



## Experimental Study of the Effect of Magnesium Oxide and Multi-Walled Carbon Nanotubes Hybrid Nanofluid on Increasing the Absorption Efficiency of Solar Radiation

R. Ghanbari, M. M. Heyhat\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** The solar radiation absorption efficiency is one of the challenges for engineers in solar energy systems. Using the hybrid nanofluids, which are obtained by dispersing two or more types of nanoparticles in the base fluid, can be effective in better absorption of solar energy. In this study, the effect of type, concentration, and mixing percentage of nanoparticles on optical properties and solar thermal utilization efficiency has been tested. First, magnesium oxide nanofluids and multi-walled carbon nanotubes with water-based fluid were fabricated by a two-step method in volumetric concentrations of 0/01%Vol, 0.02% Vol, and 0.04%Vol, and then the optical properties of single and hybrid forms were measured by spectrophotometer and have been compared by existing relations. Then, to obtain the solar thermal utilization efficiency, a solar simulator has been used. The results show that increasing the concentration of nanofluid, improves the optical properties and solar radiation absorption efficiency. Magnesium oxide nanofluid, multi-walled carbon nanotubes, and hybrid nanofluid have the values of extinction coefficient about 38, 40, and 50 times higher than pure water, respectively. The hybrid nanofluid absorbs more than 90% of the sun's energy at the highest concentration (0.04% Vol) and at a penetration depth of 0.3 cm. Solar energy absorption increases by increasing the concentration, hybridizing the nanofluid, and increasing the penetration distance.

### Review History:

Received: Oct. 24, 2021

Revised: Jan. 07, 2022

Accepted: Feb. 04, 2022

Available Online: Feb. 15, 2022

### Keywords:

Hybrid nanofluid

Magnesium oxide

Carbon nanotube

Optical properties

olar-thermal utilization efficiency

### 1- Introduction

Nowadays, to reduce carbon dioxide emissions and protect the environment, the usage of renewable energy has been a priority in research. Researchers have offered direct and indirect ways to enhance solar energy efficiency. Due to the benefits of thermophysical and optical properties of nanofluids over the base fluid, they suggested the nanofluid as a suitable alternative to the base fluid in solar energy absorbing systems. The utilization of nanofluids as a direct adsorption environment (volumetric adsorbent) will have advantages and capabilities such as improving heat transfer, reducing the size of heat transfer systems, and improving efficiency. Then, other experts have studied nanofluids by dispersing two or more nanoparticles in the base fluid called hybrid nanofluids. They tested nanofluids that were cost-effective, had a wide absorption spectrum, and had significant heat transfer properties relative to the base fluid [1]. Menbari et al. [2] investigated the effect of hybrid nanofluids of alumina and CuO on the performance of direct adsorption parabolic collectors. They combined two different nanoparticles, one of them with high adsorption potential and the other one with high dispersion potential, in different base fluids. They found that collectors with hybrid nanofluids were more efficient than collectors using single nanofluid. Valizade et al. [3]

analyzed the optical properties of CuO nanofluid, SiC, and their porous foam. In this study, the extinction coefficient was examined in the concentrations of 0.01% and 0.1%, while the porosity was 90 and 95%. Their results showed that the amount of extinction coefficient increased by 176% and 20%, respectively. Chen et al. [4] tested the optical properties of Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT) in a solar system as a volumetric adsorbent. Based on their results, with increasing the concentration of nanofluid, an increase in the efficiency of the solar system was observed. The highest thermal efficiency (95%) occurred in nanofluids with a weight concentration of 0.002% in the first 10 minutes of the experiment. In addition, the transmittance of carbon nanotubes decreased with the darkening of the nanofluid and the extinction coefficient increased with decreasing the transmittance. Mohan et al. [5] evaluated the performance of a linear solar collector with a CuO hybrid nanofluid with a volume concentration of 0.2% and 0.25% TiO<sub>2</sub>. They observed that the optical and thermal properties of the hybrid nanofluid at low concentrations were also significantly superior to the base fluid. Also, the photothermal conversion rate in the hybrid nanofluids was increased with the increment of volume concentration. According to studies, we have witnessed the significant effect of hybrid nanofluids in the

\*Corresponding author's email: mmheyhat@modares.ac.ir



enhancement of the optical properties and efficiency of solar systems in recent years. Choosing a nanofluid that can have significant radiative properties has always had challenges. In this study, we tested a hybrid nanofluid from MgO nanofluids and an MWCNT to introduce it as a suitable working fluid for solar systems.

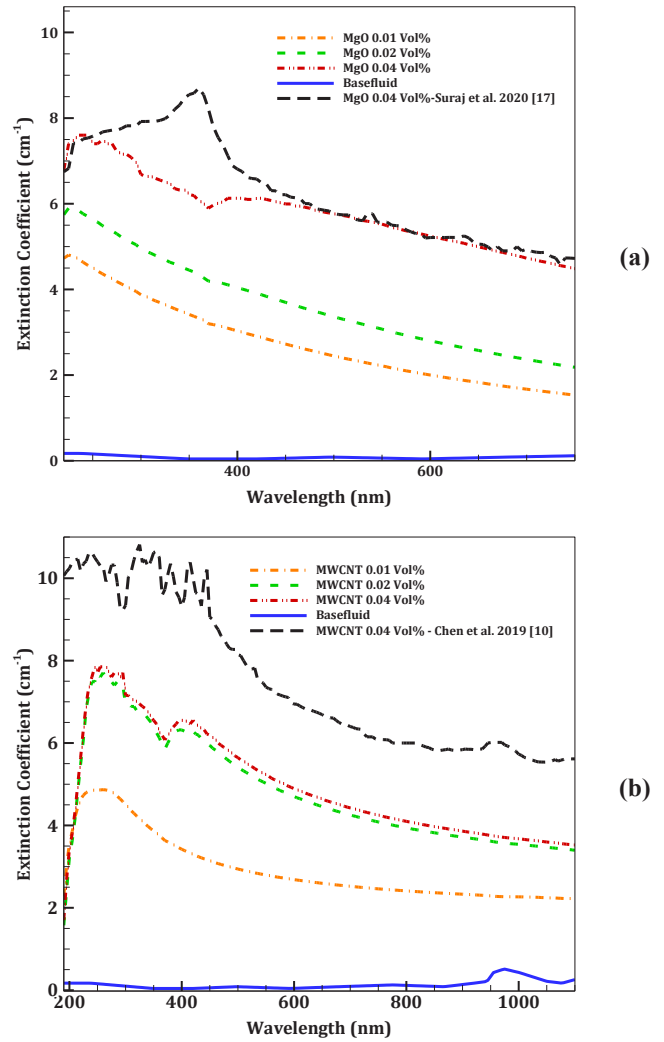
**2- Methodology**

The current study investigates the hybrid nanofluid to analyze optical properties. The powder of MgO with a particle diameter of 20-30nm and stable nanofluid consisting of an MWCNT with a particle diameter of 20-30 nm were purchased. To provide the MgO nanofluid, in the initial stage of the process, to dissolve the Polyvinyl Alcohol (PVA) powder in distilled water. As soon as making PVA fluid has carried out, we added MgO nanoparticles with two steps method to achieve the highest concentration of the experiment. An ultrasonic homogenizer was applied to disperse the nanoparticles in the base fluid. Finally, combining 0.01, 0.02, and 0.04%Vol. of nanofluids in the ratio of 30:70, 50:50, and 70: 30 to make hybrid nanofluids were performed. The optical properties of nanofluids were measured by a spectrophotometer. In this study, due to the concentration of less than 0.6% of nanofluids, we used an extinction coefficient to measure the absorption of nanofluids, which is obtained according to Eq. (1) [3, 6]:

$$\text{Transmittance} = e^{-k_e(\lambda)L} \tag{1}$$

**3- Results and Discussion**

Fig. 1 presents two peaks of extinction coefficient in 0.04Vol% hybrid nanofluid, one of which is located in the ultraviolet region and the other in the visible region. According to this diagram, the extinction coefficient of hybrid nanofluid with 70% of MWCNT has a higher value in the ultraviolet region. Fig. 1 presents two peaks of extinction coefficient in 0.04Vol% hybrid nanofluid, one of which is located in the ultraviolet region and the other in the visible region. According to this diagram, MgO nanofluid had a higher absorption spectrum in the visible and infrared region, but carbon nanotube nanofluid had a higher absorption spectrum in the ultraviolet region. Also, in the highest concentration of this experiment, due to the darkening of the nanofluid, the extinction coefficient increased. The extinction coefficient of the hybrid nanofluid in 0.04Vol% had 42 and 50 times increment compared to the base fluid in the ultraviolet and visible region, respectively. The results of the extinction coefficient in this study (Figs. 1a, b) have a good agreement between the results of Suraj et al. [7] for MgO and the results of Chen et al. [4] for MWCNT. The difference between the results can be due to the quality of the test materials, the size of the used nanoparticles, and the model of the measurement devices.



**Fig. 1. extinction coefficient a) MgO in the current study with Suraj et al. b) MWCNT in the current study with Chen et al.**

**4- Conclusions**

In this research, MgO and MWCNT were fabricated by a two-step method in volume concentrations of 0.01, 0.02, and 0.04% and hybrid ratios of 30:70, 50:50, and 30:70. Increasing the nanofluid concentration resulted in an increase in extinction coefficient of 58.5 for MgO, 60% for MWCNT, and 11% for hybrid nanofluid. In MgO, the extinction coefficient enhancement was 38-times, 40-times for MWCNT, and 50-times for hybrid nanofluids compared to the base fluid.

The solar weighted absorption fraction by hybrid nanofluid at the lowest test concentration (0.01% by volume) at a penetration depth of 0.9 cm, at 0.02% at a penetration depth of 0.5, and 0.04% in the penetration depth of 0.3 cm is more than 90% of solar energy. These results demonstrate the effect of penetration distance and concentration of nanofluid on increasing the amount of solar energy absorption by a nanofluid.

In computing the solar thermal efficiency, hybrid nanofluids improved the solar thermal efficiency due to the higher equilibrium temperature. So that this amount in single nanofluids was 85% and 87% for MgO and MWCNT at a volume concentration of 0.04%, respectively. But this value is estimated to be about 90% for hybrid nanofluids. The small discrepancy between these values and the solar weighted absorption fraction has caused a satisfactory result of this present study.

The hybrid nanofluids of MgO and MWCNT have a wide and high absorption spectrum in different areas. Therefore, hybrid nanofluid can be used as a working fluid for solar energy systems and witnessed the realization of energy conversion goals, including improving efficiency and optimization in solar systems.

### References

- [1] H.M.F. Rabbi, A.Z. Sahin, B.S. Yilbas, A. Al-Sharafi, Methods for the Determination of Nanofluid Optical Properties: A Review, *International Journal of Thermophysics*, 42(1) (2021) 1-42.
- [2] A. Menbari, A.A. Alemrajabi, Y. Ghayeb, Experimental investigation of stability and extinction coefficient of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO binary nanoparticles dispersed in ethylene glycol-water mixture for low-temperature direct absorption solar collectors, *Energy Conversion and Management*, 108 (2016) 501-510.
- [3] M. Valizade, M. Heyhat, M. Maerefat, Experimental comparison of optical properties of nanofluid and metal foam for using in direct absorption solar collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 195 (2019) 71-80.
- [4] W. Chen, C. Zou, X. Li, Application of large-scale prepared MWCNTs nanofluids in solar energy system as volumetric solar absorber, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200 (2019) 109931.
- [5] S. Mohan, A. Joseph, A. Poovathinkal, K. Akhilesh, J. Reji, J.N. Idicula, B. Vishnu, S. Sivapirakasam, Performance Evaluation of Linear Solar Collector Using Hybrid Nanofluid, in: *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, Springer, 2021, pp. 465-472.
- [6] N. Chen, H. Ma, Y. Li, J. Cheng, C. Zhang, D. Wu, H. Zhu, Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of CuO-ATO nanofluids, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 162 (2017) 83-92.
- [7] S. Choudhary, A. Sachdeva, P. Kumar, Investigation of the stability of MgO nanofluid and its effect on the thermal performance of flat plate solar collector, *Renewable Energy*, 147 (2020) 1801-1814.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Ghanbari, M. M. Heyhat, *Experimental Study of the Effect of Magnesium Oxide and Multi-Walled Carbon Nanotubes Hybrid Nanofluid on Increasing the Absorption Efficiency of Solar Radiation*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(5) (2022) 225-228.

DOI: [10.22060/mej.2022.20703.7297](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20703.7297)







## بررسی تجربی تأثیر نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله‌های کربنی چندجداره بر افزایش بازده جذب انرژی تابشی خورشید

رؤیا قنبری، محمدمهدی هیهات\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

### کلمات کلیدی:

نانوسیال هیبریدی  
اکسید منیزیم  
نانولوله کربنی  
خواص تابشی  
راندمان جذب انرژی خورشیدی

**خلاصه:** بازده جذب انرژی تابشی خورشید یکی از چالش‌های مهندسان در سامانه‌های خورشیدی است. استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی که از پراکنده‌سازی دو یا چند نوع نانوذره در سیال پایه حاصل می‌شود، می‌توانند در جذب بهتر انرژی خورشیدی کارآمد باشند. در پژوهش حاضر، تأثیر نوع، غلظت و درصد اختلاط نانوذرات بر خواص تابشی و راندمان جذب انرژی تابشی خورشید بصورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته است. در ابتدا نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره با سیال پایه آب به روش دومرحله‌ای در غلظت‌های حجمی ۰/۰۱٪، ۰/۰۲٪ و ۰/۰۴٪ ساخته شده و سپس خواص تابشی نانوسیال‌ها بصورت تکی و هیبریدی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شده و با روابط موجود مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه برای بدست آوردن راندمان جذب انرژی تابشی خورشید از دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش غلظت نانوسیال، سبب بهبود خواص تابشی و راندمان جذب تابش می‌شود. بهبود ۳۸ برابری ضریب تخفیف نانوسیال اکسید منیزیم، ۴۰ برابری نانولوله کربنی چند جداره و حدود ۵۰ برابری نانوسیال هیبریدی آن‌ها نسبت به سیال پایه بدست آمده است. نانوسیال هیبریدی در بالاترین غلظت آزمایش (۰/۰۴٪ حجمی) و در عمق نفوذ ۰/۳ سانتی‌متر بیش از ۹۰٪ انرژی خورشید را جذب می‌کند. با افزایش غلظت، هیبریدی شدن نانوسیال و افزایش عمق نفوذ، جذب انرژی خورشیدی نیز افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

امروزه در راستای کاهش تولید دی اکسید کربن و حفظ محیط زیست، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در اولویت پژوهش قرار گرفته است. پژوهش‌گران برای افزایش بهره‌وری از انرژی خورشید بصورت مستقیم و غیرمستقیم راه‌هایی را ارائه نمودند. آن‌ها پیش‌بینی کردند به دلیل برتری خواص ترموفیزیکی و تابشی نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه، استفاده از آن‌ها را می‌توان جایگزین مناسبی به عنوان سیال پایه در سامانه‌های جاذب انرژی خورشیدی پیشنهاد داد. استفاده از نانوسیال‌ها به عنوان محیط جذب مستقیم (جاذب حجمی) مزایا و قابلیت‌هایی همچون بهبود انتقال حرارت، کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت و بهبود راندمان را در پی خواهد داشت. در ادامه سایر متخصصان نیز با بهره‌گیری از تجربیات پیشین و اقدامات انجام‌شده، نانوسیال‌هایی با پراکنده‌سازی دو یا چند نانوذره در سیال پایه تحت عنوان نانوسیال هیبریدی را بررسی نموده‌اند. آن‌ها نانوسیال‌هایی که از نظر هزینه مقرون به صرفه بوده، طیف جذبی وسیع و خواص قابل توجه

انتقال حرارتی نسبت به سیال پایه داشتند را مورد آزمایش قرار داده‌اند [۱]. سانی و همکاران [۲] از کربن تک دیواره نانوشاخه<sup>۱</sup> با سایز نانوذرات ۴۰ نانومتر در سیال پایه اتیلن‌گلیکول در جمع‌کننده‌های خورشیدی استفاده کردند. در این پژوهش خواص تشعشعی نانوسیال با سوسپانسیون آمورف کربن با سیال پایه گلیکول مقایسه شد. در نتایج نشان داده شد ضریب تخفیف نانوسیال کربن تک دیواره نانوشاخه با سیال پایه اتیلن‌گلیکول در غلظت‌های پایین نیز بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین این نانوسیال برای جذب مستقیم انرژی خورشیدی بسیار مناسب است. تیلور و همکاران [۳] اثر غلظت بر قدرت جذب نانوسیال‌های گرافیت، مس، نقره و آلومینیوم در سایز نانوذرات ۵۰-۱۰ نانومتر را مورد آزمایش قرار دادند و بیان کردند اگر غلظت نانوسیال بسیار زیاد باشد، جذب در ضخامت نازکی از سیال اتفاق می‌افتد و اتلاف حرارتی به محیط بسیار زیاد خواهد بود و اگر غلظت نانوسیال بسیار پایین باشد، نانوسیال قدرت جذب کافی برای تابش را نخواهد داشت.

