نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۱۱۷، جلد ۵۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۵، صفحه ۳۱-۴۰ – پژوهشی کامل DOI: 10.22034/jmeut.2026.72499.3676

پیش‌بینی ضریب اصطکاک سمت هوا در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی

سید احسان علوی*
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه شهید چمران اهواز- پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، ایران، e.alavi@scu.ac.ir

ناصر صادقیان
استادیار، گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه شهید چمران اهواز- پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، ایران، saadeghian@gmail.com

ندا پویان
استادیار، گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه شهید چمران اهواز- پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، ایران، n.pouyan@scu.ac.ir

چکیده
ضریب اصطکاک یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد گرمایی و هیدرولیکی مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌پره‌دار است که تأثیر مستقیمی بر میزان مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری دارد. ارائه یک رویکرد داده‌محور که بتواند این ضریب را با دقت و سرعت مناسب پیش‌بینی کند، موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه روش‌های عددی و آزمایشگاهی خواهد شد. این پژوهش ضریب اصطکاک سمت هوای یک مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب را با استفاده از روش‌های جنگل تصادفی، رگرسیون افزایشی، KStar، زیرفضای تصادفی و جدول تصمیم‌گیری بصورت دقیق پیش‌بینی می‌نماید. مدل‌های مختلف با استفاده از یک مجموعه داده مشتمل بر ۱۱۴۹ مشاهده که از مراجع مختلف استخراج شده است آموزش داده شدند. گام طولی لوله، گام عرضی لوله، گام پره و عدد رینولدز به عنوان پارامترهای ورودی و ضریب اصطکاک نیز به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که روش جنگل تصادفی با ضریب همبستگی ۰/۹۹۸۶، ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۰۴، شاخص توافق ویلموت ۰/۹۹۹۹۶، کارآیی کلینگ-گوپتا ۰/۹۸۵۴۱ و کارآیی نش-ساتکلیف ۰/۹۹۸۲ بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مختلف برای داده‌های آزمایش از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: ضریب اصطکاک، هوش مصنوعی، مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار، جنگل تصادفی، پیش‌بینی، داده‌محور.

Prediction of Air-Side Friction Factor in Staggered Plain Fin-and-Tube Heat Exchangers Using Artificial Intelligence Algorithms

S. E. Alavi Faculty of Engineering,Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran.

N. Sadeghian Faculty of Engineering,Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran.

N. Pouyan Faculty of Engineering,Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran.

Abstract
The friction factor is one of the key parameters in evaluating the thermal and hydraulic performance of fin-and-tube heat exchangers, as it directly affects energy consumption and operational costs. Developing a data-driven approach capable of accurately and rapidly predicting this parameter can significantly reduce the time and cost associated with numerical and experimental methods. In the present study, the air-side friction factor of a staggered plain fin-and-tube heat exchanger was accurately predicted using several machine learning techniques, including Random Forest, Additive Regression, KStar, Random Subspace, and Decision Table methods. The models were trained using a dataset consisting of 1,149 observations collected from various published sources. Longitudinal tube pitch, transverse tube pitch, fin pitch, and Reynolds number were considered as the input parameters, while the friction factor was taken as the output parameter. The results demonstrated that the Random Forest model achieved the best predictive performance among all developed models for the testing dataset, with a correlation coefficient of 0.9986, root mean square error of 0.0004, Willmott's index of agreement of 0.99996, Kling–Gupta efficiency of 0.98541, and Nash–Sutcliffe efficiency of 0.9982.

Keywords: Friction Factor, Artificial Intelligence, Fin and Tube Heat Exchanger, Random Forest, Prediction, Data Driven.

۱- مقدمه

مبادله‌کن‌های گرمای در بسیاری از نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، صنایع تبرید و تهویه مطبوع کاربرد دارند. به همین دلیل تاکنون مطالعات زیادی در مورد آن‌ها انجام شده است. در برخی مطالعات تولید آنتروپی و کمینه‌سازی آن با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف مورد بررسی قرار گرفت [۱]. در پژوهش‌های دیگری کارآیی گرمای مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار مورد بررسی قرار گرفت و عوامل موثر

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.alavi@scu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۰۵/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۰۵/۰۷/۱۳

بر آن تحلیل شد [۲]. در مطالعات دیگری با تغییر در هندسه مبادله-کن گرمای لوله پره‌دار تلاش شد تا انتقال گرما بهبود یابد [۳]. یانگ و همکاران [۴] در یک تحقیق عددی به مطالعه یک رویکرد ترکیبی برای تحلیل ضخامت رسوب در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار مارپیچ و ارتباط آن با عملکرد گرمای پرداختند. آن‌ها همچنین با استفاده از روش جنگل تصادفی دمای خروجی سیال سمت لوله را پیش‌بینی نمودند. بیشینه خطای نسبی حاصل حدود ۰/۲ درصد بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل مورد استفاده جهت پیش‌بینی دمای خروجی بود. لیو و همکاران [۵] در تحقیق عددی خود به بهبود انتقال گرما در مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار موج‌دار پرداختند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تاثیر پارامترهای هندسی پره بر انتقال گرما را شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که طول موج بر ضریب انتقال گرما تاثیر محسوسی ندارد در حالیکه پیکربندی موج متقارن باعث کاهش چشمگیر افت فشار می‌شود. لیانگ و همکاران [۶] در تحقیق خود به بهبود انتقال گرما و اگزرژی در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار با استفاده از یک مولد گرداب جدید پرداختند. در این پژوهش تاثیر هندسه‌های مختلف مولد گرداب بر توزیع دما، ضریب اصطکاک و افت فشار نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که مولد گرداب مستطیلی با زاویه شیب ۶۰ درجه و ۹۰ درجه به ترتیب بیشترین اختلاف دما و افت فشار را ایجاد می‌کنند. فرج‌اللهی و همکاران [۷] در تحقیق خود به بررسی اثر چیدمان لوله‌ها بر کارآیی مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و سطح پاسخ پرداختند. تاثیر گام‌های طولی و عرضی لوله‌ها و نیز عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که گام‌های لوله‌ها بر پارامترهای هیدرولیکی مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار به میزان قابل توجهی اثر دارد. هو و همکاران [۸] در تحقیق خود با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی به بهینه‌سازی کارآیی مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار موج‌دار با یک نوع خاص مولد گرداب پرداختند. نتایج نشان داد که مولد گراب پیشنهادی به میزان قابل توجهی عدد ناست، توان پمپ کردن و ضریب عملکرد گرمایی را افزایش می‌دهد. کیم و همکاران [۹] در تحقیق خود به بررسی انتقال گرما سمت هوا در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار با استفاده از ارتعاشات اجباری پرداختند. تاثیر گام پره، دامنه و فرکانس ارتعاش بر عملکرد گرمایی مبادله‌کن گرمای بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و ملاحظه شد که با افزایش این پارامترها انتقال گرما افزایش می‌یابد. وانگوایس و همکاران [۱۰] در تحقیق آزمایشگاهی خود به بررسی اثر تعداد ردیف لوله و گام پره بر عملکرد مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار موج‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش گام پره بر انتقال گرما مبادله‌کن گرمای اثر قابل توجهی ندارد اما باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. مان و همکاران [۱۱] در تحقیق عددی خود به بررسی اثر فاصله پره‌ها در مبادله‌کن‌های گرمای لوله و پره‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که فاصله پره‌ها به میزان قابل توجهی بر توسعه لایه مرزی اثرگذار است. دراین پژوهش تاثیر فاصله پره‌ها بر پارامترهای گرمایی و هیدرولیکی نیز بررسی شد. رحیمی و همکاران [۱۲] به بررسی پارامترهای موثر بر تغییر فاز در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار پرداختند. ملاحظه شد که با افزایش دمای ورودی در مبادله‌کن گرمای زمان فرآیند ذوب به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. چن و همکاران [۱۳] در تحقیق خود به مطالعه رسانایی گرمایی مواد مختلف در مبادله‌کن‌های گرمای پلاستیکی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش رسانایی گرمایی تا یک مقدار مشخص باعث افزایش قابل توجهی در عملکرد مبادله‌کن گرمای خواهد شد و به ازای مقادیر بالاتر از آن تاثیر محسوسی ندارد. ون و همکاران [۱۴] در تحقیق خود با بررسی طراحی پره در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار پارامترهای گرمایی و هیدرولیکی در این مبادله کن‌ها را بهبود بخشیدند. در این پژوهش تاثیر سه پره موجی، صفحه‌ای و مرکب بر انتقال گرما، افت فشار و ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت. دیپکومار و همکاران [۱۵] در تحقیق خود به بررسی عملکرد مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌داردر جریان سمت هوا پرداختند. در این پژوهش ترکیبی از لوله‌های دایره‌ای و بیضوی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در سرعت ورودی پایین، استفاده از لوله بیضوی در مقایسه با لوله دایره‌ای عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. لمودا و همکاران [۱۶] در تحقیق عددی خود به بهینه-سازی مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار دندانه‌دار پرداختند. نتایج در دو حالت دندانه‌دار و بدون دندانه استخراج و مقایسه شد. ملاحظه شد که دندانه‌دار شدن لوله پره‌دار باعث افزایش سطح انتقال گرما و در نتیجه بهبود عملکرد مبادله‌کن گرمای خواهد شد. نعمتی و همکاران [۱۷] در تحقیق خود شکل پره‌های حلقوی در یک مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار را بهینه‌سازی نمودند. پارامترهای تولید آنتروپی، افت فشار و انتقال گرما در سیال سمت هوا مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پره‌های بیضوی حلقوی باعث کاهش محسوس افت فشار و تولید آنتروپی خواهد شد. مین و همکاران [۱۸] در تحقیق خود به بررسی تاثیر شکل لوله بر عملکرد مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار پرداختند. تحلیل ترمودینامیکی و هیدرولیکی برای سه سرعت مختلف هوا و پنج شکل متفاوت لوله انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت ابعاد لوله، افت فشار و ضریب انتقال گرما سیال سمت آب افزایش و سیال سمت هوا کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۹] با استفاده از روش تاگوچی مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار را بهینه نمودند. هفت پارامتر به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی و عملکرد گرمایی-هیدرولیکی نیز به عنوان تابع هدف انتخاب شد. نتایج نشان داد که ارتفاع، ضخامت و گام پره بیشترین تاثیر را بر عملکرد گرمایی- هیدرولیکی از خود نشان دادند.

