



# Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Models to Predict the Energy Separation Procedure in Vortex Tube Using Desirability Function

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Mohamad Sadeghi Azad M.B.\*<sup>1</sup>

PhD,

Behzadipour S.<sup>1</sup> MSc

### How to cite this article

Mohamad Sadeghi Azad M.B, Behzadipour S. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Models to Predict the Energy Separation Procedure in Vortex Tube Using Desirability Function. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(8):2139-2157.

## ABSTRACT

The vortex tube is one of the widely used cooling systems in the industry. Investigating the effect of all input variables on the outlet cold temperature difference in laboratory state is time-consuming and costly. To this purpose, in the current study, attempts were made to model and predict the effect of all input variables on the outlet cold temperature difference of air and inlet air using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) method. The ANFIS method was designed with three structures of fuzzy inference systems called subtractive clustering (SC) algorithm, fuzzy c-means (FCM), and grid partition (GP) with four types of input membership functions including trimf, gaussmf, gbellmf, and pimf. For model training and testing, 326 laboratory data were used. The developed models were compared using statistical parameters of correlation coefficient, mean absolute relative deviation, standard deviation, and root mean square error (RMSD) together with general desirability function. The results showed that GP algorithm with input pimf membership function with the greatest value of correlation coefficient (0.9975) and lowest value of RMSD for test data (0.4199) and general desirability function value of 0.71 is the best method to predict outlet cold temperature difference. Using the above-mentioned method, the most optimum state of vortex tube performance for industrial applications was found to be the use of 3 or 6 nozzles, at the pressure range of 0.55 to 0.6MPa and the nozzle angle of 20 to 30 degrees, and for laboratory applications was obtained to be the use of 6 nozzles, at the pressure range of 0.55 to 0.6MPa, and the nozzle angle of 25 to 35 degrees.

**Keywords** ANFIS; Artificial Neural Network; Vortex Tube

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Urmia University of Technology, Band Street, Urmia, Iran.  
Postal Code: 9318757166.  
Phone: +98 (44) 33728364  
Fax: +98 (44) 31980277  
m.sadeghiazad@azaruniv.ac.ir

### Article History

Received: February 28, 2019

Accepted: June 08, 2020

ePublished: August 15, 2020

## CITATION LINKS

[1] Experimental study of the impacts of cold ... [2] Experimental investigation of the flow characteristics ... [3] Investigation of the thermal separation in a counter ... [4] Experimental study of vortex tube energy separation ... [5] Experimental investigation of energy ... [6] Prediction of trapping efficiency of vortex ... [7] An experimental study of nozzle number ... [8] Modeling the cooling performance of vortex tube ... [9] Experimental study of the energy separation ... [10] The influence of working gas characteristics ... [11] Experimental modeling of a curved Ranque-Hilsch ... [12] Effect of cold orifice diameter and geometry of hot ... [13] Three-dimensional and experimental investigation ... [14] Introducing annular vortex tube and experimental ... [15] Application of anfis adaptive system to estimate ... [16] Evaluation of influential factors on the dynamic ... [17] Experimental and 3D CFD investigation ... [18] Induction motor control using ANFIS ... [19] Applications of intelligent methods in online diagnosis ... [20] Simulation of passive heating solar wall and ... [21] Controlling state of quantum system using fuzzy ... [22] Experimental modeling of vortex tube ... [23] Investigation on the vortex thermal separation ... [24] Modeling of the effects of length to diameter ratio ... [25] Comparison of two soft computing approaches ... [26] A new model for prediction of binary ... [27] Accurate prediction of solubility of hydrogen in ... [28] Implementing radial basis function neural ... [29] Prediction of water removal rate in a natural gas ... [30] The use of expansion of gases in a centrifugal ... [31] An investigation of energy separation in a vortex ... [32] Fuzzy ... [33] Assessing the dynamic viscosity of Na-K-Ca-Cl-H<sub>2</sub>O ... [34] Fuzzy identification of systems and its ... [35] Semi-polynomial Takagi-Sugeno-Kang type ... [36] ANFIS models for prediction of biodiesel fuels ...

## مدل‌های سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای پیش‌بینی روند جدایش انرژی در لوله‌های گردابه‌ای با استفاده از تابع مطلوبیت

محمدباقر محمدصادقی آزاد\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

سجاد بهزادی پور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

لوله گردابه‌ای یکی از سیستم‌های سرمایه‌ی بسیار پرکاربرد در صنعت است. بررسی تأثیر کلیه متغیرهای ورودی بر اختلاف دمای خروجی سرد در حالت آزمایشگاهی، زمان‌بر و پرهزینه است. به همین منظور در کار حاضر سعی شده تا با استفاده از روش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی تأثیر کلیه متغیرهای ورودی بر اختلاف دمای هوای خروجی سرد و هوای ورودی، مدل‌سازی و پیش‌بینی شود. روش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، با سه ساختار سیستم استنتاج فازی به نام‌های الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی، خوشه‌بندی اختیاری و منقطع‌سازی شبکه‌ای با چهار نوع تابع عضویت ورودی مثلثی، گوسی، زنگوله‌ای و شبه‌ی طراحی شد. برای آموزش و آزمون مدل، از ۳۲۶ داده آزمایشگاهی استفاده شد. مقایسه مدل‌های توسعه‌یافته با استفاده از پارامترهای آماری ضریب همبستگی، میانگین انحراف نسبی مطلق، انحراف استاندارد و خطای مربع میانگین ریشه همراه با تابع مطلوبیت کلی انجام شد. نتایج نشان داد که الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت ورودی نوع شبه‌ی با دارا بودن بیشترین مقدار ضریب همبستگی و کمترین مقدار خطای مربع میانگین ریشه برای داده‌های آزمون با مقادیر ۹۹۷۵٪ و ۴۱۹۹٪ و مقدار تابع مطلوبیت کلی ۰/۷۱ بهترین روش برای پیش‌بینی اختلاف دمای خروجی سرد است. با استفاده از روش فوق، بهینه‌ترین حالت عملکرد لوله گردابه‌ای جهت کاربردهای صنعتی استفاده از ۳ یا ۶ عدد نازل، محدوده فشار ۵۵٪ تا ۶٪ مگاپاسکال و زاویه نازل ۲۰ تا ۳۰ درجه و جهت کاربردهای آزمایشگاهی تعداد ۶ نازل، محدوده فشار ۵۵٪ تا ۶٪ مگاپاسکال و زاویه نازل ۲۵ تا ۳۵ درجه به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** ANFIS، شبکه‌های عصبی مصنوعی، لوله گردابه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹

\*نویسنده مسئول: m.sadeghiazad@azaruniv.ac.ir

### مقدمه

سرمايش به روش لوله‌های گردابه‌ای به صورت کاملاً اتفاقی در سال ۱۹۲۸ کشف شد. رانک و فرانسوی در حالت تحقیق بر روی پمپ‌های گردابه‌ای به طور اتفاقی متوجه شدند، زمانی که هوای گرم از یک طرف لوله خارج می‌شود، در طرف دیگر لوله خروج هوای سرد مشاهده می‌شود. بعد از این کشف رانکو سعی خود را بر تحقیقات بیشتر گذاشت تا بتواند یک دستگاه براساس عملکرد فوق تولید کند ولی متأسفانه در این امر چندان موفق نشد. در سال ۱۹۴۵ رودلف هیلسچ آلمانی با ارایه مقاله‌ای توجه صنایع