1 Single-Wall Carbon Nanohorn (SWCNH)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmheyhat@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



و ۲۰٪ اتفاق افتاد. آن‌ها در ادامه نشان دادند ضریب تخفیف با کاهش میزان تخلخل و قطر منافذ رابطه مستقیم دارد و در مقایسه نتایج نانوسیالات با محیط متخلخل همان ماده هیچ تفاوتی در ضریب تخفیف برای نانوسیال اکسید مس در غلظت حجمی ۰/۱٪ و فوم متخلخل با اثر تخلخل ۹۰٪ وجود ندارد، در حالی که ضریب تخفیف فوم متخلخل سیلیسیم‌کاربید با اثر تخلخل ۹۰٪، ۴ برابر بیشتر از نانوسیال در غلظت حجمی ۰/۱٪ می‌باشد.

کو و همکاران [۹] به مطالعه‌ی خواص تابشی نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله کربنی چند جداره با اندازه نانوذرات ۵۰ نانومتر و اکسید مس برای حالت هیبریدی و مجزا پرداختند و ضریب عبور و ضریب تخفیف برای هر نانوسیال را مورد تحلیل قرار دادند. در پژوهش آن‌ها ضریب عبور نانوسیال هیبریدی با درصد حجمی ۰/۲۵٪ برای اکسید مس و ۰/۰۱۵٪ برای نانوکربن لوله‌ای از بقیه کم‌تر شد. همچنین برای غلظت‌های مختلف نانو لوله کربنی چند جداره بیشترین ضریب تخفیف حاصل شد.

چن و همکاران [۱۰] خواص تابشی نانولوله کربنی چند جداره<sup>۱</sup> با سایز نانوذرات ۲۰ نانومتر در سیال پایه آب را در سیستم خورشیدی به عنوان جاذب حجمی مورد آزمایش قرار دادند. در نتایج آن‌ها با افزایش غلظت نانوسیال، افزایش راندمان سیستم خورشیدی مشاهده شد. بیشترین راندمان حرارتی (۹۵٪) در نانوسیال با غلظت وزنی ۰/۰۰۲٪ در ۱۰ دقیقه اول آزمایش رخ داد. علاوه بر این، ضریب عبور نانولوله کربنی با تیره‌شدن نانوسیال کاهش یافت و با کاهش ضریب عبور، ضریب تخفیف افزایش یافت.

لی و همکاران [۱۱] در پژوهش خود استفاده از نانوسیال هیبریدی سیلیسیم‌کاربید در اندازه نانوذرات ۴۰ نانومتر و نانولوله کربنی چند جداره در جمع‌کننده خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند این نانوسیال هیبریدی در بازه ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر که ناحیه مرئی و نزدیک فروسرخ می‌باشد، جذب تابش خورشید بسیار قابل توجه می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که این نانوسیال هیبریدی در غلظت ۰/۵٪ وزنی در عمق نفوذ یک سانتی‌متر حدود ۹۹٪ تابش خورشید را جذب می‌کند.

یزدانی‌فرد و همکاران [۱۲] مقایسه نتایج شبیه‌سازی استفاده از فیلتر طیفی نانوسیال و مواد تغییر فاز دهنده در سیستم‌های فتوولتائیک را با نتایج آزمایش تجربی ارائه کردند. در نتایج آن‌ها نشان داده شد سیستم فتوولتائیک با استفاده از نانوسیال به عنوان فیلتر طیفی قادر است تا ۵۰٪ دمای فتوولتائیک را کاهش و دمای سیال خروجی سیستم را بیشتر از دو برابر افزایش دهد. همچنین در تحلیل راندمان انرژی چنین دریافتند که

گرچی و رنجبر [۴] اثر به کارگیری نانوسیال‌ها بر افزایش راندمان جمع‌کننده‌های خورشیدی جذب مستقیم را بررسی نمودند. در این پژوهش تأثیر غلظت‌های مختلف سه نوع سیال کاری گرافیت، نقره، آهن مغناطیسی بر خواص تابشی و راندمان جمع‌کننده بررسی شد. ضریب عبور نانوسیال حاوی گرافیت از بقیه نانوسیال‌ها کمتر بود و گرافیت در بیشتر طول موج‌ها دارای ضریب تخفیف بیشتری نسبت به بقیه نانوسیال‌های آزمایش بوده است. همچنین استفاده از نانوسیال‌ها راندمان جمع‌کننده خورشیدی را به طرز چشم‌گیری افزایش داد.

منبری و همکاران [۵] بررسی تأثیر نانوسیال هیبریدی با نانوذرات ۴۰ نانومتری آلومینا و کمتر از ۱۰۰ نانومتر مس اکسید با سیال پایه آب بر عملکرد جمع‌کننده سهموی جذب مستقیم انجام دادند. آن‌ها دو نانوذره مختلف که یکی از آن‌ها دارای قدرت جذب بالا و دیگری دارای قدرت پراکنش بالا بوده را با سیال‌های پایه متفاوتی ترکیب کردند و دریافتند راندمان جمع‌کننده‌هایی که از نانوسیال هیبریدی استفاده می‌کنند نسبت به جمع‌کننده‌هایی که از یک نانوسیال در آن استفاده می‌کنند بسیار بالاتر است.

نان چن و همکاران [۶] پژوهشی در زمینه بررسی ضریب جذب و تخفیف نانوسیال هیبریدی با نانوذرات ۱۰ نانومتری آنتیموان و ۴۰ نانومتری اکسید مس با سیال پایه آب در جمع‌کننده‌های جذب مستقیم را ارائه کردند. آن‌ها برای آنکه گستره وسیعی از طول موج‌ها را که دارای بیشترین انرژی هستند را پوشش دهند از دو نانوذره استفاده نمودند. نانوذره اکسید مس دارای ضریب جذب بالا در ناحیه مرئی و نانوذره آنتیموان دارای ضریب جذب بالا در ناحیه نزدیک مادون قرمز بوده است و مشاهده کردند ترکیب این دو نانوذره قدرت جذب را به میزان قابل توجهی افزایش داده است.

مهرعلی و همکاران [۷] تبدیل انرژی حرارتی خورشیدی را با طیف کامل از طریق گرافن، نقره با اندازه ذرات ۴۵-۲۵ نانومتر و نانوسیالات پلاسمونی ترکیبی با استفاده از جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت بررسی نمودند و در ادامه خواص تابشی نانوسیال‌ها را با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری کردند. آن‌ها چنین نتیجه‌گیری کردند که کارایی جمع‌کننده خورشیدی در نقطه بهینه تابشی نانوسیال هیبریدی، ۷۷٪ افزایش یافت.

ولی‌زاده و همکاران [۸] خواص تابشی نانوسیال اکسید مس با سایز نانوذرات ۳۰ نانومتر و سیلیسیم‌کاربید در سایز نانوذرات ۳۵ نانومتر و فوم متخلخل آن‌ها را با سیال پایه آب آزمایش کردند. در این پژوهش ضریب تخفیف در درصد حجمی ۰/۰۱٪ تا ۰/۱٪ و اثر تخلخل ۹۰ تا ۹۵ درصد اندازه‌گیری شد و افزایش میزان ضریب تخفیف به اندازه‌ی به ترتیب ۱۷۶٪



جدول ۱. مشخصات فیزیکی نانوذره اکسید منیزیم (ارائه شده توسط شرکت وی سی ان)

Table 1. Physical specifications of Mgo nanoparticle (obtained from VCN-Material Company)

خلوص	٪۹۹
شکل	کروی
قطر	۲۰ نانومتر
رنگ	سفید
چگالی	۳/۵۸ گرم بر سانتی متر مکعب

پایه آب و رفتار ترموفیزیکی قابل توجه نانوسیال اکسید منیزیم<sup>۲</sup>، نانوسیال هیبریدی حاصل از این دو نانوسیال را جهت معرفی به عنوان سیال کاری مناسب سیستم‌های خورشیدی مورد آزمایش قرار دادیم. همچنین این نکته حائز اهمیت می‌باشد که در پژوهش‌های منتشرشده مطالعه جامعی راجع به اکسید منیزیم و نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانوله کربنی چند جداره تاکنون صورت نگرفته است. از آب نیز به دلیل فراوانی، صرفه‌ی اقتصادی و همچنین استفاده به عنوان سیال عامل کاری متداول در سامانه‌های انرژی به عنوان سیال پایه آزمایش استفاده شده است.

## ۲- الگوسازی تجربی

### ۲-۱- تهیه و روش ساخت نانوسیال

در این پژوهش دو نانوذره با سیال پایه آب بصورت تکی و هیبریدی برای بررسی خواص تابشی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند. نانوسیال اول شامل نانوذره‌ی اکسید منیزیم، نانوسیال دوم شامل نانوذره‌ی نانولوله‌ی کربنی چندجداره بوده است. برای تهیه نانوسیال اول، نانوذره اکسید منیزیم با قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر، خلوص ٪۹۹ و چگالی ۳/۵۸ گرم بر سانتی متر مکعب بصورت پودر از شرکت وی سی ان<sup>۳</sup> تهیه شده است که در جدول ۱ مشخصات کامل آن آمده است. همچنین جهت افزایش پایداری نانوسیال اکسید منیزیم از پلی‌وینیل‌الکل<sup>۴</sup> به عنوان پایدارکننده استفاده شده است.

نانوسیال نانولوله کربنی چندجداره به صورت پایدار در آب با قطر نانوذره‌ی ۳۰-۲۰ نانومتر، خلوص ٪۹۵ و غلظت وزنی ٪۱ از شرکت وی سی ان تهیه گردید. با توجه به طیف جذبی وسیع مشاهده شده از غلظت‌های مورد آزمایش در پژوهش‌های اخیر، غلظت‌های حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ درصد انتخاب

انرژی سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی به ترتیب ٪۱۴ و ٪۲۲ بیشتر بوده و انرژی تلف شده سیستم نیز به ترتیب ٪۰/۵ و ٪۰/۷ درصد کمتر از سیستم فتولتائیک حرارتی معمولی و سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیال است.

موهان و همکاران [۱۳] به ارزیابی عملکرد کلکتور خورشیدی خطی با نانوسیال هیبریدی اکسید مس با غلظت حجمی ۰/۲٪ و ۰/۲۵٪ اکسید تیتانیوم پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند خواص تابشی و حرارتی نانوسیال هیبریدی در غلظت‌های پایین نیز دارای برتری قابل توجهی نسبت به سیال پایه بوده است. همچنین نرخ تبدیل حرارتی نور در نانوسیال هیبریدی مورد آزمایش آن‌ها با افزایش غلظت و جذب نور افزایش یافت.

هزرا و همکاران [۱۴] عملکرد تبدیل حرارتی نور را در نانوسیال تکی نیتريد بور و نانوسیال هیبریدی نیتريد بور با کربن سیاه در سیال پایه اتیلن گلیول را درون یک کلکتور آزمایشگاهی کوچک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پس از آزمایش، افزایش ۳۴ درصدی راندمان تبدیل حرارتی نور را در نانوسیال نسبت به سیال پایه اتیلن گلیکول محاسبه و این نانوسیال هیبریدی را نانوسیالی مناسب جهت استفاده در کلکتورهای خورشیدی معرفی نمودند. طبق مطالعات انجام‌شده، شاهد نقش به سزای نانوسیال‌های هیبریدی در بهبود خواص تابشی و راندمان سیستم‌های خورشیدی در چند سال اخیر بوده‌ایم. انتخاب نانوسیالی که بتواند خواص تابشی قابل توجهی داشته باشد همواره دارای چالش‌هایی بوده است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به خواص تابشی مناسب برای افزایش میزان جذب نور، خواص ترموفیزیکی مناسب، روش ساخت و پایدارسازی نانوسیال و صرفه اقتصادی استفاده از آن‌ها اشاره کرد. در این پژوهش، خواص و روش ساخت نانوسیالات مختلف بررسی شد. به دلیل خواص تابشی رضایت‌بخش نانوله‌ی کربنی چندجداره<sup>۱</sup> با سیال

2 MgO

3 VCN material

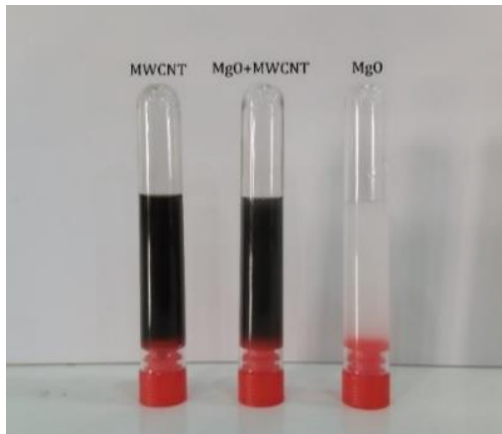
4 Poly Vinyl Alcohol (PVA)

1 MWCNT

جدول ۲. مشخصات فیزیکی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره (ارائه شده توسط شرکت وی سی ان)

Table 2. Physical specifications of MWCNT nanoparticle (obtained from VCN-Material Company)

خلوص	۹۵٪
طول	۵-۱۰ میکرومتر
قطر	۲۰-۳۰ نانومتر
رنگ	مشکی
چگالی	۲/۱ گرم بر سانتی متر مکعب
مساحت سطح ویژه	>۲۰۰ متر مربع بر گرم



شکل ۱. نمونه‌ای از نانوسیال‌ها

Fig. 1. Samples of nanofluids

شدند. همچنین رقیق‌سازی برای رساندن به غلظت‌های حجمی ۰/۰۲٪ و ۰/۰۱٪ با آب مقطر انجام شده است [۱۰]. مشخصات نانولوله کربنی چند جداره در جدول ۲ آورده شده است.

