



## بررسی عملکرد نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحات گرافن در تولید بخار خورشیدی

محمد مصطفی غفوریان<sup>۱</sup>، حمید نیازمند<sup>۲\*</sup>، زهره اکبری<sup>۳</sup> و بهاره بخش زحمت کش<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۰۵

### چکیده

در این پژوهش به بررسی تولید بخار خورشیدی با استفاده از نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت، Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) و نانوصفحات گرافن در محلول پایه آب پرداخته می‌شود. برای این منظور از یک شبیه‌ساز خورشیدی، به عنوان منبع تابش، یک بشر حاوی نانوسیال، به عنوان دریافت‌کننده نور به همراه ترازوی دیجیتالی و نیز حسگرهای دما استفاده شده است. در گام نخست نانوسیال‌های حاوی نانوذرات مگنتیت (با غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ درصد وزنی) و نانوصفحات گرافن (با غلظت‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ درصد وزنی) در شدت تابشی ۳/۵ سان (یک سان معادل یک کیلووات بر متر مربع) در تولید بخار خورشیدی، مورد بررسی قرار می‌گیرند و سپس بهترین نتیجه نانوذرات مگنتیت با غلظت بهینه (۰/۰۱ درصد وزنی)، با نانوصفحات گرافن با غلظت‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ درصد وزنی ترکیب شده و عملکرد حرارتی و نیز تولید بخار خورشیدی آن‌ها ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات، جذب نور را نسبت به آب خالص به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد؛ به طوری که بازده‌های تبخیری نانوسیال‌های حاوی نانوذرات ۰/۰۴ درصد وزنی مگنتیت و غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی نانوصفحات گرافن به ترتیب ۱/۹۷ و ۲/۶۹ برابر بازده تبخیری آب بدست می‌آیند؛ در حالی که برای نانوسیال ترکیبی حاوی نانوذرات مگنتیت ۰/۰۱ درصد و نانوصفحات گرافن ۰/۰۰۴ درصد وزنی، بازده تبخیری ۳۲/۴ درصد گزارش می‌شود که ۲/۲۹ برابر بازده آب خالص است.

**کلمات کلیدی:** بخار خورشیدی؛ نانوذرات مگنتیت؛ نانوصفحات گرافن؛ محلی‌سازی گرما؛ نانوسیال

## Performance Evaluation of Ferric Oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) and Graphene Nanoplatelet (GNP) Nanoparticles in Solar Steam Generation

M. M. Ghafurian<sup>1</sup>, H. Niazmand<sup>2,\*</sup>, Z. Akbari<sup>3</sup>, B. Bakhsh Zahmatkesh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> M.Sc. student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

In the present work, the performance of water-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetite) nanofluid and graphene nanoplatelet (GNP) nanofluid in solar steam generation has been evaluated. For this purpose, a solar simulator, a beaker containing nanofluid, an electronic balance and temperature sensors were employed. In the first place, magnetite nanofluid with different mass fractions (0.01, 0.02 and 0.04 %) and GNP nanofluid with mass fractions of 0.001, 0.002 and 0.004% were separately exposed to solar illumination at intensity of 3.5 sun kW/m<sup>2</sup>. Then the most efficient concentration of magnetite nanofluid was mixed with different concentrations of GNP nanofluid and the photothermal conversion and solar evaporation behavior of the mixed nanofluid was studied. The results showed that adding the nanoparticles mentioned above to pure water, Highly increases the light absorption so that the solar vapor generation efficiency of magnetite nanofluid with concentration of 0.04 % mass weight and GNP nanofluid with the mass fraction of 0.004 % were 1.97 and 2.69 times as high as that of pure water. And the mixed nanofluid containing 0.01% mass weight of magnetite and 0.004% mass weight of GNP has a solar evaporation efficiency of 32.4% which is while the evaporation efficiency of pure water is 14.13%.

**Keywords:** Solar Evaporation; Magnetite Nanoparticles; Graphene Nanoplate Nanoparticles; Heat Localization; Nanofluid

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۱۰۳؛ فکس: ۰۵۱۳۳۸۸۰۶۰۵۵

آدرس پست الکترونیک: [niazmand@um.ac.ir](mailto:niazmand@um.ac.ir)

## ۱- مقدمه

انرژی یکی از حیاتی‌ترین نیازهای بشر برای بقا و توسعه است. با افزایش جمعیت و سطح رفاه مورد انتظار، نرخ مصرف انرژی به شدت رشد یافته است. مشکلات تامین سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ناشی از سوزاندن آن‌ها، جوامع را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک سوق داده است. از طرفی میزان بهره برداری انرژی‌های نو ارتباط تنگاتنگی با توسعه پایدار، شکوفایی اقتصادی و کیفیت زندگی دارد [۱]. انرژی خورشیدی نیز به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر، یکی از نوید بخش‌ترین منابع انرژی در بین انرژی‌های نو است که تا کنون بهره برداری از آن در زمینه‌های فتولتائیک [۲]، سیستم‌های آب شیرین‌کن [۳-۵]، تولید توان خورشیدی [۶]، سرمایش خورشیدی و چیلرهای جذبی [۷]، گرمایش خورشیدی [۸]، تصفیه فاضلاب [۹] و استریلیزاسیون [۱۰] گزارش شده است؛ اما مشکل اساسی بهره‌گیری از انرژی خورشید، اتلافات بالا و نیز پایین بودن بازده سیستم‌ها؛ زیرا بخش اعظمی از انرژی در فرآیند انتقال و ذخیره‌سازی تلف می‌شود. یکی از فناوری‌های اخیر برای بهبود راندمان سیستم‌های تولید گرما و بخار خورشیدی، استفاده از نانوذرات جاذب است. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند، استفاده از نانوذرات علاوه بر افزایش جذب موجب محلی‌سازی گرما نیز خواهد شد که نقش موثری در کاهش اتلافات و افزایش بازده دارد [۳]. برای این منظور در ابتدا محققان از نانوذرات فلزی به دلیل داشتن قابلیت جذب بالای نور خورشید و امکان استفاده از خاصیت تشدید پلاسمونی سطحی استفاده نمودند. به عنوان نمونه، امجد و همکاران [۱۱]، با آزمون نانوسیال طلا برای تبخیر خورشیدی نشان دادند که با افزودن نانوذرات به محلول پایه، میزان جذب نور و نیز بازده تبدیل نور به گرما افزایش می‌یابد. جین و همکاران [۱۲]، با انجام پژوهشی به صورت آزمایشگاهی و عددی نشان دادند که استفاده از نانوسیال طلا، با غلظت  $5/8$  ppm سبب بهبود راندمان تبدیل نورگرمایی به میزان ۶۰٪ نسبت به آب خالص در شدت یک سان می‌شود. مورچیانو و همکاران [۱۳]، در پژوهش خود هزینه تمام‌شده ساختار طراحی خود را با سایر روش‌های تولید بخار خورشیدی مقایسه نموده و با اشاره به قیمت بالای نانوسیال طلا (که برای ۲۰ میلی‌لیتر محلول آبی نانوذره طلا

با غلظت  $1/8 \times 10^{14}$  ذره در میلی‌لیتر، برابر با ۱۸۵ دلار آمریکا است)؛ بهره‌گیری از آن را از نظر اقتصادی توجیه پذیر ندانستند. زینی و همکاران [۱۴]، عملکرد نانوذرات طلا در تولید بخار خورشیدی را با دیگر نانوسیال‌ها نظیر کربن سیاه مقایسه کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها قیمت بخار تولید شده توسط نانوذرات طلا، ۳۰۰ برابر مقدار مساوی بخار تولید شده با کربن سیاه برآورد شد. مواردی از این قبیل، باعث شده است که محققان به دنبال سایر نانوذرات ارزان‌قیمت با قابلیت جذب نور بالا باشند. به عنوان نمونه، غفوریان و همکاران [۱۵-۱۶]، نانوذرات کربنی [۱۵] و اکسید گرافن [۱۶] را برای بررسی اثر غلظت نانوسیال و شدت تابش نور ورودی روی نرخ تبخیر و بازده تبخیری و نیز بازده تبدیل نور به گرما به‌کار گرفتند. این دو تحقیق نیز، عملکرد بالای نانوسیال‌های کربنی را حتی در غلظت‌های پایین (۲۰ تا ۸۰ ppm [۱۵] و  $0/004$  [۱۶] درصد وزنی) در مقایسه با آب خالص گزارش نمودند. نی و همکاران [۱۷]، مطالعه‌ای مقایسه‌ای را در تولید بخار خورشیدی به وسیله نانوسیال‌های کربن سیاه، کربن سیاه گرافیتی شده و گرافن انجام دادند و در این میان به بازده مطلوب ۶۹ درصد دست یافتند. آن‌ها همچنین از مدل‌های تحلیلی و عددی انتقال حرارت برای اعتبارسنجی آزمون‌ها بهره گرفتند.

