولاتور و ... همگی بر مقدار بهبود در شاخص‌های عملکردی جمع کننده مؤثر بوده‌اند.

• در جمع‌کننده‌های موردبررسی با توربولاتور و نانو سیال هیبریدی بیشترین بهبود در عملکرد راندمان حرارتی و راندمان انرژی جمع کننده به ترتیب ۲۹٪ و ۲۹/۳۲٪ گزارش شده بود. همین‌طور کاهش دوره بازپرداخت هزینه کربن تا ۳۶/۲٪ نیز کاهش داشته است.

۵- تقدیر و تشکر

مقاله پیش رو با حمایت و پشتیبانی دانشگاه زابل با گرنت شماره IR UOZ GR 5425 موردتحقیق و تحلیل قرار گرفته است.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
d	قطر، m
H	ارتفاع، m
P	طول یک پیچش، m
t	ضخامت، mm
Q_{loss}	گرمای اتلافی، W
T	دما، K
I_b	شدت تابش مستقیم طبیعی، W / m^2
L	طول، m
Re	عدد رینولدز
Nu	عدد ناسلت
Be	عدد بزان
Δp	افت فشار
f	ضریب اصطکاک
علائم یونانی	
β	زاویه عرضی، درجه
γ, α	نسبت پیچ
زیرنویس	
0	مرجع
av	متوسط
اختصارات	
Performance Evaluation Criteria	PEC
Semi-Annular and Fin shape Metal foam	SAFM
Semi-Annular Metal foam	SAM
Fin shape Metal foam	FM

۷- منابع

- [1] <https://www.data.irimo.ir/>

- collectors, *Int J Energy Research*, pp. 1-46, 2020
- [19] Akbarzade S., Valipour M.S., Heat transfer enhancement in parabolic trough collectors: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 92, pp. 198-218, 2018
- [20] Abdulhamed A.J., Adam N.M., Ab-Kadir M., Hairuddin A.A., Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 822-831, 2018
- [21] Zaboli M., Saedodin S., Mousavi Ajarostaghi S.S., Karimi N., Recent progress on flat plate solar collectors equipped with nanofluid and turbulator: state of the art, *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 109921-109954, 2023.
- [22] Reddy KS, Satyanarayana GV. Numerical study of porous finned receiver for solar parabolic trough concentrator. *Eng Appl Comput Fluid Mech*, 2008, 2: p.172–84.
- [23] Huang Z., Yu G.L., Li Z.Y., Tao W.Q., Numerical study on heat transfer enhancement in a receiver tube of parabolic trough solar collector with dimples, protrusions and helical fins, *Energy Procedia*, 2015, 69: p. 1306 – 1316.
- [24] Munoz J, Anades A., Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools. *Appl Energy*, 2011, 88: p.4139–49.
- [25] Zhao Z. , Bai F., Zhang X., Wang Z., Experimental study of pin finned receiver tubes for a parabolic trough solar air collector, *Sol. Energy*, 2020, 207(6): p. 91–102.
- [26] Benabderrahmane A., Aminallah M., Laouedj S., Benazza A., Solano J.P., Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Solar Receiver using Longitudinal Fins and Nanofluids, *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(5): p. 410–417.
- [27] Adel L., Ghazali M., Enhancing Thermal Performance of a Parabolic Trough Collector with Inserting Longitudinal Fins in the Down Half of the Receiver Tube, *Journal of Thermal Science*, 2021, 30(5): p. 545–552.
- [11] Yadegari, M. and A.B. Khoshnevis., Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis, *The European Physical Journal Plus*, 2020, 135(7): p. 548.
- [12] Yadegari, M. and A.B. Khoshnevis., Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, 2020, 135(6): p. 534.
- [13] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, 2021, 136(10): p. 10-19.
- [14] Yadegari, M. and A. Bak Khoshnevis., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42: p. 1-15, 2020.
- [15] Haghghatjoo, H., M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis., Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel, *The European Physical Journal Plus*, 2022, 137(9): p. 1042.
- [16] Shahzad Nazir M., Shahsavar A., Afrand M., Arici M., Nizetic S., Ma Zh., Oztop H.F., A comprehensive review of parabolic trough solar collectors equipped with turbulators and numerical evaluation of hydrothermal performance of a novel model, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2020, 45: p. 101103.
- [17] Aissa A., Qasem N., Mourad A., Laidoudi H., Younis O., Guedri K., Alazzam A., A review of the enhancement of solar thermal collectors using nanofluids and turbulators, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 220, pp. 119663, 2023
- [18] Abed N., Afgan I., An extensive review of various technologies for enhancing the thermal and optical performances of parabolic trough