جهت به کارگیری از این پدیده در صنعت را به خود جلب کرد. لوله‌های گردابه‌ای، ابزاری مکانیکی با ساختاری نسبتاً ساده هستند. در این سامانه وارد شدن هوای متراکم از طریق نازل‌ها به صورت مماس، باعث ایجاد برخوردهای شدید بین مولکول‌ها می‌شود. با جهت دادن هوا به سمت شیر کنترل، این امر باعث افزایش درصدی از دمای هوای ورودی و کاهش دمای هوای باقی مانده می‌شود. هوای گرم از قسمت شیر کنترل‌کننده خارج می‌شود، اما در ادامه هوای سرد شده از میان توده هوای گرم برگشته و از انتهای لوله خارج می‌شود. در زمان حرکت هوا از ژنراتور به سمت شیر کنترل‌کننده درصدی از هوا ورودی که انرژی خود را از دست داده به دلیل کاهش لرزش، سرعت چرخشی آن نیز کاهش می‌یابد، این امر باعث حرکت این هوا از میانه لوله به طرف خروجی لوله در سمت دیگر می‌شود. لی و همکاران<sup>[1]</sup> به منظور به دست آوردن پارامترهای داخلی یک لوله گردابه‌ای، آن را در مقیاس بزرگ و نمونه آزمایشگاهی ساختند. یک حسگر پنج کاناله و ترموکوپل برای به دست آوردن سه پارامتر سرعت، فشار استاتیک و دمای استاتیک و توزیع دمای کل لوله گردابه‌ای استفاده شد. چهار دبی جرمی سرد (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) انتخاب شد و تأثیر پارامترهای داخلی لوله گردابه‌ای مورد بحث قرار گرفت. برخلاف دیدگاه‌های قبلی، سرعت مماسی به عنوان فرم گرداب پایدار مورد بررسی قرار گرفت. با این بررسی یک مرز جریان معکوس مشخص شد که مکان آن در شرایط مختلف آزمایش و موقعیت‌های محوری تغییر پیدا کرد. علاوه بر این، مشخص شد که کمترین دمای استاتیک در نزدیکی نازل خروجی وجود دارد و یک قانون توزیع اختلاف دمای استاتیک جدید به صورت تجربی ارایه شد. زو و همکاران<sup>[2]</sup> نشان دادند که جداسازی انرژی در لوله گردابه‌ای نتیجه‌ای از عوامل مختلف است و توضیحات آن قابل بحث است. به عنوان یک پدیده مکانیکی سیال، درک مکانیزم پیچیده جریان مارپیچ در یک لوله گرداب یک پایه اساسی است. مقیاس کوچک یک لوله گرداب صنعتی و شرایط پیچیده جریان دو چالش اصلی در به دست آوردن خواص جریان داخلی است. در این مقاله نتایج حاصل از یک بررسی تجربی در مورد رفتار جریان در یک سیستم استوانه‌ای محصور با تنظیمات مختلف متناسب با میدان جریان واقعی در یک لوله گردابه‌ای در شرایط مختلف گزارش شد. از دستگاه‌های شفاف‌ساز برای فعال‌سازی تجسم جریان و اندازه‌گیری سرعت تصویر ذرات استفاده شد. نتایج حاصل از تجسم جریان و آزمایشات نشان داد که فقط یک هسته گردابه‌ای غالب در محدوده خاصی از مقاومت چرخشی قابل توجه است. همچنین توافق خوبی بین خصوصیات جریان مشاهده شده و نتایج مقالات قبلی منتشر شده مشاهده شد. بارگیر و همکاران<sup>[3]</sup>، در یک مطالعه عددی تأثیر شکل هندسی باله‌های نصب شده بر روی لوله سرد را در حالت پایدار بررسی کردند. در این مطالعه شش هندسه مختلف برای باله‌ها شامل مثلث، مربع، مستطیل، دایره، متوازی‌الاضلاع و دوزنقه انتخاب شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی

۶۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد زمانی که از تعداد سه نازل استفاده شود، اثرات بیشتری بر جدایش انرژی از جریان مشاهده می‌شود. پوراریا و همکاران<sup>[8]</sup> با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، اثرات چهارگانه پارامترهای نسبت طول به قطر، نسبت قطر خروجی سرد به قطر لوله، فشار ورودی و کسر جرمی سرد را بر عملکرد خنک‌کنندگی جریان لوله گردابه‌ای بررسی کردند. آنها آموزش و مدل‌سازی شبکه عصبی در نرم‌افزار متلب را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام دادند و حالت بهینه عملکرد را با استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌دست آوردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک قادر به پیش‌بینی عملکرد خنک‌کنندگی لوله گردابه‌ای در یک محدوده وسیع و با دقت رضایت‌بخش است. لی و همکاران<sup>[9]</sup> تاثیر فشار ورودی و کسر جرمی سرد را بر عملکرد لوله توربوشا بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که دمای استاتیک در مرکز لوله گرداب بالاتر از قسمت جانبی محیطی است. علاوه بر این، نقطه رکود در داخل لوله گرداب با کاهش فشار ورودی یا افزایش کسر جرمی سرد به سمت انتهای سرد حرکت می‌کند. هان و همکاران<sup>[10]</sup> اثر گازهای R161, R22, R32, R744, R728 و R134 را به‌صورت تجربی بر روی عملکرد لوله گردابه‌ای بررسی کردند. در این کار به‌وضوح مشخص شد که دمای روش جدایی و فشار خروجی با افزایش فشار برای دو گاز R728 و R744 بهبود می‌یابد. وی‌پور و نیازی<sup>[11]</sup> اثر لوله منحنی بر عملکرد لوله گردابه‌ای را بررسی کردند. آنها متوجه شدند که انحنای لوله اصلی بسته به فشار ورودی و کسر توده سرد، اثرات متفاوتی بر روی عملکرد لوله گردابه‌ای دارد. همچنین نشان داده شد که حداکثر اختلاف دمای خروجی به‌وسیله یک راستا ایجاد می‌شود. دیوید و پیسا<sup>[12]</sup> تاثیرات دو بهینه‌سازی در سرمایش یخچال را نشان داد. اولین بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در هر کسری از گاز سرد، بهترین بار یخچال برای افزایش درجه حرارت به نصف، حداکثر بارگیری است. دومین بهینه‌سازی نشان می‌دهد که تقسیم مساوی جریان گردابه‌ای بین خروجی سرد و گرم حالت بهینه است. رفیعی و صادقی‌زاد<sup>[13]</sup> نشان دادند که عملکرد لوله گردابه‌ای با تغییر طول مخروطی شیر اختلاط بهبود می‌یابد. این مطالعه در رنج تغییرات صفر تا ۱۰ میلی‌متر بررسی شد و طول بهینه ۶ میلی‌متر برای طول مخروطی شیر اختلاط به‌دست آمد. در پایان، کار تجربی با نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شد. سعدی و گردمحمود<sup>[14]</sup> میزان جدایش دمایی لوله گردابه‌ای دوجداره را با لوله معمولی به‌صورت تجربی مقایسه کردند. آزمایش برای فشار ثابت ۴ بار، با گاز طبیعی انجام شد. مشاهده شد عبور مجدد جریان از روی لوله گرم در لوله گردابه‌ای دوجداره، بازده سرمایشی لوله گردابه‌ای معمولی را ۲۴٪ در نقطه بیشینه اختلاف دمای سرد بهبود بخشیده است. حدیدیان<sup>[15]</sup> شاخص فشردگی خاک در منطقه خوزستان را با استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی مورد

قبل مقایسه و همخوانی مناسبی داشت. در این مقاله تاثیر اشکال مختلف باله بر پارامترهای عملکرد بحرانی اختلاف دمای خروجی سرد، اختلاف دمای گرم، راندمان ایزنتروپیک و ضریب عملکرد (COP) به‌صورت عددی بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که باله‌های متوازی‌الاضلاع و مستطیل‌شکل به‌ترتیب بیشترین و کمترین اختلاف دمای خروجی سرد، راندمان ایزنتروپیک و COP را دارند. همچنین مشاهده شد که بیشترین میزان COP و کارایی در ضریب افت فشار ۰/۶۵ اتفاق می‌افتد که پارامترهای عملکرد بهینه باله متوازی‌الاضلاع برای اختلاف دمای خروجی سرد، اختلاف دمای گرم، راندمان ایزنتروپیک و COP به‌ترتیب ۳۵، ۳۵/۳، ۰/۲۷۹ و ۳۳ است. در حالی که این پارامترها برای باله مستطیل‌شکل به‌ترتیب ۳۰، ۳۰، ۰/۲۵۵ و ۲۳/۹ است. همدان و همکاران<sup>[4]</sup> طی یک بررسی تجربی، نگاه دقیق‌تری نسبت به عملکرد تفکیک انرژی در لوله گردابه‌ای تحت تاثیر پارامترهای مختلف هندسی از جمله طول لوله، قطر و زاویه داخلی ارایه دادند. همچنین تاثیر فشار ورودی بر عملکرد لوله گردابه‌ای بررسی شد. داده‌ها نشان داد که عملکرد لوله گردابه‌ای در طول ۶۶ تا ۱۵۸، قطر ۹ تا ۲۶ میلی‌متر و زاویه کمتر از ۴ درجه بهینه است. همچنین داده‌های تجربی نشان داد که هر چقدر فشار ورودی بیشتر باشد، اختلاف دمای خروجی سرد بیشتر است و حداکثر مقدار اختلاف دمای خروجی سرد به‌زای فشار ورودی در جایی رخ می‌دهد که به‌دلیل خفگی نازل ورودی عملکرد لوله گردابه‌ای مختل می‌شود. ایمنسا/ردا<sup>[5]</sup> پدیده جدایی انرژی و مشخصات کارایی خنک‌سازی یک لوله گردابه‌ای نوع رانک-هیلش را با چند ورودی نوع حلزونی به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه بر اثرات تعداد نازل‌های ورودی (۱ تا ۴ عدد)، نسبت بی‌بعد اریفیس بر قطر خروجی سرد (۰/۷ تا ۰/۳) و  $\left(\frac{d}{D}\right)$  و فشار هوای ورودی (۲ تا ۳ بار) تمرکز شده است. از تعداد چهار نازل مماسی برای مقایسه استفاده شده است. نتایج تجربی نشان داد که لوله گردابه‌ای با ورودی نوع حلزونی، کاهش دمای هوای سرد بیشتر و بازده خنک‌کننده بالاتری نسبت به نازل ورودی نوع مماسی در کسر جرمی سرد و فشار یکسان دارد. افزایش در عدد نازل و فشار ورودی منجر به افزایش شدت پیچش و گردابه و در نتیجه جدایش انرژی در لوله گردابه‌ای می‌شود.

