

شبیه سازی عددی تأثیر حضور نانوذرات مغناطیسی داخل هوای مرطوب بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تحت میدان آهن ربای دائم

چکیده: در مقاله حاضر برای اولین بار تأثیر تزریق نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن در داخل هوای مرطوب محفظه آب شیرین کن و نیز اعمال نیروی کلویین ناشی از میدان مغناطیسی آهن ربای دائم بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل سازی این پدیده، کد عددی به زبان C++ شی گرا در نرم افزار OpenFOAM توسعه داده شده است. معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادله انتقال کسر جرمی بخار هوای مرطوب حاوی نانوذرات مغناطیسی (اصطلاحاً نانواُتروسل مغناطیسی) به روش حجم محدود گسسته و حل شده اند. تأثیر متغیرهای گوناگون شامل پارامترهای مغناطش، زاویه و محل جایگذاری آهن ربا بر الگوی جریان و همینطور دبی آب تولیدی بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که بکار بردن نانواُتروسل در غیاب میدان مغناطیسی موجب تضعیف عملکرد آب شیرین کن می شود. به گونه ای که میزان تولید آب شیرین با $\phi=8\%$ در حدود 23% کمتر از آب شیرین کن با سیال عامل پایه می باشد. از طرف دیگر، استفاده از آهن ربای دائم، به عنوان یک منبع کم هزینه مغناطیسی، می تواند دبی آب شیرین تولیدی را تا 260% افزایش دهد که این امر توجیه اقتصادی این روش در توسعه آب شیرین کن های خورشیدی را به همراه خواهد داشت.

واژه های راهنما: نانوذرات مغناطیسی، هوای مرطوب، نانواُتروسل مغناطیسی، آب شیرین کن خورشیدی، آهن ربای دائم، نیروی کلویین

امیر بصیری
دانشجوی دکتری

صابر یکانی مطلق*
دانشیار

فرخ مبادرثانی
دانشیار

سجاد

محمدی بازرگانی

دانشجوی دکتری،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

Amir Basiri
PhD Student

Saber Yekani
Motlagh*
Associate Professor

Farrokh
Mobadersani
Associate Professor

Sajjad Mohammadi
Bazargani
PhD Student,
Department of
Mechanical Engineering,
Urmia University of
Technology, Urmia

Numerical simulation of the effect of the presence of magnetic nanoparticles in humid air on the performance of solar still under permanent magnet field

Abstract: In the present study, for the first time, the impact of presence of magnetic iron oxide nanoparticles into the humid air within the desalination chamber, as well as the application of Kelvin force induced by the magnetic field of a permanent magnet, on the performance of a solar desalination system has been numerically investigated. To model this phenomenon, an object-oriented C++ numerical code was developed in the OpenFOAM software. The governing equations, including continuity, momentum, energy, and the mass fraction transport equation for humid air containing magnetic nanoparticles (referred to as magnetic nanoaerosol), were discretized and solved using the finite volume method. The effects of various parameters, including magnetization, the angle, and the placement of the magnet, on the flow pattern and freshwater production rate were examined. The results of this study show that the use of nanoaerosols in the absence of a magnetic field weakens the desalination system's performance, such that with $\phi=8\%$, the amount of freshwater produced is approximately 23% lower than that of a desalination system with a base working fluid. On the other hand, the use of a permanent magnet, as a low-cost magnetic source, can increase the freshwater production rate by up to 260%, which justifies the economic feasibility of this method in the development of solar desalination systems.

Keywords: Magnetic nanoparticles, Humid air, Magnetic nanoaerosol, Solar still, Permanent magnet, Kelvin force

همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۱ شبیه‌سازی عددی انجام دادند. در این مطالعه از میدان مغناطیسی ناشی از لنز مغناطیسی برای اعمال نیروی کلون بر مولکول‌های اکسیژن موجود در هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن استفاده شده است. در مقاله مهدی‌زاده اثر قدرت لنز مغناطیسی و مختصات محل قرارگیری لنز مغناطیسی بر روی میزان آب تولیدی و همین‌طور الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. افزودن میدان مغناطیسی به واسطه اعمال نیروی کلون توسط لنز مغناطیسی بر مولکول‌های اکسیژن و تغییر الگوی جریان درون آب شیرین‌کن موجب افزایش عدد ناسلت و میزان آب شیرین‌کن تولیدی تا ۳۷/۷ درصد شده است. همانطور که از نتایج مقاله مهدی‌زاده مشخص می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی بر آب شیرین‌کن خورشیدی مرسوم، مقدار تولید آب شیرین تا حدودی افزایش داشته است. ولی برای تولید این میزان آب شیرین‌کن نیازمند تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار بزرگ است.

خاصیت مغناطیس‌شوندگی هوای مرطوب کم است و برای افزایش بازده آب‌شیرین‌کن نیازمند تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی می‌باشیم که در عمل تولید این میدان‌ها نیازمند صرف هزینه بسیار زیادی است و استفاده از این روش هزینه‌های تولید آب شیرین را افزایش می‌دهد. در مقاله حاضر برای اولین بار از طریق مدل‌سازی عددی تأثیر اضافه کردن ذرات مغناطیسی اکسید آهن با مغناطیس‌شوندگی صدها برابری به هوای مرطوب (نانوآیرسل مغناطیسی) داخل آب شیرین‌کن سنتی و اعمال میدان مغناطیسی آهن‌ربای دائم که منبعی کم هزینه می‌باشد، بررسی شده است و بر این اساس دبی آب شیرین تولیدی افزایش داده شده است.

۲- تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

در شکل (۱) طرحواره‌ای از آب شیرین‌کن استفاده شده و موقعیت آهن‌ربای دائمی ارائه گردیده است. فیلم نازکی از آب دریا وارد آب شیرین‌کن می‌شود و پس از شروع فرایند تبخیر آب، بخار آب با هوای داخل ترکیب می‌شود. بر اساس فیزیک آب شیرین‌کن‌های مرسوم سنتی، تابش گرمای خورشیدی وقتی به سطح شیشه‌ای بالای آب شیرین‌کن می‌رسد، بخشی از این تابش بازتاب، بخشی جذب و با توجه به ضریب گذردهی بالای شیشه، قسمت اعظم انرژی تابشی از سطح عبور و وارد محفظه آب شیرین‌کن می‌شود. پس از عبور انرژی تابشی از محیط هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن با توجه به خصوصیات کف آب شیرین‌کن که به رنگ تیره می‌باشد

موجود در داخل محفظه بهبود بخشند. نتایج آن‌ها به بهبود ۱۱۲/۳۴ درصدی عملکرد آب شیرین‌کن‌ها رسید.

آقاخانی و همکاران [۱۶] یک مدل عددی جدید برای آب شیرین‌کن خورشیدی ترکیب شده با کلکتور و بازتابنده توسعه دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از کلکتورهای از نوع لوله گرم می‌تواند باعث افزایش ۷۶/۹ درصدی در نرخ تولید آب شیرین‌کن شود.

کرمی و همکاران [۱۷] به بررسی عددی و تجربی حضور جاذب متخلخل شناور بر عملکرد آب شیرین‌کن پرداختند. نتایج ایشان منجر به افزایش ۲۶/۶ درصدی در تولید آب شیرین‌کن شد.

جیاراج و همکاران [۱۸] به صورت آزمایشگاهی و عددی به مطالعه تأثیر شکل کانال پیش گرمایش در آب شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. طبق نتایج آن‌ها استفاده از کانال دوزنقه‌ای شکل سبب افزایش ۳۷/۶۴ درصدی در تولید آب شیرین‌کن خواهد شد.

عبدالله و همکاران [۱۹] با تغییر شکل سطح شیشه و محفظه آب شیرین‌کن به شکل مخروطی توانستند به ۲۲۱/۵ درصد افزایش در تولید آب شیرین دست یابند.

کومار و همکاران [۲۰] با استفاده از منعکس‌کننده سه‌موی و به‌کارگیری نانوسیال توانستند تولید آب شیرین را تا ۲۹/۸۴ درصد افزایش دهند.

در مورد تأثیر نانوسیالات هیبریدی بر کارکرد آب شیرین‌کن‌ها اخیراً کادهیم حسین و همکاران [۲۱] مرور کاملی انجام داده‌اند که جهت اطلاعات بیشتر در این مورد به این مقاله ارجاع داده می‌شود.

در مورد کاربرد نانوآئروسول‌ها جهت بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌ها ال کوز و همکاران [۲۲] تأثیر استفاده از نانو-آیرسل‌ها بر روی مشخصات حرارتی در ورودی لوله‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. سیال مورد بررسی در این مطالعه نانوذرات اکسید آلومینیوم-هوا می‌باشد.

خادانگا و همکاران [۲۳] بررسی بر روی ویژگی‌های انتقال گرما همرفتی نانو آیرسل‌ها SiO_2 -هوا در داخل یک لوله را انجام دادند. در مقاله مذکور توزیع دما بر حسب مقیاس زمانی در نانو ذرات SiO_2 ، برهمکنش ذره به ذره از طریق رسانش و نانو ذرات به هوا توسط تابش مورد مطالعه قرار گرفته است.

اکسیژن موجود در هوای محیط دارای خاصیت مغناطیسی می‌باشد و تحقیقاتی در زمینه استفاده از این خاصیت صورت گرفته است. در رابطه با تأثیر نیروی مغناطیسی بر روی اکسیژن موجود در هوای داخل آب شیرین‌کن، مهدی‌زاده و

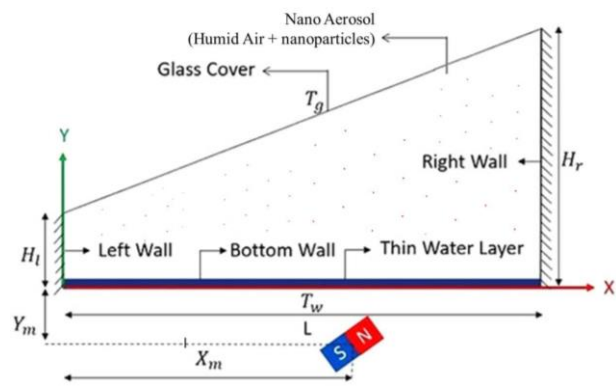
آب و شیشه مکانیزم ادوکشن^۱ جرم به دلیل سرعت ماکروسکوپیک صفر لایه تقریباً وجود ندارد.

در آب شیرین کن مرسوم، به دلیل اختلاف دمای سطح شیشه و سطح مایع آب نیروی بویانسی ایجاد شده و این نیرو سبب حرکت ماکروسکوپیک سیال هوای مرطوب و ایجاد گردابه و در نتیجه سیرکولاسیون هوای مرطوب داخل محفظه می‌شود. هر چه سرعت سیرکولاسیون جریان روی سطح آب بیشتر باشد، نرخ تخلیه بخار آب از لایه بالای لایه چسبیده به سطح آب بیشتر خواهد بود. در نتیجه اختلاف یا گرادیان غلظت بخار آب بین لایه چسبیده به سطح آب و لایه بالاتر از آن افزایش پیدا کرده و بخار آب بیشتری به لایه بالاتر نفوذ و توسط جریان به داخل محفظه و نزدیک سطح شیشه جهت تقطیر و تولید آب شیرین ادوکت^۲ می‌شد. لذا میزان نفوذ بخار آب از لایه چسبیده به سطح آب و لایه بالاتر اولاً، به گرادیان غلظت بخار آب بین دولایه (ناشی از سیرکولاسیون هوای مرطوب بالای سطح آب) و ثانیاً، به میزان نفوذپذیری بخار آب در داخل هوای خشک بستگی خواهد داشت؛ اما اختلاف غلظت بخار آب مابین لایه چسبیده به آب و لایه بالاتر از آن ویژگی ماکروسکوپیک است که همانطور که اشاره شد به سرعت سیرکولاسیون و الگوی جریان هوای مرطوب بالای سطح آب بستگی دارد.

