



شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی جریان مغشوش نانوسیال در لوله جاذب کلکتور سهموی به روش دو فازی

سامان خسروی^۱، مرضیه رضازاده^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

چکیده

کلکتور سهموی یکی از تجهیزات متداول برای استفاده از انرژی خورشیدی است که با درجه حرارت بالا راندمان خوبی ایجاد می‌کند. استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل می‌تواند باعث افزایش راندمان حرارتی سیستم می‌شود. در نظر گرفتن برخی ویژگی‌های حرارتی نانوسیال و همچنین پارامترهای جریان برای رسیدن به حداکثر راندمان امری ضروری است. در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابجایی مغشوش نانوسیال درون لوله جاذب یک کلکتور سهموی شبیه سازی شده است که شار حرارتی روی دیواره آن به صورت غیریکنواخت است. از نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب با غلظت‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۵٪ در رینولدزهای ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ استفاده شده است. با مقایسه عدد ناسلت نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب با سیال پایه می‌توان نتیجه گرفت که نانوسیال عملکرد حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه دارد. بیشترین درصد افزایش عدد ناسلت نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب نسبت به سیال پایه خود، به ترتیب ۶۶٪ و ۵۷٪ است. بیشترین درصد افزایش عدد ناسلت مربوط به نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ در رینولدز ۱۰۰۰۰ و غلظت ۴٪ است که در این حالت شاخص معیار ارزیابی عملکرد، PEC، ۲/۹۳ است. برای هر دو نانوسیال با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز PEC برای اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ کاهش و برای اکسید آلومینیوم-آب افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کلکتور سهموی؛ انتقال حرارت؛ نانوسیال؛ دوفازی؛ شار حرارتی غیر یکنواخت.

Numerical simulation of heat transfer in a parabolic solar collector absorber tube using two-phase method

S. Khosravi¹, M. Rezazadeh^{2,*}

¹ MSc, Mechanical Engineering Group, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran

² Assist. Prof, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran

Abstract

Parabolic solar collector, use highly reflective materials to collect and concentrate the heat energy from solar radiation. The thermal efficiency of the solar collectors increases by using nanofluid. It is necessary to consider some thermal properties of nanofluid and operating parameters to reach maximum efficiency. This article presents the heat transfer of a nanofluid in the absorber tube of a parabolic collector with non-uniform heat flux on the wall. Two types of nanofluids were utilized and prepared TiO₂-Syltherm 800 and Al₂O₃-water with 1.0%, 2.0%, 3.0%, and 4.0% nanoparticle volume fractions are used as working fluids. Reynolds number is between 10,000 and 80,000. Comparing the Nusselt number of TiO₂-Syltherm 800 and Al₂O₃-water nanofluid demonstrated that the nanofluid has better thermal performance than the base fluid. The highest percentage increase in Nusselt number of TiO₂-Syltherm 800 and Al₂O₃-water compared to their base fluid is 66% and 57%, respectively. The highest increase in Nusselt number is related to TiO₂-Syltherm 800 nanofluid. at Reynolds 10000 and concentration of 4%. In this case, the Performance evaluation criterion, PEC, is 2.93. For both nanofluids, PEC increases with increasing concentration. With increasing Reynolds number, PEC decreases for TiO₂-Syltherm 800 and increases for Al₂O₃-water nanofluid.

Keywords: Parabolic collector; Heat transfer; hybrid Nanofluid; Two-phase, Non-uniform heat .

۱- مقدمه

کلکتور سیستمی است که انرژی تابشی خورشید را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند. کلکتور خورشیدی باید دارای ضریب هدایت حرارتی، ضریب جذب بالا و ضریب صدور پایین بوده و در دماهای بالا پایدار باشد. با استفاده از نانوسیالات در کلکتورهای خورشیدی، می‌توان راندمان حرارتی کلکتور را افزایش داد. از توزیع نانوذرات درون سیال پایه، نانوسیال بدست می‌آید. نانوسیال کاربردهای صنعتی فراوانی دارند که یکی از این کاربردها، افزایش انتقال حرارت است. برخی از ویژگی‌های حرارتی نانوسیالات مانند هدایت حرارتی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و ضریب انتقال گرما نقش اساسی بر عملکرد نانوسیالات دارند. عملکرد حرارتی کلکتورهای حرارتی اساساً به رفتار ویژگی‌های حرارتی در حالات مختلف بهره‌برداری بستگی دارند. پارامترهای بهره‌برداری مانند دما، شرایط محیطی، نوع سیال مینا، اندازه ذرات و غلظت حجمی ذرات می‌باشند. تحقیقات عددی و تجربی متعددی در زمینه افزایش راندمان کلکتور سهموی با استفاده از نانوذرات انجام شده است که به برخی از آنها در ادامه اشاره می‌شود.

کسایان و همکاران [۱]، یک شبیه سازی عددی را برای مطالعه تاثیر نانوسیال اکسید آلومینیوم در روغن مصنوعی انجام دادند. آنها دریافتند که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. استفاده از غلظت حجمی ۵٪ اکسید آلومینیوم، باعث افزایش ۱۴ درصدی ضریب انتقال حرارت می‌شود؛ همچنین افزایش دما از ۳۰۰ کلوین به ۵۰۰ کلوین، اثر غلظت نانوذرات را بر ضریب انتقال حرارت را کاهش کی دهد. سوخان صفت و همکاران [۲]، انتقال حرارت نانوسیال روغن- اکسید آلومینیوم درون لوله جاذب کلکتور سهموی با شار حرارتی غیریکنواخت را شبیه سازی کردند. آنها از نانوذرات اکسید آلومینیوم با غلظت‌های مختلف در دمای عملیاتی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کلوین استفاده کردند. نتایج عددی آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت، رابطه مستقیمی با غلظت حجمی نانوذرات داشته است، ولی با افزایش دما، تاثیر نانوذرات بر انتقال حرارت کم می‌شود.

باسوس و همکاران [۳]، در حل عددی خود، اثر نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس، مس و نقره با غلظت حجمی ۵ درصد در سیال پایه سیلترم-۸۰۰ را بر عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که عدد

رینولدز برای همه نانوذرات افزایش و عدد پراتل برای همه آنها کاهش یافته است؛ همچنین هرچه ویسکوزیته نانوسیالات بیشتر باشد، عملکرد حرارتی آنها نیز بهتر می‌شود؛ همچنین در بین نانوذرات، نقره بیشترین راندمان حرارتی شد. بلوس و تزواندیس [۴]، در مطالعه عددی خود، اثر نانوسیالات را در کلکتورهای خورشیدی سهموی بررسی کردند. آنها نانوذره آلومینیوم اکسید و تیتانیوم اکسید را در سیال پایه سیلترم-۸۰۰ مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیالات منجر به افزایش راندمان حرارتی می‌شود. آنها همچنین دریافتند که حداکثر افزایش بهره‌وری انرژی برای نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به ترتیب ۱/۹۱ و ۱/۱۷ می‌باشد. ونکی و همکاران [۵]، انتقال حرارت اجباری جریان نانوذره اکسید آلومینیوم درون سیال پایه آب را برای کسر حجمی ۱ درصد به صورت تک فازی و دوفازی شبیه سازی کردند. مقایسه نتایج آنها با مقادیر تجربی نشان داد که مدل مخلوط دقیق‌تر بوده است، ولی روی عدد ناسلت اثری ندارند؛ همچنین اثر غلظت نانوذرات بر پارامترهای حرارتی را مورد بررسی قرار دادند.

