شبیه‌سازی عددی عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال نانولوله کربنی-آب/اتیلن‌گلیکول

شهرام دلفانی[۱]، مریم کرمی[۲]

[۱] عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش تأسیسات مکانیکی و الکتریکی

[۲] عضو هیأت علمی گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی

نویسنده مسئول: شهرام دلفانی، delfani@bhrc.ac.ir

چکیده

عملکرد مناسب کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم (حجمی) که در آنها تابش خورشیدی مستقیما توسط محیط سیال دریافت می‌شود، باعث شده تحقیقات پیرامون این نوع کلکتور طی سالهای اخیر روند رو به رشدی داشته باشد. در این تحقیق، عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانولوله‌های کربنی پراکنده شده در مخلوطی از آب و اتیلن‌گلیکول به عنوان سیال عامل به صورت عددی بررسی شده است. یک مدل عددی سه‌بعدی برای بررسی تأثیر مشخصه‌های مختلف مانند ضریب گسیل سطح داخلی و عمق کلکتور، همچنین جزءحجمی و دبی سیال عامل برپارامترهای عملکردی کلکتور یعنی دمای خروجی و کارایی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت ۱۵ توسعه یافته است. برای گسسته‌سازی و حل معادله انتقال تابش و معادلات بقا به ترتیب روش ابعاد گسسته و روش سیمپل بکار رفته است. خواص حرارتی و تابشی نانوسیال‌های تهیه شده با جزءحجمی‌های مختلف با استفاده از روشهای تجربی تعیین شده است. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از سیال شفاف، کارایی و دمای خروجی کلکتور با افزایش ضریب گسیل سطح داخلی کلکتور افزایش می‌یابد. افزایش جزء حجمی نانوسیال و عمق کلکتور نیز به افزایش کارایی و دمای خروجی منجر می‌شود.

واژگان کلیدی: کلکتور خورشیدی جذب مستقیم، شبیه‌سازی عددی، نانوسیال، نانولوله کربنی

۱- مقدمه

آب گرمکن‌های خورشیدی، به عنوان یک فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر با کاربری در ساختمان‌های مسکونی، استفاده از سوخت‌های فسیلی همچنین مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آن را کاهش می‌دهد. کلکتور خورشیدی، به عنوان جزء اصلی این سیستم‌ها، نقش مهمی در کارایی تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی مفید، ایفا می‌کند. کارایی کلکتورها براساس اینکه چه مقدار از انرژی حرارتی برخوردی روی سطح کلکتور به سیال عامل منتقل می‌شود، تعریف می‌گردد. کمینه کردن اتلاف حرارتی خروجی و بیشینه کردن جذب تابش خورشید، به بهبود کارایی کلکتور منجر خواهد شد.

نقاط ضعف کلکتورهای سطحی (مانند کلکتورهای صفحه تخت) مانند محدودیت در چگالی شار ورودی، اتلاف حرارتی نسبتا زیاد و مشکلات مربوط به خوردگی باعث شد که اواخر دهه ۸۰ از مفهوم جذب مستقیم برای جذب تابش خورشید بهره گرفته شود. در کلکتورهای جذب مستقیم یا حجمی، عبور نور از حجم سیال به جای محدود کردن آن به سطح، باعث افزایش کارایی کلکتور می‌گردد [۱]؛ در حالی که انواع دیگر کلکتور، تابش خورشید را توسط سطح جذب می‌کنند و این امر به بالارفتن دمای سطح و در نتیجه، افزایش اتلافات حرارتی به محیط بیرون از طریق سطح منجر می‌شود.

از سوی دیگر، سیال‌های عامل رایج در کلکتورهای خورشیدی مثل (آب، اتیلن‌گلیکول، پروپیلن‌گلیکول) در جذب مستقیم نور خورشید (به دلیل شفافیت و ضریب عبور نور بالا) کارایی مناسبی ندارند و قسمت اعظم آن را از خود عبور می‌دهند؛ این سیال‌ها به ترتیب ۱۳/۵۷٪، ۹/۲۵۰٪ و ۹/۰۶۲٪ از انرژی خورشیدی ورودی را در عبور از لایه سیال با ضخامت ۱۰ میلی‌متر جذب می‌کنند [۲]. بنابراین مفهوم جذب مستقیم زمانی مفید خواهد بود که سیال عامل مناسبی بکار رود یا برای بهبود خواص سیال عامل متداول راهکاری اندیشیده شود.

یکی از اولین کلکتورهای جذب مستقیم با استفاده از سیال عامل مایع، کلکتوری بود که با استفاده از یک سیال سیاه (آب دارای جوهر هندی) برای جذب مستقیم تابش و بهبود کارایی در اوخر دهه ۱۹۷۰ آزمایش گردید [۳]. این سیال سیاه، محلول آب حاوی ذرات سیاه رنگ با تجمعاتی به اندازه میکرون بود که در لوله‌های پلاستیکی شفاف که به صورت کویلی درآمده بود، جریان یافته و در معرض تابش خورشید قرار گرفته بود. میناردی و چانگ در تحقیق خود بیان کردند که به دلیل حذف فلز از ساختمان کلکتور و استفاده از شیشه یا پلاستیک علاوه بر کاهش هزینه‌ها، مشکلات خوردگی نیز مرتفع خواهد شد [۳].

پیشرفت‌های فناوری نانو باعث گردید تا در سال‌های اخیر محققان تأثیر استفاده از نانوسیال (سوسپانسیون مایع- نانوذره) به عنوان سیال عامل را روی بهبود کارایی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم در مقایسه با کلکتور صفحه تخت مطالعه کنند. در حقیقت، جذب مستقیم می‌تواند با پراکنش توسط ذرات کوچک داخل سیال عامل به شدت افزایش یابد. علاوه بر مزیت جذب حجمی، مساحت سطح ۱ گرم ذرات ۰/۵ میکرونی حدود $۶m^۲$ است که منجر به مساحت زیاد جذب در غلظت‌های نسبتا کم ذره می‌گردد [۴]. به عنوان اولین تحقیق، تیاگی و همکاران[۵] سوسپانسیون نانوذره آلومینیوم در آب را به عنوان سیال عامل در نظر گرفته و با مطالعه عددی عملکرد کلکتور، به این نتیجه دست یافتند که تحت شرایط کاری مشابه، افزایش کارایی ۱۰٪ با استفاده از کلکتور جدید نسبت به یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت بدست می‌آید. اولین مطالعه تجربی روی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم نانوسیال - بنیان، توسط اتانیکار و همکاران [۶] انجام شد که در آن، نتایج حاصل از مدل عددی براساس کار تیاگی و همکاران [۵] با نتایج تجربی حاصل از ساخت یک میکروکلکتور مقایسه شده و افزایش حدود ۵ درصد کارایی کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نانوذرات گرافیت، نانولوله کربنی و نقره نسبت به کلکتورهای معمول تأیید گردید.

لاجوردی و همکاران [۷] کاربرد نانوسیال‌های گرافیت را در جذب تابش خورشیدی به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال گرافیت با جزء حجمی ۰/۰۰۰۰۲۵٪ بیش از ۵۰٪ تابش ورودی را جذب می‌کند؛ درحالی که، تنها ۰/۰۰۴۵ دلار بر لیتر افزایش هزینه را در بردارد.

انتقال حرارت و تولید انتروپی در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم حاوی نانوسیال مس-آب توسط پروین و همکاران [۸] با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی معادلات حاکم، مورد بررسی قرار گرفته است. تمرکز مطالعه آن‌ها روی تأثیر جزء حجمی نانوذرات و عدد رینولدز روی عدد نوسلت، تولید انتروپی و کارایی کلکتور بوده است. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش جزء حجمی و عدد رینولدز، عدد نوسلت و تولید انتروپی افزایش می‌یابد.