- [37] Zhou Y., Bu sinnah Z.A., Yasin Y., Salman N.A., Jaber A.S., Abdulkadhim A.H., AL-Khafaji M. O., Nasajpour-Esfahani N., Marashi M., Golzar A., Toghraie D., A twophase simulation for analyzing the hydraulic-thermal performance of Cu–Water nanofluid within a tube enhanced with W- and C-shaped ribs, *Case Studies Thermal Eng.*, 2023, 43: p.102794.
- [38] Xiangtao G, Fuqiang W, Haiyan W, Jianyu T, Qingzhi L, Huaizhi H. Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting. *Sol Energy* 2017, 144: p.185–202.
- [39] Izadi, M. Alshehri, H.M. Hosseinzadeh, F. Shokri Rad, M. Hamida, M. Bechir Ben, Numerical study on forced convection heat transfer of TiO₂/water nanofluid flow inside a double-pipe heat exchanger with spindle-shaped turbulators, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 150: p. 612–623.
- [40] Bellos E., Tzivanidis Ch., Investigation of a star flow insert in a parabolic trough solar collector, *Applied Energy*, 2018, 224: p. 86–102.
- [41] Vahidinia F., Evaluation of energy and exergy of a parabolic trough solar collector equipped with internal fin and star turbulator absorber tube, *Journal of Applied and Computing Sciences in Mechanics*, 2024, 36 (2): p. 1-17 (In Persian).
- [42] Allauddin U., Rafique M., Malik O., Rasid O., Waseem A., King P., Karim M., Almond H., Investigation of the Thermo-hydraulic performance of a roughened Parabolic trough collector, *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 219: p. 119523.
- [43] Dovom A.R.M., Aghaei A., Joshaghani A.H., Dezfulizadeh A., kakavandi A.A., Hassani oshaghani A., Dezfulizadeh A., azadi kakavandi A., Numerical analysis of heating aerosol carbon nanofluid flow in a power plant recuperator with considering ash fouling: a deep learning approach, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2022, 141: p. 75–90.
- Science, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1256-8>
- [28] Abdulwahab AA Rashed, Alsarraf AAJ. Thermo-hydraulic and economic performance of a parabolic trough solar collector equipped with finned rod turbulator and filled with oil-based hybrid nanofluid, *J Taiwan Inst Chem Eng*, 2021, 124: p.192–204.
- [29] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Appl Energy* 2017, 205: p.540–61.
- [30] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Sol Energy* 2017, 157: p.514–31.
- [31] Bellos E., Tzivanidis C., Enhancing the performance of a parabolic trough collector with combined thermal and optical techniques, *Appl. Therm. Eng.*, 2019, 164: p. 114496, 2020.
- [32] Bellos E., Tzivanidis C., Daniil I., Energetic and exergetic investigation of a parabolic trough collector with internal fins operating with carbon dioxide, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 2017, 8(2): p. 109–122, doi: 10.1007/s40095-017-0229-5.
- [33] Bellos E., Tzivanidis C., Daniil I., Antonopoulos K. A., The impact of internal longitudinal fins in parabolic trough collectors operating with gases, *Energy Convers. Manag.*, 2017, 135: p. 35–54.
- [34] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D., Optimum number of internal fins in parabolic trough collectors, *Appl. Therm. Eng.*, 2018, 137: p. 669–677.
- [35] Felipe AS, Dezan DJ, Pantaleao AV, Salviano LO. Longitudinal vortex generator applied to heat transfer enhancement of a flat plate solar water heater. *Appl Therm Eng*, 2019, 158: p.113790.
- [36] Peng H., Li M., Hu F., Feng S., Performance analysis of absorber tube in parabolic trough solar collector inserted with semi-annular and fin shape metal foam hybrid structure, *Case Stud. Therm. Eng.*, 2021, 26: p. 101112.