باسوس و همکاران [۶]، عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی را با استفاده از نانوذرات مس اکسید، آلومینیوم اکسید، مس و نقره در سیال سیلترم-۸۰۰ با غلظت حجمی ۵٪ بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین افزایش انتقال حرارت حدود ۳۶ درصد بوده، بیشترین کاهش ضریب انتقال حرارت کلی کلکتور مربوط به نانوذرات نقره و برابر ۲۱٪ است؛ همچنین عدد رینولدز برای همه نانوذرات افزایش و عدد پراتل برای همه آنها کاهش یافته، هرچه ویسکوزیته نانوسیال بیشتر باشد، عملکرد حرارتی نیز بهتر می‌شود. قاسمی و رنجبر [۷]، انتقال حرارت اجباری نانوسیال درون جاذب کلکتور سهموی را برای جریان پایدار آشفته با استفاده از الگوریتم سیمپل شبیه سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نانوسیال به جای سیال پایه، باعث افزایش عملکرد انتقال حرارت می‌شود. علاوه بر این با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

کندوال و همکارانش [۸]، در یک بررسی تجربی، تاثیر دو نانوسیال آب-اکسید مس و اتیلن گلیکول-اکسید مس را با غلظت‌های حجمی ۱٪ و ۵٪ مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس

شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ابوظبی بهترین مکان با بالاترین راندمان حرارتی سالانه ۴۹/۵۲٪ است؛ همچنین ۱۲ عدد ناسلت برای کسر حجمی برای غلظت نانوذرات ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۳٪ به ترتیب ۱۲٪، ۱۶٪ و ۲۱٪ می‌باشند. استفاده از نانوسیال در غلظت‌های پایین می‌تواند باعث افزایش این امر شود. عملکرد ترمو هیدرولیک برای سرعت جریان کمتر از ۰/۲ لیتر در ثانیه، در حالی که غلظت نانوذرات برای انتقال حرارت بهتر باید با دبی بالاتر افزایش یابد.

الراشد و همکاران [۱۳]، عملکرد یک کلکتور سهموی مجهز به یک لوله جاذب غیر دایره‌ای و یک عایق جامد را به صورت عددی با استفاده از روش دو فازی اوپلرین-اوپلری بررسی نمودند. نانوسیال آب Al_2O_3 -CMC به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شد. تأثیرات عدد رینولدز، غلظت حجم نانوذرات، قطر نانوذرات و زاویه عایق بر روی معیارهای عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات بازده کلکتور با عدد رینولدز دارای الگوی صعودی-نزولی است. علاوه بر این، بیشترین راندمان کلکتور ۶۱/۷٪ است که مربوط به زاویه عایق ۹۰ درجه و نانوسیال با غلظت ۱/۵٪ و قطر نانوذره ۱۰۰ نانومتر است.

هانگ و همکاران [۱۴]، جریان آشفته نانوسیال آب-مس درون لوله یک کلکتور خورشیدی سهموی با شار غیر یکنواخت را به روش حجم محدود مدل سازی کردند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات مس منجر به افزایش عدد ناسلت می‌گردد. علاوه بر این، اثر افزودن نانوذرات مس بر افزایش انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. از طرفی، افزودن نانوذرات مس راندمان حرارتی و افت فشار را همزمان افزایش داد؛ همچنین، عدد ناسلت برای اعداد رینولدز ۱۰۴، ۱۰۵ و ۱۰۶، به ترتیب ۸/۶٪، ۹/۷۸٪ و ۱۱/۴۳٪ افزایش یافت که منجر به افزایش راندمان حرارتی ۳/۸۷٪، ۳/۸۲٪ و ۲/۰۴٪ شد.

فاروک و همکاران [۱۵]، اثر دو نوع نانوسیال اکسید آلومینیوم و نانوسیال اکسید مس بر بازده حرارتی کلکتور سهموی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. غلظت نانوسیال ۱٪ و دبی ۰/۱۱۲ Kg/s و ۰/۲۲۴ Kg/s در نظر گرفته شد؛ همچنین اثر جنس لوله کلکتور و طول لوله نیز بررسی شد. بیشترین راندمان حرارتی در دبی ۰/۲۲۴ Kg/s برای نانوذرات

نسبت به اتیلن گلیکول-اکسید مس، راندمان حرارتی را ۸۲ درصد افزایش می‌دهد. چودهاری و همکاران [۹]، اثر استفاده از نانوسیال در کلکتور سهموی را مورد بررسی تجربی قرار دادند. آنها نانوذرات اکسید آلومینیوم را با غلظت حجمی ۱٪ در سیال پایه آب استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت و راندمان حرارتی به ترتیب ۳۲٪ و ۷٪ و عدد ناسلت هم ۳۲٪ افزایش می‌یابد. آنها اثر تیتانیوم، اکسید روی، اکسید سلسیم، اکسید آلومینیوم و طلا با غلظت‌های حجمی متفاوت از ۱٪ تا ۳/۵٪ در سیال پایه آب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اثر استفاده از نانوسیالات مختلف بر روی راندمان حرارتی در مقایسه با اثری که باعث افت فشار می‌شود، ناچیز است. علاوه بر این، استفاده از نانوسیال آب-طلا با غلظت حجمی ۱٪ انتقال حرارت جابه‌جایی را ۵۰٪ افزایش می‌دهد. منباری و همکاران [۱۰]، در یک مطالعه تجربی و عددی اثر نانوسیال آب-اکسید مس را در کلکتورهای سهموی با غلظت‌های حجمی متفاوت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که راندمان حرارتی کلکتور برای نانوسیال آب-اکسید مس با غلظت حجمی از ۲٪ تا ۸٪، به ترتیب ۱۸ تا ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. عابد و همکاران [۱۱]، اثر نانوذرات غیر فلزی بر انتقال حرارت درون لوله کلکتور با شار حرارتی غیر یکنواخت را به صورت عددی در بازه عدد رینولدز بین ۱۰۴ تا ۱۰۵ و با کسر حجمی ۲٪، ۴٪ و ۶٪ مورد بررسی قرار دادند. نانو ذرات شامل اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید سریم (CeO_2)، اکسید مس (CuO)، اکسید آهن (Fe_2O_3)، دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و دی اکسید سیلیکون، (SiO_2)، در سه سیال پایه ترمینول، آب و نمک مذاب می‌باشد. نتایج آنها نشان داد که بدون توجه به انتخاب پایه، دی اکسید سیلیکون، بهترین انتخاب می‌باشد. به عنوان مثال برای دی اکسید سیلیکون با کسر حجمی ۶٪ در سیال پایه آب، عدد ناسلت متوسط، راندمان حرارتی و شاخص معیار ارزیابی عملکرد، PEC^۱، به ترتیب ۳۲/۴٪، ۵/۱۱٪ و ۱/۳۱۳٪ افزایش می‌یابد.

