



یک مدل یادگیری ماشین جایگزین برای تعیین ضریب اصطکاک سمت هوا در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب

سید احسان علوی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز - پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

چکیده

تعیین دقیق ضریب اصطکاک مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی مستلزم صرف هزینه‌های گزاف و حجم سنگین محاسباتی است. لذا ارائه یک روش جایگزین جهت تخمین دقیق و سریع آن الزامی است. در این پژوهش ضریب اصطکاک سمت هوای یک مبدل حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین M5 Rules, M5P, Bagging و REPT با دقت بسیار بالا تخمین زده می‌شود. یک مجموعه داده بزرگ مشتمل بر ۱۱۴۹ مشاهده که از مراجع مختلف و معتبر استخراج شده است جهت آموزش و تست مدل‌های مورد بررسی استفاده شده است. گام پره، گام عرضی لوله، گام طولی لوله و عدد رینولدز به عنوان پارامترهای ورودی و ضریب اصطکاک سمت هوا نیز به عنوان پارامتر هدف لحاظ شده است. نتایج نشان داد که روش Bagging، با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۹۹۸۳ و ۰/۹۹۶۸ به ترتیب برای داده‌های آموزش و آزمایش بالاترین دقت را در بین روش‌های مورد مطالعه دارد. میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطای این روش برای داده‌های آموزش به ترتیب ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۴ و برای داده‌های آزمایش به ترتیب ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۰۶ حاصل شد که بیانگر خطای بسیار پایین این روش جهت تخمین ضریب اصطکاک است.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی لوله پره‌دار؛ ضریب اصطکاک؛ یادگیری ماشین؛ مدل جایگزین؛ آرایش متناوب.

A machine learning-based surrogate model for estimating the air-side friction factor in plain finned-tube heat exchangers with staggered arrangement

Sayed Ehsan Alavi*

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

Abstract

Accurate determination of the friction factor in finned-tube heat exchangers through experimental and numerical methods entails substantial costs and significant computational effort. Therefore, the development of an alternative approach for rapid and precise estimation is essential. In this study, the air-side friction factor of a plain finned-tube heat exchanger with a staggered arrangement is estimated with high accuracy using machine learning techniques, including Bagging, M5P, M5Rules and REPT. A large dataset comprising 1,149 observations, extracted from various reliable sources, is employed for training and testing the developed models. Fin pitch, transverse tube pitch, longitudinal tube pitch, and Reynolds number are considered as input parameters, while the air-side friction factor is defined as the target variable. The results indicate that the Bagging method achieves the highest accuracy among the investigated models, with correlation coefficients of 0.9983 and 0.9968 for the training and testing datasets, respectively. The mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) for this method are 0.0003 and 0.0004 for the training data, and 0.0004 and 0.0006 for the testing data, respectively, demonstrating the very low prediction error and high reliability of this approach in estimating the friction factor.

Keywords: Finned-tube heat exchanger; friction factor; machine learning; surrogate model; staggered arrangement.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۹۸۹۱۶۳۱۲۲۳۸۱؛ فکس: ۹۸۶۱۳۶۷۵۱۰۲۱

آدرس پست الکترونیک: sayed_ehsan_alavi@scu.ac.ir

۱- مقدمه

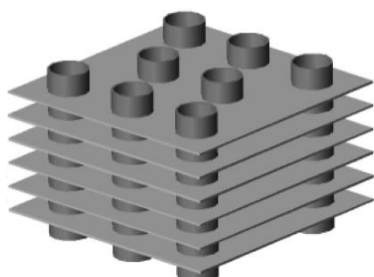
مبدل‌های حرارتی در بسیاری از نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، صنایع تبرید و تهویه مطبوع در صنایع کاربرد دارند. به همین دلیل تاکنون مطالعات زیادی در مورد آن‌ها انجام شده است. در برخی مطالعات رویکرد بررسی برگشت‌ناپذیری‌ها بوده است و پارامترهایی از قبیل انترنزی، اگزرنزی و آنتروپی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱ و ۲]. در پژوهش‌های دیگری مبدل‌های حرارتی از دیدگاه ترمودینامیکی و هیدرولیکی مطالعه شده است [۳]. از آنجایی که نانوذررات تأثیر بسیار زیادی در بهبود کارایی مبدل‌های حرارتی دارند در پژوهش‌هایی به کاربرد و اهمیت استفاده از نانوذررات در مبدل‌های حرارتی پرداخته شده است [۴]. بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی با توابع هدف مختلف نیز در تحقیقات قبلی مورد توجه قرار گرفته است. در برخی بررسی‌ها مبدل‌های حرارتی با رویکرد اقتصادی و انرژی بهینه شدند [۵ و ۶]. لیو و همکاران [۷] در تحقیق عددی خود به بهبود انتقال حرارت در مبدل حرارتی لوله پره‌دار موج‌دار پرداختند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تأثیر پارامترهای هندسی پره بر انتقال حرارت را شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که طول موج بر ضریب انتقال حرارت تأثیر محسوسی ندارد در حالیکه پیکربندی موج متقارن باعث کاهش چشمگیر افت فشار می‌شود. همچنین با تغییرات پیشنهادی در هندسه پره ملاحظه شد که انتقال حرارت به مقدار $34/2\%$ درصد افزایش می‌یابد. لیانگ و همکاران [۸] در تحقیق خود به بهبود انتقال حرارت و اگزرنزی در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با استفاده از یک مولد گرداب جدید پرداختند. در این پژوهش تأثیر 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 60° درجه و 90° درجه به ترتیب بیشترین اختلاف دما و افت فشار را ایجاد می‌کنند. فرج‌اللهی و همکاران [۹] در تحقیق خود به بررسی اثر چیدمان لوله‌ها بر کارایی مبدل حرارتی لوله پره‌دار با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و سطح پاسخ پرداختند. تأثیر 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 مبدل حرارتی لوله پره‌دار به میزان قابل توجهی اثر دارد. هو و همکاران [۱۰] در تحقیق خود با استفاده از روش الگوریتم

ژنتیک و شبکه عصبی به بهینه‌سازی کارایی مبدل حرارتی 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 حرارتی را افزایش می‌دهد. کیم و همکاران [۱۱] در تحقیق خود به بررسی انتقال حرارت سمت هوا در مبدل‌های حرارتی لوله پره-دار با استفاده از ارتعاشات اجباری پرداختند. تأثیر گام پره، دامنه و فرکانس ارتعاش بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و ملاحظه شد که با افزایش این پارامترها انتقال حرارت افزایش می‌یابد. وانگوایس و همکاران [۱۲] در تحقیق آزمایشگاهی خود به بررسی اثر تعداد ردیف لوله و گام پره بر عملکرد مبدل حرارتی لوله پره‌دار موج‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش گام پره بر انتقال حرارت مبدل حرارتی اثر قابل توجهی ندارد اما باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین ملاحظه شد که با افزایش تعداد ردیف لوله ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. مان و همکاران [۱۳] در تحقیق عددی خود به بررسی اثر فاصله پره-ها در مبدل‌های حرارتی لوله و پره‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که فاصله پره‌ها به میزان قابل توجهی بر توسعه لایه مرزی اثرگذار است. در این پژوهش تأثیر فاصله پره‌ها بر پارامترهای حرارتی و هیدرولیکی نیز بررسی شد. در ادامه نیز نتایج عددی با نتایج روابط موجود مقایسه گردید. رحیمی و همکاران [۱۴] به بررسی پارامترهای موثر بر تغییر فاز در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که پره تأثیر بسیار زیادی بر بهبود فرآیندهای انجماد و ذوب دارد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش دمای ورودی در مبدل حرارتی زمان فرآیند ذوب به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با افزایش نرخ جریان، زمان فرآیند انجماد دچار تغییر محسوس خواهد شد. چن و همکاران [۱۵] در تحقیق خود به مطالعه رسانایی حرارتی مواد مختلف در مبدل‌های حرارتی پلاستیکی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش رسانایی حرارتی تا یک مقدار مشخص باعث افزایش قابل توجهی در عملکرد مبدل حرارتی خواهد شد و به ازای مقادیر بالاتر از آن تأثیر محسوسی ندارد. ون و همکاران [۱۶] در تحقیق خود با بررسی طراحی پره در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار پارامترهای حرارتی و هیدرولیکی در این مبدل‌ها را بهبود بخشیدند. در این پژوهش تأثیر سه پره موجی، صفحه‌ای و مرکب بر انتقال حرارت، افت فشار و ضریب