از طرفی نانوذرات اکسید فلزات مغناطیسی (ترکیبات اکسید آهن، مگنتیت<sup>۱</sup> و مگامیت<sup>۲</sup>) در زمینه‌هایی که میدان مغناطیسی حائز اهمیت است، توجه زیادی را به خود معطوف داشته‌اند. علاوه بر خاصیت مغناطیسی، نانوذرات مگنتیت خواص مناسب دیگری از قبیل، غیرسمی بودن، سازگاری زیستی و زیست فروپاشی دارند که آن‌ها را برای کاربرد در بسیاری از زمینه‌ها از قبیل، کاربردهای پزشکی [۱۸] و زیست‌پزشکی [۱۹] (تصویر برداری تشدید مغناطیسی<sup>۳</sup> [۲۰]، درمان به کمک عکس‌برداری، تصویربرداری ذرات مغناطیسی [۲۱]، حامل‌های مغناطیسی در نانوداروسازی، انتقال و تحویل هدفمند دارو [۲۲]، همراه با میدان مغناطیسی خارجی)، ذرات کنترل شده با امواج رادیویی (فزون‌گرمایی مغناطیسی [۲۳]، درمان سرطان)، جدایش

<sup>1</sup> Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

<sup>2</sup> γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>3</sup> MRI

نانوذرات مغناطیسی در بازیافت و استفاده مجدد، تحت میدان مغناطیسی ۴۰ میلی تسلا، بررسی خواهد شد.

## ۲- چیدمان آزمایشگاهی

### ۲-۱- آماده سازی نانوسیال

همانطور که در بخش قبل بیان شد، در این پژوهش از دو نوع نانوذره مگنتیت و نانوصفحات گرافن جهت ارزیابی تبخیر خورشیدی استفاده می‌شود. در ابتدا نانوسیال بر پایه آب حاوی نانوصفحات گرافن که به روش دومرحله‌ای آماده‌سازی شده، در سه درصد وزنی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ از شرکت نانومواد ویرا<sup>۱</sup> خریداری شد. محلول‌ها دارای ذراتی با اندازه کمتر از ۴۰ نانومتر و درصد خلوص ۹۵ درصد می‌باشند که در مرحله قبل از شروع آزمایش، به مدت نیم ساعت در حمام اولتراسونیک قرار می‌گیرند. نانوسیال حاوی نانوذرات مگنتیت از شرکت نانومواد کربنی ویرا با اندازه ذرات ۴۰-۲۰ نانومتر و با خلوص ۹۹/۸ درصد تهیه شد که در آن از سورفکتانت آمونیاک استفاده شده بود. به منظور پایداری مناسب‌تر نانوسیال‌ها در مدت زمان تست، محلول‌ها به مدت یک ساعت در حمام اولتراسونیک<sup>۲</sup> قرار داده شدند. مخلوط نانوسیال‌های مگنتیت و نانوصفحات گرافن نیز، با ترکیب نانوسیال مگنتیت با درصد وزنی ۰/۰۱ و حجم مساوی از نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن با درصدهای وزنی مختلف آماده شده و قبل از هر تست به مدت نیم ساعت در حمام اولتراسونیک قرار گرفته تا به خوبی پراکنده گردند. شکل ۱، نانوسیال‌های بکار رفته در آزمایش با غلظت‌های مشخص در مقایسه با آب مقطر را به همراه تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۳</sup> آن‌ها نشان می‌دهد. پایداری نانوذرات با اندازه‌گیری پتانسیل زتا نشان داده شده است. نانوسیال حاوی مگنتیت با غلظت ۰/۰۱ و نیز نانوسیال حاوی نانوصفحه گرافن با غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی، به ترتیب دارای مقادیر پتانسیل زتا  $28 \text{ mV}$  و  $30.79 \text{ mV}$  هستند؛ چون تقریباً اعداد بین  $30-60 \text{ mV}$  هستند، پس پایداری قابل قبولی را در مدت زمان تست می‌توان فرض کرد. هر چند بازدیدهای چشمی نیز، تایید کننده این موضوع بود.

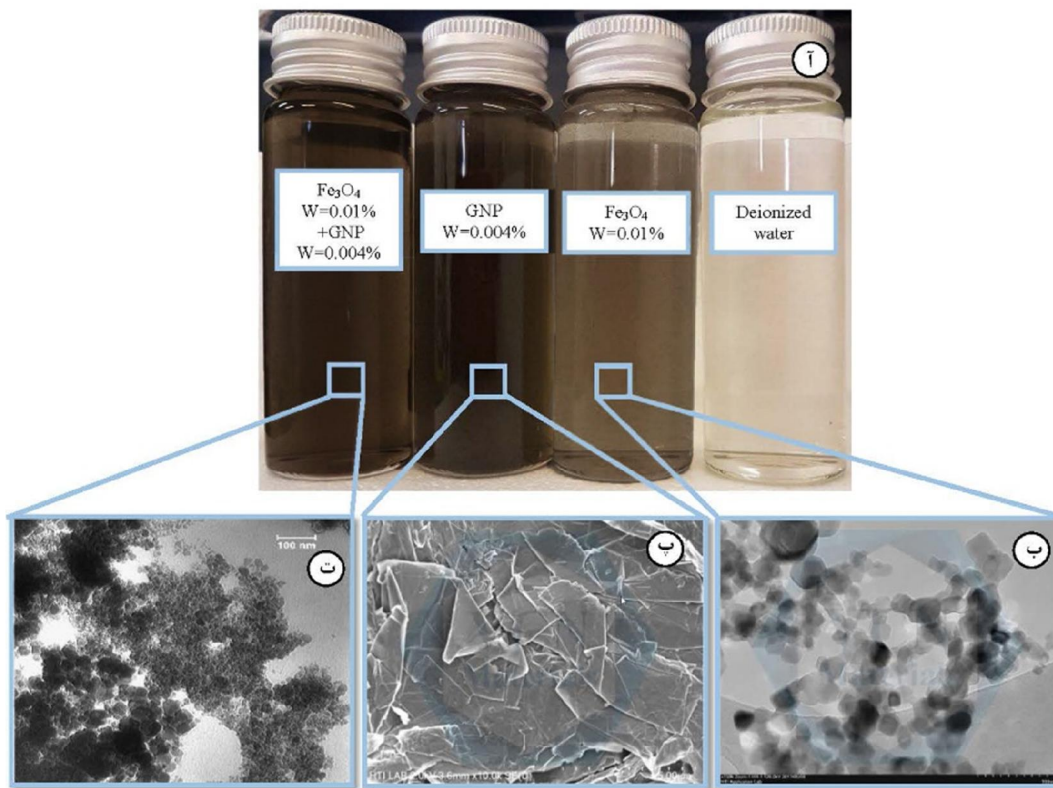
مغناطیسی (تصفیه فاضلاب [۲۴]). حذف فلزات سنگین از جمله کادمیوم، کروم، مس، نیکل و رنگدانه‌ها، مناسب نموده است. تحقیقات متعددی در زمینه‌هایی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، انجام گرفته است؛ اما در زمینه کاربرد تبدیل نور گرمایی مطالعات اندکی روی این نوع نانوذره صورت گرفته است. نکته حائز اهمیت در استفاده از این نوع نانوذره مغناطیسی، کاربرد آن در بازیافت آن و دیگر نانوذرات در تولید بخار خورشیدی است؛ زیرا که استفاده پیوسته و طولانی مدت از نانوذرات گوناگون در یک سیستم، می‌تواند سبب آلودگی شده و اگر امکان بازیافت و استفاده مجدد از نانوذرات میسر نباشد، طرح در مقیاس‌های بزرگ توجیه اقتصادی نخواهد داشت [۲۵]. یکی از پژوهش‌های اولیه در تولید بخار خورشیدی با تمرکز روی جداسازی مغناطیسی و استفاده مجدد از نانوذرات، توسط وانگ و همکاران [۳] انجام شد. آن‌ها ساختار هیبریدی مگنتیت و اکسیدگرافن کاهیده را سنتز کردند که به کمک میدان مغناطیسی قابل جداسازی است. پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از این نانو ساختار و بازیافت آن‌ها، تاثیر بسیاری بر هزینه‌های تولید بخار خورشیدی و آب‌شیرین‌کن دارد [۳]. شی و همکاران [۲۶] نشان دادند که نانوسیال با ساختار هیبرید مگنتیت و نانوتیوب کربن، طیف وسیعی از نور خورشید را جذب می‌کند. آنها همچنین نشان دادند که نرخ جدایش مغناطیسی با تنظیم نسبت مگنتیت به نانوتیوب کربن، قابل کنترل است [۲۷].