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که مهم‌ترین مطالعات عددی انجام شده درباره کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم دما پایین با استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل، مطالعه عددی تیاگی و همکاران [۵] و مطالعه عددی پروین و همکاران [۸] است که در اولی معادله تابش به صورت یک‌بعدی و معادله بقای انرژی به صورت دوبعدی و در دومی معادله تابش به صورت یک‌بعدی و معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی به صورت دوبعدی حل شده است. ضمن اینکه، تعیین خواص حرارتی و تابشی در آنها با استفاده از روشهای عددی صورت گرفته است. بنابراین تحلیل عددی جامع‌تر عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم به عنوان کلکتور جاذب تابش در یک آبگرمکن خورشیدی، ضروری به نظر می‌رسد و در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

به همین منظور، عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم نانوسیال بنیان با توسعه یک مدل سه‌بعدی بررسی می‌شود. پس از انتخاب و تهیه نانوسیال مناسب، به عنوان اولین گام، خواص حرارتی و تابشی نانوسیال با استفاده از روشهای تجربی اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه، مدل عددی براساس معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی به طور همزمان با معادله انتقال تابش حاکم بر کلکتور جذب مستقیم توسعه داده می‌شود. پس از بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه، مدل با استفاده از نتایج مطالعات عددی دیگران صحت‌سنجی می‌شود. سپس، تأثیر مشخصه‌های عملکردی بر کارایی کلکتور مانند نوع سطح پایین داخلی و عمق کلکتور، دبی ورودی و جزء حجمی نانوسیال با استفاده از این مدل عددی بررسی می‌گردد.

۲- مدل ریاضی

مدل عددی توسعه‌یافته در این تحقیق، مدل ترکیبی شامل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و معادله انتقال تابش برای بررسی رفتار کلکتورهای جذب مستقیم است. بدین منظور

معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و همچنین انتقال تابش به صورت همزمان حل شده و علاوه بر تعیین توزیع دمای داخل کلکتور، کارایی آن نیز پیش‌بینی می‌گردد.

۲-۱- معادلات بقا

معادله بقای جرم برای جریان سه‌بعدی پایای سیال تراکم‌ناپذیر داخل کلکتوربه شکل زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

معادلات بقای مومنتم برای جریان سه‌بعدی پایای سیال تراکم‌ناپذیر داخل کلکتور به صورت زیر است:

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad (۲\text{- الف})$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \qquad (۲\text{- ب})$$

$$\rho\left(u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \qquad (۲\text{- پ})$$

معادله بقای انرژی برای جریان سه‌بعدی پایای سیال تراکم-ناپذیر با جمله تولید انرژی تابشی، به شکل نهایی زیر درمی‌آید:

$$\rho c_P\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right)+\mu\varphi-\nabla\cdot q_r \qquad (۳)$$

که در آن، $\boldsymbol{\varphi}$تلفات لزجت، $\boldsymbol{\rho}$چگالی، $\boldsymbol{c_p}$ گرمای ویژه، $\boldsymbol{k}$ضریب هدایت حرارتی و $\boldsymbol{q_r}$ شار حرارتی تابشی است که با حل معادله انتقال تابش قابل محاسبه است.

هدف، حل معادله (۱) تا (۳) در هندسه کلکتور جذب مستقیم به منظور بدست آوردن میدان سرعت، فشار و دماست. میدان محاسباتی مورد استفاده در حل معادلات و شبیه‌سازی عملکرد کلکتور در شکل ۱ نشان داده شده است. فرض می‌شود که نانوذرات با سیال پایه دمای یکسانی دارد. نسبت سطح به حجم زیاد این ذرات به انتقال حرارت آنی آنها به محیط پیرامون منجر می‌شود. همچنین فرض می‌شود که نانوذرات برای مدت نامحدود در سیال به صورت معلق باقی بمانند و همراه با سیال و با سرعت لغزش ناچیز حرکت می‌کنند [۹].

شرایط اولیه و مرزی زیر در تحلیل انرژی کلکتور بکار می‌رود:

$$x=0, 0<y<H, 0<z<W:\ T(0,y,z)=T_{in}, u(0,y,z)=U_0 \qquad (۴\text{- الف})$$

$$y=0, x,z>0: -k\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0}=(1-\tau_g-\rho_g)G_T-h(T_g-T_{amb}) \qquad (۴\text{- ب})$$

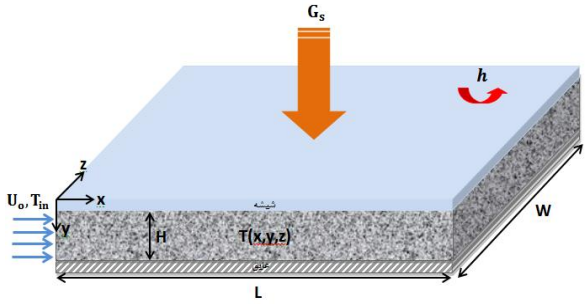
که در آن، $\boldsymbol{T_{in}}$ دمای سیال ورودی، $\boldsymbol{U_0}$ سرعت سیال ورودی، $\boldsymbol{G_T}$ شار خورشیدی برخوردی روی کلکتور و $\boldsymbol{h}$ضریب انتقال حرارت مرکب جابجایی و تشعشع با محیط در دمای $\boldsymbol{T_{amb}}$، $\boldsymbol{\tau_g}=0/9$ و $\boldsymbol{\rho_g}=0/05$ضرایب عبور و انعکاس شیشه است. $\boldsymbol{T_g}$دمای سطح بالای شیشه است که از حل معادله هدایت حرارتی در شیشه بدست می‌آید. به عبارت دیگر، سطح فوقانی شیشه، حرارت را با مکانیزم‌های جابجایی و تشعشعی از دست می‌دهد. سطح سمت چپ کلکتور در شکل ۱ به عنوان ورودی با دما و سرعت ثابت در نظر گرفته می‌شود. در سایر سطوح یعنی پشت و دیواره‌های کلکتور، شرط مرزی آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. در خروج نیز از شرط مرزی فشار نسبی صفر استفاده شده است. شرط مرزی عدم لغزش نیز در دیواره‌ها لحاظ شده است.

۲-۲- معادله انتقال تابش

در معادله بقای انرژی (معادله ۳) جمله شار حرارتی تابشی (q_r) جزء مجهولات مسأله است که برای محاسبه آن نیاز به تعیین تغییرات شدت تابش در سیال است؛ این تغییرات براساس معادله انتقال تابش که تغییرات تابش را در یک محیط جذب‌کننده، گسیل‌کننده و پراکنش‌کننده تعیین می‌کند، محاسبه می‌گردد [۱۰]:

$$\frac{di_\lambda}{dS}=-(K_{a\lambda}+K_{s\lambda})i_\lambda(S)+K_{a\lambda}i_{\lambda b}(S)+\frac{K_{s\lambda}}{4\pi}\int_{\omega_i=0}^{4\pi} i_\lambda(S,\omega_i)\,\Phi_\lambda(\omega,\omega_i)d\omega_i \qquad (۵)$$

که $\boldsymbol{i_\lambda}$شدت تابش طیفی، $\boldsymbol{i_{\lambda b}}$گسیل جسم سیاه پلانک، Φ تابع فاز پراکنش، ω زاویه فضایی و S مسیر دلخواه است. $K_{a\lambda}$ ضریب جذب طیفی و $K_{s\lambda}$ ضریب پراکنش طیفی است. جمع این ضرایب $K_{e\lambda}$ضریب میرایی طیفی را نتیجه می‌دهد.



