

# بررسی عددی خواص رئولوژیکی یک نانو سیال هیبریدی از طریق الگوریتم MOPSO با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و بررسی بهینه‌سازی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک آن

امین مسلمی پطرودی<sup>۱</sup>، خداداد واحدی<sup>۲</sup>، محمدعلی مسلمی پطرودی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران

\*مسئول مکاتبات: amin.tehran2020@gmail.com

## چکیده

## واژگان کلیدی

بهینه‌سازی چند هدفه  
ضریب اصطکاک  
عدد ناسلت  
پارتو  
نانوسیال

در مقاله حاضر به بررسی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی بین (۰ تا ۱۰٪) در اعداد رینولدز تقریبی (۱۴۰ تا ۳۰۰۰) به صورت عددی پرداخته شده است. به منظور پیشینه عدد ناسلت و کمینه ضریب اصطکاک با تغییر در دما و کسر حجمی نانوذره از الگوریتم MOPSO استفاده شده است. برای بدست آوردن مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بر حسب دما و کسر حجمی نانوذره از روش سطح پاسخ (RSM) از داده های تجربی استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت افزایش و ضریب اصطکاک کاهش می یابد. به منظور ارزیابی توابع هدف در بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ (RSM) به الگوریتم بهینه‌سازی متصل شده است. در انتها جبهه پارتو (pareto-front) و نقاط بهینه متناظر با آن ارائه شده است.

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۱  
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

## ۱ مقدمه

روش‌ها افزایش یافته و برای یافتن یک مجموعه جواب بهینه و نه یک جواب بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرند در این مسیر یافتن راهکارهای مفید که بتواند موجب کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری گردد ارزشمند است. [۴] پک و چو با انجام آزمایش‌هایی بر روی نانوسیالات آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید تیتانیوم در لوله‌ای که شار حرارت ثابتی به آن اعمال می‌شد، دریافتند عدد ناسلت این نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات در محلول و عدد رینولدز جریان افزایش می‌یابد. از سایر نتیجه‌گیری‌ها نیز مشاهده شد زمانیکه کسر حجمی نانوذرات در محلول ۱۳/۰ درصد است، ضریب انتقال حرارت نانوسیال ۱۲ درصد کمتر از مقدار موجود برای آب خالص است. دلیل ممکن برای این رفتار این است که سوسپانسیون ویسکوزیته بالاتری نسبت به آب خالص مخصوصاً برای کسر حجمی بالای ذرات داشته است. [۲]

زوان و لی انتقال حرارت به روش جابجایی در نانوسیالات را در لوله‌ای که تحت شار حرارتی ثابتی قرار داشت بررسی کردند این افراد افزایشی در حدود ۳۹ درصد در ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نسبت به آب گزارش کردند. [۵] ون و دینگ انتقال حرارت در نانوسیال آب/اکسید آلومینا را در لوله‌ای تحت شرایط جریان متلاطم بررسی کردند و نتیجه گرفتند در حضور نانوذرات ضریب انتقال حرارت جابجایی آب افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در بخش ورودی لوله بیش از سایر قسمت‌های آن گزارش شد. [۲] زینالی و همکاران با بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس در لوله‌ای که دارای دمای ثابت در دیواره و تحت شرایط جریان آرام قرار داشت، دریافتند افزودن نانوذرات اکسید فلزی به آب

نانوسیال‌ها به دلیل خواص هدایت حرارتی بی‌نظیرشان به سرعت در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفتند. کمی بیش از یک دهه گذشته با توسعه سریع نانوفناوری، ذرات جامد در ابعاد نانومتر (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) جایگزین ذرات با ابعاد میکرومتر در سیال شدند. سیال بدست آمده نانوسیال نامیده شد. ضریب رسانندگی حرارتی بالاتر، پایداری بهتر و افت فشار کمتری با استفاده از ذرات جامد در ابعاد نانومتر دیده شد. مطالعات متعددی در مورد انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال انجام شده است. [۱] اولین بار لفظ نانوسیال را، فردی به نام Choi در سال ۱۹۹۵ در موسسه تحقیقاتی Argonne در آمریکا، برای سوسپانسیون‌های ذرات جامد فلزی در مایع استفاده کرد. [۲] علم انتقال حرارت یکی از مهم‌ترین و پر کاربردترین علوم مهندسی است که با توجه به لزوم مدیریت انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی اهمیت آن چندین برابر می‌شود. نانو سیالات به دلیل این خواصشان کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند که سبب شده بررسی این خواص از اهمیت خاصی برخوردار باشد. همچنین به علت اینکه این خواص به غلظت نانوذرات در سیال پایه بستگی دارند، با تغییر غلظت نانوذرات، خواص نانوسیال قابل تنظیم است. [۳] بهینه‌سازی هنر یافتن بهترین جواب در بین وضعیت‌های موجود است. از روش‌های بهینه‌سازی برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها استفاده شده است. ساختار و اصول روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه همان روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه است اما به طریقی تعداد متغیرها و توابع هدف در این

دارند، با تغییر غلظت نانوذرات، خواص نانوسیال قابل تنظیم است. [۱۶]

### ۳ ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک عبارت است از مقدار نیروی عمودی بخش بر نیروی اصطکاک. طبق نظریه کولمب ضریب اصطکاک هر ماده ثابت است. با این وجود آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد ضریب اصطکاک به عواملی از جمله فشار تماس، سرعت لغزش، دما، تعداد چرخه‌های بارگذاری و غیره بستگی دارد. [۱۷]

### ۴ عدد ناسلت

عدد ناسلت یک عدد بدون بعد می‌باشد که در انتقال حرارت مبین نسبت گرمای انتقال یافته از طریق همرفت (یا جابجایی) به گرمای انتقال یافته از طریق رسانش (یا هدایتی) در مرز سیستم می‌باشد. این عدد که با نماد (Nu) نشان داده شد. [۱۸]

### ۵ الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یک الگوریتم جستجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. در سال ۲۰۰۲ به Eberhart و Kennedy برای اولین بار توسط PSO عنوان یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح گشت این الگوریتم از حرکت دسته جمعی پرندگانی که به دنبال غذا می‌باشند الهام گرفته شده است. در ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز همزمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آنها و تغییر شکل بهینه‌ی دسته به کار گرفته شد. در PSO، ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است. بنابراین موقعیت دیگر توده ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش بدست آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند اساس کار PSO بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. [۱۳]

### ۶ مراحل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

۱. مقدار دهی اولیه: دادن مقدار اولیه به یک جمعیت از ذرات با موقعیت ها و سرعت های تصادفی در ابعاد D در فضای جستجو
۲. تخمین: زدن تخمین برای شایستگی هر ذره در این جمعیت
۳. به روز رسانی: محاسبه سرعت هر ذره با رابطه (۱) و حرکت به

سبب بهبودی ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت می‌شود. [۶] زوآن و لی رفتار حرارتی نانوسیال آب/مس را تحت شرایط متلاطم در لوله بررسی کردند و نشان دادند انتقال حرارت توسط این نانوسیال، بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

دهه گذشته شاهد فعالیت‌های تحقیقاتی بی‌شماری در زمینه نانوسیالات و تعیین عملکرد حرارتی آنها بوده است. بخش اعظم این مطالعات به تعیین شاخص‌های حرارتی از قبیل هدایت حرارتی موثر در شرایط استاتیکی، ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب انتقال حرارت همراه با تغییر فاز اختصاص یافته است. انجام تحقیقات بیشتر در زمینه نانوسیالات از طریق افزایش تحرک ذرات، منجر به دستیابی به علوم نوینی در ارتباط با هدایت حرارتی می‌شود. بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی که برای تعیین ضریب هدایت حرارتی موثر در نانوسیالات انجام گرفته‌اند نشان می‌دهند که هنوز مدلی که بتواند هدایت حرارتی محلول‌های سوسپانسیونی را دقیق پیش‌گویی کند ارائه نشده است. [۷]

اهداف کلی از تحقیق و توسعه نانوسیالات بهره گرفتن از خواص منحصر بفرد نانوذرات است. بدین ترتیب می‌توان خواص انتقال و عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات را طبقه‌بندی نمود و فن‌آوری نانوسیال را جهت ارتقاء خواص حرارتی سایر سیالات متداول گسترش داد. علی‌رغم تلاش‌های متعدد، هنوز مکانیسم‌های درگیر در افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات بصورت ناشناخته باقی مانده‌اند. از این رو تلاش‌ها جهت تهیه نانوسیالاتی که در آنها از نانوذرات گوناگون و با ابعاد متفاوت استفاده شده همچنان ادامه دارد. در این بین نانوسیالات آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس بطور گسترده توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۵] در مقاله حاضر به منظور بهینه‌سازی عدد ناسلت و کمینه ضریب اصطکاک با تغییر در دماهای (۱۴۰ تا ۳۰۰) درجه کلونین و کسر حجمی (۰ تا ۱۰٪) نانوسیال از الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO استفاده شده است. برای بدست آوردن مقادیر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت بر حسب دما و کسر حجمی نانوسیال از روش سطح پاسخ (RSM) داده‌های تجربی استفاده شده است. مدل‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) صورت گرفته و نتایج حاصله به عنوان تابع هدف به الگوریتم بهینه‌سازی داده شده است.