همانطور که از پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود، بررسی عملکرد ترکیبی نانوذرات مغناطیسی با دیگر نانوذرات دارای جذب نور بالا، ایده جدیدی است که تاکنون به طور کامل گسترش نیافته است و بررسی انواع مختلف نانوذرات ارزان قیمت در ترکیب با نانوذرات مغناطیسی و تاثیر پارامترهای شدت و غلظت در آن‌ها نیز، از جمله خلاءهای موجود در ادبیات این موضوع است. از این رو در این پژوهش از نانوذرات مغناطیسی مگنتیت ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) و نیز نانوصفحات گرافن (GNP) به دلیل ساختار صفحه‌ای و رنگ تیره و مساحت زیاد نسبت به حجم، به عنوان جاذب خوب نور خورشید استفاده خواهد شد و عملکرد تولید بخار خورشیدی در درصدهای وزنی مختلف و نیز شدت خورشیدی متفاوت در محیط آزمایشگاه بررسی می‌شود. به علاوه توانایی این

<sup>1</sup> Vira Carbon Material CO.(VCN CO.)

<sup>2</sup> Ultrasonic

<sup>3</sup> Transmission Electron Microscopy



شکل ۱- (آ) نانوسیال‌های بکار رفته در آزمایش با غلظت‌های مشخص در مقایسه با آب مقطر؛ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری برای نانوذرات، (ب) مگنتیت، (پ) نانوصفحات گرافن، و (ت) نانوسیال مخلوط

## ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

شکل ۲ سیستم آزمایشگاهی تولید بخار خورشیدی را نشان می‌دهد. در این چیدمان از یک شبیه‌ساز نور خورشید ساخت شرکت نانوشات ایران مدل IIS-310 که دارای لامپ زنون ۱۶۰۰ وات و دمای تابش ۶۰۰۰ کلوین است، به منظور تولید تابش مصنوعی استفاده می‌شود. گیرنده‌ی خورشیدی، یک بشر شیشه‌ای با عایق پلاستیک حبابی با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و قطر ۳۸ میلی‌متر است که حاوی نانوسیال یا آب است و سه حسگر دما از نوع پی تی ۱۰۰ در ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متری از کف آن برای اندازه‌گیری افزایش دمای سیال در طول آزمایش، تعبیه شده‌اند. قسمت بالای این حسگرها که در معرض تابش هستند، با کمک پوشش سیلیکونی به رنگ

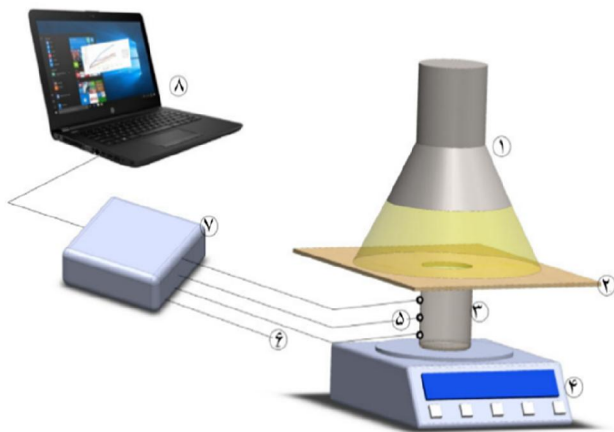
سفید درآمدند تا از جذب نور و افزایش دمای ناخواسته جلوگیری شود. به منظور اندازه‌گیری نرخ تبخیر از یک ترازوی دیجیتال دقیق با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم ساخت شرکت کرن<sup>۲</sup> آلمان مدل ABJ220-4NM استفاده می‌شود. برای تنظیم شدت نور در آزمایش، از پیرانومتر سی ام پی<sup>۳</sup> ساخت شرکت کیپ و زونن<sup>۴</sup> با دقت یک وات بر متر مربع در محدوده طول موجی ۲۰۰-۲۸۰ نانومتر استفاده شده و شدت تابش مورد نظر تنظیم می‌شود. در هر مرحله از آزمون، بشر از نانوسیال مربوطه کاملاً پر شده و در مدت زمان سی دقیقه در معرض تابش نور قرار می‌گیرد. تمامی داده‌های

<sup>2</sup> Kem

<sup>3</sup> CMP3 Secondary Standard Pyranometer

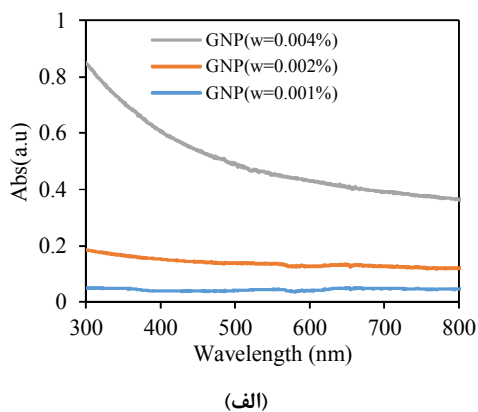
<sup>4</sup> Kipp & Zonen Co.

<sup>1</sup> PT100

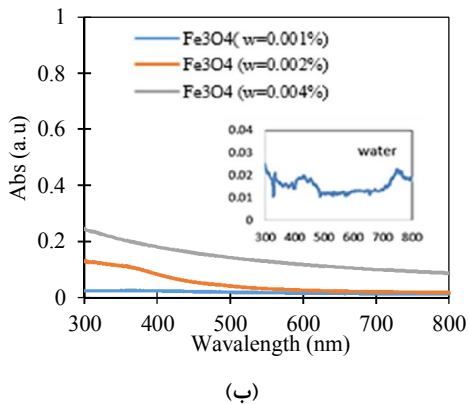


- ۱- شبیه ساز خورشید
- ۲- روزنه
- ۳- گیرنده خورشیدی (بشر)
- ۴- ترازوی دیجیتالی دقت ۰/۰۰۰۱ گرم
- ۵- سه حسگر دما از نوع Pt100
- ۶- حسگر دمای محیط از نوع Pt100
- ۷- ثبت کننده‌ی داده
- ۸- رایانه

شکل ۲- شماتیک چیدمان آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری بخار خورشیدی



(الف)



(ب)

شکل ۳- طیف جذبی؛ الف) نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن و ب) نانوسیال حاوی نانوذره اکسید آهن (مگنتیت) در غلظت‌های مختلف در مقایسه با آب دیونیزه

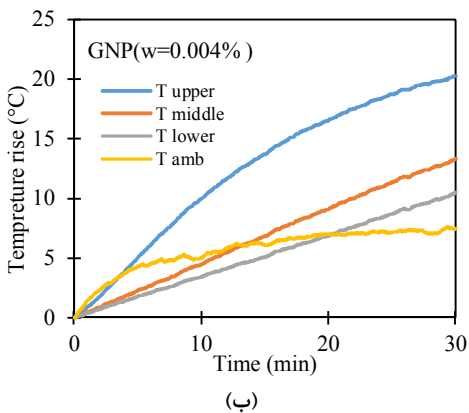
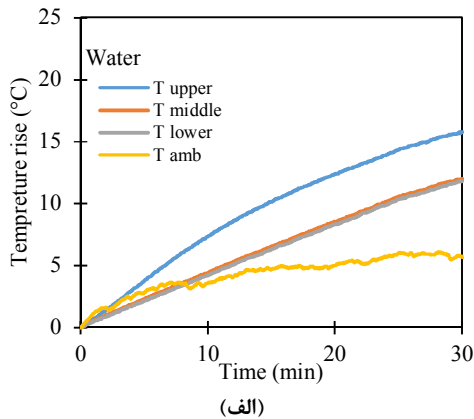
حسگرها و ترازو با استفاده از یک سیستم جمع‌آوری داده به رایانه فرستاده می‌شود. شایان توجه است که دمای محیط هنگام شروع آزمایش، ۳۲-۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی محیط، ۱۹ درصد و فشار هوا ۰/۹ بار ثبت شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی عملکرد نانوسیال گرافن در تولید بخار خورشیدی

به منظور درک دقیق‌تر جذب نور توسط نانوسیال‌ها در ناحیه مرئی، از دستگاه طیف سنج نور خورشید مدل (Agilent 8453) استفاده شد؛ زیرا که بخش اعظمی از طول موج‌های منتشر شده از خورشید که توسط زمین جذب می‌شوند، مربوط به این ناحیه است. شکل ۳ نتایج طیف جذبی نمونه‌ها را برای غلظت‌های مختلف (الف) نانوسیال نانوصفحات گرافن و (ب) نانوسیال اکسید آهن (مگنتیت) در مقایسه با آب، نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، آب خالص قدرت بسیار کمی در جذب نور خورشید دارد. به علاوه، افزودن نانوذره به آب و افزایش غلظت نانوسیال، منجر به افزایش قدرت نانوسیال در جذب نور خورشید شده که در مقایسه با طیف جذبی آب، افزایش قابل توجهی دارد [۱۶، ۲۷]. از طرفی با مقایسه دو شکل می‌توان قدرت بیشتر نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن را در جذب نور خورشید درک کرد.