در ادامه به تبیین بیشتر نوآوری کار حاضر پرداخته می‌شود. مشکل اساسی آب شیرین‌کن‌های مرسوم، نرخ پایین تبخیر و به تبع آن نرخ پایین تقطیر و تولید آب شیرین در آن‌ها می‌باشد. با توجه به توضیحات داده شده، یکی از روش‌های افزایش گرادیان غلظت بخار آب (کسر جرمی بخار آب) روی سطح آب و به تبع آن افزایش تبخیر و در نتیجه افزایش تقطیر و تولید آب شیرین، تغییر الگوی جریان هوای مرطوب بالای سطح آب در داخل محفظه آب شیرین کن می‌باشد.

هوای مرطوب ترکیبی از هوای خشک (اکسیژن و نیتروژن) و بخار آب می‌باشد. اکسیژن موجود در این ترکیب دارای خاصیت مغناطیس‌شوندگی بالاتری نسبت به سایر اجزا می‌باشد. با این وجود مغناطیس‌شوندگی اکسیژن بسیار پایین‌تر از موادی مانند اکسید آهن می‌باشد. در تحقیق حاضر به هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن، نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن اضافه شد. با توجه به اینکه مغناطیس‌پذیری اکسید آهن صدها برابر مولکول‌های اکسیژن بود، میدان مورد نیاز برای تأثیرگذاری بر الگوی جریان کاهش قابل توجهی خواهد داشت.

بیشترین جذب در سطح پایینی آب شیرین‌کن اتفاق می‌افتد. لذا این سطح دمای بیشتری نسبت به سطح شیشه خواهد داشت. با توجه به سرعت عبور پایین لایه آب و ضخامت کم آن مقاومت هدایتی و جابجایی در لایه آب قابل صرف‌نظر بوده و دمای کف آب شیرین‌کن با دمای سطح آب تقریباً یکسان خواهد بود.



شکل ۱ طرحواره آب شیرین‌کن در مقاله حاضر

با توجه به اینکه محفظه آب شیرین‌کن تحت فشار نمی‌باشد و با هوای محیط اطراف در ارتباط است، فشاری در حدود فشار اتمسفر خواهد داشت. بدیهی است که در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطوح شیشه و آب، فشار جزء بخار آب کمتر از فشار کل هوای مرطوب که مجموع فشارهای جزء هوای خشک و بخار آب است، خواهد بود. در لایه چسبیده به سطح آب فشار جزء بخار آب با فشار اشباع در دمای سطح آب برابر است که تغییر فاز مایع به بخار یا تبخیر صورت می‌گیرد. در صورت پایابودن جریان داخل محفظه انتظار می‌رود به همان مقدار، بخار هوا در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطح شیشه که در آنجا نیز فشار جزء بخار برابر فشار اشباع در دمای سطح شیشه است، تغییر فاز بخار به مایع یا تقطیر رخ دهد. سطح شیشه شیب کمی جهت جمع‌آوری قطرات آب شیرین تقطیر شده به واسطه نیروی گرانش دارا می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد سرعت جریان هوای مرطوب در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطوح شیشه و آب با سرعت این سطوح یکسان و تقریباً صفر می‌باشد. در این لایه‌ها همانند انتقال حرارت در لایه سیال چسبیده به دیواره ساکن که مکانیزم انتقال حرارت میکروسکوپیک یا هدایت می‌باشد، مکانیزم انتقال جرم (مولکول‌های آب) از سطح آب مایع به داخل لایه هوای مرطوب چسبیده به آن، از نوع نفوذ میکروسکوپیک و در جهت عمود بر سطح می‌باشد. در واقع در لایه هوای مرطوب چسبیده به سطح

¹ Advection

² Advect

بلتزن، T دما و m_i جرم مولی جزء i می‌باشند. مومنومم زاویه‌ای کل i الکترون اسپین با S_i تعریف شده است. مغناطیس‌شوندگی مولکول‌های موجود در مسئله یعنی اکسیژن، نیتروژن، آب و اکسید آهن (در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۹۳ کلوین) در جدول (۱)، گزارش شده‌اند.

جدول ۱ مغناطیس‌شوندگی مولکول‌های مسئله حاضر [۲۷، ۲۸]

مولکول	$\chi (m^3/kg)$
O_2	$+1.8028 \times 10^{-6}$
N_2	-0.0063×10^{-6}
H_2O	-0.0068×10^{-6}
Fe_3O_4	$+0.5216 \times 10^{-3} \sim +0.5435 \times 10^{-3}$

همان‌طور که از جدول (۱) قابل تشخیص است، در این بین فقط مولکول اکسیژن و نانوذره Fe_3O_4 خاصیت پارامغناطیسی دارند و سایر مواد دیامغناطیس بوده و مقدار قدر مطلق مغناطیس‌شوندگی‌شان نیز بسیار کم و قابل صرف‌نظر است. مقدار مغناطیس‌شوندگی نانو ذره نانوذره Fe_3O_4 نیز به مراتب بیشتر از مولکول اکسیژن می‌باشد. میدان‌های مغناطیسی ناشی از آهن‌ربا دائم زاویه‌دار استفاده شده در تحقیق حاضر به عنوان منبع مغناطیسی با روابط زیر قابل توصیف هستند.

برای یک آهن‌ربای دائم که با محور افقی زاویه θ دارد، مولفه‌های میدان مغناطیسی H_x و H_y از معادلات (۳) تا (۸) بدست می‌آیند [۲۹]:

$$H_x = H_{xx} \times \cos \theta - H_{yy} \times \sin \theta \quad (۳)$$

$$H_y = H_{xx} \times \sin \theta + H_{yy} \times \cos \theta \quad (۴)$$

که در آن H_{xx} و H_{yy} ، به شکل زیر تعریف می‌شوند:

h و w به ترتیب ارتفاع و عرض آهن‌ربا دائم می‌باشند. همچنین a و b به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a = (x - x_m) \times \cos(-\theta) - (y - y_m) \times \sin(-\theta) \quad (۷)$$

$$b = (x - x_m) \times \sin(-\theta) + (y - y_m) \times \cos(-\theta) \quad (۸)$$

در نهایت نیروی مغناطیسی وارده بر نانو آئروسول‌ها از رابطه (۹) به دست می‌آید. ترم مذکور نیروی کلون نامیده می‌شود و

به‌گونه‌ای که میدان مغناطیسی با قدرت قابل دسترس تر و ارزان تر می‌تواند برای افزایش دبی آب شیرین تولیدی استفاده شود. با اعمال میدان مغناطیسی، نیروی فروهیدرودینامیکی کلون ناشی از آهن‌ربای دائم به مولکول‌های اکسیژن و نانوذرات اکسید آهن و به تبع آن به هوای مرطوب وارد می‌شود. نیروی کلون توزیع مکانی غیر یکنواخت دارد و کرل آن غیر صفر یا اصطلاحاً نیرو ناپایستار است. لذا طبق معادله انتقال ورتیستی این نیروی ناپایستار سبب ایجاد چرخش بیشتر و تولید گردابه‌های جدید در جریان می‌شود. در نتیجه الگوی جریان تغییر و سیرکولاسیون هوای مرطوب بالای سطح آب افزایش پیدا کرده و سبب افزایش دبی آب تولیدی در آب شیرین‌کن می‌شود.

۱-۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این بخش ابتدا به توضیح مدل ریاضی نیروی مغناطیسی کلون پرداخته می‌شود و سپس بر اساس فرض‌های مسئله معادلات حاکم بیان می‌شود. در ادامه مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای محاسبه خواص هوای خشک، بخار آب و نانوائروسول مغناطیسی پرداخته می‌شود و در نهایت شرایط مرزی مسئله بیان می‌شود.

۲-۲- نیروی مغناطیسی کلون

یکی از پارامترهای اصلی در این مقاله میزان تأثیر پذیری عناصر موجود در درون آب شیرین‌کن از میدان مغناطیسی می‌باشد. برای سنجش و مقایسه این خاصیت سیال از عدد χ (قابلیت مغناطیس‌پذیری) استفاده می‌شود. مغناطیس‌شوندگی نانو سیال را می‌توان به صورت معادله (۱) و بر حسب شدت میدان مغناطیسی (H_M) نوشت [۲۵]:

$$M_M = \chi H_M \quad (۱)$$

در تحقیق حاضر برای محاسبه χ از رابطه (۲) استفاده شده است [۲۶]:

$$\chi_i = \frac{N_A g_L^2 \mu_B^2 s_i(s_i + 1) \mu_0}{3 K T_{mi}} \quad (۲)$$

که در آن $g_L = 2$ ، $N_A = 0.022 \times 10^{23} [\frac{1}{mol}]$ و $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} [\frac{J}{T}]$ به ترتیب عدد آوگادرو، جی فاکتور لند و عدد بوهر مگنتون می‌باشند. $K = 1.38 \times 10^{-23} [\frac{J}{K}]$ ثابت

دمای سطوح شیشه و آب از مقیاس چند ساعت می‌باشد. لذا در بازه چند ساعته که دمای سطوح به دلیل تغییرات کم در زاویه و شدت تابش خورشید ثابت است می‌توان مسئله را به صورت پایا حل کرد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت سرعت پاسخ جریان به تغییر دمای سطوح سریعتر از سرعت تغییر در دمای سطوح می‌باشد. نکته دیگری که باید اشاره شود این است که در بازه‌های زمانی که دمای سطوح طبق نتایج تجربی ثابت هست تست‌های اولیه پژوهشگران این مقاله نشانگر این هست که شدینگ^۱ گردابه‌های داخل محفظه ناشی از ناپایداری جریان در طول زمان قابل صرف‌نظر می‌باشد. لذا استفاده از فرض پایا بودن جریان در بازه‌های زمانی مشخص از روز می‌تواند صحیح باشد.

– دماهای شیشه و سطح آب در مقادیر ثابت T_w و T_g هستند و دیواره‌های جانبی عایق فرض شده‌اند.
در مقاله حاضر با توجه به اینکه تمرکز کار بر پیشنهاد روشی نوین برای افزایش کارایی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با استفاده از نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی می‌باشد، به منظور کاهش پیچیدگی و ساده‌سازی مدل ریاضی در سایر بخش‌های مسئله از جمله مدل‌سازی ریاضی اثرات تشعشع، شرایط مرزی سطح شیشه و سطح آب بر اساس نتایج تجربی شواطفه و فرید دمای ثابت و یکنواخت فرض شده است. در واقع تأثیر تابش عبوری از شیشه و سایر ویژگی‌های تشعشعی مسئله در دمای سطوح دیده شده است. همانطور که در توضیحات فرض قبل اشاره شد بر اساس نتایج تجربی دمای سطح آب و سطح شیشه در بازه‌های زمانی چند ساعته در روز تقریباً در تمام مکان‌های روی سطوح عدد ثابت و مشخصی بود. در تحقیق حاضر دقیقاً دماهایی که از نتایج آزمایشگاهی شواطفه و فرید در بازه‌های زمانی مختلف بدست آمده است، استفاده شده است. خاطر نشان می‌سازد که ابعاد هندسی و سایر مشخصه‌ها در مطالعه عددی حاضر دقیقاً مطابق با ستاپ آزمایشگاهی شواطفه و فرید بوده است تا امکان مقایسه نتایج فراهم آید. این فرض کمک زیادی در کاهش هزینه محاسباتی و پیچیدگی مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر داشت، چرا که اصولاً برای بدست آوردن دمای سطوح باید معادلات انتقال شدت تشعشع در محفظه آب شیرین‌کن حل می‌شد. مسمماً در صورت تغییر در شرایط هندسی و محیطی اعداد مورد استفاده برای دمای سطوح دیگر معتبر نیست. لذا جهت اجتناب از این مورد در تمام مدل‌سازی‌های این مقاله شرایط مشابه شرایط آزمایشگاهی شواطفه و فرید در نظر گرفته شده است. با فرضیات فوق، معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی،

رابطه مستقیم با شدت میدان مغناطیسی و همچنین گرادینان میدان مغناطیسی دارد.

$$\vec{F}_{Kelvin} = \mu_0 M_M \vec{\nabla} H \quad (9)$$

در مطالعه حاضر آهن‌ربا دارای ارتفاع و عرض به ترتیب $h=0/1$ و $W=0/1$ بر حسب متر و همچنین مختصات مرکز آهن‌ربا $X_m=0/49$ و $Y_m=0/072$ بر حسب متر می‌باشد.

