

بررسی تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی آب/اتیلن گلیکول- $Fe_2O_3/SWNCT$ و بهینه‌سازی آن با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک

امیر اسدی کیا^۱، سید علی آقا میر جلیلی^{۲*}، نوید نصیری زاده^۳ و هادی کارگر شریف آباد^۴

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۳- گروه مهندسی نساجی و پلیمر، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۴- مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۵/۲۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵

چکیده

در این مقاله، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌های ترکیبی متشکل از نانولوله‌های کربنی تک جداره و نانوذرات آهن II اکسید در مخلوط آب و اتیلن گلیکول به صورت تجربی بررسی شده است. پارامترهایی نظیر درصد اتیلن گلیکول، مقدار نانولوله کربنی تک جداره، نانوذرات آهن II اکسید و pH محلول به عنوان پارامترهای مؤثر بر هدایت حرارتی انتخاب شدند. نتایج بررسی تجربی نشان داد که ضریب هدایت حرارتی همراه با افزایش میزان نانوذرات افزایش یافته و در محیط قلیایی کاهش می‌یابد. همچنین اثر هم‌افزایی افزودن هر دو نانوذره به سیال پایه بر ضریب هدایت حرارتی مورد تایید قرار گرفت. با توجه به وابسته بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن مقادیر بهینه استفاده شد. بهترین آموزش در یک شبکه عصبی دو لایه با تعداد نرون‌های لایه مخفی برابر ۶ و نرخ یادگیری اولیه برابر ۰/۰۴ حاصل شد که متوسط خطای شبکه عصبی پس از آموزش ۸/۸ بدست آمد. با تغییر ضریب جهش از ۱٪ تا ۸٪ در الگوریتم ژنتیک، مقدار جمعیت اولیه مناسب برابر ۲۰۰ شد. با در نظر گرفتن شرط همگرایی برابر 1×10^{-6} در تغییرات نسبی بهترین مقدار تابع هدف و مقدار متوسط تابع هدف در جمعیت، ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیال ترکیبی با ترکیب اتیلن گلیکول برابر ۳۰/۰۱٪، نانولوله کربنی تک جداره برابر ۰/۹۹۸٪، نانوذرات آهن II اکسید برابر ۱/۹۹٪ و pH برابر ۲/۰۱۸، بیشترین مقدار در مقایسه با نسبت‌های دیگر اجزا داشته است.

واژه‌های کلیدی: ضریب هدایت حرارتی، نانوسیال، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

بهبود و افزایش میزان انتقال حرارت، همواره یکی از دغدغه‌ها و زمینه‌هایی بوده است که متخصصان و مهندسان را به خود مشغول کرده است [۱، ۲]. نانوسیال‌ها گروه جدیدی از سیال‌ها هستند که توانایی خوبی در کاربردهای انتقال حرارت

امروزه کشف و یا ساخت یک سیال حامل انرژی با ضریب رسانایی بالا در کنار تغییر هندسه، شرایط مرزی و ... برای

* عهده‌دار مکاتبات: سید علی آقا میر جلیلی

نشانی: گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

تلفن: ۰۳۵-۳۱۸۷۲۷۰۷، دورنگار: ۰۳۵-۳۱۸۷۲۷۰۷، پست الکترونیکی: saa_mirjalily@iauyazd.ac.ir

دارند [۳]. نانوسیال دارای دو جزء اصلی سیال پایه و نانوذره است. منظور از سیال پایه، سیالی است که نانوذره به آن، افزوده خواهد شد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اکسید فلزاتی مثل اکسید مس و اکسید آلومینیوم، بهترین پخش را درون سیال‌هایی مثل آب، روغن و اتیلن گلیکول دارند. از اضافه کردن نانوذرات به سردکننده‌هایی مثل اتیلن گلیکول، شبه سیال‌ها، روان کننده‌ها، روغن‌ها و امولسیون‌ها نیز می‌توان نانوسیال تولید کرد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها، به فاکتورهایی مانند کسر حجمی، اندازه نانوذرات، شکل ذره، افزایشده‌ها، pH، درجه حرارت، سیال پایه و جنس نانوذرات بستگی دارد [۴-۶].

امینیان [۷] یک مدل نئومورفیک (neuromorphic) برای پیش‌بینی ضریب انتقال هدایت حرارتی نانوسیال‌ها با توجه به اثرات اندازه، قطر، درصد حجمی، درجه حرارت و هدایت حرارتی نانوذرات و همچنین خواص مایعات پایه ارائه داده است. مدل ارائه شده قادر است به درستی بر اساس ترکیب‌های مختلف مایعات پایه و نانوذرات با غلظت‌های مختلف پیش‌بینی را انجام دهد.

۲۶ نوع مختلف نانوذرات فلزی شامل Al_2O_3 -water/EG، Cu -water/EG/oil، CuO -water/TO/EG/MEG/paraffin، TiO_2 -water/EG/ZnO-water/EG، Al -water/EG/EO/TO، SiO_2 -water/EG/oil، MWCNTs-water/EG/oil/R113 و Ag -water برای ارزیابی اثربخشی مدل نئومورفیک پیشنهاد شده استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که مدل پیش‌بینی شده برای ضریب انتقال هدایت حرارتی مؤثر در مورد ۲۶ نوع مختلف نانوسیال در توافق خوبی با داده‌های تجربی است. در تحقیقی دیگر تأثیر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها بررسی شده است [۸]. مطالعات نشان می‌دهد که دما تأثیر قابل توجهی بر هدایت حرارتی نانوسیال‌ها دارد. با این حال، در مقادیر گزارش شده اختلاف زیادی وجود دارد. فیلیپ و شیما [۹] در یک مقاله مروری تأثیر پارامترهای مختلفی را در ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال‌ها بررسی کردند. آن‌ها در مطالعات خود تأثیر

پارامترهایی مانند حجم نانوذرات، شکل نانوذرات، جنس نانوذرات، اندازه نانوذرات، دما، اسیدی بودن و سورفکتانت را بر تغییر ضریب هدایت حرارتی بررسی کردند. ماناسراه و همکاران [۱۰] تأثیر نانولوله‌های کربنی معمولی و نانولوله‌های کربنی فعال شده با پلی‌اتیلن گلیکول را در افزایش انتقال حرارت و ویسکوزیته و افت فشار بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نانولوله‌های کربنی فعال شده با پلی‌اتیلن گلیکول به علت پراکندگی بهتر در سیال پایه دارای تأثیر بهتر در انتقال حرارت می‌باشد. همچنین مشخص شد علی‌رغم تغییر ویسکوزیته نانوسیال با درصد حجمی نانولوله‌های کربنی، افت فشار سیستم تغییر چندانی ندارد. در مقاله مروری دیگری جنبه‌های مختلف نانوسیال‌ها از جمله سنتز، کاربردهای بالقوه، مطالعات تجربی و تحلیلی در مورد هدایت حرارتی مؤثر، نفوذپذیری حرارتی مؤثر و انتقال گرما مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. کومر و همکاران [۱۲]، مدلی برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها ارائه کردند که در آن وابستگی هدایت حرارتی به اندازه ذرات، دما و غلظت در نظر گرفته شده بود. چون و همکاران [۱۳]، به محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها در حالت دینامیکی پرداختند. لی و پترسون [۱۴]، تلاش کردند رابطه‌ای ارائه دهند که شامل دما و غلظت باشد. محققان دیگری بر اساس تئوری فرکتال و محیط مؤثر برای توصیف خوشه‌های نانوذرات و توزیع شعاعی‌شان مدلی را برای پیش‌بینی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال‌ها پیشنهاد کردند و اثر اندازه و جذب سطحی نانوذرات را هم در نظر گرفتند [۱۵]. این مدل داده‌های تجربی برای ذرات ۵۰ nm مس اکسید در آب دی‌یونیزه شده با غلظت ذرات کمتر از ۰/۲۵٪ حجمی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. کرروزن [۱۶] هم رابطه‌ای برای هدایت حرارتی دینامیکی ارائه کرد. داس و همکاران [۱۷] به بررسی اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب/مس اکسید و آب/آلومینیوم اکسید پرداختند و دریافتند که تغییرات دما بر ضریب هدایت حرارتی تأثیر زیادی دارد. نتیجه مطالعه آن‌ها این بود که با افزایش دما میزان ضریب