شکل۱- میدان محاسباتی سه‌بعدی کلکتور جذب مستقیم

پراکنش توسط نانوذرات براساس تقریب پراکنش رایلی (که در آن پارامتر اندازه بسیار کوچکتر از یک است یعنی $\alpha = ۱$ $\ll \frac{\pi D}{\lambda}$) در مقایسه با تابش جذب شده کوچک است [۶]. از نظر فیزیکی، پراکنش رایلی به عنوان رژیمی که در آن اندازه ذره بسیار کوچکتر از طول موج تابش برخوردی است، تعریف می شود. براساس تقریب پراکنش رایلی و فرض پراکنش مستقل (شکل ۲) [۱۱] که در محدوده جزء حجمی نانوذرات کمتر از ۰/۶٪ است، ضریب میرایی برای یک ذره کروی از رابطه زیر بدست می آید:

$$K_{e\lambda} = \frac{۳ f_v Q_{e\lambda}(\alpha, m)}{۲D} \qquad (۶)$$

$\boldsymbol{Q_{e\lambda}}$ کارایی میرایی و $\boldsymbol{m(= (n+ik)_{particles}/n_{fluid})}$ ضریب شکست نرمال‌شده ذره است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در اندازه‌های ذره و جزء حجمی‌های بسیار کوچک، فرض رژیم پراکنش مستقل که محاسبات خواص اپتیکی را آسان می‌کند، قابل استناد است. درنتیجه، کارایی میرایی، مجموع کارایی جذب $(\boldsymbol{Q_{a\lambda}})$ و پراکنش $(\boldsymbol{Q_{s\lambda}})$ است که از روابط زیر بدست می‌آید [۵]:

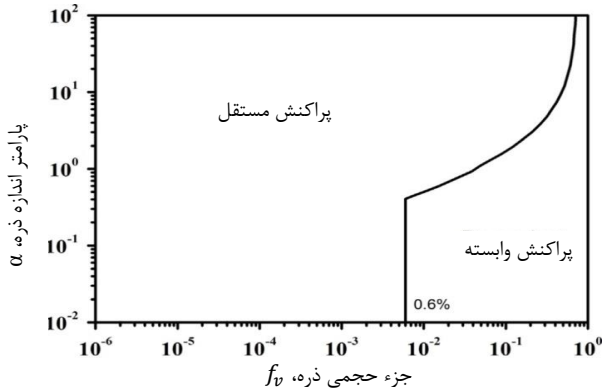
$$\boldsymbol{Q_{a\lambda} = 4\alpha \times Im\left\{\frac{m^2-1}{m^2+2}\left[1 + \frac{\alpha^2}{15}\left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)\frac{m^4+27m^2+38}{2m^2+3}\right]\right\}} \qquad (۷\text{-الف})$$

$$\boldsymbol{Q_{s\lambda} = \frac{8}{3}\alpha^4\left|\left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)\right|^2} \qquad (۷\text{- ب})$$

با بررسی معادله (۸) می‌توان دریافت که کارایی پراکنش $(Q_{s\lambda})$ با توان چهارم اندازه ذره تغییر می‌کند. بعلاوه، معلوم می‌شود که کارایی جذب $(Q_{a\lambda})$ غالبا رابطه خطی با اندازه ذره دارد. این امر حتی با وجود عبارت $\alpha^۲$ در جمله موهومی معادله (۷- الف) درست است چرا که $\alpha \ll ۱$. بنابراین، می‌توان از جمله سوم معادله انتقال تابش یعنی ازدیاد تابش در اثر پراکنش تابش برخوردی توسط محیط صرف نظر نمود $(\cong K_{s\lambda}\cdot)$.

با ساده‌سازی‌های فوق، معادله (۵) به معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{di_\lambda}{dS} = -K_{a\lambda} i_\lambda(S) + K_{a\lambda} i_{\lambda b}(S) \qquad (۸)$$



شکل ۲- رژیم پراکنش مستقل و وابسته [۱۱]

این معادله نه تنها کاهش شدت تابش طیفی در راستای S را بر حسب ضریب میرایی نانوسیال نشان می‌دهد؛ بلکه افزایش آن را نیز بواسطه تابش حرارتی از نانوسیال در دماهای بالا لحاظ می‌کند. گسیل تابش ناشی از بالا رفتن دمای محیط $(i_{\lambda b})$ با استفاده از رابطه تابش جسم سیاه یعنی رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$i_{\lambda b}(\lambda, T(x,y,z)) = \frac{۲hc^۲}{\lambda^۵\left[exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - ۱\right]} \qquad (۹)$$

که h ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن، c سرعت نور در محیط و λ طول موج است.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، کلکتور در بالا توسط شیشه‌ای که ضریب عبور نور بالایی دارد، محدوده شده است. سطح پایین کلکتور می‌تواند بازتابنده کامل $(\rho_w \approx ۱)$ در نتیجه $(\varepsilon_w \approx ۰)$ و یا جاذب کامل $(\varepsilon_w \approx ۰)$، باشد. پس از حل معادله انتقال تابش، شار حرارتی تابشی برای محیط غیرپراکنشی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۰]:

$$\nabla \cdot q_r(S) = 4\pi \int K_{a\lambda} \left[i_{\lambda b}(\lambda, S) - \frac{1}{4\pi} \int_{\omega_i=0}^{4\pi} i_\lambda(\lambda, S, \omega) d\omega_i \right] d\lambda \quad (10)$$

در نهایت، پس از حل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی همزمان با معادله انتقال تابش، توزیع دمای خروجی از کلکتور و در نتیجه، کارایی آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\dot{m} c_P (\bar{T}_{out} - T_{in})}{A G_T} \quad (11)$$

که $\dot{m}$ نرخ جریان جرمی سیال جاری در کلکتور، T_{in} و $\bar{T}_{out}$ دماهای متوسط ورودی و خروجی سیال است. A سطح بالایی کلکتور و G_T شار خورشیدی برخوردی روی کلکتور است.

۳- تهیه نانوسیال و خواص تابشی و حرارتی آن

در این تحقیق، از نانولوله کربنی عاملدار (با گروه اسیدی کربوکسیل)، برای تهیه نانوسیال‌ها بهره گرفته شده است. از مخلوط ۷۰٪ آب و ۳۰٪ اتیلن‌گلیکول (حجمی) به عنوان سیال پایه برای تهیه نانوسیال‌ها استفاده شده است. از میان روش‌های موجود جهت تهیه نانوسیال، از روش دومرحله‌ای استفاده شده است. در این روش، مقدار معین از نانوذره مورد نظر با استفاده از التراسونیک میله‌ای مدل هیلشر ۴۰۰ وات به مدت ۳۰ دقیقه مستقیماً با سیال پایه مخلوط می‌شود. به منظور جلوگیری از گرمایش بیش از حد، مخلوط به طور متناوب التراسونیک می‌شود. مدت زمان استراحت معمولاً ۲ دقیقه در نظر گرفته می‌شود تا فرصت لازم برای خروج حرارت از نمونه تأمین شود [۱۲]. مقدار نانو ماده لازم برای تهیه نمونه‌های نانوسیال با جزءحجمی مختلف در جدول ۱ آمده است.