برای تهیه‌ی نانوسیال اکسید منیزیم ابتدا با استفاده از همزن مغناطیسی<sup>۱</sup> به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد پودر پلی‌وینیل‌الکل (به مقدار ۳:۱ نسبت به نانوذره اکسید منیزیم) را در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه نمودیم. سپس مقدار ۰/۰۷۲ گرم پودر سفیدرنگ نانوذره اکسید منیزیم به روش دو مرحله‌ای برای ساخت بالاترین غلظت مورد آزمایش (۰/۰۴٪ حجمی) در پنج قسمت به پلی‌وینیل‌الکل افزودیم. برای پایدارسازی نانوذرات در سیال پایه از دستگاه همزن آلتراسونیک<sup>۲</sup> مدل SKL۹۵۰-IIIDN از شرکت Ningbo Sjia Lab به مدت ۳۰ دقیقه با توان ۹۰ درصد استفاده شده است [۸]. در پایان، رقیق‌سازی با آب مقطر برای تهیه‌ی نانوسیال با غلظت‌های ۰/۰۲٪ و ۰/۰۱٪ حجمی انجام شد.

برای ساخت نانوسیال هیبریدی پژوهش حاضر، ابتدا نانوسیال‌های اکسید منیزیم و نانولوله‌ی کربنی چندجداره در غلظت‌های حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ درصد ساخته شدند و سپس این نانوسیال‌ها با نسبت ۳۰:۷۰، ۵۰:۵۰ و ۷۰:۳۰ با یکدیگر مخلوط شدند. نمونه‌ای از نانوسیال‌های ساخته‌شده در شکل ۱ آمده است.

توزیع نانوذرات در سیال پایه جهت سنجش میزان کلوخگی در شکل ۲

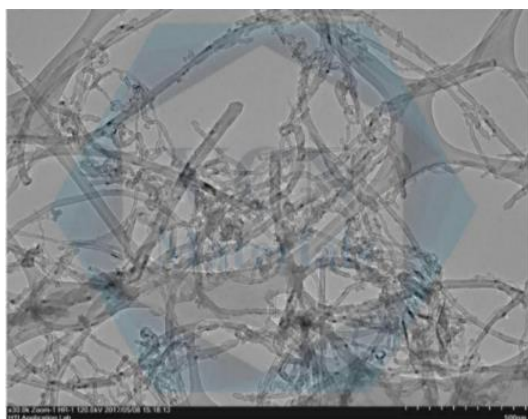
- 1 Magnetic stirrer
- 2 Ultrasonic homogenizer

آمده است. این تصاویر از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> در مقیاس ۵۰۰ نانومتر بدست‌آمده است.

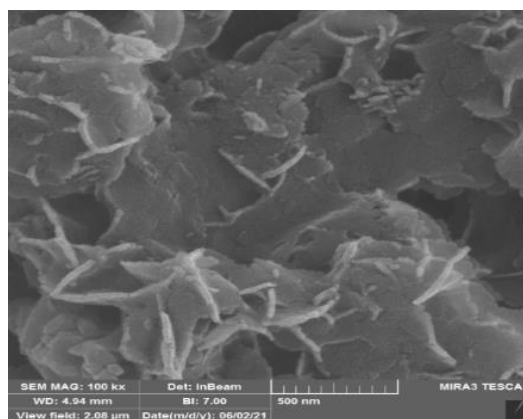
نانوسیال یک مخلوط ساده از نانوذرات درون سیال پایه نیست. بلکه به سبب نیروهای بین‌مولکولی نانوذرات می‌توانند به هم چسبیده و ته نشین شوند که در اینصورت نانوسیال از حالت همگنی خارج و ناپایدار خواهد شد. در این پژوهش با استفاده از سورفکتانت و همزن فراصوت به همگن‌سازی و تولید نانوسیال‌های پایدار مبادرت ورزیده شده است. علاوه بر مشاهده فیزیکی مخلوط‌های همگن تولید شده که عدم ته‌نشینی آن‌ها در بلند مدت

3 Scanning Electron Microscope (SEM)

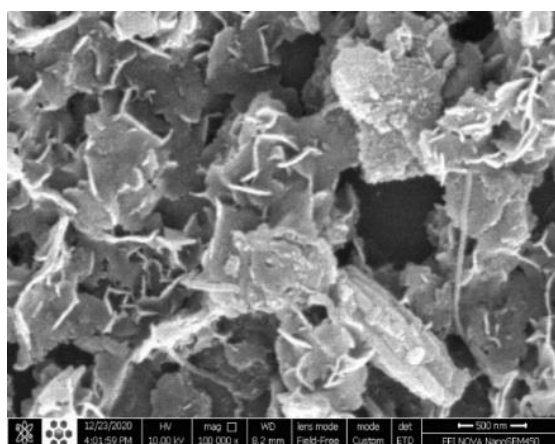




(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲. توزیع نانوذرات در مقیاس نانومتری با میکروسکوپ الکترونی (الف) نانوسیال اکسید منیزیم (تهیه شده در آزمایشگاه نانوایوتوالکتریک دانشگاه تربیت مدرس) (ب) نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره (تهیه شده از شرکت وی سی ان) (ج) نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره (تهیه شده در آزمایشگاه نانوایوتوالکتریک دانشگاه تربیت مدرس)

**Fig. 2. SEM images of a) MgO nanofluid (taken at the nano-optoelectronics laboratory of Tarbiat Modares University), b) MWCNT nanofluid (taken at VCN-Material company), and c) MgO-MWCNT hybrid nanofluid (taken at the nano-optoelectronics laboratory of Tarbiat Modares University)**

محاسبه راندمان حرارتی و سنجش نقش افزودن نانوذرات در عمل، از دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی استفاده شد. در ادامه به شرح تفصیلی این دو قسمت خواهیم پرداخت.

### ۲-۲-۱- اندازه‌گیری خواص تابشی

برای اندازه‌گیری دقیق میزان جذب نور و محاسبه خواص تابشی نانوسیالات مورد آزمایش از دستگاه اسپکتروفتومتر<sup>۱</sup> UV مدل OPTIZEN ۳۲۲۰ واقع در دانشگاه تربیت مدرس، با دقت

(حدود سه ماه) حکایت از پایداری آنها داشت، مقادیر اندازه‌گیری پتانسیل زتا برای نانوسیال‌های نانولوله کربنی چند جداره، اکسید منیزیم و نانوسیال هیبریدی ۵۰٪-۵۰٪ به ترتیب ۲۱/۲- میلی‌ولت، ۱۴/۵- و ۱۷/۳- میلی‌ولت بود که بیانگر پایداری مناسب آنهاست.

### ۲-۲-۲- روش آزمایش

پژوهش حاضر شامل دو قسمت است. در قسمت اول برای سنجش پتانسیل نانوسیال در جذب انرژی خورشیدی و همچنین تغییرات آن با افزودن نانوذرات، خواص تابشی اندازه‌گیری شد. در قسمت دوم برای

1 Spectrophotometer



شکل ۳. اسپکتروفوتومتر UV، آزمایشگاه آنالیز دستگاهی دانشگاه تربیت مدرس

Fig. 3. UV spectrophotometer, instrumental analysis laboratory of Tarbiat Modares University

اندازه‌گیری  $\pm 0.3\%$  که دارای دو فتودیود سیلیکونی به عنوان آشکارساز بود استفاده شد. در این آزمایش مقدار ۴ میلی‌لیتر از نانوسیال ساخته شده درون ظرف شیشه‌ای تمیزی با اندازه‌ی  $4 \times 1 \times 1$  سانتی متر مکعب که از جنس کوارتز<sup>۱</sup> در دستگاه اسپکتروفوتومتر شکل ۳ ریخته شد. ابتدا میزان جذب نور سیال پایه بر حسب طول موج‌های متفاوت برای سنجش میزان دقت دستگاه در محدوده‌ی طول موج ۱۱۰۰-۱۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. سپس نانوسیال تهیه‌شده بصورت پایدار و بدون حباب، در غلظت‌های حجمی و با نسبت‌های مختلف بصورت تکی و هیبریدی برای سنجش میزان جذب نور بر حسب طول موج در دمای اتاق (۲۰ درجه سانتی‌گراد) درون دستگاه قرار گرفتند. در نهایت نتیجه‌ی آزمایش در مانیتور تحت نمودار میزان جذب و ضریب عبور نور بر حسب طول موج نمایش داده شد.

### ۲-۲-۳- تحلیل عدم قطعیت

آزمایش‌هایی که انجام می‌شوند، هر قدر هم به صورت دقیق انجام شود، باز هم امکان وجود خطاهایی وجود دارد و نمی‌توان به نتایج به‌دست‌آمده به‌طور کامل اطمینان داشت. برای این‌که نتایج آزمایش به نتایج صحیح نزدیک‌تر باشد معمولاً آزمایش را چندین بار تکرار می‌کنند. در نهایت از نتایج به‌دست‌آمده، عدم قطعیت آزمایش را برای میزان اطمینان به نتایج آزمایشگاهی تعیین می‌کنند.

عوامل بسیاری در آزمایش موجب انحراف نتایج از نتایج صحیح می‌شود. مانند بی‌دقتی کاربر، شرایط محیطی، مواد آزمایشگاهی، خطای دستگاه‌ها و تجهیزات، قابل محاسبه نبودن یک پارامتر و غیره. از خطاهای این

- 4 Olip
- 5 Resolution

شبهه‌سازی نور خورشید و بدست آوردن میزان تغییرات دما نسبت به زمان با دستگاه شبهه‌ساز خورشید<sup>۲</sup> مدل SIM-۱۰ شرکت شریف سولار (شکل ۴) موجود در آزمایشگاه نانوآپتوالکتریک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. این دستگاه متشکل از ۲ لامپ هالوژن و ۴ لامپ ال‌ای‌دی<sup>۳</sup> برای شبهه‌سازی نور خورشید است. در این آزمایش ابتدا سل با تابش مرجع  $100 \text{ mW/cm}^2$  کالیبره شد. یک ظرف شیشه‌ای از جنس کوارتز تحت تابش

### ۲-۲-۲- شبهه‌ساز خورشیدی

۱ Quartz  
 2 Solar simulator  
 3 Light-Emitting Diode (LED)



شکل ۴. شبیه‌ساز خورشیدی و دوربین ترموگرافی، آزمایشگاه نانو‌اپتوالکترونیک دانشگاه تربیت مدرس

Fig. 4. Solar simulator and thermography camera, nano-optoelectronics laboratory of Tarbiat Modares University

اما برای محاسبه‌ی عدم قطعیت مرکب بایستی انحراف معیار در مشتق پارامترها طبق معادله (۱) ضرب شود. همچنین انحراف معیار از معادله (۲) حاصل می‌شود [۱۵]:

$$\omega = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{average})^2}{n}} \quad (2)$$

طبق معادله (۲)، داده‌های به دست آمده از میانگین داده‌های تکرارهای آزمایش کسر می‌شود و پس از به توان‌رسانی مجموع آن‌ها، بر تعداد تکرار آزمایش تقسیم می‌گردد.

عدم قطعیت ضریب عبور خروجی از دستگاه اسپکتروفوتومتر با دقت  $> \pm 0.3\%$  و دمای نمایش داده شده دوربین ترموگرافی با دقت  $0.1$  درجه از نوع ساده می‌باشد. بیشترین عدم قطعیت ساده‌ی به دست آمده در دو بار تکرار آزمایش همان انحراف معیار داده‌های خروجی دستگاه می‌باشد. با توجه به اینکه ضریب تخفیف از معادله (۳)، تابش طیفی از معادله (۴)، کسر وزنی جذب خورشید از معادله (۵) و راندمان حرارتی خورشیدی از معادله (۱۱) به دست آمده، عدم قطعیت آن‌ها از نوع مرکب می‌باشد. مقادیر عدم قطعیت محاسبه شده برای هر مؤلفه در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است

آزمایش می‌توان به خطای عمده و سیستماتیک اشاره کرد. خطای عمده که از خطای انسانی ناشی می‌شود عبارتست از اندازه‌گیری غیردقیق مواد مورد نیاز، روش نادرست ساخت نانوسیال، میزان پایداری نامناسب نانوسیال، استفاده غیرصحیح از دستگاه، تمیز نبودن کوئت اسپکتروفوتومتر، استفاده از سمت غیرشفاف کوئت در سمتی که دستگاه اندازه‌گیری را انجام می‌دهد و وجود حباب در نمونه‌ی نانوسیال موجود در کوئت. همچنین برای خطای سیستماتیک می‌توان کالیبره‌نبودن دستگاه اسپکتروفوتومتر، عدم تنظیم دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی برای تابش مرجع و تابش غیر یکنواخت لامپ‌ها را نام برد.

میزان عدم قطعیت در هر آزمایش طبق منابع موجود از معادله (۱) به دست می‌آید [۱۵].

$$\omega_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \omega_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \omega_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \omega_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$R = f(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

در معادله (۱)،  $\omega$  عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده می‌باشد. در محاسبه عدم قطعیت ساده، به دست آوردن انحراف معیار کافی است.

جدول ۳. عدم قطعیت هر پارامتر

Table 3. Uncertainty of each parameter

پارامتر	نوع عدم قطعیت	مقدار عدم قطعیت (%)
ضریب عبور	ساده	۱/۳
دمای نمایش داده شده در دوربین ترموگرافی	ساده	۰/۰۷
ضریب تخفیف	مرکب	۰/۱
تابش طیفی	مرکب	۰/۰۸
کسر وزنی جذب خورشید	مرکب	۱
راندمان حرارتی خورشید	مرکب	۱/۱

جذب نانوسیال‌ها استفاده می‌کنیم که طبق معادله (۳) بدست می‌آید [۶ و ۸]:

$$\text{ضریب عبور} = e^{-k_e(\lambda)L} \quad (3)$$

در معادله (۳)،  $K_e(\lambda)$  ضریب تخفیف و  $L$  عمق نفوذ می‌باشد. در پژوهش حاضر، ضریب عبور نانوسیال در بازه ۱۱۰۰-۱۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شده است. ضریب تخفیف نیز به تبع از آن با معادله (۳) بدست آمده است. از آنجا که ضریب عبور نانوسیال نقش مهمی در جذب پرتوها دارد می‌توان گفت برای حصول نتیجه‌ی بهتر به معنی جذب بالاتر لازم است نانوسیالی با ضریب عبور کمتر انتخاب کنیم تا طبق معادله (۳) میزان ضریب تخفیف که با ضریب جذب تقریباً برابر است بالاتر رود.