۲-۳- معادلات اساسی حاکم

برای حل معادلات حاکم بر مسئله توضیح داده شده فرض‌های ذیل در نظر گرفته شده‌اند:

- نانو ذرات کاملاً کروی می‌باشند.
- ضخامت فیلم مایع بسیار کم می‌باشد.
- نانو ذرات بصورت همگن در هوای داخل آب شیرین‌کن پراکنده شده‌اند.
- جریان غیر قابل تراکم می‌باشد.
- تلفات ویسکوزیته در نظر گرفته نشده است.
- از اثرات تابش ذره-هوا، ذره-ذره و ذره-دیوار صرف‌نظر شده است.
- جریان دو بعدی و آرام فرض شده است.
- حل عددی جریان آب شیرین‌کن در طول روز شبه پایا فرض می‌شود. یعنی در بازه‌های زمانی مشخص مطابق با نتایج تجربی شواطفه و فرید که در شکل (۳) نتایج مطالعه حاضر با نتایج این مقاله مقایسه شده است، دمای سطح شیشه و سطح آب در طول بازه زمانی مشخص به‌طور مثال از ساعت ۱۲:۳۰ ظهر تا ۱۴:۵۰ تقریباً ثابت بوده است. لذا در طول آن بازه می‌توان مسئله را با فرض شرط مرزی مستقل از زمان و ثابت در طول آن بازه زمانی فرض و حل کرد. علت فیزیکی این امر می‌تواند مرتبط با عدد بی‌بعد استروهل مسئله باشد. عدد استروهل در این مسئله مقیاس زمانی تغییر دمای سطوح یا شرایط مرزی به دلیل تغییر در شرایط شدت، زاویه و ... تابش نور خورشید به مقیاس زمانی تغییر الگوی دما و جریان در داخل آب شیرین‌کن می‌باشد. در جابجایی آزاد سرعت مشخصه داخل محفظه از نسبت نفوذ حرارتی به طول مشخصه مسئله بدست می‌آید. مقیاس زمانی نیز از نسبت طول مشخصه به سرعت مشخصه بدست می‌آید. طول مشخصه نیز میانگین ارتفاع سطوح جانبی آب شیرین‌کن است. لذا مقیاس زمانی تغییر توزیع دما الگوی جریان ناشی از تغییر شرایط مرزی در مقیاس دقیقه خواهد بود. در صورتیکه مقیاس زمانی تغییر در

¹ Shedding

$$A = \frac{[0.8876(1 + \sqrt{k_v/k_a})]^2}{3.6} \quad (18)$$

در معادلات فوق M و $x_v = \frac{C_v}{C_v + M^*(1 - C_v)}$ به ترتیب بیانگر وزن مولکولی و کسر مولی و اندیس‌های a ، v و h به ترتیب نشان‌دهنده هوای خشک، بخار آب و هوای مرطوب می‌باشند. M^* نسبت جرم مولی هوای خشک به بخار آب با مقدار 0.629 می‌باشد. مقادیر مربوط به لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی برای هوای خشک و بخار آب از طریق بسط چند جمله‌ای ذیل که توسط لاید و کپهائیان [۳۱] برای دماهای 273 تا 600 کلوین توسعه یافته‌اند، بدست می‌آیند:

$$\mu = A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 \quad (19)$$

$$k = A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4 \quad (20)$$

مقادیر مربوط به ضرایب فرمول‌های فوق در جداول (۲) و (۳) آورده شده است.

جدول ۲ ضرایب بسط چند جمله‌ای لزجت دینامیکی [۳۱]

A_4	A_3	A_2	A_1	μ	
-	2.71368×10^{-14}	-5.95238×10^{-11}	7.72488×10^{-8}	18.5×10^{-6}	هوای خشک
-2.69021×10^{-16}	3.90133×10^{-13}	-1.73637×10^{-10}	5.75100×10^{-8}	9.9×10^{-6}	بخار آب

جدول ۳ ضرایب بسط چند جمله‌ای ضریب هدایت حرارتی [۳۱]

A_4	A_3	A_2	A_1	k	
8.882×10^{-14}	-9.310×10^{-11}	-9.960×10^{-9}	0.965×10^{-4}	26.1×10^{-3}	هوای خشک
2.050×10^{-13}	-2.576×10^{-10}	1.511×10^{-7}	0.349×10^{-4}	18.6×10^{-3}	بخار آب

پس از اعمال مقادیر بدست آمده از معادلات فوق در فرمول‌های محاسبه مشخصات نانو سیال‌ها [۳۲] خواص فیزیکی نانو آئروسول‌ها بدست می‌آیند که به شرح ذیل می‌باشند:

$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\rho_h + \varphi\rho_p \quad (21)$$

$$(\rho C_p)_{na} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_h + \varphi(\rho C_p)_p \quad (22)$$

مومنوم، انرژی و غلظت می‌باشند که به شکل زیر می‌باشند [۳۰]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (10)$$

$$\rho_{na}(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \nabla \cdot (\mu_{na} \nabla \vec{V}) + (\rho\beta)_{na}(T - T_g)\vec{g} + \vec{F}_{Kelvin} \quad (11)$$

$$(\rho C_p)_{na} \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = \nabla \cdot (k_{na} \nabla T) \quad (12)$$

$$\vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_v = \nabla \cdot (D_{v-a} \nabla C_v) \quad (13)$$

در روابط فوق V نشان‌دهنده سرعت، P نمایاگر فشار، T میدان دما، β_t ضرایب انبساطی حجمی گرمایی و $D_{v-a} = \frac{1.8 \times 10^{-10} T^{2.072}}{10^5}$ نشان‌دهنده ضریب نفوذ بخار آب در داخل هوای خشک هستند.

۲-۴- محاسبه خواص نانو آئروسول‌ها

پژوهشگران در مطالعات مربوط به نانو سیالات فرمول‌هایی جهت محاسبه ویژگی‌های ترمو فیزیکی این پدیده توسعه داده‌اند. نانو آئروسول در مسئله حاضر به عنوان نانو سیال گاز پایه ترکیبی از هوای خشک و بخار آب به‌عنوان سیال پایه و نانو ذرات مغناطیسی می‌باشد. جهت محاسبه خواص نانو آئروسول‌ها ابتدا خواص هوای مرطوب (هوای خشک به همراه بخار آب حاصل از تبخیر آب) بدست آمده و سپس از طریق روابط ذیل چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی هوای مرطوب محاسبه می‌شوند [۳۰].

$$\rho_h = \frac{10^5}{RT} \left(\frac{M_a M_v}{C_v M_a + (1 - C_v) M_v} \right) \quad (14)$$

$$\mu_h = \frac{(\sqrt{18}\mu_v x_v + \sqrt{29}\mu_a x_a)}{(\sqrt{18}x_v + \sqrt{29}x_a)} \quad (15)$$

$$C_p = (1 - C_v)C_{p-a} + C_v C_{p-v} \quad (16)$$

$$k_h = \frac{x_v k_v}{x_v + x_a A} + \frac{x_a k_a}{x_a + x_a A} \quad (17)$$

ضریب A از طریق فرمول ذیل محاسبه می‌گردد:

شرط مرزی غلظت یا کسر جرمی بخار آب برای دیواره‌های بالا و پایین، مقدار ثابت بوده و دیواره‌های چپ و راست، دارای شرط مرزی گرادیان غلظت صفر هستند. شرط مرزی فشار نیز برای دیواره‌های بالا، پایین، چپ و راست گرادیان صفر می‌باشد. در نهایت تمامی شرایط مرزی در جدول (۴)، ارائه می‌گردد. کسر جرمی بخار روی کاور شیشه‌ای و سطح آب نیز همان میزان غلظت برای رطوبت نسبی ۱۰۰٪ در دما و فشار جزئی جزء بخار بر روی مرزهای مسئله است. به بیان دیگر با تعریف رطوبت نسبی به شکل رابطه (۲۷):

$$\Phi = \frac{n_v}{n_g} = \frac{P_v}{P_g @ T \text{ of mixture}} \quad (27)$$

که در آن n_v و n_g به ترتیب تعداد مول جزء بخار و هوای مرطوب می‌باشند. با توجه به این که بر روی سطح فیلم آب و دیواره بالا $\Phi = 100\%$ می‌باشد، پس:

$$P_v = P_g @ T \text{ of mixture} \quad (28)$$

که در آن فشار جزء بخار برای دیواره‌های بالا و پایین با معلوم بودن دماهای سطوح قابل محاسبه می‌باشند. ω نسبت رطوبت می‌باشد که از رابطه (۲۹) بدست می‌آید.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \left(\frac{M_v}{M_a}\right) \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{10^5 - P_v} \quad (29)$$

m_a و m_v در این معادله به ترتیب جرم بخار آب و جرم هوای خشک می‌باشند. همچنین M_v ، M_a و P_a به ترتیب نشان‌دهنده جرم مولی بخار آب، جرم مولی هوای خشک و فشار جزئی هوای خشک می‌باشند. در آخر کسر جرمی بخار آب در هوای مرطوب به شکل زیر بر حسب نسبت رطوبت محاسبه می‌شود:

$$C_v = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{\omega m_a}{\omega m_a + m_a} = \frac{\omega}{\omega + 1} \quad (30)$$

مقادیر شرط مرزی دما و کسر جرمی بخار برای حالت (۱) و (۲) یعنی ساعات ۱۲:۳۰ ظهر و ۱۴:۵۰ در جدول (۵) ارائه شده است. یادآور می‌شود مقادیر دمای سطح شیشه و آب از نتایج آزمایشگاهی و کسر جرمی بخار آب بر اساس روابط ارائه شده در این بخش بدست آمده‌اند. در این مقاله از روابط (۳۱) و (۳۲) برای محاسبه عدد ناسلت و میزان دبی آب شیرین تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) استفاده شده است.

$$(\rho\beta)_{na} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_h + \varphi(\rho\beta)_p \quad (23)$$

لزجت دینامیکی ترکیب نهایی نانو آئروسول از معادله برینکم [۳۳] بدست می‌آید.

$$\mu_{na} = \frac{\mu_h}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (24)$$

و در نهایت ضریب هدایت حرارتی از معادله همیلتن - کراسر [۳۴] بدست می‌آید.

$$\frac{k_{na}}{\times k_h} = \frac{k_p + (n - 1) \times k_h - (n - 1) \times (k_h - k_p) \times \varphi}{k_p + (n - 1) \times k_h + (k_h - k_p) \times \varphi} \quad (25)$$

$$n = \frac{3}{\Psi} \quad (26)$$

در رابطه (۲۵)، Ψ بیانگر ضریب شکل نانوذره و نشان‌دهنده میزان کرووی بودن ذره می‌باشد. در مسئله حاضر با توجه به فرض کرووی بودن نانوذره مقدار Ψ برابر با ۳ می‌باشد.

