

محاسبه و بهینه سازی هدایت حرارتی و ویسکوزیته ی نانوسیال هیبریدی اکسید

آلومینیم / نانو لوله های کربنی چند جداره با سیال پایه ی روغن

میلاد گودرزی دهریزی

کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)
Goodarzi.milad18@gmail.com

محمد همت اسفه

استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)
m.hemmatesfe@gmail.com

سعید اسفنده

دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان
Saeedesfandeh.uk@gmail.com

چکیده

بهینه سازی خواص هدایت حرارتی و ویسکوزیته ی نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیم _ نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه روغن با روش های الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب و روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر دما و کسر حجمی نانوذره بر هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج روش سطح پاسخ نشان داد که مدل هدایت حرارتی دارای ضریب رگرسیون 0.9959 و مدل ویسکوزیته دارای ضریب رگرسیون 0.9989 می باشد. با بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر خاصیت ترموفیزیکی نانوسیال دریافت شد که افزایش دما اثر مثبتی برای هر دو خاصیت هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال به منظور دستیابی به بهترین راندمان نانوسیال دارد. همچنین مشخص شد که دما و کسر حجمی تاثیر مستقیم بر هدایت حرارتی می گذارند. اما در مورد ویسکوزیته نانوسیال دما تاثیر معکوس و کسر حجمی تاثیر مستقیم می گذارد. در بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب مقادیر بهینه ویسکوزیته و هدایت حرارتی در بیشترین دمای عملیاتی گزارش شده اند. در روش سطح پاسخ بهینه ترین حالت برای استفاده از نانوسیال در دمای $49/99$ درجه سانتی گراد و کسر حجمی $1/49$ ٪ با هدایت حرارتی 0.1820 (W/mK) و ویسکوزیته 0.1174 ($Pa.sec$) با درجه مطلوبیت 0.9725 نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: نانوسیال هیبریدی، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب، هدایت حرارتی، ویسکوزیته.

۱- مقدمه

از تعلیق مقدار مشخصی از ذرات جامد نانوساختار در یک سیال خنک کننده معمولی مانند اتیلن گلیکول و آب سیال جدیدی به نام نانوسیال تشکیل می گردد [۱]. در واقع نانوسیالات به علت جنبش و برهمکنش براونی ذرات عملکرد بالاتر انتقال حرارت را نسبت به سیالات معمولی از خود نشان می دهد. بر همین اساس گروه های متعددی از پژوهشگران در این زمینه مطالعات فراوانی را انجام داده اند [۲-۱۰]. همانطور که اشاره شد، نانوسیال از ذرات در ابعاد نانومتری در سیال پایه ساخته می شود. در نتیجه، تغییراتی در خواص فیزیکی آنها، مانند ویسکوزیته، دانسیته و هدایت حرارتی در مقایسه با سیال پایه، رخ می دهد [۱۱]. در همین راستا خواص ترموفیزیکی نانوسیالات در سال های اخیر به مرور بررسی شده است که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: تحقیقات مروری انجام شده بر روی خواص و اثرات نانوسیالات