تیواری و همکاران<sup>[6]</sup>، با استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی و شبکه عصبی مصنوعی، راندمان دهش لوله گردابه‌ای را محاسبه کردند. آنها از ۱۴۴ داده آزمایشگاهی و سه نوع تابع عضویت برای آموزش مدل استفاده نمودند نتایج نشان داد که مدل‌سازی با تابع عضویت ورودی نوع گاوسی بهترین نتایج را به‌دست می‌دهد و نسبت استخراج مهم‌ترین پارامتر در تعیین راندمان دهش لوله گردابه‌ای است. آتالا و همکاران<sup>[7]</sup> به بررسی تاثیر تعداد نازل‌ها و فشار ورودی سیال بر عملکرد لوله گردابه‌ای پرداختند. تعداد نازل‌ها ۲، ۳ و ۶ و فشار ورودی از ۲۰۰ تا

دمای اتاق با وجود باله‌های مستطیلی تقریباً ۱/۲۴٪ بیشتر از دیوار ترومب ساده است. صدقی‌رستمی و رضایی<sup>[21]</sup> با استفاده از کنترل‌کننده فازی حالت یک سیستم کوانتومی را کنترل کردند. سیستم کوانتومی در نظر گرفته شده، یک سیستم کوانتومی مرتبه سه بوده و مدل تحلیل سیستم نیز مدل دوخطی است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال روش پیشنهادی روی سیستم کوانتومی مرتبه سه نمونه و با وجود نامعینی‌های کران‌دار در سیستم نشان از کاربردی و موثر بودن روش در کنترل سیستم‌های کوانتومی دارد.

### تشریح روش آزمایشگاهی

هوا از طریق نازل ورودی به‌صورت مماسی وارد لوله گردابه‌ای می‌شود. وارد شدن هوای متراکم از طریق نازل‌ها به‌صورت مماس، باعث ایجاد برخوردهای شدید بین مولکول‌ها می‌شود. با جهت‌دادن هوا به‌سمت شیر کنترل، این امر باعث افزایش دمای بخشی از هوای ورودی و کاهش دمای هوای باقی‌مانده می‌شود. هوای گرم از قسمت شیر کنترل‌کننده خارج می‌شود، اما در ادامه هوای سرد شده از میان توده هوای گرم برگشته و از انتهای لوله خارج می‌شود. در زمان حرکت هوا از محفظه چرخش به‌سمت شیر کنترل درصدی از هوا ورودی که انرژی خود را از دست داده به‌دلیل کاهش انرژی، سرعت چرخشی آن نیز کاهش می‌یابد، این امر باعث حرکت این هوا از میانه لوله به طرف خروجی لوله در سمت دیگر می‌شود. در شکل ۱- الف<sup>[13]</sup> نمونه وسیله آزمایشگاهی و در شکل ۱- ب فرآیند لوله گردابه‌ای نشان داده شده است. شکل ۱- پ شماتیکی از تجهیزات به‌کاررفته در روند آزمایش را نشان می‌دهد. هوای فشرده به‌وسیله کمپرسور هوا تامین می‌شود. نکته قابل توجه در فرآیند به‌کار گرفته شده در لوله گردابه‌ای این است که هوای به‌کار گرفته شده در سیستم باید تا حد امکان خشک باشد. چرا که اگر رطوبت همراه با هوا وارد سیستم شود، در اثر کاهش ناگهانی دما، هوا در خروجی سرد منجمد شده و باعث ممانعت از خروج هوای سرد می‌شود. این امر تاثیر مستقیم بر روی کسر جرمی سرد دارد و با کاهش کسر جرمی سرد، بازده لوله گردابه‌ای کاسته می‌شود. با توجه به توضیحات داده شده به‌کارگیری یک واحد رطوبت‌زدایی در تجهیزات آزمایشگاه امری ضروری است. علاوه بر این، هوای تزریق شده به داخل لوله گردابه‌ای باید هوایی پاکیزه و فاقد آلودگی (در سیستم‌هایی که هدف سرمایش است) باشد. لذا یک واحد فیلترکننده آلاینده‌ها در مسیر تزریق گاز قرار داده می‌شود که آلاینده‌های محیطی شامل گردوغبار و سایر آلودگی‌ها از قبیل دوده و غیره را از سیال عامل که هوا است جدا کند. بدین ترتیب با به‌کارگیری دو واحد ذکر شده هوای تزریقی عبارت است از سیال عاملی که فاقد رطوبت و آلودگی است که می‌توان در شبیه‌سازی‌ها با احتساب یک سری فرضیات آن را به‌صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفت. دبی هوا از طریق تانک هوا و

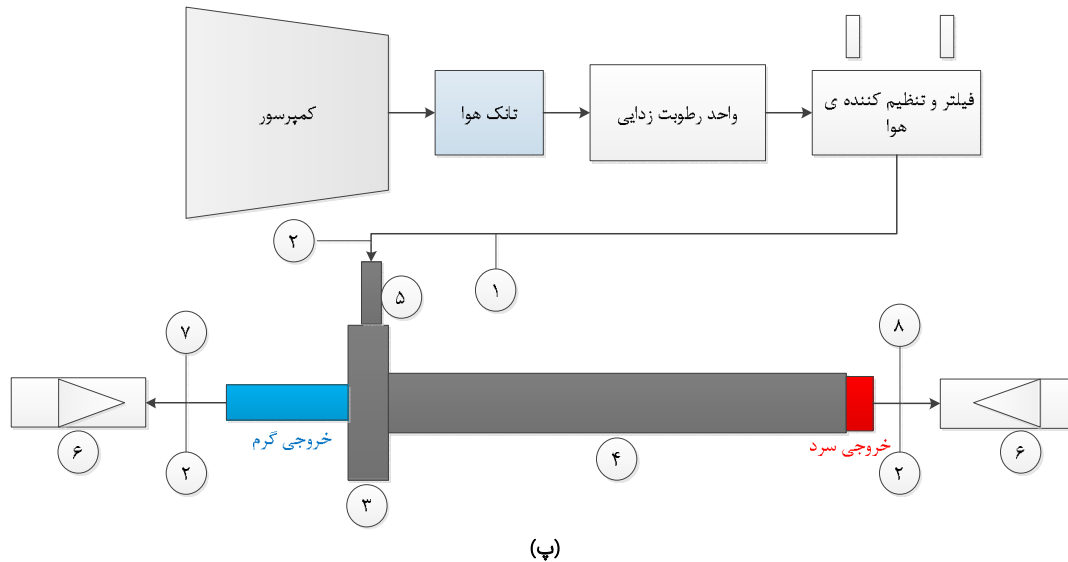
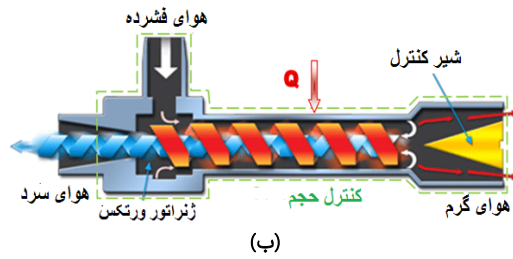
ارزیابی قرار دادند. نتایج کسب شده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی با نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی در ارتباط با داده‌های واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. در بهترین حالت خطای برخی از روابط تجربی در منطقه مورد مطالعه در حدود ۲۰٪ محاسبه شد، در حالی که اکثر روابط تجربی در منطقه مورد مطالعه دارای دقت قابل قبولی نبودند. براساس نتایج به‌دست آمده از مدل عصبی، خطای مربع میانگین ریشه داده‌ها در حدود ۱۵ و خطای داده‌ها در حدود ۱۲٪ به‌دست آمد. کوهساری و همکاران<sup>[16]</sup> با استفاده از سیستم فازی و روش استنتاج سوگنو، تاثیر پارامترهای دخیل در عملیات بهینه‌سازی به روش تراکم دینامیکی بر روی عمق بهبود نسبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از الگوی کوبش ۲۵ ضربه و فاصله کوبش ۶ الی ۷ متر سبب به‌دست آمدن بیشترین عمق بهبود می‌شود. رفیعی و صادقی‌زاد<sup>[17]</sup> بررسی کردند که عملکرد لوله گردابه‌ای با تغییر شکل شیرهای اختلاط می‌تواند تحت تاثیر قرار بگیرد. آزمون‌های تجربی و عددی بر روی عملکرد حرارتی لوله گردابه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار ظرفیت سرمایشی با کاهش فاصله بین نقاط سکون و شیرهای اختلاط به‌دست می‌آید. صالحی و همکاران<sup>[18]</sup> با استفاده از کنترل‌کننده سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی و الگوریتم علف‌های هرز مهاجم، سرعت موتور القایی را جهت به‌کارگیری در سیستم آزمون واحد کنترل سوخت موتور جت کنترل کردند. این مدل جهت طراحی کنترلر فازی-عصبی-تطبیقی استفاده شد و با به‌کارگیری الگوریتم علف‌های هرز مهاجم به‌عنوان یک ابزار قدرتمند کاوش در فضاهای جستجوی وسیع و نامنظم به تنظیم پارامترهای این کنترلر پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی کنترلر طراحی شده، نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترلر فازی-عصبی-تطبیقی طراحی شده با الگوریتم علف‌های هرز مهاجم است. خواجوی و ناصرنیا<sup>[19]</sup> از ساختار هوشمند شبکه عصبی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی جهت تشخیص مقدار سایش ابزار در هنگام فرزکاری با استفاده از تحلیل ارتعاشات استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای ۸۶ مورد اندازه‌گیری نهایی، شبکه‌های سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی و ساختار هوشمند شبکه عصبی به‌ترتیب دارای میانگین ۹۱ و ۸۲٪ موفقیت در تشخیص درست مقدار سایش و شکست ابزار بودند. از آنجایی که شبکه فازی-عصبی در مقایسه با شبکه عصبی در طبقه‌بندی عیوب، نتایج بهتر و قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد، می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب در جهت تشخیص هوشمند سایش ابزار به‌کار برده شود. جهانخشی و حمیدی‌ندوشن<sup>[20]</sup> با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل تطبیقی عصبی-فازی گرمایش غیرفعال دیوار خورشیدی را شبیه‌سازی و پیش‌بینی کردند. نتایج حاصل نشان داد دیوار خورشیدی با باله مستطیلی در تمامی فواصل هوایی بهتر از دیوار ساده عمل می‌کند و به‌طور نمونه در فاصله هوایی برابر یک متر،