### ۲ خواص نانوسیالات

خاصیت ترموفیزیکی سیال که با افزودن نانوذرات به سیال پایه، مقدارشان تغییر می‌کند. این خواص عبارتند از: چگالی، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه. محققان مختلف نظرات متفاوتی در مورد اثر افزودن نانوذرات بر روی مقادیر این خواص بیان کرده‌اند اما به طور کلی افزودن نانوذرات باعث افزایش این خواص به جز گرمای ویژه می‌شود که این خاصیت با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد. درصد این افزایش به عوامل مختلفی از جمله درصد حجمی نانوذرات، خواص نانوذرات، خواص سیال پایه و دما بستگی دارد. نانو سیالات به دلیل این خواصشان کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند که سبب شده بررسی این خواص از اهمیت خاصی برخوردار باشد. همچنین به علت اینکه این خواص به غلظت نانوذرات در سیال پایه بستگی

**جدول ۱:** خلاصه برخی از تحقیقات صورت گرفته در مورد پارامترهای موثر بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نانوسیال

Author(s)	Nanofluid	Characteristic	Parameters	Methods	Years
Akbarinia [8]	nanofluid flow	friction factor and Nusselt number	Impacts of nanofluid flow on skin friction factor and Nusselt number in curved tubes with constant mass flow	RSM	2008
Zhou et al. [9]	microchannel heat	wavy channel	Design of microchannel heat sink with wavy channel and its time-efficient optimization with combined RSM and FVM methods	RSM	2016
Milani et al. [10]	heat exchanger filled	combined heat transfer	Two phase simulation and sensitivity analysis of effective parameters on combined heat transfer and pressure drop in a solar heat exchanger filled with nanofluid by RSM	RSM	2016
Iranmanesh et al. [11]	graphene nanoplatelets	viscosity and thermal conductivity	Evaluation of viscosity and thermal conductivity of graphene nanoplatelets nanofluids through a combined experimental-statistical approach using RSM	RSM	2016
Hemmat et al. [12]	ND-Co3O4	viscosity and thermal conductivity	The optimization of viscosity and thermal conductivity in hybrid nanofluids prepared with magnetic nanocomposite of nanodiamond cobalt-oxide (ND-Co3O4) using NSGA-II and RSM	NSGA-II and RSM	2016
Huang et al. [13]	ultrasound	ultrasound-assisted	RSM and ANN modeling-based optimization approach for the development of ultrasound-assisted liposome encapsulation of piceid	RSM and ANN	2017
Ohale et al. [14]	alumina	factor evaluation	Optimal factor evaluation for the dissolution of alumina from Azaraegbelu clay in acid solution using RSM and ANN comparative analysis	RSM and ANN	2017

## ۸ مقایسه‌ی PSO با الگوریتم‌های تکاملی

موقعیت بعدی بر اساس رابطه (۲)

$$\left(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]\right) + c_1 + r_1 \left(x_j^{g,best}[t] - x_j^i[t]\right) \quad (1)$$

$$x_j^i[t + 1] = x_j^i[t] + v_j^i[t + 1] \quad (2)$$

- بر خلاف الگوریتم‌های تکاملی در PSO عملیات انتخاب وجود ندارد. این بدان معناست که هیچ یک از ذرات (پاسخ‌ها) حذف نمی‌شوند و تنها مقدار هر ذره تغییر می‌کند.
- PSO از اصل بقای نسل استفاده نمی‌کند.
- عمل ترکیب جواب‌ها (Cross Over) در PSO وجود ندارد.
- در PSO نیز عمل جهش (Mutation) به نوعی وجود دارد.
- می‌توان در PSO نسبت بین جستجوی محلی و سراسری را به کمک وزن‌ها مشخص کرد. [۱۹]

۴. خاتمه: متوقف کردن الگوریتم اگر به یک معیار توقف معین شده برسد در غیر این صورت رفتن به مرحله ۲

## ۷ مزایای PSO نسبت به دیگر روش‌های

### بهینه‌سازی

## ۹ الگوریتم MOPSO

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)

۱. ایجاد جمعیت اولیه
۲. جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره کردن آن‌ها در Rep

- یک روش مرتبه صفر است و نیازی به عملیات سنگین ریاضی مثل گرادبان‌گیری احتیاج ندارد.
- یک روش مبتنی بر جمعیت است. (استفاده از محاسبات توزیع شده)
- بار محاسباتی قابل قبولی دارد.
- همگرایی نسبتاً سریعی دارد.

۳. جدول بندی فضای هدف کشف شده

۴. هر ذره از میان اعضای Rep یک رهبر انتخاب می کند و حرکت خود را انجام می دهد.

۵. بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذرات به روز می شود.

۶. اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به Rep اضافه می شوند.

۷. اعضای مغلوب Rep را حذف می کنیم.

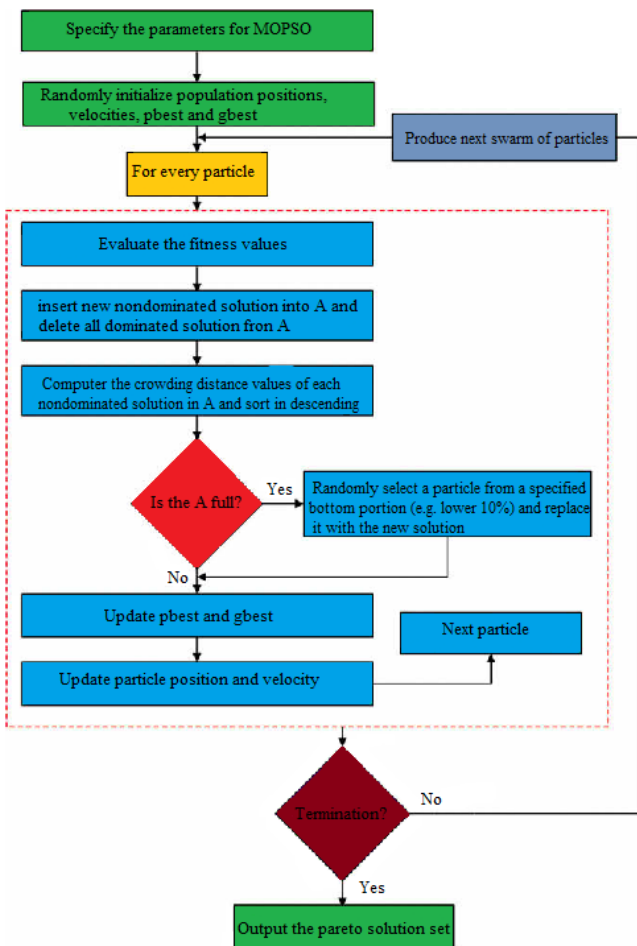
۸. اگر تعداد اعضای Rep بیش از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی را حذف می کنیم.

۹. در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده اند، به (۳) برگردید و در غیر این صورت (پایان). [۱۶]

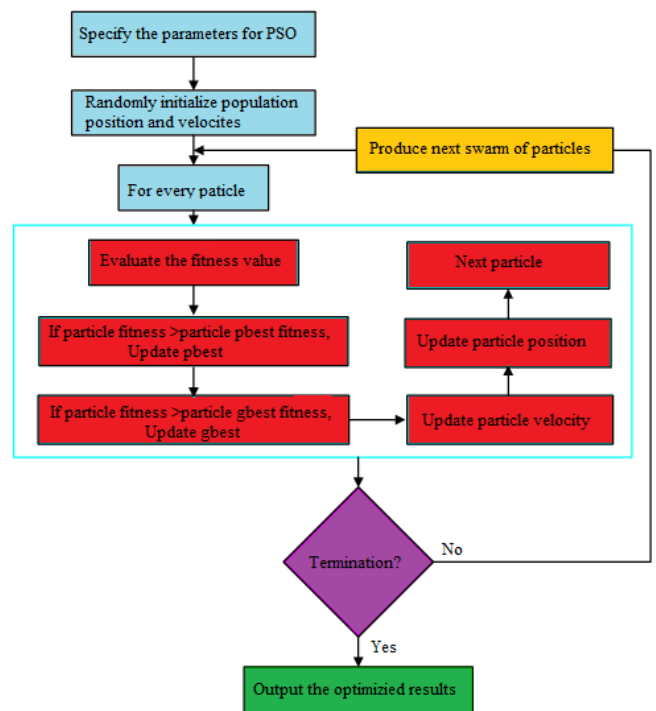
## ۱۰ متولوژی سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه ای از تکنیک های ریاضی و آماری به منظور انطباق داده های تجربی با مدل های چند جمله ای است.

روش سطح پاسخ به عنوان یکی از روش های مدل سازی تجربی مطرح است. روش سطح پاسخ، یکی از رویکردهای بررسی در طراحی آزمایش ها و علوم وابسته است. در روش سطح پاسخ سعی می شود تا با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین برهم کنش ها (Interactions)، اثرات درجه دوم و حتی شکل موضعی سطح پاسخ مورد مطالعه یافته شود. در این میان اهداف خاصی به طور جدی دنبال می شوند که از مهم ترین شان می توان به بهبود فرایند با یافتن ورودی های بهینه، رفع مشکلات و نقاط ضعف فرایند و پایدارسازی آن اشاره کرد. در اینجا پایدارسازی مفهوم مهمی در آمار کیفیت است که به حداقل کردن اثرات متغیرهای ثانویه یا غیرکنترلی (اغتشاشی) دلالت می کند. [۲۰]