نویسنده	نوع نانوسیال	اثر مورد بررسی	نتیجه گیری
بنرجی و جو [۱۲]	نانو لوله های کربنی چند جداره با سیال پایه ی نمک مذاب	افزایش ظرفیت حرارتی ویژه	افزایش ظرفیت حرارتی ویژه در دمای ۴۰۰ درجه ی سانتی گراد برای فاز مایع در محدوده ۶ تا ۲۹/۳ درصد می باشد.
چندران و همکاران [۱۳]	اکسید روی - کپسول موم پارافین / سیال پایه آب و پروپیلن گلیکول	گرمای ویژه	مقدار افزایش برای گرمای ویژه ۱۸/۶۵٪ می باشد.
عطاری و همکاران [۱۴]	تیتانیوم دی اکسید _ اکسید نیکل_ اکسید _ آهن_ اکسید روی اکسید تنگستن / سیال پایه روغن	ویسکوزیته	در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد افزایش کسر جرمی اکسید نانوذرات، باعث افزایش ویسکوزیته نسبی نانوسیالات از ۰/۹ تا ۱/۴ می شود.
همت و همکاران [۱۵]	اکسید روی_ نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه اتیلن گلیکول	هدایت حرارتی	در کسر حجمی ۱/۹٪ و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، حداکثر هدایت حرارتی نسبی مقدار ۱/۲۴۸ حاصل می شود.
زیلا و فال [۱۶]	اکسید سیلیکون / سیال پایه اتیلن گلیکول	هدایت حرارتی و ویسکوزیته	حداکثر هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات در کسر حجمی ۰/۰۲۶، به ترتیب برابر با ۰/۲۵۲۶ و ۰/۰۲۳۵۰ می باشد.
همت و همکاران [۱۷]	اکسید مس / سیال پایه اتیلن گلیکول	ویسکوزیته	با افزایش غلظت حجمی (از ۰ تا ۱/۵٪) در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و ویسکوزیته از ۷/۸ تا ۴۱/۹۸ مگا پاسکال در ثانیه افزایش می یابد.

با استفاده از مدل سازی و روش های عددی مانند شبکه ی عصبی مصنوعی؛ روش سطح پاسخ الگوریتم ژنتیک^۲، منطق فازی، الگوریتم ازدحام جمعیت پرندگان^۴، می توان به بررسی خواص و شرایط ترموفیزیکی نانوسیالات مانند؛ به دست آوردن توزیع بهینه انتقال حرارت، به منظور بهینه سازی چند منظوره، بهینه سازی جریان و عملکرد حرارتی، تعیین شرایط بهینه انتقال حرارت جریان نانوسیالات، پیش بینی خواص حرارتی و فیزیکی نانوسیالات پرداخت [۱۸-۲۰].

- . Artificial neural network
- . Response surface method
- . Genetic algorithm
- . Particle Swarm Optimization

امینیان [۲۱]، برای بهبود میزان انتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تغذیه رو به جلو ویسکوزیته ی موثر نانوسیالات را پیش بینی کرده است. او برای ارزیابی صحت مدل پیشنهادی، هشت نوع نانوسیال مختلف، سیلیکون کرباید، اکسید مس، نانو لوله ی چند جداره، اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، نیکل، اکسید آلومینیم، نقره با سیال پایه آب را مورد استفاده قرار داد. او دریافت که خطای پیش‌بینی توسط مدل و داده‌های واقعی با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش می‌یابد. وی به این نتیجه رسید که ویسکوزیته دینامیکی پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با داده های تجربی با مطابقت بالایی برخوردار می باشد. همت [۲۲]، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیش بینی انتقال حرارت و ویژگی‌های افت فشار نانوسیال نقره / سیال پایه آب را با کسر حجمی تا ۱٪ در مبدل حرارتی بررسی کرد. او برای ارزیابی دقت روش خود ضریب رگرسیون داده‌ها را برای افت فشار نسبی و عدد ناسلت نسبی محاسبه نمود، که این مقادیر به ترتیب ۹۹/۵۴٪ و ۹۹/۷۶٪ بدست آمدند.

در این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی مورد مطالعه اسدی و همکاران [۲۳] بهینه‌سازی خواص نانوسیال اکسید روی - نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه روغن با کمک روش های الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب و سطح پاسخ انجام شده است. به منظور بهینه کردن هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال، به کمک سطح پاسخ مدل‌سازی صورت گرفته است و تاثیر دما و کسر حجمی نانوذره بررسی شده است.