تحقیقی دیگر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی Ag-MgO با اندازه حجمی مساوی برای هر جزء اندازه گیری شده است [۲۸]. در این تحقیق تاثیر درصد حجمی نانوذرات در ضریب انتقال حرارتی دیده شده و در نهایت رابطه‌ای برای پیش‌بینی آن استخراج شده است. سلطانی و همکاران [۲۹] تاثیر نانوذرات WO₃-MWCNTs را بر ضریب هدایت حرارتی روغن موتور بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد، علیرغم اینکه نانوسیال ترکیبی جدید با پایه روغن و نانوذرات WO₃-MWCNTs خواص نیوتنی دارد، در بهترین حالت نسبت به روغن معمولی ۱۹/۸۵٪ ضریب هدایت حرارتی آن افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه دیگری در رابطه با بررسی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی با سیال پایه آب و ذرات CuO-MWCNT بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داد ضریب هدایت حرارتی این نانوسیال ترکیبی با نسبت حجمی ۰/۶٪ در دمای ۵۰ °C، ۳۰/۳۸٪ نسبت به دمای محیط بیشتر است [۳۰]. همت اسفه و همکاران ضریب هدایت حرارتی Cu/TiO₂-water/EG را به صورت تجربی با نسبت ۶۰٪ آب و ۴۰٪ اتیلن گلیکول بررسی کردند [۳۱]. ترکیب آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه در نانوسیال‌های ترکیبی در تحقیقات دیگری نیز بررسی شده است [۳۲، ۳۳]. تاثیر مدت زمان همگن‌سازی و نوع سورفکتانت‌های مختلف بر پایداری نانوسیال ترکیبی بررسی شده است و نشان داده شده است که نانوسیال ترکیبی تا ۴۰ روز می‌تواند پایداری خود را حفظ کند و بدون ته‌نشینی باشد [۳۴]. اخگر و همکاران [۳۵]، صفایی و همکاران [۳۶] و کریمی‌پور و همکاران [۳۷] از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی استفاده کردند.

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد این نانوسیال‌ها که تحت عنوان نانوسیال‌های ترکیبی معرفی شده‌اند، با انتخاب ترکیب خاصی از دو نانوذره می‌تواند دارای خواص حرارتی بهتری نسبت به تک‌تک نانوذرات باشند و به عبارتی دارای خواص بهبود یافته‌ای نسبت به نانوسیال‌های معمولی تک جزئی

هدایت حرارتی افزایش پیدا می‌کند که بر اثر افزایش حرکات براونی می‌باشد. همچنین مقالاتی در مورد افزایش ضریب هدایت حرارتی با استفاده از ذرات نانومغناطیسی و سیال‌های فرو موجود می‌باشد. لی و همکاران [۱۸] ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال‌های مغناطیسی را تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی بررسی نمودند و اثر درصد حجمی و سورفکتانت را بر این خواص را مشخص کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تا زمانی که سیال مغناطیسی از نظر مغناطیسی اشباع نشده باشد، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی با افزایش میدان در درصد حجمی خاصی از سیال افزایش می‌یابد. سام سنذر و همکاران [۱۹]، هدایت حرارتی نانوسیال آب-Fe₃O₄ را در کسر حجمی‌ها و دماهای متفاوت اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نیز نشان دهنده افزایش هدایت حرارتی این نانوسیال با افزایش دما و افزایش کسر حجمی نانوذرات است. آنان مشاهده کردند که در کسر حجمی ۲٪ از نانوذرات Fe₃O₄، هدایت حرارتی نانوسیال در دماهای ۲۰ و ۶۰ °C به ترتیب ۲۵ و ۴۸٪ نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. آنان دلیل این افزایش را حرکت براونی نانوذرات ذکر کردند. نانوسیال‌های ترکیبی از ترکیب مواد مختلف تهیه می‌شوند [۲۰، ۲۱]. مواد نانوسیال‌های ترکیبی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی شامل Al₂O₃/Ni-Al₂O₃/Fe-MgO/Fe، ۲- نانوکامپوزیت‌های سرامیکی مانند Al₂O₃/SiO₂، ۳- نانوکامپوزیت‌های پلیمری. در مراجع [۲۲-۲۶] مطالعات جامعی درباره نانوسیال‌های ترکیبی شامل ترکیب ذرات مختلف، سیال‌های پایه مختلف، تاثیر درصد حجمی نانوذرات و دما انجام شده است. همت اسفه و همکاران [۲۷] نانوسیال ترکیبی CNTs-Al₂O₃ بر پایه آب را بررسی و تاثیر درصد حجمی نانوذرات و دما را بر ضریب هدایت حرارتی بررسی کردند و در نهایت بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی ارائه دادند. در این تحقیق برای هر درصد حجمی جزء جامد از حجم مساوی CNTs و Al₂O₃ استفاده شده است. در

هستند [۳۸-۳۵، ۲۹]. با توجه به جدید بودن این روش، تعداد تحقیقات و مطالعات انجام شده در این زمینه اندک است و در راستای اهمیت نانوسیال‌ها در سیستم‌های خنک کاری و خواص حرارتی آن‌ها بایستی تحقیقات گسترده‌ای در زمینه خواص ترموفیزیکی و مکانیزم‌های انتقال حرارت آن‌ها صورت گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد انتخاب ترکیب خاصی از دو نانوذره می‌تواند دارای خواص حرارتی بهتری نسبت به تک تک نانوذرات باشد [۲۹]. بررسی مطالعات گذشته در این زمینه نیز نشان می‌دهد تاکنون بررسی ضریب هدایت حرارتی بهینه نانوسیال ترکیبی چهار جزئی شامل دو جزء سیال پایه و دو جزء نانوذرات با روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک انجام نشده است. بر این اساس در این تحقیق ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها ترکیبی نانولوله‌های کربنی تک جداره و نانوذرات آهن II اکسید در مخلوط آب و اتیلن گلیکول به صورت تجربی بررسی شده است. با انتخاب پارامترهایی نظیر ترکیب درصد اتیلن گلیکول، مقدار نانولوله کربنی تک جداره، نانوذرات آهن II اکسید و pH محلول به عنوان پارامترهای مؤثر بر هدایت حرارتی و استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه نانوسیال ترکیبی مورد نظر پیدا شده‌اند.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- اثر همزمان متغیرها و برهمکنش میان آن‌ها

آزمایش‌ها در دمای محیط و با تغییر دادن متغیرهایی نظیر نسبت اتیلن گلیکول به آب (۳۰ الی ۷۰)، نسبت نانولوله‌های کربنی (۱/۰ الی ۱ درصد وزنی-حجمی)، نسبت نانوذرات آهن II اکسید (۱/۰ الی ۲ درصد وزنی-حجمی) و pH محلول (۲ الی ۱۰) انجام شد. لازم بذکر است که محدوده تمامی مقادیر ذکر شده بر اساس مطالعه و بررسی تحقیقات گذشته که در قسمت مقدمه به برخی از آن‌ها اشاره شد، انتخاب شده‌اند. این مجموعه آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ طراحی و داده‌های حاصل مدل‌سازی شدند. در واقع با

کمک این روش آماری و با حداقل تعداد آزمایش‌ها، اثرات همزمان هر چهار پارامتر تاثیرگذار و برهمکنش میان آن‌ها بر هدایت حرارتی نانوسیال‌های ترکیبی به صورت جامع بررسی می‌شود.