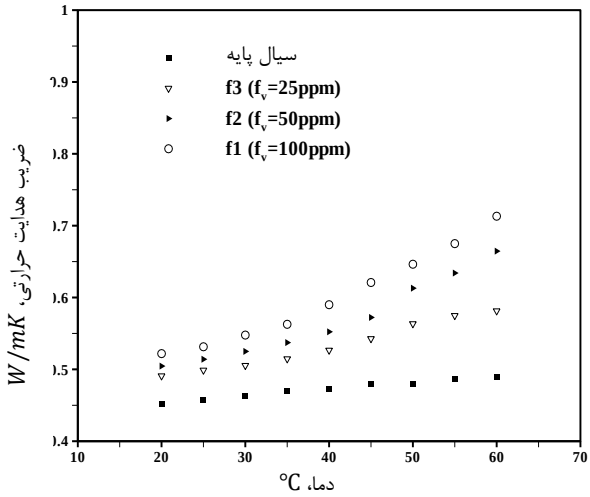
تعیین خواص تابشی و ترموفیزیکی نانوسیال‌های تهیه شده در این تحقیق، گام اول در بررسی عملکرد کلکتور جذب مستقیم است. خواص ترموفیزیکی مهم در معادلات حاکم بر سیستم‌های انتقال حرارت شامل ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی، لزجت و ضریب هدایت حرارتی است. در صورتی که سیال عامل سیستم حرارتی، نانوسیال باشد، باید از خواص ترموفیزیکی مربوط به نانوسیال در حل معادلات بهره برد. در محدوده جزء حجمی مورد استفاده در این تحقیق ($f_v < 10^{-4}$)، می‌توان چگالی، ظرفیت گرمایی و لزجت نانوسیال را با دقت بالا مانند سیال پایه در نظر گرفت [۹]. تنها خاصیت ترموفیزیکی نانوسیال که تغییر قابل توجهی نسبت به سیال پایه از خود نشان می‌دهد، ضریب هدایت حرارتی است. افزایش این خاصیت طوری است که حتی در غلظت‌های پایین نانوسیال نیز مشاهده می‌شود [۱۲]. بنابراین صرف نظر کردن از تغییر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه، خطای قابل توجهی را در مدل عددی ایجاد خواهد کرد. با توجه به توضیحات فوق، در این تحقیق، علاوه بر تعیین خواص تابشی، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها نیز اندازه‌گیری شده و در مدل عددی لحاظ شده است.

۳-۱- خواص حرارتی

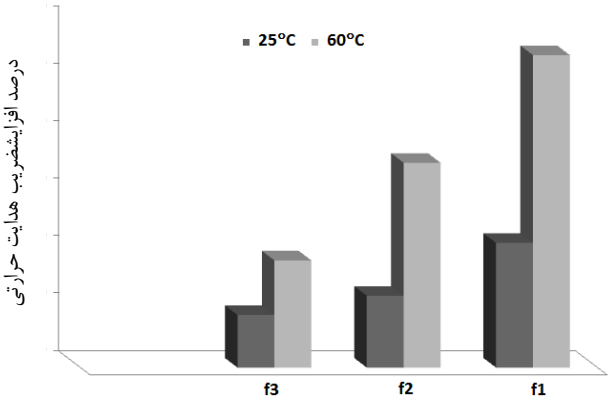
در این تحقیق از روش سیم داغ گذرا برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها توسط دستگاه آنالیز حرارتی ساخت دکاگون آمریکا (KD۲ Pro thermal analyzer Decagon devices, Inc., USA) بهره گرفته شده است. در هر آزمایش برای هر نمونه نانوسیال سه اندازه‌گیری به صورت مجزا (با دقت اندازه گیری ±۵٪) و با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه صورت گرفته و در نهایت میانگین عددی آنها به عنوان ضریب هدایت حرارتی نمونه محاسبه و گزارش شده است. در شکل ۳ ضریب هدایت حرارتی سه نمونه نانوسیال نانولوله کربنی با جزء حجمی‌های متفاوت در دماهای مختلف نشان داده شده است. از نتایج پیداست که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها با افزایش دما، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها با افزایش جزء حجمی در سیال پایه نیز بالا می‌رود. این امر بدلیل حضور نانوذرات بیشتر با ضریب هدایت حرارتی بالاتر نسبت به سیال پایه است. به عنوان مثال، نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش ضریب هدایت حرارتی نمونه f^3 با جزء حجمی ۲۵ppm نسبت به سیال پایه، ۹/۲٪ در ۲۵°C و ۱۸/۶٪ در ۶۰°C است، درحالی که این افزایش برای نمونه f^1 با جزء حجمی ۱۰۰ ppm، ۱۰/۰٪ در ۲۵°C به ۵۴/۴٪ در ۶۰°C است.

جدول ۱- جزء حجمی و جرم نانومواد در ۱۰۰ میلی‌لیتر سیال پایه

نمونه	جزء حجمی (ppm)	جرم نانوماده (میلی‌گرم)
f۱	۱۰۰	۶۴
f۲	۵۰	۳۲
f۳	۲۵	۱۶



شکل ۳- تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌های نانولوله کربنی با دما برای جزء حجمی‌های مختلف



شکل ۴- درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های نانوسیال نانولوله کربنی نسبت به سیال پایه در دماهای ۲۵ °C و ۶۰°C

از شکل ۴ همچنین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضریب هدایت حرارتی در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین، بارزتر است. چرا که علاوه بر افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه با دما، ضریب هدایت حرارتی نانوذرات نیز با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

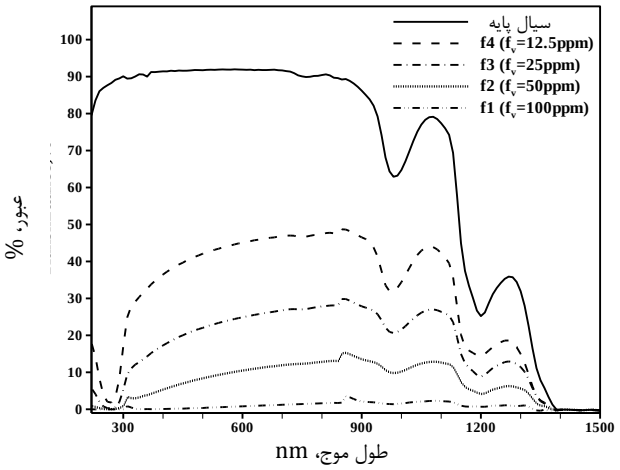
۳-۲- خواص تابشی

با بررسی خواص تابشی می‌توان جزء حجمی بهینه که در آن بیشترین جذب تابش صورت می‌گیرد، تعیین نمود. به همین منظور، طیف‌های عبور نور از نمونه‌های نانوسیال با استفاده از اسپکتروفوتومتر دوپرتویی ساخت شرکت Perkin-Elmer Lambda ۱۰۵۰ با دقت ٪۰.۰۰۰۴± اندازه‌گیری شده است. تأثیر بازتاب‌های چندگانه در سطح مشترک هوا، شیشه و سیال ناچیز فرض شده است. تئوری محیط مؤثر نشان می‌دهد که این فرض برای جزء حجمی‌های کم درست است [۱۳]. یک کوئت از جنس کوارتز با طول مسیر ۱۰ میلی‌متر با نانوسیال پر می‌شود. در پرکردن کوئت دقت می‌شود تا از وجود هرگونه حباب جلوگیری شود. هر اندازه‌گیری برای سه بار تکرار می‌شود تا دقت نتایج تضمین شود.