هاچیجا و همکاران [۱۲]، اثر نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) بر انتقال حرارت درون لوله کلکتور سهموی در کشور امارات را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. سیال پایه آب مقطر و غلظت حجمی نانوذرات مختلف ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۳٪ در نظر گرفته شد. نتایج

^۱Performance evaluation criterion (PEC)

۲- معادلات حاکم

در شبیه سازی حاضر جریان پایدار، کاملاً توسعه یافته، مغشوش و تراکم ناپذیر بوده، خواص ترموفیزیکی سیال و نانوذرات تابع دما نمی باشد. حداقل طول ورودی لوله حدوداً $50D_h$ است که در آن D_h قطر هیدرولیکی لوله است [۲۰، ۱۹]. در شبیه سازی حاضر طول لوله به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است (بزرگتر از $50D_h$) که بتوان از اثرات طول ورودی صرف نظر نمود و جریان را کاملاً توسعه یافته در نظر گرفت [۲۱].

در حالت کلی نانوسیالات را می توان به دو صورت تک فاز و دوفاز مدل سازی نمود. هنگامی که نانوسیال به صورت تک فازی در نظر گرفته می شود، به جای استفاده از معادلات برای حاکم بر هر فاز به صورت جداگانه، معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی برای مخلوط استفاده می شوند. در مدل دو فازی معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی برای هر فاز به صورت جداگانه در نظر گرفته می شود. نتایج پژوهش ها نشان می دهد که نتایج شبیه سازی به روش دوفازی نسبت روش تک فازی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر است [۲۲]. علت را می توان ناشی از این مسئله دانست که مدل های دو فازی مانند مدل مخلوط و VOF به دلیل در نظر گرفتن حرکت براونی و توزیع غیر یکنواخت نانو ذرات درون سیال پایه میزان عدد ناسلت را به صورت دقیق تری نسبت به مدل تک فازی محاسبه می کنند [۲۳].

روش های مختلفی برای شبیه سازی جریان دوفازی وجود دارد که در این شبیه سازی از روش مخلوط استفاده می شود. [۲۳]. معادله پیوستگی مخلوط برای شرایط پایا به صورت رابطه (۱) بیان می شود [۲۰]. سرعت متوسط نیز از رابطه (۲) به دست می آید.

$$\nabla(\rho_m U_m) = 0 \quad (1)$$

$$U_m = \frac{\rho_s \phi_s U_s + \rho_f \phi_f U_f}{\rho_m} \quad (2)$$

که در آن U_m سرعت مخلوط، U_s سرعت نانوذرات و U_f سرعت سیال پایه، ρ_s و ρ_f به ترتیب چگالی نانوذرات و چگالی سیال پایه، ϕ_s و ϕ_f کسر حجمی نانوذره و سیال است. ρ_m که چگالی مخلوط است. چگالی مخلوط ρ_m را می توان از رابطه (۳) محاسبه نمود.

اکسید مس و اکسید آلومینیوم به ترتیب ۱/۱۳٪ و ۱۴/۷۹٪ به دست آمد. تغییر جنس لوله از فولاد به مس و آلومینیوم دمای خروجی سیال را افزایش داد. حداکثر دمای خروجی سیال برای لوله از جنس مس، آلومینیوم و فولاد به ترتیب ۳۰۸ K، ۳۰۷ K و ۳۱۱ K می باشد.

مصطفی و همکاران [۱۵]، تأثیر یک لوله جاذب ماریچ بر عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی سهموی حاوی توسط نانوسیال غیر نیوتنی را به صورت عددی بررسی کرده اند. برای حل عددی از روش حجم محدود، الگوریتم SIMPLE و مدل k-ε استفاده شد. کلکتور خورشیدی مجهز به یک لوله جاذب ماریچ حاوی نانوسیال با کسر حجمی ۴٪ و قطر نانوذرات ۵۰ نانومتر است. نتایج نشان داد که راندمان حرارتی کلکتور دارای لوله جاذب و بدون لوله جاذب به ترتیب ۴۷/۵٪ و ۵۸/۲٪ می باشند.

شبیه سازی عددی یکی از روش های بررسی اثر نانوسیال بر میزان انتقال حرارت در کلکتور خورشیدی سهموی است. افزایش انتقال حرارت توسط نانوذرات و افزایش راندمان حرارتی کلکتورهای خورشیدی موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه های اخیر بوده است. یکی از دلایل استفاده از روش عددی، هزینه نسبتاً پایین تر آن نسبت به مطالعات تجربی و آزمایشگاهی است. سیال عامل یکی از مهم ترین پارامترهای کلکتور است که نقش به سزایی در میزان انتقال حرارت دارد [۱۷]. برای افزایش راندمان حرارتی کلکتور خورشیدی از نانوذراتی مانند اکسید آلومینیوم، اکسید مس و اکسید تیتانیوم درون سیال پایه مانند آب یا روغن استفاده می کنند [۱۸]. برخی از ویژگی های حرارتی سیال در عملکرد نانوسیال نقش بسزایی دارند که می توان به ضریب هدایت گرمایی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و ضریب انتقال گرمای جابه جایی اشاره کرد. در این پژوهش، انتقال حرارت جریان نانوسیال درون لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی سهموی در نرم افزار Ansys fluent شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار می گیرد. جریان نانوسیال به صورت دو فازی و با استفاده از روش مخلوط بررسی می گردد. توزیع شار حرارتی در راستای شعاعی غیر یکنواخت در نظر گرفته شده است. علاوه بر بررسی اثر نانوذرات بر میزان انتقال حرارت، اثر آنها بر افزایش افت فشار درون لوله و در نتیجه افزایش توان مورد نیاز پمپ بررسی می شود.

$$T_b = \frac{(T_{out} + T_{in})}{2} \quad (۹)$$

که در آن، T_b ، T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای بالک، دمای ورودی و خروجی است. عدد رینولدز از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$Re = \frac{U_m d \rho_m}{\mu_m} \quad (۱۰)$$

که در آن، U_m سرعت مخلوط، ρ_m چگالی مخلوط، μ_m ویسکوزیته مخلوط و d قطر لوله است. ضریب انتقال حرارت جابجایی از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است.

$$h = \frac{q_w}{(T_w - T_b)} \quad (۱۱)$$

که در آن، h ضریب انتقال حرارت، q_w میانگین شار حرارتی روی دیواره و T_w ، T_b دمای دیواره لوله و دمای بالک است. عدد ناسلت در این حالت از رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$Nu = \frac{(hd)}{K_{eff}} \quad (۱۲)$$

در معادله (۱۲)، Nu عدد ناسلت، d قطر داخلی لوله کلکتور و K_{eff} ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال مورد نظر است.

از دو نوع مدل های توربولانس رینولدز پایین و رینولدز بالا برای مدل کردن آشفتگی جریان استفاده می شود. مدل $k-\varepsilon$ که مدل رینولدز بالا محسوب شده، برای محاسبه کمیت ها در نزدیک دیواره از توابع دیواره بهره می برد. برخی مدل ها مانند $k-\omega$ و $SST k-\omega$ که مدل های رینولدز پایین محسوب می گردند، به جای استفاده از توابع دیواره، از توابع استهلاک استفاده می کنند [۲۱]. در شبیه سازی حاضر از مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است که با معادلات زیر بیان می شوند [۲۱].