است که این ضریب یک پارامتر کلیدی و تاثیرگذار در عملکرد و هزینه‌های عملیاتی مبدل‌های حرارتی است. از یک سو آزمایشات مورد نیاز جهت تعیین دقیق مقدار ضریب اصطکاک معمولاً گرانقیمت است و از سویی دیگر استخراج آن با استفاده از روش‌های نرم‌افزاری سنگین و زمان‌بر است. لذا ارائه یک روش جایگزین سریع و دقیق جهت محاسبه ضریب اصطکاک ضروری بنظر می‌رسد. این پژوهش با استفاده از یک مجموعه داده بزرگ مشتمل بر ۱۱۴۹ مشاهده یک مدل یادگیری ماشین ارائه می‌دهد تا در همه رژیم‌های جریان با دقت بسیار بالا ضریب اصطکاک سمت هوای یک مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب پیش‌بینی نماید. بدین منظور چهار روش یادگیری ماشین M5 Rules, M5P, Bagging و REPT مورد بررسی و مقایسه قرار داده می‌شود و در نهایت مدل برتر و دقیق‌تر به عنوان مدل پیشنهادی تحقیق معرفی خواهد شد. مدل حاصل می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد و دقیق جایگزین روش‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری فعلی در صنعت باشد. این مدل با قابلیت تعمیم‌پذیری بالای خود قادر خواهد بود به عنوان یک ابزار توانمند و قابل اعتماد داده‌های صنعتی جدید را دریافت نماید و ضریب اصطکاک را بصورت دقیق پیش‌بینی نماید.

۲- مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها

مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار یکی از پرکاربردترین انواع مبدل‌های حرارتی هستند که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مبدل‌ها سیال با ضریب انتقال حرارت بیشتر درون لوله و سیال با ضریب انتقال حرارت کمتر که معمولاً هوا یا گاز است از روی پره‌ها عبور می‌کند. در شکل ۱ مبدل حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه مبدل حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب [۲۲].

اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با شکل پره مرکب در رتبه اول قرار دارد و پس از آن پره موجی عملکرد بهتری نشان داد. دیپیکومار و همکاران [۱۷] در تحقیق خود به بررسی عملکرد مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار در 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. همچنین از نتایج ملاحظه شد که در سرعت‌های بالا استفاده از ترکیب لوله‌های بیضوی و دایره‌ای مفیدتر خواهد بود. لمودا و همکاران [۱۸] در تحقیق عددی خود به بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی 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 حرارت و در نتیجه بهبود عملکرد مبدل حرارتی خواهد شد. نعمتی و همکاران [۱۹] در تحقیق خود شکل پره‌های حلقوی در یک مبدل حرارتی لوله پره‌دار را بهینه‌سازی نمودند. پارامترهای تولید آنتروپی، افت فشار و انتقال حرارت در سیال سمت هوا مورد مطالعه قرار گرفت. در قسمت بهینه‌سازی تابع هدف نرخ انتقال حرارت و افت فشار لحاظ شد. نتایج نشان داد که پره‌های بیضوی حلقوی باعث کاهش محسوس افت فشار و تولید آنتروپی خواهد شد. مین و همکاران [۲۰] در تحقیق خود به بررسی تاثیر شکل لوله بر عملکرد مبدل‌های حرارتی 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 حرارت سیال سمت آب افزایش و سیال سمت هوا کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [۲۱] با استفاده از روش تاگوچی مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار را بهینه نمودند. هفت پارامتر به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی و عملکرد حرارتی-هیدرولیکی نیز به عنوان تابع هدف انتخاب شد. نتایج نشان داد که ارتفاع، ضخامت و گام پره بیشترین تاثیر را بر عملکرد حرارتی-هیدرولیکی از خود نشان دادند. همچنین از نتایج بهینه‌سازی ملاحظه شد که بیشترین مقدار بهبود عملکرد حرارتی-هیدرولیکی حدود ۱۶٪ است.

مطالعاتی که تاکنون در مورد ضریب اصطکاک در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار انجام شده است حاکی از آن

ضریب اصطکاک سیال سمت هوا در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با استفاده از رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۲]:

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

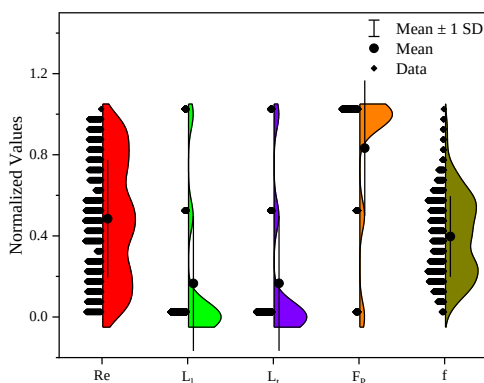
این ضریب که بر اساس افت فشار ناشی از اصطکاک سیال در طول مسیر جریان تعریف شده است، یک پارامتر بدون بعد است که میزان مقاومت هیدرودینامیکی مبدل حرارتی در برابر عبور جریان هوا را نشان می‌دهد. در این رابطه، افت فشار ایجادشده در اثر عبور هوا از میان پره‌ها و لوله‌ها بر فشار دینامیکی جریان ورودی نرمال‌سازی شده است. بنابراین، ضریب اصطکاک بیانگر میزان انرژی جنبشی جریان است که در نتیجه اصطکاک دیواره‌ای، تشکیل و ریزش گردابه‌ها در اطراف لوله‌ها، جدایش جریان و همچنین انقباض و انبساط‌های موضعی در کانال‌های بین پره‌ها تلف می‌شود. لذا، هرچه مقدار ضریب اصطکاک بزرگتر باشد، انرژی بیشتری از جریان هوا در اثر تلفات هیدرودینامیکی مستهلک شده و افت فشار بزرگتری در مبدل حرارتی ایجاد می‌شود. در رابطه (۱)، P ، u و ρ به ترتیب بیانگر فشار، سرعت و چگالی سیال است. همچنین زیرنویس in معرف مقدار آن پارامتر در ورودی است. پارامتر L طول مسیر جریان در راستای عبور هوا از میان دسته لوله‌ها بوده (وابسته به تعداد ردیف لوله‌ها و گام طولی آن‌ها) و H فاصله آزاد بین دو پره مجاور را نشان می‌دهد. عبارت هندسی $H/4L$ نیز نقش مشابه نسبت قطر هیدرولیکی به طول جریان در معادله کلاسیک داریسی-ویسباخ را ایفا کرده و اثر ابعاد هندسی مبدل بر افت فشار را در محاسبه ضریب اصطکاک لحاظ می‌کند. در نتیجه، ضریب اصطکاک محاسبه‌شده نه تنها تابع شرایط جریان، بلکه تابع هندسه مبدل حرارتی شامل آرایش لوله‌ها و فاصله پره‌ها نیز خواهد بود.

در این پژوهش ضریب اصطکاک یک مبدل حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب در رژیم‌های مختلف جریان و از مراجع معتبر استخراج شده است [۲۲-۲۵]. در این مجموعه داده که مشتمل بر ۱۱۴۹ مشاهده است ضریب اصطکاک مبدل حرارتی 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. محدوده این متغیرها در جدول ۱ ذکر شده است. شکل ۲ نمودار ویولون مقادیر

نرمال شده کلیه پارامترها برای مجموع داده‌های جمع‌آوری شده را نشان می‌دهد. در مورد یک متغیر مستقل، توزیعی را می‌توان نرمال فرض کرد که مقادیر کشیدگی و چولگی آن در محدوده ± 2 باشد [۲۶]. با توجه به این معیار، از نتایج داده‌های آماری حاصل می‌توان دریافت که همه پارامترها در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرند. در نتیجه، توزیع نرمال برای همه متغیرهای مستقل مورد بررسی اعمال می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که مجموعه داده‌ها برای تولید مدل‌های پیش‌بینی مناسب است.

جدول ۱- محدوده متغیرهای ورودی.