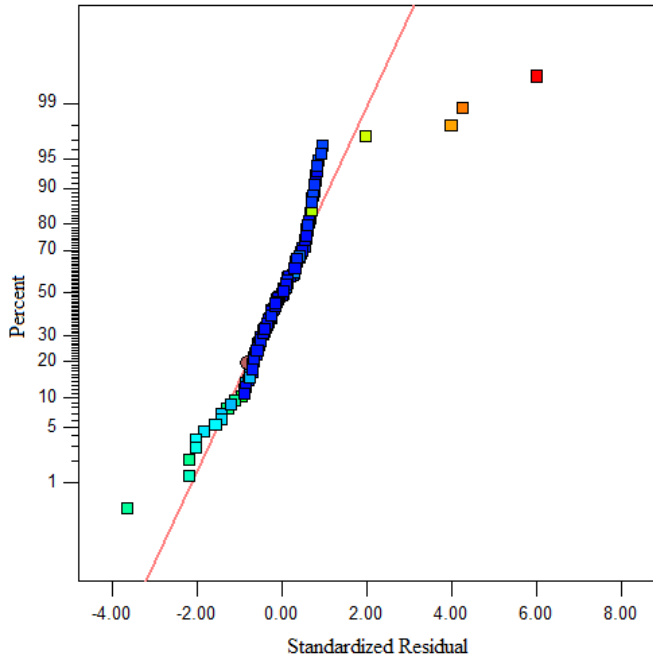
شکل ۲: فلوچارت MOPSO



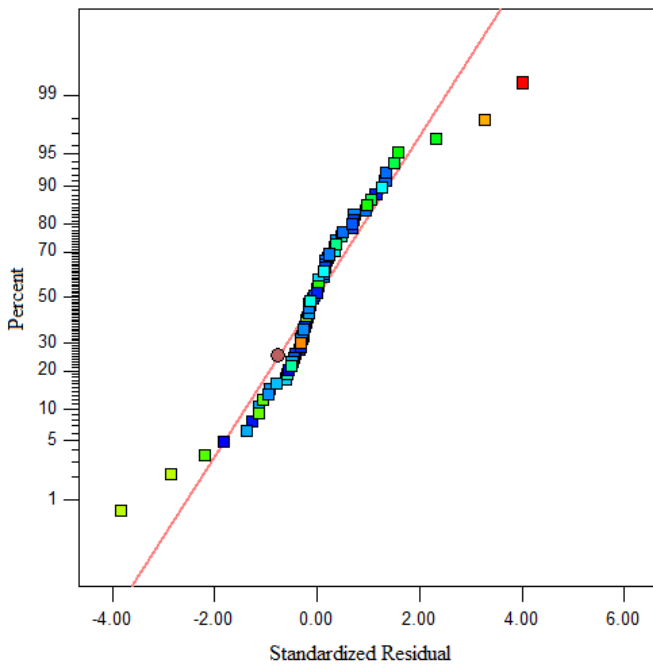
شکل ۱: فلوچارت PSO

## ۱۱ مزایای روش RSM

- برهم کنش بین پارامترها را به خوبی دیده و تحلیلی می کند.
- از مدل های درجه دوم و سوم می تواند برای آنالیز خواص و بهینه سازی کمک بگیرد.
- در این روش آماری است که با درون یابی بین متغیرهای ورودی، مقادیر بهینه تعیین می شود.
- روش طراحی آزمایش RSM، می تواند متغیرهای کیفی را نیز دریافت کند و در آنالیز و بهینه سازی خواص به کار بگیرد. [۲۱]



(الف)



(ب)

شکل ۳: نمودار پیش‌بینی شده نرمال در باقیمانده وزنی (الف) ضریب اصطکاک (ب) عدد ناسلت

جدول ۲: Analysis of variance (ANOVA) for Friction Sample 2 factor

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	1.47	13	0.11	98.76	2.51107E - 054
$\varphi$	1.430E - 003	1	1.430E - 003	1.25	0.26667
$Re$	0.34	1	0.34	299.67	3.46347E - 033
$\varphi Re$	2.718E - 003	1	2.718E - 003	2.37	0.1267
$\varphi^2$	7.561E - 005	1	7.561E - 005	0.066	0.7979
$Re^2$	0.23	1	0.23	199.01	2.00406E - 0026
$\varphi^2 Re$	1.117E - 004	1	1.117E - 004	0.097	0.7556
$\varphi Re^2$	4.185E - 003	1	4.185E - 003	3.65	0.0588
$\varphi^3$	3.743E - 005	1	3.743E - 005	0.033	0.8570
$Re^3$	0.17	1	0.17	144.79	8.64685E - 022
$\varphi^2 Re^2$	1.565E - 003	1	1.565E - 003	1.36	0.2454
$\varphi^3 Re$	3.015E - 005	1	3.015E - 005	0.026	0.8715
$\varphi Re^3$	3.264E - 003	1	3.264E - 003	2.84	0.0946
$\varphi^4$	0.000	0			
$Re^4$	0.13	1	0.13	112.82	1.45576E - 018
Residual error	0.13	110	1.148E - 003		
Total	1.60	123			

Standard deviation = 0.034.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 0.19.

R2 (Adequate) = 43.821% R2 (Predicted) = 0.8782% R2 (Adjusted) = 0.9118%.

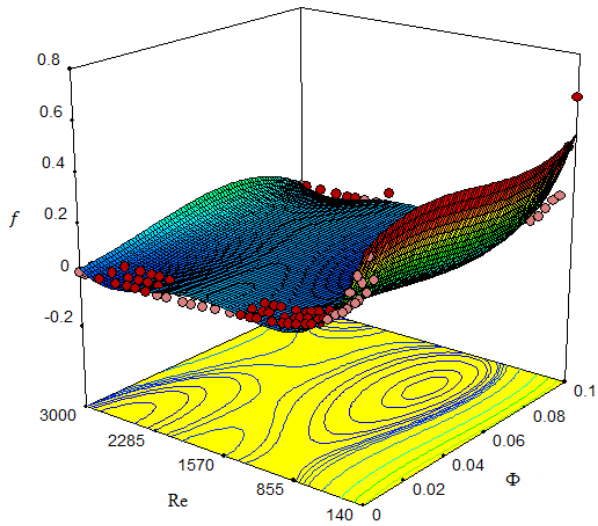
جدول ۳: Analysis of variance (ANOVA) for Nusselt Sample 2

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	593.26	13	45.64	846.87	4.84155E - 061
$\varphi$	1.298E - 003	1	1.298E - 003	0.024	0.8772
$Re$	0.20	1	0.20	3.66	0.0606
$\varphi Re$	0.45	1	0.45	8.27	0.0056
$\varphi^2$	5.590E - 003	1	5.590E - 003	0.10	0.7485
$Re^2$	0.037	1	0.037	0.68	0.4133
$\varphi^2 Re$	1.32	1	1.32	24.44	6.88554E - 006
$\varphi Re^2$	3.80	1	3.80	70.56	1.31233E - 011
$\varphi^3$	7.615E - 003	1	7.615E - 003	0.14	0.7084
$Re^3$	0.011	1	0.011	0.20	0.6581
$\varphi^2 Re^2$	5.05	1	5.05	93.78	1.00598E - 013
$\varphi^3 Re$	1.36	1	1.36	25.31	5.01964E - 006
$\varphi Re^3$	0.077	1	0.077	1.43	0.2361
$\varphi^4$	0.000	0			
$Re^4$	9.218E - 004	1	9.218E - 004	0.017	0.8964
Residual error	3.13	58	0.054		
Total	596.38	71			

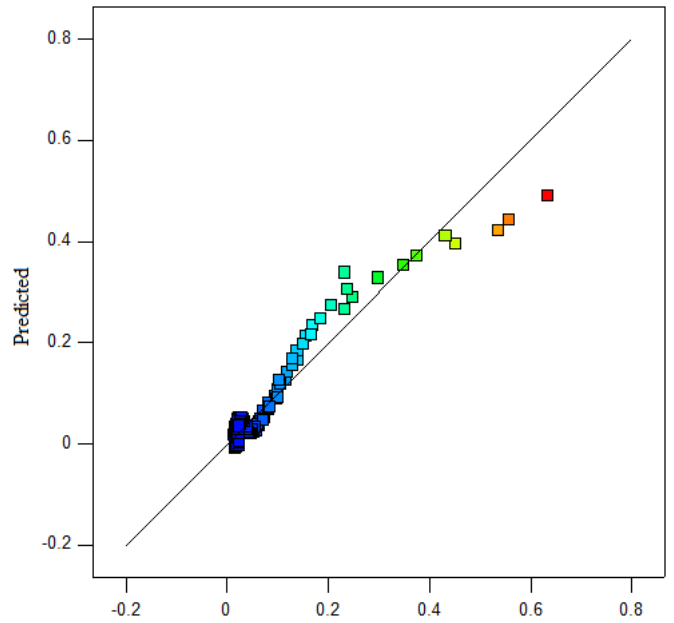
Standard deviation = 0.023.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 6.97.

R2 (Adequate) = 116.287% R2 (Predicted) = 0.9883% R2 (Adjusted) = 0.9936%.

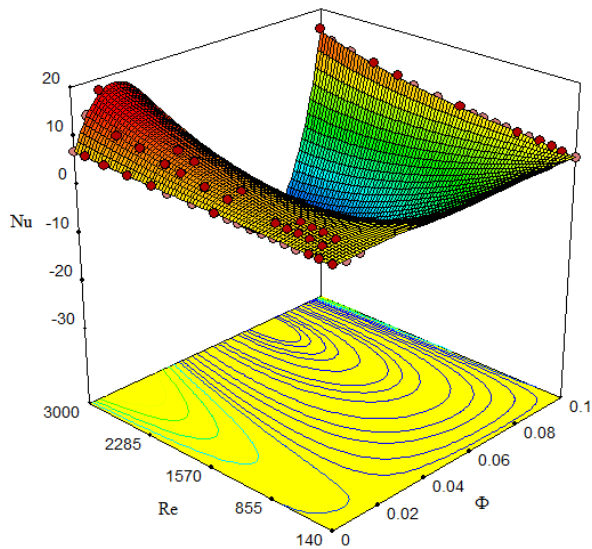


شکل ۵: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در ضریب اصطکاکی

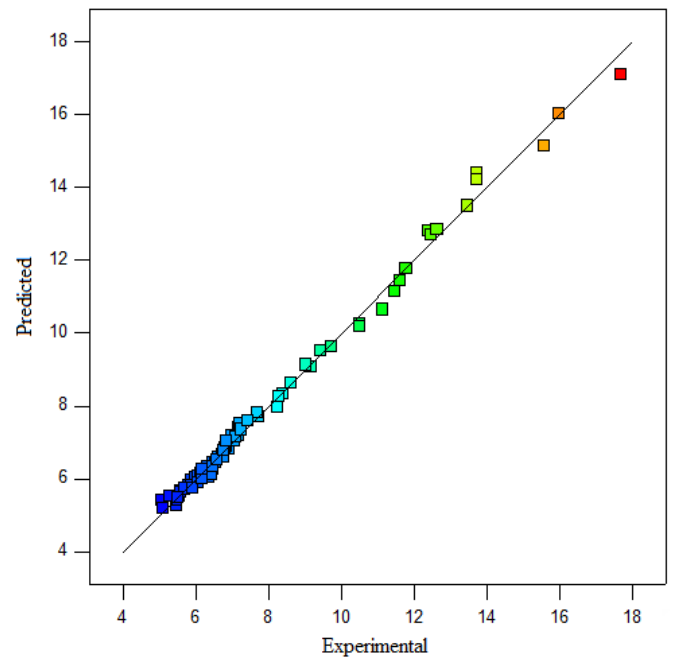


Experimental

(الف)