- [52] Ghasemi S.E., Hydrothermal analysis of turbulent fluid flow inside a novel enhanced circular tube for solar collector applications, *Waves Random Complex Media*, 2023, 33: p. 225–236.
- [53] Wang D., Ashraf Ali M., Sharma K., Fahad Almojil S., Alizadeh A., Fahmi Alali A., Ibrahim Almohana A., Multiphase numerical simulation of exergy loss and thermohydraulic behavior with environmental considerations of a hybrid nanofluid in a shell-and-tube heat exchanger with twisted tape, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 147: p. 1–10.
- [54] Sheikholeslami M., Jafaryar M., Li Z., Nanofluid turbulent convective flow in a circular duct with helical turbulators considering CuO nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2018, 124: p. 980–989.
- [55] Sheikholeslami M., Jafaryarab M., Li Z., Second law analysis for nanofluid turbulent flow inside a circular duct in presence of twisted tape turbulators, *J. Mol. Liquids*, 2018, 263: p. 489–500.
- [56] Sheikholeslami M., Farshad S.A., Investigation of solar collector system with turbulator considering hybrid nanoparticles. *Renew Energy*, 2021, 171: p. 1128–58
- [57] Farshad S.A., Sheikholeslami M., Numerical examination for entropy generation of turbulent nanomaterial flow using complex turbulator in a solar collector. *Physica A*, 2020, 550: p.123–951.
- [58] Kumar R, Chand P., Performance prediction of extended surface absorber solar air collector with twisted tape inserts. *Sol Energy* 2018, 169: p. 40–8.
- [59] Promvong P., Eiamsa-ard S., Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert, *Int. Commun. Heat Mass Tran.*, 2007, 34 (7), p. 849–859.
- [60] Zaboli M., Ajarostaghi S. S. M., Saedodin S., Pour M. S., Thermal performance enhancement using absorber tube with inner helical axial fins in a parabolic trough solar collector, *Appl. Sci.*, 2021, 11(16): p. 1-22.
- [44] Yadegari M and Bak Khoshnevis A 2021 Numerical and Experimental Study of Characteristics of the Wake Produced Behind an Elliptic Cylinder with Trip Wires. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering.*, 45(1): p.265-285.
- [45] Yadegari, M., A. Bak Khoshnevis, and M. Boloki, An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2023. 47(1): p. 67-80.
- [46] Mansouri, Z., M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis, Numerical investigation of the effects of installing four trip wires with different diameters on the mean and fluctuation velocities and characteristics of the wake around the circular cylinder. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023. 45(9): p. 459.
- [47] Bak Khoshnevis, A., M. Boloki, and M. Yadegari, The Investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylindrical wake. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2020. 10(1): p. 223-236.
- [48] Sadeghi, M., Yadegari, M. & Khoshnevis, A.B. Numerical investigation of the flow characteristics around two sequential cylinders with circular and square cross-sections. *J Mar Sci Technol* 29, 2024, p.315–332.
- [49] Too YCS, Benito R. Enhancing heat transfer in air tubular absorbers for concentrated solar thermal applications. *Appl Therm Eng.*, 2013, 50: p.1076–83
- [50] García A, Herrero-Martin R, Solano JP, P´erez-García J. The role of insert devices on enhancing heat transfer in a flat-plate solar water collector. *Appl Therm Eng.*, 2018, 132: p.479–89.
- [51] Yılmaz İ. H., Mwesigye A., Göksu T. T., Enhancing the overall thermal performance of a large aperture parabolic trough solar collector using wire coil inserts, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2020, 39: p. 100696.