۲-۵- شرایط مرزی

شرط مرزی دمایی دیواره‌های پایین و بالا دما ثابت می‌باشد و دیواره‌های چپ و راست نیز عایق حرارتی فرض شده‌اند. در پژوهش حاضر دمای کاور شیشه‌ای T_g و دمای دیواره پایین T_w از مقالات تجربی [۳۵] برداشته شده‌اند. شرط مرزی سرعت برای تمام دیواره‌ها عدم لغزش می‌باشد.

جدول ۴ شرایط مرزی اعمالی در مرزهای آب شیرین کن

	Bottom Wall	Glass cover	Left Wall	Right wall
Temperature	$T=T_w$	$T=T_g$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Velocity	$u=v=0$	$u=v=0$	$u=v=0$	$u=v=0$
Concentration	$C_v = C_{v-w}$	$C_v = C_{v-g}$	$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$
Pressure	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$

جدول ۵ مقادیر شرط مرزی دما و کسر جرمی بخار برای مورد (۱) و (۲)

	Case1	Case2
Time	12:30 P.M.	14:50 P.M.
T_g	45.26	55.63
T_w	53.1	64.2
C_{v_g}	0.0208	0.1064
C_{v_w}	0.0935	0.1635

- حل معادله پیش‌بینی سرعت بر اساس مقادیر اولیه متغیرها
 - حل معادله پواسون فشار (ترکیب معادلات (۱۰) و (۱۱))
 یعنی پیوستگی و مومنتم) جهت پیش‌بینی فشار بر اساس
 سرعت پیش‌بینی شده از مرحله قبل (در الگوریتم سیمپل این
 مرحله یک بار صورت می‌گیرد).

- تصحیح سرعت و فشار بر اساس سرعت و فشار پیش‌بینی
 شده از دو مرحله قبل با استفاده از معادله مومنتم
 - حل معادله انرژی (معادله (۱۲)) بر اساس سرعت تصحیح
 شده از مرحله قبل

- حل معادله انتقال کسر جرمی بخار آب در داخل هوای
 خشک (معادله (۱۳)) بر اساس سرعت تصحیح شده

- محاسبه خواص هوای مرطوب که بر اساس روابط وابسته به
 خواص هوای خشک و بخار آب حاصل می‌شود و به تبع آن
 بدست آوردن ویژگی‌های نانواثروسل با استفاده از ویژگی‌های
 هوای مرطوب و نانوذرات اکسید آهن بر اساس روابط ۱۴ تا ۲۶.

- تکرار مراحل تا همگرایی حل

در این مطالعه، در حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی
 انتقال حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی گسسته‌سازی
 ترم‌های پخش به روش اختلاف مرکزی مرتبه دوم و ترم‌های
 جابجایی با روش بالادست، با دقت مرتبه دوم انجام گرفته است.
 دستگاه معادلات جبری حاصل از گسسته‌سازی معادلات به
 روش گوس-سایدل حل شده‌اند. معیار همگرایی برای تمامی
 معادلات کاهش مقادیر باقیمانده به کمتر از 10^{-6} در نظر گرفته
 شده است. همچنین معیار دیگر در نظر گرفته شده عدم تغییر
 پارامترهای سرعت و دما با افزایش تکرار می‌باشد.

۳-۲- مطالعه شبکه محاسباتی

ابعاد هندسی آب شیرین‌کن مورد بررسی جهت شبیه‌سازی
 عددی دقیقاً مطابق با کار تجربی شوافقه و فرید تنظیم شده
 است به‌طوری‌که ارتفاع دیواره سمت راست، چپ و طول دیواره
 پایین به ترتیب ۰/۴۸، ۰/۱ و ۰/۹۸ متر می‌باشند. نمونه مش
 بندی مورد استفاده در مقاله حاضر در شکل (۲-الف) نمایش
 داده شده است. برای اطمینان از مستقل بودن نتایج عددی از
 تعداد المان‌های شبکه، چهار شبکه‌بندی ساختار یافته متفاوت
 مورد ارزیابی قرار گرفتند.

جدول (۶)، تأثیر تعداد المان‌های شبکه بر میزان آب
 تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و عدد ناسلت میانگین را در
 بحرانی‌ترین حالت، مورد شماره (۲) در کسر حجمی ۰/۰۵

$$Nu = \frac{-1}{(T_w - T_g)} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} dx \quad (31)$$

$$\dot{m} = \frac{-3600 \times D_{v,a} \times \rho}{L} \int_0^L \frac{\partial C_v}{\partial y} \Big|_{y=0} dx \quad (32)$$

این روابط بر اساس عدد ناسلت سطح آب و دبی آب تبخیر
 شده از سطح آب می‌باشد که در شرایط جریان پایا با عدد
 ناسلت سطح شیشه و دبی آب تقطیر شده روی سطح شیشه
 برابر خواهند بود.

۳-۱- حل عددی، استقلال از شبکه و صحت سنجی نتایج

در این بخش از مقاله به بررسی الگوریتم حل عددی استفاده
 شده برای شبیه‌سازی‌ها، مطالعه شبکه محاسباتی مورد استفاده
 و اعتبارسنجی کد عددی پرداخته می‌شود.

۳-۱- الگوریتم حل عددی

در کار حاضر یک حلگر بر پایه نرم‌افزار متن باز OpenFOAM
 که به زبان C^{++} شی‌گرا می‌باشد، توسعه داده شد. در واقع یکی
 از حلگرهای پایه کد متن باز اوپن فوم تغییر داده شد و کدهای
 محاسبه خواص هوای مرطوب (بخار آب + هوای خشک)، خواص
 نانواثروسل (هوای مرطوب + نانوذرات اکسید آهن)، حل معادله
 انتقال کسر جرمی بخار آب در در داخل هوای خشک و محاسبه
 نیروی کلونین برای اکسیژن هوا و نانوذرات اضافه شد. الگوریتم
 کوپلینگ فشار-سرعت^۱ کد به روش حجم محدود، بر پایه
 الگوریتم سیمپل^۲ می‌باشد. گام‌های الگوریتم عدد کد به صورت
 زیر می‌تواند خلاصه شود:

¹ Pressure velocity coupling

² Simple

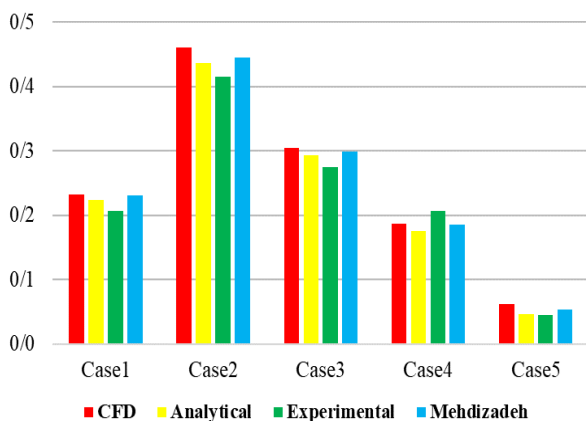
بدین منظور جهت صرفه‌جویی در زمان محاسبات برای استخراج نتایج از شبکه 100×100 استفاده گردیده است. بررسی شبکه نهایی نشانگر این است که نسبت منظری مش-های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های تحقیق حاضر زیر ۱۰، میزان عدم تعامد میانگین مش‌ها زیر ۱۲ و ماکزیمم چولگی مش‌ها زیر ۱ می‌باشند، که همگی در محدوده مش معتبر هستند.

۳-۳- صحت‌سنجی نتایج

برای اطمینان از صحت نتایج عددی، مقایسه‌ای با نتایج تجربی شواقفه و فرید [۳۵]، کار تحلیلی دانکل [۲۶] و مقاله عددی مهدی‌زاده و همکاران [۲۴] انجام گرفت. برای انجام مقایسه، نتایج حاصل در حالت بدون اعمال اثرات نیروی مغناطیسی و نانو آئروسول‌ها، با نتایج مقاله‌های فوق‌الذکر انجام پذیرفت.

در شکل (۳) میزان آب تولیدی در موردهای مختلف بدست آمده و نتایج عددی حاضر با مقادیر تجربی و تحلیلی در ساعات مختلف روز مقایسه شده‌اند. در این شکل:

مورد (۱): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۲:۳۰ ظهر
مورد (۲): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۴:۵۰
مورد (۳): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۶:۴۰
مورد (۴): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۷:۵۰
مورد (۵): داده‌های دمایی سطوح مربوط به حدود ساعت ۱۹:۴۰
به علاوه، در جدول (۷) مقدار تولید آب و عدد ناسلت در حالات بدون اعمال میدان و عدم حضور نانو آئروسول در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر، مورد (۱) و ساعت ۱۴:۵۰ مورد (۲) با مطالعه دانکل و مقاله مهدی‌زاده مقایسه گردیده است.



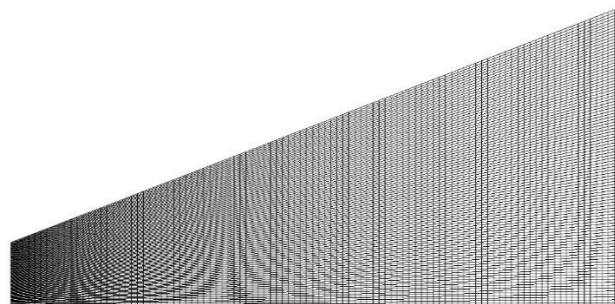
شکل ۳ مقایسه میزان تولید آب شیرین

\dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2 \cdot hr}$) با مطالعه تحلیلی دانکل [۲۶]، تحقیق تجربی شواقفه و فرید [۳۵] و کار مهدی‌زاده و همکاران [۲۴]

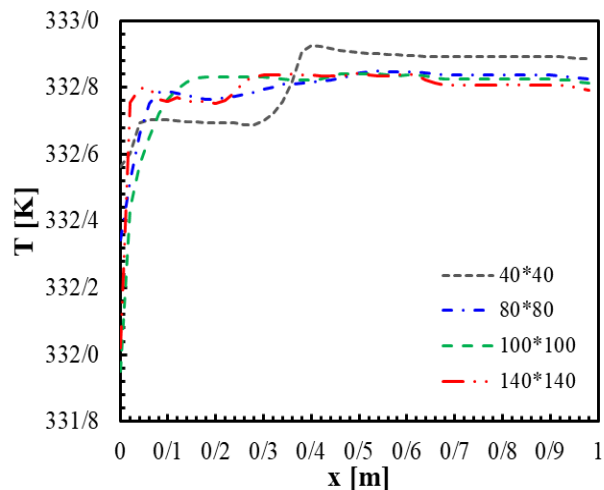
درصد و با نانوذره Fe_3O_4 و برای آب شیرین‌کن تحت میدان آهن‌ریا دائم را نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتایج استقلال از شبکه برای آب شیرین‌کن تحت میدان آهن‌ریای دائم

Mesh Number	Permanent Magnet	
	$\dot{m}(\frac{Kg}{m^2 \cdot hr})$	Nu
40×40	0.6203	59.13
80×80	0.7718	95.00
100×100	0.8340	108.21
140×140	0.8353	109.60



(الف)



(ب)

شکل ۴ الف- نمونه مش‌بندی مساله، ب- تغییرات دما (کلوین) برحسب شبکه‌بندی‌های مختلف

در شکل (۲-ب) تغییرات دمای هوای مرطوب روی خط میانی به ازای چهار شبکه متفاوت رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد المان شبکه از 100×100 به 140×140 تغییر محسوسی در نتایج بوجود نمی‌آید و روند تغییرات دما ثابت می‌ماند و مستقل از شبکه رفتار می‌کنند.