همانگونه که در شکل ۶ (الف) و ۶ (ب) نمایان است با افزایش غلظت حجمی نانوسیال به دلیل افزایش تعداد نانوذرات، شاهد افزایش برخورد پرتوهای تابیده شده به ذرات و در نتیجه افزایش ضریب تخفیف یا جذب بوده‌ایم. همچنین با توجه به اینکه ضریب عبور در ناحیه فرابنفش<sup>۵</sup> در نانولوله کربنی چند جداره کمتر است، طبق معادله (۳) افزایش میزان ضریب تخفیف را داریم که این امر به دلیل تیره‌بودن نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره می‌باشد.

با بررسی نمودارهای شکل ۶ این نتیجه حاصل می‌شود که نانوسیال اکسید منیزیم در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ که بالاترین غلظت آزمایش است در ناحیه فرابنفش جذبی حدود ۳۸ برابر نسبت به سیال پایه دارد ولی این مقدار برای نانولوله کربنی چند جداره کمی بیش از ۳۸ برابر، یعنی ۴۰ برابر

در محاسبات انجام شده، به دلیل کوچک بودن مقدار خطا و دقت بسیار بالای اندازه‌ی کوئت، می‌توان از انحراف معیار مقدار عمق نفوذ صرف نظر کرد [۱۵].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی پژوهش حاضر از نتایج پژوهش چن و همکاران [۱۰] استفاده شده است. شکل ۵ مقایسه ضریب تخفیف سیال پایه در این پژوهش و پژوهش چن را نمایش می‌دهد. طبق مقایسه‌ای که بین این دو پژوهش صورت گرفته است، ضریب تخفیف سیال پایه (آب) در پژوهش حاضر دارای تطابق خوبی با مرجع [۱۰] بوده است. حداکثر تفاوت بین نتایج ۷٪ است.

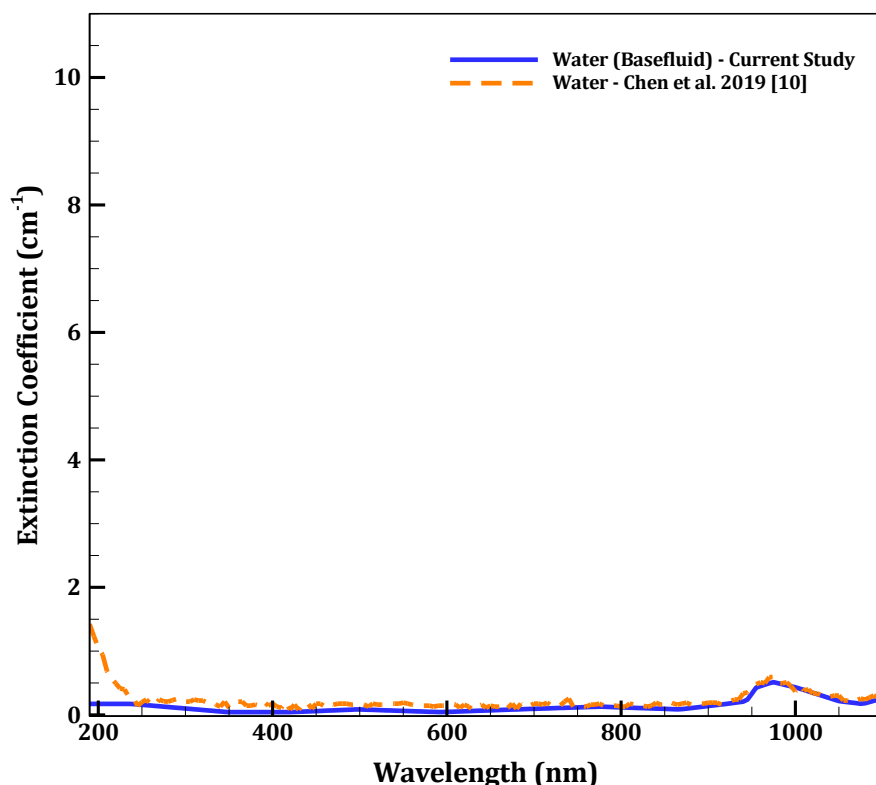
#### ۳-۲- خواص تابشی

#### ۳-۲-۱- ضریب تخفیف

خواص تابشی نانوسیال‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شده است. داده خروجی دستگاه اسپکتروفتومتر ضریب جذب<sup>۱</sup> و ضریب عبور<sup>۲</sup> بر حسب طول موج است. در مفاهیم علمی، مجموع ضریب تخفیف<sup>۳</sup> و ضریب پراکنش<sup>۴</sup>، ضریب جذب نامیده می‌شود. اما در مواردی که غلظت نانوسیال کمتر از ۰/۰۶٪ باشد از ضریب پراکنش صرف نظر می‌شود و می‌توان ضریب جذب را با ضریب تخفیف تقریباً برابر دانست [۸]. در این پژوهش نیز به دلیل غلظت پایین‌تر از ۰/۰۶٪ نانوسیال‌ها، از ضریب تخفیف برای سنجش میزان

- 1 Absorption coefficient
- 2 Transmittance
- 3 Extinction coefficient
- 4 Scattering

5 Ultraviolet



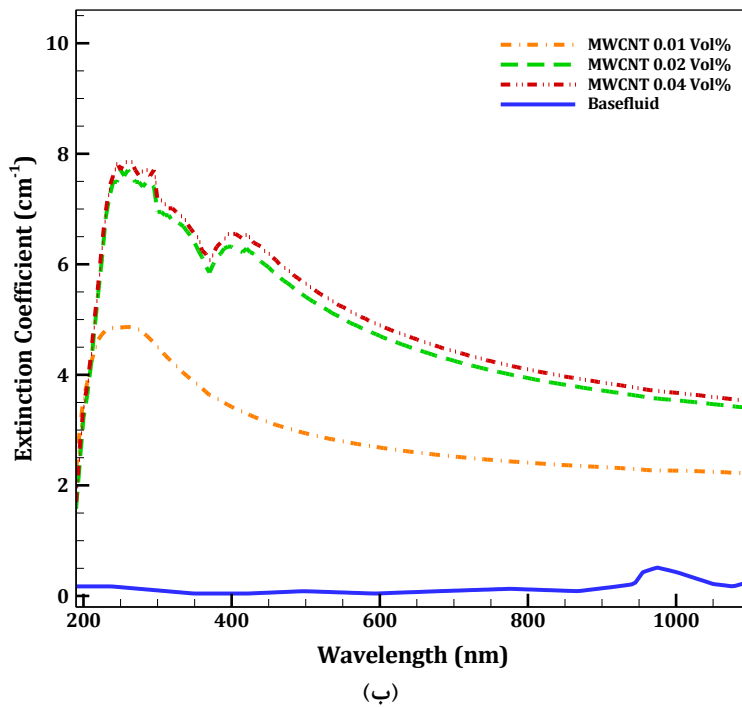
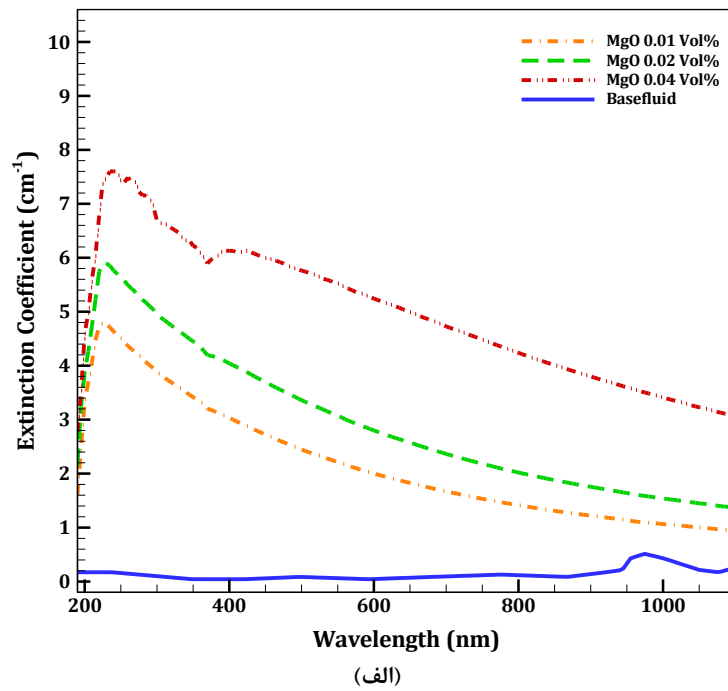
شکل ۵. صحت‌سنجی نتایج پژوهش حاضر با نتایج چن و همکاران [۱۰]

Fig. 5. Validation of the present study with the results of Chen et al. [10]

در سیال پایه و افزایش جذب پرتوهای تابیده شده به سمت سیال است. از تفاسیر فوق و روابط موجود در مبحث تشعشع می‌توان نتیجه گرفت هر سیال در محدوده خاصی دارای بیشینه مقدار قابلیت جذب است که این مقدار با افزایش تعداد نانوذرات در سیال پایه (افزایش غلظت) و تیره‌تر شدن نانوسیال نیز نسبت مستقیم دارد.

در شکل ۷ (الف) ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی در غلظت حجمی ۰/۰۱٪ و نسبت ۷۰٪ نانولوله کربنی چند جداره و ۳۰٪ اکسید منیزیم دارای بالاترین میزان جذب در ناحیه فرابنفش است. در حالی که در نسبت‌های دیگر نانوسیال هیبریدی، دارای مقدار جذب پایین‌تری می‌باشد که این مسئله گویای تأثیر ضریب تخفیف بالاتر نانولوله کربنی چند جداره از اکسید منیزیم در ناحیه فرابنفش است. بدین ترتیب نانوسیال هیبریدی که دارای مقدار بیشتری از نانولوله کربنی چند جداره بوده است در ناحیه فرابنفش دارای عملکرد بهتری بوده است. در ادامه مقدار ضریب تخفیف به تدریج از نواحی مرئی تا فرورسرخ روند کاهشی داشته و می‌توان دریافت که غلظت حجمی

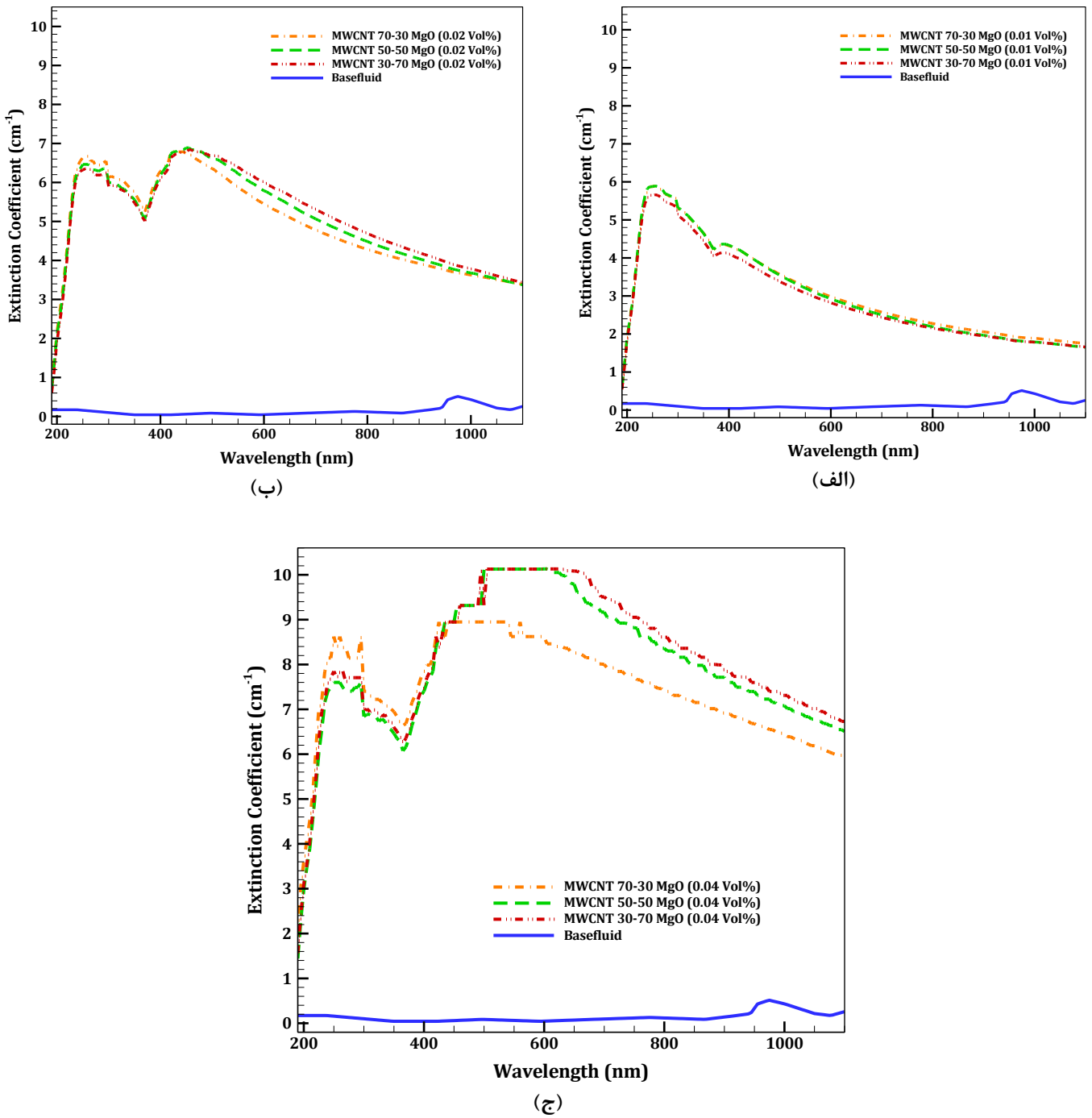
است که بیانگر قدرت جذب کمی بالاتر نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره نسبت به اکسید منیزیم در این ناحیه می‌باشد. این اختلاف را می‌توان به تیره بودن نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره نسبت داد. در واقع با تیره‌تر شدن نانوسیال مقدار کمتری از نور از نانوسیال عبور کرده و طبق معادله (۳)، افزایش جذب را در نانوسیال خواهیم داشت. همچنین برای بررسی طیف جذبی در محدوده‌ی بالاتر از فرابنفش (ناحیه مرئی) که شامل امواج بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر می‌شود در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ ضریب تخفیف نانوسیال‌ها ۱۵ برابر بالاتر از سیال پایه قرار دارد. در پایین‌ترین غلظت آزمایش (۰/۰۱٪ حجمی)، ضریب تخفیف نانوسیال‌های اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره در ناحیه فرابنفش و مرئی به ترتیب حدود ۲۵ و ۳۲ برابر نسبت به سیال پایه بهبود یافته است. بنابراین غلظت حجمی ۰/۰۴٪ برای نانوسیال تکی دارای ضریب تخفیف مناسب‌تر و طیف جذب بالاتری می‌باشد. در ادامه در ناحیه فرورسرخ (۸۰۰-۱۱۰۰ نانومتر) نمودار بصورت نزولی است اما مقدار آن‌ها از سیال پایه آزمایش بسیار بیشتر است که به دلیل وجود نانوذرات



شکل ۶. توزیع طیفی ضریب تخفیف نانوسیال در غلظت‌های حجمی مختلف الف) اکسید منیزیم، ب) نانولوله کربنی چند جداره

Fig. 6. The spectral distribution of extinction coefficient at different concentrations of (a) MgO, and (b) MWCNT nanofluid





شکل ۷. توزیع طیفی ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره در غلظت حجمی (الف) ۰/۰۱٪، (ب) ۰/۰۲٪ و (ج) ۰/۰۴٪

Fig. 7. The spectral distribution of extinction coefficient of (a) 0.01Vol% , b) 0.02Vol%, and c) 0.04Vol% hybrid nanofluid

ضریب تخفیف نیز می‌باشد، دارای رشد ۴۲ برابری نسبت به سیال پایه در ناحیه فرابنفش و ۵۰ برابری در ناحیه مرئی است.