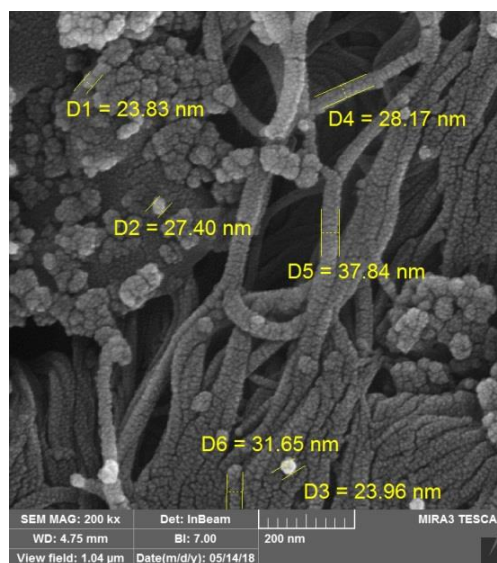
۲-۲- آماده‌سازی نانوسیال

در این پژوهش، نانوسیال‌ها از مخلوط آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات آهن II اکسید به عنوان نانو افزودنی تهیه شدند. برای کسب بیشترین مقدار هدایت حرارتی، تاثیر نسبت‌های مواد سازنده شامل نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول، نسبت نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات آهن II اکسید به کمک روش سطح پاسخ بهینه‌سازی شدند. در واقع به کمک این روش آماری و با حداقل تعداد آزمایش‌ها، اثرات همزمان چهار پارامتر مؤثر بر هدایت حرارتی نانوسیال تهیه شده بررسی شده است. نمونه‌های نانوسیال ترکیبی بر اساس مقادیر طراحی شده (جدول ۱) تهیه شدند و سپس در معرض امواج فراصوت (حمام فراصوت با توان ۴۰۰ W و فرکانس ۲۴ kHz) به مدت ۲ h قرار داده شدند. امواج فراصوت به منظور گسستن تجمع نانوذرات، تهیه محلول پایدار و همگن بکار برده می‌شود. اندازه و مورفولوژی نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ روبشی گسیل میدان (FESEM, MIRA3) تشریح شدند. نانوذرات در استون پخش شدند تا به واسطه تبخیر سریع حلال، نانوذرات برای تصویربرداری میکروسکوپی آماده باشند. شکل ۱ تصویر FESEM از نانوسیال ترکیبی متشکل از نانولوله کربنی تک جداره و آهن II اکسید می‌باشد. بر اساس تصویر FESEM از باقیمانده خشک نانوسیال بعد از تبخیر حلال به خوبی پراکنندگی مناسب نانوذرات آهن II اکسید با قطر کمتر از ۳۰ nm مشاهده می‌شود. همچنین حضور و وجود نانولوله‌های کربنی با قطر کمتر از ۴۰ nm در تصویر مورد نظر دیده می‌شود. نکته اساسی برای افزایش کارایی یک نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت، حفظ پایداری نانوذرات مورد استفاده و عدم

جدول ۱: حالت‌های مختلف نانوسیال ترکیبی و مقدار ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده.

مرحله آزمایش	A:EtG	B:CNT	C:Fe ₂ O ₃	D:pH	k
	V/V%	w/v%	w/v%	-	W/m.K
۱	۵۰	۰/۵۰۵	۰/۱	۶	۰/۳۹۸
۲	۴۰	۰/۷۵۲۵	۱/۵۲۵	۴	۰/۵۸۴
۳	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۴۲۷
۴	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۴۱۹
۵	۴۰	۰/۷۵۲۵	۱/۵۲۵	۸	۰/۴۱۸
۶	۶۰	۰/۲۵۷۵	۱/۵۲۵	۸	۰/۳۳
۷	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۴۲۵
۸	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۱۰	۰/۳۶۶
۹	۶۰	۰/۲۵۷۵	۰/۵۷۵	۸	۰/۴۶۵
۱۰	۴۰	۰/۷۵۲۵	۰/۵۷۵	۴	۰/۴۳
۱۱	۵۰	۰/۰۱	۱/۰۵	۶	۰/۳۲۳
۱۲	۴۰	۰/۲۵۷۵	۰/۵۷۵	۸	۰/۴۱۷
۱۳	۶۰	۰/۷۵۲۵	۰/۵۷۵	۸	۰/۳۵۱
۱۴	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۴۲۹
۱۵	۶۰	۰/۷۵۲۵	۱/۵۲۵	۴	۰/۴۱۱
۱۶	۶۰	۰/۷۵۲۵	۱/۵۲۵	۸	۰/۳۲۹
۱۷	۶۰	۰/۷۵۲۵	۰/۵۷۵	۴	۰/۳۱۷
۱۸	۶۰	۰/۲۵۷۵	۰/۵۷۵	۴	۰/۳۶۲
۱۹	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۴۲۵
۲۰	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۲	۰/۴۰۳
۲۱	۵۰	۱	۱/۰۵	۶	۰/۳۸۵
۲۲	۵۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۴۲۱
۲۳	۴۰	۰/۲۵۷۵	۱/۵۲۵	۸	۰/۴۵۵
۲۴	۶۰	۰/۲۵۷۵	۱/۵۲۵	۴	۰/۴۲۲
۲۵	۴۰	۰/۷۵۲۵	۰/۵۷۵	۸	۰/۴۲۸
۲۶	۴۰	۰/۲۵۷۵	۰/۵۷۵	۴	۰/۵۰۶
۲۷	۵۰	۰/۵۰۵	۲	۶	۰/۴۵۳
۲۸	۴۰	۰/۲۵۷۵	۱/۵۲۵	۴	۰/۵۴۸
۲۹	۷۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۳۹۱
۳۰	۳۰	۰/۵۰۵	۱/۰۵	۶	۰/۵۷۳

جمع آن‌ها در فاز محلول است. این تصویر به خوبی نشان می‌دهد که نانومواد مورد استفاده در تهیه نانوسیال ترکیبی حاضر با حلال‌های مورد استفاده برهمکنش نداشته و عوامل پایدار کننده سطحی آن‌ها پس از تهیه نانوسیال حفظ شده‌اند. از طرفی مابین نانومواد مختلف در شرایط مورد نظر در تهیه نانوسیال هیچ گونه برهمکنش جاذبه‌ای صورت نگرفته است و لذا نانومواد مذکور بطور کاملاً مجزا نقش خود را در انتقال حرارت ایفا نمودند.



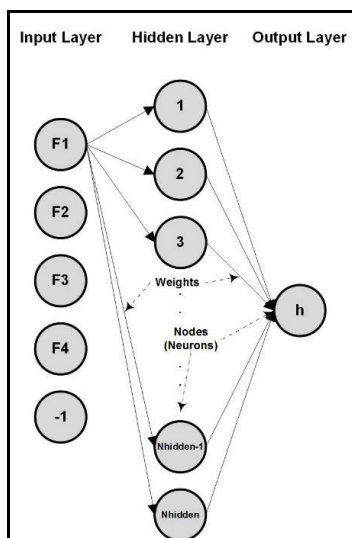
شکل ۱: تصویر FESEM از نانوسیال ترکیبی متشکل از نانولوله کربنی تک جداره و آهن اکسید.