۲- مدل روش سطح پاسخ

متدولوژی سطح پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در این گونه طرح‌ها بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. در سطح پاسخ فرض می‌شود که خطاها تصادفی هستند. کاربرد سطح پاسخ برای بهینه‌سازی طرح، در کاهش هزینه روش‌های تحلیل گرانیقت و بی‌نظمی‌های عددی مرتبط با آنها می‌باشد. روش‌های سطح پاسخ می‌توانند بسته به کاربردشان در طرح آزمایش به روش‌های متفاوتی طرح شوند. کاربرد روش‌های سطح پاسخ در صنایع بسیار وسیع است که از جمله می‌توان به صنایع شیمیایی، پتروشیمی، غذایی، دارویی، میکروبیولوژی و ... اشاره نمود [۲۴].

در سطح پاسخ، معادله مدل معادله مرتبه دوم کامل می‌باشد. مدل مرتبه دوم می‌تواند به شکل معادله (۱) نوشته شود:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i < j = 1}^4 \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

که β_0 ، β_i ، β_{ii} و β_{ij} به ترتیب ثابت، اثر خطی، اثر دوم و اثرات متقابل ضرایب رگرسیون می‌باشد. x_i و x_j متغیر مستقل کد شده هستند.

۲-۱- مدل سازی با روش سطح پاسخ

در این بخش به بررسی معادلات مدل شده برای پیش‌بینی هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید روی - نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه روغن پرداخته شده است. اسدی و همکاران [۲۳] هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال را در ۶ کسر حجمی مختلف (۰/۱۲۵٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪) و در محدوده دمایی ۲۵ الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند.

مدل رگرسیون روش سطح پاسخ برای تعیین عملکرد هدایت حرارتی نانوسیال مورد مطالعه اسدی و همکاران [۲۳] توسط معادله ۵ به نمایش گذاشته شده است:

Thermal Conductivity

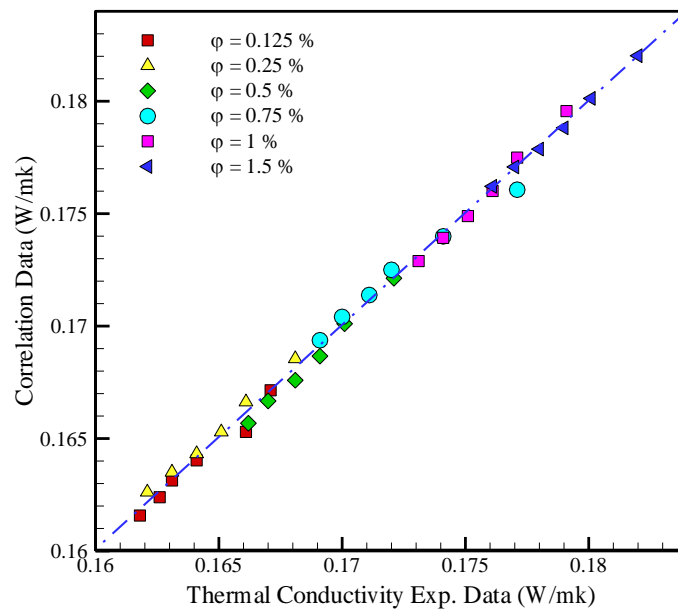
$$= 0.1486 - 0.001121 \times \varphi + 0.0009998 \times T + 0.0001481 \times \varphi \times T \quad (2)$$

$$+ 0.020036 \times \varphi^2 - 2.75 \times 10^{-5} \times T^2 - 8.68 \times 10^{-5} \times \varphi^2 \times T$$

$$- 0.0085461 \times \varphi^3 + 2.91E \times 10^{-7} \times T^3$$

که در آن T و φ به ترتیب دما و کسر حجمی جامد نانوذرات می‌باشد.

شکل ۱ نمودار انطباق بر اساس نتایج تجربی مدل سطح پاسخ پیشنهادی برای تابع هدایت حرارتی نانوسیال را نشان می‌دهد. این امر برای ارزیابی کیفیت مدل سطح پاسخ هدایت حرارتی نانوسیال صورت پذیرفت. نزدیک بودن نقاط بر خط مورب بیانگر آن است که مقادیر آزمایشی با مقادیر پیش بینی شده توافق خوبی دارند.