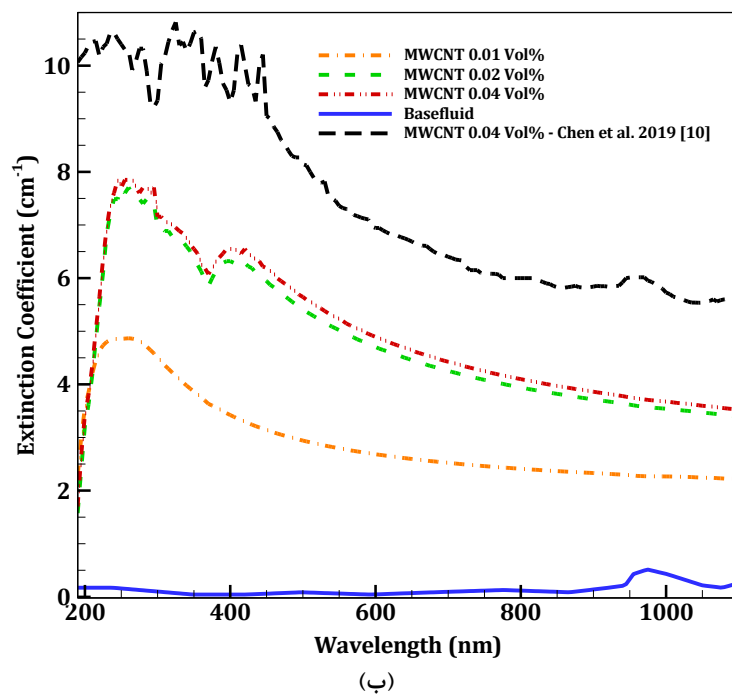
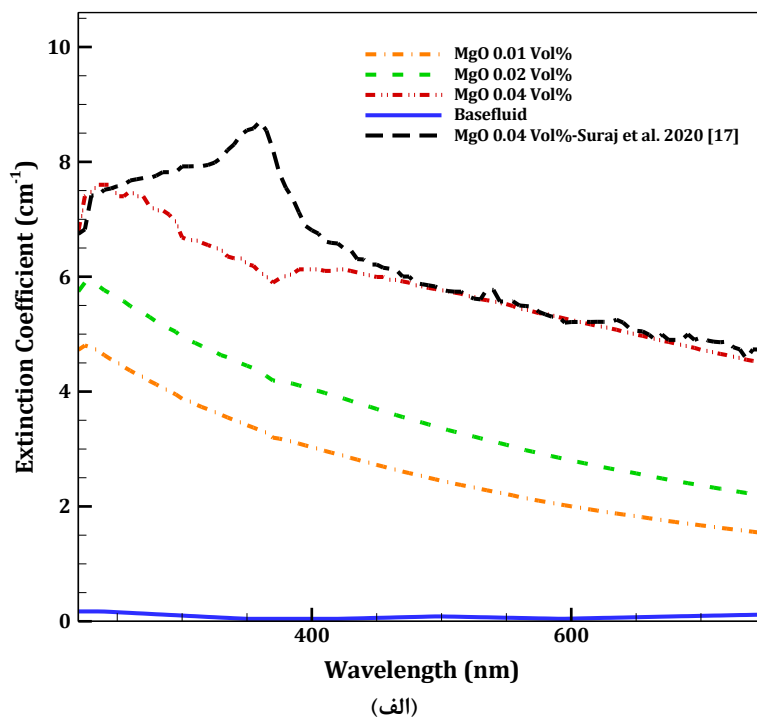
### ۳-۲-۲- مقایسه با نتایج محققان دیگر

نتایج بدست‌آمده این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه شد و طبق بررسی‌های انجام‌شده نتایج بدست‌آمده در این پژوهش تطابق خوبی با نتایج پیشین دارد. نتایج سوراج و همکاران [۱۶] در نمودار شکل ۸ (الف) برای ضریب تخفیف اکسید منیزیم با سایز نانوذرات ۴۰ نانومتر با سورفکتانت ستیل تری متیل آمونیوم برومید<sup>۱</sup> و بدون سورفکتانت در بازه طول موج ۸۰۰-۲۱۰ نانومتر ارائه شده است. در این آزمایش غلظت‌های حجمی ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۸ درصد بررسی شد. مشاهده می‌شود که سورفکتانت ستیل تری متیل آمونیوم برومید دارای طیف جذبی تقریباً منطبق با اکسید منیزیم بوده و با نتایج اکسید منیزیم بدون سورفکتانت نیز تفاوت محسوسی دیده نشده است. همچنین دیده شد که افزایش غلظت اکسید منیزیم سبب افزایش ضریب تخفیف می‌شود و بیشینه ضریب تخفیف در ناحیه فرابنفش رخ می‌دهد و پس از این ناحیه در ناحیه مرئی و فرورسرخ ضریب تخفیف بصورت نزولی ادامه می‌یابد. طبق بررسی پژوهش سوراج و همکاران و نتایج پژوهش حاضر که در شکل ۸ (الف) آمده است می‌توان تطابق قابل قبولی بین اندازه‌ی ضریب تخفیف در این دو پژوهش با توجه به شرایط آزمایش را شاهد بود. علت اختلاف جزئی بین نتایج را می‌توان به دلیل تفاوت در دقت دستگاه‌ها، اندازه نانوذرات، کیفیت نانوذرات خریداری شده و یا نوع ساخت نانوسیال دانست.

مقایسه‌ی ضریب تخفیف نانولوله کربنی چند جداره با نتایج پژوهش چن و همکاران [۱۰] در شکل ۸ (ب) آمده است. در این پژوهش نانوسیال‌های نانولوله کربنی چند جداره با سایز نانوذرات حدود ۲۰ نانومتر در غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ تا ۰/۰۱ درصد در بازه طول موج ۱۱۰۰-۱۹۰ نانومتر بررسی شدند. نتایج این نانوسیال‌ها نشان می‌دهد که ضریب تخفیف در ناحیه فرابنفش دارای بیشینه مقدار است. سپس نمودار بصورت نزولی کاهش یافته و در ناحیه فرورسرخ دوباره به حالت صعودی بازمی‌گردد و سبب ایجاد پیک دوم در نمودار شده است. در مقایسه نتایج آزمایش چن و پژوهش حاضر، تطابق قابل قبولی بین این دو پژوهش در شرایط آزمایش دیده می‌شود. اختلاف بین نتایج می‌تواند به دلیل کیفیت مواد آزمایش، سایز نانوذرات مصرفی و مدل وسایل اندازه‌گیری ضریب عبور باشد.

۰/۰۱٪ غلظت مناسبی برای این نانوسیال هیبریدی نیست زیرا که تأثیر نانوسیال هیبریدی در این غلظت به طور ویژه دیده نشده است. همچنین این نتیجه را نیز می‌توان اضافه کرد که ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی این پژوهش در ناحیه فرابنفش حدود ۳۰ برابر و در ناحیه مرئی حدود ۲۲ برابر ضریب تخفیف سیال پایه است و حتی در پایین‌ترین غلظت آزمایش نیز نقش چشمگیر نانوسیال هیبریدی در نواحی مختلف مشاهده می‌شود.

شکل ۷ (ب) نمودار ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره در غلظت حجمی ۰/۰۲٪ در سه نسبت مختلف را نشان می‌دهد. از ناحیه فرابنفش تا فرورسرخ دو قله برای ضریب تخفیف مشاهده می‌شود که اولی در ناحیه فرابنفش و دیگری در ناحیه مرئی قرار دارد. همچنین این نتیجه حاصل شد که ضریب تخفیف نانولوله کربنی چند جداره در ناحیه فرابنفش و اکسید منیزیم در ناحیه مرئی دارای مقادیر بیشتری هستند. برای مقایسه ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی در غلظت حجمی ۰/۰۲٪ و سیال پایه آب، شاهد بهبود ۳۲ برابری در ناحیه فرابنفش و ۳۵ برابری در ناحیه مرئی بوده‌ایم که این امر به دلیل ضریب تخفیف بالای نانولوله کربنی چند جداره در ناحیه فرابنفش و ضریب تخفیف بالای اکسید منیزیم در ناحیه مرئی و فرورسرخ برای نانوسیال هیبریدی این پژوهش بوده است. همچنین با مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۷ (الف) و ۷ (ب) این نتیجه حاصل می‌آید که افزایش تعداد ذرات سبب افزایش میزان جذب شده است. مطابق شکل ۷ (ج) ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ دو قله دارد که این قله‌ها یکی در ناحیه فرابنفش و دیگری در ناحیه مرئی قرار دارد و در ادامه در ناحیه فرورسرخ به تدریج مقدار ضریب تخفیف کاهش می‌یابد که مقدارش از ضریب تخفیف نانوسیال تکی بیشتر است. طبق این نمودار نیز مقدار ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی با ۷۰ درصد نانولوله کربنی چند جداره دارای مقدار بالاتری در ناحیه فرابنفش است. اما زمانی که نانوسیال دارای ۷۰ درصد اکسید منیزیم است نمودار در ناحیه مرئی از نانولوله کربنی چند جداره بالاتر می‌رود. از نمودارهای نانوسیال هیبریدی چنین برداشت می‌شود که نانوسیال اکسید منیزیم دارای طیف جذب بالاتری در ناحیه مرئی و فرورسرخ بوده است، اما نانوسیال نانولوله کربنی طیف جذب بالاتری در ناحیه فرابنفش را حاصل نموده است. همچنین در بالاترین غلظت این آزمایش، به دلیل تیره و کدر شدن نانوسیال به علت وجود ذرات، ضریب عبور کمتری مشاهده می‌شود که سبب افزایش ضریب تخفیف شده است. همانگونه که از نمودار شکل ۷ (ج) قابل مشاهده است، ضریب تخفیف نانوسیال هیبریدی در بالاترین غلظت مورد آزمایش که دارای بیشینه مقدار



شکل ۸. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج الف) اکسید منیزیم پژوهش سوراج و همکاران [۱۶]، ب) نانولوله کربنی چند جداره پژوهش چن و همکاران [۱۰]

Fig. 8. Validation of the present study with the results of a) MgO of Suraj et al. [17], b) MWCNT of Chen et al. [10]

### ۳-۲-۳- انرژی جذب شده توسط نانوسیال

نانوسیالات نوعی سیال کاری مناسب به دلیل افزایش میزان جذب انرژی خورشید به حساب می‌آیند. برای محاسبه‌ی میزان جذب انرژی خورشیدی توسط نانوسیال در عمق نفوذ  $L$  و طول موج‌های مختلف از معادله (۴) می‌توان استفاده کرد [۶].

$$I_A(\lambda) = I(\lambda)(1 - e^{-k_e(\lambda)L}) \quad (4)$$

در معادله فوق،  $I_A(\lambda)$  مقدار انرژی جذب شده توسط نانوسیال،  $I(\lambda)$  تابش طیفی خورشید در طول موج‌های مختلف،  $K_e$  ضریب تخفیف نانوسیال در طول موج‌های آزمایش شده و  $L$  عمق نفوذ تابش خورشید می‌باشد. در این پژوهش  $I(\lambda)$  و  $K_e$  در طول موج‌های از ۲۷۰ تا ۱۱۰۰ و  $L$  عمق نفوذ کوئت (یک سانتی‌متر) در نظر گرفته شده است. در پایان پس از انجام محاسبات، میزان انرژی جذب شده خورشید با تابش طیفی آن نیز مقایسه شده است [۱۷].

در شکل‌های ۹ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود با افزایش غلظت نانوسیال، میزان انرژی جذب شده در طیف تابشی مورد نظر افزایش یافته است. زیرا طبق معادله (۴)، با افزایش میزان ضریب تخفیف، انرژی جذب شده در طول موج‌های مورد آزمایش افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه انرژی جذب شده در ناحیه مرئی و در بازه حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر بوده است. می‌توان این نکته را نیز اضافه کرد که از بین غلظت‌های آزمایش شده اکسید منیزیم، غلظت حجمی ۰/۰۴٪ که بالاترین غلظت این پژوهش است به دلیل بالاتر بودن ضریب تخفیف نسبت به بقیه‌ی غلظت‌ها، عملکرد بهتری از نظر جذب انرژی خورشید دارد. به عبارتی پتانسیل جذب تقریباً ۱۰٪ از انرژی خورشید را دارد. این غلظت از نانوسیال با اختلاف بسیار کمی به طیف تابشی خورشید نزدیک است.

شکل ۱۰ (الف) گویای عملکرد بهتر نانوسیال هیبریدی در جذب انرژی نسبت به نانوسیال تکی به دلیل افزایش ضریب تخفیف بوده است. انرژی جذب‌شده در نانوسیال هیبریدی در غلظت حجمی ۰/۰۱٪ تقریباً بین دو نانوسیال تکی بوده است. بنابراین برای افزایش میزان جذب می‌توانیم از راه افزایش غلظت نانوسیال بهره ببریم.

در شکل‌های ۱۰ (ب) و (ج) می‌توان تأثیر غلظت نانوسیال هیبریدی بر جذب انرژی خورشید را به وضوح دید. با افزایش غلظت، میزان جذب انرژی

خورشیدی به طیف جذبی خورشید بسیار نزدیک شده است که این امر به دلیل افزایش نانوذرات در سیال پایه و کاهش ضریب عبور می‌شد. در نمودارهای این شکل‌ها می‌توان به رفتار تقریباً مشابه نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۰۴٪ با ۰/۰۲٪ اشاره کرد که نانوسیال هیبریدی در این غلظت‌های حجمی تفاوت زیادی با یکدیگر در جذب انرژی خورشید ندارند و توانایی جذب تقریباً ۱۰۰٪ انرژی خورشید را از خود نشان داده‌اند. در نتیجه نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره عملکرد بسیار رضایت‌بخشی از نظر جذب انرژی خورشید در غلظت‌ها و نسبت‌های مختلف نسبت به سیال پایه و تابش طیفی خورشید از خود نشان داده است.