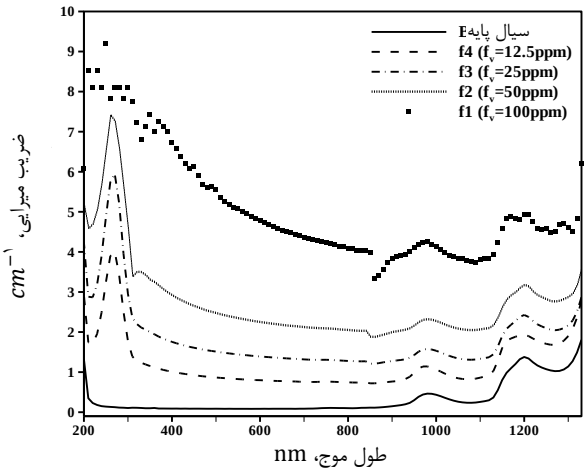
طیف‌های عبور نور از نمونه‌های نانوسیال نانولوله کربنی در مقابل هوا در شکل ۵ مشاهده می‌شود. بدیهی است که وجود نانومواد عبور نور از سیال پایه را به میزان قابل توجهی کاهش داده و در نتیجه، مقدار نور جذب شده را افزایش می‌دهد. باندهای جذب قوی برای نانوسیال‌ها نیز مانند سیال پایه در محدوده بین ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، همچنین در ۱۲۰۰ نانومتر دیده می‌شود. علاوه بر این، در حدود ۱۴۰۰ نانومتر، نانوسیال‌ها در برابر تابش ورودی کدر هستند باند جذب دیگری در حدود ۲۵۰ نانومتر در طیف‌های عبور نور از نمونه‌های نانولوله کربنی مشاهده می‌شود. برای بررسی بهتر خواص تابشی نمونه‌ها، ضریب میرایی $K(\lambda)$ با استفاده از میزان عبور نور و براساس قانون بیر-لمبرت ($T(\lambda) = e^{-K(\lambda)L}$) محاسبه می‌شود. در این قانون، L طول مسیر عبور نور از نمونه یعنی ۱۰ میلی‌متر است. ضریب میرایی نانوسیال‌های نانولوله کربنی در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست، حضور ۱۰۰ppm نانولوله کربنی، ضریب میرایی سیال پایه آب-اتیلن‌گلیکول را در منطقه نور مرئی حدود ۶۰ برابر افزایش می‌دهد.

۴- روش حل عددی و صحت‌سنجی

در این تحقیق، مدل‌سازی سه‌بعدی معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و معادله انتقال تابش با استفاده از نرم‌افزار *فلوئنت ۱۵,۰* انجام شده است.

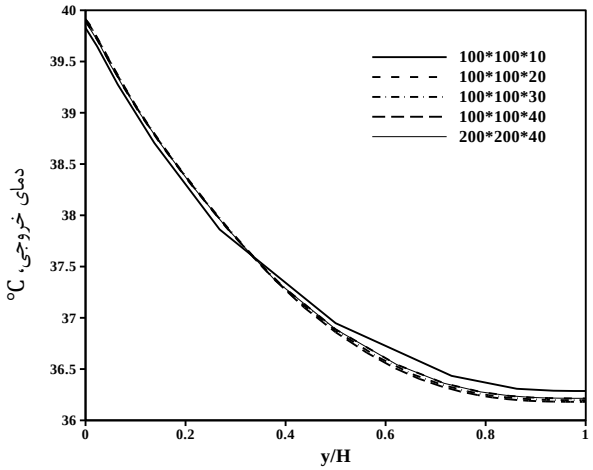


شکل ۵- طیف‌های عبور نور از نمونه‌های نانوسیال نانولوله کربنی با جزء حجمی‌های مختلف

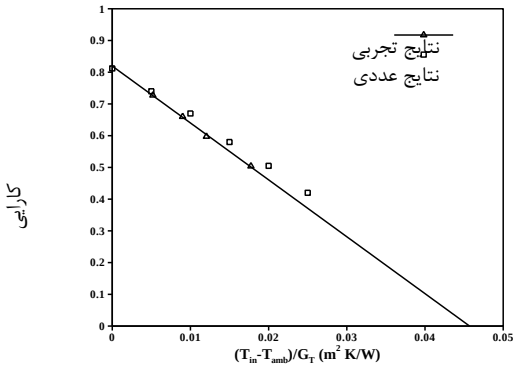


شکل ۶- ضریب میرایی طیفی نمونه‌های نانوسیال نانولوله کربنی با جزء حجمی‌های مختلف

برای حل عددی معادله انتقال تابش از روش ابعاد گسسته استفاده شده است. در این روش کل میدان به چندین حجم کنترل و مرزها به چندین سطح کنترل تقسیم می‌شود. معادله انتقال تابش برای هر حجم کنترل در چندین جهت زاویه‌ای ($d\omega_m$ به تعداد M) نوشته شده و به صورت جداگانه برای هر یک از جهات حل می‌گردد. اگر به تعداد N حجم کنترل وجود داشته باشد، با کمک شرایط مرزی می‌توان $M \times N$ معادله دیفرانسیل خطی نوشت که با حل آنها، مقدار تابش (i_m) در هر نقطه و هر جهت بدست می‌آید. میزان کل تابش در هر نقطه با محاسبه جمع برداری تابش‌های محاسبه‌شده بدست می‌آید. برای حل معادلات بقا نیز از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. شبکه سازمان‌یافته یکنواخت مستطیلی برای شبکه-بندی میدان محاسباتی بکار رفته است. برای بررسی دقیق جریان در حال توسعه در ناحیه ورودی و همچنین در نزدیکی دیواره از شبکه ریز استفاده شده است. قبل از ارائه نتایج بدست‌آمده از مدل عددی، عدم وابستگی نتایج آن به شبکه، با استفاده از تغییر اندازه شبکه بررسی شده و نتیجه آن در شکل ۷ آمده است. همانطور که از شکل پیداست دمای خروجی با استفاده از شبکه۳۰× ۱۰۰×۱۰۰ بخوبی با نتایج شبکه ۲۰× ۱۰۰×۱۰۰منطبق شده است؛ لذا تعداد گره ۲۰ در عمق کلکتور مناسب است. در جهت طول نتیجه حاصل از شبکه ۴۰× ۲۰۰×۲۰۰ با شبکه ۴۰× ۱۰۰×۱۰۰ هماهنگی قابل قبولی دارد. بنابراین، شبکه ۲۰× ۱۰۰×۱۰۰ برای حل جریان نانوسیال در مدل استفاده شده است.



شکل ۷- بررسی عدم وابستگی حل به شبکه



شکل ۸- مقایسه کارایی عددی و تجربی برحسب اختلاف دمای کاهش‌یافته در دبی $۰/۰۲۰kg/s$(سیال‌عامل f۱)

برای صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج تجربی کرمی و همکاران [۱۴] بهره گرفته شده است. شکل ۸ مقایسه کارایی عددی و تجربی برحسب اختلاف دمای کاهش‌یافته در دماهای ورودی مختلف و دبی $۰/۰۲۰kg/s$را نشان می‌دهد. بدیهی است که جزء حجمی صفر مربوط به سیال پایه است. اختلاف بیشینه ۵٪ بین نتایج عددی و تجربی، صحت مدل عددی توسعه‌یافته در این تحقیق را تایید می‌کند.

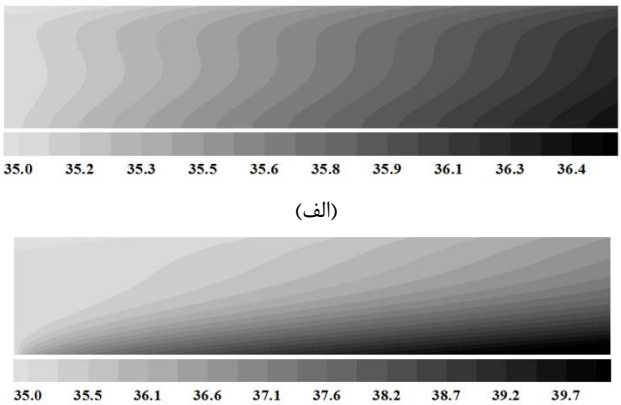
۵- بحث و نتایج

پس از صحت‌سنجی مدل عددی توسعه‌یافته، مدل سه‌بعدی کلکتور جذب مستقیم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، کلکتوری با شرایط و مشخصات مشابه مطالعه کرمی و همکاران [۱۴] یعنی با ابعاد $۶۰cm \times ۶۰\ cm \times ۱\ cm$ که سطح بالای آن، شیشه با ضخامت ۴ میلی‌متر و سطح پایین آن عایق با ضخامت ۱۰ میلی‌متر است، توسعه داده شده است. در نتایج زیر، دمای ورود ۳۵°C، دمای محیط ۲۵°C، تابش ورودی $۸۰۰W/m^۲$، دبی

ورودی ۰/۰۱۵، ۰/۰۲۰ و ۰/۰۲۵ kg/s و ضریب انتقال حرارت جابجایی با محیط بیرون ۱۰ $W/m^2\,°C$ [۱۵] در نظر گرفته شده است. برای خواص ترموفیزیکی و تابشی نانوسیال‌ها از نتایج بخش ۳ استفاده شده است. در ادامه، تأثیر مشخصه‌های مختلف بر کارایی کلکتور با استفاده از این مدل، ارزیابی شده است.