با وجود مطالعات متعدد درباره عملکرد گرمای و هیدرولیکی مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌پره‌دار، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های موجود بر شبیه‌سازی عددی، بهینه‌سازی هندسی و بهبود انتقال گرما تمرکز داشته‌اند. در مقابل، توسعه یک چارچوب داده‌محور برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک سمت هوا در مبادله‌کن‌های لوله‌پره‌دار ساده با آرایش متناوب، با درنظرگرفتن رژیم‌های مختلف جریان و بررسی نقش پارامترهای هندسی، همچنان نیازمند بررسی بیشتر است. در پژوهش حاضر، یک مجموعه داده شامل ۱۱۴۹ مشاهده از مطالعات منتشرشده گردآوری شده و عملکرد پنج الگوریتم یادگیری ماشین برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک ارزیابی می‌شود. علاوه بر مقایسه دقت مدل‌ها، اثرگذاری پارامترهای ورودی در رژیم‌های مختلف جریان بررسی شده و عملکرد مدل برتر با داده‌های مستقل مطالعات پیشین اعتبارسنجی می‌شود. بنابراین، نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه و ارزیابی یک چارچوب داده‌محور برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک سمت

هوا در مبادله‌کن‌های لوله‌پره‌دار ساده با آرایش متناوب، همراه با تحلیل رژیم‌محور و اعتبارسنجی مستقل، است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد، سریع و دقیق، جایگزین مناسبی برای روش‌های متداول آزمایشگاهی و عددی در کاربردهای صنعتی باشد. همچنین، قابلیت تعمیم‌پذیری بالای مدل سبب می‌شود تا بتوان از آن به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تحلیل داده‌های جدید و نیز پیش‌بینی دقیق ضریب اصطکاک در صنعت استفاده کرد.

۲- مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها

مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار یکی از پرکاربردترین انواع مبادله‌کن‌های گرمای است که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مبادله‌کن‌ها سیال با ضریب انتقال گرما بیشتر درون لوله و سیال با ضریب انتقال گرما کمتر که معمولا هوا یا گاز است از روی پره‌ها عبور می‌کند. در شکل ۱ مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد نشان داده شده است.



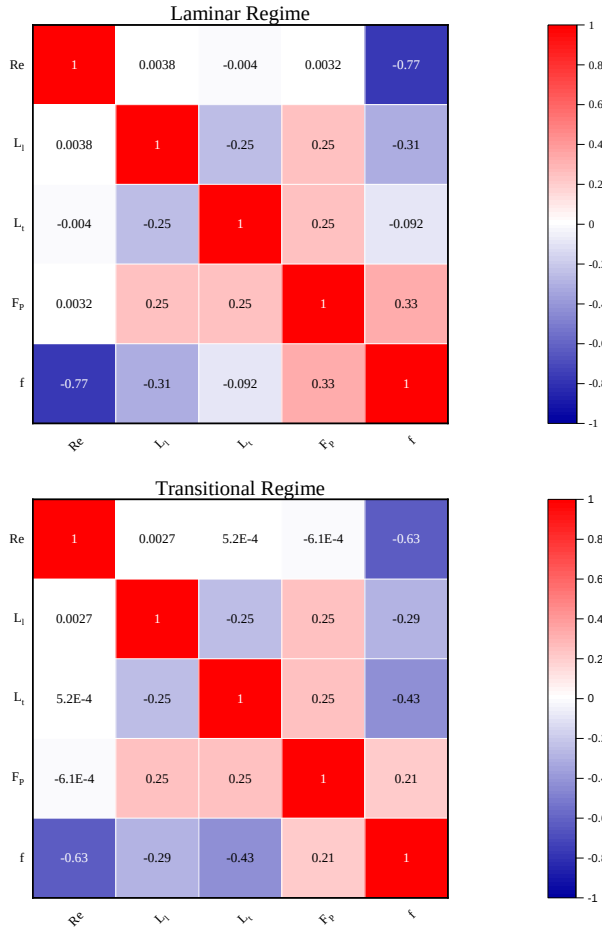
شکل ۱- مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار مورد مطالعه [۲۰].