۲-۳- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها از طریق غوطه‌ورسازی حسگر آنالیزور حرارتی KD2 Pro در محلول‌ها تعیین شده است. این دستگاه یک وسیله تجاری است که عموماً برای تعیین هدایت حرارتی سیال در دامنه ۰/۰۲-۲ W/m.K بکار برده می‌شود. حسگر دستگاه از جنس فولاد ضدزنگ است و دارای دقت ۰/۵٪ بوده، طول و قطر آن حدود ۶۰ و ۱/۲۷ mm می‌باشد که در نانوسیال قرار داده می‌شود. برای تایید دقت اندازه‌گیری‌ها، تمامی اندازه‌گیری‌ها حداقل ۳ مرتبه تکرار شدند. مقادیر ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

برای بهینه‌سازی پارامترهای سیستم مورد مطالعه می‌بایست ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی سیستم توسط یک مدل قابل ارزیابی باشد [۲۶]. به دلیل پیچیدگی روابط تحلیلی و حجم محاسبات بسیار بالا، استفاده از روش‌های تحلیلی و



شکل ۲: نمای شبکه عصبی (پرسترون دولایه) استفاده شده برای مدل سازی ضریب انتقال حرارت نانوسیال.

است. مقدار پارامتر تابع فعالیت هیپربولیک دو قطبی مورد استفاده در شبکه عصبی برابر $1/3$ در نظر گرفته شده است زیرا با انتخاب این مقدار برای پارامتر تابع فعالیت، خروجی های شبکه عصبی در تمام بازه مقیاس داده های خروجی بطور مناسب توزیع می شوند و توانایی شبکه برای درون یابی افزایش می یابد. برای بدست آوردن این مقدار بهینه، شبکه عصبی به ازای مقادیر مختلف این پارامتر از $0/08$ تا $2/5$ آموزش داده شد. حداکثر سیکل آموزشی در نظر گرفته شده برای این کار 2000 بود. به ازای هر مقدار این پارامتر، مقدار حداقل خطای شبکه بعد از طی شدن سیکل های آموزشی بدست آمد. تغییرات حداقل خطای شبکه بر حسب مقدار پارامتر تابع فعالیت در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان طور که در جدول نشان داده شده است ورودی های شبکه عصبی در بازه $[0/5 \ 1/5]$ مقیاس بندی شده اند زیرا وزن های تصادفی اولیه شبکه عصبی در بازه $[-0/5 \ 0/5]$ انتخاب شده نزدیک بودن این دو بازه باعث می شود آموزش شبکه سریع تر (با اعمال دوره های آموزشی کمتر) صورت گیرد. علاوه بر این مقدار بازه انتخاب شده حول صفر انتخاب

عددی در فرآیند بهینه سازی امکان پذیر نمی باشد و صرفا باید از مدل ورودی-خروجی با دقت مناسب و سرعت محاسبه بالا برای مدل سازی سیستم استفاده شود. با توجه به خصوصیات منحصر بفرد مدل شبکه عصبی، در این کار با به کارگیری یک شبکه عصبی تأثیر پارامترهای ترکیب درصد اتیلن گلیکول، مقدار نانولوله کربنی تک جداره، نانوذرات آهن II اکسید و pH محلول بر میزان ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بررسی می شود.

۳-۱- نوع شبکه استفاده شده و دلایل آن

به دلیل ماهیت غیرخطی تابعیت ضریب هدایت حرارتی از فاکتورهای در نظر گرفته شده، برای شناسایی سیستم مورد مطالعه پرسترون دو لایه با یک لایه مخفی مورد آزمایش قرار گرفت. نمای شبکه عصبی و ورودی ها و خروجی های آن در شکل ۲ نشان داده شده است. استفاده از شبکه های عصبی با تعداد لایه های بیشتر امکان شناسایی بهتر را فراهم می کند اما با توجه به محدودیت تعداد داده های آموزشی و زمان آموزش استفاده از شبکه های ۲ لایه مفیدتر خواهد بود.

۳-۲- ورودی ها و خروجی ها-مقیاس بندی داده ها

پارامترهای مؤثر بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال سنتز شده شامل نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول ($v/v\%$)، نسبت وزن نانولوله های کربنی به حجم نانوسیال ($w/v\%$)، نسب وزن نانوذرات فلزی به حجم نانوسیال ($w/v\%$) و میزان اسیدی بودن نانوسیال (pH) هستند که به عنوان ورودی های شبکه عصبی در نظر گرفته شده اند. این پارامترها در بخش بعدی به عنوان متغیرهای بهینه سازی بکار گرفته می شوند.

در جدول مشخصات شبکه عصبی در نظر گرفته شده برای شناسایی سیستم خلاصه شده است. یکی از پارامترهای اساسی که نحوه توزیع خروجی های شبکه در بازه تعیین شده را مشخص می کند مقدار پارامترهای تابع فعالیت انتخاب شده

نشده است زیرا وجود صفر در ورودی‌ها باعث عدم آموزش وزن‌های متصل به ورودی با مقدار صفر می‌شود [۳۹].

جدول ۲: مشخصات شبکه عصبی استفاده شده برای مدل‌سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال.

نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول (v/v%)	F1	پارامترهای ورودی
نسبت وزن نانولوله‌های کربنی به حجم نانوسیال (w/v%)	F2	
نسب وزن نانوذرات فلزی به حجم نانوسیال (w/v%)	F3	
میزان اسیدی بودن نانوسیال (pH)	F4	پارامتر خروجی
ضریب هدایت حرارتی نانوسیال	k	
۲		تعداد لایه‌ها
Bipolar Activation Function: $f(x) = \frac{(1 - \exp(-ax))}{(1 + \exp(-ax))}$		تابع فعالیت
[۰/۵ ۱/۵]		مقیاس داده‌های ورودی
[-۱ ۱]		مقیاس داده‌های خروجی

حین آموزش پارامترهای شبکه شامل نرخ یادگیری اولیه (نرخ یادگیری در ابتدای فرآیند آموزش) (۰/۰۵ تا ۰/۱۱) و تعداد نرون‌های لایه مخفی (۴ تا ۱۰) تغییر داده شده است تا بهترین شبکه برای شناسایی مشخص شود. به منظور جلوگیری از افتادن در دام مینیمم‌های محلی در فرآیند آموزش، نرخ آموزش در فرآیند یادگیری به صورت تطبیقی و با استفاده از منطق روش شبیه‌سازی سرد شدن تدریجی فلزات (Simulated Anuling) طبق روابط (۱) و (۲) تغییر داده شد:

$$\Delta E_{Co}(t) = E_{Co}(t) - E_{Co}(t-1) \quad (1)$$

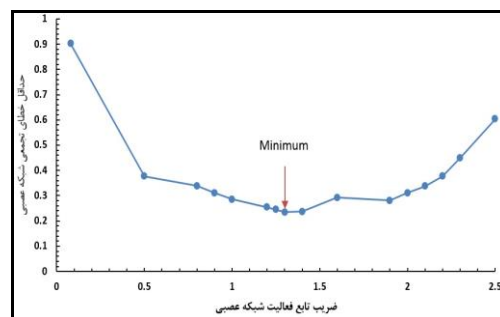
$$\begin{cases} \Delta E_{Co}(t) < 0 \Rightarrow \lambda(t+1) = 1.01 \times \lambda(t) \\ \Delta E_{Co}(t) > 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda(t+1) = 1.01 \times \lambda(t) & \text{if } \exp\left(-\frac{\Delta E_{Co}(t)}{\tau}\right) \geq \omega \\ \lambda(t+1) = \lambda(t) & \text{if } \exp\left(-\frac{\Delta E_{Co}(t)}{\tau}\right) < \omega \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