شکل (۳) و نتایج جدول (۷) نشان می‌دهند که نتایج بدست آمده برای میزان آب تولیدی به روش عددی به ترتیب برای موردهای (۱)، (۲)، (۳)، (۴) و (۵) دارای ۰/۴۹٪، ۵/۵۷٪، ۴/۹۴٪ و ۹/۳۸٪ خطا در مقایسه با نتایج تحلیلی دانکل و ۲۵/۷٪، ۱۴٪، ۱۲/۴۶٪، ۱۰/۶۲٪ و ۹٪ خطا در مقایسه با نتایج تجربی شفق و مهدی‌فرد در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی هستند. اختلاف بین نتایج عددی، تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی نتیجه ترکیبی از عواملی همچون فرض‌های اولیه (در بخش معادلات اساسی حاکم، به آن اشاره شده است) جهت استخراج مدل‌ها و معادلات حاکم در روش‌های عددی و تحلیلی، خطاهای ناشی از روش‌های عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها و همچنین کیفیت داده‌های تجربی و خطاهای آزمایشگاهی است.

جهت بررسی بخش نیروی مغناطیسی کد توسعه داده شده است. در شکل (۴) مقایسه نتایج کانتور رنگی دما و توزیع سرعت عمودی بر روی دو خط افقی که از کویتی عبور می‌کند با کار عددی سانگ و تاگوا [۳۶] (۲۰۱۸) نشان داده شده‌اند. سانگ و تاگوا به بررسی عددی انتقال گرمای همرفتی در کویتی حاوی مولکول‌های اکسیژن و تحت اثر میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهن‌ربای دائم پرداخته‌اند. نتایج کانتور دما، کار حاضر و نتایج عددی سانگ و تاگوا از نظر کیفی همخوانی نسبتاً خوبی دارند. همچنین روند نمودارهای پروفیل سرعت کار حاضر و نتایج سانگ و تاگوا کاملاً مشابه می‌باشند. از نظر کمی درصد جذر میانگین مربعات خطا برای پروفیل‌های سرعت در حدود ۱۷٪ می‌باشد. از آنجا که روش‌های گسسته-سازی ترم‌های معادلات در کار حاضر و کار عددی مرجع متفاوت می‌باشد؛ این اختلاف می‌تواند ناشی از این تفاوت باشد.

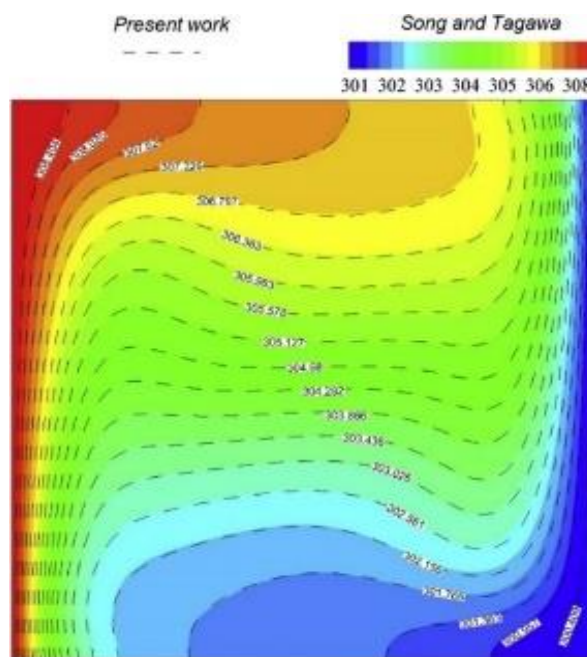
۴- نتایج و بحث

هدف کلی این مقاله بررسی و شناخت اثرات نانو آئروسول‌های مغناطیسی در بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی مرسوم خواهد بود. در تحقیق حاضر، اثرات میدان مغناطیسی که توسط آهن‌ربای دائم ایجاد شده است، در درصد حجمی‌های مختلف نانوآئروسول Fe_3O_4 -هوا بر افزایش میزان تولید آب شیرین، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده در بخش بعدی ارائه می‌گردد.

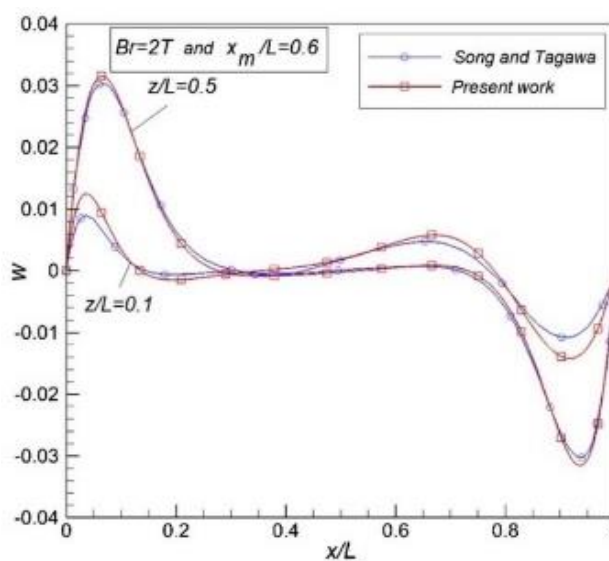
۴-۱- عملکرد سیستم در حضور نانوذرات و غیاب میدان مغناطیسی

جدول ۷ مقایسه میزان دبی تولیدی آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2 \cdot hr}$) به همراه تغییرات ناسلت میانگین با مطالعه تحلیلی دانکل [۲۶] و شبیه‌سازی عددی مهدی‌زاده [۲۴]

Time	CFD		Analytical		Mehdizadeh	
	\dot{m}	Nu	\dot{m}	Nu	\dot{m}	Nu
Case1 (12:30 P.M.)	0.23	27.2	0.22	26.1	0.23	25.9
Case2 (14:50 P.M.)	0.46	29.30	0.43	28.98	0.44	28.3



(الف)



(ب)

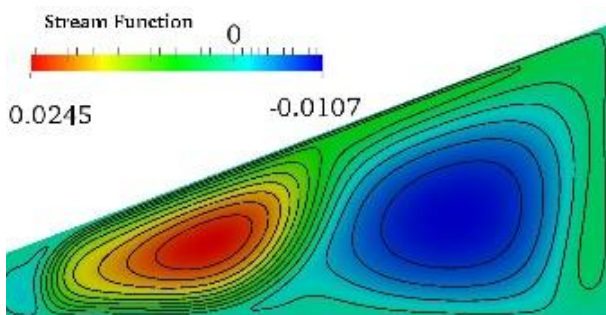
شکل ۴ مقایسه نتایج در کویتی با کار سانگ و تاگوا [۳۶] الف- میدان دما (بر حسب کلونین) ب- توزیع مولفه عمودی بردار سرعت (برحسب متر بر ثانیه)

تولیدی در حالت‌های حضور و عدم حضور نانو آئروسول و بدون اعمال میدان مغناطیسی هستند. طبق این نتایج استفاده از آئروسول‌ها در غیاب میدان مغناطیسی موجب کاهش عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی می‌گردد.

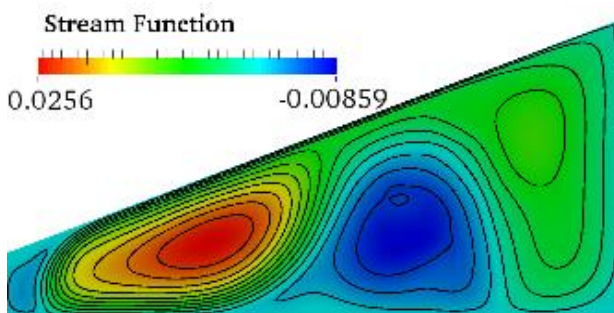
علت فیزیکی این موضوع به این مسئله می‌تواند ارتباط داشته باشد که افزودن نانوذرات در مقیاس میکروسکوپی سبب افزایش ویسکوزیته معادل نانوآئروسول می‌شود و این امر به صورت محلی عدد رایلی را کاهش داده و سبب می‌شود برتری نیروی بویانسی به نیروی ویسکوزیته کاهش یابد. بدین طریق سرعت جریان و سیرکولاسیون کاهش می‌یابد و این امر سبب کاهش عملکرد حرارتی و انتقال جرم در داخل آب شیرین‌کن و به تبع آن سبب کاهش آب شیرین تولیدی می‌شود.

۴-۲- عملکرد سیستم با اعمال میدان مغناطیسی

به منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر تولید آب شیرین، تأثیر قدرت، زاویه و مکان قرارگیری آهن‌ربا در کسر حجمی‌های مختلف نانوذره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای بررسی اثر قدرت آهن‌ربا، از آهن‌ربا دائم با مغناطش یا قدرت‌های در حدود 10^7 ، 10^6 ، 4×10^5 ، 2×10^5 ، 10^5 و 10^4 و 10^3 M_{st} امپر بر متر که در فاصله $(x=0/7$ و $y=0/2)$ متری قرار داده شده، استفاده شد.

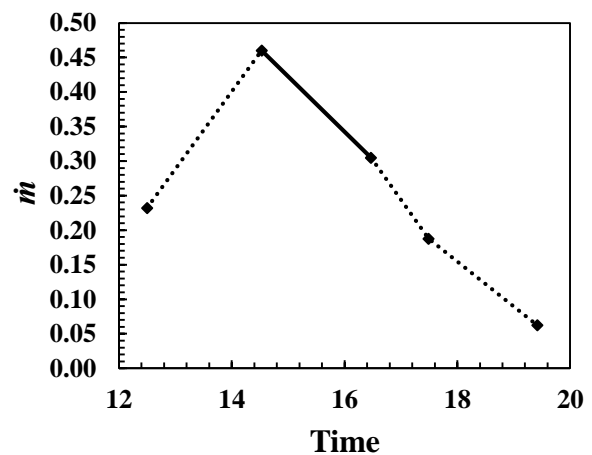


الف: $\phi=0$, $M_{st}=100,000$

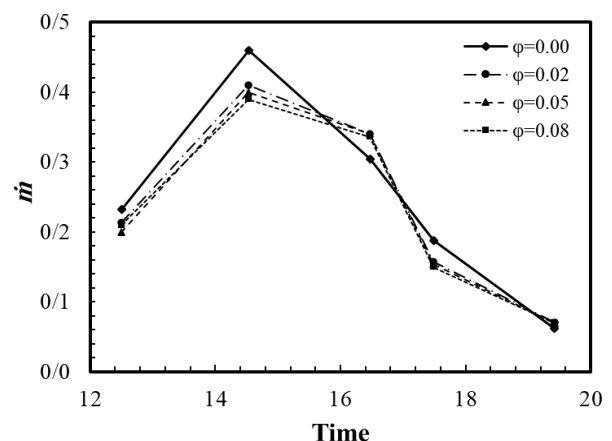


ب: $\phi=0$, $M_{st}=1,000,000$

شکل (۵) نشان‌دهنده تغییرات میزان تولید آب و عدد ناسلت در طی روز در حالت بدون نانوذرات و میدان مغناطیسی می‌باشد. همانطور که از این شکل مشخص می‌شود میزان تولید آب در طی روز با نزدیک شدن به میانه روز افزایش می‌یابد و در مورد (۲) مقدار آب شیرین تولید شده به حداکثر $0/45 \frac{Kg}{m^2.hr}$ می‌رسد. در ادامه با کاهش دما و با نزدیک شدن به انتهای روز میزان تولید آب شیرین شدیداً کاهش می‌یابد. کمترین میزان تولید آب نیز در انتهای روز و حوالی ساعت ۷ عصر در حدود $0/05 \frac{Kg}{m^2.hr}$ است.