متغیر	محدوده
عدد رینولدز	$400 \leq Re \leq 3000$
گام طولی لوله (mm)	$19/05 \leq L_1 \leq 38/1$
گام عرضی لوله (mm)	$25/4 \leq L_t \leq 35/4$
گام پره (mm)	$1/53 \leq F_p \leq 3/53$



شکل ۲- توزیع مقادیر نرمال شده پارامترهای ورودی و خروجی.

۳- مبانی روش‌های یادگیری ماشین

این مطالعه به بررسی توانایی‌های پیش‌بینی ضریب اصطکاک مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار چهار تکنیک یادگیری ماشین REPT، M5P، Bagging و M5 Rules می‌پردازد. هر رویکرد به طور کامل از نظر دقت پیش‌بینی و کاربردپذیری در دنیای واقعی در زمینه تحقیق ارزیابی می‌شود. این مطالعه به طور کامل مزایا و معایب هر روش در پیش‌بینی ضریب اصطکاک را بررسی می‌کند.

۳-۱- روش Bagging

روش Bagging یک رویکرد یادگیری ماشینی است که با هدف کاهش بیش‌برازش و بهبود پایداری مدل‌ها انجام می‌شود. این روش با ایجاد چندین مجموعه داده از مجموعه داده اصلی با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی با جایگزینی کار می‌کند. یک مدل متمایز، معمولاً یک درخت تصمیم، روی هر مجموعه داده آموزش داده می‌شود. در نهایت، پیش‌بینی‌های همه مدل‌ها - یا با میانگین‌گیری برای وظایف رگرسیون یا با استفاده از رأی‌گیری برای وظایف طبقه‌بندی - ترکیب می‌شوند تا نتیجه نهایی حاصل شود. یکی از مزایای قابل توجه این روش این است که پایداری و مقاومت مدل را در برابر نویز بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، با کاهش اثرات تغییرات تصادفی در داده‌ها، دقت را افزایش می‌دهد. با این حال، یک نکته منفی قابل توجه این است که آموزش چندین مدل مورد نیاز است که می‌تواند هزینه‌های محاسباتی را افزایش دهد. علاوه بر این، ممکن است مزایای ضروری را برای مجموعه داده‌های ساده‌تر که الگوهای متمایزی را نشان می‌دهند، فراهم نکند. این تکنیک یک روش گروهی رایج در یادگیری ماشینی است که برای وظایف طبقه‌بندی و رگرسیون موثر است. روش Bagging در حوزه‌های مختلفی از جمله تشخیص چهره، پیش‌بینی مالی و پردازش زبان طبیعی اعمال می‌شود، اما محدود به این موارد نیست. اثربخشی آن در افزایش دقت مدل و به حداقل رساندن بیش‌برازش، آن را به ابزاری ضروری در مجموعه یادگیری ماشین تبدیل می‌کند [۲۷].

۳-۲- روش M5P

روش M5P یک روش رگرسیون است که از درخت‌های تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی مقادیر عددی استفاده می‌کند. این روش با ساخت یک درخت تصمیم‌گیری آغاز می‌شود، اما به جای اختصاص یک مقدار ثابت به هر گره انتهایی، از مدل‌های رگرسیون خطی استفاده می‌کند. این روش، داده‌ها را قادر می‌سازد تا به بخش‌هایی تقسیم شوند که ساختاری درخت‌مانند را تشکیل می‌دهند و از یک معادله خطی برای تخمین نتایج در هر بخش استفاده می‌شود. یکی از مزایای کلیدی روش M5P توانایی آن در ترکیب مزایای درخت‌های تصمیم‌گیری و رگرسیون خطی است که منجر به بهبود دقت در مقایسه با درخت‌های تصمیم‌گیری سنتی می‌شود. این روش

در مدیریت مجموعه داده‌های پیچیده و پیوسته مؤثر است. با این حال، به منابع محاسباتی بیشتری نسبت به درخت‌های تصمیم‌گیری ساده نیاز دارد. علاوه بر این، مدل‌های رگرسیون ممکن است با داده‌های نویزی مشکل داشته باشند و در نتیجه عملکرد ضعیفی داشته باشند. روش M5P که به عنوان درخت مدل برای رگرسیون نیز شناخته می‌شود، ابزاری حیاتی است که در حوزه‌های مختلف، از جمله پیش‌بینی سری‌های زمانی، ارزیابی مالی و وظایف مهندسی استفاده می‌شود. کاربردهای آن به زمینه‌های پیچیده‌ای مانند هواشناسی، کمک به پیش‌بینی آب و هوا و ایجاد سیستم‌های توصیه‌گر می‌رسد. توانایی الگوریتم در مدیریت و تجزیه و تحلیل مؤثر مجموعه داده‌های قابل توجه، آن را به یک منبع کلیدی در این برنامه‌های متنوع تبدیل می‌کند [۲۸].

۳-۳- روش REPT

روش REPT روشی سریع و مؤثر برای ساخت درخت‌های تصمیم‌گیری است که از تکنیک‌های هرس برای کاهش خطر بیش‌برازش استفاده می‌کند. این روش با ایجاد یک درخت کامل با استفاده از الگوریتم C4.5 یا روشی مشابه آغاز می‌شود و پس از آن حذف بازگشتی گره‌ها از پایین به بالا، با تمرکز بر گره‌هایی که در کاهش خطای اعتبارسنجی نقشی ندارند، انجام می‌شود. مراحل پیاده‌سازی این روش عبارت است از: ۱- ساخت درخت اولیه: یک درخت کامل با بیشترین تعداد شاخه ممکن با استفاده از داده‌های آموزشی تولید می‌شود. ۲- تعیین معیار تقسیم: ویژگی‌هایی برای تقسیم بر اساس معیارهایی مانند اطلاعات متقابل یا کاهش واریانس انتخاب می‌شوند. ۳- اجرای هرس کاهش خطا: گره‌هایی که می‌توانند بدون کاهش دقت مدل روی داده‌های اعتبارسنجی حذف شوند، نگه داشته می‌شوند، در حالی که بقیه حذف می‌شوند. ۴- نهایی کردن درخت: پس از هرس، یک درخت ساده‌تر و قابل تعمیم‌تر تولید می‌شود [۲۹].

۳-۴- روش M5 Rules

الگوریتم M5 Rules یک روش یادگیری ماشینی است که با ترکیب درخت‌های تصمیم‌گیری با مدل‌های خطی، چالش‌های رگرسیون را برطرف می‌کند. این روش جدید، قوانین واضح و قابل فهمی را برای پیش‌بینی نتایج عددی ایجاد می‌کند. این فرآیند با ایجاد یک درخت رگرسیون آغاز می‌شود که مدل‌های

رگرسیون خطی در گره‌های انتهایی آن نمایش داده می‌شوند. متعاقباً مسیرهای این درخت را به قوانینی تبدیل می‌کند که هر کدام معیارهای خاصی دارند تا به پیش‌بینی خروجی از طریق یک مدل خطی کمک کنند. سپس این دستورالعمل‌ها بهبود یافته و ساده‌سازی می‌شوند تا پیچیدگی را کاهش داده و وضوح را افزایش دهند. برخی از مزایای کلیدی M5 Rules شامل دقت چشمگیر آن با مجموعه داده‌هایی است که الگوهای خطی محلی را نشان می‌دهند، قابلیت تفسیر عالی، توانایی حذف ویژگی‌های نامربوط و گزینه‌های مدل‌سازی متنوع آن است. این رویکرد مستعد تحت تأثیر قرار گرفتن توسط داده‌های پرت است و گاهی اوقات می‌تواند با مشکلاتی در زمینه بیش‌برازش مواجه شود. علاوه بر این، به ویژه در موقعیت‌هایی که شامل روابط غیرخطی است، نسبت به تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند شبکه‌های عصبی، اثربخشی کمتری دارد [۳۰].