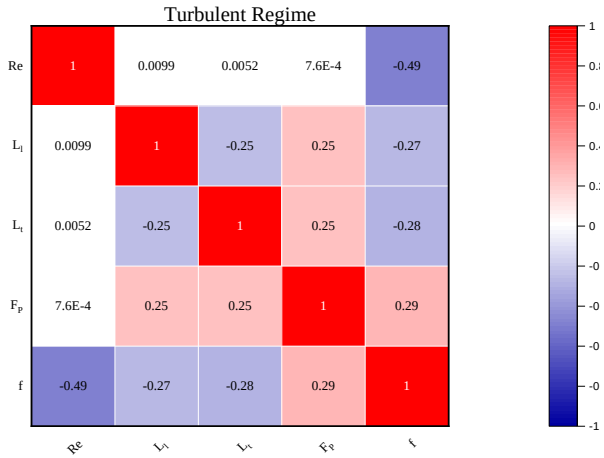
ضریب اصطکاک سیال سمت هوا در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار با استفاده از رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۰]:

$$f = \frac{(P_{in} - P)}{1/2\,\rho u_{in}^2}\,\frac{H}{4L} \qquad (۱)$$

در جایی که P، H، L، u و ρ به ترتیب بیانگر فشار، فاصله بین پره‌ها، طول جریان، سرعت و چگالی سیال است. همچنین زیرنویس in معرف مقدار آن پارامتر در ورودی است.

در این پژوهش ضریب اصطکاک یک مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب در رژیم‌های مختلف جریان و از مراجع معتبر استخراج شده است [۲۳-۲۰]. در این مجموعه داده که مشتمل بر ۱۱۴۹ مشاهده است ضریب اصطکاک مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب به عنوان متغیر هدف و گام طولی لوله، گام عرضی لوله، گام پره و عدد رینولدز به عنوان پارامترهای موثر بر آن لحاظ شدند. در شکل ۲ رابطه بین ضریب اصطکاک و پارامترهای موثر بر آن در جریاهای لایه‌ای، گذرا و متلاطم با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نمایش داده شده است. نتایج تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که عدد رینولدز در تمامی رژیم‌های جریان، بیشترین ارتباط را با ضریب اصطکاک سمت هوا دارد. این موضوع را می‌توان با نقش بنیادی عدد رینولدز در تعیین نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج و در نتیجه، در تعیین ساختار جریان، ضخامت لایه مرزی و میزان اختلاط جریان توضیح داد. با افزایش عدد رینولدز، توسعه جریان در اطراف لوله‌ها و پره‌ها و تغییرات تنش برشی دیواره تحت تأثیر قرار گرفته و در نتیجه ضریب اصطکاک نیز تغییر می‌کند. با این حال، اهمیت نسبی پارامترهای هندسی در رژیم‌های مختلف یکسان نیست. در رژیم لایه‌ای، پس از عدد رینولدز ، گام پره بیشترین ارتباط را با ضریب اصطکاک نشان می‌دهد؛ زیرا تغییر فاصله بین پره‌ها می‌تواند هندسه مسیر عبور جریان، توزیع سرعت و شرایط توسعه لایه مرزی را تغییر دهد. در رژیم انتقالی، گام عرضی لوله‌ها در رتبه بعدی قرار دارد که می‌تواند با تغییر مسیر جریان در اطراف ردیف‌های لوله، میزان انقباض و انبساط موضعی، جدایش جریان و نواحی بازچرخش مرتبط باشد. در رژیم آشفته، اهمیت نسبی گام طولی لوله‌ها، گام عرضی لوله‌ها و گام پره به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود؛ زیرا در این رژیم، اختلاط شدیدتر و نوسانات سرعت موجب می‌شود ویژگی‌های مختلف هندسی به‌صورت هم‌زمان در تعیین ساختار جریان و تنش برشی نقش داشته باشند. بنابراین، اگرچه عدد رینولدز در تمامی رژیم‌ها پارامتر غالب است، رتبه‌بندی پارامترهای هندسی وابسته به رژیم جریان بوده و تغییر رژیم می‌تواند اهمیت نسبی این پارامترها را تغییر دهد. این یافته نشان می‌دهد که بررسی رژیم‌محور پارامترها می‌تواند اطلاعات بیشتری نسبت به یک رتبه‌بندی کلی ارائه کرده و درک مناسب‌تری از ارتباط بین مشخصات هیدرودینامیکی و هندسه مبادله‌کن و ضریب اصطکاک فراهم کند.





شکل ۲- نمودار پیرسون بین پارامترهای ورودی و هدف: جریان‌های الف): لایه‌ای ب): گذرا چ): متلاطم.

۳- مبانی روش‌های هوش مصنوعی

این مطالعه توانایی‌های پیش‌بینی پنج روش هوش مصنوعی جنگل تصادفی، رگرسیون افزایشی، KStar، زیرفضای تصادفی و جدول تصمیم‌گیری جهت تخمین ضریب اصطکاک در مبادله‌کن گرمای لوله پره‌دار بررسی می‌شود. هر یک از روش‌ها به طور کامل از نظر دقت پیش‌بینی و کاربردپذیری در دنیای واقعی در زمینه تحقیق ارزیابی می‌شوند.

۳-۱- روش جنگل تصادفی

جنگل تصادفی[1] یک تکنیک یادگیری ماشینی است که از چندین درخت تصمیم برای بهبود دقت مدل و به حداقل رساندن احتمال بیش‌برازش استفاده می‌کند. این روش با آموزش چندین درخت تصمیم بر روی نمونه‌های تصادفی، دقت پیش‌بینی را افزایش داده و احتمال بیش‌برازش را کاهش می‌دهد. فرآیند جنگل تصادفی مستلزم تولید چندین زیرمجموعه تصادفی از مجموعه داده‌های آموزشی و به دنبال آن ساخت یک درخت تصمیم برای هر زیرمجموعه است. هر درخت از مجموعه‌ای از ویژگی‌های تصادفی برای تصمیم‌گیری خود استفاده می‌کند که منجر به یک مدل نهایی می‌شود که تغییرپذیری و مقاومت بیشتری در برابر نویز نشان می‌دهد. در طول مرحله پیش‌بینی، خروجی کلی با میانگین‌گیری از نتایج همه درختان در وظایف رگرسیون یا از طریق رأی‌گیری اکثریت در وظایف طبقه‌بندی به دست می‌آید[۲۴].

۳-۲- روش رگرسیون افزایشی

رگرسیون افزایشی[2] روشی در یادگیری جمعی است که با افزودن تدریجی مدل‌های بیشتر، دقت مدل را بهبود می‌بخشد. این روش با یک مدل پایه، مانند رگرسیون خطی، شروع می‌شود و سپس مدل‌های جدیدی را برای اصلاح خطاهای مدل‌های قبلی اضافه می‌کند. هر مدل جدید برای پیش‌بینی خطاهای باقیمانده - اختلاف بین نتایج واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده - طراحی شده است و این توالی را تا زمانی که خطای کلی کاهش یابد، ادامه می‌دهد [۲۵].

۳-۳- روش KStar

الگوریتم KStar یک رویکرد یادگیری مبتنی بر نمونه است؛ به جای استفاده از معیارهای فاصله عددی، از تبدیل‌های احتمالی برای ارزیابی شباهت استفاده می‌کند. این نشان می‌دهد که روش‌های آماری به جای ارزیابی مستقیم فاصله بین دو رویداد، احتمال تبدیل یک نمونه به نمونه دیگر را تعریف می‌کنند. این امر به کاهش داده‌های پرت و اثرات داده‌های نویزی کمک می‌کند [۲۶].