شکل ۵ تغییرات میزان تولید آب شیرین \dot{m} (بر حسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) در طی ساعات مختلف روز (بر حسب ساعت)

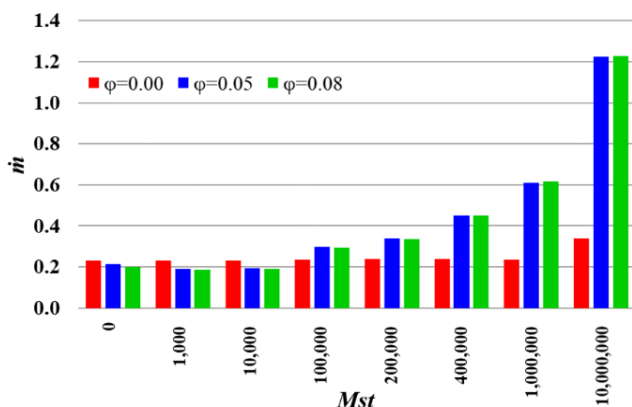


شکل ۶ تغییرات میزان تولید آب شیرین \dot{m} (بر حسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) در حضور نانو آئروسول و در غیاب میدان مغناطیسی در ساعات مختلف روز (بر حسب ساعت)

برای بررسی میزان اثرگذاری نانو آئروسول بر نرخ تولید آب شیرین‌کن، کد برای کسر حجمی‌های متفاوت (۰، ۵ و ۸ درصد) از نانو آئروسول Fe_3O_4 در عدم حضور میدان مغناطیسی اجرا گردید. شکل (۶) نشان‌دهنده مقایسه نرخ آب شیرین

گردیده است. طبق معادله تابع جریان - ورتیسیتی مقدار تابع جریان رابطه مستقیم با قدرت گردابه‌های جریان دارد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، با افزودن نانو آئروسول Fe_3O_4 - هوا به سیستم قدرت و سرعت گردابه‌ها به طور محسوسی افزایش می‌یابد که به تبع آن دبی آب شیرین تولیدی \dot{m} مسئله بهبود می‌یابد. در زمان استفاده از آهن‌ربائی با مغناطش 10^6 آمپر بر متر به دلیل نیروی کلون یک گردابه بسیار قوی ایجاد می‌شود که باعث افزایش سرعت جریان هوای روی فیلم نازک آب می‌شود که این عامل میزان آب تولیدی را افزایش می‌دهد.

میزان تولید آب شیرین و مقدار عدد ناسلت میانگین در مورد (۱) یعنی ساعت ۱۲:۳۰ ظهر در شکل (۸) و جدول (۸) نشان داده شده‌اند.



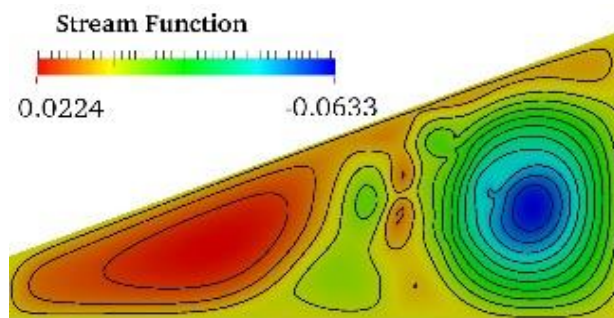
شکل ۸ میزان تولید آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) برای مورد (۱) به ازاء درصدهای حجمی مختلف

جدول ۸ مقایسه دبی جرمی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) آب شیرین و عدد ناسلت مورد (۱)

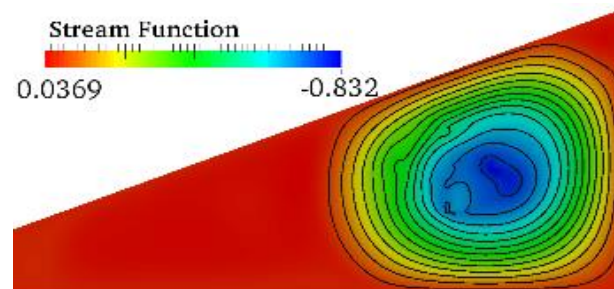
Mst	\dot{m}							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.34
$\phi=0.05$	0.21	0.19	0.19	0.30	0.34	0.45	0.61	1.22
$\phi=0.08$	0.20	0.19	0.19	0.29	0.34	0.45	0.62	1.23
Mst	Nu							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	27	26	26	26	25	26	26	37
$\phi=0.05$	62	65	67	83	85	101	113	146
$\phi=0.08$	74	76	77	90	91	107	120	146

جدول ۹ مقایسه دبی جرمی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) آب شیرین و عدد ناسلت مورد (۲)

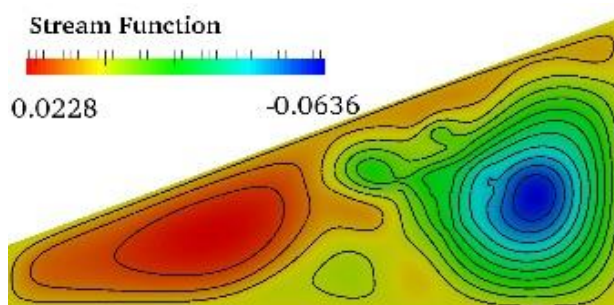
Mst	\dot{m}							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	0.41	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.43	0.63
$\phi=0.05$	0.40	0.36	0.36	0.55	0.63	0.83	1.10	2.31
$\phi=0.08$	0.39	0.36	0.36	0.55	0.63	0.84	1.11	2.32
Mst	Nu							
	0	1,000	10,000	100,000	200,000	400,000	1,000,000	10,000,000
$\phi=0.00$	55	28	28	28	28	28	27	40
$\phi=0.05$	71	68	68	89	93	108	118	159
$\phi=0.08$	81	68	68	97	100	115	125	159



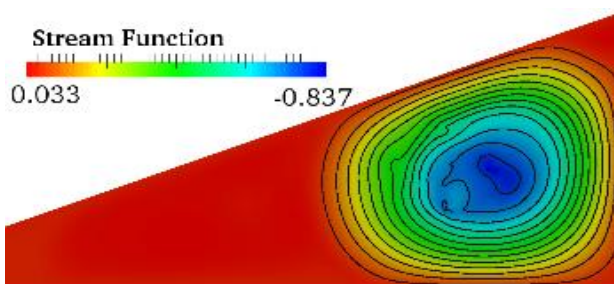
ج: $\phi=0.05, M_{st}=100,000$



د: $\phi=0.05, M_{st}=1,000,000$



ه: $\phi=0.08, M_{st}=100,000$



و: $\phi=0.08, M_{st}=1,000,000$

شکل ۷ کانتورهای تابع جریان (برحسب $1/s$) یا الگوهای جریان مورد (۲) الف - $\phi=0, M_{st}=10^5$ ب - $\phi=0, M_{st}=10^6$ ج - $\phi=0.05, M_{st}=10^5$ د - $\phi=0.05, M_{st}=10^6$ ه - $\phi=0.08, M_{st}=10^5$ و - $\phi=0.08, M_{st}=10^6$

الگوهای جریان به واسطه کانتورهای مربوط به تابع جریان در حالت استفاده از آهن‌ربا با قدرت‌های $100,000$ و $1,000,000$ آمپر بر متر برای مورد (۲) در شکل (۷) ارائه

طبق نتایج بدست آمده بیشترین مقدار \dot{m} در زاویه ۹۰ درجه و در مورد (۲) تولید می‌شود. لازم به ذکر است، نرخ تولید آب شیرین ابتدا با افزایش زاویه آهن‌ربا دائم به طور نامحسوسی کاهش می‌یابد و سپس بیشترین مقدار آب شیرین تولید شده در زمان استفاده از آهن‌ربا دائم با زاویه ۹۰ درجه تولید می‌شود. روند تغییرات عدد ناسلت نیز شبیه تغییرات \dot{m} است.

۴-۴- تاثیر تغییر مکان قرارگیری آهن‌ربا بر میزان تولید آب شیرین و مقدار عدد ناسلت میانگین

اثر مکان آهن‌ربا، دیگر پارامتر بررسی شده در تحقیق حاضر می‌باشد. در ادامه با جابجایی محل قرارگیری آهن‌ربای دائم تغییرات مشخصه‌های جریان داخل محفظه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی از یک آهن‌ربا با قدرت $M_{st}=10^6$ در مختصات طولی و عرضی مختلف که در جدول (۱۱) آورده شده‌اند، در کسر حجمی ۰/۰۵ از نانوذره Fe_3O_4 استفاده شده است.

بیشترین مقدار تولید آب شیرین در مختصات (۰/۷ و ۰/۳) بدست می‌آید. کانتورهای تابع جریان در مکان‌های مختلف قرارگیری آهن‌ربا در شکل (۹) ترسیم شده‌اند. نتایج نشانگر تشکیل دو گردابه بزرگ و نسبتاً قوی در حالتی است که محل قرارگیری آهن‌ربا در محلی با مختصات (۰/۷ و ۰/۳) می‌باشد.

جدول ۱۱ مقایسه دبی جرمی آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و عدد ناسلت به ازاء موقعیت‌های مختلف آهن‌ربا

موقعیت آهن‌ربا	مورد ۱	مورد ۲
$\dot{m}(\frac{Kg}{m^2.hr})$		
(0.7, 0.2)	1.1000	0.6083
(0.7, 0.3)	1.6900	0.9164
(0.7, 0.1)	1.1021	0.5950
(0.5, 0.2)	1.5260	0.8330
(0.85, 0.2)	1.1111	0.5991
Nu		
(0.7, 0.2)	118.00	112.66
(0.7, 0.3)	154.18	141.91
(0.7, 0.1)	119.48	110.74
(0.5, 0.2)	140.45	133.73
(0.85, 0.2)	124.30	114.53

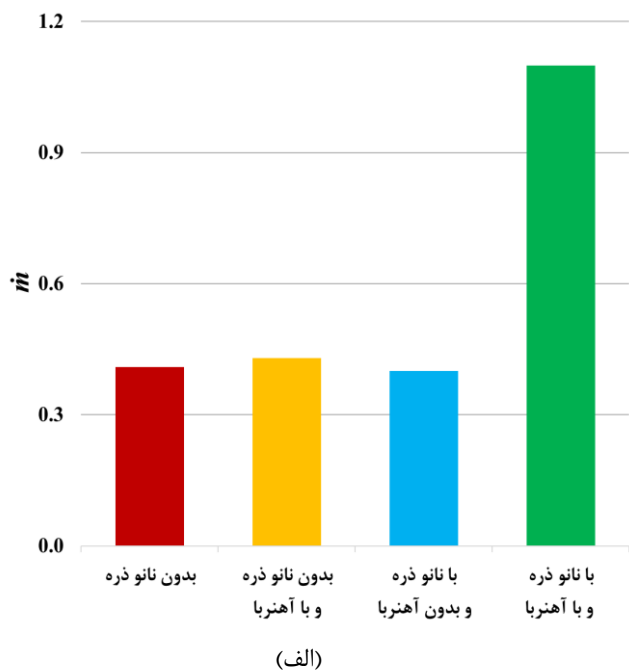
در نمودارهای میله‌ای نشان داده‌شده در شکل (۸) تاثیر آهن‌ربا دائم در افزایش میزان تولید آب شیرین مشخص می‌باشد. با افزایش قدرت آهن‌ربا مقدار آب تولیدی افزایش می‌یابد. در جدول (۸) مقادیر مربوط به مقدار آب قابل شرب بدست آمده به همراه مقادیر عدد ناسلت میانگین آورده شده‌اند. مقدار افزایش تولید آب شیرین با آهن‌ربائی به قدرت ۴۰۰،۰۰۰ آمپر بر متر در حدود ۸۷/۵ درصد و با آهن‌ربای دارای قدرت ۱۰،۰۰۰،۰۰۰ آمپر بر متر، ۲۶۰ درصد نسبت به دبی تولیدی آب شیرین‌کن‌های مرسوم بدون نانوذرات و میدان مغناطیسی (یعنی کسر حجمی و میدان مغناطیسی صفر) است. مقادیر عدد ناسلت میانگین نیز با افزایش قدرت آهن‌ربا و افزایش کسر جرمی نانوذره افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش بیشتر انتقال گرمای جابه‌جایی در افزایش عملکرد آب شیرین‌کن می‌باشد.