به‌گونه‌ای انتخاب شده است که باعث شود عملکرد لوله گردابه‌ای بهینه شود. در اکثر کارهای تجربی صورت‌گرفته پیرامون بررسی اثرات نسبت  $\frac{d_c}{D}$  بر جدایش دمای کل، نتایج یکسان ارایه شده است. براساس مطالعات پیشین [22, 23] نسبت  $\frac{d_c}{D} = 0.5$  به‌عنوان مقدار بهینه گزارش شده است. در این پژوهش نیز این نسبت  $(\frac{d_c}{D} = \frac{9}{18})$  جهت عملکرد بهینه لوله گردابه‌ای رعایت شده است. براساس نتایج مطالعه دینسر و همکاران [24]، نسبت  $\frac{L}{D}$  بهینه بین اعداد ۱۰ تا ۱۶ گزارش شده است. این نسبت ۱۳/۸۸ در نظر گرفته شده است و همانند مقالات دیگر سعی بر آن بوده است که نتایج با مقالات قبلی مقایسه شوند. در اکثر مقالات طول لوله مورد بررسی بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. طول لوله مورد بررسی ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده تا در رنج فوق قرار بگیرد. در انتخاب ابعاد هندسی امکان اینکه اندازه‌های دیگری انتخاب شوند وجود دارد. اما نکته مهم در انتخاب ابعاد هندسی در واقع رعایت نسبت‌های هندسی بی‌بعد است. با رعایت نسبت‌های هندسی بی‌بعد هر دو هدف عملکرد بهینه و مقایسه با کارهای قبلی تامین می‌شود. در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده علت اصلی جدایش جریان و انرژی پدیده کاهش سرعت گردشی در طول لوله اصلی بیان شده است که رابطه ی مستقیم با شکستگی فشار در وسیله دارد.

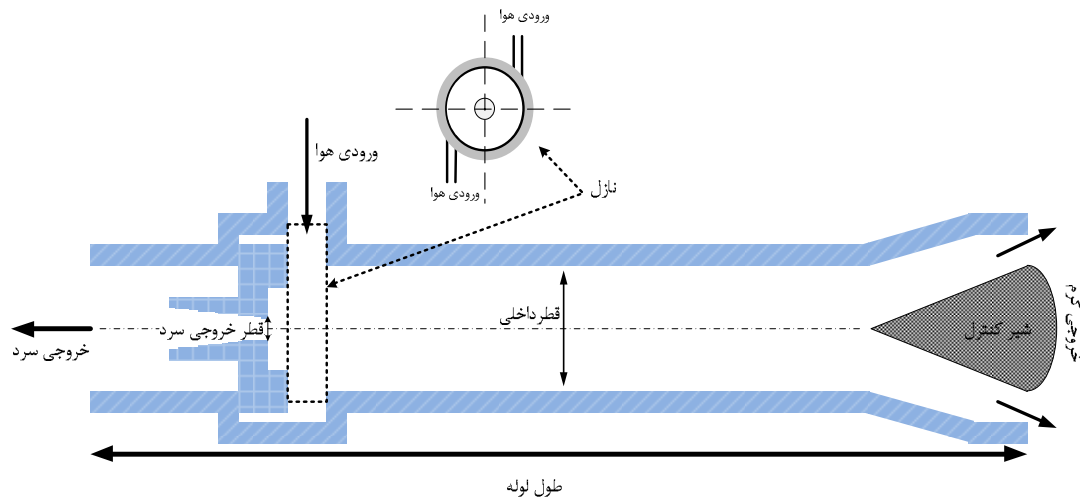
#### اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی ضروری است که از داده‌های آزمایشگاهی در رنج‌های مختلف پارامترهای ورودی و خروجی استفاده شود. بانک اطلاعاتی شامل ۳۲۶ داده آزمایشگاهی است. مقادیر فشار هوای ورودی ( $P$ )، تعداد نازل‌ها ( $N$ )، زاویه نازل‌ها ( $\theta$ )، کسر جرمی سرد ( $\alpha$ ) به‌عنوان متغیرهای ورودی و اختلاف دمای خروجی سرد ( $\Delta T_c$ ) به‌عنوان متغیر خروجی مساله است. سهم هوای خروجی سرد از کل هوای ورودی در اینجا کسر جرمی سرد و اختلاف دمای هوای خروجی سرد و هوای ورودی، اختلاف دمای خروجی نامیده شده است. جدول ۱ شامل نام و جزئیات آماری داده‌ها است [13] و در جدول ۲ مقادیر آزمایشگاهی کار حاضر ارایه شده است. به‌منظور اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی، نتایج با نتایج مطالعات پیشین [25-31] مقایسه شده است. پارامترهای مورد آزمایش در آزمایشات مربوط به لوله‌های گردابه‌ای به دو دسته کلی پارامترهای هندسی و پارامترهای ترموفیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌منظور عملکرد بهینه لوله گردابه‌ای و مقایسه نتایج با مراجع قبلی، نسبت‌های هندسی بی‌بعد شده با مراجع قبلی یکسان در نظر گرفته شده است. در مورد پارامترهای ترموفیزیکی نیز دمای هوای ورودی ۲۹۴/۲ کلوین، فشار هوای ورودی ۰/۵ مگاپاسکال و دبی هوای ورودی در رنج ۰/۹۶۸۸ تا ۰/۶۸۵ کیلوگرم بر ثانیه یکسان در نظر گرفته شده است.

شیر کنترل تنظیم می‌شود. فشار و دمای هوای ورودی در قسمت یک و ۲ شکل ۱- پ که شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، با استفاده از فشارسنج و ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود. پس از این مرحله هوا مستقیماً از طریق نازل‌ها به محفظه چرخش تزریق می‌شود. قسمت شماره ۵ طرح شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۱- پ ورودی هوا را نشان می‌دهد. نازل‌ها به‌صورت متقارن (در صورت زوج بودن تعداد نازل‌ها) و یا به‌صورت غیرمتقارن (در صورت فرد بودن تعداد نازل‌ها) پیرامون محفظه چرخش قرار می‌گیرند. نازل استفاده‌شده از نوع واگرا- همگرا است. عرض و ارتفاع نازل به‌ترتیب ۱/۴۱ و ۰/۹۷ میلی‌متر است. قسمت ۳ و ۴ شکل ۱- پ نشان می‌دهد که قطر محفظه چرخش از قطر لوله اصلی بزرگ‌تر است. هوا پس از نازل‌ها وارد محفظه‌ای می‌شود که در آن مجبور به افزایش حجم ناگهانی و همچنین گردش اجباری می‌شود. ترکیب‌شدن این دو فرآیند عامل اصلی شکستن فشار داخل محفظه چرخش است که موجب کاهش شدید دما در هسته مرکزی محفظه چرخش می‌شود. باید در نظر گرفت که بیشترین مقدار فرآیند جدایش انرژی در طول لوله اصلی اتفاق می‌افتد و آغازگر این فرآیند شکستگی فشار در محفظه چرخش است. محفظه چرخش در ابتدای لوله اصلی قرار می‌گیرد و با داشتن زوایای خاص، هوا را به‌سمت میانه لوله اصلی هدایت می‌کند. بنابراین هوا در حین فرآیند جدایش انرژی دارای حرکت گردشی و طولی است. دمای سکون هوای ورودی قبل از ورود به نازل لوله گردابه‌ای ۲۹۴/۲ کلوین ( $\pm 0.5$ ) است. جریان هوای داخل لوله یک میدان گردابی چرخشی سریع ایجاد می‌کند و به دو جریان سرد و گرم مستقل از هم تبدیل می‌شود. دمای جریان هوای ورودی و خروجی سرد و گرم با استفاده از ترموکوپل‌های شماره ۲ در طرح شماتیک شکل ۱- پ اندازه‌گیری می‌شوند. هوای سرد طبق شکل ۱- پ از قسمت آبی‌رنگ و هوای گرم از قسمت قرمز رنگ خارج می‌شوند. دبی جرمی و فشار جریان هوای سرد و گرم خروجی به‌ترتیب با استفاده از روماترهای شماره ۶ و مانومترهای ۷ و ۸ اندازه‌گیری می‌شوند. نوسانات فشار جریان ورودی توسط یک کنترل‌کننده بر روی خط کنترل می‌شود، به همین دلیل در ورودی فشار ثابت است. مقادیر فشار در ورودی در بازه ۰/۴ تا ۰/۶ مگاپاسکال تنظیم شده است. پس از تنظیم فشار در ورودی برای هر نمونه مورد مطالعه، وسیله آزمایشگاهی به‌طور مداوم بین ۱۰ تا ۱۵ دقیقه، جهت رسیدن به حالت پایدار کار کرده است. لوله گردابه‌ای با پارامترهای ثابت طراحی شده است. قطر داخلی، قطر خروجی سرد و طول لوله مورد بررسی به‌ترتیب ۱۸، ۹ و ۲۵۰ میلی‌متر است. در شکل ۲ طرح شماتیک لوله گردابه‌ای نمایش داده شده است. علت انتخاب اندازه‌های فوق، رعایت نسبت‌های هندسی جهت بهینه‌کردن عملکرد لوله گردابه‌ای و مقایسه با کارهای قبلی بوده است. دو نسبت هندسی مهم طول لوله بر قطر داخلی و  $(\frac{L}{D})$  و قطر خروجی سرد بر قطر داخلی  $(\frac{d_c}{D})$