داده‌ها به صورت یکپارچه به شبکه آموزش داده شده‌اند و در هر دوره آموزشی خطای تجمعی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$E_{Co} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_{Tr}} (h_{act,j} - h_{NN,j})^2 \quad (3)$$

۳-۴- نتایج شبکه عصبی

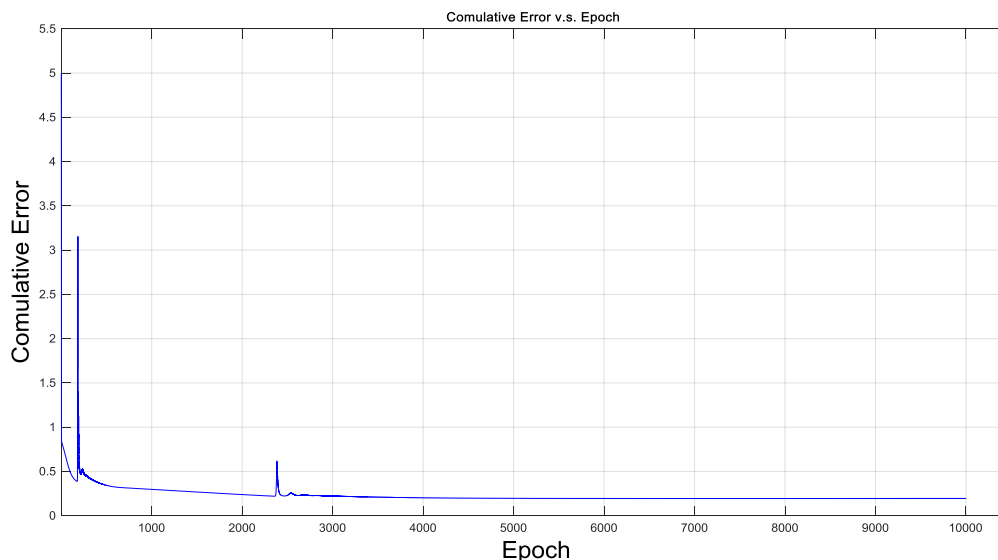
در جدول‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی برای حرارت بدست آمده به ازای پیکربندی‌های مختلف برای شبکه عصبی نشان داده شده است. در این جداول مقادیر خطای جذر میانگین مربعات برای حرارت پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی بر حسب حرارت اندازه‌گیری شده از کلکتورها برای شبکه‌های ۲ و ۳ لایه با تعداد مختلف نرون در لایه‌های مخفی و همچنین دو نوع مختلف تابع فعالیت تک قطبی و دو قطبی برای داده‌های آموزشی و تست نشان داده شده است.



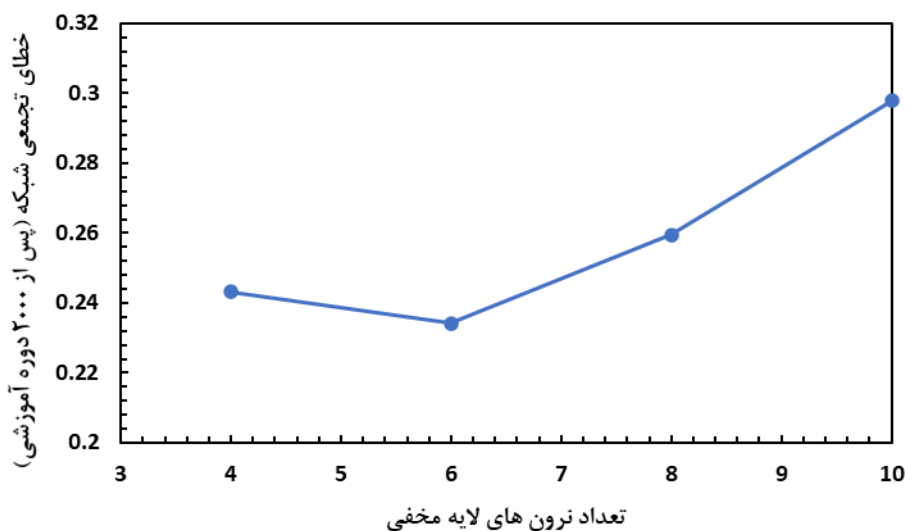
شکل ۳: تغییرات حداقل خطای شبکه بر حسب ضریب تابع فعالیت به ازای ۲۰۰۰ سیکل آموزشی.

۳-۳- آموزش شبکه عصبی

تعداد داده‌های آموزشی ۳۰ عدد می‌باشد و آموزش به روش پس انتشار خطا صورت گرفته است که در آن وزن‌های شبکه در جهت کاهش خطای شبکه اصلاح می‌گردد و فرآیند به صورت تکراری تا رسیدن به یک خطای معقول برای شبکه ادامه می‌یابد. ۷۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰٪ باقیمانده که به صورت تصادفی از بین داده‌ها استخراج شده‌اند، به عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شده‌اند. در



شکل ۴: تغییرات خطای تجمعی شبکه بر حسب دوره آموزشی برای شبکه عصبی ۲ لایه.



شکل ۵: تغییرات خطای تجمعی شبکه بر حسب تعداد نرون های لایه مخفیو

شبکه عصبی انتخاب شده برای مقادیر مختلف پارامترهای شبکه آموزش داده شد و بهترین آموزش در یک شبکه عصبی دو لایه با مقادیر ۶ برای تعداد نرون های لایه مخفی و ۰/۰۴ برای نرخ یادگیری اولیه حاصل شد. برای این شبکه تغییرات خطای تجمعی شبکه بر حسب دوره آموزشی در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز مقدار خطای شبکه (حداقل خطا در پایان ۲۰۰۰ دوره آموزشی) بر حسب

جدول ۳: نتایج آموزش و تست شبکه عصبی ۲ لایه برای مقادیر مختلف تعداد نرون های لایه های مخفی.

تعداد لایه های مخفی	خطای جذر میانگین مربعات (%)	
	آموزش	تست
۴	۹/۰	۱۱/۳
۶	۸/۸	۱۰/۰
۸	۹/۳	۸/۹
۱۰	۹/۹	۱۰/۷

نانوسیال (w/v%)، نسبت وزن نانوذرات فلزی به حجم نانوسیال (w/v%) و میزان اسیدی بودن نانوسیال (pH) هستند که به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. محدوده مجاز این متغیرها برای فرآیند بهینه‌سازی همان محدوده آزمایش شده در فرآیند اندازه‌گیری می‌باشد که در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. هدف از بهینه‌سازی سیستم بدست آوردن بالاترین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی ممکن به ازای محدوده مجاز مذکور برای پارامترهای سیستم است به عبارتی تابع هدف بهینه‌سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی می‌باشد.

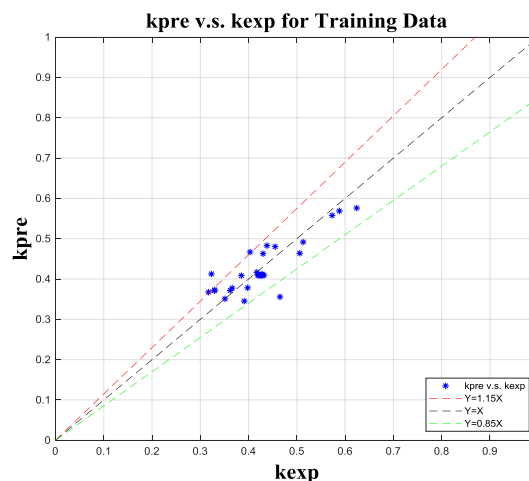
جدول ۴: متغیرهای بهینه‌سازی و تابع هدف استفاده شده در فرآیند بهینه‌سازی.