شکل ۴- افزایش دما در ارتفاع‌های مختلف از ظرف برای (الف) آب خالص و (ب) نانوسیال نانوصفحه‌ای گرافن با درصد وزنی ۰/۰۰۴ درصد وزنی تحت شدت ۳/۵ سان

شکل ۵ افزایش دمای بالاترین حسگر و نیز جرم تبخیر شده برای نانوسیال حاوی نانوصفحه‌ای گرافن در غلظت‌های مختلف در مقایسه با آب در مدت ۳۰ دقیقه تحت شدت ۳/۵ برابر شدت خورشیدی نشان می‌دهد. علت انتخاب این مدت زمان این است که نرخ تبخیر در کمتر از ۱۵ دقیقه به حالت پایدار رسیده و دیگر ثابت می‌ماند. نتایج این شکل نشان می‌دهد که افزایش دمای سطح برای آب خالص، به  $15/75^{\circ}\text{C}$  و برای نانوصفحه گرافن با کمترین غلظت ۰/۰۰۱ درصد وزنی به  $17/75^{\circ}\text{C}$  می‌رسد که دلیل آن در پاراگراف قبلی نیز ارائه شد؛ اما نکته حائز اهمیت، افزایش جذب با افزایش غلظت است که منجر به افزایش دما و سپس افزایش نرخ تبخیر را به دنبال خواهد داشت. به طوری که بیشترین نرخ تبخیری برای محلول نانوصفحه‌ای گرافن با غلظت ۰/۰۰۴ درصد

برای بررسی اثر تبخیر خورشیدی، نمونه‌های آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه در معرض نور منتشر شده توسط شبیه ساز خورشیدی قرار گرفتند و از سه حسگر دما در سه ارتفاع مختلف نسبت به کف ظرف، برای ثبت تغییرات دما در طول آزمایش استفاده شد که بالاترین آن در ارتفاع ۵۰ میلی متری و پایین‌ترین، در ارتفاع ۱۰ میلی‌متری از کف ظرف قرار داشت؛ همچنین از یک دماسنج دیگر، برای اندازه‌گیری تغییرات دمای محیط آزمایشگاه استفاده شد. تغییرات دمای آب و نانوسیال نانوصفحه‌ای گرافن در غلظت ۰/۰۰۴ درصد، وزنی نسبت به زمان در ارتفاع‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است.

با مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که تفاوت دما در ارتفاع میانی و کف ظرف تقریباً ناچیز است که نشان می‌دهد، انرژی گرمایی دریافت شده توسط آب، بیشتر از آنکه برای تبخیر خورشیدی استفاده شود، سبب افزایش دمای کلی سیال می‌شود و از این طریق اتلاف خواهد شد. در مقابل افزودن نانوذره به آب، سبب افزایش اختلاف دما در سطوح مختلف نسبت به آب به خصوص در سطح نانوسیال می‌شود که این نشان دهنده محلی سازی گرما در سطح بالا و اطراف نانوذرات است. این پدیده مطابق با نتایج دیگر محققان [۱۶،۲۹] و نیز طبق قانون بیر لمبرت<sup>۱</sup> قابل توضیح است؛ این رابطه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$A = \log_{10}(1/T_r) = \epsilon cl \quad (1)$$

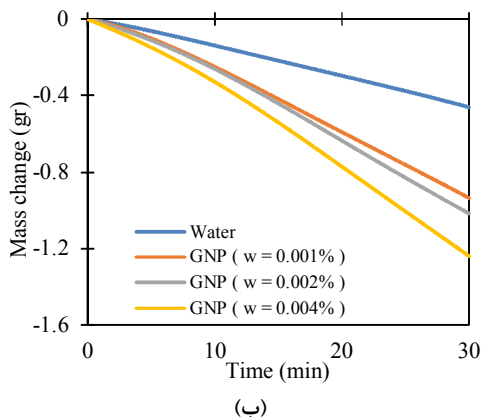
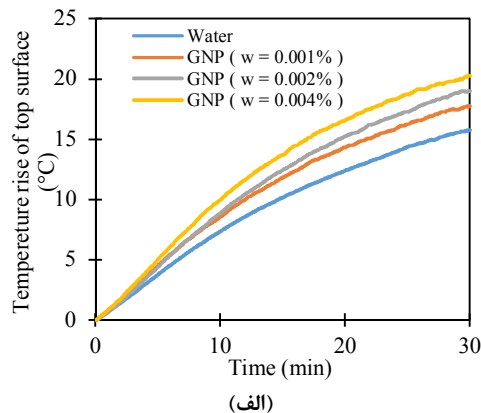
A میزان جذب اندازه‌گیری شده، Tr ضریب عبور،  $\epsilon$  ضریب جذب یا ضریب خاموشی، c غلظت جاذب و l طول قسمتی است که در مسیر نور قرار گرفته است. میان غلظت جاذب نور و میزان جذب، یک رابطه خطی وجود دارد، به گونه‌ای که با افزایش طول عبوری نور میزان جذب کاهش می‌یابد [۲۷،۲۹]؛ بنابراین طبق این رابطه، مقدار قابل توجهی از نور تابیده شده، توسط سطح نانوسیال جذب و سبب افزایش دمای سطح می‌شود؛ به طوری که در نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن، افزایش دمای بالاترین و نیز میانگین سه حسگر ۲۰/۲۵ و ۱۴/۶۹ درجه سانتی‌گراد گزارش می‌شود. این درحالی است که این مقادیر برای آب ۱۵/۷۵ و ۱۳/۱۹ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

<sup>۱</sup> Beer-Lambert

می‌شود. به منظور پیدا کردن غلظت بهینه‌ای که نانوسیال اکسید آهن (مگنتیت) باید با نانوصفحات گرافن مخلوط شود؛ ابتدا نانوسیال اکسید آهن (مگنتیت) با غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ درصد وزنی ساخته شد و به مدت ۳۰ دقیقه تحت شدت ۳/۵ سان برای اندازه‌گیری نرخ تبخیر قرار داده شد. مشاهده شد که برای هر یک از این غلظت‌ها به ترتیب جرم تبخیر شده برابر با ۰/۸۷gr، ۰/۸۴gr و ۰/۹۱gr به دست آمد که معادل نرخ تبخیری آن به ترتیب ۱/۵۳، ۱/۴۸ و ۱/۶ کیلوگرم بر مترمربع ساعت است. برای پیدا کردن غلظت بهینه از نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> و از روش پاسخ سطح استفاده شد. غلظت نانوسیال و تغییرات دما در طول آزمایش به عنوان متغیر ورودی و بیشترین نرخ تبخیر، به عنوان متغیر خروجی تعریف شد و در نهایت با انتخاب تابع انتقال معکوس  $1/(x+k)$ ، که نزدیک‌ترین مقدار واریانس را به عدد یک به خود اختصاص داده، غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی پیشنهاد می‌شود؛ لذا در این پژوهش مقدار غلظت بهینه نانوسیال مگنتیت برای ترکیب با نانوصفحات گرافن این مقدار انتخاب شد.