شکل ۱ الف) تجهیزات آزمایشگاهی، ب) لوله گردابه‌ای، پ) شماتیک تجهیزات آزمایشگاه: ۱. فشارسنج ورودی، ۲. دماسنج، ۳. محفظه چرخش، ۴. لوله گردابه‌ای، ۵. نازل ورودی، ۶. دی‌سنج، ۷. فشارسنج خروجی سرد، ۸. فشارسنج خروجی گرم



شکل ۲ شماتیک لوله گردابه‌ای

جدول ۱) جزییات آماری داده‌ها

| نام متغیر             | نوع متغیر | رنج داده‌ها      |
|-----------------------|-----------|------------------|
| $\alpha$              | ورودی ۱   | ۰/۹۶۸۸ تا ۰/۰۶۸۵ |
| $\theta^\circ$ (درجه) | ورودی ۲   | ۸۰ تا ۲۰         |
| P (مگاپاسکال)         | ورودی ۳   | ۰/۶ تا ۰/۴       |
| N                     | ورودی ۴   | ۶ تا ۲           |
| $\Delta T_c$ (کلوین)  | خروجی ۱   | ۳۷/۴۴ تا ۶/۹۲    |

| $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ | $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ | $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ | $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ |
|--------------|---|-----|----------------|----------|--------------|---|-----|----------------|----------|--------------|---|-----|----------------|----------|--------------|---|-----|----------------|----------|
| ۲۳/۲۸        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۶      | ۱۳/۴۹        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۷۴     | ۱۰/۳۸        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۷۹     | ۱۶/۶         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۱۷     |
| ۲۲/۲۴        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۶۴     | ۱۲/۳۴        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۷۷     | ۹/۶۹         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۸۳     | ۱۷/۴         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۲      |
| ۲۱/۰۹        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۶۹     | ۱۱/۴۱        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۸۱     | ۹/۴۶         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۸۸     | ۱۸/۳۲        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۲۳     |
| ۲۰/۵۱        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۷۲     | ۱۰/۶۱        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۸۵     | ۹/۱۱         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۹      | ۱۸/۵۶        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۲۶     |
| ۱۹/۵۹        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۷۵     | ۱۰/۰۳        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۸۸     | ۸/۵۳         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۹۴     | ۱۸/۶۷        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۲۸     |
| ۱۸/۶۷        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۷۹     | ۸/۷۶         | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۹۲     | ۲۳/۹۷        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۱۴     | ۱۸/۳۲        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۳۱     |
| ۱۷/۸۶        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۸۲     | ۷/۹۶         | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۹۴     | ۲۴/۴۳        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۱۶     | ۱۷/۸۶        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۳۵     |
| ۱۶/۴۸        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۸۵     | ۲۰/۹۷        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۱۲     | ۲۵/۳۵        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۱۷     | ۱۷/۵۲        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۳۸     |
| ۱۵/۷۹        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۸۷     | ۲۱/۴۳        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۱۵     | ۲۵/۹۳        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۲۱     | ۱۶/۷۱        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۴۲     |
| ۱۵/۱         | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۹      | ۲۱/۷۸        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۱۷     | ۲۶/۱۶        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۲۴     | ۱۵/۹۱        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۴۵     |
| ۱۳/۸۳        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۹۳     | ۲۱/۹         | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۲      | ۲۶/۲۷        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۲۶     | ۱۵/۳۳        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۴۹     |
| ۱۳/۱۴        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۹۶     | ۲۲/۰۱        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۲۲     | ۲۵/۸۱        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۲۹     | ۱۴/۹۸        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۵۳     |
| ۲۶/۶۲        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۱     | ۲۲/۴۷        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۲۴     | ۲۵/۰۱        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۳۳     | ۱۴/۶۴        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۵۶     |
| ۲۷/۱۹        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۲     | ۲۲/۸۲        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۲۶     | ۲۴/۳۱        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۳۶     | ۱۳/۹۵        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۶      |
| ۲۷/۶۵        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۴     | ۲۲/۹۳        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۲۸     | ۲۳/۶۲        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۴      | ۱۳/۲۶        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۶۴     |
| ۲۸/۳۵        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۷     | ۲۲/۳۶        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۳۱     | ۲۲/۷         | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۴۴     | ۱۲/۸         | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۶۸     |
| ۲۹/۵         | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۹     | ۲۲/۳۶        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۳۵     | ۲۲/۲۴        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۴۹     | ۱۱/۹۹        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۷۲     |
| ۲۹/۸۴        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۲     | ۲۲/۲۴        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۴      | ۲۱/۴۳        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۵۵     | ۱۱/۱۸        | ۲ | ۰/۴ | ۲۰             | ۰/۷۵     |
| ۳۰/۰۷        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۵     | ۲۲/۰۱        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۴۵     | ۲۰/۸۶        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۵۸     | ۳۲/۱۵        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴      |
| ۳۰/۴۲        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳      | ۲۱/۰۹        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۴۸     | ۲۰/۶۳        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۶۲     | ۳۱/۸         | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۳     |
| ۲۹/۸۴        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۳     | ۲۰/۲۸        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۵      | ۲۰/۲۸        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۶۵     | ۳۱/۳۴        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۷     |
| ۲۹/۰۴        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۶     | ۱۹/۵۹        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۵۳     | ۱۹/۴۸        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۶۹     | ۳۰/۴۲        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۱     |
| ۲۸/۴۶        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۱     | ۱۹/۱۳        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۵۷     | ۱۸/۳۲        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۷۳     | ۲۹/۶۱        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۴     |
| ۲۸/۲۳        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۵     | ۱۸/۹         | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۶      | ۱۷/۲۹        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۷۷     | ۲۸/۱۲        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۸     |
| ۲۷/۷۷        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۱     | ۱۸/۹         | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۶۴     | ۱۶/۰۲        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۸      | ۲۶/۶۲        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۳     |
| ۲۶/۸۵        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۳     | ۱۸/۴۴        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۶۷     | ۱۴/۴۱        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۸۵     | ۲۵/۴۷        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۸     |
| ۲۵/۸۱        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۷     | ۱۷/۸۶        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۷      | ۱۳/۱۴        | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۸۸     | ۲۴/۴۳        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷      |
| ۲۴/۷۷        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶      | ۱۷/۲۹        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۷۱     | ۱۲/۱         | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۹۲     | ۲۳/۵۱        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۳     |
| ۲۳/۳۹        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۳     | ۱۶/۴۸        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۷۳     | ۱۱/۳         | ۲ | ۰/۴ | ۳۰             | ۰/۹۵     | ۲۲/۸۲        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۶     |
| ۲۲/۲۴        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۶     | ۱۵/۵۶        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۷۵     | ۱۸/۰۹        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۱۵     | ۲۱/۶۶        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸      |
| ۲۱/۲         | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۹     | ۱۴/۶۴        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۷۸     | ۱۸/۴۴        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۱۶     | ۲۰/۸۶        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۵     |
| ۲۰/۴         | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۳     | ۱۳/۸۳        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۸      | ۱۸/۶۷        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۱۹     | ۲۰/۴         | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۸     |
| ۱۹/۷۱        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۷     | ۱۳/۲۶        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۸۳     | ۱۹/۳۶        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۲۱     | ۱۹/۳۶        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۳     |
| ۱۸/۵۶        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۱     | ۱۲/۵۷        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۸۷     | ۱۹/۸۲        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۲۳     | ۱۷/۴         | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۵     |
| ۱۷/۶۳        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۴     | ۱۱/۴۱        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۸۹     | ۱۹/۸۴        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۲۶     | ۱۵/۷۹        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۶     |
| ۱۶/۸۳        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۹     | ۱۰/۰۳        | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۹۲     | ۱۹/۹۴        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۲۸     | ۱۴/۸۷        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۷     |
| ۱۶/۰۲        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۲     | ۸/۹۹         | ۲ | ۰/۴ | ۶۰             | ۰/۹۵     | ۱۹/۴۸        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۳      | ۳۲/۱۵        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۰۷     |
| ۱۴/۸۷        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۵     | ۲۲/۸۲        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۳     | ۱۹/۷۱        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۳۴     | ۳۲/۸۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۰۹     |
| ۱۴/۰۶        | ۳ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۷     | ۲۳/۱۶        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۴     | ۱۹/۳۶        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۳۶     | ۳۳/۵۳        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۱۱     |
| ۲۸           | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۰۸     | ۲۳/۷۴        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۷     | ۱۹/۳۶        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۴      | ۳۳/۶۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۱۳     |
| ۲۸/۵۸        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۱     | ۲۴/۴۳        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۹     | ۱۹/۰۲        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۴۴     | ۳۳/۸۷        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۱۷     |
| ۲۹/۰۴        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۵     | ۲۵/۱۲        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۱     | ۱۸/۶۷        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۴۶     | ۳۳/۸۷        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۱۸     |
| ۲۹/۶۱        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۷     | ۲۵/۲۴        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۴     | ۱۸/۳۲        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۴۷     | ۳۴/۱         | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۲      |
| ۳۰/۴۲        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۸     | ۲۵/۸۱        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۶     | ۱۷/۶۳        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۵      | ۳۴/۶۸        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۲۱     |
| ۳۱/۳۴        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۲     | ۲۵/۸۱        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۹     | ۱۶/۸۳        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۵۵     | ۳۵/۳۷        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۲۴     |
| ۳۱/۶۹        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۵     | ۲۵/۰۱        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۲     | ۱۶/۰۲        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۵۹     | ۳۵/۳۷        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۲۷     |
| ۳۱/۸         | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۸     | ۲۵/۵۴        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۷     | ۱۵/۱         | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۶۲     | ۳۵/۶         | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۳۱     |
| ۳۱/۲۳        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۱     | ۲۴/۸۹        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۲     | ۱۴/۲۹        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۶۴     | ۳۵/۱۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۳۳     |
| ۳۰/۹۹        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۶     | ۲۴/۲         | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۵     | ۱۳/۷۲        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۶۶     | ۳۴/۶۸        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۳۵     |
| ۳۰/۸۸        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴      | ۲۳/۰۵        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۹     | ۱۳/۱۴        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۶۹     | ۳۴/۳۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۳۷     |
| ۳۰/۳         | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۴     | ۲۱/۶۶        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۱     | ۱۲/۵۷        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۷۳     | ۳۴/۲۲        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۴      |