۳-۴- روش زیرفضای تصادفی

روش یادگیری زیرفضای تصادفی[3] یکی از روش‌های یادگیری تجمعی است که تمرکز اصلی آن روی تنوع‌بخشی به ویژگی‌ها است. در این روش برای آموزش هر مدل، زیرمجموعه‌ای تصادفی از ویژگی‌ها انتخاب می‌شود و یک یادگیرنده پایه فقط با همان زیرمجموعه آموزش می‌بینند. در نهایت، خروجی همه مدل‌ها با هم ترکیب می‌شود. در روش زیرفضای تصادفی هر مدل فقط بخشی از اطلاعات مسئله را می‌بینند در نتیجه خطاهای مدل‌ها وابسته به هم نیستند و ترکیب آن‌ها منجر به پایداری و دقت بیشتر می‌شود [۲۷].

۳-۵- روش جدول تصمیم‌گیری

الگوریتم جدول تصمیم‌گیری[4] یک رویکرد طبقه‌بندی ساده و سرراست است که داده‌ها را در یک جدول قوانین مرتب می‌کند. هر سطر در جدول، مجموعه‌ای از ویژگی‌ها و مقادیر خروجی مربوطه را نشان می‌دهد. الگوریتم در حین آموزش، بهترین ویژگی‌ها را برای ایجاد جدول تصمیم‌گیری انتخاب می‌کند. نمونه جدید با قوانین جدول مطابقت داده می‌شود تا دسته‌بندی آن تعیین شود و بنابراین پیش‌بینی ایجاد شود [۲۸].

۳-۶- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

معیارهایی که جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های ایجاد شده در این پژوهش مورد استفاده می‌گیرد عبارتند از ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق، ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص توافق ویلموت، کارآیی کلینگ-گوپتا و کارآیی نش-ساتکلیف. این معیارها بصورت زیر تعریف می‌شوند [۲۹]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x}).(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (۲)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2\right)^{0.5} \quad (۳)$$

$$MAE(\%) = \left(\frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{y_i - x_i}{y_i}\right|\right) \quad (۴)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۵)$$

[1] RF
[2] AR
[3] RSS
[4] DT

$$\alpha = \frac{SD_{xi}/\bar{x}}{SD_{yi}/\bar{y}} \quad (۶)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad (۷)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \quad (۸)$$

$$I_A = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|(x_i - \bar{y})| + |(y_i - \bar{y})|)^2}, 0 < I_A < 1 \quad (۹)$$

در روابط فوق x_i ،$\bar{x}$ ،y_i ،$\bar{y}$ و N به ترتیب مقدار پیش بینی شده، میانگین مقدار پیش بینی شده، مقدار واقعی، میانگین مقدار واقعی و تعداد کل نقاط داده را نشان می‌دهند. همچنین r بیانگر ضریب همبستگی پیرسون است.

۳-۷- توسعه و پیکربندی مدل

این تحقیق، ضریب اصطکاک سیال سمت هوا مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در محیط نرم افزار وکا پیش‌بینی می‌نماید. این ارزیابی از یک مجموعه داده دقیق شامل ۱۱۴۹ مشاهده استفاده می‌کند که از نمودارهای ارائه شده در مراجع مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای استخراج داده از نمودار جمع‌آوری شده است [۲۳-۲۰]. پارامترهای ورودی انتخاب شده جهت تعیین ضریب اصطکاک سمت هوا در مبادله‌کن‌های گرمای لوله پره‌دار حیاتی هستند. این پارامترها شامل گام طولی لوله که بر رژیم جریان و شدت اختلاط تاثیر دارد، گام عرضی لوله که بر مساحت موثر عبور جریان و سرعت موضعی هوا اثرگذار است، گام پره که سطح تماس هوا- جامد و آشفتگی جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ و عدد رینولدز، یک شاخص بدون بعد که شرایط جریان سیال را توصیف می‌کند، می‌باشد. ضریب اصطکاک سمت هوا نیز متغیر هدف، است. ۸۰٪ از داده‌ها به طور تصادفی برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین و ۲۰٪ باقیمانده به آزمایش عملکرد مدل اختصاص داده شد. ابتدا با استفاده از داده‌های آموزش روش‌های جنگل تصادفی، رگرسیون افزایشی، KStar، زیرفضای تصادفی و جدول تصمیم‌گیری تعلیم داده شده و عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای آماری مختلف بررسی می‌شود. در ادامه با استفاده از داده‌های آزمایش به عنوان مشاهدات جدیدی که در آموزش مدل استفاده نشدند عملکرد مدل‌های مختلف جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک مورد مطالعه قرار می‌گیرد.. در جدول ۱ تنظیمات کلی روش‌های یادگیری ماشین مورد مطالعه در نرم‌افزار وکا ارائه شده است. مراحل انجام پژوهش را می‌توان بدین‌صورت خلاصه کرد: ۱- جمع‌آوری داده‌ها از مطالعات منتشر شده ۲- تعیین متغیرهای ورودی و خروجی ۳- تقسیم داده‌ها به دو مجموعه آموزش و آزمایش ۴- پیاده‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین در نرم‌افزار وکا ۵- پیش‌بینی ضریب اصطکاک سمت هوا ۶- ارزیابی عملکرد مدل‌ها ۷- مقایسه نتایج مدل‌های مختلف و انتخاب مدل برتر.

جدول ۱- تنظیمات کلی مدل‌ها.

روش	پارامتر	تنظیمات
RF	اندازه دسته داده‌ها	**۱۰۰**
	تعداد تکرار	**۱۰۰**
	تعداد ارقام اعشاری	**۲**
	تعداد هسته‌های اجرایی	۱
	مقدار بذر تصادفی	۱
AR	اندازه دسته داده‌ها	۱۰۰
	تعداد تکرار	۱۰
	تعداد ارقام اعشاری	۲
	ضریب کوچک‌سازی	۱
	طبقه‌بند پایه	درخت تصمیم تک گره‌ای
KStar	اندازه دسته داده‌ها	۱۰۰
	ترکیب خودکار آنتروپی	غیرفعال
	تعداد ارقام اعشاری	**۲**
	ضریب ترکیب کلی	**۲۰**
	حالت مدیریت داده‌های مفقوده	منحنی‌های میانگین آنتروپی ستون‌ها
RSS	اندازه دسته داده‌ها	۱۰۰
	تعداد تکرار	۱۰
	تعداد ارقام اعشاری	۲
	اندازه زیرفضا	۰/۵
	مقدار بذر تصادفی	۱
DT	اندازه دسته داده‌ها	۱۰۰
	تعداد اعتبارسنجی متقابل	۱
	تعداد ارقام اعشاری	۲
	معیار ارزیابی	ریشه میانگین مربعات خطا
	روش جستجو	بهترین اول