۵-۱- تأثیر ضریب گسیل سطح داخلی کلکتور

نوع سطح پایین کلکتور (ضریب گسیل آن) در صورتی‌که ضریب میرایی سیال کم باشد، تأثیر قابل توجهی روی کارایی کلکتور دارد. یعنی زمانی‌که بخش عمده‌ای از تابش خورشیدی ورودی به سطح پایین برسد. زمانی که سطح داخلی بازتابنده (صیقلی) باشد، قسمتی از تابش خورشیدی ورودی روی سطح بالا (شیشه) قبل از اینکه به سطح پایین برسد، توسط سیال جذب می‌شود و قسمت جذب نشده توسط سطح داخلی بازتابیده می‌شود. قسمتی از این تابش بازتاب شده مجدداً توسط سیال جذب می‌شود، قبل از اینکه از طریق سطح شیشه به بیرون کلکتور عبور کند. در این فرایند، سیال افزایش دمای کمتر و توزیع دمای یکنواخت‌تری را تجربه می‌کند (شکل ۹- الف).



شکل ۹- توزیع دما در لایه سیال (الف) سیال پایه با سطح داخلی جاذب (ب) سیال پایه با سطح داخلی بازتابنده در دبی ۰/۰۲۰kg/s

در صورتی که سطح داخلی غیربازتابنده یا جاذب باشد، هر تابشی که به آن برسد جذب می‌شود. این امر باعث افزایش قابل توجه دمای دیوار داخلی و سیال مجاور آن می‌شود. بنابراین، با اینکه انتقال حرارت از سطح پایین با محیط بیرون افزایش می‌یابد، به دلیل افزایش جذب تابش، دمای سیال بالاتر در خروجی کلکتور، حاصل می‌شود (شکل ۹- ب). تغییرات کارایی کلکتور با ضریب گسیل سطح داخلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در بالا توضیح داده شد، در صورتی که سیال پایه به عنوان سیال عامل بکار رود، کارایی کلکتور با افزایش ضریب گسیل سطح داخلی، به دلیل جذب بیشتر تابش توسط این سطح افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، بررسی نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش کارایی با افزایش ضریب گسیل سطح پایین در حالت استفاده از نانوسیال f۳ به عنوان سیال عامل، شیب ملایمی دارد و در صورت استفاده از نانوسیال f۱، کارایی مستقل از ضریب گسیل سطح داخلی بوده و افزایشی نشان نمی‌دهد. این امر نشان می‌دهد که با استفاده از نانوسیال غلیظ، تمامی تابش ورودی قبل از رسیدن به سطح پایین توسط نانوسیال جذب شده و نوع سطح داخلی تأثیری بر میزان جذب ندارد.

۵-۲- تأثیر عمق کلکتور

از آنجا که تابش ورودی به دیواره بالایی عمود است، عمق کلکتور مشخص می‌کند که چه کسری از تابش ورودی قبل از رسیدن به دیوار پایینی جذب می‌شود. بنابراین هرچه عمق کلکتور بیشتر باشد، تابش عمدتاً در لایه‌های فوقانی جذب شده و مقدار کمی از آن به لایه‌های پایینی رسیده و توسط آنها جذب می‌شود. تأثیر عمق کلکتور بر توزیع دمای لایه سیال در دبی ثابت (۰/۰۲۰ kg/s) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در عمق کم، از آنجا که طول مسیر عبور نور کم است، جذب در تقریباً تمامی لایه‌ها انجام شده و بنابراین توزیع دمای یکنواخت‌تری حاصل شده است. با افزایش عمق و به عبارت دیگر، طول مسیر عبور نور، بیشتر تابش در عبور از لایه‌های فوقانی جذب شده و لایه‌های پایینی، جذب کمتر و درنتیجه، افزایش دمای کمتری را تجربه می‌کنند.

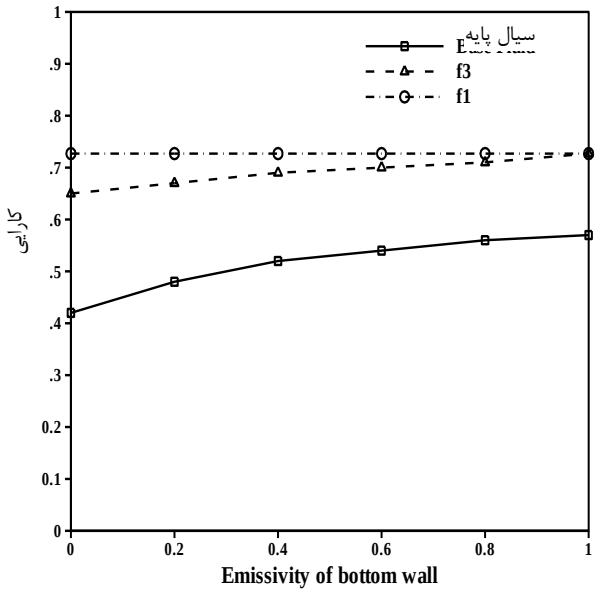
تغییرات کارایی کلکتور با عمق آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. کارایی ابتدا با عمق کلکتور افزایش یافته و سپس، در مقادیر عمق زیاد، مستقل از آن رفتار می‌کند. همانطور که در توضیحات شکل ۱۱ اشاره شد، در مقادیر عمق کم، تابش ورودی روی دیواره بالایی داخل لایه سیال نفوذ کرده و پس از جذب قسمتی از آن توسط سیال به دیواره پایینی می‌رسد. از آنجا که دیواره پایینی کاملا بازتابنده است، هر تابشی که به آن برسد، بازتاب شده و مجددا توسط سیال جذب می‌شود، اما به دلیل عمق کم ممکن است مقداری از این تابش بازتاب شده از سطح فوقانی کلکتور خارج شده و کاهش کارایی را به دنبال

داشته باشد. با افزایش عمق، تابش بازگشتی از دیواره پایینی افزایش یافته و لذا کارایی نیز بالاتر خواهد بود. البته افزایش عمق کلکتور پس از مقدار معینی به افزایش کارایی منجر نشده و کارایی مستقل از عمق خواهد بود. چرا که در عمق مشخصی بیشینه تابش ورودی توسط سیال جذب شده و افزایش عمق به بالاتر از آن تأثیری بر میزان جذب نخواهد داشت. این امر دلالت بر وجود مقدار مجانبی برای عمق کلکتور دارد.