شکل ۱: نمودار تطابق رابطه پیشنهادی با داده های تجربی هدایت حرارتی

در همین راستا برای پیش‌بینی ویسکوزیته اکسید روی - نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه روغن معادله مدل رگرسیون روش سطح پاسخ ارائه شده است که به شکل زیر می‌باشد:

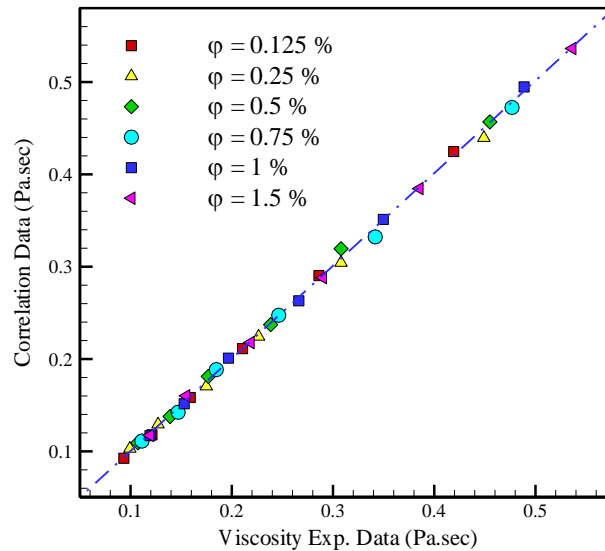
$$Viscosity = 4.0203 + 0.26016 \times \varphi - 0.3312 \times T - 0.001096 \times \varphi \times T - 0.3846$$

$$\times \varphi^2 + 0.01118 \times T^2 - 0.000878 \times \varphi^2 \times T + 0.386 \times \varphi^3 - 0.0001752 \quad (3)$$

$$\times T^3 - 0.1194 \times \varphi^4 + 1.048 \times 10^{-6} \times T^4$$

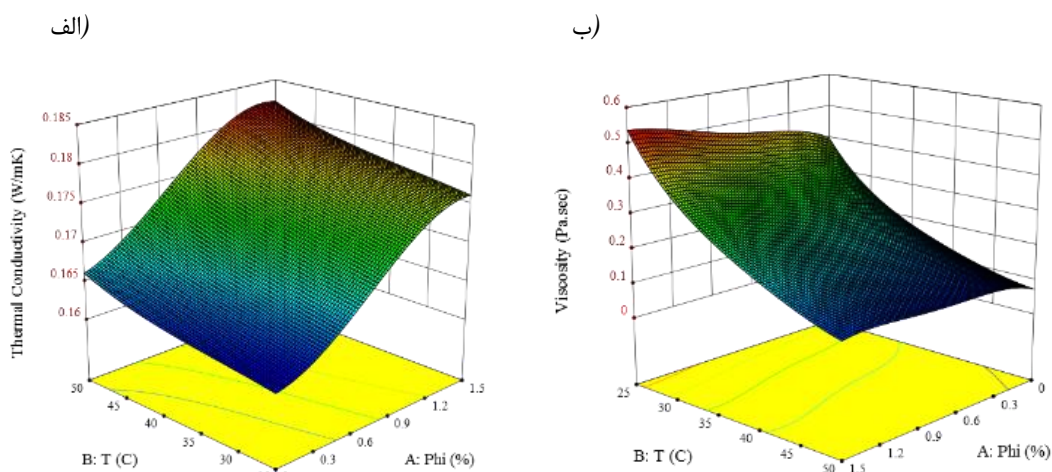
که در آن T و φ به ترتیب دما در سیال پایه و کسر حجمی جامد نانوذرات می‌باشد.

برای ارزیابی کیفیت مدل سطح پاسخ ویسکوزیته نانوسیال، نمودار انطباق بر اساس نتایج تجربی برای تابع ویسکوزیته نانوسیال ترسیم شد. این نمودارها در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نزدیک بودن نقاط بر خط مورب نشان از آن است که مقادیر آزمایشی با مقادیر پیش‌بینی شده توافق خوبی دارند.