متغیرهای بهینه‌سازی		متغیر	کمترین مقدار	بیشترین مقدار
عنوان	واحد			
نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول	v/v%	F1	۳۰	۷۰
نسبت وزن نانولوله‌های کربنی به حجم نانوسیال	w/v%	F2	۰/۰۱	۱
نسب وزن نانوذرات فلزی به حجم نانوسیال	w/v%	F3	۰/۱	۲
میزان اسیدی بودن نانوسیال	pH	F4	۲	۱۰

۳-۵-۲- بهینه‌سازی ضریب هدایت حرارتی

به منظور جلوگیری از افتادن در دام اکسترم‌های محلی، در الگوریتم ژنتیک از فرآیند جهش استفاده می‌شود که در آن تعدادی از کروموزوم‌های هر نسل بطور تصادفی انتخاب و همانند جمعیت اولیه تولید می‌شوند. در این کار ضریب جهش از ۱٪ تا ۸٪ تغییر داده شده است (به ازای هر مقدار جمعیت اولیه). مقدار جمعیت اولیه نیز در فرآیند بهینه‌سازی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کروموزوم تغییر داده شد تا بهترین جمعیت اولیه که در آن ضریب هدایت حرارتی بالاتر حاصل می‌شود پیدا گردد زیرا با انتخاب جمعیت اولیه بزرگتر احتمال افتادن در دام اکسترم‌های محلی کاهش می‌یابد و احتمال رسیدن

تعداد نرون‌های لایه مخفی ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود مقدار خطای شبکه به ازای ۶ عدد نرون در لایه مخفی کمترین مقدار را دارد.



شکل ۶: ضریب هدایت حرارتی بدست آمده از شبکه عصبی آموزش داده شده بر حسب ضریب هدایت حرارتی واقعی (اندازه‌گیری شده).

۳-۵-۳- بهینه‌سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی به عنوان تابع هدف انتخاب شده است و هدف از بهینه‌سازی حداکثر نمودن این پارامتر می‌باشد. به دلایل زیر از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شده است:

- عدم دسترسی به مدل ریاضی سیستم
 - ماهیت غیرخطی رفتار سیستم
 - غیرخطی بودن مدل بهینه‌سازی
 - محدوده تغییرات وسیع برای پارامترهای بهینه‌سازی
- به دلیل پیوسته بودن متغیرهای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک با ژن‌های پیوسته استفاده شده است [۳۹].

۳-۵-۳-۱- متغیرهای بهینه‌سازی و تاثیر آنها بر راندمان

ورودی‌های شبکه عصبی شامل نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول (v/v%)، نسبت وزن نانولوله‌های کربنی به حجم

$$Offspring_1 = [P_{new_1}^1, P_{new_2}^1, \dots, P_{new_{N_{par}}}^1]$$

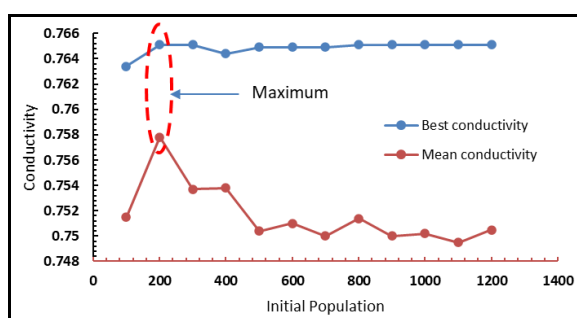
$$Offspring_2 = [P_{new_1}^2, P_{new_2}^2, \dots, P_{new_{N_{par}}}^2]$$
(۷)

$$P_{new_1} = \beta P_{mn} + (1 - \beta) P_{dn}$$
(۸)

$$P_{new_2} = (1 - \beta) P_{mn} + \beta P_{dn}$$
(۹)

۳-۵-۳- نتایج بهینه‌سازی

در شکل ۷ نحوه تغییرات بهترین مقدار تابع هدف به ازای مقادیر مختلف جمعیت اولیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است به ازای مقادیر یکسان تولید نسل برای جمعیت‌های اولیه نشان داده شده تعداد ۲۰۰ برای جمعیت اولیه مطلوب‌ترین گزینه می‌باشد زیرا به ازای کمترین زمان برای فرآیند بهینه‌سازی منجر به بالاترین ضریب هدایت حرارتی شده است.



شکل ۷: تغییرات بهترین ضریب هدایت حرارتی و متوسط ضریب هدایت حرارتی بر حسب جمعیت اولیه.

در شکل ۸ تغییرات تعداد بازتولید لازم برای رسیدن به نقطه بهینه به ازای مقادیر مختلف جمعیت اولیه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد مقدار جمعیت اولیه مابین ۱۰۰ الی ۳۰۰ یک مقدار مطلوب برای جمعیت اولیه خواهد بود که در آن تعداد بازتولید لازم برای رسیدن به نقطه بهینه حداقل می‌باشد.

شکل نشان دهنده تغییرات مقدار تابع هدف (راندمان حرارتی سیستم) در بازتولیدهای مختلف طی فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود با حذف

به مقدار مطلوب‌تر برای تابع هدف افزایش می‌یابد اما با این کار زمان اجرای برنامه بهینه‌سازی به شدت افزایش می‌یابد. انتخاب کروموزوم‌های پدر و مادر جهت بازترکیب و تولید نسل بر اساس بیشترین احتمال تجمعی که با استفاده از تابع هدف محاسبه می‌شود، صورت گرفته است. بدین ترتیب که ابتدا جمعیت هر نسل پس از مرتب‌سازی بر اساس مقدار تابع هدف به دو نیمه جمعیت خوب و جمعیت بد تقسیم می‌گردد و نیمه بد حذف می‌گردد و از میان نیمه خوب به اندازه نصف جمعیت خوب جفت انتخاب می‌شود که هر جفت والدین یک جفت فرزند تولید می‌کند و به نیمه خوب اضافه می‌گردد تا جمعیت نسل ثابت بماند. نحوه انتخاب والدین طبق روابط (۵) و (۶) صورت می‌پذیرد بدین ترتیب که ابتدا احتمال تجمعی بر اساس اختلاف تابع هدف هر کروموزوم در نیمه جمعیت خوب از بهترین کروموزوم در جمعیت بد محاسبه می‌شود سپس یک عدد تصادفی برای هر یک از کروموزوم‌های نیمه جمعیت خوب تولید می‌شود و در صورتی که احتمال تجمعی هر کروموزوم در جمعیت خوب از عدد تصادفی بیشتر باشد آن کروموزوم به عنوان والد انتخاب می‌گردد.

$$P_n = \frac{C_n}{\sum_{p=1}^{N_{good}} C_p}$$
(۴)

$$C_n = Cost_n - Cost_{N_{good}+1}$$
(۵)

بازترکیب با استفاده از یک نقطه قطع و ترکیب تصادفی کروموزوم‌های والد با استفاده از روابط (۶) الی (۹) صورت می‌پذیرد. شرط همگرایی یا همان شرط توقف فرآیند بهینه‌سازی برابر 1×10^{-6} در تغییرات نسبی بهترین مقدار تابع هدف و مقدار متوسط تابع هدف در جمعیت در نظر گرفته شده است.

$\beta = \text{Random in } [0, 1]$ for paring of chromosomes

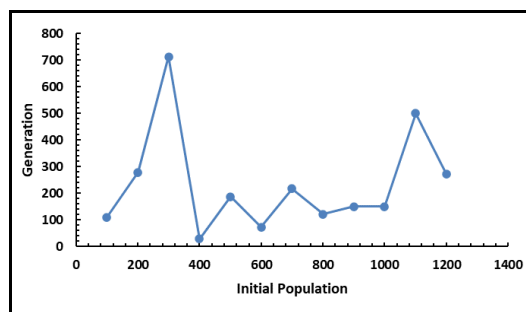
$\beta = \text{Random in } (1, 2, 3)$ for crossover (۶)

جدول ۵: مقدار بهینه تابع هدف و متغیرهای بهینه در نقطه بهینه.