| $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ | $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ | $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ | $\Delta T_c$ | N | P   | $\theta^\circ$ | $\alpha$ |
|--------------|---|-----|----------------|----------|--------------|---|-----|----------------|----------|--------------|---|-----|----------------|----------|--------------|---|-----|----------------|----------|
| ۲۹/۶۱        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۴۹     | ۲۰/۸۶        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۱     | ۱۱/۸۷        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۷۴     | ۳۳/۹۹        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۴۵     |
| ۲۸/۹۲        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۲     | ۲۰/۱۷        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۳     | ۱۰/۸۴        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۷۵     | ۳۳/۶۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۴۸     |
| ۲۷/۶۵        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۵     | ۱۹/۲۵        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۵     | ۱۰/۰۳        | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۷۹     | ۳۲/۷۲        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۵      |
| ۲۶/۳۹        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۹     | ۱۸/۵۶        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۵۸     | ۹/۳۴         | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۸۱     | ۳۱/۹۲        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۵۲     |
| ۲۵/۴۷        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۲     | ۱۷/۸۶        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۲     | ۸/۸۸         | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۸۳     | ۳۱/۳۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۵۶     |
| ۲۴/۷۷        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۶     | ۱۷/۴         | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۶     | ۸/۰۷         | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۸۸     | ۳۱/۲۳        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۵۹     |
| ۲۳/۹۷        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۶۹     | ۱۶/۶         | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۱     | ۷/۲۷         | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۹۲     | ۳۰/۷۶        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۶۴     |
| ۲۳/۰۵        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۳     | ۱۶/۰۲        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۶     | ۶/۹۲         | ۲ | ۰/۴ | ۴۰             | ۰/۹۴     | ۳۰/۳         | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۶۵     |
| ۲۱/۷۸        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۷۸     | ۱۵/۶۸        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸      | ۱۹/۲۵        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۱۳     | ۲۹/۶۱        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۶۹     |
| ۲۰/۴         | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸      | ۱۴/۸۷        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۴     | ۱۹/۷۱        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۱۷     | ۲۸/۹۲        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۷۲     |
| ۱۸/۷۹        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۴     | ۱۳/۷۲        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۹     | ۱۹/۹۴        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۱۹     | ۲۸/۴۶        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۷۶     |
| ۱۷/۷۵        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۶     | ۱۲/۳۴        | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۲     | ۲۰/۷۴        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۲۳     | ۲۸/۲۳        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۷۸     |
| ۱۶/۳۷        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۸۸     | ۱۱/۳         | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۴     | ۲۱/۲         | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۲۶     | ۲۷/۶۵        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۸      |
| ۱۵/۳۳        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹      | ۹/۹۲         | ۲ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۶     | ۲۱/۴۳        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۲۹     | ۲۶/۸۵        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۸۴     |
| ۱۴/۱۸        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۳     | ۲۴/۸۹        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۱۲     | ۲۱/۲         | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۳۲     | ۲۶/۵         | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۸۷     |
| ۱۳/۲۶        | ۴ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۹۴     | ۲۵/۵۸        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۱۴     | ۲۰/۶۳        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۳۵     | ۲۵/۸۱        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۸۹     |
| ۳۰/۰۷        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۰۷     | ۲۶/۱۶        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۱۷     | ۲۰/۷۴        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۳۸     | ۲۴/۶۶        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۹۲     |
| ۳۰/۶۵        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۱     | ۲۶/۵         | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۱۹     | ۲۰/۰۵        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۴۲     | ۲۳/۷۴        | ۶ | ۰/۵ | ۷۰             | ۰/۹۴     |
| ۳۰/۹۹        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۴     | ۲۷/۵۴        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۲۲     | ۱۹/۹۴        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۴۶     | ۳۴/۵۷        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۹      |
| ۳۱/۴۶        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۱۷     | ۲۷/۵۴        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۲۵     | ۲۰/۰۵        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۵      | ۳۴/۵۷        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۱۳     |
| ۳۱/۹۲        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲      | ۲۷/۳۱        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۳      | ۱۸/۹         | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۵۲     | ۳۵/۰۳        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۱۵     |
| ۳۲/۳۸        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۲     | ۲۷/۱۹        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۳۴     | ۱۷/۱۷        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۵۴     | ۳۵/۴۹        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۱۶     |
| ۳۳/۱۸        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۶     | ۲۶/۵         | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۳۸     | ۱۶/۱۴        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۵۶     | ۳۶/۲۹        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۱۷     |
| ۳۲/۸۴        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۲۹     | ۲۶/۲۷        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۴۳     | ۱۵/۴۵        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۶      | ۳۷/۱         | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۲      |
| ۳۳/۰۷        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۳     | ۲۵/۵۸        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۴۷     | ۱۴/۸۷        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۶۵     | ۳۷/۲۱        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۲۲     |
| ۳۲/۸۴        | ۶ | ۰/۴ | ۷۰             | ۰/۳۷     | ۲۵/۱۲        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۵۱     | ۱۴/۵۲        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۶۸     | ۳۷/۲۱        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۲۵     |
| ۳۲/۲۶        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۷۱     | ۲۴/۳۱        | ۲ | ۰/۴ | ۸۰             | ۰/۵۵     | ۱۴/۴۱        | ۲ | ۰/۴ | ۵۰             | ۰/۷      | ۳۷/۴۵        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۲۹     |
| ۳۱/۸         | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۷۶     | ۳۱/۲۳        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۸      | ۳۵/۶         | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۵۳     | ۳۷/۳۳        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۳۵     |
| ۲۹/۲۷        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۹      | ۳۰/۸۸        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۸۳     | ۳۴/۴۵        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۵۸     | ۳۶/۰۶        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۴      |
| ۲۹/۶۱        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۸۸     | ۳۰/۶۵        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۸۷     | ۳۳/۹۹        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۶۱     | ۳۶/۰۶        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۴۵     |
|              |   |     |                |          |              |   |     |                |          | ۳۲/۹۵        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۶۵     | ۳۵/۷۲        | ۶ | ۰/۶ | ۷۰             | ۰/۴۹     |

حاضر برای جامعه علمی شناخته شده است. روش منطق فازی (FL) با استفاده از قوانین خاص اگر- سپس (if-then)، برای درک فرآیندها یک روش جایگزین معرفی می‌کند که با اندازه‌گیری‌های دقیق و به‌صورت کیفی محاسبه می‌شوند. با این وجود لازم است که یک دیدگاه دقیق در مورد مساله‌ای که در حال بررسی است به‌دست آورده شود<sup>[32]</sup>. مدل‌سازی یک مساله با روش منطق فازی به‌واسطه اطلاعات نامناسب، تفاوت‌ها در قضاوت‌های انسانی یا اشتباهات، ممکن است در ارایه نتایج با شکست روبرو شود<sup>[33]</sup>. برای رفع این مشکل ضروری است که از روش‌های جایگزین همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) استفاده شود، که قابلیت یادگیری از پایگاه داده‌های موجود را دارا هستند<sup>[33]</sup>. دو روش منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی در یک سیستم استنتاج عصبی- فازی- تطبیقی با همدیگر ترکیب می‌شوند. این فرآیند ترکیبی از طریق قوانین اگر- سپس و توابع خاصی بنام توابع عضویت (MFS) برای ایجاد یک ساختار از پیش

نمودار ۱ نشان می‌دهد که اختلاف دمای خروجی سرد برای مقادیر مختلف کسر جرمی سرد روند یکسانی را طی می‌کند و مشخص است که بین نتایج انطباق مناسبی برقرار است. با زیاد شدن کسر جرمی سرد نقطه سکون (محلی است که قسمت عمده جریان سرد، تا قبل از آن به‌سمت خروجی سرد باز می‌شود) از خروجی گرم دور می‌شود. در این حالت سیال طول کمتری از لوله گردابه‌ای را طی می‌کند و فرصت کمتری برای خنک‌شدن دارد. این موضوع باعث شده که در عمل و در صنعت، لوله‌های گردابه‌ای برای کسر جرمی بیشتر از ۰/۸ مورد استفاده قرار نگیرد. در این حالت اختلاف دمای خروجی سرد بسیار کم و ناچیز است و احتمال خطا در محاسبه آن بالا می‌رود. همان گونه که از نمودار ۱ مشخص است در کسرهای جرمی بالا این اخلاف بین نتایج مراجع قبلی نیز زیاد است.