شکل ۶ (الف)، افزایش دما برای ارتفاع‌های مختلف ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) با درصد وزنی ۰/۰۱ و نانوصفحه گرافن با غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نانوسیال، افزایش دما کاهش می‌یابد که مشابه قسمت قبلی و به دلیل قانون بیر لمبرت، می‌تواند نتیجه اثر محلی‌سازی گرما در سطح باشد. این در حالی است که برای محلول نام برده در بالاترین حسگر، افزایش دما به ۱۹/۱۹°C می‌رسد که در مقایسه با نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافنی با غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی، نتیجه مطلوب‌تری دارد. شکل ۶ (ب)، افزایش دمای سطح و (پ)، جرم تبخیر شده در مدت زمان ۳۰ دقیقه برای غلظت‌های مختلف نانوصفحات گرافنی (۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ درصد وزنی) و غلظت ثابت نانوذرات مغناطیسی (۰/۰۱ درصد وزنی) تحت شدت ۳/۵ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نانوسیال ترکیبی نقش موثری در افزایش دما دارد و این اثر با افزایش غلظت پررنگ‌تر می‌شود؛ به طوری که با افزایش غلظت از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۴ درصد

وزنی، برابر با ۲/۱۹ کیلوگرم بر متر مربع ساعت بدست می‌آید که ۲/۶۹ برابر نرخ تبخیر شده آب خالص است. این عدد برای محلول نانوصفحه‌ای گرافن با غلظت ۰/۰۰۱ درصد وزنی، ۲/۰۴ برابر آب است. این نقش موثر نانوسیال غلظت نانو صفحات گرافن را در جذب نور و تولید بخار خورشیدی نشان می‌دهد.

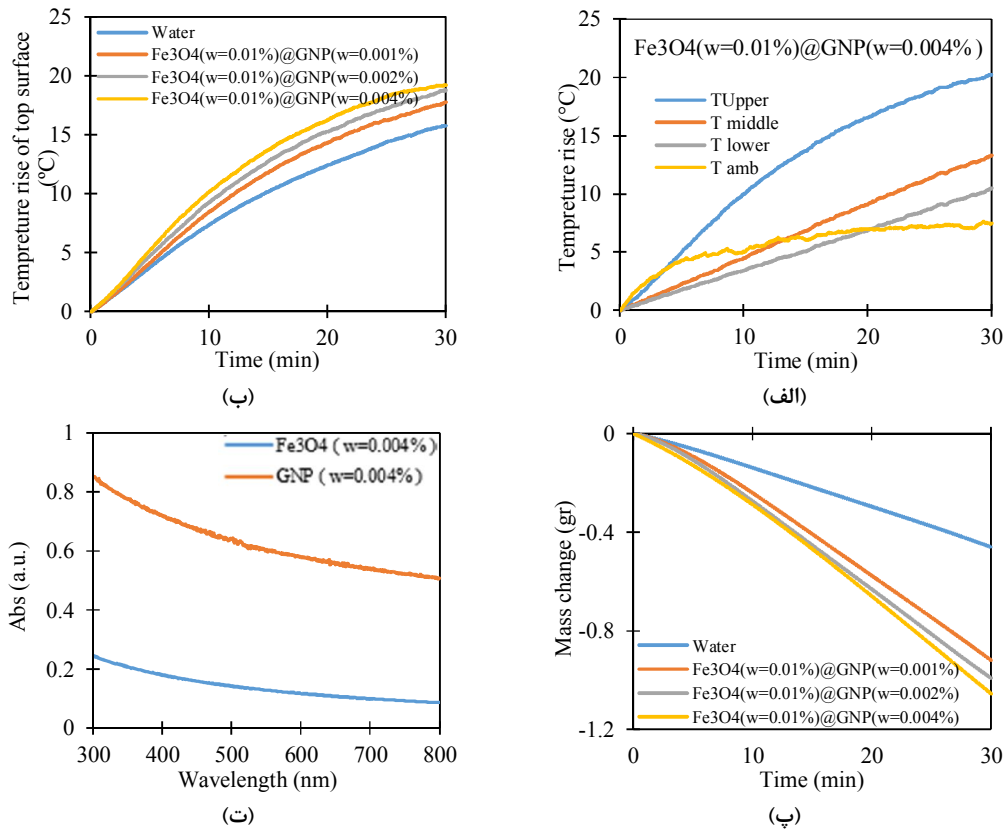


شکل ۵- (الف) افزایش دمای در سطح نانوسیال حاوی نانوصفحه گرافن با درصد وزنی مختلف به همراه و (ب) جرم تبخیر شده نانوسیال تحت شدت ۳/۵ سان

### ۲-۳- بررسی عملکرد نانوسیال ترکیبی حاوی نانو ذرات گرافن و اکسید آهن در بخار خورشیدی

همانطور که در قسمت مقدمه بیان شد، به منظور بازیافت نانوصفحات می‌توان از نانوذرات مغناطیسی استفاده کرد. برای این منظور، اثر تبخیری و حرارتی ترکیب نانوصفحات گرافن با نانوذره اکسید آهن (مگنتیت) به صورت تجربی بررسی

<sup>1</sup> Design Expert



شکل ۶- الف) افزایش دما در سطح نانوسیال ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحه گرافن با درصد وزنی ۰/۰۰۴ (ب) افزایش دمای در سطح نانوسیال ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحه گرافن با درصد وزنی مختلف (پ) جرم تبخیر شده نانوسیال ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) با نانوصفحه گرافن با درصد وزنی مختلف (ت) مقایسه طیف جذبی نانوسیال اکسید آهن (مگنتیت) و نانوسیال نانوصفحه گرافن در غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی

(ت) به وضع مشاهده می شود که در ناحیه مرئی جذب نانوصفحات گرافنی بیشتر از نانوذرات اکسید آهن در درصد وزنی مشابه است و با افزودن یا جایگزین کردن نانو صفحات گرافنی با نانوذرات مغناطیسی، میزان جذب و در نتیجه نرخ تبخیر کاهش می یابد.

### ۳-۳- بازده تبخیری

به منظور ارزیابی نانوسیالها در تبخیر خورشیدی، راندمان تبخیر محلولها برای غلظتهای متفاوت طبق رابطه (۲) محاسبه شد. [۲۹،۲۶،۳،۱۶،۳۰]

$$\eta_{evaporation} = \frac{m h_{fg}}{I A} \quad (2)$$

وزنی، افزایش دمای سطح از ۱۷/۷۵ به ۱۹/۱۹ درجه سانتی-گراد تغییر می یابد که به دنبال آن میزان جرم تبخیر شده نیز با افزایش غلظت افزایش خواهد یافت. نتایج مربوط به جرم تبخیر شده نشان می دهد که بیشترین میزان تبخیر برای بیشترین غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی در مدت ۳۰ دقیقه با مقدار ۱/۰۵gr معادل ۱/۸۵ کیلوگرم بر متر مربع ساعت است که حدود ۲/۲۸ برابر نرخ تبخیر آب خواهد بود. در حقیقت با مقایسه نتایج این بخش و بخش قبل مشاهده می شود که افزودن نانوذرات مغناطیسی، سبب افزایش دما می شود و میزان تبخیر را افزایش می دهد؛ ولی در افزایش نرخ تبخیر همانند نانوصفحات گرافنی عمل نمی کند، زیرا جذب نانوصفحات گرافنی بیشتر از آهن است. این نتیجه در شکل ۶



بر لیتر ترکیب اکسید آهن و کربن نانولوله‌ای دوجداره با نسبت ۴ به ۱، بازده تبخیری ۶۰/۳۰ درصد تحت شدت نور ۱۰ سان گزارش کردند [۲۶]؛ همچنین غفوریان و همکاران در شدت نور  $3/5 \text{ kW/m}^2$  و برای درصد وزنی ۰/۰۰۴ درصد وزنی اکسید گرافن، راندمان تبخیری ۲۱/۷ درصد محاسبه نمودند [۱۶] و وانگ و همکاران [۳۱] نیز، روی نانوذرات گران‌بهای طلا برای بهبود کارایی تبخیر خورشیدی به راندمان ۵۴/۴۵ درصد برای غلظت ۱۷۸ ppm در شدت ۳ سان رسیدند. این در حالی است که در پژوهش حاضر بیشترین بازده تبخیری تحت شدت  $3/5 \text{ kW/m}^2$  و درصد وزنی ۰/۰۰۴ برای نانوسیال نانوصفحه گرافن، ۳۸/۱۳ درصد محاسبه شد. این نشان می‌دهد که این نوع نانوذره در مقایسه با نانوذرات گران‌بها در جذب انرژی خورشید و نیز تولید بخار نقش موثری دارد.