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (۱۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \quad (۱۴)$$

$$\rho_m = \rho_s \varphi_s + \rho_f \varphi_f \quad (۳)$$

معادله ی ممنتوم در شرایط پایا برای مخلوط با رابطه (۴) بیان می شود.

$$\begin{aligned} \rho_m (U_m \nabla U_m) &= -\nabla P + \mu_m (\nabla U_m + \nabla U_m^T) \\ &+ \nabla (\varphi_f \rho_f U_{drf} U_{drf} + \varphi_s \rho_s U_{drs} U_{drs}) \\ &+ \rho_m g \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن P ، U_m ، μ_m ، φ_f ، ρ_f ، φ_s ، ρ_s و U_{drf} و U_{drs} به ترتیب فشار، سرعت مخلوط، چگالی مخلوط، کسر حجمی و چگالی سیال پایه، کسر حجمی و چگالی نانو ذرات، سرعت رانش سیال پایه و سرعت رانش ذرات بوده و به ترتیب از روابط (۵) و (۶) محاسبه می شوند.

$$U_{drs} = U_s - U_m \quad (۵)$$

$$U_{drf} = U_f - U_m \quad (۶)$$

که U_s ، U_f و U_m به ترتیب سرعت نانو ذره، سرعت سیال پایه و سرعت سیال مخلوط است. معادله انرژی در شرایط پایا برای مخلوط به صورت رابطه (۷) است.

$$\begin{aligned} &(\varphi_s U_s \rho_s h_s + \varphi_f U_f \rho_f h_f) \\ &= \nabla \cdot ((\varphi_s k_s + \varphi_f k_f) \nabla T) \end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن h_f ، ρ_f ، U_f ، φ_f و K_f به ترتیب انتالپی سیال پایه، چگالی سیال پایه، سرعت سیال پایه، کسر حجمی سیال پایه و ضریب انتقال حرارت سیال پایه و h_s ، ρ_s ، U_s ، φ_s و K_s به ترتیب انتالپی نانو ذرات، چگالی نانو ذرات، سرعت نانو ذرات، کسر حجمی نانو ذرات و ضریب انتقال حرارت هدایتی نانو ذرات است. معادله کسر حجمی برای مخلوط دو فاز به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه است.

$$\nabla (\varphi_s \rho_s U_m) = -\nabla (\varphi_s \rho_s U_{drs}) \quad (۸)$$

که در آن U_{drs} سرعت لغزشی است. کلیه خواص مورد نیاز برای عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بر اساس دمای توده سیال، T_b مطابق رابطه (۹) محاسبه می شوند.

$$C_{p\,nf} = \frac{\varphi\rho_{np}C_{p\,np} + (1 - \varphi)\rho_f C_{p\,f}}{\rho_{nf}} \quad (19)$$

که در آن $C_{p\,nf}$, $C_{p\,np}$, $C_{p\,f}$, ρ_{nf} و φ به ترتیب گرمای ویژه نانوسیال، گرمای ویژه نانوذره، گرمای ویژه سیال پایه، چگالی نانوسیال و غلظت نانوذره است [۲۴ و ۲۵].

$$K_{nf} = K_f \left(\frac{K_{np} + 2K_f}{K_{np} + 2K_f} + \varphi \frac{K_f - K_{np}}{K_{np} + 2K_f} \right) \quad (20)$$

که در آن K_{nf} , K_{np} , K_f و φ به ترتیب ضریب انتقال حرارت نانوسیال، ضریب انتقال حرارت نانوذره، ضریب انتقال حرارت سیال پایه و غلظت نانوذره است. در پژوهش حاضر جریان نانوسیال به صورت دو فازی، به روش مخلوط در نرم افزار Ansys Fluent شبیه سازی شده است. شار حرارتی روی دیواره بصورت غیریکنواخت با استفاده از udf اعمال شده است. دمای عملیاتی ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. چون عدد رینولدز بیشتر از ۲۳۰۰ است، جریان آشفته است. از طرفی چون عدد رینولدز بیش از ۴۰۰۰ است، جریان از نظر هیدرودینامیکی و حرارتی کاملاً توسعه یافته و دایم در نظر گرفته شده است. در ورودی شرط مرزی دما و سرعت بوده و در خروجی شرط مرزی دما و فشار معلوم است. روی دیوار لوله شرط عدم لغزش فرض شده است. همچنین سطح داخلی به صورت آدیاباتیک بوده و تشعشع خورشید به صورت شارحرارتی غیریکنواخت مدل شده و گرمای از دست رفته توسط تشعشع هم بصورت سطح^۱ به سطح مدل سازی می-شود [۲۶]. شرایط مرزی مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- شرایط مرزی

شرط مرزی	شرط مرزی سرعت	شرط مرزی دما
ورودی	Velocity inlet	T=300k
سطح داخلی لوله	شرط عدم لغزش	آدیاباتیک
سطح خارجی لوله	شرط عدم لغزش	شارحرارتی غیریکنواخت
خروجی	Pressure Outlet	دما معلوم

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}}$$

در معادله فوق μ ، ویسکوزیته جریان آشفته، k انرژی جنبشی توربولانس و G نرخ تولید آشفتگی k به ترتیب از معادله های (۱۵) و (۱۶) به دست می آیند.

$$\mu_{t,m} = C_\mu \rho_m \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} ((\nabla U_m)^2 + (\nabla U_m^T)) \quad (16)$$

که در آن ρ_m ، μ_m و U_m به ترتیب چگالی، ویسکوزیته و سرعت مخلوط می باشند؛ همچنین، مقادیر ضرایب $C_{\mu} = 0.09$ ، $C_1 = 1/44$ ، $C_2 = 1/92$ ، $\sigma_k = 1$ ، $\sigma_\varepsilon = 1/3$ و $\sigma_\varepsilon = 0.185$ در نظر گرفته شده اند [۱۸].

معادلات حاکم به صورت پایدار بوده و هیچ وابستگی به زمان ندارد. برای انتخاب معیار همگرایی، مقدار یاقیمانده برای برای سرعت، پیوستگی، مومنتم، معادله انرژی، نرخ تولید آشفتگی و انرژی جنبشی توربولانس بررسی شد و در نهایت معیار همگرایی 10^{-6} در نظر گرفته شد. چگالی و ویسکوزیته نانوسیال به ترتیب از روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می آیند [۲۴ و ۲۵].

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_{np} + (1 - \varphi)\rho_f \quad (17)$$

که در آن ρ_{nf} ، ρ_{np} و ρ_f به ترتیب چگالی نانوسیال، چگالی سیال پایه، φ کسر حجمی نانوذره است.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2/5}} \quad (18)$$

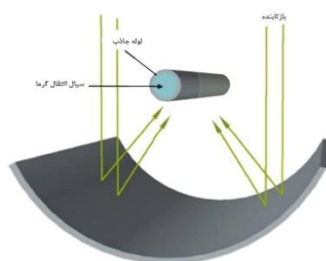
که در آن μ_{nf} ، μ_f و φ به ترتیب ویسکوزیته نانوسیال، ویسکوزیته سیال و کسر حجمی نانوذره است. گرمای ویژه و ضریب هدایت گرمایی نانوسیال به ترتیب از روابط (۱۹) و (۲۰) قابل محاسبه می باشند [۲۴ و ۲۵].

^۱ Surface to Surface

در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی لوله کلکتور مورد استفاده در شبیه سازی حاضر در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات کلکتور سهموی مدل LS-2 [۲]

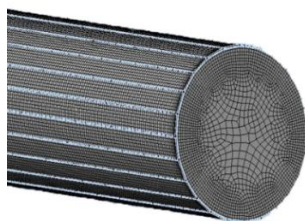
پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
طول کلکتور	L	m	۷/۸
عرض کلکتور	W	m	۵
شعاع لوله جاذب	R _b	m	۰/۰۳۳
شعاع محفظه شیشه‌ایی	R _g	m	۰/۰۵۷۵



شکل ۱- اجزای کلکتور سهموی [۲].