۳-۵- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

معیارهایی که جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های ایجاد شده در این پژوهش مورد استفاده می‌گیرد عبارتند از ضریب همبستگی (R)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE). این معیارها بصورت زیر تعریف می‌شوند [۳۱]:

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

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$MAE(\%) = \left(\frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - x_i}{y_i} \right| \right) \quad (4)$$

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

۳-۶- توسعه و پیکربندی مدل

این تحقیق، ضریب اصطکاک سیال سمت هوا مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار ساده با آرایش متناوب را با استفاده از چهار روش یادگیری ماشین Bagging، M5P، REPT و M5 Rules ارزیابی می‌کند. این ارزیابی از یک مجموعه داده دقیق شامل ۱۱۴۹ مشاهده استفاده می‌کند که همگی در محیط نرم‌افزار

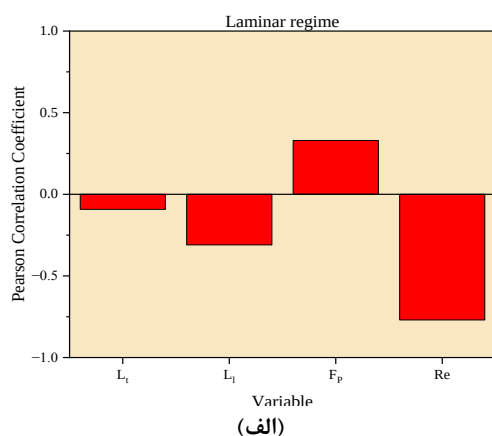
وکا که یک پلتفرم برجسته برای وظایف یادگیری ماشین است تجزیه و تحلیل شده‌اند. پارامترهای ورودی انتخاب شده برای این بررسی برای تعیین ضریب اصطکاک سمت هوا در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار حیاتی هستند. این پارامترها شامل گام طولی لوله که بر رژیم جریان و شدت اختلاط تأثیر دارد، گام عرضی لوله که بر مساحت موثر عبور جریان و سرعت موضعی هوا اثرگذار است، گام پره که سطح تماس هوا-جامد و آشفتگی جریان را تحت تأثیر 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. با اختصاص ۸۰٪ از داده‌ها به طور تصادفی برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین، مجموعه داده‌ها به زیرمجموعه‌های آموزشی و آزمایشی تقسیم شدند تا امکان تجزیه و تحلیل کامل فراهم شود. ۲۰٪ باقیمانده به آزمایش عملکرد اختصاص داده شد.

در جدول ۲ پیکربندی کدگذاری اعمال شده برای پیاده‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین مورد بررسی فهرست شده است. این جدول بر تنظیمات کلی اختصاص داده شده به هر روش تأکید دارد.

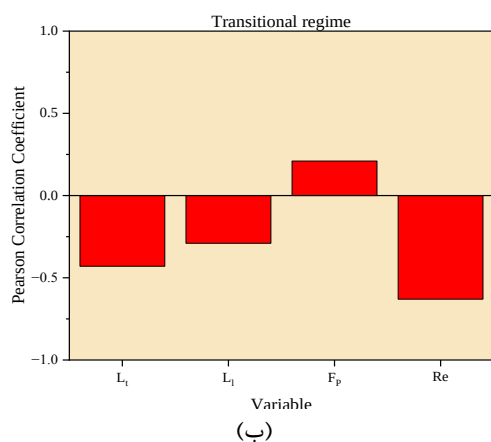
جدول ۲- تنظیمات کلی مدل‌های مورد بررسی.

تنظیمات	پارامتر	روش
Bagging	Batch Size	۱۰۰
	Bag Size Percent	۱۰۰
	Num Iterations	۱۰
	Num Decimal Places	۲
	Seed	۱
M5P	Batch Size	۱۰۰
	Min Num Instances	۴
	Build Regression Tree	خیر
	Num Decimal Places	۴
	Use Unsmoothed	خیر
REPT	Batch Size	۱۰۰
	Min Depth	-۱
	Min Num	۲
	Num Decimal Places	۲
	Seed	۱
M5 Rules	Batch Size	۱۰۰
	Debug	خیر
	Min Num Instances	۴
	Num Decimal Places	۴
	Use Unsmoothed	خیر

افت فشار عمل کرده و در نتیجه حساسیت ضریب اصطکاک نسبت به آن‌ها در یک سطح تقریباً مشابه قرار می‌گیرد. این موضوع دلیل مشاهده ضرایب همبستگی نزدیک به یکدیگر برای این سه پارامتر در رژیم متلاطم است.



شکل ۳- نمودار ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای ورودی و هدف: جریان‌های الف): آرام ب): گذرا ج): متلاطم.



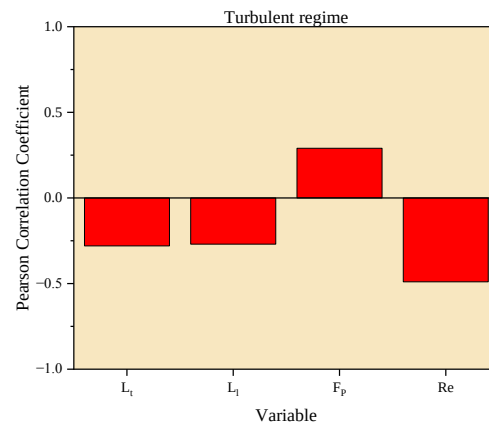
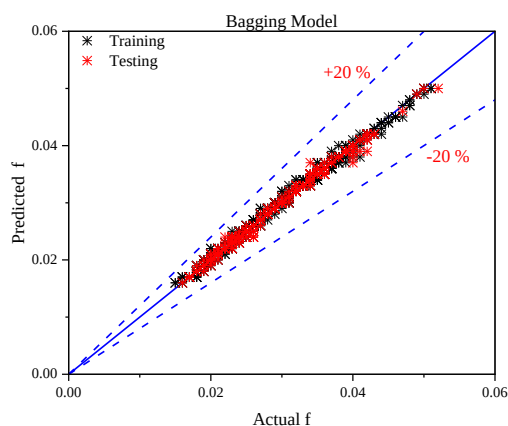
۴- نتایج

مجموعه داده‌ها به گونه‌ای تصادفی تقسیم‌بندی شدند تا تکنیک‌های یادگیری ماشین REPT، M5P، Bagging و Rules برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک با نسبت ۸۰:۲۰ به ترتیب برای داده‌های آموزش و آزمایش، اعمال شوند. روش انتخاب تصادفی، روشی ثابت برای ارزیابی عملکرد روی داده‌های پردازش نشده ارائه می‌دهد و از ساخت مدل متعادل پشتیبانی می‌کند.

۴-۱- بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف بر ضریب اصطکاک

در شکل ۳ رابطه بین ضریب اصطکاک و پارامترهای موثر بر آن در جریان‌های آرام، گذرا و متلاطم با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر سه رژیم جریان عدد رینولدز موثرترین پارامتر و قویترین رابطه را با ضریب اصطکاک دارد. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر پارامترهای هندسی بر ضریب اصطکاک در جریان‌های مختلف متفاوت است. در جریان آرام پس از عدد رینولدز، گام پره بیشترین تاثیر را بر ضریب اصطکاک دارد و کمترین میزان اثرگذاری را گام عرضی لوله دارد. در حالی که در جریان گذرا گام عرضی لوله در رتبه دوم قرار دارد و گام پره کمترین میزان تاثیر را بر ضریب اصطکاک دارد. همچنین از نتایج مشاهده می‌شود که در جریان متلاطم میزان اثرگذاری هر سه پارامتر گام طولی لوله، گام عرضی لوله و گام پره تقریباً یکسان است. از دیدگاه فیزیکی، در این محدوده از عدد رینولدز، افت فشار دیگر صرفاً تحت تأثیر نیروهای لزجی نیست، بلکه به میزان قابل توجهی از شتاب‌گیری جریان، جدایش لایه مرزی و تشکیل گردابه‌ها در اطراف لوله‌ها تأثیر می‌پذیرد. هر سه پارامتر هندسی مذکور با تغییر فضای آزاد عبور جریان و میزان انسداد هندسی، ساختار میدان سرعت و شدت برهم‌کنش جریان با لوله‌ها و پره‌ها را کنترل می‌کنند. افزایش گام طولی موجب کاهش تداخل نواحی دنباله جریان بین ردیف‌های متوالی لوله‌ها می‌شود، افزایش گام عرضی شدت فشردگی جریان بین لوله‌ها را کاهش می‌دهد و افزایش گام پره نیز مقاومت جریان در کانال‌های بین پره‌ای را کم می‌کند. بنابراین، اگرچه مکانیزم اثرگذاری این سه پارامتر متفاوت است، اما در محدوده $Re \geq 2000$ ، همگی از طریق کاهش انسداد جریان و