### ۳-۴- بازده محسوس و کل

در فرآیند تبخیر، بخشی از انرژی گرمایی صرف تغییر فاز سیال و تبخیر می‌شود و بخش عمده دیگر، سبب گرمایش و افزایش دمای بالک سیال می‌شود. راندمان افزایش دمای بالک سیال یا راندمان محسوس طبق رابطه (۳) به دست می‌آید: [۱۶، ۳۲]

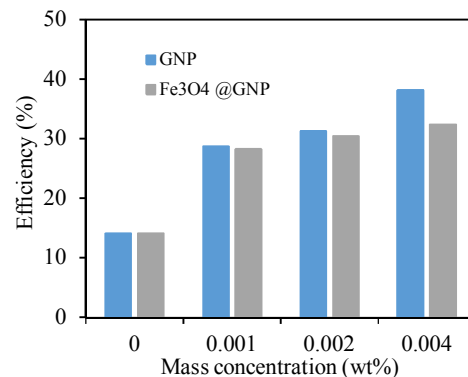
$$\eta_{\text{sensible}} = \frac{MC_p \Delta T}{IA} \quad (3)$$

که در این رابطه  $M$  جرم کل نانوسیال،  $C_p$  ضریب گرمایی ویژه آب،  $\Delta T$  تغییر دمای بالک سیال در طول آزمایش،  $t$  زمان آزمایش،  $A$  مساحت سطح معرض تابش و  $I$  چگالی شدت نور است. مقدار ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از رابطه ۴ به دست می‌آید: [۳۴]

$$C_p = \frac{M_{liq} C_{p liq} + M_{np} C_{p np}}{M_{liq} + M_{np}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $M_{liq}$  جرم سیال پایه،  $M_{np}$  جرم نانوذره و  $C_{p liq}$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه و  $C_{p np}$  ظرفیت گرمایی ویژه نانوذره است. برای غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی نانوسیال مگنتیت، مقدار ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال  $4/1696 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{C}^{-1}$  و برای غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی نانوسیال نانوصفحات گرافن  $4/1699 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{C}^{-1}$  به دست آمد که باتوجه به اینکه ظرفیت گرمایی ویژه آب خالص  $4/17 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{C}^{-1}$  است، نتیجه می‌شود در غلظت‌های پایین

که  $\dot{m}$  نرخ تبخیر (کیلوگرم بر مترمربع ساعت)،  $h_{fg}$  آنتالپی تغییر فاز آب ( $2257 \text{ kJ.kg}^{-1}$  در فشار ۱ اتمسفر برای آب خالص) و  $I$  چگالی شدت نور (کیلووات بر مترمربع) و  $A$  سطح تبخیر (مترمربع) است. هنگام تبخیر خورشیدی، فقط آب خالص تبخیر می‌شود و نانوذره‌ای در آب کندانس شده وجود ندارد؛ لذا در رابطه ۲ تنها آنتالپی تبخیر آب خالص لحاظ شده است. راندمان تبخیر برای نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافنی و ترکیب نانوسیال حاوی نانوصفحه‌های گرافن و اکسید آهن (مگنتیت) در غلظت‌های متفاوت، تحت شدت نور  $3/5 \text{ kW/m}^2$  در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، با افزایش غلظت نانوسیال راندمان تبخیر افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش غلظت از صفر (آب خالص) به نانوسیال حاوی نانوصفحه‌های گرافن در غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی، بازده تبخیری از ۱۳/۱۴ درصد به ۳۸/۱۳ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که برای نانوسیال ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحه‌های گرافن این مقدار از ۱۴/۱۳ درصد به ۳۲/۴۰ درصد افزایش می‌یابد که این نقش موثر نانوذرات را در افزایش بازده نسبت به آب خالص نشان می‌دهد.



شکل ۷- راندمان تبخیر نانوسیال نانوصفحه گرافن و ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحه گرافن در غلظت‌های مختلف و شدت ۳/۵

به منظور مقایسه بهترین بازده نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین، نتایج دیگر محققان در مقایسه با پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شی و همکاران برای غلظت جرمی ۰/۵ گرم

جدول ۱- راندمان تبخیری گزارش شده در پژوهش‌های پیشین

مرجع	نوع نانوسیال	غلظت	شدت تابش (suns)	راندمان تبخیر (%)
[۱]	MWCNT-OH	۰/۰۰۲%wt	۲/۳	۳۴/۶۳ (تقطیری)
[۱]	MWCNT-COOH	۰/۰۰۲%wt	۲/۳	۲۶/۷۹ (تقطیری)
[۲۶]	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @MWCNT	۰/۵ g/l	۱	۴۳/۸
[۲۶]	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @MWCNT	۰/۵ g/l	۳	۲۳/۳
[۲۶]	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @MWCNT	۰/۵ g/l	۱۰	۶۰/۳
[۱۶]	GO	۰/۰۰۴% wt	۱/۵	۳۶/۵
[۱۶]	GO	۰/۰۰۴% wt	۲/۵	۲۶/۳
[۱۶]	GO	۰/۰۰۴% wt	۳/۵	۲۱/۷
[۳۲]	rGO	۱۰ ppm	۱	۴۶/۱۷
[۳۲]	rGO	۱۰ ppm	۳	۳۶/۲۲
[۳۲]	rGO	۱۰ ppm	۵	۴۲/۸۲
[۳۲]	rGO	۱۰ ppm	۷	۴۷/۴
[۳۱]	Au	۱۷۸ ppm	۱	۶۶/۲۸
[۳۱]	Au	۱۷۸ ppm	۳	۵۴/۴۵
[۳۱]	Au	۱۷۸ ppm	۵	۴۲/۱۳
[۳۱]	Au	۱۷۸ ppm	۷	۳۹/۱
[۳۳]	Ag@TiO <sub>2</sub>	۲۰۰ ppm	۱	۵۳/۶
[۳۳]	Ag@TiO <sub>2</sub>	۲۰۰ ppm	۳	۴۵/۹
[۳۳]	Ag@TiO <sub>2</sub>	۲۰۰ ppm	۱۰	۶۶/۹
[۳۰]	GO@Au	۱۵/۶% wt	۱۶/۷۷	۵۹/۲
پژوهش حاضر	GNP	۰/۰۰۴% wt	۳/۵	۳۸/۱۳
پژوهش حاضر	GNP@Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	۰/۰۰۴% wt	۳/۵	۳۲/۴۰

در شدت‌های پایین چندان محسوس نیست، لذا همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش شدت تابش نور خورشید، بازده تبخیر کاهش پیدا می‌کند. از طرفی افزایش شدت سبب می‌شود، بخشی از انرژی دریافت شده توسط نانوسیال صرف افزایش دمای بالک سیال شود که خود موجب افزایش بازده محسوس خواهد بود. هم چنین افزایش شدت، باعث اتلاف بیشتر انرژی دریافت شده به دلیل افزایش انتقال حرارت به محیط اطراف نیز می‌شود؛ بنابراین به طور کلی نتیجه می‌شود که با افزایش شدت از ۱/۵ تا ۳/۵ بازده تبخیری با کاهش و بازده محسوس با افزایش همراه است و بازده کل نیز افزایش ناچیزی خواهد داشت؛ اما با مقایسه دو شکل به راحتی می‌توان دریافت که نانوسیال نانوصفحه‌ای گرافن نقش موثری در نرخ تبخیر و

افزودن نانوذره تاثیر زیادی بر ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال نخواهد داشت.

بازده کل نیز به صورت حاصل جمع بازده تبخیری و بازده محسوس محاسبه می‌شود.