۴- استقلال حل از شبکه

برای بررسی استقلال حل از شبکه، دمای خروجی برای شبکه‌های مختلف محاسبه شده است. با توجه به مقادیر جدول (۳)، شبکه با تعداد المان ۱۵۹۳۳۵۵ انتخاب گردید. شکل (۲) شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی حاضر را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، برای بخش مرکزی جریان از شبکه نامنظم و برای بخش کنار دیواره، شبکه منظم استفاده شده است.



شکل ۲- شبکه ایجاد شده بر روی لوله جاذب

افزایش غلظت نانوذره، باعث افزایش ویسکوزیته نانوسیال شده که خود باعث ایجاد افت فشار می‌شود؛ اما با افزایش عدد رینولدز می‌توان این افت فشار ناشی از افزایش ویسکوزیته نانوسیال را کاهش داد. با افزایش غلظت، میزان انتقال حرارت و افت فشار هر دو افزایش می‌یابند؛ بنابراین باید اطمینان حاصل کرد که افزایش انتقال حرارت برعوامل افت فشار غلبه دارد. برای بررسی این مسئله می‌توان از عدد بی بعد PEC استفاده کرد. اگر PEC بزرگتر از ۱ باشد، عامل انتقال حرارت غالب و اگر کوچکتر از ۱ باشد، عامل افت فشار غالب است [۲۷].

PEC یک معیار ارزیابی عملکرد و یک عدد بدون بعد است که بیانگر نسبت عملکرد انتقال حرارت به عملکرد هیدرولیکی است. که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶].

$$PEC = \frac{(Nu_{nf})}{(Nu_{bf})} / \left(\frac{f_{nf}}{f_{bf}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

که در معادله (۲۱)، Nu_{nf} عدد ناسلت نانوسیال، Nu_{bf} عدد ناسلت سیال پایه، f_{nf} افت فشار نانوسیال و f_{bf} افت فشار سیال پایه است که افت فشار نانوسیال از رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$f = \Delta P \left(\frac{d}{L} \right) / \rho_{nf} \frac{u^2}{2} \quad (22)$$

در معادله (۲۲) ΔP اختلاف فشار، d قطر لوله، L طول لوله، u سرعت ورودی نانوسیال و ρ چگالی نانوسیال است.

۳- هندسه مسئله

بسیاری از کلکتورهای خورشیدی سهموی براساس مدل LS-2 طراحی شده‌اند [۲]. لوله جاذب در کلکتور، انرژی خورشیدی جذب شده توسط کلکتور را به سیال منتقل می‌کند. معمولاً لوله جاذب برای افزایش کارایی بالاتر از دولایه تشکیل شده است. لایه بیرونی شیشه شفاف ضد تابش خورشید که می‌تواند باعث کاهش تلفات گرما در اثر انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش شود. لایه داخلی از جنس مس، حاوی مایع انتقال دهنده گرما است [۱]. هندسه مسئله، شامل لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی مدل LS-2 است که شکل (۱) هندسه لوله جاذب را نشان می‌دهند. در این پژوهش برای ساده سازی لوله تک لایه

جدول (۵)، مشخصات نانوذرات نقره و تیتانیوم و سیال پایه سیلترم-۸۰۰ مورد استفاده در شبیه سازی حاضر را ارائه می‌کند. در این شبیه سازی لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی از جنس مس بوده، دمای ورودی سیال ۳۰۰ K در نظر گرفته شده است. جریان نانوسیال به صورت یک جریان دوفازی با استفاده از روش مخلوط شبیه سازی می‌شود. نانوسیال با غلظت‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ در نظر گرفته شده است [۱۸، ۱۶، ۱۱]. نتایج برای سه مقدار عدد رینولدز ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ به دست آمده است. این مقادیر عدد رینولدز بر اساس مقادیر پیشنهادی توسط اکیسایلر و همکاران [۲۷] انتخاب شده است. از آنجا که یک نیروگاه خورشیدی دارای کلکتور سهموی در شیراز موجود است، در شبیه سازی حاضر از مشخصات مربوط به شهر شیراز استفاده شده که در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۵- خواص نانوذرات و سیال پایه [۶]

پارامتر	ρ	C_p	k	μ
نانوذرات	(kg/m ³)	(J/Kg.K)	(W/m K)	(N.S/m ²)
Al	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	-
Ti	۴۲۵۰	۶۸۶	۸/۷۸۶	-
Syltherm-800	۷۴۷/۲	۱۹۶۲	۰/۰۹۶۱	۰/۰۰۰۸۴
water	۹۹۸/۲	۴۱۸۲	۰/۶	۰/۰۰۱۰۰۳

جدول ۶- ضرایب معادله LCR [۲]

ساعت	روز	ماه	سال	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	شهر
۱۲	۱۵	تیر	۱۳۹۹	۲۹/۳۷۳	۵۲/۳۲	شیراز

شار حرارتی روی دیواره، غیریکنواخت در نظر گرفته شده است، که طبق رابطه (۲۳) تعریف می‌شود [۲]:

$$LCR = b_3 \theta^3 + b_2 \theta^2 + b_1 \theta^1 + b_0 \quad (23)$$

$$q_w = LCR * I \quad (24)$$

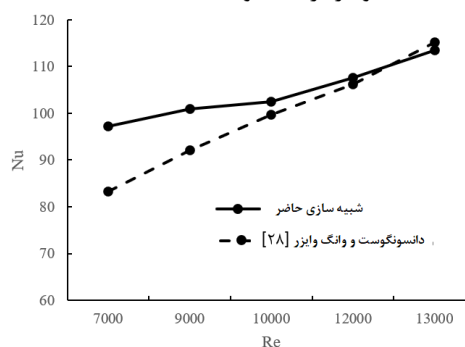
که در رابطه (۲۳)، LCR نسبت غلظت محلی، ϕ زاویه تابش خورشید نسبت به کلکتور و b_1 ، b_2 و b_3 ضرایب ثابت بوده و با زاویه تابش خورشید نسبت به کلکتور تغییر می‌کنند. مقادیر b_0 ، b_1 ، b_2 و b_3 برای زوایا مختلف تابش در جدول (۷)

جدول ۳- دمای خروجی برای شبکه های مختلف

تعداد المان	دمای خروجی
۴۰۹۳۴۸	۳۰۴/۷۸۹۸
۸۱۰۵۱۷	۳۰۵/۰۲۰۹
۱۵۹۳۳۵۵	۳۰۵/۳۸۳۳
۲۰۴۹۸۶۱	۳۰۵/۳۵۵۴

۵- اعتبار سنجی

برای اعتبارسنجی جریان نانوسیال اکسید تیتانیوم درون سیال پایه آب درون لوله جاذب شبیه سازی شد. قطر نانوذرات ۲۱ نانومتر، با غلظت ۱٪ و دمای ورودی ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شد. نتایج شبیه سازی حاضر با نتایج آزمایشگاهی دانسونگوست و وانگ وایزر [۲۸] مقایسه شده و در شکل (۳) نشان داده شده است. جدول (۴) خطای شبیه سازی حاضر نسبت به نتایج تجربی را نشان می‌دهد. همانگونه مشاهده می‌شود، نتایج در رینولدزهای پایین خطایی معادل ۱۴٪ خواهد داشت که با افزایش عدد رینولدز میزان خطا به ۵/۶٪ رسیده و نتایج از تطابق خوبی برخوردار است. علت را می‌توان ناشی از خطای روش تجربی دانست که با افزایش رینولدز کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه شبیه سازی حاضر برای رینولدزهای ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ انجام شده و در این بازه خطای کمتر از ۶٪ است، نتایج حاضر قابل قبول است؛ همچنین دانسونگوست و وانگ وایزر [۲۸] مقادیر دقیق پارامترهای نانوسیال مورد استفاده خود را ارائه نموده‌اند.