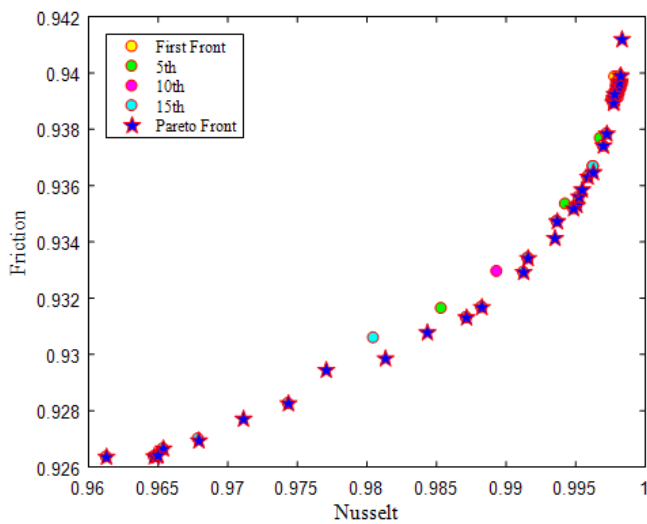
شکل ۶: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در عدد ناسلت



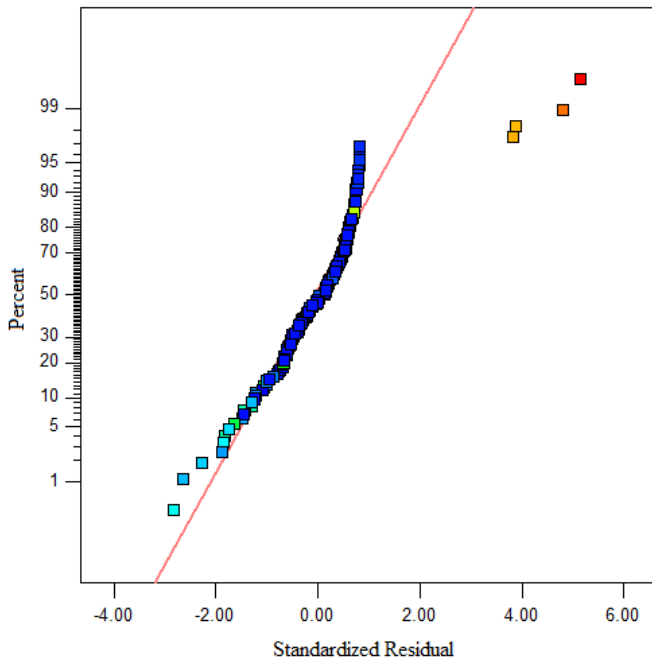
Experimental

(ب)

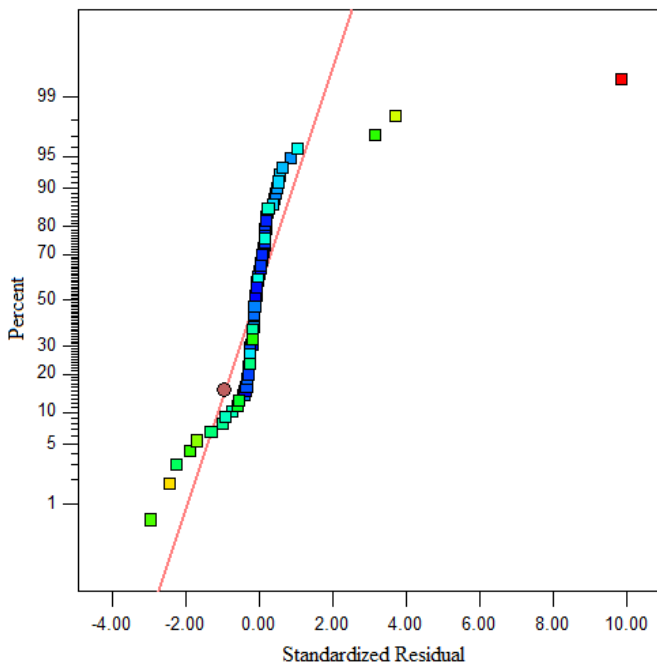
شکل ۴: مقایسه نتایج تجربی پیش‌بینی شده (الف) ضریب اصطکاکی (ب) عدد ناسلت



شکل ۷: نتایج بهینه‌سازی چندهدفه به روش NSGA II

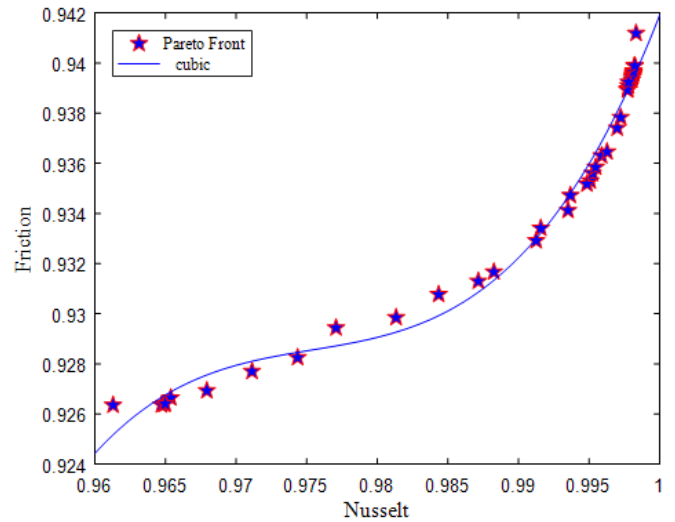


(الف)



(ب)

شکل ۹: نمودار پیش‌بینی شده نرمال در باقیمانده وزنی (الف) ضریب اصطکاک (ب) عدد ناسلت



شکل ۸: نتایج بهینه جبهه پارتو

جدول ۴: ضریب اصطکاک در- Analysis of variance (ANOVA) for Friction Sample 3 factor

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	2.72	13	0.21	94.91	1.74414E - 058
$\varphi$	8.104E - 009	1	8.104E - 009	3.678E - 006	0.9985
Re	0.74	1	0.74	336.83	2.09171E - 037
$\varphi Re$	1.132E - 003	1	1.132E - 003	0.51	0.4748
$\varphi^2$	5.542E - 004	1	5.542E - 004	0.25	0.6169
Re <sup>2</sup>	0.50	1	0.50	226.07	6.77035E - 030
$\varphi^2 Re$	2.695E - 004	1	2.695E - 004	0.12	0.7272
$\varphi Re^2$	5.824E - 003	1	5.824E - 003	2.64	0.1065
$\varphi^3$	6.192E - 004	1	6.192E - 004	0.28	0.5970
Re <sup>3</sup>	0.36	1	0.36	163.80	1.52656E - 024
$\varphi^2 Re^2$	1.447E - 003	1	1.447E - 003	0.66	0.4192
$\varphi^3 Re$	4.113E - 004	1	4.113E - 004	0.19	0.6665
$\varphi Re^3$	6.592E - 003	1	6.592E - 003	2.99	0.0862
Re <sup>4</sup>	0.000	0			
Re <sup>4</sup>	0.28	1	0.28	125.95	1.09391E - 020
Residual error	0.28	126	2.204E - 003		
Total	3.00	139			

Standard deviation = 0.047.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 0.42.

R2 (Adequate) = 45.796% R2 (Predicted) = 0.8588% R2 (Adjusted) = 0.8978%.

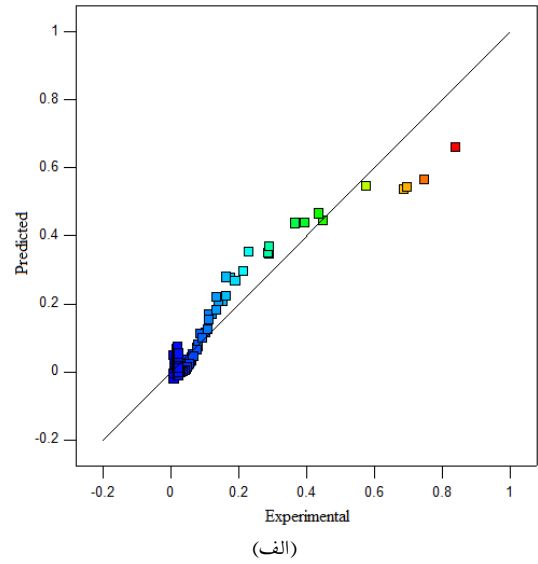
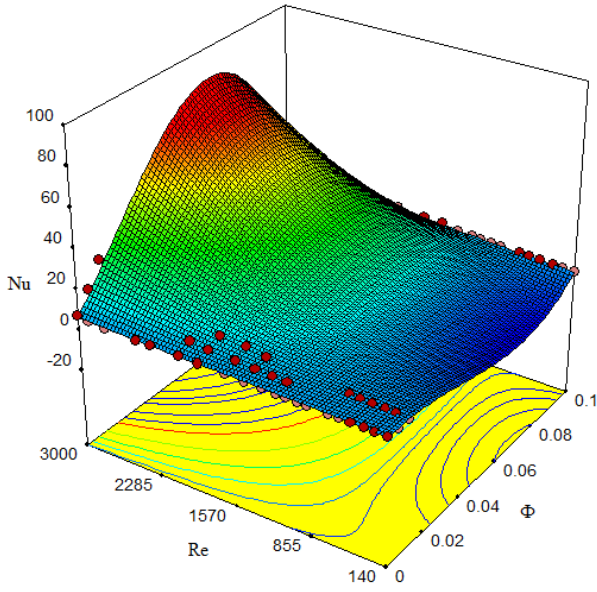
جدول ۵: Analysis of variance (ANOVA) for Nusselt Sample 3