#### مفهوم سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)

مفهوم منطق فازی اولین‌بار توسط زاده معرفی شد<sup>[32]</sup> و به‌دلیل توانایی آن برای انتقال متغیرهای زبانی به فرمت ریاضی در حال

به‌شکل یک عدد برمی‌گرداند. در رابطه ۵ شکل ریاضی لایه پنجم آورده شده است.

$$O_i^5 = Y = \sum_{i=1}^4 \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (5)$$

#### توسعه مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)

به‌منظور توسعه مدل‌های واقعی و منطقی برای پیش‌بینی اختلاف دمای خروجی ضروری است که از داده‌های آزمایشگاهی در رنج‌های مختلف پارامترهای ورودی و خروجی استفاده شود [25-29].

فاکتور دیگری که در پردازش‌کردن مدل اختلاف دمای خروجی نقش مهمی دارد، مشخص‌کردن پارامترهای ورودی است که تأثیر قابل توجهی بر روی خروجی دارند. برای پیاده‌سازی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در ابتدا داده‌ها با استفاده از رابطه

۶ بین منفی یک و مثبت یک نرمال‌سازی شده‌اند.

$$x_{Normal} = 2 \times \frac{x - x_{Min}}{x_{Max} - x_{Min}} - 1 \quad (6)$$

سپس داده‌ها به دو زیرمجموعه داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شده‌اند. تقسیم تصادفی و یکنواخت برای جلوگیری از تجمع داده‌های محلی مساله در یک دامنه دلخواه در هر دو زیرمجموعه اجرا شده است. به‌ترتیب ۸۰ و ۲۰٪ کل داده‌ها برای آموزش و آزمون سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی استفاده شده است.

داده‌های آموزش به‌منظور ساخت و آموزش و داده‌های آزمون برای ارزیابی عملکرد سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در پیش‌بینی داده‌های غیرقابل مشاهده استفاده شده است. برای

شبیه‌سازی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی از یک کد نرم‌افزار متلب استفاده شده که شامل سه روش تولید سیستم استنتاج فازی (Genfis) است. به‌هنگام استفاده از الگوریتم

منقطع‌سازی شبکه‌ای (Genfis1 یا Grid Part) تعداد توابع عضویت، نوع توابع عضویت ورودی و خروجی همه به‌صورت

اختیاری انتخاب می‌شوند. در این روش تعداد توابع عضویت بین ۲ تا ۶، نوع توابع عضویت ورودی‌ها به چهار شکل مثلثی، گوسی،

زنگوله‌ای و شبه پی و نوع توابع عضویت خروجی به دو شکل ثابت

و خطی در نظر گرفته شد. الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی (Genfis

2 یا Sub. Clustering) یک الگوریتم سریع برای تخمین تعداد

خوشه‌ها و مشخص‌کردن مراکز خوشه‌ها است. در این روش ابتدا

الگوریتم برای تمامی داده‌ها این شانس را در نظر می‌گیرد که

می‌توانند مرکز خوشه باشند. سپس به هر کدام از داده‌ها برحسب

فاصله از سایر داده‌ها امتیاز داده می‌شود و در نهایت چند نقطه که

کمترین فاصله را از سایر نقاط داشته باشند به‌عنوان مراکز

خوشه‌ها در نظر گرفته می‌شوند و ناحیه نفوذ یا شعاع تأثیر

(RDI) آن مرکز خوشه تعیین می‌شود. هر خوشه در روش

الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی یک ناحیه نفوذ دارد. این پارامتر

مقادیر بین صفر و یک را می‌پذیرد. در مقادیر پایین‌تر این پارامتر،

عملکرد مدل پیشنهادی بهتر خواهد بود، اما لازم به ذکر است که

مقادیر بسیار کوچک این پارامتر قوانین بسیار زیادی ایجاد می‌کند

که باعث وقت‌گیر شدن فرآیند آموزش می‌شود. در شکل ۴ نحوه

خوشه‌بندی در روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی نمایش داده

تعریف‌شده به‌نام سیستم استنتاج فازی انجام می‌شود. دو نوع سیستم استنتاج فازی در تحقیقات و مطالعات به‌نام‌های ممدانی (Mamdani) و تاکاگی-سوگنو (TSK) موجود هستند [14].

سیستم استنتاج فازی نوع ممدانی با معرفی مفاهیم اگر- سپس از طریق استفاده از اظهارات کارشناسان، که معمولاً منجر به ناآگاهی و ابهام می‌شود اجرا می‌شود. سیستم استنتاج فازی نوع تاکاگی-سوگنو قوانین حاکم را از طریق بهره‌گیری از الگوی داده‌های ورودی و خروجی خلق می‌کند [32, 34, 35]. سیستم استنتاج فازی نوع تاکاگی-سوگنو به‌دلیل توانایی بالا در برقراری ارتباط غیرخطی بین پارامترهای ورودی و خروجی مورد استفاده قرار گرفته است. شکل معمولی ساختار کلی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

لایه اول شکل ۳، داده‌های خام ورودی را به ترم‌های زبانی تبدیل می‌کند [32, 33]. در لایه اول دو گروه مرتبط به‌عنوان ترم‌های زبانی برای هر کدام از پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. این لایه ترم‌ها را براساس توابع عضویت قبلی ایجاد می‌کند. توابع عضویت دارای شکل‌های مختلفی هستند که به‌منظور مدل‌سازی استفاده می‌شوند. به‌عنوان نمونه فرمول تابع عضویت نوع گوسین، به‌دلیل هموارترکردن رفتار مدل نسبت به بقیه مدل‌ها آورده شده است. تابع عضویت نوع گوسین از لحاظ ریاضی به شکل رابطه ۱ نوشته می‌شود:

$$O_i^1 = \beta(X) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(X-z)^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

در زمان پردازش مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی با تنظیم متغیرهای ورودی عملکرد مطلوب‌تر مدل فراهم خواهد شد.

لایه دوم شکل ۳، سطح دقت و کارایی شرایط را در قسمت قبلی مشخص می‌کند. خروجی این لایه ضرب سیگنال‌های ورودی است که در واقع معادل قسمت اگر قوانین است. نام دیگر این لایه

FSL است و با استفاده از رابطه ۲ مشخص می‌شود [32].

$$O_i^2 = W_i = \beta_{Ai}(X) \cdot \beta_{Bi}(X) \quad (2)$$

خروجی لایه سوم شکل ۳، نرمال‌شده لایه قبلی است. مقادیر محاسبه شده  $W_i$  در لایه‌های قبلی به‌شکل رابطه ۳ نرمال می‌شوند.

$$O_i^3 = \frac{W_i}{\sum_i W_i} \quad (3)$$

لایه چهارم شکل ۳، ترم‌های زبانی خروجی مدل را تعیین می‌کند. مقدار اختلاف دمای خروجی سرد لوله گردابه‌ای خروجی مدل است. درجه تأثیر هر قانون روی خروجی مدل از طریق رابطه ۴ مشخص می‌شود.

$$O_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (m_i X_1 + n_i X_2 + p_i X_3 + q_i X_4 + r_i) \quad (4)$$

در رابطه فوق متغیرهای  $m_i, n_i, p_i, q_i$  و  $r_i$  خطی هستند. این متغیرها برای ایجاد بهترین مطابقت بین خروجی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و مقادیر هدف، همانند متغیرهای لایه اول قابل تنظیم هستند.

لایه پنجم شکل ۳، کلیه قوانین متناسب با یک خروجی را جمع می‌کند و با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی خروجی را

است [36].