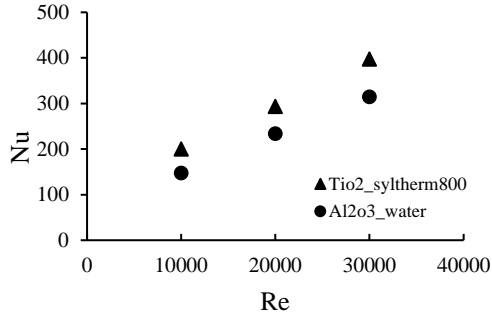


شکل ۳- مقادیر عدد ناسلت برای شبیه سازی حاضر و دانسونگوست و وانگ وایزر [۲۸].

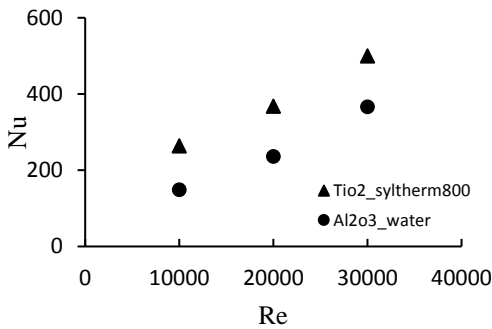
جدول ۴- خطای اعتبار سنجی

خطای میانگین	خطای بیشینه	خطای کمینه
۵/۶٪	۱۴/۳٪	۱/۲٪

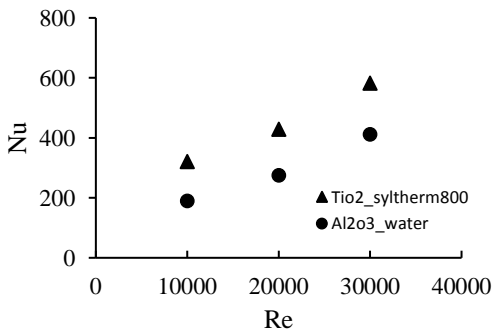
افزایش پیدا می‌کند که باعث می‌شود، انتقال حرارت از طریق جا به جایی افزایش یافته و بازده حرارتی افزایش یابد؛ بنابراین



شکل ۵ - تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت ۱٪



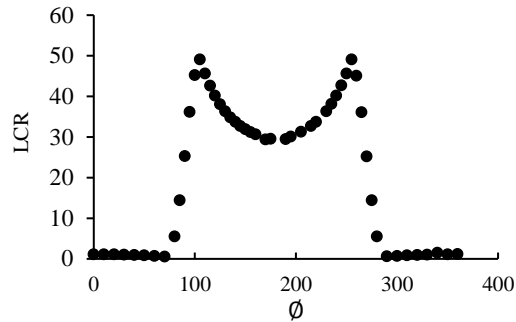
شکل ۶ - تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت ۲٪



شکل ۷ - تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت ۳٪

برای یک مقدار مشخص رینولدز و غلظت یکسان، عدد ناسلت نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب بیشتر است. این اختلاف عدد ناسلت عمدتاً ناشی از تفاوت ضریب انتقال حرارتی هدایتی سیال پایه سیلترم ۸۰۰ در مقایسه با آب است. به عبارت دیگر، هرچه ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال پایه کمتر باشد، عدد

ارائه شده است؛ همچنین در رابطه (۲۴)، I تابش نرمال مستقیم است که برابر 1000 W/m^2 در نظر گرفته شده است. شکل (۴) تغییرات نسبت غلظت محلی برحسب زاویه تابش خورشید را نشان می‌دهد.



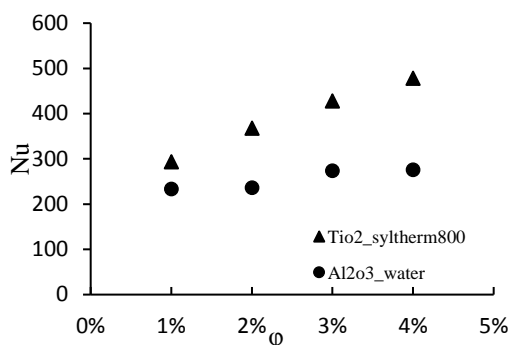
شکل ۴ - تغییرات نسبت غلظت محلی برحسب زاویه تابش خورشید [۶]

جدول ۷ - خواص نانوذرات و سیال پایه

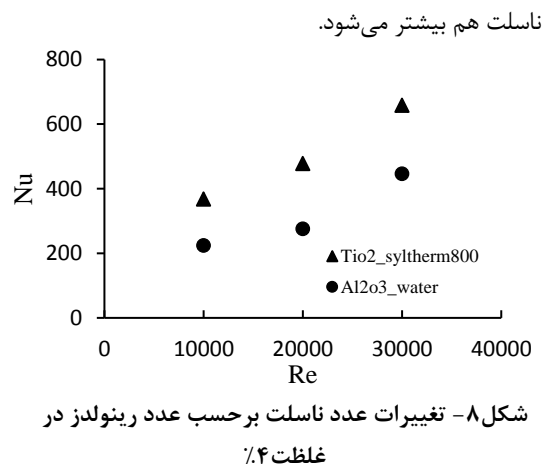
	b_0	b_1	b_2	b_3
$0 < \theta < 75$	$1/112 \times 10^4$	$-0/81 \times 10^{-1}$	$-0/171 \times 10^{-1}$	۰
$75 < \theta < 104$	$1685/403$	$-59/744$	$-0/6878$	$-0/254 \times 10^{-1}$
$104 < \theta < 171$	$327/533$	$-5/2804$	$0/3196$	$-0/660 \times 10^{-1}$
$171 < \theta < 189$	$4957/224$	$-54/886$	$0/1524$	۰
$189 < \theta < 256$	$-440/3785$	$6/97994$	$-0/350$	$-0/596 \times 10^{-1}$
$256 < \theta < 285$	$-4840/387$	$542/7366$	$-2/01905$	$-0/249 \times 10^{-1}$
$285 < \theta < 360$	$-9/607$	$0/057$	$-0/751 \times 10^{-1}$	۰

۶- نتایج

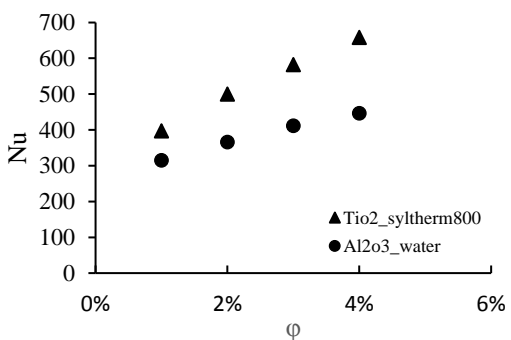
شکل‌های (۵) الی (۸)، تغییرات عدد ناسلت برای رینولدزهای ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ را در غلظت‌های ثابت ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ برای نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ عدد ناسلت افزایش می‌یابد. علت را می‌توان ناشی از این مسئله دانست که با افزایش عدد رینولدز مومنتم سیال، اغتشاش جریان و در نتیجه حرکت توده ای سیال افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در غلظت ۴٪ با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰۰۰ به ۳۰۰۰۰، عدد ناسلت اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و اکسید آلومینیوم-آب به ترتیب ۲۷٪ و ۳۸٪ افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد رینولدز، سرعت نانوسیال ورودی