شکل ۲: نمودار تطابق رابطه پیشنهادی با داده های تجربی هدایت حرارتی

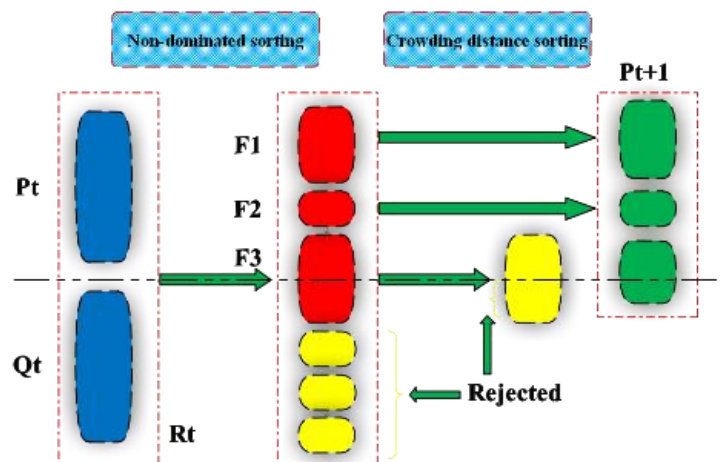
شکل ۳ نمودارهای سه بعدی (الف) هدایت حرارتی و (ب) ویسکوزیته نانوسیال را بر اساس دما و کسر حجمی جامد نانوذرات نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بالاترین هدایت حرارتی نانوسیال در بالاترین دما و کسر حجمی نانوذره اتفاق می‌افتد. در حالیکه بالاترین ویسکوزیته نانوسیال در کمترین دما و بیشترین کسر حجمی نانوذره رخ می‌دهد. بدین ترتیب افزایش دما اثر مثبتی برای هر دو خاصیت هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال به منظور دستیابی به بهترین راندمان نانوسیال دارد. اما در کسر حجمی می بایست مقداری بهینه برای دستیابی به حالت بهینه این دو خاصیت پیدا کرد.



شکل ۳: نمودار سه بعدی (الف) هدایت حرارتی و (ب) ویسکوزیته

۲-۲- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب

الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی چند منظوره است. این الگوریتم برای حل مسائل با پیچیدگی محاسباتی، فقدان نخبگان و برای انتخاب بهینه مقادیر پارامترها بسیار موثر بوده و کاربرد دارد [۲۵]. شکل ۴ ساختار کلی این الگوریتم را نشان می‌دهد.



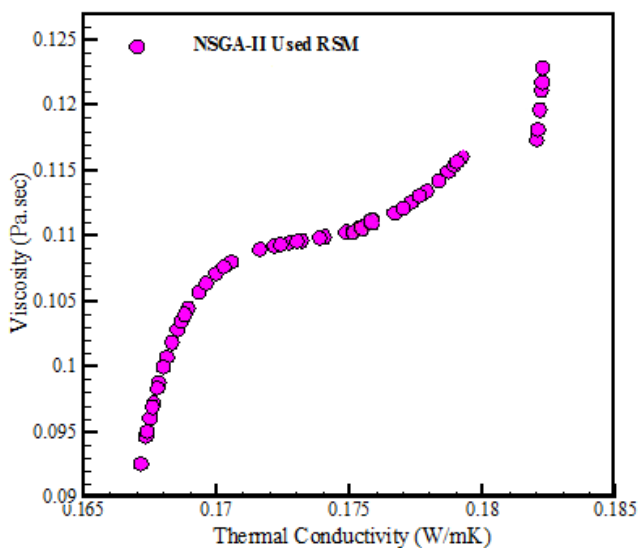
شکل ۴: ساختار الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب

۲-۳- نتایج و بحث بر روی نتایج

بهینه سازی چند هدفه خواص با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب و سطح پاسخ به منظور دستیابی به بهینه ترین مقدار هدایت حرارتی با حداقل نمودن مقدار ویسکوزیته نانوسیال اکسید روی - نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه روغن توسط اسدی و همکاران [۲۳] انجام شده است. به همین منظور، ارزش نقاط بهینه در هر نسل در مقایسه با نسل قبلی بهینه می شود و در نهایت بهترین نتایج ارائه می شود. دما و کسر حجمی نانوذره در مسئله بهینه سازی پیشنهادی، به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می شوند. توابع هدف هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال می باشند که با استفاده از داده های تجربی و از طریق کوپل شدن الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب با سطح پاسخ و درحالتی دیگر با روش سطح پاسخ مدل سازی شد.

۲-۳-۱- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب

جمعیت اولیه ۵۰ نمونه برای الگوریتم قدرتمند ژنتیک، انتخاب گردید. در شکل ۵، مجموعه ای از نتایج غیر غالب در جبهه پارتو ارائه شده است. با توجه به شکل، تمام نقاط جبهه پارتو بهینه هستند و هیچ مزیتی بر یکدیگر ندارند. پژوهشگران می توانند هر کدام از نقاط را با توجه به نیاز خود انتخاب کنند. با توجه به نتایج، در بالاترین دما حداکثر مقدار هدایت حرارتی و حداقل مقدار ویسکوزیته اتفاق می افتد. بدین ترتیب برای انتخاب نقاط بهینه باید به دما توجه بیشتری کرد. همچنین این واقعیت اثبات می گردد که پارامتر دما بسیار مهم تر از کسر حجمی نانوذره می باشد. در جدول ۲ به عنوان نمونه ۱۶ نتیجه بهینه توسط کوپل شدن الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب با تابع مدل شده سطح پاسخ از ارائه شده است.



شکل ۵: مجموعه ای از نتایج غیر غالب در جبهه پارتو

جدول ۲: نتایج بهینه توسط کوپل شدن الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب با تابع مدل شده سطح پاسخ

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
کسر حجمی (%)	۰/۱۲۵	۱/۳۹۹۵۹۹	۱/۳۹۹۵۹۹	۰/۱۲۵	۱/۰۱۱۷۴۵	۱/۵	۰/۴۶۶۹۹۲	۰/۳۹۵۶۱۳
دما (°C)	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۴۹/۹۹۹۴۱	۴۹/۹۹۹۸۶
هدایت حرارتی (W/mK)	۰/۱۶۷۱۴۵	۰/۱۸۲۲۳۹	۰/۱۸۲۲۳۹	۰/۱۶۷۱۴۵	۰/۱۷۹۷۰۳	۰/۱۸۲۰۲۵	۰/۱۷۱۶۱۸	۰/۱۷۰۵۴۴
ویسکوزیته (Pa.sec)	۰/۰۹۲۵۳۶	۰/۱۲۲۸۷۳	۰/۱۲۲۸۷۳	۰/۰۹۲۵۳۶	۰/۱۱۷۳۲۱	۰/۱۱۷۳۶۸	۰/۱۰۸۹۸	۰/۱۰۸۰۲۲
شماره	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
کسر حجمی (%)	۰/۷۳۷۶۸۹	۰/۳۰۹۲۸۴	۰/۷۹۰۳۴۲	۱/۴۶۸۳۹۸	۰/۶۷۲۱۰۹	۰/۹۰۵۰۲۹	۰/۲۳۱۴۹۱	۰/۱۴۳۷۲۶
دما (°C)	۴۹/۹۸۶۱۶	۴۹/۹۸۹۰۲	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۴۹/۹۹۹۹۷	۴۹/۹۸۰۸۸
هدایت حرارتی (W/mK)	۰/۱۷۵۸۷	۰/۱۶۹۳۱۸	۰/۱۷۶۶۸۲	۰/۱۸۲۱۴	۰/۱۷۴۸۵	۰/۱۷۸۳۳۸	۰/۱۶۸۳۲۱	۰/۱۶۷۳۲۴
ویسکوزیته (Pa.sec)	۰/۱۱۱۰۴۶	۰/۱۰۵۷۳۵	۰/۱۱۱۷۷	۰/۱۱۹۶۶۳	۰/۱۱۰۳۱	۰/۱۱۴۲۳۵	۰/۱۰۱۸۶۳	۰/۰۹۴۶۴۷