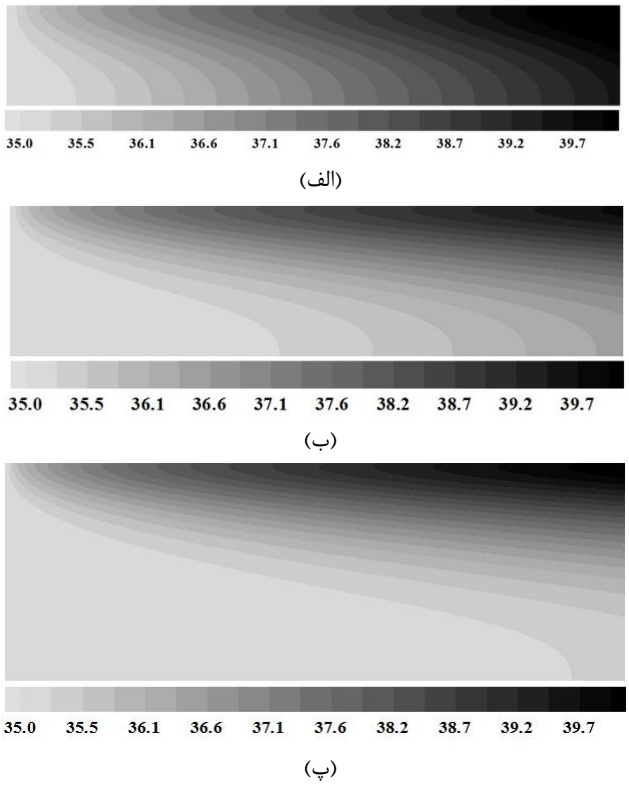
۵-۳- تأثیر جزءحجمی نانوسیال

کسری از تابش ورودی به سیال که توسط آن جذب می‌شود، به ضریب میرایی آن بستگی دارد. هنگامی که از نانوسیال به عنوان سیال عامل استفاده شود، ضریب میرایی سیال عامل با تغییر جزء حجمی نانوسیال تغییر می‌کند. همانطور که در بخش ۳ مشاهده شد، با افزایش جزء حجمی نانوسیال ضریب میرایی آن افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۳ توزیع دمای لایه سیال با جزء حجمی‌های (ضرایب میرایی) مختلف در عمق کلکتور (۱۰ میلی‌متر) و دبی ثابت (۰/۰۲۰ kg/s)، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در جزء حجمی یا ضریب میرایی پایین، تابش کمی توسط سیال جذب شده و میزان جذب نشده آن به دیوار پایینی برخورد کرده و بازتاب می‌کند. با افزایش جزء حجمی میزان تابش جذب شده توسط سیال بالا رفته و در نتیجه دما بویژه در لایه‌های فوقانی، افزایش می‌یابد.



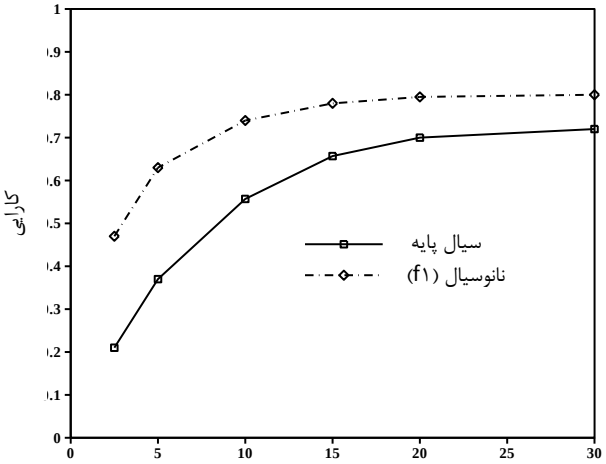
شکل۱۰- تاثیر ضریب گسیل سطح داخلی کلکتور بر کارایی



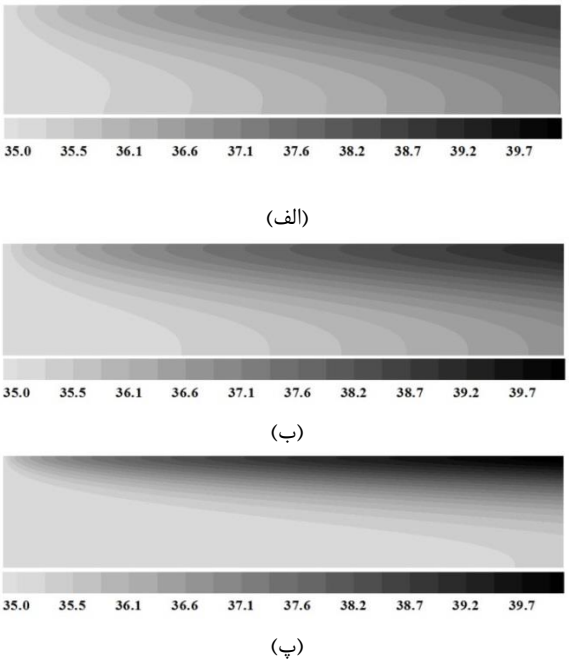
شکل ۱۱- توزیع دما در لایه سیال در عمق (الف) ۵ (ب) ۱۰ (پ) ۱۵ میلی‌متر (دبی ۰/۰۲۰kg/sو نانوسیال f1)

در شکل ۱۴ تغییرات کارایی کلکتور با جزء حجمی در همان عمق و دبی ثابت، نشان داده شده است. کارایی با افزایش جزء حجمی تا مقدار معینی افزایش یافته و پس از آن تغییر چندانی ندارد. به عبارت دیگر مستقل از جزء حجمی رفتار می‌کند. رفتار حدی نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که اگر جزء حجمی سیال از مقدار معینی بالاتر رود، دیگر تأثیری بر کارایی کلکتور ندارد.

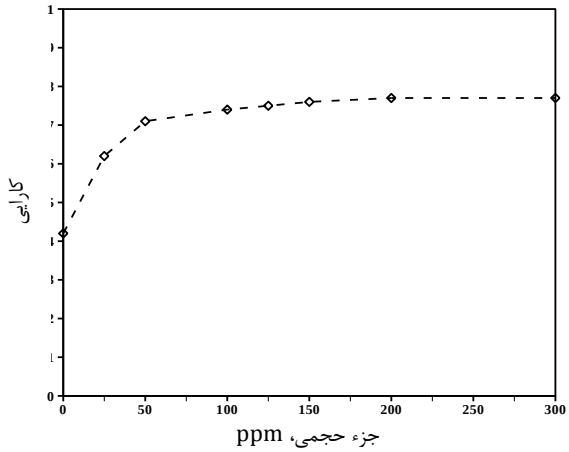
چراکه بیشترین میزان تابش در سطح بالایی جذب شده و منجر به افزایش دما در این سطوح می‌گردد. بنابراین اتلاف حرارت به محیط بیرون بیشتر شده و از اثر مثبت افزایش ضریب میرایی بر کارایی می‌کاهد. این امر نشان می‌دهد که مقدار مجانبی برای جزء حجمی نانوسیال وجود دارد. براساس نتایج شکل ۱۴، جزء حجمی مناسب برای نانوسیال نانولوله کربنی در این عمق و دبی ورودی، حدود ۱۰۰ ppm است و پس از این جزء حجمی، کارایی افزایش چشمگیری ندارد. افزایش جزء حجمی به بیش از این مقدار، افزایش کارایی کمتر از ۲٪ را به دنبال دارد.