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	1857.77	13	142.91	133.27	5.94922E - 044
$\varphi$	0.32	1	0.32	0.30	0.5868
Re	0.47	1	0.47	0.44	0.5082
$\varphi Re$	0.93	1	0.93	0.87	0.3552
$\varphi^2$	0.35	1	0.35	0.33	0.5693
Re <sup>2</sup>	0.065	1	0.065	0.060	0.8065
$\varphi^2 Re$	1.29	1	1.29	1.20	0.2771
$\varphi Re^2$	17.42	1	17.42	16.24	0.0001
$\varphi^3$	0.35	1	0.35	0.32	0.5716
Re <sup>3</sup>	2.336E - 003	1	2.336E - 003	2.178E - 003	0.9629
$\varphi^2 Re^2$	19.96	1	19.96	18.62	5.14792E - 005
$\varphi^3 Re$	1.21	1	1.21	1.12	0.2926
$\varphi Re^3$	0.027	1	0.027	0.026	0.8733
Re <sup>4</sup>	0.000	0			
Re <sup>4</sup>	0.018	1	0.018	0.017	0.8964
Residual error	75.06	70	1.07		
Total	1932.83	83			

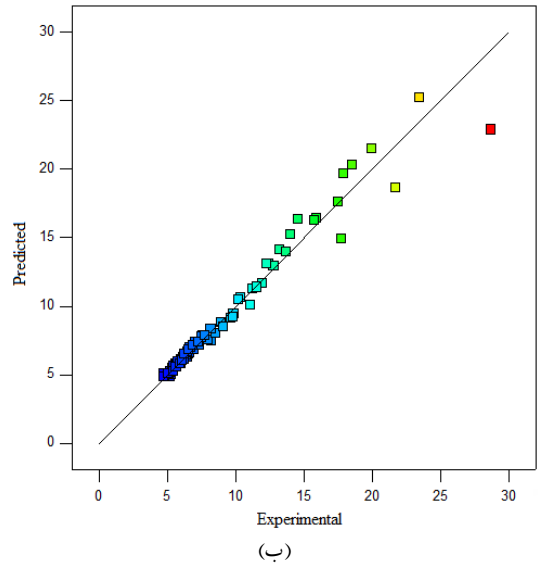
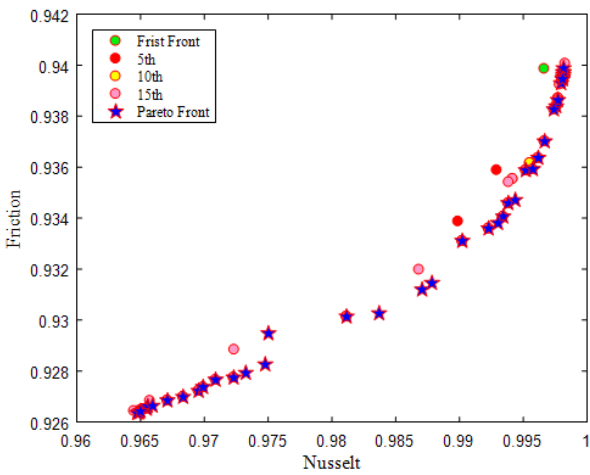
Standard deviation = 1.04.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 146.67.

R2 (Adequate) = 48.176% R2 (Predicted) = 0.9241% R2 (Adjusted) = 0.9540%.

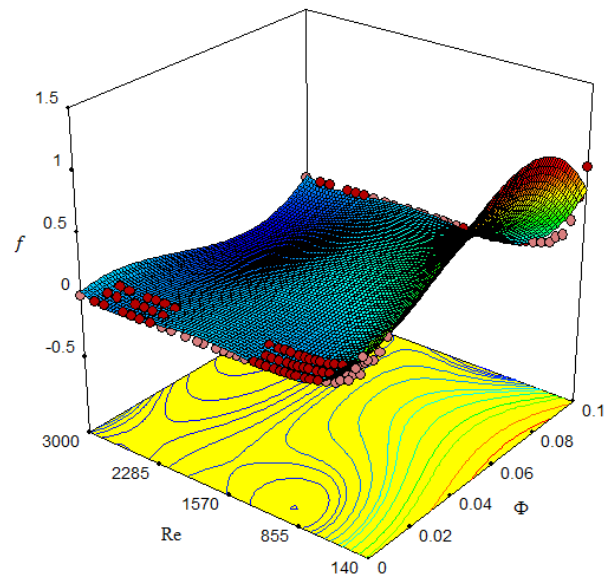
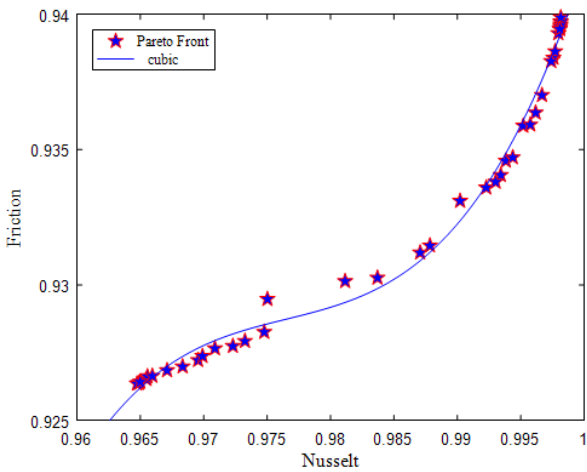


شکل ۱۲: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در عدد ناسلت



شکل ۱۰: مقایسه نتایج تجربی پیش‌بینی شده (الف) ضریب اصطکاک (ب) عدد ناسلت

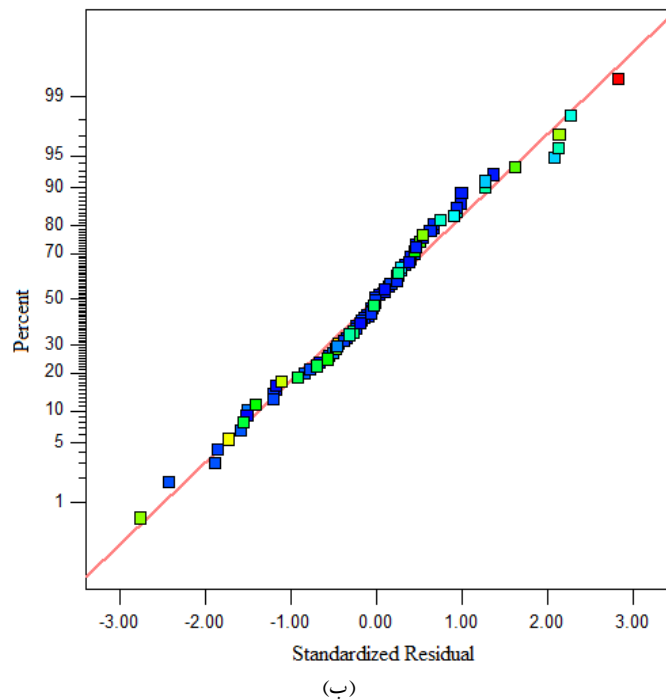
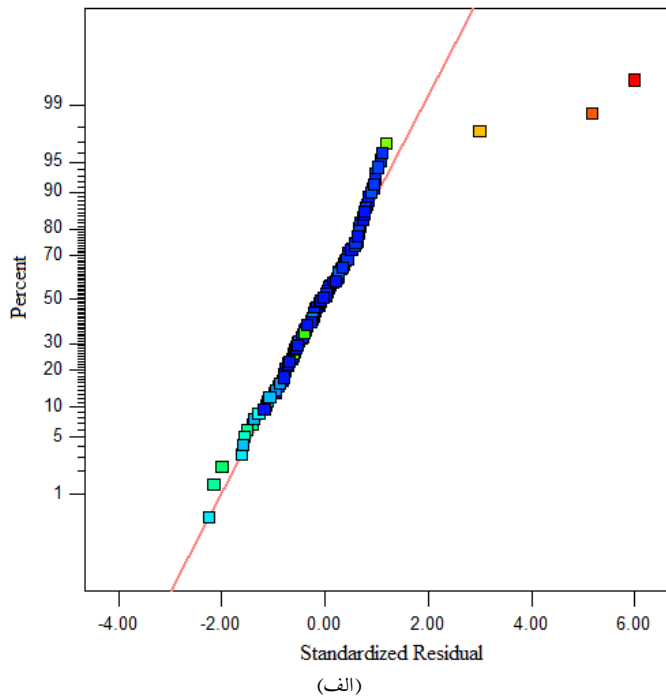
شکل ۱۳: نتایج بهینه‌سازی چندهدفه به روش NSGA II



شکل ۱۴: نتایج بهینه جبهه پارتو

شکل ۱۱: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در ضریب اصطکاک





شکل ۱۵: نمودار پیش‌بینی شده نرمال در باقیمانده وزنی (الف) ضریب اصطکاک (ب) عدد ناسلت

جدول ۶: Analysis of variance (ANOVA) for Friction Sample 4 factor

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	1.72	13	0.13	85.23	2.36939E - 047
$\varphi$	8.487E - 003	1	8.487E - 003	5.47	0.0213
$Re$	0.42	1	0.42	269.11	7.35009E - 030
$\varphi Re$	0.012	1	0.012	7.68	0.0067
$\varphi^2$	2.520E - 004	1	2.520E - 004	0.16	0.6877
$Re^2$	0.29	1	0.29	187.89	1.62455E - 024
$\varphi^2 R$	2.516E - 004	1	2.516E - 004	0.16	0.6880
$\varphi Re^2$	0.013	1	0.013	8.10	0.0054
$\varphi^3$	6.390E - 005	1	6.390E - 005	0.041	0.8396
$Re^3$	0.21	1	0.21	138.46	1.87995E - 020
$\varphi^2 Re^2$	0.011	1	0.011	7.36	0.0079
$\varphi^3 Re$	3.615E - 006	1	3.615E - 006	2.331E - 003	0.9616
$\varphi Re^3$	9.890E - 004	1	9.890E - 004	0.64	0.4264
$\varphi^4$	0.000	0			
$Re^4$	0.17	1	0.17	107.05	2.14266E - 017
Residual error	0.15	98	1.551E - 003		
Total	1.87	111			

Standard deviation = 0.039.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 0.24.

R2 (Adequate) = 40.347%R2 (Predicted) = 0.8697%R2 (Adjusted) = 0.9080%.