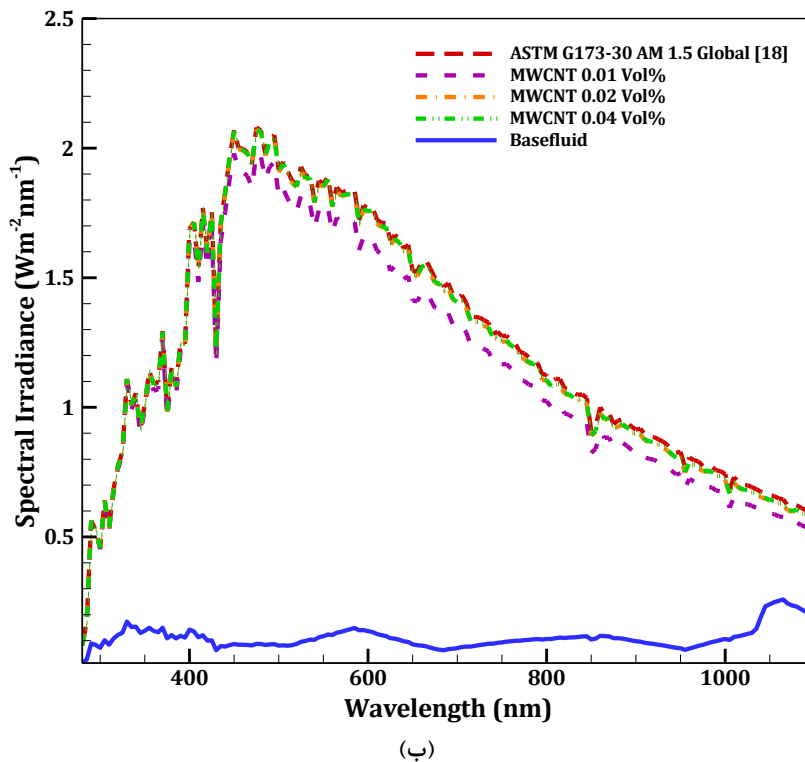
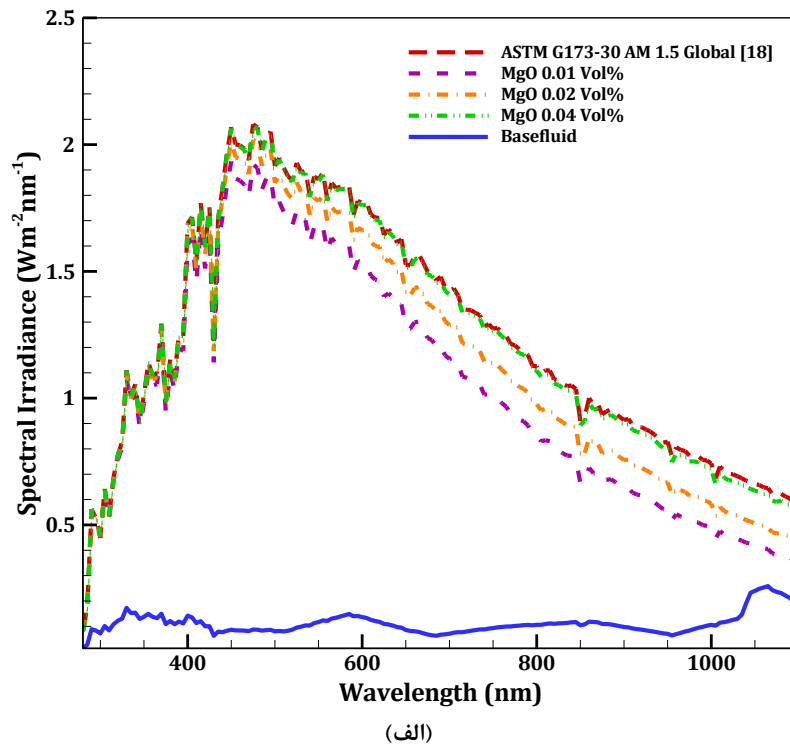
در شکل‌های ۱۰ (ب) و (ج) می‌توان تأثیر غلظت نانوسیال هیبریدی بر جذب انرژی خورشید را به وضوح دید. با افزایش غلظت، میزان جذب انرژی خورشیدی به طیف جذبی خورشید بسیار نزدیک شده است که این امر به دلیل افزایش نانوذرات در سیال پایه و کاهش ضریب عبور می‌باشد. در نمودارهای این شکل‌ها می‌توان به رفتار تقریباً مشابه نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۰۴٪ با ۰/۰۲٪ اشاره کرد که نانوسیال هیبریدی در این غلظت‌های حجمی تفاوت زیادی با یکدیگر در جذب انرژی خورشید ندارند و توانایی جذب تقریباً ۱۰۰٪ انرژی خورشید را از خود نشان داده‌اند. در نتیجه نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره عملکرد بسیار رضایت‌بخشی از نظر جذب انرژی خورشید در غلظت‌ها و نسبت‌های مختلف نسبت به سیال پایه و تابش طیفی خورشید از خود نشان داده است.

### ۳-۲-۴- کسر وزنی جذب خورشید

هر سیال پتانسیل جذب درصدی از انرژی خورشید در عمق‌های نفوذ مختلف را دارد که نانوسیال‌ها در مقایسه با سیال پایه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. این پتانسیل، کسر وزنی جذب خورشید نامیده می‌شود و طبق معادله (۵) بدست می‌آید [۸].

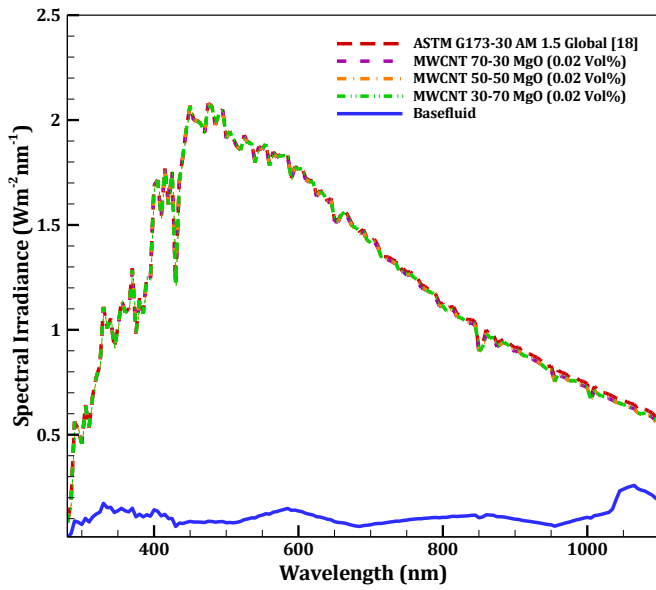
$$F = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda)(1 - e^{-k_e(\lambda)L}) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

در این معادله (۵)،  $I(\lambda)$  بیانگر تابش طیفی خورشید،  $K_e$  ضریب تخفیف نانوسیال و  $L$  طول نفوذ می‌باشد. طبق این معادله می‌توان میزان انرژی جذب شده توسط نانوسیال را در عمق‌های نفوذ مختلف بدست آورد.

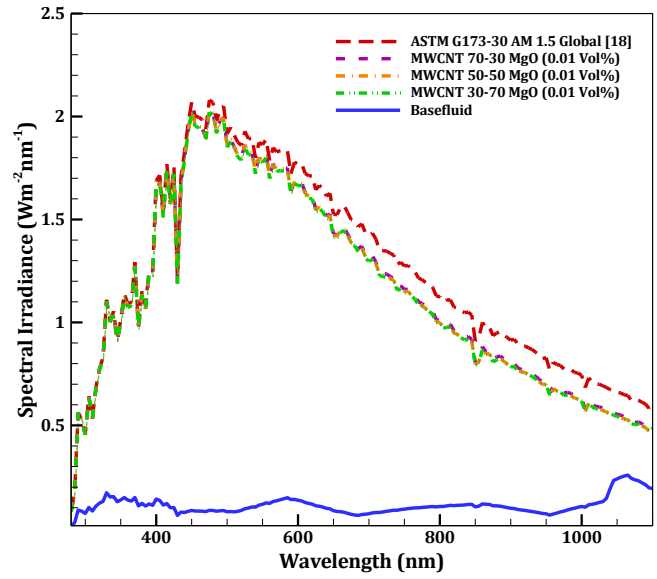


شکل ۹. توزیع طیفی تابش خورشید و انرژی جذب شده در الف) اکسید منیزیم و ب) نانولوله کربنی چند جداره

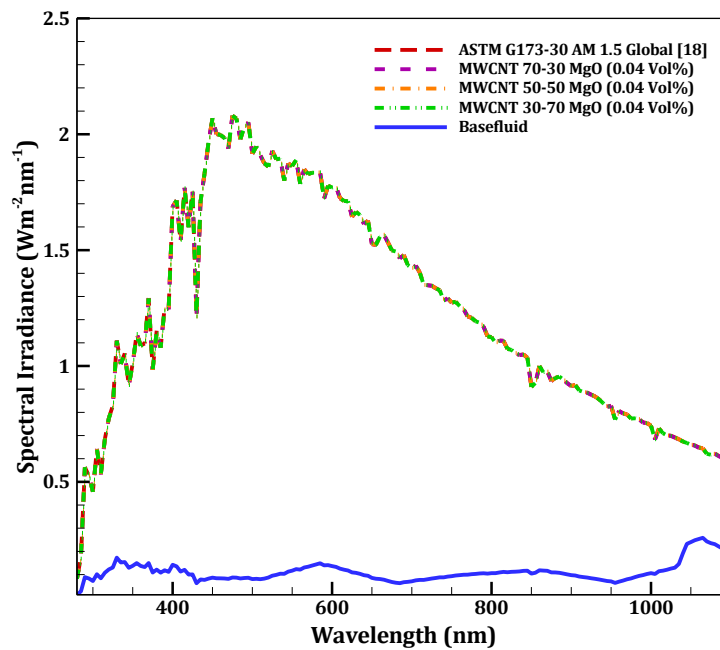
Fig. 9. Spectral distribution of solar radiation (ASTM G173-03AM 1.5 Global) and the absorbed energy term of a) MgO, and b) MWCNT



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰. انرژی جذب شده توسط نانوسیال هیبریدی و توزیع طیفی تابش خورشید بر حسب طول موج در نانوسیال با غلظت حجمی (الف) ۰/۰۱٪، (ب) ۰/۰۲٪ و (ج) ۰/۰۴٪

Fig. 10. Spectral distribution of solar radiation (ASTM G173-03AM 1.5 Global) and the absorbed energy of a) 0.01Vol%, b) 0.02Vol%, and c) 0.04Vol% hybrid nanofluid



در معادله (۶)،  $m_i$  بیانگر جرم،  $C_i$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $\frac{dT}{dt}$  تغییرات دما نسبت به زمان،  $Q_{NFS}$  و  $Q_{CUV}$  انرژی مبادله شده نانوسیال و کوئت می‌باشند.

در ابتدای این آزمایش  $Q_{NFS} + Q_{CUV} > Q_{OUT}$  و تغییرات دما نسبت به زمان در حال افزایش می‌باشد  $\left(\frac{dT}{dt} > 0\right)$ . زمانی که دمای سیستم در حال افزایش می‌باشد، با افزایش  $Q_{OUT}$ ، سیستم به حالت تعادلی می‌رسد که در آن  $\frac{dT}{dt} > 0$  می‌شود و در نتیجه:

$$Q_{NFS} + Q_{CUV} = Q_{OUT} \quad (7)$$

مقدار ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال تکی برای جایگذاری در معادله (۶)، طبق قانون موازنه از معادله (۸) و برای نانوسیال هیبریدی از معادله (۹) بدست می‌آید [۱۸ و ۱۹]:

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (8)$$

در معادله (۸)،  $C_{p_{nf}}$  ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال،  $\phi$  غلظت نانوسیال و  $\rho$  چگالی می‌باشد. همچنین زیرنویس nf مربوط به اطلاعات سیال پایه، P نانوذره و nf نانوسیال بوده است. در ادامه ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال هیبریدی از معادله (۹) چنین بدست می‌آید:

$$\left(\rho_{nf} C_{p_{nf}}\right) = (1-\phi_{np})(\rho C_p)_f + \phi_{np1}(\rho_{np1} C_{p_{np1}}) + \phi_{np2}(\rho_{np2} C_{p_{np2}}) \quad (9)$$

برای بدست آوردن چگالی نانوسیالها از معادله (۱۰) می‌توان استفاده کرد.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{v}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{v_f + v_p} = \frac{\rho_f v_f + \rho_p v_p}{v_f + v_p} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (10)$$

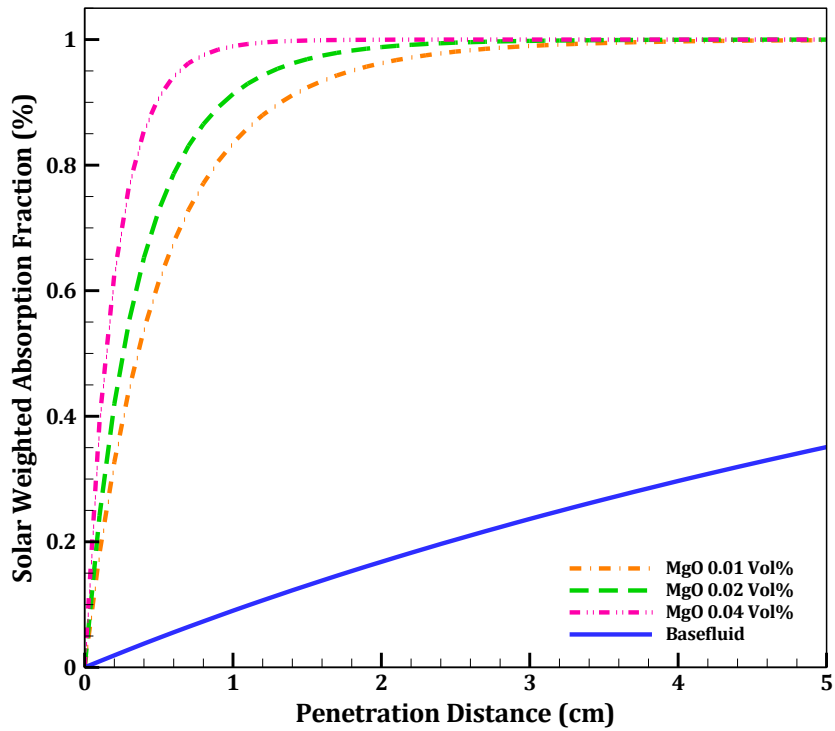
طبق نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایش و معادله (۵)، در عمق نفوذ یک تا پنج سانتی‌متر، نمودارهای شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بدست آمده‌اند. در نمودارهای به دست آمده از نانوسیال اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چندجداره چنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوسیال و نیز افزایش عمق نفوذ، کسر وزنی جذب خورشیدی توسط نانوسیالات افزایش می‌یابد. علاوه بر این، طبق شکل‌های ۱۱ (الف) و (ب) کسر وزنی جذب خورشید توسط نانولوله کربنی چند جداره از اکسید منیزیم بیش‌تر است. در واقع نانولوله کربنی چند جداره در عمق نفوذ کمتر (۲ سانتی‌متر) نسبت به اکسید منیزیم (۴ سانتی‌متر) به حداکثر مقدار ممکن یعنی ۱۰۰٪ کسر وزنی جذب خورشید می‌رسد. همچنین نانوسیال‌های اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره بصورت تکی در عمق نفوذ ۰/۹ سانتی‌متر می‌توانند بیش از ۹۰٪ انرژی خورشید را جذب کنند. در این محاسبات، سیال پایه در بیش‌ترین درصد جذبی به مقدار ۳۰٪ در عمق نفوذ ۵ سانتی‌متر رسیده است که نسبت به نانوسیال‌ها حدود ۳/۳ برابر کمتر می‌باشد.