در پیش‌بینی ضریب اصطکاک را روش REPT ارائه داده است. علاوه بر این، هنگام ارزیابی پیش‌بینی‌های ضریب اصطکاک در روش‌های مختلف، واضح است که مدل پیشنهادی با استفاده از روش Bagging هیچ پیش‌بینی پرتی را در داده‌های آموزشی و آزمایشی نداشته 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. در نتیجه، این یافته نشان می‌دهد که مدل از درجه بالایی از تعمیم‌پذیری برخوردار است. در خصوص نتایج دو روش M5P و M5 Rules باطرنشان می‌گردد که در هر دو حالت فعال بودن و فعال نبودن هموارسازی، نتایج ارزیابی گردید. ملاحظه شد که اختلاف عملکرد بین دو حالت از نظر معیارهای آماری بسیار ناچیز بوده و تغییر قابل توجهی در دقت پیش‌بینی این روش‌ها ایجاد نمی‌کند. لذا، با توجه به ماهیت متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش که شامل پارامترهای ترموهیدرولیکی بوده و ذاتا رفتار پیوسته و بدون ناپیوستگی فیزیکی دارند، استفاده از نسخه هموار شده الگوریتم از نظر فیزیکی و مهندسی مناسب‌تر تشخیص داده شد و بر مبنای آن نتایج تحقیق ارائه شد. این انتخاب همچنین موجب حفظ پیوستگی پاسخ مدل در فضای ویژگی‌ها و انطباق بهتر با رفتار واقعی پدیده‌های ترموهیدرولیکی می‌گردد.

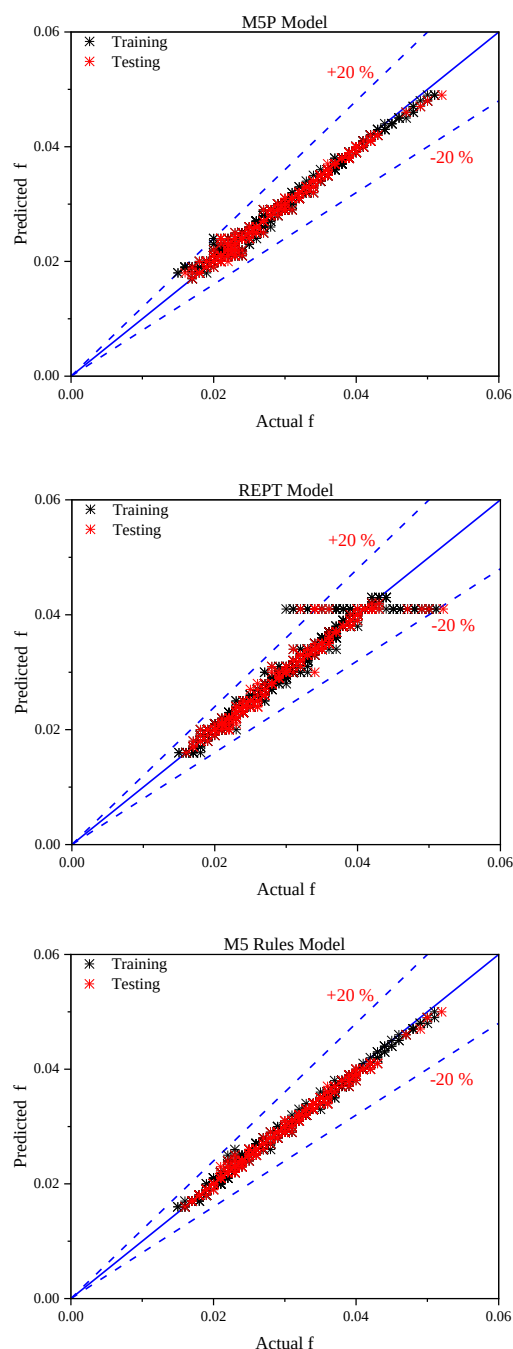


(ج)

ادامه شکل ۳- نمودار ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای ورودی و هدف: جریان‌های الف): آرام ب): گذرا ج): متلاطم.

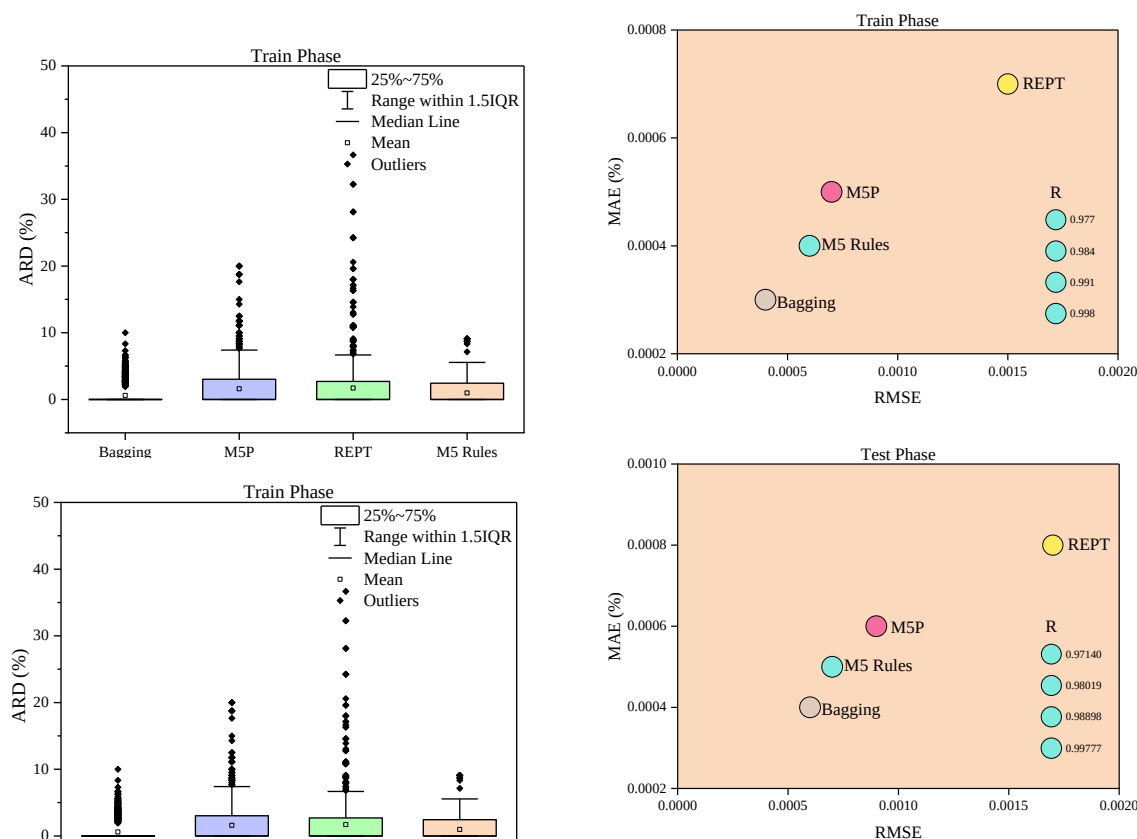
شکل ۴ نمودارهای پراکندگی را برای تکنیک‌های مختلف نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک پیش‌بینی شده و واقعی را برای مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی مقایسه می‌کند. در این نمودارها نتایج واقعی در محور افقی و نتایج پیش‌بینی شده در امتداد محور عمودی نشان داده شده‌اند. قابلیت پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر در گروه‌بندی نزدیک‌تر نقاط در نزدیکی خط مورب $y = x$ منعکس می‌شود. روش Bagging 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 میان سایر تکنیک‌های بررسی شده، رویکرد Bagging با نشان دادن برازش نزدیک‌تر به خط ایده‌آل در مقایسه با سایر تکنیک‌ها، دقت بهتری را نشان می‌دهد. در هر تصویر، خطوط چین‌دار نشان‌دهنده دو محدوده انحراف در $\pm 20\%$ و $\pm 2\%$ هستند که نشان‌دهنده عدم دقت در مقادیر ضریب اصطکاک پیش‌بینی شده هستند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که نتایج پیش‌بینی شده توسط همه روش‌ها غیر از روش REPT در این محدوده قرار می‌گیرند. همچنین ملاحظه می‌شود نقاط ایجاد شده توسط روش Bagging نزدیک‌تر به خط 45° درجه هستند. در نتیجه، این روش پیش‌بینی دقیقی را در بین روش‌های آزمایشی در این مطالعه ارائه می‌دهد و پس از آن روش M5 Rules در رتبه دوم قرار دارد. ضعیف‌ترین عملکرد