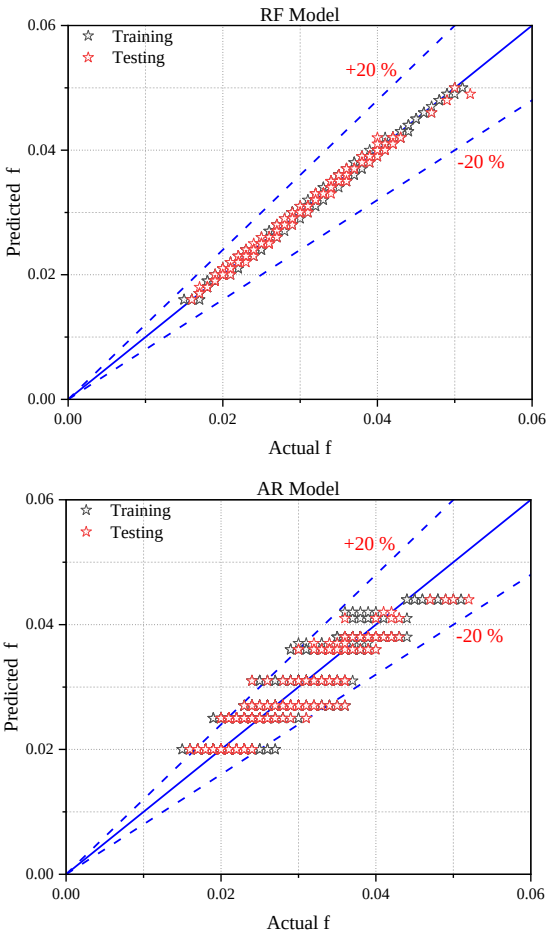
۴- بحث و نتیجه‌گیری

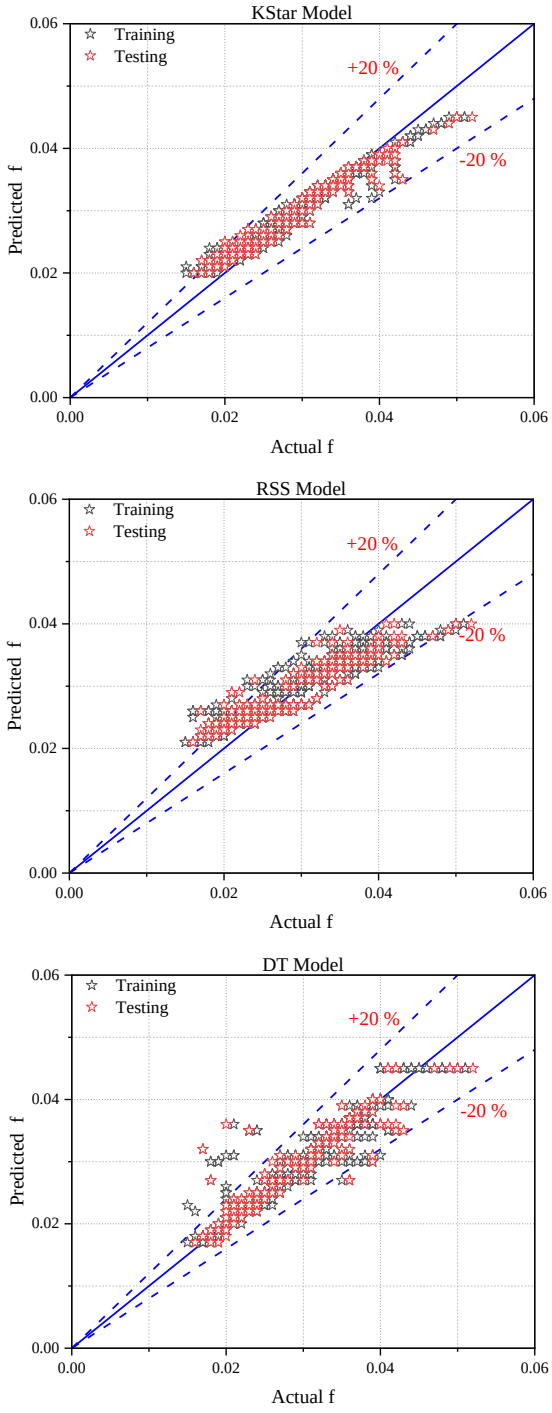
در این پژوهش مجموعه داده‌ها به گونه‌ای تصادفی تقسیم‌بندی شدند تا با نسبت ۸۰:۲۰ به ترتیب برای داده‌های آموزش و آزمایش، پنج روش مختلف هوش مصنوعی جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک اعمال شوند.

۴-۱- بررسی عملکرد مدل‌ها

شکل ۳ نمودارهای پراکندگی روش‌های مختلف را نشان می‌دهد و ضریب اصطکاک پیش‌بینی شده و واقعی را برای مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی مقایسه می‌کند. در این نمودارها نتایج واقعی در محور افقی و نتایج پیش‌بینی شده در امتداد محور عمودی نشان داده شده‌اند. قابلیت پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر در گروه‌بندی نزدیک‌تر نقاط در نزدیکی خط مورب y = x منعکس می‌شود. هم‌پوشانی زیاد مقادیر پیش‌بینی و واقعی نشان می‌دهد که مدل‌ها توانسته‌اند رابطه چندمتغیره میان پارامترهای ورودی و ضریب اصطکاک را به خوبی بازنمایی کنند. روش جنگل تصادفی با نشان دادن برازش بسیار خوب مقادیر پیش‌بینی شده با اندازه‌گیری‌های واقعی، یک مدل آموخته شده بسیار قوی و دقیق از داده‌های آموزشی را نشان می‌دهد. در هر تصویر، خطوط چین‌دار نشان دهنده دو محدوده انحراف در ۲۰٪- و ۲۰٪ + هستند که میزان انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر واقعی را نشان می‌دهند.. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بیشتر نتایج پیش‌بینی‌شده توسط روش جنگل تصادفی نزدیک به خط ۴۵ درجه

قرار دارند و در محدوده خطا قرار می‌گیرند. در نتیجه، روش جنگل تصادفی پیش‌بینی دقیقی را در بین روش‌های مورد بررسی در این مطالعه ارائه می‌دهد و پس از آن روش‌های KStar و جدول تصمیم‌گیری در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. علاوه بر این، هنگام ارزیابی پیش‌بینی‌های ضریب اصطکاک در روش‌های مختلف، واضح است که مدل پیشنهادی با استفاده از روش جنگل تصادفی هیچ پیش‌بینی پرتی را در داده‌ها ایجاد نکرده است. به عبارت دیگر، هیچ نقطه‌ای وجود ندارد که به طور قابل توجهی از خط بهترین برازش منحرف شود. این مدل دقت قابل توجهی را در پیش‌بینی مقادیر کوچک و بزرگ ضریب اصطکاک واقعی نشان داد. بنابراین این یافته نشان می‌دهد که مدل از درجه بالایی از تعمیم‌پذیری برخوردار است. همچنین عملکرد روش جنگل تصادفی در محدوده مقادیر کوچک و بزرگ ضریب اصطکاک پایدار باقی مانده است. این رفتار بیانگر توانایی این روش در استخراج روابط غیرخطی موجود در داده‌ها و تعمیم آن به داده‌های آزمایش است.