شکل ۱۰ - تغییرات عدد ناسلت برحسب کسر حجمی در رینولدز ۲۰۰۰۰

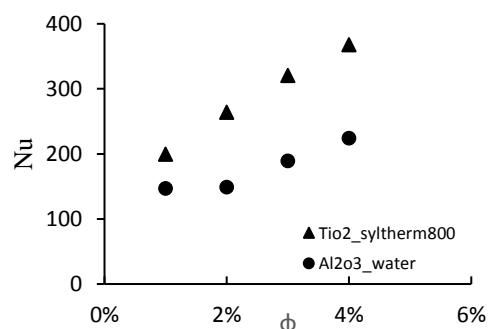


شکل ۸ - تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت ۰.۴٪



شکل ۱۱ - تغییرات عدد ناسلت برحسب کسر حجمی در رینولدز ۲۰۰۰۰

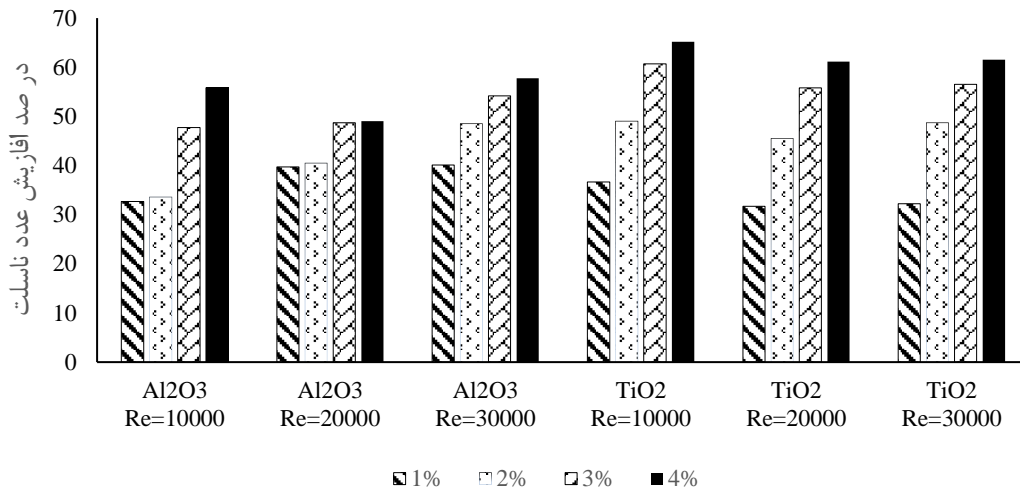
شکل‌های (۹) الی (۱۱)، تغییرات عدد ناسلت برحسب کسر حجمی‌های ۰.۱٪، ۰.۲٪ و ۰.۳٪ در رینولدزهای ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برای نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و اکسید آلومینیوم-آب را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی از ۰.۱٪ تا ۰.۳٪ عدد ناسلت افزایش می‌یابد. به طور مثال در رینولدز ۳۰۰۰۰ با افزایش عدد کسر حجمی از ۰.۳٪ به ۰.۴٪، عدد ناسلت اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و اکسید آلومینیوم-آب به ترتیب ۰.۱۲٪ و ۰.۸٪ افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه جذب انرژی خورشیدی بیشتر شده و به گرما تبدیل می‌شود که این عمل باعث افزایش دمای خروجی سیال شده، اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی افزایش می‌یابد.



شکل ۹ - تغییرات عدد ناسلت برحسب کسر حجمی در رینولدز ۱۰۰۰۰

شکل (۱۲) درصد افزایش عدد ناسلت نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در مقایسه با سیال پایه در عدد رینولدز ثابت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۲) بهترین حالت افزایش عدد ناسلت مربوط به نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ در رینولدز ۱۰۰۰۰ و غلظت ۰.۴٪ و بهترین درصد افزایش نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب مربوط به عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ و غلظت ۰.۴٪ است.

شکل (۱۳) و (۱۴) تغییرات PEC را برحسب عدد رینولدز و کسر حجمی‌های متفاوت برای نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب نشان می‌دهد. عدد بی‌بعد PEC برای همه حالات بزرگتر از یک بوده و عامل انتقال حرارت بر عامل اصطکاک غلبه می‌کند.



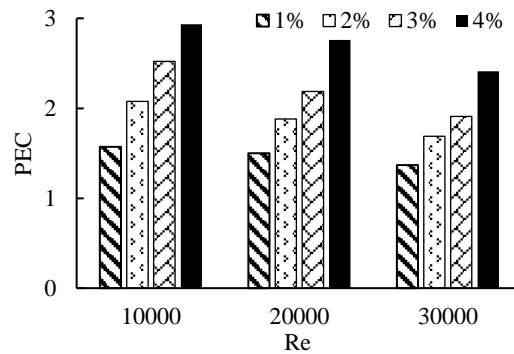
شکل ۱۲- درصد افزایش عدد ناسلت اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و اکسید آلومینیوم- آب نسبت به سیال پایه

۷- جمع بندی

در این پژوهش انتقال حرارت لوله جاذب یک کلکتور سهموی در شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه سازی از اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و اکسید آلومینیوم-آب به عنوان سیال عامل استفاده شد. جریان به صورت دو فازی، به روش مخلوط در نرم افزار Ansys-Fluent شبیه سازی شد. لوله جاذب تحت شار حرارتی غیریکنواخت، دمای سیال ورودی ۳۰۰ کلوین و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ در نظر گرفته شد.

عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب در غلظت‌های مختلف ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ برای رینولدزهای ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ محاسبه و مقادیر مربوط به آنها با یکدیگر مقایسه شد.

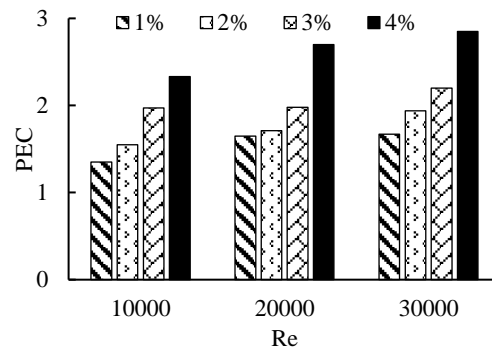
نتایج نشان داد با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه، عدد ناسلت و میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افت فشار در جریان می‌شود. در صورتی افزودن نانوذرات در سیال پایه قابل قبول است که عامل انتقال حرارت بر عامل اصطکاک غلبه کند. در همه حالت‌ها مقدار PEC بزرگتر از یک است که بیانگر این مسئله است که