- numerical analysis. *Energy Convers Manag*, 2017, 153: p. 278–87.
- [70] Javaniyan Jouybari H, Saedodin S, Zamzamian A, Nimvari ME. Experimental investigation of thermal performance and entropy generation of a flat-plate solar collector filled with porous media. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 127: p. 1506–17.
- [71] Armaghani T., Maghrebi M.J., Nazari M., The effects of fluid/nanoparticle and fluid/solid heat transfer parameters on forced displacement heat transfer of nanofluids in a porous channel: with the condition of thermal imbalance, *Journal of modeling in engineering*, 2016, 44 (In Persian).
- [72] Abdullatif Alshuhail L. , Shaik F., Syam Sundar L , Thermal efficiency enhancement of mono and hybrid nanofluids in solar thermal applications – A review, *Alexandria Eng. J.*, 2023, 68: p. 365–404.
- [73] Vahidinia F., Khorasani-Zade H., Aghaee A., Studying the thermal and hydrodynamic performance of a linear parabolic solar collector using hybrid nanofluid of MWCNTs/ Fe_2O_3 - Terminol VP, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2022, 2: p. 82-95 (In Persian).
- [74] Ghanbari R., Heihat M.M., Experimental investigation of the effect of magnesium oxide hybrid nanofluid and multi-walled carbon nanotubes on increasing solar radiation energy absorption efficiency, *Amirkabir Mechanical Engineering Journal*, 2022, 54(5): p. 1101-1124, (In Persian).
- [75] Niknejadi M., Alizade A., Zekri H., Ruhani B., Nasajpour-esfahani N., Fadhil G., Engineering Analysis with Boundary Elements Numerical simulation of the thermal-hydraulic performance of solar collector equipped with vector generators filled with two-phase hybrid, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 151: p. 670-685.
- [76] Panja S. K., Das B., Mahesh V., Numerical study of parabolic trough solar collector ' s thermo-hydraulic performance using CuO and Al 2O_3 nanofluids, *Appl. Therm. Eng.*, 2024, 248: p. 123-179.
- [61] Kursun B. Thermal performance assessment of internal longitudinal fins with sinusoidal lateral surfaces in parabolic trough receiver tubes. *Renew Energy* 2019, 140: p.816–27.
- [62] Jaramillo O. A., Borunda M., Velazquez-Lucho K. M., Robles M., Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: An analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts, *Renew. Energy*, 2016, 93: p. 125–141.
- [63] Mwesigye A., Bello-Ochende T., Meyer J. P., Heat transfer and entropy generation in a parabolic trough receiver with wall-detached twisted tape inserts, *Int. J. Therm. Sci.*, 2016, 99: p. 238–257, 2016.
- [64] Song X., Dong G., Gao F., Diao X., Zheng L., Zhou F., A numerical study of parabolic trough receiver with nonuniform heat flux and helical screw-tape inserts, *Energy*, 2014, 77: p. 771–782.
- [65] Fahim T., Laouedj S., Abderrahmane A., Driss Z., Tag-Eldin E.S.M., Guedri K., Younis O., Numerical study of perforated obstacles effects on the performance of solar parabolic trough collector, *Front. Chem.*, 2023, 10: p. 1–11.
- [66] Mwesigye A., Bello-Ochende T., Meyer J. P., Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts, *Appl. Energy*, 2014, 136: p. 989–1003.
- [67] Reddy KS, Ravi Kumar K, Satyanarayana GV. Numerical investigation of energy efficient receiver for solar parabolic trough concentrator. *Heat Transfer Eng.*, 2008, 29: p.961–72.
- [68] Dehghan M, Rahmani Y, Domiri Ganji D, Saedodin S, Valipour MS, Rashidi S. Convection-radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: Homotopy perturbation method versus numerical analysis. *Renew Energy* 2015, 74: p.448–55.
- [69] Saedodin S, Zamzamian SAH, Nimvari ME, Wongwises S, Jouybari HJ. Performance evaluation of a flat-plate solar collector filled with porous metal foam: Experimental and