طبق نمودارهای شکل ۱۲، نانوسیال هیبریدی با غلظت حجمی ۰/۰۱٪ در عمق نفوذ حدود ۳ سانتی‌متر، غلظت حجمی ۰/۰۲٪ در عمق نفوذ ۱/۵ سانتی‌متر و در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ در عمق نفوذ یک سانتی‌متر ۱۰۰٪ انرژی خورشید را جذب می‌کند. این نتیجه گویای تأثیر عمق نفوذ و غلظت نانوسیال بر افزایش میزان جذب انرژی خورشیدی توسط نانوسیال است. همچنین نانوسیال‌های هیبریدی با غلظت‌های حجمی ۰/۰۱٪، در عمق نفوذ ۰/۹ سانتی‌متر، ۰/۰۲٪ در ۰/۵ سانتی‌متر و ۰/۰۴٪ در ۰/۳ سانتی‌متر توانایی جذب بیش از ۹۰٪ از انرژی خورشید را دارند. از آنجا که مقدار ضریب تخفیف و میزان انرژی جذب‌شده در نانولوله کربنی چند جداره نسبت به اکسید منیزیم بالاتر است، بنابراین در غلظت‌های مورد آزمایش آن‌جا که درصد نانولوله کربنی چند جداره بیشینه (۷۰٪) است دارای مقدار بالاتری نسبت به بقیه نسبت‌های آن غلظت است.

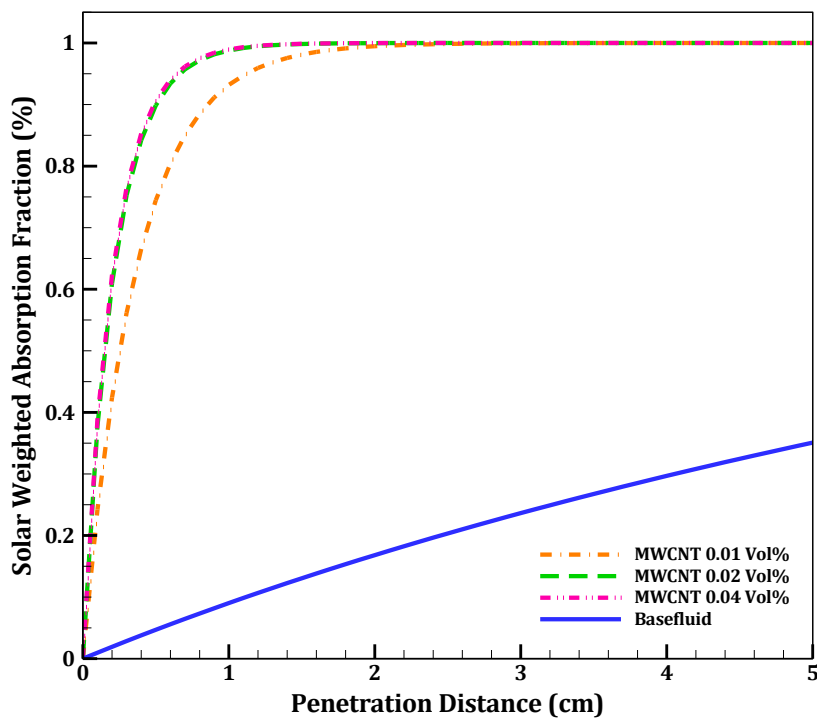
### ۳-۲-۵- راندمان حرارتی خورشیدی

برای سنجش پتانسیل نانوسیال در بهبود راندمان حرارتی خورشیدی از روابط (۶) تا (۱۱) استفاده می‌شود. از ابتدای آزمایش تا رسیدن به تعادل انرژی داریم [۶]:

$$\sum_i m_i C_i \frac{dT}{dt} = Q_{NFS} + Q_{CUV} - Q_{OUT} \quad (6)$$



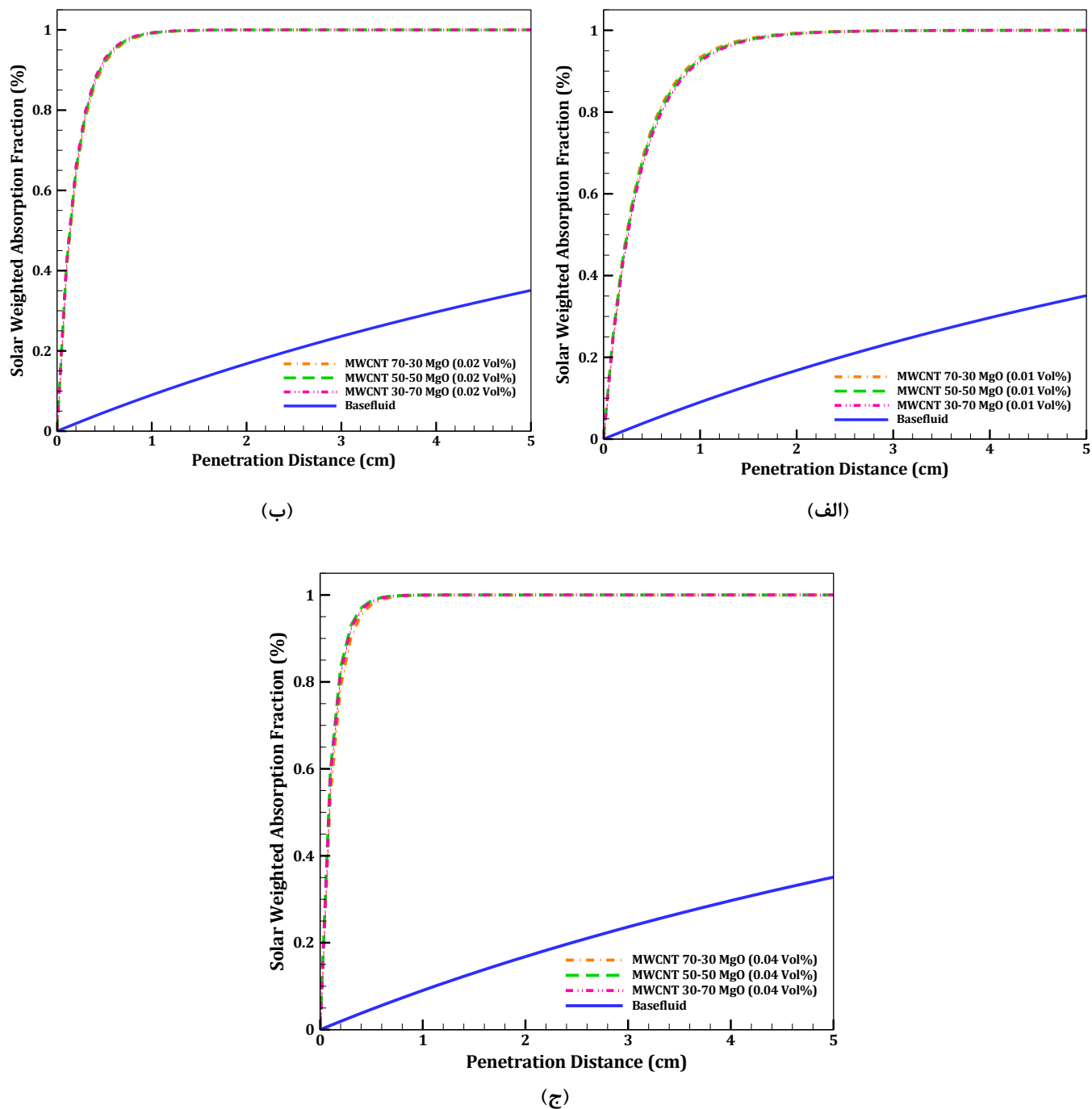
(الف)



(ب)

شکل ۱۱. مقایسه تغییرات کسر وزنی جذب خورشید در اعماق نفوذ مختلف در الف) اکسید منیزیم و ب) نانولوله کربنی چند جداره

Fig. 11. Comparison of solar weighted absorption fraction changes at different penetration distances in a) MgO, and b) MWCNT nanofluid



شکل ۱۲. مقایسه تغییرات کسر وزنی جذب خورشید نانوسیال هیبریدی در اعماق نفوذ مختلف در نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های الف) ۰.۰۱٪، ب) ۰.۰۲٪ و ج) ۰.۰۴٪

Fig. 12. Comparison of solar weighted absorption fraction changes at different penetration distances in a) 0.01Vol%, b) 0.02Vol%, and c) 0.04Vol% hybrid nanofluid

در نهایت راندمان حرارتی خورشیدی از معادله (۱۱) بدست می‌آید [۶]:

$$\eta = \frac{Q_{NFS}}{I_0 A} \quad (11)$$

در معادله (۱۱)،  $I_0$  تابش مرجع،  $A$  مساحت منطقه در معرض تابش نور و  $\eta$  راندمان حرارتی استفاده از خورشید است.

طبق روابط بیان شده، زمانی که لامپ در دستگاه روشن است دمای نانوسیال افزایش می‌یابد. این افزایش دما تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دمای نمونه‌ی مورد آزمایش به دمای تعادل برسد. می‌توان از  $\Delta T_{eq}$  برای سنجش خواص تبدیل حرارتی خورشیدی در نمونه‌های مورد آزمایش استفاده کرد. به عبارت دیگر می‌توان گفت هر چه  $\Delta T_{eq}$  یا همان دمای رسیدن به تعادل در نمونه بالاتر باشد، خاصیت تبدیل حرارتی خورشیدی در آن نمونه بالاتر است [۶].

در پژوهش حاضر، تغییرات دمایی نانوسیال‌ها در غلظت‌های حجمی ۰/۰۲٪ و ۰/۰۴٪ و نسبت‌های هیبرید ۳۰-۷۰، ۵۰-۵۰ و ۷۰-۳۰ مورد آزمایش قرار گرفتند. همانطور که در نمودارهای شکل ۱۳ نمایان است، نتایج این آزمایش‌ها برای نانوسیال تکی و هیبریدی چنین است که نمودار تغییرات دما نسبت به زمان به سه قسمت تقسیم شده است. قسمت اول نمودار مربوط به روشن شدن لامپ و افزایش دمای نانوسیال تا رسیدن به دمای تعادل، قسمت دوم مربوط به رسیدن به دمای تعادل و قسمت سوم مربوط به خاموش شدن لامپ و کاهش دمای نانوسیال‌ها بوده است. از این نمودار چنین دریافت می‌شود که افزایش غلظت نانوسیال سبب افزایش دمای تعادل نسبت به نانوسیال‌های با غلظت‌های پایین‌تر و سیال پایه خواهد شد. همچنین نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ در زمان حدوداً ۱۰۰۰ ثانیه از ابتدای آزمایش، به دمای تعادل (حدود ۴۳ درجه سانتی‌گراد) رسیده است.

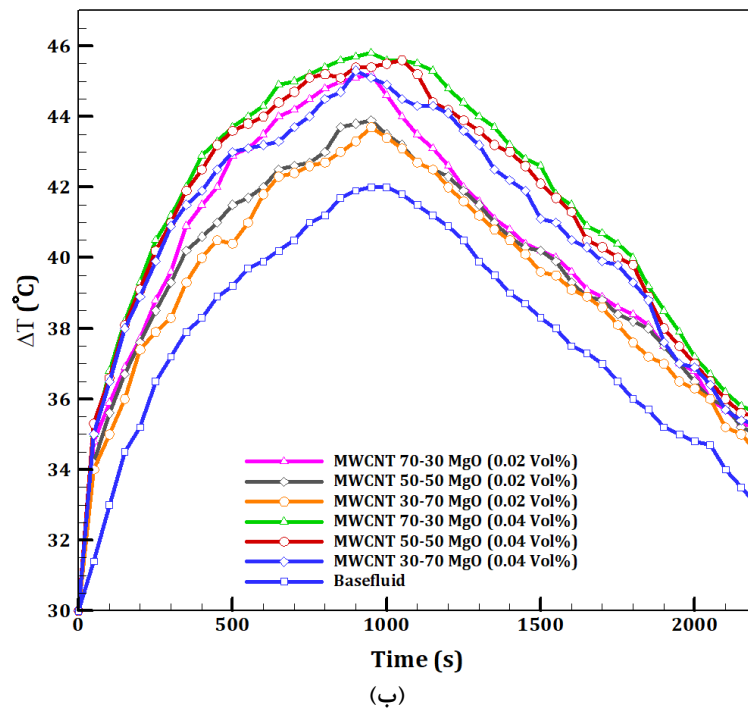
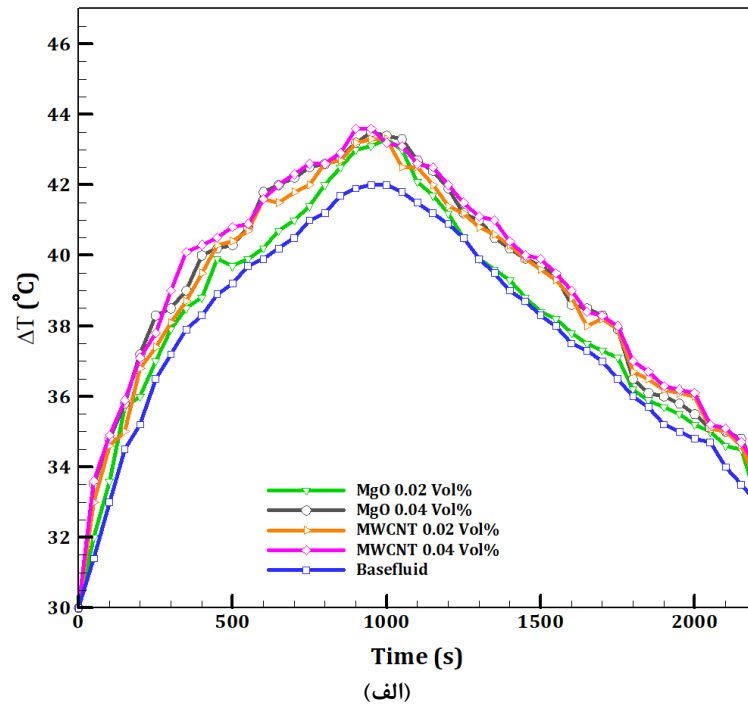
از مقایسه شکل‌های ۱۳ (الف) و (ب) نقش هیبریدی شدن نانوسیال در افزایش دمای تعادل به وضوح نمایان است. به دلیل برتری خواص انتقال حرارت در نانولوله کربنی چند جداره نسبت به اکسید منیزیم، دمای تعادل نیز دارای مقدار بیشتر بوده است. بنابراین نانوسیال‌هایی که دارای نسبت بیشتری از نانولوله کربنی چند جداره‌اند، دارای دمای تعادل بالاتری نسبت به بقیه‌ی حالت‌ها بوده‌اند. برای مثال نانوسیال هیبریدی در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ دارای بالاترین دمای تعادل در این آزمایش بوده است که این دما

تا حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. این دما نسبت به سیال پایه (آب) حدود ۴ درجه سانتی‌گراد بالاتر است. طبق محاسبات انجام شده، هر چه دمای تعادل در نمونه‌ی آزمایش بالاتر رود، نانوسیال می‌تواند باعث افزایش راندمان حرارتی در سیستم‌های خورشیدی شود و سیال کاری مناسبی خواهد بود.