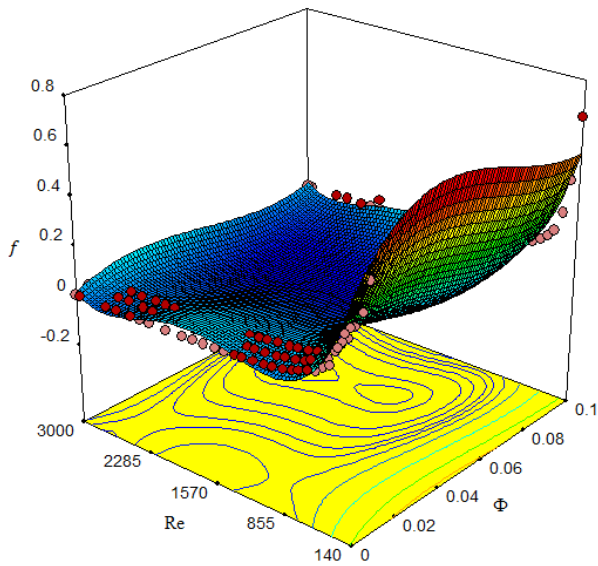
جدول ۷: Analysis of variance (ANOVA) for Nusselt Sample 4

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	2260.46	13	173.88	1373.78	8.67017E - 079
$\varphi$	2.83	1	2.83	22.38	1.1258E - 005
$Re$	0.90	1	0.90	7.09	0.0096
$\varphi Re$	11.03	1	11.03	87.17	6.40697E - 014
$\varphi^2$	3.22	1	3.22	25.47	3.41076E - 006
$Re^2$	1.20	1	1.20	9.50	0.0029
$\varphi^2 R$	33.37	1	33.37	263.68	1.94678E - 025
$\varphi Re^2$	23.67	1	23.67	186.97	1.89298E - 021
$\varphi^3$	3.20	1	3.20	25.25	3.71071E - 006
$Re^3$	1.18	1	1.18	9.36	0.0031
$\varphi^2 Re^2$	22.28	1	22.28	175.99	8.79805E - 021
$\varphi^3 Re$	34.03	1	34.03	268.82	1.13719E - 025
$\varphi Re^3$	1.99	1	1.99	15.75	0.0002
$\varphi^4$	0.000	0			
$Re^4$	1.22	1	1.22	9.61	0.0028
Residual error	8.86	70	0.13		
Total	2269.32	83			

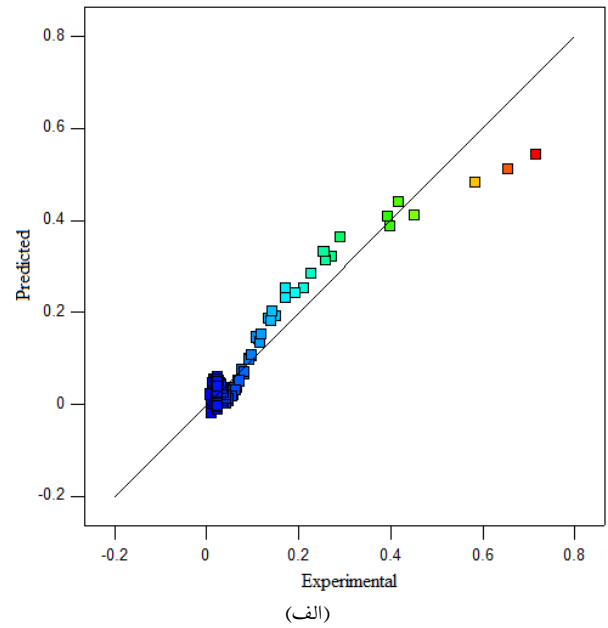
Standard deviation = 0.36.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 14.92.

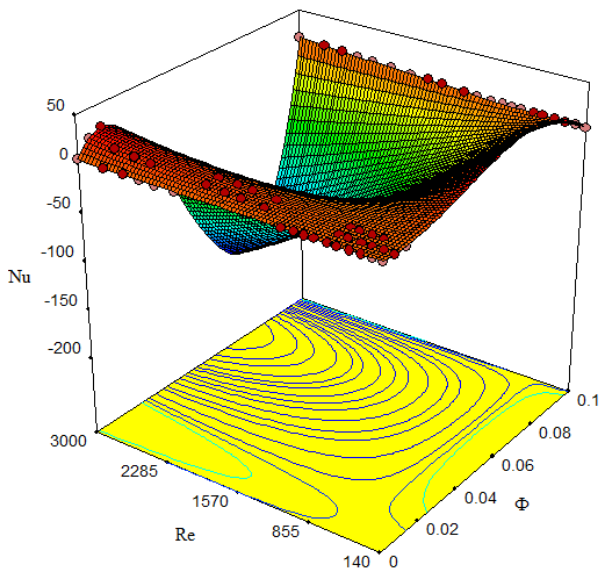
R2 (Adequate) = 149.977%R2 (Predicted) = 0.9934%R2 (Adjusted) = 0.9954%.



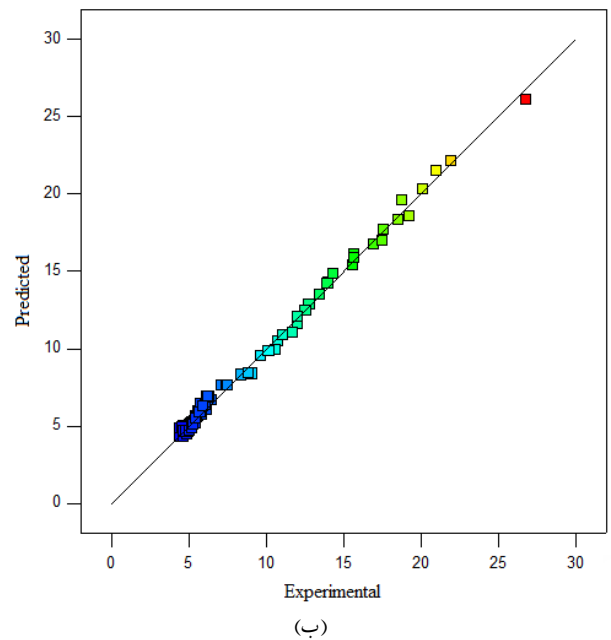
شکل ۱۷: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در ضریب اصطکاکی



(الف)

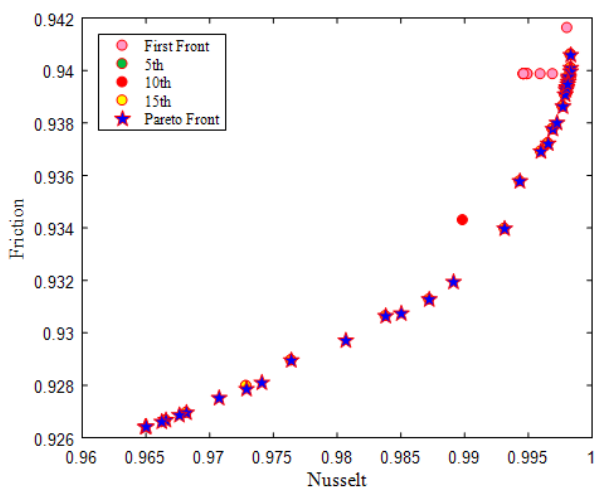


شکل ۱۸: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در عدد ناسلت

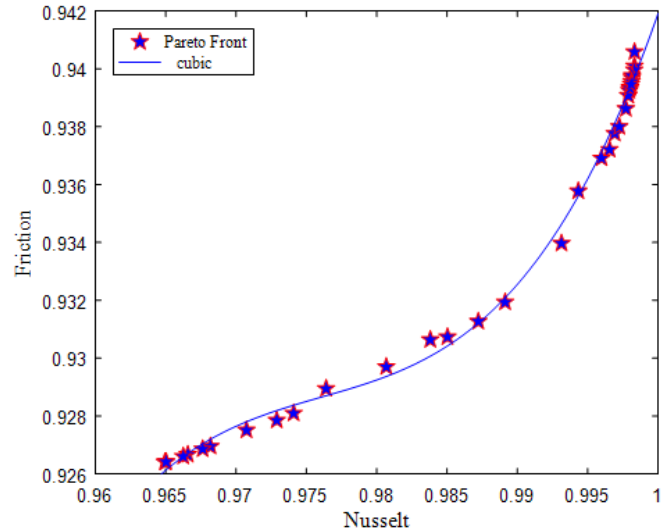
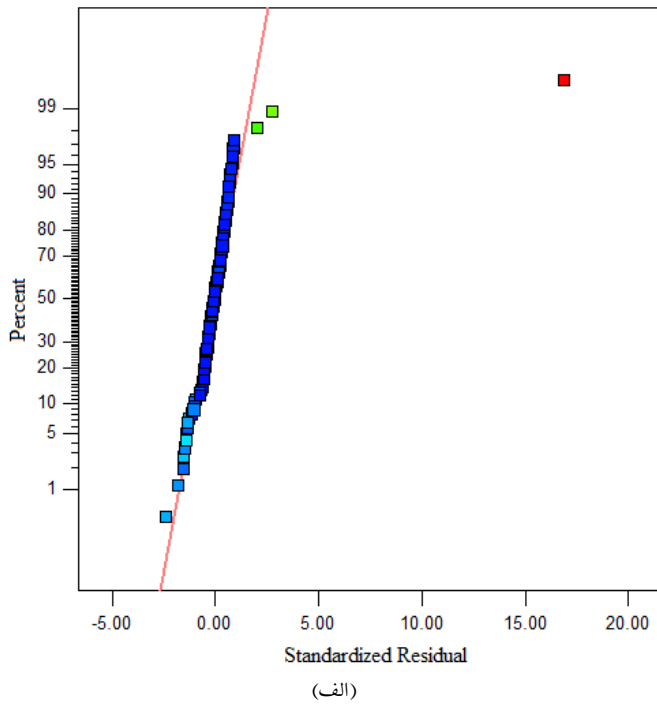


(ب)