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش، بهینه سازی خواص هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید روی - نانو لوله های کربنی چند جداره / سیال پایه روغن انجام شده است. در این بهینه سازی، توابع هدف با داده های تجربی ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال و با استفاده از سطح پاسخ انجام شده است. به کمک سطح پاسخ دو معادله برای پیش بینی داده های تجربی هدایت حرارتی و

ویسکوزیته نانوسیالات ارائه شده اند که می توانند عملکرد آنها را به خوبی پیش‌بینی کنند. نتایج زیر از بررسی‌های مطالعه بدست آمد:

- مدل سطح پاسخ هدایت حرارتی نانوسیال دارای ضریب رگرسیون $0/9959$ و مدل سطح پاسخ ویسکوزیته نانوسیال دارای ضریب رگرسیون $0/9989$ می‌باشد.
 - افزایش دما اثر مثبتی برای هر دو خاصیت هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال به منظور دستیابی به بهترین راندمان نانوسیال دارد.
 - دما و کسر حجمی تاثیر مستقیم بر هدایت حرارتی می‌گذارند. اما درمورد ویسکوزیته نانوسیال دما تاثیر معکوس و کسر حجمی تاثیر مستقیم بر ویسکوزیته نانوسیال می‌گذارد.
 - برای ویسکوزیته نانوسیال، مدل سطح پاسخ دقت بالایی از خود نشان داد.
 - در بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک مرتب سازی شده غیر غالب مقادیر بهینه ویسکوزیته و هدایت حرارتی در بیشترین دمای عملیاتی گزارش شده اند.
- © در بهینه‌سازی با سطح پاسخ بهینه ترین حالت برای استفاده از این نانوسیال در دمای $49/99$ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی $1/49\%$ نانوذره با هدایت حرارتی $0/1820 (W/mK)$ و ویسکوزیته $0/1174 (Pa.sec)$ با درجه مطلوبیت $0/9725$ نشان داده شده است.

- [1] Meng, X., & Li, Y. (2015). Numerical study of natural convection in a horizontal cylinder filled with water-based alumina nanofluid. *Nanoscale research letters*, 10(1), 142.
- [2] Esfe, M. H., Amiri, M. K., & Alirezaie, A. Thermal conductivity of a hybrid nanofluid. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-10.
- [3] Esfe, M. H., Zabihi, F., Rostamian, H., & Esfandeh, S. (2018). Experimental investigation, model development of the non-Newtonian behavior of CuO-MWCNT-10w40 nano-lubricant for lubrication purposes, Vol. 249, 677-687, *Journal of Molecular Liquids*.
- [4] Esfe, M. H., & Esfandeh, S. (2018). Rheological behavior of CuO/EG: W (20: 80 v/v) nanofluid from a thermal perspective. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-12.
- [5] Esfe, M. H., & Esfandeh, S. (2018). Investigation of rheological behavior of hybrid oil based nanolubricant-coolant applied in car engines and cooling equipments. *Applied Thermal Engineering*, 131, 1026-1033.
- [6] Esfe, M. H., Esfandeh, S., & Rejvani, M. (2018). Modeling of thermal conductivity of MWCNT-SiO₂ (30: 70%)/EG hybrid nanofluid, sensitivity analyzing and cost performance for industrial applications. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 1437-1447.
- [7] Esfe, M. H., Wongwises, S., Esfandeh, S., & Alirezaie, A. (2018). Development of a New Correlation and Post Processing of Heat Transfer Coefficient and Pressure Drop of Functionalized COOH MWCNT Nanofluid by Artificial Neural Network. *Current Nanoscience*, 14(2), 104-112.
- [8] Esfe, M. H., Alirezaie, A., & Rejvani, M. (2017). TTTd alterations gradient of thermal conductivity increases with the rise of volume fraction of up to 1%, and emmy then, the sensitivity decreases. Generally, the current study is a combination of empirical studies along. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1202-1210.
- [9] Esfe, M. H., Behbahani, P. M., Arani, A. A. A., & Sarlak, M. R. (2017). Thermal conductivity enhancement of SiO₂-MWCNT (85: 15%)-EG hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128(1), 249-258.
- [10] Alirezaie, A., Hajmohammad, M. H., Ahangar, M. R. H., & Esfe, M. H. (2018). Price-performance evaluation of thermal conductivity enhancement of nanofluids with different particle sizes. *Applied Thermal Engineering*, 128, 373-380.
- [11] Kleinstreuer, C., & Feng, Y. (2011). Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review. *Nanoscale research letters*, 6(1), 229.
- [12] Jo, B., & Banerjee, D. (2015). Effect of solvent on specific heat capacity enhancement of binary molten salt-based carbon nanotube nanomaterials for thermal energy storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 98, 219-227.
- [13] Chandran, M. N., Manikandan, S., Suganthi, K. S., & Rajan, K. S. (2017). Novel hybrid nanofluid with tunable specific heat and thermal conductivity: Characterization and performance assessment for energy related applications. *Energy*, 140, 27-39.