- [85] Sarasar M. B., Saedodin S., Rostamian S. H., Doostmohammadi M., Khaledi O., The effect of vortex generator insert and TiO₂/Water nanofluid on thermal efficiency and heat transfer of flat plate solar collector, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2022, 53: p. 102617.
- [86] Byiringiro J., Chaanaoui M., Halimi M., Heat transfer enhancement of a parabolic trough solar collector using innovative receiver configurations combined with a hybrid nanofluid: CFD analysis Performance Evaluation criterion, *Renew. Energy*, 2024, 233: p. 121169.
- [87] Mustafa J., Alqaed S., Aybar H., Husain S., Investigation of the effect of twisted tape turbulators on thermal-hydraulic behavior of parabolic solar collector with polymer hybrid nanofluid and exergy analysis using numerical method and ANN, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2022, 144: pp. 81–93.
- [88] Said Z., Sharma P., Syam Sundar L., Nguyen V. G., Tran V. D., Le V. V., Using Bayesian optimization and ensemble boosted regression trees for optimizing thermal performance of solar flat plate collector under thermosyphon condition employing MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2022, 53: p. 102708.
- [89] Azimy N., Saffarian M. R., Investigation of thermal characteristics and entropy generation in a solar collector including Fly Ash-Cu hybrid nanofluids: Numerical approach using mixture model, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 152: pp. 169–184.
- [90] Samiezadeh S., Khodaverdian R., Doranehgard M. H., Chehrmonavari H., Xiong Q., CFD simulation of thermal performance of hybrid oil-Cu-Al₂O₃ nanofluid flowing through the porous receiver tube inside a finned parabolic trough solar collector, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2021, 50: p. 101888.
- [91] Alqaed S., Mustafa J., Sharifpur M., Alharthi M. A., Numerical simulation and artificial neural network modeling of exergy and energy of parabolic trough solar collectors equipped
- [77] Pazarlioglu H.K., Ekiciler R., Arslan K., Mohammed N.A.M., Exergetic , Energetic , and entropy production evaluations of parabolic trough collector retrofitted with elliptical dimpled receiver tube filled with hybrid nanofluid, *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 223: p. 120004.
- [78] Vahidinia F., Khorasanizadeh H., Aghaei A., Energy , exergy , economic and environmental evaluations of a finned absorber tube parabolic trough collector utilizing hybrid and mono nanofluids and comparison, *Renew. Energy*, 2023, 205: p. 185–199.
- [79] Karami M., Delfani Sh., Akhavan Bahabadi M.A., Experimental study of direct absorption solar collector performance using carbon nanotube nanofluid, *Iranian Energy Journal*, 1997, 21(2): p. 99-109, (In Persian).
- [80] Mohammed H.A., Vuthaluru H.B., Liu S., Heat transfer augmentation of parabolic trough solar collector receiver's tube using hybrid nanofluids and conical turbulators, *J Taiwan Inst Chem Eng.*, 2021, 125: p.215–42.
- [81] Xiong Q., Jafaryar M., Divsalar A., Sheikholeslami M., Shafee A., Dat D., Khan M. H., Tlili I., Lijk Z., Macroscopic simulation of nanofluid turbulent flow due to compound turbulator in a pipe, *Chem. Phys.*, 2019, 527: p. 110–475.
- [82] Dezfulizadeh A., Aghaei A., Sheikhzadeh G. A., Engineering Analysis with Boundary Elements Comprehensive 3E analyses of a parabolic trough collector equipped with an innovative combined twisted turbulator, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 150: p. 507–527.
- [83] Hosseini Esfahani A., Aliehyaei M., Hassani Joshaghani A., Najafizadeh M.M., Energy, exergy, economic and environmental analysis of parabolic trough collector containing hybrid nanofluid equipped with turbulator, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 150: p. 492–506.
- [84] Ajeena A. M., Farkas I., Víg P., Energy and exergy assessment of a flat plate solar thermal collector by examine silicon carbide nanofluid: An experimental study for sustainable energy, *Appl. Therm. Eng.*, 2024, 236: p. 121844.