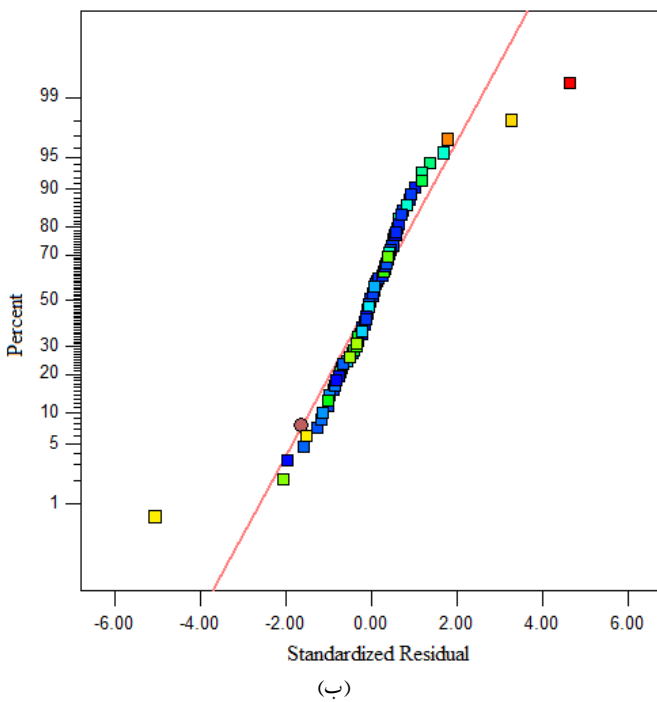
شکل ۱۶: مقایسه نتایج تجربی پیش‌بینی شده (الف) ضریب اصطکاکی (ب) عدد ناسلت



شکل ۱۹: نتایج بهینه‌سازی چندهدفه به روش NSGA II



شکل ۲۰: نتایج بهینه جبهه پارتو



شکل ۲۱: نمودار پیش‌بینی شده نرمال در باقیمانده وزنی (الف) ضریب اصطکاک (ب) عدد ناسلت

جدول ۵: Analysis of variance (ANOVA) for Friction Sample 5 factor

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	2.43	13	0.19	30.67	9.17218E - 032
$\varphi$	0.048	1	0.048	7.93	0.0057
$Re$	0.73	1	0.73	120.36	9.87568E - 020
$\varphi Re$	0.029	1	0.029	4.69	0.0324
$\varphi^2$	0.034	1	0.034	5.64	0.0191
$Re^2$	0.53	1	0.53	86.60	8.80298E - 016
$\varphi^2 R$	0.022	1	0.022	3.69	0.0572
$\varphi Re^2$	9.074E - 003	1	9.074E - 003	1.49	0.2247
$\varphi^3$	0.033	1	0.033	5.34	0.0226
$Re^3$	0.39	1	0.39	64.82	7.34564E - 013
$\varphi^2 Re^2$	8.258E - 003	1	8.258E - 003	1.36	0.2466
$\varphi^3 Re$	0.020	1	0.020	3.20	0.0760
$\varphi Re^3$	6.207E - 004	1	6.207E - 004	0.10	0.7501
$\varphi^4$	0.000	0			
$Re^4$	0.31	1	0.31	50.90	8.46821E - 011
Residual error	0.72	118	6.091E - 003		
Total	3.15	131			

Standard deviation = 0.078.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 1.08.

R2 (Adequate) = 24.55% R2 (Predicted) = 0.6553% R2 (Adjusted) = 0.7464%.

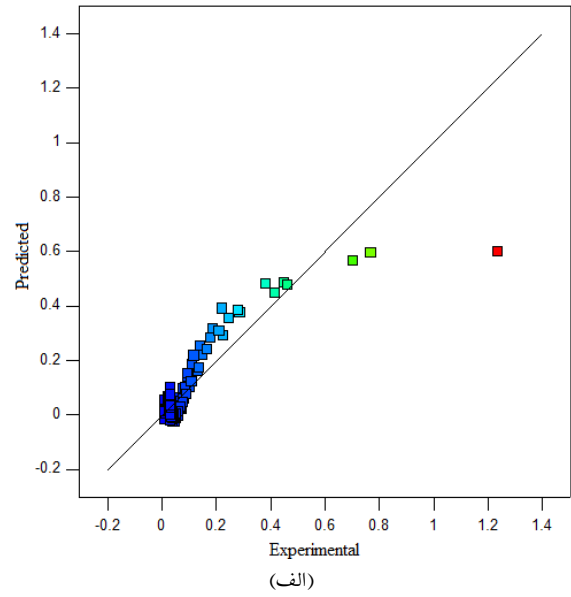
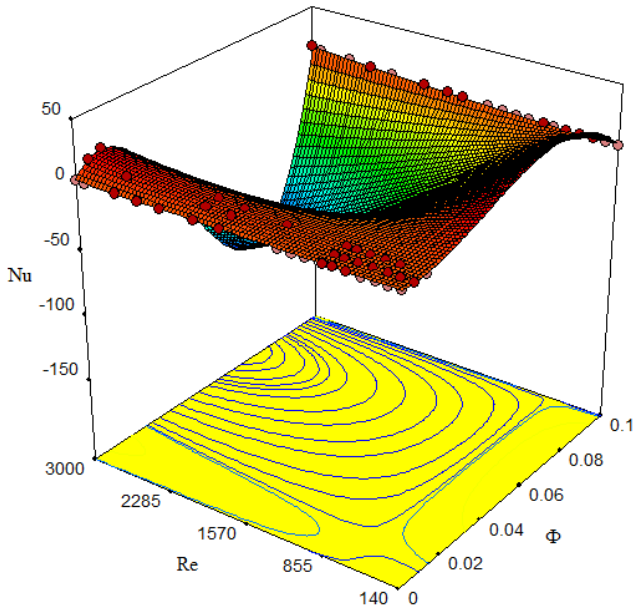
جدول ۹: Analysis of variance (ANOVA) for Nusselt Sample 5

Source	Adj SS	Df	Adj MS	F	P
Model	1102.31	13	84.79	550.59	8.11295E - 059
$\varphi$	1.17	1	1.17	7.59	0.0077
$Re$	0.32	1	0.32	2.06	0.1559
$\varphi Re$	3.31	1	3.31	21.47	1.89189E - 005
$\varphi^2$	2.09	1	2.09	13.58	0.0005
$Re^2$	0.65	1	0.65	4.23	0.0440
$\varphi^2 R$	15.40	1	15.40	100.00	1.4908E - 014
$\varphi Re^2$	13.44	1	13.44	87.26	1.93909E - 013
$\varphi^3$	2.16	1	2.16	14.03	0.0004
$Re^3$	0.84	1	0.84	5.44	0.0229
$\varphi^2 Re^2$	13.49	1	13.49	87.61	1.8037E - 013
$\varphi^3 Re$	16.27	1	16.27	105.65	5.10478E - 015
$\varphi Re^3$	0.59	1	0.59	3.83	0.0549
$\varphi^4$	0.000	0			
$Re^4$	0.98	1	0.98	6.38	0.0141
Residual error	9.55	62	0.15		
Total	1111.86	75			

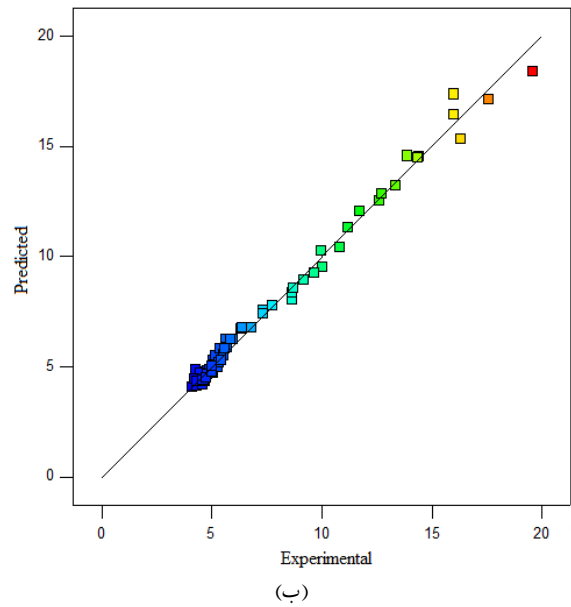
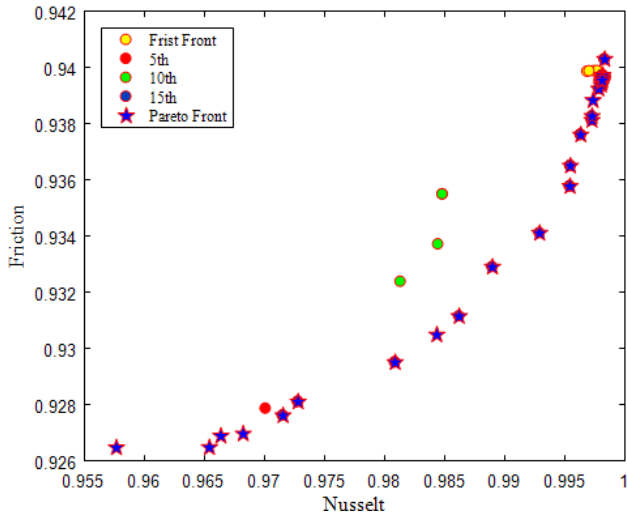
Standard deviation = 0.39.

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 19.89.

R2 (Adequate) = 84.839% R2 (Predicted) = 0.9821% R2 (Adjusted) = 0.9896%.