شکل ۱۳- تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز و

کسر حجمی‌های متفاوت نانوسیال اکسید تیتانیوم-

سیلترم ۸۰۰



شکل ۱۴- تغییرات PEC بر حسب عدد رینولدز و

کسر حجمی‌های متفاوت نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب

- [2] Sokhansefat T, Kasaeian A B and Kowsary F (2014) Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 33: 636-644.
- [3] Basbous N, Taqi M and Belouaggadia N (2015) Numerical study of a parabolic trough collector using a nanofluid. *Asian j. curr. eng. Math.* 4(3): 40-44.
- [4] Bellos E and Tzivanidis C (2017) Optimization of a solar-driven trigeneration system with nanofluid-based parabolic trough collectors. *Energies* 10(7): 848.
- [5] Vanaki S M, Ganesan P and Mohammed H A (2016) Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: a review. *Renew. Sust. Energ. Rev* 54: 1212-1239.
- [6] Basbous N, Taqi M and Janan M A (2016, November) Thermal performances analysis of a parabolic trough solar collector using different nanofluids. *International renewable and sustainable energy conference (IRSEC)* (pp. 322-326). IEEE.
- [7] Ghasemi S E, Ranjbar A A (2017) Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants. *Int. J. Hydrog. Energy* 42(34): 21626-21634.
- [8] Kandwal S and Lal K G (2015) An Experimental Investigation into Nanofluids (CuO-H₂O & CuO-Ethylene Glycol) Based Parabolic Solar Collector.
- [9] Chaudhari K S, Walke P V Wankhede U S and Shelke R S (2015) An experimental investigation of a nanofluid (Al₂O₃+ H₂O) based parabolic trough solar collectors. *Curr. Appl. Sci. Technol.* 9(6): 551-557.
- [10] Menbari A, Alemrajabi A A and Rezaei A (2016) Heat transfer analysis and the effect of CuO/Water nanofluid on direct absorption concentrating solar collector. *Appl. Therm. Eng.* 104: 176-183.
- [11] Abed N, Afgan I, Cioncolini A, Iacovides H, Nasser A and Mekhail T (2020) Thermal performance evaluation of various nanofluids with non-uniform heating for parabolic trough collectors. *Case Stud. Therm. Eng.* 22: 100769.
- [12] Hachicha A A, Said Z, Rahman S M A and Al-Sarairah E (2020) On the thermal and thermodynamic analysis of parabolic trough collector technology using industrial-grade MWCNT based nanofluid. *Renew. Energy* 161: 1303-1317.
- [13] Al-Rashed A A, Alnaqi A A and Alsarraf J (2021) Numerical investigation and neural network modeling of the performance of a dual-fluid parabolic trough solar collector containing non-Newtonian water-CMC/Al₂O₃ nanofluid. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 48: 101555.

استفاده از این دو نانوسیال عملکرد حرارتی کلکتور را افزایش داده و این عامل بر افت فشار غلبه دارد.

بیشترین درصد افزایش عدد ناسلت مربوط به نانوسیال اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ با غلظت ۴٪ در رینولدز ۱۰۰۰۰ می باشد. از طرفی میزان انتقال حرارت با افزایش غلظت در هر دو نانوسیال افزایش یافته است، ولی PEC برای اکسید تیتانیوم-سیلترم ۸۰۰ کاهش و برای اکسید آلومینیوم-آب افزایش می یابد.

۸- علائم، نشانه‌ها و ارقام

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، J/Kg.K
f	افت فشار
d	قطر
G	نرخ تولید آشفستگی
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی، W/m ² K
I	تابش نرمال مستقیم، W/m ²
k	ضریب هدایت حرارتی، W/m K
K	نرخ تولید آشفستگی
L	طول کلکتور، m
LCR	نسبت غلظت محلی
Nu	عدد ناسلت
P	فشار، Pa
q	شار حرارتی دیواره، W/m ²
Re	عدد رینولدز
T	دما، K
v	سرعت، m/s
ρ	چگالی، Kg/m ³
μ	ویسکوزیته، N.s/m ²
ϕ	کسر حجمی
ΔP	اختلاف فشار، Pa
ϕ	زاویه برخورد پرتو خورشید به کلکتور

مراجع

- [1] Kasaeian A B, Sokhansefat T, Abbaspour, M J and Sokhansefat M (2012) Numerical study of heat transfer enhancement by using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid in a parabolic trough collector tube. *World acad. eng. technol.* 69: 1154-1159.

- [21] Huang Z, Yu GL, Li ZY, Tao WQ (2015) Numerical study on heat transfer enhancement in a receiver tube of parabolic trough solar collector with dimples protrusions and helical fins. *Energy Procedia* 69:1306–16.
- [22] Safaei, Mohammad Reza, A. Jahanbin, Ali Kianifar, Samira Gharekhani, Akeel Shebeeb Kherbeet, Marjan Goodarzi, and Mahidzal Dahari. "Mathematical modeling for nanofluids simulation: a review of the latest works." *Modeling and simulation in engineering sciences* (2016): 189-220.
- [23] Naphon P, Nakharintr L(2015) Turbulent two phase approach model for the nanofluids heat transfer analysis flowing through the minichannel heat sinks. *Int. J. Heat Mass Transf.* 82: 388–95.
- [24] Xuan Y, Roetzel W (2000) Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int. J. HeatMass Transf.* 43(19): 3701–3707.
- [25] Yu W, Choi SU ((2003) The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *J Nanopart Res* 5 167-171.
- [26] Tijani, A.S. and Roslan, A M (2014) Simulation analysis of thermal losses of parabolic trough solar collector in Malaysia using computational fluid dynamics. *Proc. Technol.* 15: 841-848
- [27] Ekiciler R, Arslan K, Turgut O and Kurşun B (2020) Effect of hybrid nanofluid on heat transfer performance of parabolic trough solar collector receiver. *J. Therm. Anal. Calorim* 143: 1-18.
- [28] Duangthongsuk W, Wongwises S (2010) An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *Int. J. Heat Mass Transf.* 53(1-3): 334-344.
- [14] Hong K, Yang Y, Rashidi S, Guan Y. and Xiong Q (2021) Numerical simulations of a Cu–water nanofluid-based parabolic-trough solar collector. *J. Therm. Anal. Calorim.* 143 :4183-4195.
- [15] Farooq M, Farhan M, Ahmad G, Usman M, Sultan M, Hanif M S, Imran M, Anwar S, El-Sherbeeney A M and Shakir M A (2022) Thermal performance enhancement of nanofluids based parabolic trough solar collector (NPTSC) for sustainable environment. *Alex. Eng. J.* 61(11): 8943-8953.
- [16] Mustafa J, Alqaed S and Sharifpur M (2022) Numerical study on performance of double-fluid parabolic trough solar collector occupied with hybrid non-Newtonian nanofluids: Investigation of effects of helical absorber tube using deep learning. *Eng Anal Bound Elem* 140: 562-580.
- [17] Olia H, Torabi M, Bahiraei M, Ahmadi M H, Goodarzi M and Safaei M R (2019) Application of nanofluids in thermal performance enhancement of parabolic trough solar collector: state-of-the-art. *Appl. Sci.* 9(3): 463.
- [18] Kaloudi E, Papanicolaou E and Belessiotis V (2016) Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model. *Renew. Energy*, 97: 218-229.
- [19] Wen D, Ding Y (2004) Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *Int. J. Heat Mass Transf.* 47: 5181–5188.
- [20] Takabi B, Shokouhmand, H (2015) Effects of Al₂O₃–Cu/water hybrid nanofluid on heat transfer and flow characteristics in turbulent regime. *J. Mod. Phys. C* 26(04): 1550047.