ارزیابی مورد استفاده در این مطالعه شامل R، MAE و RMSE است. این معیارها برای مدلی ارائه شده‌اند که با استفاده از روش‌های مختلف آموزش دیده است و در نتیجه ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد پیش‌بینی را تسهیل می‌کند. نتایج روش‌های بررسی شده بیانگر این است که هر سه روش دقت بسیار بالا و نرخ خطای بسیار پایینی را نشان می‌دهند. از مقایسه نتایج مدل‌های مختلف ملاحظه می‌شود که مدل Bagging با مقادیر ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطای به ترتیب ۰/۹۹۹۵، ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۲ بهترین عملکرد را برای داده‌های آموزش از خود نشان می‌دهد. در مرحله آزمایش نیز این روش با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۹۹۷۸، میانگین خطای مطلق ۰/۰۰۰۴ و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۰۵ پیش‌بینی بسیار دقیقی را برای ضریب اصطکاک ارائه نموده است. لذا روش می‌تواند به عنوان یک روش مطمئن جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک در کاربردهای صنعتی مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با آرایش متناوب استفاده شود و جایگزین روش‌های آزمایشگاهی و عددی شود. همچنین روش‌های M5 Rules، M5P و REPT به ترتیب در رتبه‌های دوم، سوم و چهارم قرار دارند. عملکرد ضعیف‌تر الگوریتم REPT نسبت به سایر روش‌ها را می‌توان به ماهیت مدل‌سازی آن نسبت داد که بر پایه یک درخت تصمیم تکی با هرس خطامحور استوار است. این روش به دلیل ساختار قطعه‌ای و نبود قابلیت برازش روابط خطی یا غیرخطی درون گره‌های درخت، توانایی محدودی در تقریب رفتار پیوسته و شدیداً غیرخطی ضریب اصطکاک در مبدل‌های حرارتی دارد. علاوه بر این، REPT به دلیل وابستگی بالا به نحوه تقسیم‌بندی داده‌ها و حساسیت نسبت به نویزهای موجود در داده‌های تجربی ترموهیدرولیکی، معمولاً واریانس بالاتری از خود نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار پراکندگی داده‌های آموزش و آزمایش روش‌های مختلف.

شکل ۵ نتایج پیش‌بینی ضریب اصطکاک را برای مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی نشان می‌دهد. معیارهای

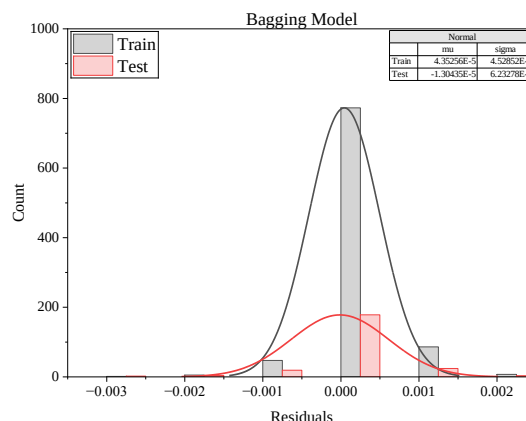
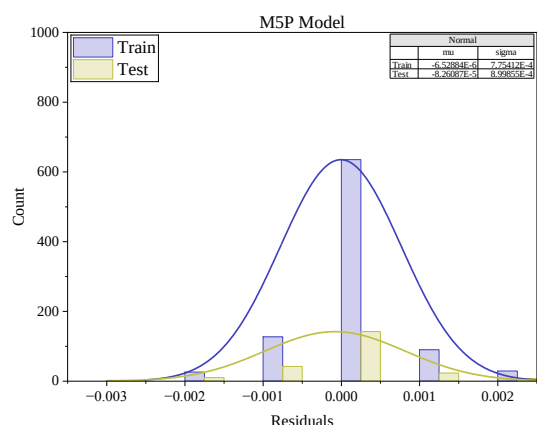


شکل ۵- ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف.

شکل ۶- درصد انحراف نسبی مطلق پیش‌بینی روش‌های مختلف.

شکل ۷ مقادیر مانده‌های حاصل از پیش‌بینی‌های روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار مانده پیش‌بینی ضریب اصطکاک برای داده‌های آموزشی و آزمایشی هنگام استفاده از هر چهار روش به ویژه روش Bagging بسیار کم و نزدیک به صفر است که نشان می‌دهد مدل تعلیم داده شده روی داده‌های آموزشی با استفاده از این روش‌ها دقت بسیار بالایی دارد. علاوه بر این، درصد انحراف نسبی مطلق پیش‌بینی نتایج روش REPT نشان می‌دهد که این روش نیز توانسته است عملکرد قابل قبولی را ارائه دهد اما دقت پیش‌بینی آن از سه روش دیگر کمتر است.

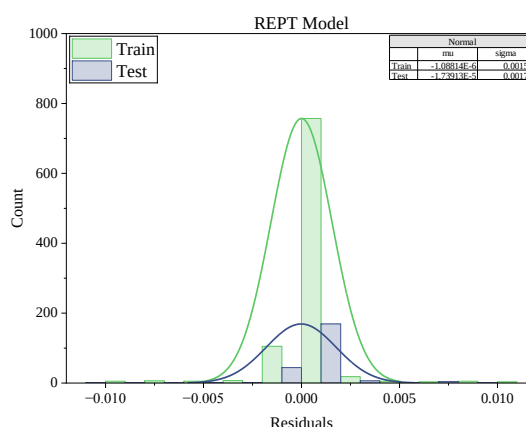
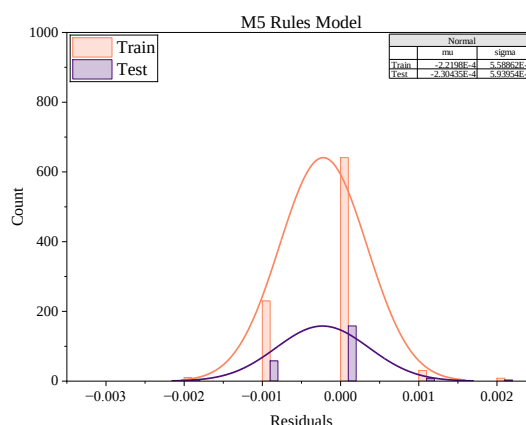
شکل ۶ نموداری را نشان می‌دهد که درصد انحراف نسبی مطلق روش‌های مختلف مورد استفاده روی داده‌های آموزش و آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که روش Bagging فوق‌العاده دقیق است و هم برای داده‌های آموزش و هم برای داده‌های آزمایش از سایر روش‌ها خطای به مراتب کمتری دارد. همچنین مشاهده می‌شود که این روش هیچگونه پیش‌بینی پرت ندارد و بسیاری از پیش‌بینی‌های انجام شده بسیار نزدیک به مقادیر واقعی است. از بررسی سایر مدل‌ها ملاحظه می‌شود که روش M5 Rules درصد انحراف نسبی مطلق کمتری در مقایسه با روش M5P ارائه می‌دهد که بر پایداری و قابلیت اطمینان برتر آن تأکید دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که روش REPT بیشترین میزان درصد انحراف نسبی مطلق را دارد و تعداد پیش‌بینی‌های پرت آن از سایر روش‌ها بیشتر است.