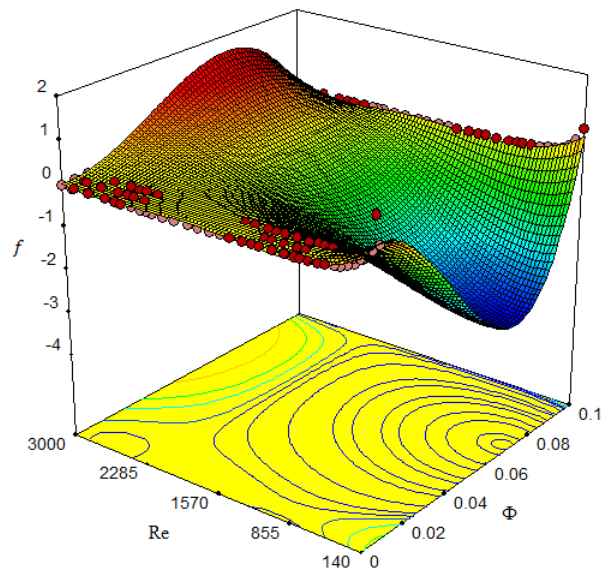
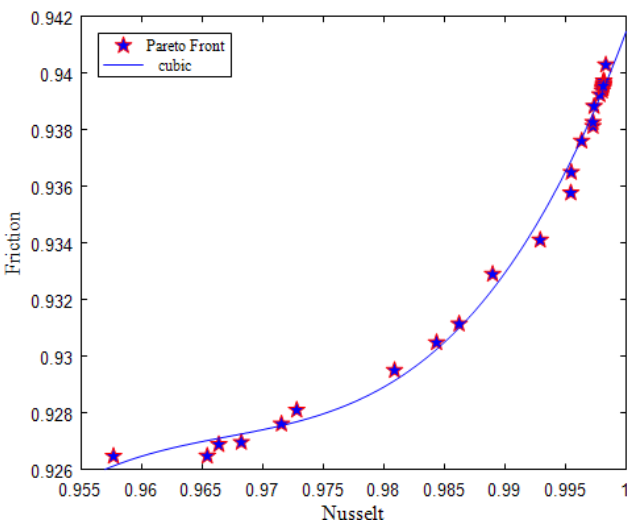


شکل ۲۴: گراف سه بعدی روش سطح پاسخ در عدد ناسلت



شکل ۲۵: نتایج بهینه‌سازی چندهدفه به روش NSGA II

شکل ۲۲: مقایسه نتایج تجربی پیش‌بینی شده (الف) ضریب اصطکاک (ب) عدد ناسلت



شکل ۲۶: نتایج بهینه جبهه پارتو

شکل ۲۳: گراف ۳ بعدی روش سطح پاسخ در ضریب اصطکاک

## ۱۲ تحلیل واریانس (ANOVA)

تحلیل واریانس مجموعه‌ای از مدل‌های آماری است که به بررسی میانگین در گروه‌ها و توابع وابسته به آنها (مثل واریانس در یک گروه یا بین چند گروه) می‌پردازد. در این روش واریانس بدست آمده از یک متغیر تصادفی به اجزاء کوچکتری که منابع واریانس هستند تقسیم می‌شوند روش قابل اطمینان برای بررسی کیفیت انطباق داده‌ها به کاربردن آنالیز واریانس است. در ساده‌ترین شکل آن، ANOVA آزمون آماری را فراهم می‌کند که برابری میانگین‌های گروه‌های متفاوت را می‌آزماید، و در نتیجه آزمون تی استیودنت (t-test) را به بیش از دو گروه تعمیم می‌دهد. [۲۲]

## ۱۳ نتایج

به منظور دست‌یابی به نتایج بهینه الگوریتم مورد نظر در چند مرحله و با مقادیر مختلف تعداد اعضای جمعیت ۵۰ عضو و تعداد تکرار ۱۵ بار اجرا و ارائه شده است. به منظور مقایسه روند بهینه‌سازی نتایج در جبهه اول، پنجم، دهم و جبهه پارتو بهینه‌سازی ارائه شده است. در این مقاله عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و همچنین عدد رینولدز بهبود می‌یابد. این افزایش به دلیل هدایت حرارتی مؤثر بالاتر نانوسیال و همچنین تقویت اختلاط نانوذرات می‌باشد. در ادامه با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) داده‌های آن استخراج شده است. به کمک منحنی بدست آمده می‌توان نقاط بهینه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک معادل با آن را در دست داشت.

## ۱۴ نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق بهینه‌سازی نانو سیال برای کاهش ضریب اصطکاک و افزایش عدد ناسلت است. این بهینه‌سازی با تعیین توابع هدف و داده‌های تجربی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت نانو سیال و بکارگیری روش سطح پاسخ انجام شد. در این تحقیق روش سطح پاسخ با تولید روند داده‌های ورودی عدد رینولدز (۱۴۰ تا ۳۰۰۰) و کسری حجمی (۰ تا ۱۰٪) به تعیین ضریب اصطکاک و عدد ناسلت پرداخت. بعد از متغیرها و توابع هدف تعریف شده در روش MOPSO، بهینه‌سازی چند هدفه انجام شده و جواب‌های ضریب اصطکاک و عدد ناسلت در جبهه پارتو معرفی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و همچنین عدد رینولدز بهبود می‌یابد. این افزایش به دلیل هدایت حرارتی مؤثر بالاتر نانوسیال و همچنین تقویت اختلاط نانوذرات می‌باشد. در میان نتایج بدست آمده، این نقاط که دارای بیشترین عدد ناسلت و کمترین ضریب اصطکاک، به عنوان بهترین نقطه انتخاب شده‌اند.

## مراجع

- ergy, 82:857–864, 2015.
- [2] Wang, Xinwei, Xu, Xianfan, and S. Choi, Stephen U. Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4):474–480, 1999.
- [3] Esmaeeli, A. D., Mahdavi, S. R., Pouladian, M., Monfared, A. S., and Bagheri, S. Improvement of dose distribution in breast radiotherapy using a reversible transverse magnetic field linac-mr unit. *Medical Physics*, 41(1):011709, 2014.
- [4] Mohammadi, Majid, Dadvar, Mitra, and Dabir, Bahram. Tio2/sio2 nanofluids as novel inhibitors for the stability of asphaltene particles in crude oil: Mechanistic understanding, screening, modeling, and optimization. *Journal of Molecular Liquids*, 238:326–340, 2017.
- [5] Xie, Hua-qing, Wang, Jin-chang, Xi, Tong-geng, and Liu, Yan. Thermal conductivity of suspensions containing nanosized sic particles. *International Journal of Thermophysics*, 23(2):571–580, 2002.
- [6] Zhou, Jiandong, Hatami, M, Song, Dongxing, and Jing, Dengwei. Design of microchannel heat sink with wavy channel and its time-efficient optimization with combined rsm and fvm methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103:715–724, 2016.
- [7] Zhang, Chun-ping, Lian, Yi-fu, Yu, Xiang-fei, Liu, Wei, Teng, Jyh-tong, Xu, Ting-ting, Hsu, Cheng-Hsing, Chang, Yaw-Jen, and Greif, Ralph. Numerical and experimental studies on laminar hydrodynamic and thermal characteristics in fractal-like microchannel networks. part a: Comparisons of two numerical analysis methods on friction factor and nusselt number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66:930–938, 2013.
- [8] Akbarinia, A. Impacts of nanofluid flow on skin friction factor and nusselt number in curved tubes with constant mass flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(1):229–241, 2008.
- [9] Zhao, Ningbo and Li, Zhiming. Experiment and artificial neural network prediction of thermal conductivity and viscosity for alumina-water nanofluids. *Materials*, 10(5):552, 2017.
- [10] Shirvan, Kamel Milani, Mamourian, Mojtaba, Mirzakhani, Soroush, Öztop, Hakan F, and Abu-Hamdeh, Nidal. Numerical simulation and sensitivity analysis of effective parameters on heat transfer and homogeneity of al2o3 nanofluid in a channel using dpm and rsm. *Advanced Powder Technology*, 27(5):1980–1991, 2016.
- [11] Iranmanesh, Soudeh, Mehrali, Mohammad, Sadeghinezhad, Emad, Ang, Bee Chin, Ong, Hwai Chyuan, and Esmaeilzadeh, Alireza. Evaluation of viscosity and thermal conductivity of graphene nanoplatelets

- [1] Zadeh, P Mohammad, Sokhansefat, T, Kasaeian, AB, Kowsary, F, and Akbarzadeh, A. Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nanofluid. *En-*

- wavy-wall enclosure. *Advanced Powder Technology*, 28(3):890-899, 2017.
- [21] Hatami, M, Ganji, MJZ, Sohrabiasl, I, and Jing, D. Optimization of the fuel rod's arrangement cooled by turbulent nanofluids flow in pressurized water reactor (pwr). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(6):722-731, 2017.
- [22] Gorji, Tahereh B and Ranjbar, AA. Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector. *Renewable Energy*, 106:274-287, 2017.
- [12] Esfe, Mohammad Hemmat, Hajmohammad, Mohammad Hadi, Razi, Peyman, Ahangar, Mohammad Reza Hassani, and Arani, Ali Akbar Abbasian. The optimization of viscosity and thermal conductivity in hybrid nanofluids prepared with magnetic nanocomposite of nanodiamond cobalt-oxide (nd-co3o4) using nsga-ii and rsm. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 79:128-134, 2016.
- [13] Huang, Shang-Ming, Kuo, Chia-Hung, Chen, Chun-An, Liu, Yung-Chuan, and Shieh, Chwen-Jen. Rsm and ann modeling-based optimization approach for the development of ultrasound-assisted liposome encapsulation of piceid. *Ultrasonics sonochemistry*, 36:112-122, 2017.
- [14] Ohale, PE, Uzoh, Chigozie F, and Onukwuli, Okechukwu Dominic. Optimal factor evaluation for the dissolution of alumina from azaraegbelu clay in acid solution using rsm and ann comparative analysis. *south african journal of chemical engineering*, 24:43-54, 2017.
- [15] Sabour, Mohammad Reza and Amiri, Allahyar. Comparative study of ann and rsm for simultaneous optimization of multiple targets in fenton treatment of landfill leachate. *Waste Management*, 65:54-62, 2017.
- [16] Patel, Hrishikesh E, Das, Sarit K, Sundararajan, T, Sreekumaran Nair, A, George, Beena, and Pradeep, T. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*, 83(14):2931-2933, 2003.
- [17] Shirvan, Kamel Milani, Mamourian, Mojtaba, Mirzakhani, Soroush, and Ellahi, Rahmat. Numerical investigation of heat exchanger effectiveness in a double pipe heat exchanger filled with nanofluid: a sensitivity analysis by response surface methodology. *Powder Technology*, 313:99-111, 2017.
- [18] Kumar, Anil, Kumar, Raj, Maithani, Rajesh, Chauhan, Ranchan, Sethi, Muneesh, Kumari, Anita, Kumar, Sushil, and Kumar, Sunil. Correlation development for nusselt number and friction factor of a multiple type v-pattern dimpled obstacles solar air passage. *Renewable Energy*, 109:461-479, 2017.
- [19] Lin, TY and Tseng, CH. Optimum design for artificial neural networks: an example in a bicycle derailleur system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13(1):3-14, 2000.
- [20] Hatami, M. Nanoparticles migration around the heated cylinder during the rsm optimization of a