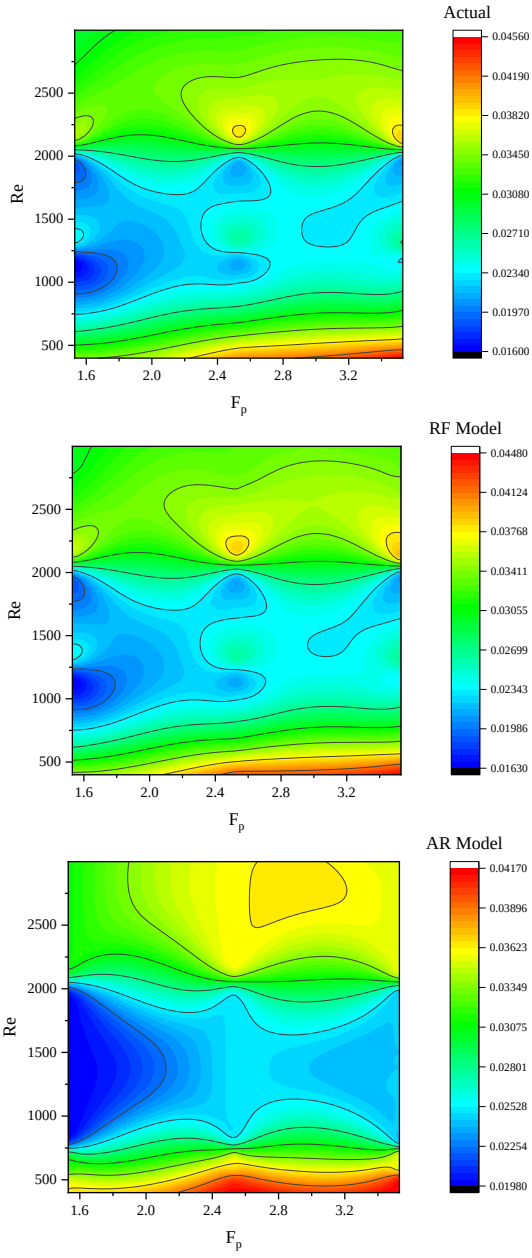


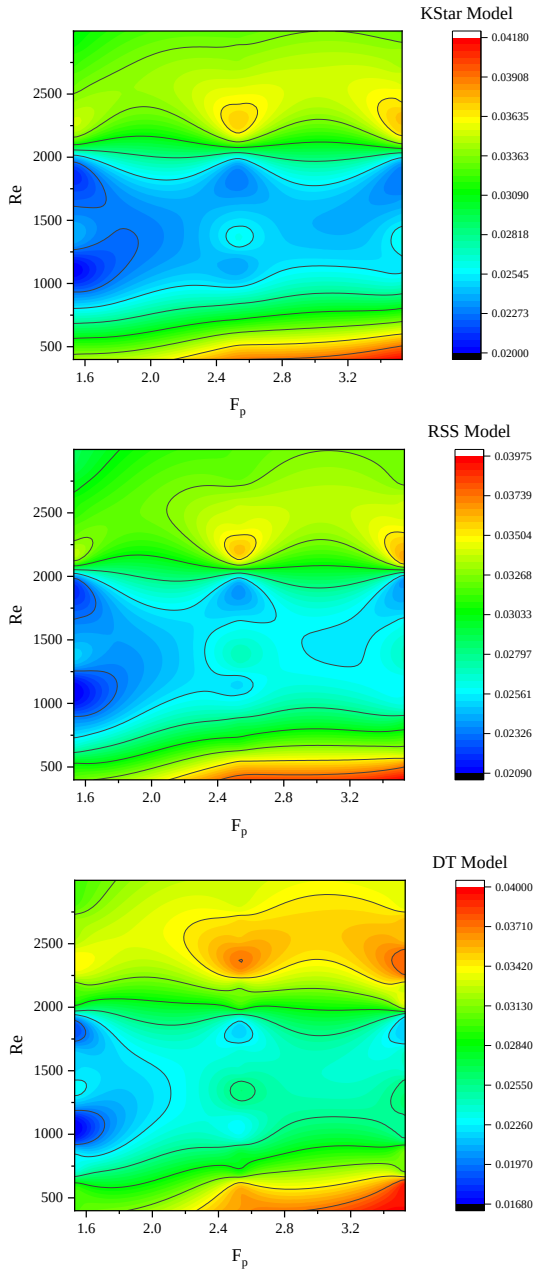


شکل ۳- نمودار پراکندگی داده‌های آموزش و آزمایش.

شکل ۴ کانتورهای ضریب اصطکاک واقعی و پیش‌بینی‌شده را بر حسب دو متغیر مستقل مهم یعنی عدد رینولدز و گام پره نشان می‌دهد. در واقع هدف این است که مشخص شود که کدام روش‌های یادگیری ماشین رابطه بین این دو متغیر مستقل و ضریب اصطکاک را نزدیکتر به نتایج واقعی پیش‌بینی می‌نماید. بر اساس نتایج پیش‌بینی روش‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی ملاحظه می‌شود که مدل‌های جنگل تصادفی و زیرفضای تصادفی ضریب اصطکاک و رابطه آن را با عدد رینولدز و گام پره بسیار نزدیک به

مقادیر واقعی تخمین زدند. این ارزیابی کیفی، توانایی مدل را در تطبیق مؤثر با داده‌های واقعی و رفتار فیزیکی مساله برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که این مدل‌ها علاوه بر پیش‌بینی دقیق ضریب اصطکاک، قادرند رفتار فیزیکی جریان و تغییرات آن را نیز به خوبی نمایش دهند. در مقایسه با روش‌های جدول تصمیم‌گیری‌و رگرسیون افزایشی، پیش‌بینی‌های انجام شده توسط KStar نیز با مقادیر واقعی همسوتر هستند.





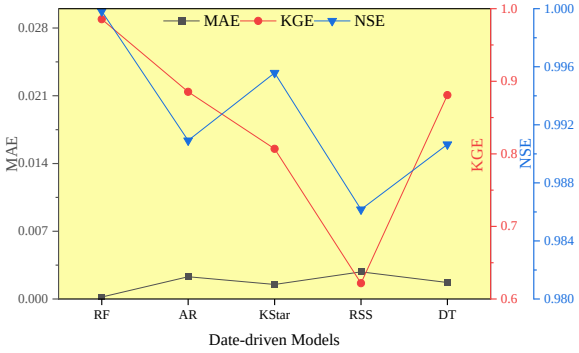
شکل ۴- ضریب اصطکاک پیش‌بینی‌شده و واقعی بر حسب عدد رینولدز و گام پره.

جدول ۲ نتایج ارزیابی روش‌های هوش مصنوعی مورد مطالعه جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک را برای مجموعه داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تمام روش‌های بررسی شده دقت بسیار بالا و نرخ خطای بسیار پایینی را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که روش جنگل تصادفی با بالاترین میزان ضریب همبستگی و کمترین مقدار خطا بهترین عملکرد را از خود ارائه داده است و پس از آن روش KStar در رتبه دوم قرار دارد.

جدول ۲- ارزیابی عملکرد مدل‌ها.

نام مدل	R	$RMSE$	I_A
RF	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۹۶
KStar	۰/۹۷۷۹	۰/۰۰۲	۰/۹۹۸۹
DT	۰/۹۱۷۵	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۷۶۴
AR	۰/۹۲۲۳	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۷۷
RSS	۰/۹۲۳	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۶۴۹

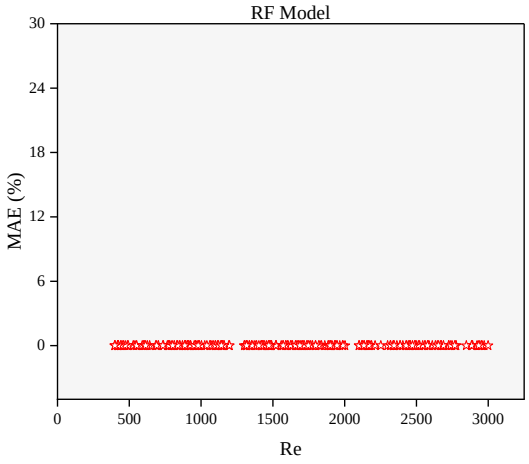
شکل ۵ سایر معیارهای آماری جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که روش جنگل تصادفی با هر سه معیار آماری کارآیی کلینگ-گوپتا ۰/۹۸۵۴۱ و کارآیی نش-ساتکلیف ۰/۹۹۸۲ و میانگین خطای مطلق ۰/۰۰۰۲ نیز در رتبه اول قرار دارد و بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد مطالعه دارد. از مقایسه سایر مدل‌ها مشاهده می‌شود که روش زیرفضای تصادفی‌ضعیفترین عملکرد را در پیش‌بینی ضریب اصطکاک از خود ارائه داده است. مقایسه عملکرد مدل‌ها نشان می‌دهد که اختلاف میان الگوریتم‌ها صرفا از نظر یک شاخص آماری نیست، بلکه در مجموعه‌ای از معیارهای دقت و خطا نیز مشاهده می‌شود و حاصل عملکرد همزمان آن‌ها در چند معیار ارزیابی است. برتری روش جنگل تصادفی نشان می‌دهد که این الگوریتم توانسته است روابط پیچیده موجود بین چهار متغیر ورودی و ضریب اصطکاک را با خطای کمتری بازنمایی کند.