- utilizing a two-phase model, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2023, 156: p. 90–113.
- [100] Mustafa J., Alqaed S., Sharifpur M., Evaluation of energy efficiency, visualized energy, and production of environmental pollutants of a solar flat plate collector containing hybrid nanofluid, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: p. 102399.
- [101] Sheikhzade Gh.A., Aghaee A.R., Dezfouli-Zade A., Sepehri Rad M., Numerical investigation of turbulator effect on thermal-hydraulic performance of two-phase hybrid nanofluid inside constant temperature channel, *The 5th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, 2020, Tehran, (In Persian).
- [102] Sheikhzade Gh.A., Asgarian M.S., Aghaee A.R., Numerical simulation of geothermal heat exchanger equipped with turbulator containing two-phase hybrid nanofluid, *Journal of Energy, Engineering and Management*, 2024, 14(2), (In Persian).
- [103] Asgarian M.S., Sheikhzade Gh.A., Aghaee A.R., Investigating the effects of turbulator and vortex generator in geothermal heat exchanger containing two-phase hybrid nanofluid, *The 31st annual international conference of mechanical engineering of Iran and the 9th conference of Iran's power plant industry*, 2023, (In Persian).
- [104] Hosseini A., Ehyaei M.A., Hassani Joshaghani A., Najafi-Zade M.M., Economic, Exergy, and Environmental Analyses of Parabolic Trough Solar Collector with Turbulator Containing Polymer Hybrid Nanofluid, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2023, 12(4): p. 80-99, (In Persian).
- [105] Rahmati A. R., Chitsazi F., Reiszadeh M., Evaluation of Performance of both Spiral and Direct Tube Heat Exchanger Using the Hybrid Nano fluid, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2020, 10(1): p. 193-207, (In Persian).
- with innovative turbulators containing hybrid nanofluids, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2023, 148(16): p. 8611–8626.
- [92] Amar M., Akram N., Chaudhary G.Q., Kazi S. N., M. Soudagar M.E., Mubarak N.M., Kalam M.A, Energy, exergy and economic (3E) analysis of flat-plate solar collector using novel environmental friendly nanofluid, *Sci. Rep.*, 2023, 13(1), p. 1–21, 2023.
- [93] Verma S. K., Tiwari A. K., Chauhan D. S., Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids, *Energy Convers. Manag.*, 2017, 134:p. 103–115, 2017.
- [94] Henein S. M., Abdel-Rehim A. A., El-Nagar K., Energy, economic and environmental analysis of an evacuated tube solar collector using hybrid nanofluid, *Appl. Therm. Eng.*, 2023, 219: p. 119671.
- [95] Hussein O. A., Habib K., Muhsan A. S., Saidur R., Alawi O. A., Ibrahim T. K., Thermal performance enhancement of a flat plate solar collector using hybrid nanofluid, *Sol. Energy*, 2020, 204: p. 208–222.
- [96] Elshazly E., Abdel-Rehim A. A., El-Mahallawi I., 4E study of experimental thermal performance enhancement of flat plate solar collectors using MWCNT, Al₂O₃, and hybrid MWCNT/ Al₂O₃ nanofluids, *Results Eng.*, 2022, 16: p. 100723.
- [97] Said Z., Sharma P., Sundar L.S., Nguyen V.G., Tran V.D., Le V.V., Improving the thermal efficiency of a solar flat plate collector using MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids and ensemble machine learning, *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, 40: p. 102448.
- [98] Nabi H., Pourfallah M., Gholinia M., Jahanian O., Increasing heat transfer in flat plate solar collectors using various forms of turbulence-inducing elements and CNTs-CuO hybrid nanofluids, *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, 33: p. 101909.
- [99] Negeed E. S. R., Alhazmy M., Bokhary A. Y. F., Abulkhair H., Almas M. A., Hedia H. S., Numerical simulation of flat plate solar collector equipped with a turbulator containing water/copper-graphene hybrid nanofluid

-
- [108] Farshad S.A., Sheikholeslami M., Numerical modeling of increasing thermal efficiency of nanofluid in flat plate solar collector equipped with twist strip, *Journal of Modelling in Engineering*, 1999, 17(57): p. 295-313, (In Persian).
- [109] Esfahani A.H., Aliehyaei M., Hassani Joshaghani A., Najafizadeh M.M., Economic, Exergy, and Environmental Analyses of Parabolic Trough Solar Collector with Turbulator Containing Polymer Hybrid Nanofluid, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 2023, 12(4): p. 80-99.
- [106] Jameati M., Pour Mohammadian H., The effect of using two crossed irradiated strips in order to enhance the reception of radiant energy in a linear parabolic solar collector, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, 2020, 11(4): p. 1-10, (In Persian).
- [107] Jameati M., Pour Mohammadian H., Improving the performance of two-fluid convoluted torsional heat exchanger containing hybrid nanofluids, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, 2020, 11(4): p. 1-10, (In Persian).