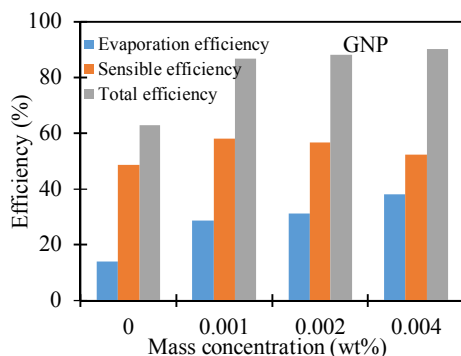
$$\eta_{total} = \eta_{evaporation} + \eta_{sensible} \quad (5)$$

شکل ۸ بازده محسوس و کل را برای نانوسیال نانوصفحه گرافن و ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحه گرافن در غلظت‌های مختلف و در شدت تابش  $3/5 \text{ kW/m}^2$  نشان می‌دهد. افزایش غلظت نانوسیال سبب می‌شود که انرژی نور-گرمایی منتقل شده به نانوسیال، صرف محلی سازی گرما و افزایش دمای سطح نانوسیال شود، اما دمای بالک سیال تغییرات محسوسی نخواهد داشت، در نتیجه بازده محسوس با افزایش غلظت نانوسیال (به جز نانوسیال در غلظت صفر یعنی آب خالص) کاهش می‌یابد؛ اما این افزایش جذب و به دنبال آن افزایش دمای سطح سیال، سبب افزایش نرخ تبخیر و بازده تبخیر می‌شود. با مقایسه دو شکل مشاهده می‌شود که نانوسیال ترکیبی در افزایش بازده محسوس نقش موثرتری دارد و تاثیر غلظت در آن کم‌رنگ‌تر است؛ درحالی‌که در بازده تبخیر عملکرد نانوسیال حاوی نانوذرات گرافن موفق‌تر است؛ زیرا که بازده تبخیری، محسوس و کل برای نانوسیال حاوی نانوذرات گرافن موفق‌تر است؛ زیرا که بازده تبخیری، محسوس و کل برای نانوسیال حاوی نانوصفحات گرافن در بهترین رکورد خود  $38/13$ ،  $52/13$  و  $90/26$  درصد است که به ترتیب  $1/18$ ،  $1$  و  $1/07$  برابر بازده نانوسیال ترکیبی است.

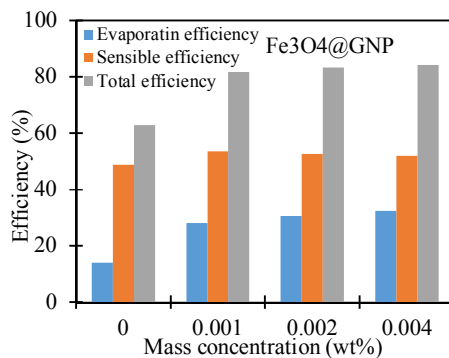
### ۳-۵- بررسی اثر شدت نور

برای بررسی اثر شدت نور خورشید بر عملکرد تبخیر، آزمایش تبخیری در سه شدت  $1/5 \text{ kW/m}^2$ ،  $2/5 \text{ kW/m}^2$  و  $3/5 \text{ kW/m}^2$  آزمایش شد. شکل ۹ بازده تبخیری، محسوس، و کل را برای بهترین رکورد یعنی نانوسیال حاوی نانوذرات گرافن و حالت ترکیبی با نانوذرات مگنتیت نشان می‌دهد.

همانطور که از قبل مشاهده شد، با افزایش شدت تابش، دمای سطح نانوسیال به دلیل محلی‌سازی گرما، افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین نرخ تبخیر با افزایش همراه است، اما میزان تبخیر با توجه به افزایش شدت به خصوص



(الف)



(ب)

شکل ۸- راندمان محسوس و کل نانوسیال؛ الف) نانو صفحه گرافن و ب) ترکیب آن با ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) در غلظت‌های مختلف و شدت ۳/۵

درصد به دست آمد که کارایی بالا این نانوسیال حتی در غلظت‌های کم نشان می‌دهد. در گام بعدی به منظور بررسی عملکرد نانوسیال ترکیبی حاوی نانو صفحات گرافن و نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت)، بهترین عملکرد تبخیری نانوسیال حاوی تنها نانوذره اکسید آهن با غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ درصد وزنی ارزیابی شد و پس از محاسبه غلظت بهینه نانوسیال توسط روش پاسخ سطح، عملکرد تبخیری برای مخلوط ۰/۰۱ درصد وزنی اکسید آهن (مگنتیت) و ۰/۰۰۴ درصد وزنی نانو صفحه گرافن

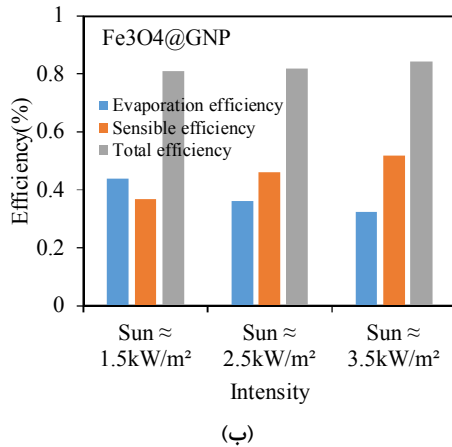
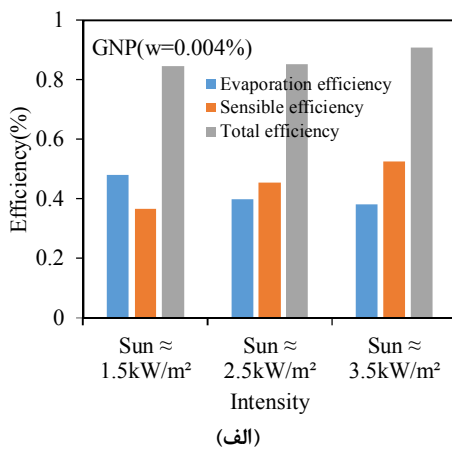
بازده کل دارد؛ در حالی که حضور نانوذره مگنتیت در کنار آن بازده محسوس را فقط نسبت به نانو سیال دیگر افزایش می‌دهد. هر چند در نرخ تبخیر، افزایشی ایجاد نخواهد کرد.

### ۳-۶- بازیافت نانوسیال

در این پژوهش به منظور اعمال میدان مغناطیسی جهت بازیافت نانو ذرات از یک آهنربا استفاده شد که میدانی معادل ۴۰ میلی تسلا را تامین می‌کرد. شدت میدان توسط گوسمتر مدل MG-3003SD ساخت شرکت لوترون<sup>۱</sup>، اندازه‌گیری شد. مدت اعمال میدان ۴ دقیقه بود که در فاصله معینی از نانوسیال‌های مگنتیت (با درصد وزنی ۰/۰۲ درصد وزنی) و نانوسیال ترکیبی (نانوصفحه‌ی گرافن ۰/۰۰۴ درصد وزنی و مگنتیت ۰/۰۱ درصد وزنی) قرار داده شده بود و هر یک دقیقه به منظور بررسی غلظت نانوسیال، از نانوسیال نمونه‌برداری می‌شد. شکل ۱۰ این نمونه‌ها را برای (آ) نانوسیال مگنتیت و (ب) نانوسیال مخلوط نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذرات مگنتیت به‌طور کامل قابلیت جداسازی و استفاده مجدد را دارند و در مورد نانوسیال ترکیبی، با توجه به روش ساخت، علی-رغم قرار گرفتن در معرض امواج آلتراسونیک، اتصال نانوذرات مگنتیت و نانوصفحات گرافن به خوبی برقرار نشده و این ذرات به‌طور کامل بازیافت نشدند. اگرچه با توجه به عملکرد نانوسیال مخلوط و بازده‌های تبخیری و محسوس، این ایده که درصدی از نانوذرات به‌کار رفته در تبخیر خورشیدی قابل بازیافت باشند نیز، قابل قبول است.

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی راندمان تبخیر خورشیدی نانوسیال حاوی نانوصفحه گرافن و نیز حالت ترکیبی آن با نانوذرات مغناطیسی مگنتیت پرداخته شد. برای این منظور در گام نخست، غلظت‌های بسیار کم و در حدود ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ درصد وزنی از نانوصفحات گرافن در شدت تابش نور خورشید  $2/5 \text{ kW/m}^2$  آزمایش شد. برای بیشترین درصد وزنی راندمان تبخیری ۳۸/۱۲ درصد و راندمان کل ۹۰/۲۶



شکل ۹- راندمان تبخیری، محسوس و کل نانوسیال حاوی (الف) نانوصفحات گرافن و (ب) ترکیب اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفحات گرافن با غلظت ۰/۰۰۴ درصد وزنی تحت شدت‌های مختلف

<sup>1</sup> Lutron



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- نمایش غلظت نمونه؛ الف) نانوسیال مگنتیت در غلظت ۰/۰۲ درصد وزنی و ب) نانوسیال ترکیبی نانوصفحه گرافن ۰/۰۰۴ درصد وزنی و مگنتیت ۰/۰۱ درصد وزنی پس از اعمال میدان ۴۰ میلی تسلا در زمان‌های مختلف