- [14] Attari, H., Derakhshanfard, F., & Darvanjooghi, M. H. K. (2017). Effect of temperature and mass fraction on viscosity of crude oil-based nanofluids containing oxide nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 103-113.
- [15] Esfe, M. H., Esfande, S., & Rostamian, S. H. (2017). Experimental evaluation, new correlation proposing and ANN modeling of thermal conductivity of ZnO-DWCNT/EG hybrid nanofluid for internal combustion engines applications. *Appl Therm Eng*.
- [16] Żyła, G., & Fal, J. (2017). Viscosity, thermal and electrical conductivity of silicon dioxide–ethylene glycol transparent nanofluids: an experimental studies. *Thermochimica Acta*, 650, 106-113.
- [17] Esfe, M. H., Bahiraei, M., & Mahian, O. (2018). Experimental study for developing an accurate model to predict viscosity of CuO–ethylene glycol nanofluid using genetic algorithm based neural network. *Powder Technology*.
- [18] Hafezisefat, P., Esfahany, M. N., & Jafari, M. (2017). An experimental and numerical study of heat transfer in jacketed vessels by SiO₂ nanofluid. *Heat and Mass Transfer*, 53(7), 2395-2405.
- [19] Esfe, M. H., Kamyab, M. H., Afrand, M., & Amiri, M. K. (2018). Using artificial neural network for investigating of concurrent effects of multi-walled carbon nanotubes and alumina nanoparticles on the viscosity of 10W-40 engine oil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.in press
- [20] Ahmadloo, E., & Azizi, S. (2016). Prediction of thermal conductivity of various nanofluids using artificial neural network. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 74, 69-75.
- [21] Aminian, A. (2017). Predicting the effective viscosity of nanofluids for the augmentation of heat transfer in the process industries. *Journal of Molecular Liquids*, 229, 300-308.
- [22] Esfe, M. H. (2017). Designing a neural network for predicting the heat transfer and pressure drop characteristics of Ag/water nanofluids in a heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 126, 559-565.
- [23] Asadi, A., Asadi, M., Rezaniakolaei, A., Rosendahl, L. A., Afrand, M., & Wongwises, S. (2018). Heat transfer efficiency of Al₂O₃-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 474-486.
- [24] Gunst, R. F. (1996). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*.
- [25] Rabbani, M., Montazeri, M., Farrokhi-Asl, H., & Rafiei, H. (2016). A multi-objective genetic algorithm for a mixed-model assembly U-line balancing type-I problem considering human-related issues, training, and learning. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4), 485-497.