مقدار	متغیر	واحد	عنوان
۰/۷۶۵۱	k	W/m.K	ضریب هدایت حرارتی
مقدار بهینه متغیرهای ورودی	F1	v/v%	نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول
	F2	w/v%	نسبت وزن نانولوله‌های کربنی به حجم نانوسیال
	F3	w/v%	نسب وزن نانوذرات فلزی به حجم نانوسیال
	F4	-	میزان اسیدی بودن نانوسیال

رابطه با اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌های ترکیبی انجام شده است که هر کدام دارای خصوصیات خاص خود می‌باشند [۳۸-۳۵، ۳۰، ۲۹]. جهت مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیق‌های پیشین، خلاصه‌ای از روش استفاده شده در آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. با مقایسه روش استفاده شده در این تحقیق با مطالعات انجام شده مشخص می‌شود تاکنون بررسی ضریب هدایت حرارتی بهینه نانوسیال ترکیبی چهار جزئی شامل دو جزء سیال پایه و دو جزء نانوذرات با روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک انجام نشده است. مقایسه روش‌های استفاده شده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌های ترکیبی به پارامترهای مختلفی وابسته است و متفاوت بودن یک پارامتر تاثیرگذار در دو تحقیق می‌تواند به نتایج مختلفی منجر شود. بر این اساس بایستی در هنگام استفاده از خواص نانوسیال‌های ترکیبی، کاملاً از شرایط و خصوصیات سیال‌های پایه، نانوذرات استفاده شده، میزان اسیدی بودن و سورفکتانت بکار برده شده اطلاع کافی داشت.

کروموزوم‌های بد در هر بازتولید و جایگزینی آن‌ها با نسل‌های جدید مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد.

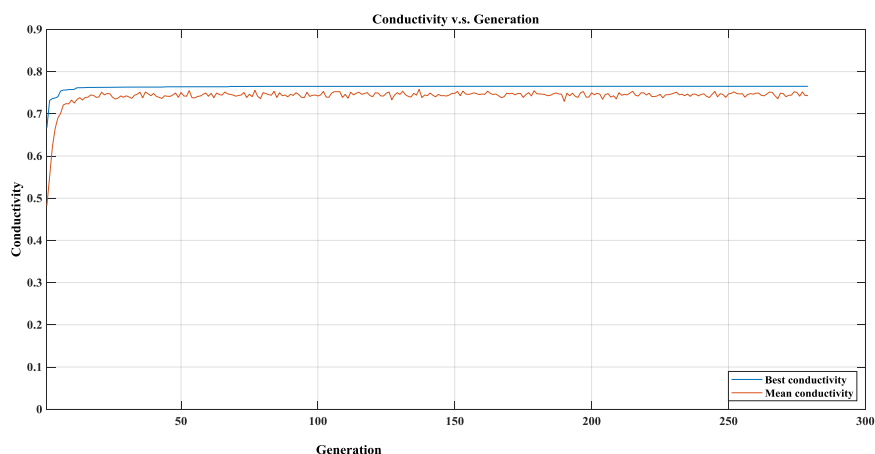


شکل ۸: تغییرات تعداد بازتولید بر حسب جمعیت اولیه.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی ضریب هدایت حرارتی در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشخص است با افزایش درصد نانوذرات و افزایش خاصیت اسیدی بودن محیط، ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. به عبارتی ضریب هدایت حرارتی در محیط اسیدی یعنی در pHهای کمتر، بیشتر است. این امر مبین آن است که در محیط‌های اسیدی شرایط به گونه‌ای که نانوذرات به صورت کامل در سیال توزیع شده‌اند و شارژ سطحی ذرات موجب دفعه میان آن‌ها و عدم تجمع ذرات در محیط محلولی سیال می‌گردد. حال آنکه در محیط قلیایی به دلیل حضور زیاد یون‌های منفی هیدروکسید در محیط، ذرات به سوی هم رانده شده و در محیط سیال تجمع می‌یابند. این تجمع موجب کاهش تعداد برخوردها و کاهش میزان انتقال بار و جریان در سیال می‌گردد. در نتیجه آن ضریب هدایت حرارتی کمتری حاصل شده است.

۳-۵-۴- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با تحقیقات پیشین

همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد، مطالعات مختلفی در



شکل ۹: تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بر حسب بازتولید.

جدول ۶: مقایسه روش استفاده شده و نتایج بدست آمده برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در مراجع مختلف.

مرجع	سیال/سیال‌های پایه	نانوذرات استفاده شده	روش بررسی	نتایج
[۳۰]	water	MWCNT-CuO	روش تجربی برای استخراج داده‌ها، شبکه عصبی مصنوعی برای ارائه رابطه	دقت بالای رابطه ارائه شده، افزایش ۳۰/۳۸٪ ضریب هدایت حرارتی در دمای ۵۰ °C نسبت به دمای محیط برای ۰/۶٪ حجمی نانوذرات
[۳۲]	water-ethylene glycol (50:50)	SiO ₂	روش تجربی برای استخراج داده‌ها، شبکه عصبی مصنوعی برای ارائه رابطه	دقت بالای رابطه ارائه شده، پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی برحسب درصد حجمی نانوذرات و دمای نانوسیال
[۲۹]	Engine Oil	WO ₃ -MWCNTs	روش تجربی	افزایش ۱۹/۸۵٪ ضریب هدایت حرارتی در دمای ۶۰ °C برای ۰/۶٪ حجمی نانوذرات نسبت به سیال پایه
[۳۶]	Ethylene glycol	ZnO-TiO ₂	روش تجربی برای استخراج داده‌ها، شبکه عصبی مصنوعی برای ارائه رابطه	دقت بالای رابطه ارائه شده، دقت بیشتر روش شبکه عصبی نسبت به برازش منحنی
[۳۵]	water-ethylene glycol (50-50)	MWCNT-TiO ₂	روش تجربی برای استخراج داده‌ها، برازش منحنی و شبکه عصبی مصنوعی برای ارائه رابطه	تفاوت کم در نتایج رابطه مستخرج از رابطه روش برازش منحنی و شبکه عصبی
[۳۷]	water	MWCNT-CuO	استفاده از روش SVR (Support Vector Regression) و شبکه عصبی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی	برای حجم داده‌های ورودی کم، روش SVR بهتر از روش شبکه عصبی است.
تحقیق حاضر	water-ethylene glycol	Fe ₂ O ₃ -SWCNT	روش تجربی برای استخراج داده‌ها، شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی رفتار نانوسیال و استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن ضریب هدایت حرارتی	دقت خوب شبکه عصبی برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی، پیدا کردن بهترین مقادیر برای نسبت‌های سیال‌های پایه و نانوذرات نانولوله‌های کربنی تک جداره و آهن II اکسید

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس تغییر مواد سازنده آن‌ها به روش سطح پاسخ تهیه شدند. نانوسیال‌های ترکیبی نسل جدیدی از نانوسیال‌ها هستند که حاوی ترکیبی از نانوذرات مختلف و سیال پایه هستند و

در این مقاله نانوسیال‌های ترکیبی بر پایه اتیلن گلیکول و آب حاوی نانوذرات آهن II اکسید و نانولوله کربنی تک جداره