شکل۱۲- تاثیر عمق کلکتور بر کارایی



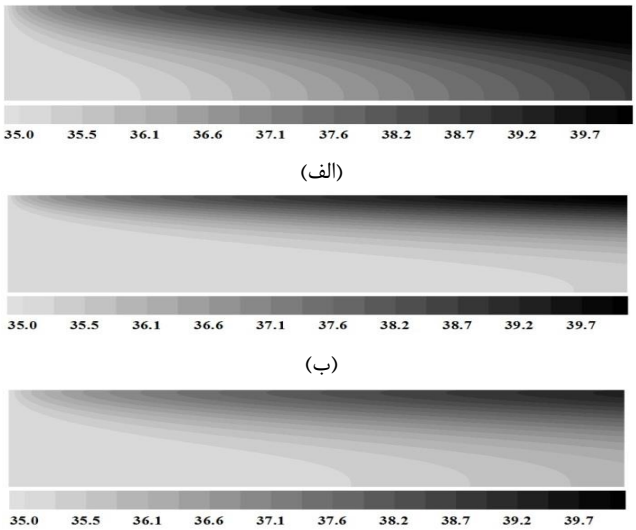
شکل ۱۳- تاثیر جزءحجمی نانوسیال بر توزیع دمای کلکتور (الف) ۲۵ppm۱۰۰ (ب) ۵۰ (پ)



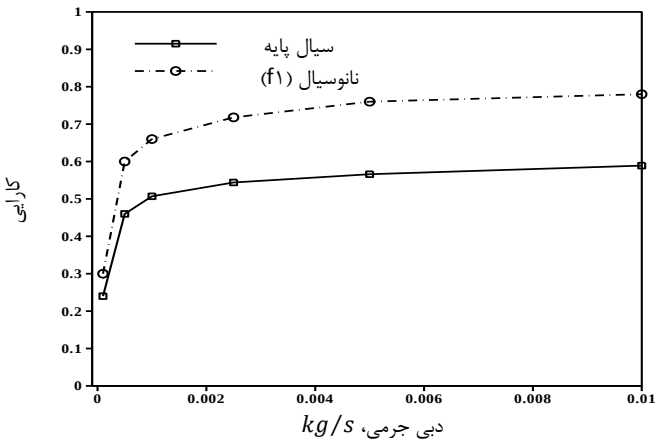
شکل ۱۴- تاثیر جزء حجمی نانوسیال بر کارایی کلکتور

۵-۴- تأثیر دبی سیال

توزیع دمای لایه سیال کلکتور با تغییر دبی ورودی در عمق و جزء حجمی ثابت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. دمای سیال خروجی از کلکتور در شکل ۱۵- الف بیشتر از دمای خروج در شکلهای ۱۵- ب و ۱۵- پ با دبی بالاتر است. در دبی‌های پایین، زمان بین ورود و خروج سیال، یعنی زمان اقامت سیال در کلکتور، بالاست و به همین دلیل سیال افزایش دمای بیشتری را نسبت به دبی‌های بالاتر، تجربه می‌کند. تأثیر دبی ورودی بر کارایی کلکتور در عمق ثابت در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کارایی با دبی افزایش می‌یابد. با وجود اینکه بررسی شکل ۱۵ نشان داد که در دبی‌های کم، افزایش دما بیشتر است، ولی بدلیل پایین بودن دبی، حاصلضرب دبی در افزایش دما بگونه‌ای است که همچنان با افزایش دبی، کارایی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵- تاثیر دبی ورودی بر توزیع دمای کلکتور (الف) ۰/۰۱۵ (ب) ۰/۰۲۰ (پ) $0/025kg/s$



شکل ۱۶- تاثیردبیورودیبرکاراییکلکتور

بررسی دقیق‌تر شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با افزایش بیشتر دبی، کارایی مستقل از آن رفتار کرده و تغییری نشان نمی‌دهد. چرا که تأثیر افزایش دبی بر میزان افزایش دما، یا به عبارت دیگر، حاصلضرب دبی در اختلاف دمای ورود و خروج، ثابت شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با هدف کاربری در آبگرمکن خورشیدی خانگی و با استفاده از نانوسیال نانولوله کربنی به عنوان سیال عامل به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از سیال شفاف و سطح داخلی جاذب، کارایی و دمای خروجی کلکتور بالاتری نسبت به حالت سطح پایین بازتابنده بدست می‌آید. در صورت استفاده از سیال عامل جاذب، سطح داخلی کلکتور تأثیر چندانی بر کارایی آن ندارد. با افزایش جزء حجمی نانوسیال و عمق کلکتور، کارایی و دمای خروجی حاصل به صورت مجانبی، افزایش می‌یابد. این افزایش مجانبی در مورد تغییرات کارایی با دبی نیز مشاهده می‌شود.

۷- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
c	سرعت نور (ms^{-1})
c_p	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	قطر ذره (m)
f_v	جزءحجمی
G_T	شار تابش خورشیدی (Wm^{-2})
h	ثابت پلانک (Js)
h	ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-2}K^{-1}$)
H	عمق (m)
i	شدت تابش طیفی ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
k	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
K	ضریب میرایی (m^{-1})
k_B	ثابت بولتزمن (JK^{-1})
L	طول (m)
$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی (kgs^{-1})
m	ضریب شکست نرمال‌شده
n	نمایه شکست
P	فشار (Pa)
q_r	شار تابشی (Wm^{-2})
Q	کارایی جذب یا پراکنش
S	دما (s)
T	دما (K)
u, v, w	سرعت (ms^{-1})
W	عرض (m)
x, y, z	مختصات

علائم یونانی

α	پارامتر اندازه ذره
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ρ	ضریب انعکاس
τ	ضریب عبور
μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
ω	فرکانس ($rad.s^{-1}$)
λ	طول موج (m)
η	کارایی
φ	تابع تلفات (s^{-2})
Φ	تابع فاز پراکنش

زیرنویس‌ها

a	جذب
amb	محیط
cv	جابجایی
e	میرایی
g	شیشه
i	جهتی
in	ورودی
out	خروجی
r	تشعشعی
s	پراکنش
λ	طیفی

۸- منابع

[1] Arai,N., Itaya, Y., Hasatani, M., 1984, Development of a Volume heat-trap' typesolar collector using a fine-particle semitransparent liquid suspension (FPSS)as a heat vehicle and heat storage medium, Solar Energy, Vol. 32, pp. 49-56.

[2]Otanicar, T.P., Phelan, P.E., Golden, J.S., 2009, Optical Properties of Liquids for Direct Absorption Solar Thermal Energy Systems, SolarEnergy, Vol. 83, pp. 969-977.

[3] Minardi, J.E., Chuang, H.N., 1975, Performance of a "black" liquid flat-plate solar collector, Solar Energy, Vol.17, pp. 179-183.

[4] Miller, F.J., Koenigsdorff, R.W., 2000, Thermal modeling of a small-particle solarcentral receiver, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.122, pp. 23-29.

[5] Tyagi, H., Phelan, P., Prasher, R.S., 2009, Predicted Efficiency of Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Receiver, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 131.

[6] Otanicar, T.P., Phelan, P.E., Prasher, R.S., Rosengarten, G., Taylor, R.A., 2010, Nanofluid-based direct absorption solar collector, Journal ofRenewable and Sustainable Energy, Vol. 2.

[7] Ladjevardi, S.M., Asnaghi, A., Izadkhast, P.S., Kashani, A.H., 2013, Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption, Solar Energy, Vol. 94, pp. 327–334,.

[8] Parvin, S., Nasrin, R., Alim, M.A., 2014, Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 71, pp. 386–395.

[9] Lenert, A., Wang, E.N., 2012, Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion, *Solar Energy,* Vol. 86, pp. 253–265.

[10] Siegel, R., Howell, J., 1992, Thermal radiation heat transfer, 3rd Edition, Hemisphere Publishing Corporation, USA.

[11] Brewster, M. Q., Tien, C. L., 1982, Radiative transfer in packed fluidized beds: dependent versus independent scattering, Journal of Heat Transfer, Vol. 104.

[12] Nasiri, A., Shariaty-Niasar, M., Rashidi, Amrollahi, A., Khodafarin, A. R., 2011, Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 35, pp. 717–723.

[13] Taylor, R. A., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Adrian, R., Prasher, R., 2011, Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors, Nanoscale Research Letters, Vol. 6.

[14] Karami, M., Delfani, S., Akhavan Bahabadi, M. A., 2016 Performance Characteristics of a Residential-type Direct Absorption Solar Collector using MWCNT Nanofluid, Renewable Energy Vol. 87 , pp. 754–764.

[15] Kumar, S., Tien, C.L., 1989, Analysis of combined radiation and convection in aparticulate laden falling film. Heat transfer Phenomena in Radiation, Combustion and Fires, National Heat Transfer Conference.