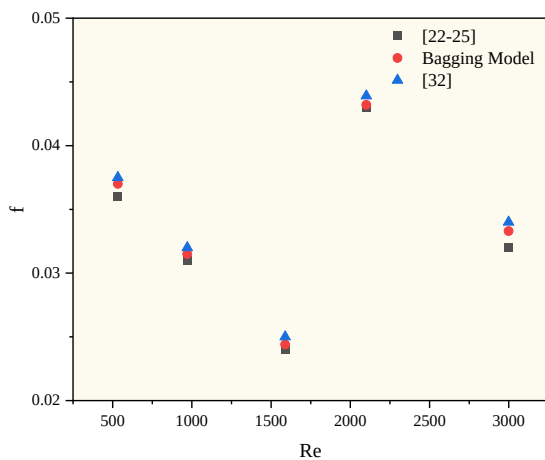


شکل ۷- مقدار باقیمانده‌های حاصل از پیش‌بینی روش‌های مختلف.

۴-۳- معرفی مدل یادگیری ماشین برتر

از بررسی‌هایی که در بخش‌های قبلی در خصوص ارزیابی روش‌های یادگیری ماشین M5P، Bagging، M5 Rules و REPT با معیارهای مختلف جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک صورت پذیرفت، ملاحظه شد که روش Bagging بالاترین میزان دقت و کمترین مقدار خطا را دارد و لذا این روش به عنوان روش برتر جهت پیش‌بینی دقیق ضریب اصطکاک در کاربردهای صنعتی مبدل حرارتی لوله پره‌دار با آرایش متناوب پیشنهاد می‌گردد. در شکل ۸ پایداری و دقت روش Bagging در رژیم‌های مختلف جریان و به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز با معیار درصد انحراف نسبی مطلق مورد بررسی قرار گرفته است. ملاحظه می‌شود که نه تنها در تمام گستره اعداد رینولدز مقدار درصد انحراف نسبی مطلق این روش بسیار کم و نزدیک به صفر است بلکه در هیچ رژیم جریانی پیش‌بینی دور از واقعیت ارائه نداده است. رژیم جریان گذرا به دلیل تغییرات سریع ساختار جریان و رفتار غیرخطی وابسته به عدد رینولدز، یکی از چالش‌برانگیزترین نواحی برای مدل‌سازی محسوب می‌شود. با این حال، الگوریتم Bagging با استفاده از نمونه‌گیری مجدد با جایگذاری و تجمیع خروجی چندین مدل پایه، موجب کاهش واریانس مدل، افزایش قابلیت تعمیم و بهبود دقت پیش‌بینی می‌شود [۳۳]. علاوه بر این، در مطالعه قبلی نویسنده، همین الگوریتم برای پیش‌بینی شاخص ناسلت در مبدل حرارتی صفحه‌ای با موفقیت به کار گرفته شد و





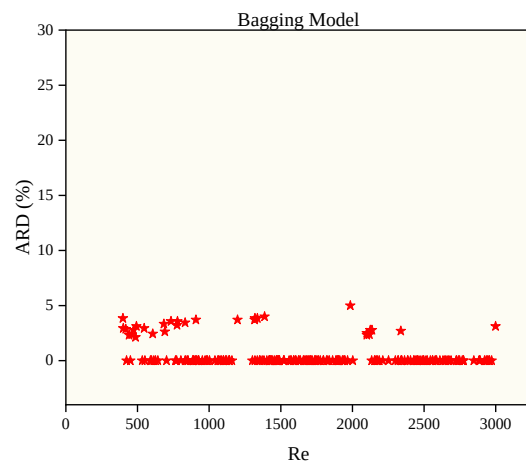
شکل ۹- اعتبارسنجی روش Bagging.

۵- جمع‌بندی نتایج

در این پژوهش ضریب اصطکاک سمت هوا در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با آرایش متناوب با استفاده از روش‌های مختلف یادگیری ماشین تخمین زده شد. روش‌های یادگیری ماشین Bagging، M5P، REPT و M5 Rules با استفاده از یک مجموعه داده مشتمل بر ۱۱۴۹ مشاهده آموزش داده شدند. ضریب اصطکاک به عنوان پارامتر خروجی و گام طولی لوله، گام عرضی لوله، گام پره و عدد رینولدز به عنوان متغیرهای موثر بر ضریب اصطکاک انتخاب شدند. نتایج مهم تحقیق به شرح زیر است:

- از بررسی تاثیر ویژگی‌های مختلف بر متغیر هدف ملاحظه شد که در هر سه رژیم جریان آرام، گذرا و متلاطم عدد رینولدز بیشترین تاثیر را بر ضریب اصطکاک دارد. دومین پارامتر تاثیرگذار در رژیم‌های مختلف جریان متفاوت بود. در رژیم جریان آرام گام پره و در رژیم جریان گذرا گام عرضی لوله موثرترین متغیرها بودند در حالی که در رژیم جریان متلاطم تقریباً هر سه پارامتر گام طولی لوله، گام عرضی لوله و گام پره میزان اثرگذاری یکسانی بر ضریب اصطکاک داشتند.
- برای داده‌های آموزش، مدل Bagging با ضریب همبستگی ۰/۹۹۸۳ بهترین عملکرد را از خود ارائه داد. روش‌های M5 Rules، M5P و REPT با مقادیر

توانست روابط غیرخطی بین عدد رینولدز و انتقال حرارت را با دقت بالایی مدل‌سازی کند [۳۴]. بنابراین، با توجه به ماهیت الگوریتم و شواهد موجود، انتظار می‌رود مدل پیشنهادی در همه رژیم‌های جریان به ویژه رژیم جریان گذرا نیز از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار باشد که این موضوع با مقادیر بالای ضریب همبستگی و پایین بودن شاخص‌های خطا در نتایج پژوهش حاضر نیز تأیید می‌شود.



شکل ۸- بررسی پایداری ساختاری روش Bagging در رژیم‌های مختلف جریان.

۴-۴- اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

در شکل ۹ نتایج حاصل از پیش‌بینی ضریب اصطکاک با استفاده از روش Bagging به عنوان مدل پیشنهادی این تحقیق با نتایج روش‌های عددی [۲۵-۲۲] و آزمایشگاهی [۳۲] مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که در رژیم‌های مختلف جریان نتایج پیش‌بینی بسیار نزدیک به نتایج عددی است. به عبارتی دیگر نتایج نشان می‌دهد که این روش به خوبی می‌تواند روند واقعی تغییرات ضریب اصطکاک را بصورت دقیق پیش‌بینی نماید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش Bagging یک روش دقیق و توانمند جهت جایگزین شدن با روش‌های عددی سنگین و طولانی است. همچنین از آنجایی که در کاربردهای صنعتی محاسبه آزمایشگاهی ضریب اصطکاک در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار متناوب بسیار گرانقیمت است، مدل پیشنهادی پژوهش حاضر ابزاری کاربردی، مفید و اثرگذار در صنعت جهت صرفه‌جویی اقتصادی و طراحی بهینه خواهد بود.

گام پره به عنوان مهمترین عوامل موثر بر ضریب اصطکاک، قادر است با دقت بسیار بالا پیش‌بینی نماید، با این حال عوامل دیگری نظیر تعداد ردیف لوله، قطر لوله و نوع آرایش هندسی که در این تحقیق ثابت فرض شده‌اند، می‌توانند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرند.

۶- مراجع

- [1] Chahartaghi, M., & Alavi, S. E (2019) Minimization of entransy dissipations of a finned shell and tube heat exchanger. *J. Comput. Appl. Mech*, 50(2), 246-255.
- [2] Alavi, S. E., & Moory Shirbani, M (2024) Optimization and Comprehensive Investigation of the Effect of Geometrical Parameters on Entransy, Exergy and Entropy in Finned Tube Heat Exchangers. *Iran. J. Chem. Chem. Eng*, 43(7), 2800-2814.
- [3] Alavi, S. E., & Shirbani, M. M (2024) Thermo-hydraulic analysis and optimization of finned tube heat exchangers. *Multiscale Multidiscip. Model. Exp. Des*, 7(3), 2031-2043.
- [4] Alavi, S. E., & Moory, S. M (2025) Investigation of the Effects of the Size, Shape, and Temperature of Al₂O₃ Nanoparticles on the Thermodynamic Analysis of Spiral Plate Heat Exchangers. *Iran. J. Chem. Chem. Eng*, 44(5):1398-1409.
- [5] Alavi, S. E., & Moory Shirbani, M (2024) Multi-objective optimization of double-pipe heat exchangers from the point of view of efficiency and economics. *Iran. J. Chem. Chem. Eng*, 43(7), 2786-2799.
- [6] Mehregan, M., & Alavi, S. E (2021) Thermal and economic optimization of an intercooler of three-stage compressor. *Energy Equip. Syst*, 9(3), 261-278.
- [7] Liu, X., Wang, M., Liu, H., Chen, W., & Qian, S (2021) Numerical analysis on heat transfer enhancement of wavy fin-tube heat exchangers for air-conditioning applications. *Appl. Therm. Eng*, 199, 117597.
- [8] Liang, X., Min, M., Bian, K., & Cheng, J (2025) Study on the enhanced heat transfer and exergy performance of the finned tube heat exchanger with vortex generator. *Int. J. Therm. Sci*, 210, 109639.
- [9] Farajollahi, A., Vaferi, K., & Baharvand, M (2024) Analyzing tube arrangements of a finned-tube heat exchanger to optimize overall efficiency using artificial neural network and response surface methodology. *Case Stud. Therm. Eng*, 63, 105302.
- [10] Hu, D., Zhang, Q., Song, K., Gao, C., Zhang, K., Su, M., & Wang, L (2023) Performance