علائم و اختصارات

آموزشی	Tr	ضریب هدایت حرارتی	k
تعداد نرون‌های خروجی	Out	نسبت پرشدگی	CR
احتمال	P	تعداد	N
تعداد جمعیت در هر نسل	p	تعداد نرون‌ها در لایه مخفی	NH
عدد تصادفی بین ۰ و ۱	α	عدد تصادفی بین ۰ و ۱	β
عدد تصادفی بین ۰ و ۱	γ	تعداد جمعیت خوب در هر نسل	Ngood
پارامتر کنترل در SA	τ	عدد تصادفی بین ۰ و ۱	ω
		خطای تجمعی	E _{Co}

مراجع

- [1] M.H. Talebi, V. Kalantar, M.R. Nazari, H. Kargarsharifabad, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, **8**, 2018, 229.
- [2] M.H. Dibaei, H. Kargarsharifabad, *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, **4**, 2017, 1.
- [3] J.A. Eastman, U.S. Choi, S. Li, L.J. Thompson, S. Lee, *MRS Proceedings*, **457**, 2011, 3.
- [4] S. Pil Jang, S.U. Choi, 2006.
- [5] C. Kleinstreuer, Y. Feng, *Nanoscale Research Letters*, **6**, 2011, 229.
- [6] W. Yu, D.M. France, J.L. Routbort, S.U.S. Choi, *Heat Transfer Engineering*, **29**, 2008, 432.
- [7] A. Aminian, *Powder Technology*, **301**, 2016, 288.
- [8] S. Mukherjee, P.C. Mishra, S. Parashar, P. Chaudhuri, *Heat and Mass Transfer*, **52**, 2016, 2575.
- [9] J. Philip, P.D. Shima, *Advances in Colloid and Interface Science*, **183**, 2012, 30.
- [10] A.D. Manasrah, T. Laoui, S.J. Zaidi, M.A. Atieh, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **84**, 2017, 231.
- [11] S. Murshed, K. Leong, C. Yang, *Applied Thermal Engineering*, **28**, 2008, 2109.
- [12] D.H. Kumar, H.E. Patel, V.R. Kumar, T. Sundararajan, T. Pradeep, S.K. Das, *Physical Review Letters*, **93**, 2004, 144301.
- [13] C.H. Chon, K.D. Kihm, S.P. Lee, S.U. Choi, *Applied Physics Letters*, **87**, 2005, 153107.
- [14] C.H. Li, G. Peterson, *Journal of Applied Physics*, **99**, 2006, 084314.
- [15] Z. Wang, D. Tang, S. Liu, X. Zheng, N. Araki, *International Journal of Thermophysics*, **28**, 2007, 1255.
- [16] M. Corcione, *Energy Conversion and Management*, **52**, 2011, 789.
- [17] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, *Journal of Heat Transfer*, **125**, 2003, 567.
- [18] Q. Li, Y. Xuan, J. Wang, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, 2005, 109.

نسبت به نانوسیال‌های معمولی، دارای خواص بهبود یافته‌ای هستند. هدایت حرارتی نانوسیال‌ها با روش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. از روش FESEM برای تشریح نانوذرات آهن اکسید، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذره ترکیبی بکار برده شد. با توجه به وابسته بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی در این تحقیق به چهار پارامتر فوق، از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن مقادیر بهینه استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل شده از شبکه عصبی مشاهده می‌شود که شبکه عصبی به خوبی معماری شده و آموزش یافته است به طوری که متوسط خطای شبکه پس از آموزش ۸ درصد بدست آمده است.

به منظور دستیابی به نقطه بهینه کلی برای ضریب انتقال حرارت، متغیرهای بهینه‌سازی در محدوده وسیعی تغییر داده شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که تمامی متغیرهای بهینه‌سازی تاثیر نسبتاً یکنواختی بر روی ضریب هدایت حرارتی دارند. بر این اساس با اتیلن گلیکول برابر ۳۰/۰۱٪، مقدار نانولوله کربنی تک جداره برابر ۰/۹۹۸٪، نانوذرات آهن II اکسید برابر ۱/۹۹٪ و pH برابر ۲/۰۰۱۸ ضریب هدایت حرارتی نسبت به سایر نسبت‌های دیگر افزایش یافته است و مقدار بیشینه برای ضریب هدایت حرارتی W/m.K ۰/۷۶۵۱ بدست آمده است. همان‌طور که از جدول ۵ نیز مشاهده می‌شود، در نقطه بهینه که ضریب انتقال حرارت برابر ۰/۷۶۵۱ W/m.K است، نسبت حجمی آب به اتیلن گلیکول و میزان اسیدی بودن نانوسیال حداقل مقدار ممکن را اختیار می‌کند. همچنین فاکتورهای نسبت وزن نانولوله‌های کربنی به حجم نانوسیال و نسب وزن نانوذرات فلزی به حجم نانوسیال در نقطه بهینه حداکثر مقدار مجاز را انتخاب می‌کنند. همچنین از نتایج حاصل شده می‌توان استنباط کرد که متغیرهای بهینه‌سازی به صورت مستقل بر روی ضریب هدایت حرارتی تاثیر می‌گذارند و وابستگی بین این متغیرها دیده نمی‌شود.

- [31] M.H. Esfe, S. Wongwises, A. Naderi, A. Asadi, M.R. Safaei, H. Rostamian, M. Dahari, A. Karimipour, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **66**, 2015, 100.
- [32] S. Rostami, D. Toghraie, M.A. Esfahani, M. Hekmatifar, N. Sina, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **143**, 2021, 1119.
- [33] A. Moradi, M. Zareh, M. Afrand, M. Khayat, *Powder Technology*, **362**, 2020, 578.
- [34] H.W. Xian, N.A.C. Sidik, R. Saidur, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **110**, 2020, 104389.
- [35] A. Akhgar, D. Toghraie, N. Sina, M. Afrand, *Powder Technology*, **355**, 2019, 602.
- [36] M.R. Safaei, A. Hajizadeh, M. Afrand, C. Qi, H. Yarmand, N.W. Zulkifli, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **519**, 2019, 209.
- [37] A. Karimipour, S.A. Bagherzadeh, A. Taghipour, A. Abdollahi, M.R. Safaei, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **521**, 2019, 89.
- [38] A. Asadikia, S.A.A. Mirjalily, N. Nasirzadeh, H. Kargarsharifabad, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **117**, 2020, 104603.
- [39] R.L. Haupt, S.E. Haupt, *A Wiley-Interscience Publication, USA*, 1998.
- [19] L. Syam Sundar, M.K. Singh, A.C.M. Sousa, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **44**, 2013, 7.
- [20] A.K. Sharma, R.K. Singh, A.K. Tiwari, A. Dixit, J. Katiyar, *Tribology in Materials and Applications*, Springer, 2020.
- [21] W. Chen, X. Zhang, Y. Zhang, M. Mamadiev, *Journal of Molecular Liquids*, **241**, 2017, 1013.
- [22] S. Akilu, K. Sharma, A.T. Baheta, R. Mamat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **66**, 2016, 654.
- [23] J.R. Babu, K.K. Kumar, S.S. Rao, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **77**, 2017, 551.
- [24] P.K. Das, *Journal of Molecular Liquids*, **240**, 2017, 420.
- [25] J. Sarkar, P. Ghosh, A. Adil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **43**, 2015, 164.
- [26] M.H. Esfe, S.H. Rostamian, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **553**, 2020, 12406.
- [27] M. Esfe, S. Saedodin, W. Yan, M. Afrand, N. Sina, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **124**, 2016, 455.
- [28] M.H. Esfe, A.A.A. Abbasian Arani, M. Rezaie, W.M. Yan, A. Karimipour, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **66**, 2015, 189.
- [29] F. Soltani, D. Toghraie, A. Karimipour, *Powder Technology*, **371**, 2020, 37.
- [30] S. Rostami, D. Toghraie, B. Shabani, N. Sina, P. Barnoon, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **143**, 2021, 1097.