تغییر فاز	fg	زیرنویس	۳۲/۴
سیال پایه	liq		درصد و راندمان کل ۸۴/۲ درصد به دست می‌آید که به ترتیب ۲/۲۹ و ۱/۳۴ برابر آب محاسبه شد. این در حالی بود که بهترین رکورد در حالت نانوسیال حاوی ۰/۰۰۴ درصد وزنی نانوصفحه گرافن گزارش شد که مقادیر راندمان تبخیری، محسوس و کل آن به ترتیب ۳۸/۱۳، ۵۲/۱۵ و ۹۰/۲۶ درصد بدست آمد. به طور کلی نتایج نشان داد که نانوسیال نانوصفحه‌ای گرافن نقش موثری در نرخ تبخیر دارد؛ در حالی که حضور نانوذره مگنتیت در کنار آن بازده محسوس را افزایش می‌دهد. هر چند در نرخ تبخیر، افزایشی ایجاد نخواهد کرد. از طرفی استفاده از نانوسیال اکسید آهن (مگنتیت) به علت خاصیت مغناطیسی در بازیافت کردن نانوسیال و استفاده مجدد از نانوسیال‌ها کاربرد خواهد داشت.
نانوذره	np		

#### ۶- مراجع

- [1] Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia bejestan E (2018) Performance evaluation of multi-wall carbon nanotube in solar fresh water production. Articles in Press, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Accepted Manuscript.
- [2] Fu Y, Wang G, Mei T, Li T (2017) Accessible graphene aerogel for efficient harvesting solar energy. ACS Sustain Chem Eng 5(6): 4665-4671.
- [3] Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia-Bajestan E (2019) Improving steam generation and distilled water production by volumetric solar heating. Appl Therm Eng 158: 113808
- [4] Vafaie M, Barzgarnezhad M, Arbabi A, Shakib E, Ghafurian MM (2018) Experimental study and economic evaluation of various techniques for increasing fresh water production in a cascade solar water desalination unit. Articles in Press, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Accepted Manuscript.
- [5] Shakib E, Amidpour M, Ghafurian MM (2017) Investigation of thermoeconomic optimizing single and two objectives of hybrid METVC +RO desalination system of different configurations integrated to gas turbine power plant. Articles in Press, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Accepted.
- [6] Zhang HL, Baeyens J, Degreè J, Cacères J (2013) Concentrated solar power plants: Review and design methodology. Renew Sustain Energ Rev 22(1): 466-481.
- [7] Marugán-Cruz C, Sánchez-Delgado S, Rodríguez-Sánchez MR, Venegas M (2014) District cooling using central tower power plant. Energy Procedia 49(1): 1800-1809.
- [8] Akbari Z, Ghafurian MM, Niazmand H, Bakhsh Zahmatkesh B (2018) Performance evaluation of multi-wall carbon nanotube in hot water production. In 26<sup>th</sup> Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers, Semnan, Iran, 24-26 April.
- [9] Higgins MW, AR SR, Devarapalli RR, Shelke MV (2018) Carbon fabric based solar steam

#### ۵- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

A	میزان جذب
c	غلظت ( $\text{g.L}^{-1}$ )
C	گرمای ویژه نانوسیال ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ )
h	آنتالپی ( $\text{kJ.g}^{-1}$ )
I	چگالی نور تابشی ( $\text{kW.m}^{-2}$ )
l	طول عبوری نور (mm)
m	نرخ تبخیر ( $\text{kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )
M	جرم (kg)
T	دما ( $\text{°C}$ )
Tr	ضریب عبور نور

##### علائم یونانی

$\Delta$	تغییر
$\varepsilon$	ضریب جذب ( $\text{L.g.mm}$ )
$\eta$	راندمان

- MRI contrast agents. *Adv Fund Mater* 21(24): 4769-4775.
- [21] Li Calzi S, Kent DL, Chang KH, Padgett KR, et al (2009) Labeling of stem cells with monocrySTALLINE iron oxide for tracking and localization by magnetic resonance imaging. *Microvasc Res* 78(1): 132-139.
- [22] Cengelli F, Grzyb JA, Montoro A, Hofmann H, et al (2009) Surface-functionalized ultrasmall superparamagnetic nanoparticles as magnetic delivery vectors for camptothecin. *Chem Med Chem* 4(6): 988-997
- [23] Balivada S, Rachakatla RS, Wang H, Samarakoon TN, et al (2010) A/C magnetic hyperthermia of melanoma mediated by iron (0)/iron oxide core/shell magnetic nanoparticles: a mouse study. *BMC Cancer* 10(1): 119-127.
- [24] Shen YF, Tang J, Nie ZH, Wang YD, et al (2009) Preparation and application of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for wastewater purification. *Sep Purif Tech* 68(3): 312-319.
- [25] Zeng Y, Wang K, Yao J, Wang H (2014) Hollow carbon beads for significant water evaporation enhancement. *Chem Eng Sci* 116(1): 704-709.
- [26] Shi L, He Y, Huang Y, Jiang B (2017) Recyclable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CNT nanoparticles for high-efficiency solar vapor generation. *Energy Convers Manag* 149(1): 401-408.
- [27] Shi L, Huang J, He Y (2017) Recyclable purification-evaporation systems based on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Energy Procedia* 142(1): 356-361.
- [28] Swinehart DF (1962) The Beer-Lambert law. *J Chem Educ* 39(7): 335-335 .
- [29] Wang X, He Y, Cheng G, Shi L, et al (2016) Direct vapor generation through localized solar heating via carbon-nanotube nanofluid. *Energy Convers Manag* 130(1): 176-183.
- [30] Fu Y, Mei T, Wang G, Guo A, et al (2017) Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids. *App Therm Eng* 114(1): 961-968.
- [31] Wang Y, He Y, Liu X, Shi L, et al (2017) Investigation of photothermal heating enabled by plasmonic nanofluids for direct solar steam generation. *Solar Energy* 157(1): 35-46.
- generation for waste water treatment. *Solar Energy* 159(1): 800-810.
- [10] Neumann O, Feronti C, Neumann AD, Dong A, et al (2013) Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. *PNAS* 110(29): 11677-11681.
- [11] Amjad M, Raza G, Xin Y, Pervaiz S, et al (2017) Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids. *Appl Energy* 206(1): 393-400.
- [12] Jin H, Lin G, Bai L, Amjad M, et al (2016) Photothermal conversion efficiency of nanofluids: An experimental and numerical study. *Solar Energy* 139(1): 278-289.
- [13] Morciano M, Fasano M, Salomov U, Ventola L, et al (2017) Efficient steam generation by inexpensive narrow gap evaporation device for solar applications. *Sci Rep* 7(1): Article number: 11970
- [14] Zeiny A, Jin H, Lin G, Song P, et al (2018) Solar evaporation via nanofluids: A comparative study. *Renewable Energy* 122(1): 443-454.
- [15] Ghafurian MM, Niazman H, Tavakoli-Dastjerd F, Mahian O (2019) A study on the potential of carbon-based nanomaterials for enhancement of evaporation and water production. *Chem Eng Sci* 207: 79-90.
- [16] Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia-Bajestan E, Elhami Nik H (2018) Localized solar heating via graphene oxide nanofluid for direct steam generation. *J Therm Anal Calorim* 1-7.
- [17] Ni G, Miljkovic N, Ghasemi H, Huang X, et al (2015) Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation. *Nano Energy* 17(1): 290-301.
- [18] Chen BA, Lai BB, Cheng J, Xia GH, et al (2009) Daunorubicin-loaded magnetic nanoparticles of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> overcome multidrug resistance and induce apoptosis of K562-n/VCR cells in vivo. *Int J Nanomedicine* 4(1): 201-208.
- [19] Ghazanfari MR, Kashefi M, Shams SF, Jaafari MR (2016) Perspective of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles role in biomedical applications. *Biochem Res Int* Article ID: 7840161, 32 pages.
- [20] Ninjbadgar T, Brougham DF (2011) Epoxy ring opening phase transfer as a general route to water dispersible superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their application as positive

- in a broadband Ag@TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticle-based receiver. Appl Therm Eng 121(1): 617-627.
- [34] Hentschke R(2016) On the specific heat capacity enhancement in nanofluids. Nanoscale Res Lett 11(1): 88
- [32] Liu X, Wang X, Huang J, Cheng G, et al (2018) Volumetric solar steam generation enhanced by reduced graphene oxide nanofluid. Appl Energy 220(1): 302-312.
- [33] Li H, He Y, Liu Z, Huang Y, et al (2017) Synchronous steam generation and heat collection