ضریب همبستگی ۰/۹۹۷۹، ۰/۹۹۵۴ و ۰/۹۷۷۳ به ترتیب در رتبه‌های دوم، سوم و چهارم قرار گرفتند. برای داده‌های آزمایش، روش Bagging با ضریب همبستگی ۰/۹۹۷۸ نشان داد که توانمندی بسیار بالایی در پیش‌بینی ضریب اصطکاک دارد. روش‌های M5 Rules، M5P و REPT نیز با مقادیر ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۹۹۶۷، ۰/۹۹۳۹ و ۰/۹۷۱۴ عملکرد قابل قبولی را نشان دادند.

میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطای روش Bagging برای داده‌های آموزش به ترتیب ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۴ و برای داده‌های آزمایش به ترتیب به ترتیب ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۰۶ حاصل شد که بیانگر دقت بالای این روش جهت پیش‌بینی دقیق ضریب اصطکاک است. روش M5 Rules با میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطای به ترتیب ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۰۶ برای داده‌های آموزش و ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۰۰۷ برای داده‌های آزمایش عملکردی عالی از خود نشان داد در حالی که روش REPT با میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین بالاتر عملکرد ضعیفتری را از خود به نمایش گذاشت.

روش Bagging به عنوان روش برتر در پژوهش حاضر جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک در مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار با آرایش متناوب پیشنهاد گردید. مقایسه نتایج آن با نتایج مراجع معتبر و نیز ارزیابی عملکرد ساختاری این روش نشان داد که در رژیم‌های مختلف جریان بسیار کارآمد، پایدار و دقیق است.

تعیین دقیق ضریب اصطکاک با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی گرانش‌میت، طولانی و سنگین است. لذا روش داده محور ارائه شده در پژوهش حاضر که بطور دقیق و سریع ضریب اصطکاک را در رژیم‌های مختلف جریان پیش‌بینی می‌نماید در کاربردهای صنعتی ابزاری توانمند و مفید بنظر می‌رسد.

اگرچه مدل ارائه شده در این پژوهش با در نظر گرفتن عدد رینولدز، گام طولی و عرضی لوله و نیز

- [23] Bhuiyan, A. A., Amin, M. R., Karim, R., & Islam, A. S (2014) Plate fin and tube heat exchanger modeling: Effects of performance parameters for turbulent flow regime. *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, 9, 1768-1781.
- [24] Bhuiyan, A. A., Amin, M. R., & Islam, A. S (2013) Three-dimensional performance analysis of plain fin tube heat exchangers in transitional regime. *Appl. Therm. Eng.*, 50(1), 445-454.
- [25] Bhuiyan, A. A., Islam, A. S., & Amin, M. R (2011) Numerical prediction of laminar characteristics of fluid flow and heat transfer in finned-tube heat exchangers. *Innov. Syst. Des. Eng.*, 2(6), 1-12.
- [26] Jamei, M., Karbasi, M., Mosharaf-Dehkordi, M., Olumegbon, I. A., Abualigah, L., Said, Z., & Asadi, A (2022) Estimating the density of hybrid nanofluids for thermal energy application: Application of non-parametric and evolutionary polynomial regression data-intelligent techniques. *Measurement*, 189, 110524.
- [27] Wu, Z., Li, N., Peng, J., Cui, H., Liu, P., Li, H., & Li, X (2018) Using an ensemble machine learning methodology-Bagging to predict occupants' thermal comfort in buildings. *Energy Build.*, 173, 117-127.
- [28] Thai, T. H., Omari, R. A., Barkusky, D., & Bellingrath-Kimura, S. D (2020) Statistical analysis versus the M5P machine learning algorithm to analyze the yield of winter wheat in a long-term fertilizer experiment. *Agronomy*, 10(11), 1779.
- [29] Paudel, N., & Bhatta, J (2022) Mushroom classification using random forest and REP tree classifiers. *Nepal J. Math. Sci.*, 3(1), 111-116.
- [30] Duggal, H., & Singh, P (2012) Comparative study of the performance of M5-Rules algorithm with different algorithms. *J. Softw. Eng. Appl.*, 5(4), 270-276.
- [31] Alavi, S. E., Chachi, J., & Makvandi, H (2026) Data-Driven Modeling of the Nusselt Index in Plate Heat Exchangers Using Ensemble Machine Learning. *Results Eng.*, 110497.
- [32] Wang CC, Chi KY (2000) Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part I: new experimental data. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1;43(15):2681-91.
- [33] Breiman, L (1996) Bagging predictors. *Mach. Learn.*, 24, 123-140.
- [34] Alavi SE, Mehregan M (2026) Application of Artificial Intelligence Approaches for Predicting Nusselt Index in Plate Heat Exchangers. *Appl. Eng. Sc.*, 9:100338.
- optimization of a wavy finned-tube heat exchanger with staggered curved vortex generators. *Int. J. Therm. Sci.*, 183, 107830.
- [11] Kim, M., Han, C., Baek, C., & Kim, Y (2023) Air-side heat transfer enhancement in fin-tube heat exchangers using forced vibrations under various conditions. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 144, 106798.
- [12] Wongwises, S., & Chokeman, Y (2005) Effect of fin pitch and number of tube rows on the air side performance of herringbone wavy fin and tube heat exchangers. *Energy Convers. Manag.*, 46(13-14), 2216-2231.
- [13] Mon, M. S., & Gross, U (2004) Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47(8-9), 1953-1964.
- [14] Rahimi, M., Ranjbar, A. A., Ganji, D. D., Sedighi, K., & Hosseini, M. J (2014) Experimental Investigation of Phase Change inside a Finned-Tube Heat Exchanger. *J. Eng.*, 2014(1), 641954.
- [15] Chen, L., Li, Z., & Guo, Z. Y (2009) Experimental investigation of plastic finned-tube heat exchangers, with emphasis on material thermal conductivity. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 33(5), 922-928.
- [16] Wen, M. Y., & Ho, C. Y (2009) Heat-transfer enhancement in fin-and-tube heat exchanger with improved fin design. *Appl. Therm. Eng.*, 29(5-6), 1050-1057.
- [17] Deepakkumar, R., & Jayavel, S (2017) Air side performance of finned-tube heat exchanger with combination of circular and elliptical tubes. *Appl. Therm. Eng.*, 119, 360-372.
- [18] Lemouedda, A., Schmid, A., Franz, E., Breuer, M., & Delgado, A (2011) Numerical investigations for the optimization of serrated finned-tube heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.*, 31(8-9), 1393-1401.
- [19] Nemati, H., Moghimi, M. A., Sapin, P., & Markides, C. N (2020) Shape optimisation of air-cooled finned-tube heat exchangers. *Int. J. Therm. Sci.*, 150, 106233.
- [20] Min, J., & Webb, R. L (2004) Numerical analyses of effects of tube shape on performance of a finned tube heat exchanger. *J. Enhanc. Heat Transf.*, 11(1).
- [21] Wang, H., Liu, Y. W., Yang, P., Wu, R. J., & He, Y. L (2016) Parametric study and optimization of H-type finned tube heat exchangers using Taguchi method. *Appl. Therm. Eng.*, 103, 128-138.
- [22] Bhuiyan, A. A., & Islam, A. S (2016) Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 101, 38-59.