در شکل ۱۴ راندمان حرارتی خورشیدی برای نانوسیال‌ها بصورت تکی و هیبریدی در غلظت‌ها و نسبت‌های مختلف آمده است. این مقادیر با کسر وزنی جذب خورشید نانوسیال‌ها در عمق نفوذ ۳ سانتی‌متر نیز مقایسه شده است. طبق شکل ۱۳ و شکل ۱۴ می‌توان گفت افزایش دمای تعادل سبب بهبود راندمان حرارتی خورشید می‌شود و در جایی که کسر وزنی جذب خورشید بالاتر است، راندمان حرارتی خورشید نیز بالاتر خواهد شد. برای مثال در این پژوهش، نانوسیال هیبریدی متشکل از ۷۰٪ اکسید منیزیم و ۳۰٪ نانولوله کربنی چند جداره دارای کسر وزنی جذب خورشید ۱۰۰٪ و راندمان حرارتی خورشیدی ۹۰٪ بوده است. همچنین راندمان حرارتی خورشیدی برای نانوسیال‌های تکی در بالاترین غلظت حجمی از اکسید منیزیم برابر با ۸۵٪ و در نانولوله کربنی چند جداره ۸۷٪ بوده است. از مقادیر بدست آمده برای راندمان حرارتی خورشید واضح است نانوسیال‌های هیبریدی دارای راندمان حرارتی بالاتری نسبت به نانوسیال‌های تکی هستند. از نتایج بدست آمده چنین نتیجه‌گیری می‌شود که مقدار کسر وزنی جذب خورشید با راندمان حرارتی خورشید دارای اختلاف معناداری است. به این معنا که تمام تابش خورشید که توسط نانوسیال‌ها جذب می‌شود به گرما تبدیل نمی‌شود و سبب اختلاف جزئی بین کسر وزنی جذب خورشید و راندمان حرارتی خورشید شده است. از آنجایی که مقدار کسر وزنی جذب خورشید در آزمایش‌های انجام شده دارای بیشینه مقدار خود (۱۰۰٪) بوده است، می‌بایست کاهش اختلاف بین کسر وزنی جذب و راندمان حرارتی خورشید در اولویت تحقیقاتی قرار گیرد. طبق روابط موجود، با تغییر شرایط ترمودینامیکی، افزایش راندمان حرارتی خورشید و کاهش اختلاف با کسر وزنی جذب خورشید قابل تحقق است.

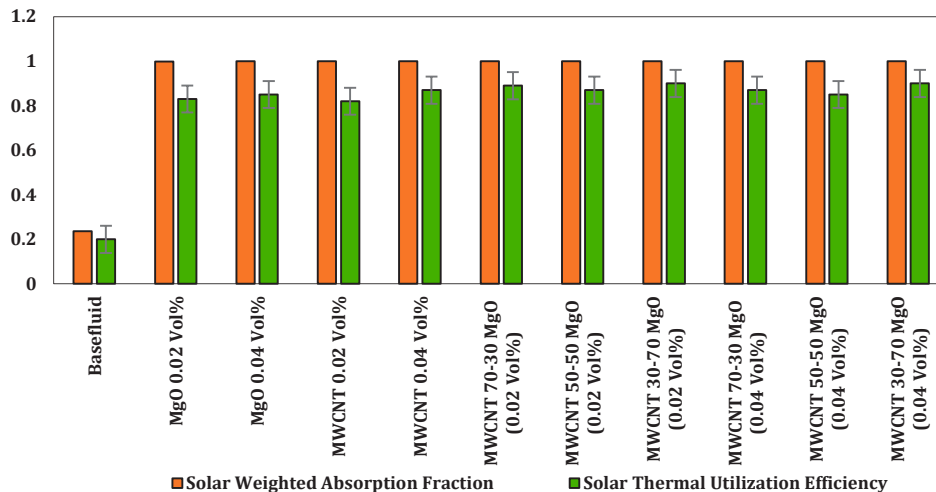
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوسیال اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره به روش دو مرحله‌ای در غلظت‌های حجمی ۰/۰۱٪، ۰/۰۲٪ و ۰/۰۴٪ بصورت تکی تهیه شدند و در نهایت نانوسیال هیبریدی از ترکیب این دو نانوسیال با نسبت‌های ۳۰-۷۰، ۵۰-۵۰ و ۷۰-۳۰ ساخته شدند. افزایش غلظت نانوسیال



شکل ۱۳. تغییرات دما در غلظت های مختلف نسبت به زمان در الف) نانوسیال تکی و ب) نانوسیال هیبریدی

Fig. 13. Temperature changes at different concentrations over time in a) single nanofluid, and b) hybrid nanofluid



شکل ۱۴. مقایسه‌ی راندمان حرارتی بهره‌وری از خورشید و کسر وزنی جذب خورشیدی در عمق نفوذ ۳ سانتی‌متر در نانوسیال تکی و هیبریدی

Fig. 14. Comparison of solar thermal utilization efficiency and solar weighted absorption fraction at a penetration depth of 3 cm in single and hybrid nanofluids

کسر وزنی جذب خورشیدی توسط نانوسیال با روابط موجود بدست آمد و میزان کسر وزنی جذب خورشید نانوسیال هیبریدی در کمترین غلظت آزمایش (۰/۰۱٪ حجمی) در عمق نفوذ ۰/۹ سانتی‌متر، در ۰/۰۲٪ در عمق نفوذ ۰/۵ و در ۰/۰۴٪ در عمق نفوذ ۰/۳ سانتی‌متر بیش از ۹۰٪ انرژی خورشید است. این نتایج بیانگر تأثیر مستقیم عمق نفوذ و غلظت نانوسیال بر افزایش میزان جذب انرژی خورشیدی توسط نانوسیال و یا افزایش کسر وزنی جذب خورشید است.

در محاسبه راندمان حرارتی خورشیدی، نانوسیال‌های هیبریدی به دلیل دمای تعادل بالاتر سبب بهبود راندمان حرارتی خورشیدی شدند. بطوری که راندمان حرارتی خورشیدی در نانوسیال تکی به ترتیب ۸۵٪ و ۸۷٪ برای اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره در غلظت حجمی ۰/۰۴٪ بوده است. اما این مقدار برای نانوسیال هیبریدی حدود ۹۰٪ برآورد شده است. اختلاف کم این مقادیر با کسر وزنی جذب خورشید، سبب رضایت‌بخشی از نتایج پژوهش حاضر شده است.

نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی چند جداره در سیال پایه آب دارای طیف جذبی وسیع و بالا در نواحی مختلف بوده است. از این رو، از نانوسیال هیبریدی می‌توان به عنوان سیال کاری سیستم‌های خورشیدی استفاده نمود و شاهد محقق‌شدن اهداف تبدیل انرژی از جمله بهبود راندمان و بهینه‌سازی در سیستم‌های خورشیدی بود.

منجر به افزایش ضریب تخفیف شده بطوری که با افزایش غلظت حجمی نانوسیال از ۰/۰۱٪ به ۰/۰۴٪ به میزان ۵/۵۸٪ افزایش ضریب تخفیف برای اکسید منیزیم، ۶۰٪ برای نانولوله کربنی چند جداره و ۱۱٪ برای نانوسیال هیبریدی مشاهده شد. در اکسید منیزیم رشد ۳۸ برابری نسبت به سیال پایه، ۴۰ برابری در نانولوله کربنی چند جداره و ۵۰ برابری در نانوسیال هیبریدی به دست آمد.

نانوسیال هیبریدی به دلیل ویژگی‌های جذب نانوذرات هر جزء تشکیل‌دهنده، دارای خواص جذب تقویت شده در سه ناحیه‌ی فرابنفش، مرئی و فروسرخ بوده است. در ناحیه فرابنفش، نانوسیال هیبریدی با نسبت بیشتر نانولوله کربنی چند جداره میزان جذب بالاتری داشته است. در ناحیه مرئی و فروسرخ نانوسیال با نسبت بالاتر از اکسید منیزیم، دارای جذب بالاتر بوده است. این نتیجه گویای جذب بالای اکسید منیزیم در ناحیه مرئی و جذب بالای نانولوله کربنی چند جداره در ناحیه فرابنفش است.

میزان انرژی جذب‌شده توسط نانوسیال نیز با روابط ذکر شده محاسبه شد. در نانوسیال هیبریدی، میزان کسر وزنی جذب خورشید نسبت به نانوسیال تکی و سیال پایه با افزایش قابل توجهی روبرو بوده است. این مقدار با طیف تابشی انرژی خورشید که در استاندارد جهانی آمده است نیز مقایسه شده و دارای تطابق تقریباً کاملی بوده است.



۵- فهرست علائم

سیستم	<i>OUT</i>
نانوذره	<i>p</i>
زمان	<i>t</i>

علائم انگلیسی

ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg^{\circ}C$	$C_p$
کسر وزنی جذب خورشیدی، %	$F$
ضریب انتقال حرارت	$h$
شدت نور، $mW/cm^2$	$I$
ضریب تخفیف، $1/cm$	$K_e$
عمق نفوذ، cm	$L$
جرم، kg	$m$
تبادل گرمایی، $J/s$	$Q$
تابع جذب نور	$R$
دما، $^{\circ}C$	$T$
زمان، s	$t$
ضریب عبور، %	$T$
حجم، ml	$v$

علائم یونانی

راندمان حرارتی خورشیدی، %	$\eta$
طول موج، nm	$\lambda$
چگالی، $gr/ml$	$\rho$
فرکانس، HZ	$\nu$
کسر حجمی، $gr/ml$	$\phi$
داده	$x$
عدم قطعیت اندازه‌گیری، %	$\omega$

علائم فارسی

ضریب عبور	$\cdot$
زیر نویس‌ها	$\cdot$
محیط	$\cdot$
میانگین	<i>average</i>
سیال پایه	<i>bf</i>
کونت	<i>CUV</i>
تخفیف	<i>e</i>
تعادل	<i>eq</i>
سیال پایه	<i>f</i>
جزء	<i>i</i>
شمارنده	<i>n</i>
نانوسیال	<i>nf</i>
نانوسیال	<i>NFS</i>
اولیه یا مرجع	<i>o</i>

منابع

- [1] H.M.F. Rabbi, A.Z. Sahin, B.S. Yilbas, A. Al-Sharafi, Methods for the Determination of Nanofluid Optical Properties: A Review, International Journal of Thermophysics, 42(1) (2021) 1-42.
- [2] E. Sani, L. Mercatelli, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, L. Colla, P. Sansoni, Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors, Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(11) (2011) 2994-3000.
- [3] R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, R. Adrian, R. Prasher, Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors, Nanoscale research letters, 6(1) (2011) 225.
- [4] T.B. Gorji, A. Ranjbar, A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (DASC) using graphite, magnetite and silver nanofluids, Solar Energy, 135 (2016) 493-505.
- [5] A. Menbari, A.A. Alemrajabi, Y. Ghayeb, Experimental investigation of stability and extinction coefficient of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO binary nanoparticles dispersed in ethylene glycol-water mixture for low-temperature direct absorption solar collectors, Energy Conversion and Management, 108 (2016) 501-510.
- [6] N. Chen, H. Ma, Y. Li, J. Cheng, C. Zhang, D. Wu, H. Zhu, Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of CuO-ATO nanofluids, Solar Energy Materials and Solar Cells, 162 (2017) 83-92.
- [7] M. Mehrali, M.K. Ghatkesar, R. Pecnik, Full-spectrum volumetric solar thermal conversion via graphene/silver hybrid plasmonic nanofluids, Applied energy, 224 (2018) 103-115.
- [8] M. Valizade, M. Heyhat, M. Maerefat, Experimental comparison of optical properties of nanofluid and metal foam for using in direct absorption solar collectors, Solar

- Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering, Springer, 2021, pp. 465-472.
- [14] S. Hazra, M. Michael, T. Nandi, Investigations on optical and photo-thermal conversion characteristics of BN-EG and BN/CB-EG hybrid nanofluids for applications in direct absorption solar collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230 (2021) 111245.
- [15] J.P. Holman, *Experimental methods for engineers*, (1966).
- [16] S. Choudhary, A. Sachdeva, P. Kumar, Investigation of the stability of MgO nanofluid and its effect on the thermal performance of flat plate solar collector, *Renewable Energy*, 147 (2020) 1801-1814.
- [17] A. International, Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface, (2012).
- [18] Y.A. Cengel, M.A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Edition (SI Units)*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2007.
- [19] X. Zhang, H. Gu, M. Fujii, Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(6) (2007) 593-599.
- Energy Materials and Solar Cells, 195 (2019) 71-80.
- [9] J. Qu, R. Zhang, Z. Wang, Q. Wang, Photo-thermal conversion properties of hybrid CuO-MWCNT/H<sub>2</sub>O nanofluids for direct solar thermal energy harvest, *Applied Thermal Engineering*, 147 (2019) 390-398.
- [10] W. Chen, C. Zou, X. Li, Application of large-scale prepared MWCNTs nanofluids in solar energy system as volumetric solar absorber, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200 (2019) 109931.
- [11] X. Li, G. Zeng, X. Lei, The stability, optical properties and solar-thermal conversion performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids for the direct absorption solar collector (DASC) application, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 206 (2020) 110323.
- [12] F. Yazdanifard, M. Ameri, R. Taylor, Investigation of using hybrid nanofluid-phase change material spectral splitter in photovoltaic/thermal system, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(7) (2021) 19-19. (in persian)
- [13] S. Mohan, A. Joseph, A. Poovathinkal, K. Akhilesh, J. Reji, J.N. Idicula, B. Vishnu, S. Sivapirakasam, Performance Evaluation of Linear Solar Collector Using Hybrid Nanofluid, in: *Innovative Design, Analysis and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Ghanbari, M. M. Heyhat, *Experimental Study of the Effect of Magnesium Oxide and Multi-Walled Carbon Nanotubes Hybrid Nanofluid on Increasing the Absorption Efficiency of Solar Radiation*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(5) (2022) 1101-1124.

DOI: 10.22060/mej.2022.20703.7297