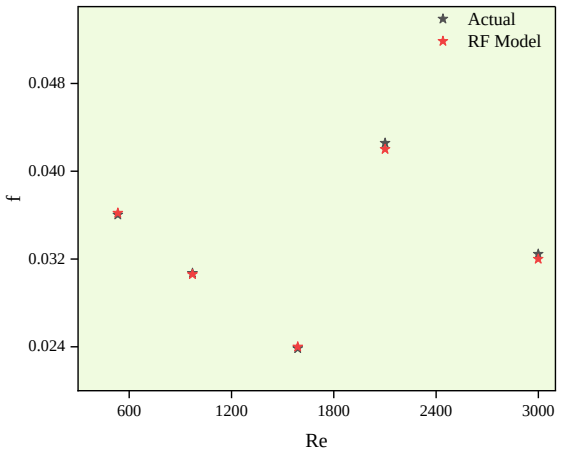
شکل ۵- عملکرد مدل‌ها.

۴-۲- معرفی و اعتبارسنجی الگوریتم برتر

مقایسه نتایج حاصل از معیارهای آماری مختلف برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی جنگل تصادفی، KStar، جدول تصمیم‌گیری، رگرسیون افزایشی و زیرفضای تصادفی نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی توانسته است در میان مدل‌های مورد بررسی، دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها را با حداقل میزان خطا ارائه دهد. برتری این روش در شاخص‌های مختلف ارزیابی بیانگر توانایی بالای آن در مدل‌سازی رفتار ضریب اصطکاک و استخراج روابط پیچیده میان پارامترهای مؤثر است. توانمندی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی، استفاده از چندین درخت تصمیم و مقاومت بالا نسبت به داده‌های پرت از دلایل این برتری می‌تواند باشد. ازاین‌رو، الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل اعتماد و مناسب برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌پره‌دار با آرایش متناوب در کاربردهای صنعتی معرفی شود. به منظور تحلیل میزان پایداری و قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی، عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی در محدوده‌های مختلف عدد رینولدز و رژیم‌های گوناگون جریان بر پایه معیار خطای مطلق در شکل ۶ بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقدار خطای مطلق در سراسر دامنه اعداد رینولدز بسیار محدود و نزدیک به صفر باقی مانده است. همچنین، مدل در هیچ‌یک از شرایط جریان رفتار غیرواقعی یا نوسانات شدید در پیش‌بینی‌ها از خود نشان نداده است. این ویژگی‌ها حاکی از آن است که مدل جنگل تصادفی از استحکام ساختاری و قابلیت تعمیم‌پذیری مطلوبی برخوردار بوده و می‌تواند با دقت و پایداری بالا، ضریب اصطکاک را در شرایط عملیاتی مختلف پیش‌بینی کند. شکل ۷ مقایسه‌ای میان مقادیر ضریب اصطکاک پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم جنگل تصادفی و نتایج حاصل از مطالعات عددی پیشین [۲۳-۲۰] ارائه می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در محدوده‌های مختلف جریان، تطابق بسیار مطلوبی با داده‌های عددی داشته و قادر است رفتار واقعی ضریب اصطکاک را با دقت بالا بازسازی کند. همخوانی نزدیک میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و نتایج واقعی پنج مشاهده مختلف در جدول ۳ بیانگر توانایی مناسب الگوریتم جنگل تصادفی در شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده میان پارامترهای مؤثر بر ضریب اصطکاک است (در این جدول f_p بیانگر نتایج پیش‌بینی f_a معرف نتایج واقعی است). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان بیان کرد که روش جنگل تصادفی ظرفیت بالایی برای جایگزینی روش‌های عددی متداول، که معمولاً با هزینه محاسباتی و زمان پردازش قابل‌توجهی همراه هستند، دارد. افزون بر این، با توجه به هزینه بالای اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضریب اصطکاک در مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌پره‌دار با آرایش متناوب، استفاده از مدل توسعه‌یافته در این پژوهش می‌تواند به عنوان یک ابزار کاربردی و قابل اعتماد در فرآیند طراحی و تحلیل صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. بهره‌گیری از این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌ها و زمان موردنیاز، امکان دستیابی به طراحی بهینه و تصمیم‌گیری دقیق‌تر در کاربردهای صنعتی را نیز فراهم می‌سازد.



شکل ۶- پایداری روش جنگل تصادفی.



شکل ۷- اعتبارسنجی روش جنگل تصادفی.

جدول ۳- مقایسه نتایج پیش‌بینی روش جنگل تصادفی با نتایج واقعی پنج مشاهده مختلف.

پارامتر	مشاهده ۱	مشاهده ۲	مشاهده ۳	مشاهده ۴	مشاهده ۵
Re	۲۱۱۸/۵	۸۷۰/۳۸	۵۳۳/۲	۱۳۳۶/۸۱	۷۷۲/۸۸
F_p	۳/۵۳	۳/۵۳	۲/۵۳	۳/۵۳	۱/۵۳
L_l	۱۹/۰۵	۳۸/۱	۱۹/۰۵	۱۹/۰۵	۱۹/۰۵
L_t	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۳۰/۴	۲۵/۴
f_a	۰/۰۴۲۵	۰/۰۲۱۰	۰/۰۳۶۰	۰/۰۲۵۶	۰/۰۲۲۲۶
f_p	۰/۰۴۲	۰/۰۲۱	۰/۰۳۶	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳

۵- جمع‌بندی نتایج

در این مطالعه، قابلیت الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک سمت هوای مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌پره‌دار با آرایش متناوب مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، پنج الگوریتم هوش مصنوعی جنگل تصادفی، KStar، جدول تصمیم‌گیری، رگرسیون افزایشی و زیرفضای تصادفی با استفاده از مجموعه داده‌ای شامل ۱۱۴۹ نمونه آموزش داده شدند. در فرآیند مدل‌سازی، ضریب اصطکاک به عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شد و پارامترهای هندسی و هیدرودینامیکی شامل گام طولی لوله، گام عرضی لوله، گام پره و عدد رینولدز به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شدند. همچنین معیارهای آماری ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق، ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص توافق ویلموت، کارآیی کلینگ-گوپتا و کارآیی نش-ساتکلیف جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