۴-۳- تاثیر زاویه آهن‌ربا بر میزان تولید آب شیرین و مقدار عدد ناسلت میانگین

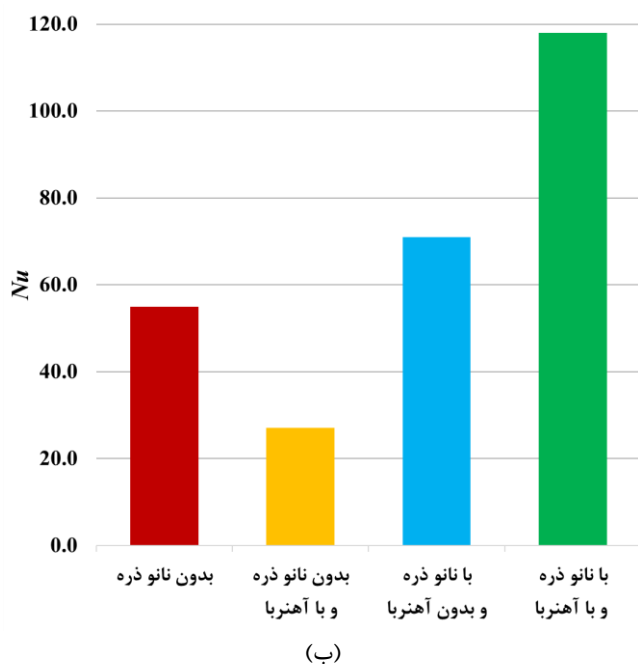
برای بررسی تاثیر زاویه قرارگیری آهن‌ربا بر عملکرد سیستم، زاویه آهن‌ربا با قدرت ۱۰^۶ آمپر بر متر را که در فاصله $y=0/2$ و $x=0/7$ متری نسبت به مبدا مختصات واقع شده است در زاویه‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در کسر حجمی ۰/۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات میزان تولید آب شیرین به همراه تغییرات ناسلت میانگین در زوایای مختلف آهن‌ربا دائم در جدول (۱۰) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۰ مقایسه دبی جرمی آب شیرین \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و عدد ناسلت به ازاء زوایای مختلف آهن‌ربا

زاویه	مورد ۱	مورد ۲
$\dot{m}(\frac{Kg}{m^2.hr})$		
$\theta=0^\circ$	1.1692	0.6405
$\theta=30^\circ$	1.1101	0.6343
$\theta=45^\circ$	1.1000	0.6083
$\theta=60^\circ$	1.0781	0.5912
$\theta=90^\circ$	1.2561	0.6744
Nu		
$\theta=0^\circ$	125.62	117.50
$\theta=30^\circ$	119.08	115.63
$\theta=45^\circ$	118.00	112.66
$\theta=60^\circ$	117.56	111.43
$\theta=90^\circ$	130.95	120.78



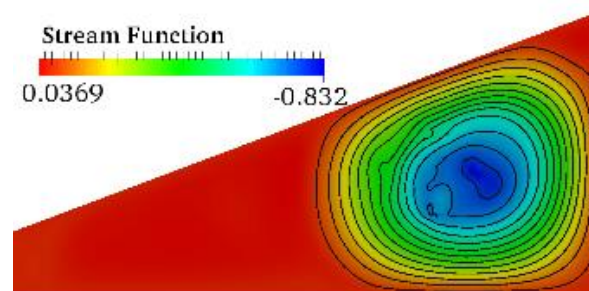
(الف)



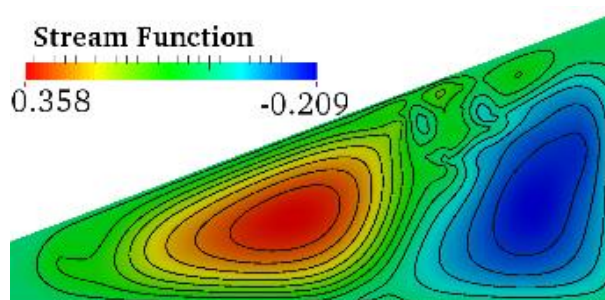
(ب)

شکل ۱۰ الف- نتایج دبی جرمی آب شیرین تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) ب- عدد ناسلت برای مورد (۲) در حالت‌های بدون نانو ذره و بدون میدان مغناطیسی، بدون نانوذرات مغناطیسی و با آهنربا، با حضور نانوذرات مغناطیسی و بدون میدان آهنربا و با حضور نانوذرات مغناطیسی و میدان آهنربا

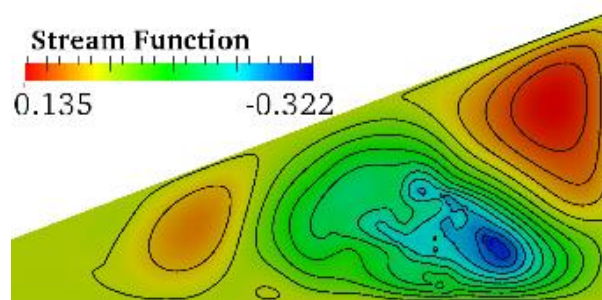
در ادامه به منظور جمع‌بندی و تبیین بهتر تأثیر حضور نانوذرات مغناطیسی به همراه میدان مغناطیسی آهنربا در شکل (۱۰-الف)، نتایج دبی جرمی آب شیرین تولیدی \dot{m} (برحسب $\frac{Kg}{m^2.hr}$) و در شکل (۱۰-ب)، نتایج عدد ناسلت برای مورد (۲) در چهار حالت: ۱- بدون نانوذرات مغناطیسی و بدون



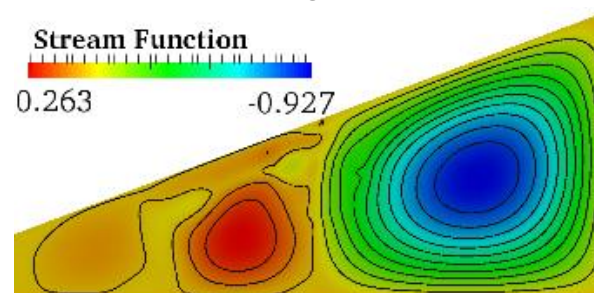
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹ کانتورهای تابع جریان (برحسب $1/s$) یا الگوهای جریان مورد ۲ در مکان‌های مختلف آهنربا دائم الف: (0.7, 0.2)، ب: (0.7, 0.3)، ج: (0.7, 0.1)، د: (0.5, 0.2)

همانطور که نتایج نهایی نشان می‌دهند تأثیر اصلی حضور نانو ذرات بر پارامترهای مولکولی مانند ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. ولی زمانی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود و به تبع آن نیروی کلون بر سیال حاوی نانوذرات مغناطیسی اعمال می‌شود، الگوی جریان ناشی از این نیروی خارجی تغییر می‌یابد و مکانیزم ادوکشن باعث افزایش میزان آب تولیدی و ناسلت میانگین می‌گردد.

به دلیل پایین بودن مغناطیس‌شوندگی اکسیژن موجود در هوای مرطوب به تنهایی نمی‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش تولید آب شیرین بگذارند و برای تولید آب شیرین بیشتر نیازمند میدان‌هایی با نیروی مغناطیسی بسیار قوی است که بعضاً پرهزینه بوده و یا غیرقابل دسترس می‌باشد.

- با اعمال میدان مغناطیسی، گردابه‌های غیر هم جهت درون محفظه آب شیرین‌کن تولید می‌شود. این گردابه‌ها موجب اختلاط هرچه بیشتر سیال عامل با ناحیه گرم شده و بدین ترتیب میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در قوی‌ترین میدان مغناطیسی بررسی شده، مقدار تولید آب افزایشی در حدود ۲۶۰٪ دارد.

- نتایج نشانگر این بود که تغییر مکان آهن‌ربای دائم می‌تواند سبب تغییراتی در الگوی جریان داخل محفظه داشته باشد و از این رو به عنوان یکی از پارامترهای موثر در تنظیم دبی آب شیرین‌تولیدی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

- زاویه قرارگیری آهن‌ربا در افزایش مقدار تولید مؤثر است. از بین زوایای بررسی شده بهترین زاویه قرارگیری آهن‌ربا نسبت به محور افقی ۹۰ درجه می‌باشد.

نتایج این تحقیق روش نوینی جهت بهبود دبی آب تولیدی و مدل ریاضی جهت مدل‌سازی تاثیر حضور نانوذرات در محفظه آب شیرین‌کن خورشیدی در حضور میدان آهن‌ربای دائم ارائه نمود. البته در این مدل‌سازی این مسائل فرض‌ها و در کاربرد نانواثروسل‌ها چالش‌هایی وجود دارد که باید در کارهای آتی مورد بررسی و توجه قرار گیرد.

از جمله این چالش‌ها می‌توان به این موارد اشاره نمود که اگر برخی از نانوذرات وارد قطرات آب حاصل از میعان آب روی سطح شیشه شوند چه تأثیری بر کیفیت آب تولیدی خواهند داشت؛ بویژه وقتی که هدف از تولید آب، تأمین آب شرب باشد، این مورد حائز اهمیت خواهد بود. در این صورت نیاز به استفاده از نانوذرات پوشش داده شده با مواد آب‌گریز و روش‌هایی برای فیلتراسیون آب خروجی از آب شیرین‌کن مانند استفاده از فیلترهای بر پایه نیروی گریز از مرکز خواهد بود.

چالش دیگر مربوط به پایداری نانواثروسل‌ها می‌باشد. در بلند مدت احتمال از بین رفتن پایداری نانوذرات و ته‌نشینی آن‌ها وجود دارد که می‌تواند کسر حجمی موثر نانوذرات را در داخل آب شیرین‌کن کاهش دهد. همچنین به خصوص در شرایطی که نیروی مغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی بسیار قوی باشد می‌تواند سبب جذب نانوذرات به سمت میدان مغناطیسی شود و توزیع همگن نانوذرات در سیال را بر هم

میدان مغناطیسی (آب شیرین‌کن مرسوم)، ۲- بدون نانوذرات مغناطیسی و با حضور آهن‌ربا (فقط مولکول‌های اکسیژن تحت تاثیر میدان مغناطیسی)، ۳- با حضور نانوذرات مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی آهن‌ربا و ۴- با حضور نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی آهن‌ربا با هم مقایسه شده است. در حالت‌هایی که نانوذرات حضور دارند کسر حجمی نانوذرات ۸٪ و در حالت‌هایی که آهن‌ربا حضور دارد ضریب مغناطیس‌شوندگی آهن‌ربا ۱۰۷ می‌باشد. بر اساس توضیحات بخش نتایج و شکل (۱۰) بهبود عملکرد حرارتی و انتقال جرم در روش ترکیبی ارائه شده در کار حاضر مشهود می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر یک روش جدید جهت استفاده در آب شیرین‌کن‌های مرسوم توسعه داده شد و برای اولین بار نقش نانو اثروسل‌های مغناطیسی در افزایش انتقال حرارت و بهبود عملکرد آب شیرین‌کن به روش عددی بررسی گردید. در ابتدا صحت‌سنجی و اعتبارسنجی بر اساس داده‌های اخذ شده از تحقیقات قبلی انجام شد. سپس با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نقش پارامترهای مختلف همانند مغناطش، زاویه، محل قرارگیری آهن‌ربا و کسر حجمی نانوذرات مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل، نشان‌دهنده بهبود قابل توجه عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با استفاده از نانواثروسل‌های مغناطیسی تحت اثر میدان مغناطیسی تولید شده توسط آهن‌ربای دائم می‌باشد. عمده نتایج حاصل به شرح ذیل می‌باشد:

- افزودن نانوذرات مغناطیسی در قالب نانو اثروسل‌ها در غیاب میدان مغناطیسی تاثیر به‌سزایی در عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی ندارد و به دلیل افزایش بیشتر لزجت سیال معادل حتی ممکن است سبب کاهش مقدار آب شیرین‌تولیدی نیز گردد.