- نتایج نشان داد که تحلیل داده‌محور ارائه شده در این پژوهش قادر به شناسایی اثرگذاری پارامترهای هیدرودینامیکی و هندسی در رژیم‌های مختلف جریان است. ملاحظه شد که اگرچه عدد رینولدز در تمامی رژیم‌های جریان شامل لایه‌ای، گذرا و متلاطم، بیشترین نقش را در تغییرات ضریب اصطکاک ایفا می‌کند، با این حال اهمیت سایر پارامترها به نوع رژیم جریان وابسته بود؛ به‌طوری‌که در جریان لایه‌ای، گام پره بیشترین اثرگذاری را پس از عدد رینولدز داشت، در حالی‌که در رژیم گذرا، گام عرضی لوله به عنوان دومین پارامتر مؤثر شناخته شد. همچنین در جریان متلاطم، سه پارامتر گام طولی لوله، گام عرضی لوله و گام پره تأثیر تقریباً مشابهی بر رفتار ضریب اصطکاک نشان دادند.
- روش جنگل تصادفی با استفاده از گام طولی لوله، گام عرضی لوله، گام پره و عدد رینولدز به عنوان پارامترهای ورودی و ضریب اصطکاک به عنوان پارامتر خروجی برای داده‌های آموزش و آزمایش و با شاخص‌های آماری ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق، ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص توافق ویلموت، کارآیی کلینگ-گوپتا و کارآیی نش-ساتکلیف بهترین و دقیق‌ترین مدل ارزیابی شد.
- بر اساس نتایج حاصل، الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌پره‌دار با آرایش متناوب معرفی شد.
- مقایسه نتایج مدل جنگل تصادفی با داده‌های مطالعات معتبر و همچنین ارزیابی پایداری عملکرد آن در شرایط مختلف جریان، بیانگر دقت، قابلیت اعتماد و پایداری بالای این الگوریتم است.
- از آنجا که تعیین ضریب اصطکاک از طریق روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی معمولاً مستلزم صرف هزینه و زمان قابل‌توجهی است، مدل داده‌محور ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری سریع، دقیق و کارآمد در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد و جایگزین مناسبی برای روش‌های متداول موجود باشد.

۶- مراجع

[1] Thanh LN, Hoang AQ. Multi-objective optimization for maximizing thermohydraulic performance and minimizing entropy generation in finned-tube heat exchangers. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2026 Apr 1;119:110265.
[2] Lee MS, Gwon JG, Seo YM, Choi HK, Park YG. Ellipsoidal protrusions for enhanced thermal performance in fin-tube heat exchangers. Case Studies in Thermal Engineering. 2025 Jul 28:106770.
[3] Dang W, Wan Y, Song J, Song K, Ding Y. Heat transfer enhancement of finned-tube heat exchangers by novel fins with interrupted toroidal dimples and protrusions. Applied Thermal Engineering. 2026 May 27:131624.
[4] Yang Y, Jiang T, Liu J, Tang D, Tian H, Miao J, Deng C. A hybrid modeling approach for performance prediction of fouled spiral fin-tube heat exchanger. Modelling. 2025 Oct 30;6(4):138.
[5] Liu X, Wang M, Liu H, Chen W, Qian S. Numerical analysis on heat transfer enhancement of wavy fin-tube heat exchangers for air-conditioning applications. Applied Thermal Engineering. 2021 Nov 25;199:117597.
[6] Liang X, Min M, Bian K, Cheng J. Study on the enhanced heat transfer and exergy performance of the finned tube heat exchanger with vortex generator. International Journal of Thermal Sciences. 2025 Apr 1;210:109639.
[7] Farajollahi A, Vaferi K, Baharvand M. Analyzing tube arrangements of a finned-tube heat exchanger to optimize overall efficiency using artificial neural network and response surface methodology. Case Studies in Thermal Engineering. 2024 Nov 1;63:105302.
[8] Hu D, Zhang Q, Song K, Gao C, Zhang K, Su M, Wang L. Performance optimization of a wavy finned-tube heat exchanger

with staggered curved vortex generators. International Journal of Thermal Sciences. 2023 Jan 1;183:107830.
[9] Kim M, Han C, Baek C, Kim Y. Air-side heat transfer enhancement in fin-tube heat exchangers using forced vibrations under various conditions. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023 May 1;144:106798.
[10] Wongwises S, Chokeman Y. Effect of fin pitch and number of tube rows on the air side performance of herringbone wavy fin and tube heat exchangers. Energy Conversion and Management. 2005 Aug 1;46(13-14):2216-31.
[11] Mon MS, Gross U. Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers. International journal of heat and mass transfer. 2004 Apr 1;47(8-9):1953-64.
[12] Rahimi M, Ranjbar AA, Ganji DD, Sedighi K, Hosseini MJ. Experimental Investigation of Phase Change inside a Finned-Tube Heat Exchanger. Journal of Engineering. 2014;2014(1):641954.
[13] Chen L, Li Z, Guo ZY. Experimental investigation of plastic finned-tube heat exchangers, with emphasis on material thermal conductivity. Experimental Thermal and Fluid Science. 2009 Jul 1;33(5):922-8.
[14] Wen MY, Ho CY. Heat-transfer enhancement in fin-and-tube heat exchanger with improved fin design. Applied Thermal Engineering. 2009 Apr 1;29(5-6):1050-7.
[15] Deepakkumar R, Jayavel S. Air side performance of finned-tube heat exchanger with combination of circular and elliptical tubes. Applied Thermal Engineering. 2017 Jun 5;119:360-72.
[16] Lemouedda A, Schmid A, Franz E, Breuer M, Delgado A. Numerical investigations for the optimization of serrated finned-tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering. 2011 Jun 1;31(8-9):1393-401.
[17] Nemati H, Moghimi MA, Sapin P, Markides CN. Shape optimisation of air-cooled finned-tube heat exchangers. International Journal of Thermal Sciences. 2020 Apr 1;150:106233.
[18] Min J, Webb RL. Numerical analyses of effects of tube shape on performance of a finned tube heat exchanger. Journal of Enhanced Heat Transfer. 2004;11(1).
[19] Wang H, Liu YW, Yang P, Wu RJ, He YL. Parametric study and optimization of H-type finned tube heat exchangers using Taguchi method. Applied Thermal Engineering. 2016 Jun 25;103:128-38.
[20] Bhuiyan AA, Islam AS. Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016 Oct 1;101:38-59.
[21] Bhuiyan AA, Amin MR, Karim R, Islam AS. Plate fin and tube heat exchanger modeling: Effects of performance parameters for turbulent flow regime. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2014;9:1768-81.
[22] Bhuiyan AA, Amin MR, Islam AS. Three-dimensional performance analysis of plain fin tube heat exchangers in transitional regime. Applied Thermal Engineering. 2013 Jan 10;50(1):445-54.
[23] Bhuiyan AA, Islam AS, Amin MR. Numerical prediction of laminar characteristics of fluid flow and heat transfer in finned-tube heat exchangers. Innovative Systems Design and Engineering. 2011;2(6):1-2.
[24] Gholizadeh M, Jamei M, Ahmadianfar I, Pourrajab R. Prediction of nanofluids viscosity using random forest (RF) approach. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2020 Jun 15;201:104010.
[25] Elbeltagi A, Al-Mukhtar M, Kushwaha NL, Al-Ansari N, Vishwakarma DK. Forecasting monthly pan evaporation using hybrid additive regression and data-driven models in a semi-arid environment. Applied Water Science. 2023 Feb;13(2):42.
[26] Painuli S, Elangovan M, Sugumaran V. Tool condition monitoring using K-star algorithm. Expert Systems with Applications. 2014 May 1;41(6):2638-43.
[27] Ho TK. The random subspace method for constructing decision forests. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1998 Aug 31;20(8):832-44.
[28] Gorgulho J, Tavares J, Páscoa C, Tribolet J. Governance: Decision-making model and cycle. Procedia Computer Science. 2015 Jan 1;64:578-85.
[29] Alavi SE, Chachi J, Makvandi H. Data-Driven Modeling of the Nusselt Index in Plate Heat Exchangers Using Ensemble Machine Learning. Results in Engineering. 2026 Apr 16:110497.