- طی این شرایط حداکثر آب شیرین‌تولیدی در حدود ساعت ۱۵ بدست آمده و دبی آن در حدود $\frac{Kg}{m^2.hr} = 0.45$ می‌باشد.

- افزایش درصد حجمی نانوذرات در غیاب میدان مغناطیسی موجب تضعیف عملکرد آب شیرین‌کن می‌گردد. به‌گونه‌ای که میزان تولید آب شیرین با $\phi = 8\%$ در حدود ۲۳٪ کمتر از آب شیرین‌کن با سیال عامل پایه می‌باشد.

- وجود میدان مغناطیسی و عدم حضور نانوذرات مغناطیسی

فشار جزئی بخار در دمای آب	P_w
فشار جزئی بخار در دمای شیشه	P_g
عدد رایلی	Ra
دمای آب	T_w
دمای شیشه	T_g
اختلاف دما بین آب و شیشه	ΔT

علائم یونانی

ضریب پخش دمایی هوا	α
ضریب انبساط حجمی	β
ضریب انبساط مخصوص	β^*
چگالی	ρ
ویسکوزیته سینماتیکی هوا	ν
قابلیت مغناطیس پذیری	χ
ثابت تراوایی خلاء	μ_0
نسبت رطوبت	ω
رطوبت نسبی	Φ
زاویه شیب	θ
کسر حجمی نانوذرات	φ

زیرنویس‌ها

آب	w
شیشه	g
جابجایی	c
بخار آب	v
هوا	a

بزند. لذا نیاز است به روش‌های دوفازی اویلری لاگرانژی به صورت ناپایا شبیه‌سازی هایی انجام پذیرد و این موارد مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

مساحت سطح آب شیرین‌کن	A_s
گرمای نهان بخار آب	h_{fg}
گرمای ویژه	C_p
میزان غلظت بخار در هوا	C_v
ضریب پخش بخار	$D_{v,a}$
ارتفاع دیواره سمت چپ آب شیرین‌کن	H_1
ارتفاع دیواره سمت راست آب شیرین‌کن	H_r
ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب و پوشش شیشه‌ای	h_c
ضریب انتقال حرارت تبخیر	h_{ev}
شدت میدان مغناطیس	H_M
طول آب شیرین‌کن	L
میزان آب تولیدی	\dot{m}
وزن مولکولی	M
مغناطیسی پذیری	M_M
عدد ناسلت	Nu
مولفه x سرعت	u
بردار سرعت	\vec{v}
مولفه y سرعت	v

۷- مراجع

- [5] A. K. Kaviti, A. S. Ram, and A. K. Thakur, "Influence of fully submerged permanent magnets in the evaluation of heat transfer and performance analysis of single slope glass solar still," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 236, no. 1, pp. 109-123, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/0957650921103102>.
- [6] Alizadeh, Mohammad, Asari, T. insight, and advantage, "Experimental study and evaluation of the effect of the thickness of the wool porous material on the production of fresh water, temperature distribution and energy efficiency and exergy of the solar step desalination plant.," (in persian), *Journal of mechanical engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 17-26, 2024, doi: 10.30506/MMEP.2023.2010858.2116.
- [7] M. d. P. Bouçanova, C. V. Vital, D. Rativa, and L. A. Gómez-Malagón, "Single slope solar distiller performance using metallic nanofluids," *Solar Energy*, vol. 245, pp. 1-10, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.065>.
- [8] H. Amiri, "Design, construction and laboratory investigation of the performance of an improved
- [1] A. E. Kabeel, Z. Omara, and F. Essa, "Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 75, pp. 77-86, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.017>.
- [2] S. Rashidi, M. Bovand, N. Rahbar, and J. A. Esfahani, "Steps optimization and productivity enhancement in a nanofluid cascade solar still," *Renewable Energy*, vol. 118, pp. 536-545, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.048>.
- [3] Asari, Karimi, Safora, breeder, Mohsen, and Sadeghian, "A review of the performance of solar water softener with reflectors," (in persian), *Journal of mechanical engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 15-28, 2020, doi: 10.30506/MMEP.2020.102729.1700.
- [4] E. Hedayati-Mehdiabadi, F. Sarhaddi, and F. Sobhnamayan, "Exergy performance evaluation of a basin-type double-slope solar still equipped with phase-change material and PV/T collector," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2409-2425, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.160>.

- [17] M. R. Karami, S. Saffar-Avval, M. Shokri, H. Aghakhani, Z. Mansoori, and M. Saffar-Avval, "Numerical and experimental investigation of floating wick solar still with a porous-media system," *Solar Energy*, vol. 282, p. 112958, 2024/11/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112958>.
- [18] T. Jeyaraj, P. Kumar, and S. Pathak, "Experimental and computational modeling analysis of double slope solar still with a trapezoidal channel for preheating," *Applied Thermal Engineering*, vol. 253, p. 123757, 2024/09/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123757>.
- [19] S. Abdallah and S. M. Aldarabseh, "Performance of Modified Conical Solar Still Integrated With Continuous Volume Flowrate," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 146, no. 1, 2023, doi: 10.1115/1.4062448.
- [20] M. Kumar, S. K. Patel, V. Mishra, D. Singh, B. S. Giri, and D. Singh, "Performance analysis of modified solar still with parabolic reflector and nanofluids," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, p. 105651, 2024/07/20/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105651>.
- [21] A. K. Hussein *et al.*, "A review of the application of hybrid nanofluids in solar still energy systems and guidelines for future prospects," *Solar Energy*, vol. 272, p. 112485, 2024/04/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112485>.
- [22] W. Al-Kouz, R. Al-Waked, M. e. Sari, W. Owhaib, and A. Atieh, "Numerical study of heat transfer enhancement in the entrance region for low-pressure gaseous laminar pipe flows using Al₂O₃-air nanofluid," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 7, p. 1687814018784410, 2018, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018784410>.
- [23] V. Khadanga, S. Mukherjee, P. C. Mishra, and S. Chakrabarty, "Heat Transfer Performance of Novel SiO₂ Nanoaerosol: The Numerical Investigation," *Microgravity Science and Technology*, vol. 34, no. 3, p. 50, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09969-w>.
- [24] M. Mehdizadeh Youshanlouei, S. Yekani Motlagh, and H. Soltanipour, "The effect of magnetic field on the performance improvement of a conventional solar still: a numerical study," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 24, pp. 31778-31791, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12947-1>.
- [25] A. Jocher, H. Pitsch, T. Gomez, J. Bonnetty, and G. Legros, "Combustion instability mitigation by inclined solar desalination plant," (in persian), *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 52, no. 3, pp. 237-246, 2022, doi: 10.22034/JMEUT.2022.50389.3063.
- [9] S. S. Adibi Tousi, S. Sina, opening, h. worker, t. faith, and rescue, "Experimental assessment of stepped solar still with hybrid NPCM under magnetic field," (in persian), *Mechanical Engineering, University of Tabriz*, vol. 53, no. 1, pp. 13-22, 2023, doi: 10.22034/JMEUT.2022.53281.3163.
- [10] A. Farvardin and S. Y. Motlagh, "Investigating the effects of air inlet jet on the performance of solar still: A comprehensive numerical study," *Desalination*, vol. 569, p. 117048, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117048>.
- [11] H. G. Hameed, H. A. N. Diabil, and M. A. Al-Moussawi, "A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 484-500, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.199>.
- [12] U. F. Alqsair, "Numerical simulation and optimization of surface evaporation in a 3D solar still for improved performance," *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101554, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101554>.
- [13] M. Khalili, M. Taheri, and A. Nourali, "Metal fins efficacy on stepped solar still performance: An experimental study," *Desalination*, vol. 563, p. 116706, 2023/10/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116706>.
- [14] M. Abbaspour, Q. Esmaili, and A. Ramiar, "A numerical and experimental investigation of the impact of wire mesh on vertical solar still," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 105106, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105106>.
- [15] A. F. Abed, M. J. Alshukri, and D. M. Hachim, "Improving solar still performance via the integration of nanoparticle-enhanced phase change materials: A novel pyramid-shaped design with a numerical simulation approach," *Journal of Energy Storage*, vol. 97, p. 112980, 2024/09/10/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112980>.
- [16] H. Aghakhani, S. M. Ayatollahi, and M. R. Hajmohammadi, "A novel numerical model for solar still combined with collector and reflector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 248, p. 123123, 2024/07/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123123>.

- [31] D. R. Lide and H. V. Kehiaian, *CRC handbook of thermophysical and thermochemical data*. CRC press, 2020, <https://doi.org/10.1201/9781003067719>.
- [32] S. Y. Motlagh and H. Soltanipour, "Natural convection of Al₂O₃-water nanofluid in an inclined cavity using Buongiorno's two-phase model," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 111, pp. 310-320, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.08.022>.
- [33] H. C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions," *The Journal of chemical physics*, vol. 20, no. 4, pp. 571-571, 1952, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1700493>.
- [34] R. L. Hamilton and O. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems," *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, vol. 1, no. 3, pp. 187-191, 1962, doi: <https://doi.org/10.1021/i160003a005>.
- [35] A. T. Shawaqfeh and M. M. Farid, "New development in the theory of heat and mass transfer in solar stills," *Solar energy*, vol. 55, no. 6, pp. 527-535, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00069-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00069-4).
- [36] K. W. Song and T. Tagawa, "Thermomagnetic convection of oxygen in a square enclosure under non-uniform magnetic field," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 125, pp. 52-65, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.012>.
- magnetic fields," *Physical Review E*, vol. 95, no. 6, p. 063113, 2017, doi: DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.063113>.
- [26] R. Dunkle, "Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still," in *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA, 1961*, 1961, vol. 5, p. 895.
- [27] J. Nakagawa, N. Hirota, K. Kitazawa, and M. Shoda, "Magnetic field enhancement of water vaporization," *Journal of applied physics*, vol. 86, no. 5, pp. 2923-2925, 1999, doi: <https://doi.org/10.1063/1.371144>.
- [28] N. Setyaningsih, S. Yanasin, Z. Supardi, and A. Taufiq, "Phase and magnetic properties of Fe₃O₄/SiO₂ natural materials-based using polyethylene glycol media," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 515, no. 1: IOP Publishing, p. 012017, doi: DOI:10.1088/1757-899X/515/1/012017.
- [29] T. Gehrke, "Design of permanent magnetic solenoids for REGAE," Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), 2013. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/002/45002598.pdf?r=1.
- [30] H. Panchal, K. K. Sadasivuni, M. Israr, and N. Thakar, "Various techniques to enhance distillate output of tubular solar still: a review," *Groundwater for sustainable development*, vol. 9, p. 100268, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100268>.