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^t (\lambda_{Pred}(i) - \bar{\lambda}_{Pred}(i))(\lambda_{Exp}(i) - \bar{\lambda}_{Exp}(i)))^2}{\sum_{i=1}^t (\lambda_{Pred}(i) - \bar{\lambda}_{Pred}(i))^2 \sum_{i=1}^t (\lambda_{Exp}(i) - \bar{\lambda}_{Exp}(i))^2} \quad (7)$$

$$AARD = \frac{100}{t} \sum_{i=1}^t \left| \frac{\lambda_{Pred}(i) - \lambda_{Exp}(i)}{\lambda_{Exp}(i)} \right| \quad (8)$$

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^t (\lambda_{Pred}(i) - \lambda_{Exp}(i))^2}{t} \right)^{0.5} \quad (9)$$

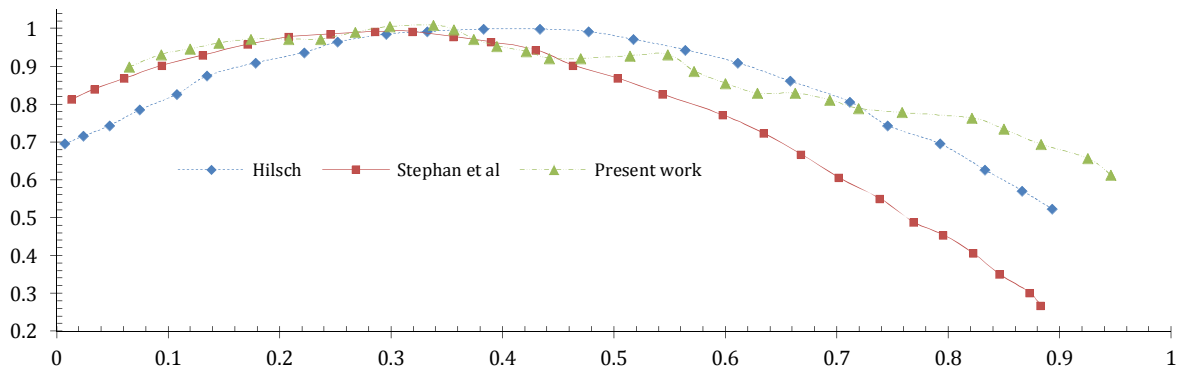
$$STD = \sum_{i=0}^t \left( \frac{(\lambda_{Pred}(i) - \bar{\lambda}_{Pred}(i))^2}{t-1} \right)^{0.5} \quad (10)$$

مدل‌های پیشنهادی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در طی فرآیند همگرایی مدل برای بهینه‌کردن مقدار خطا مورد بررسی قرار گرفتند. زمانی که مقدار خطای میانگین مربعات ریشه کمترین و ضریب همبستگی بیشترین مقدار خود را داشته باشد، می‌توان گفت که بهترین حالت پیش‌بینی اتفاق افتاده است. در جدول ۳ نتایج بهترین مدل‌های پیش‌بینی آورده شده است.

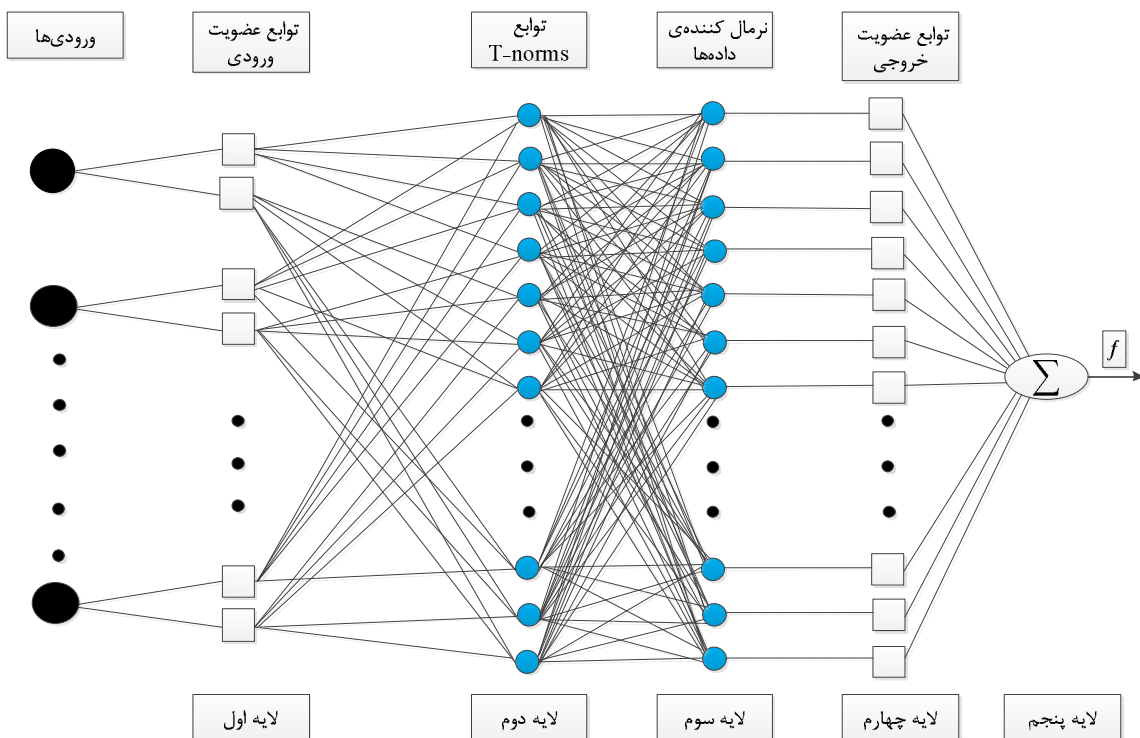
شده است. در روش سوم از الگوریتم خوشه‌بندی اختیاری (Genfis3 یا FCM) استفاده شده است. نحوه خوشه‌بندی داده‌ها در این روش همانند روش قبلی است با این تفاوت که تعداد خوشه‌ها در این روش به‌صورت اختیاری انتخاب می‌شود. در این روش تعداد خوشه‌ها بین ۵ تا ۴۵ خوشه در نظر گرفته شده است. پس از ایجاد ساختار سیستم استنتاج فازی گام بعدی آموزش این ساختار است. از روش ترکیبی که براساس ترکیب روش گرادیان نزولی و حداقل مربعات خطا است، برای آموزش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی استفاده شده است.

### آنالیز آماری

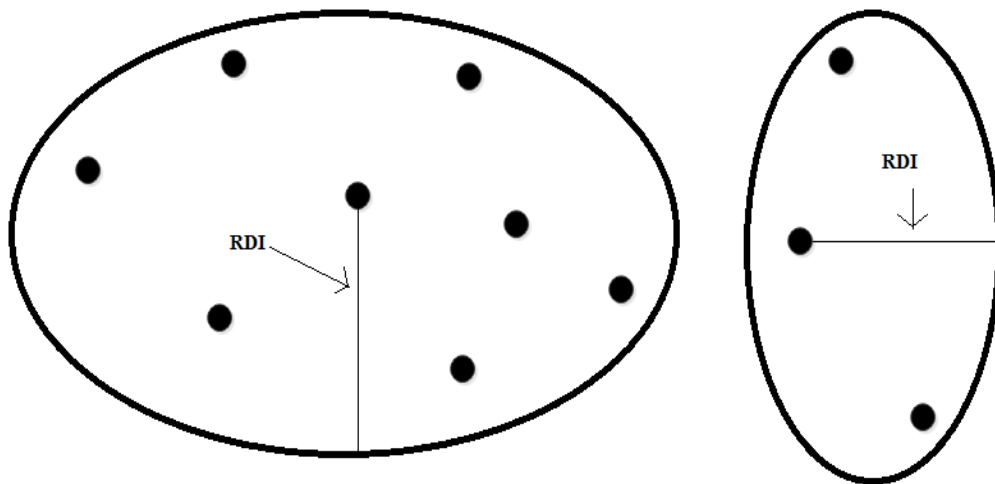
چهار پارامتر مهم آماری ضریب همبستگی، میانگین انحراف نسبی مطلق، انحراف استاندارد و خطای مربع میانگین ریشه برای بررسی دقیق‌تر مدل‌های پیشنهادی طبق روابط ۷ تا ۱۰ آورده شده



نمودار ۱) اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی کار حاضر در مقایسه با کارهای قبلی مشابه



شکل ۳) ساختار کلی مدل ANFIS



شکل ۴) نحوه خوشه‌بندی در روش SC

جدول ۳) خلاصه‌ای از شرایط بهترین مدل‌های ANFIS و پارامترهای آماری آن

| روش FCM |        | روش SC |        | روش GP                |        |                          |   | پارامترهای آماری |  |
|---------|--------|--------|--------|-----------------------|--------|--------------------------|---|------------------|--|
|         |        |        |        | نوع توابع عضویت ورودی |        |                          |   |                  |  |
|         |        |        |        | زنگوله‌ای             |        | شبه‌پی                   |   |                  |  |
|         |        |        |        | نوع توابع عضویت خروجی |        |                          |   |                  |  |
|         |        |        |        | خطی                   |        | خطی                      |   |                  |  |
|         |        |        |        | تعداد توابع عضویت     |        |                          |   |                  |  |
|         |        |        |        | ۵                     | ۴      | ۶                        | ۵ |                  |  |
| ۰/۹۹۹۰  | ۰/۹۹۷۷ | ۰/۹۹۸۹ | ۰/۹۹۷۹ | ۰/۹۹۵۹                | ۰/۹۹۹۲ | ضریب همبستگی             |   | داده‌های آموزش   |  |
| ۰/۱۶۲۷  | ۰/۳۵۸۳ | ۰/۲۴۸۴ | ۰/۳۳۳۰ | ۰/۴۷۱۳                | ۰/۲۱۵۲ | خطای مربع میانگین ریشه   |   |                  |  |
| ۰/۱۶۲۷  | ۰/۳۵۸۳ | ۰/۲۴۸۴ | ۰/۳۳۳۰ | ۰/۴۷۱۳                | ۰/۲۱۵۲ | انحراف استاندارد         |   |                  |  |
| ۰/۰۰۵۱  | ۰/۰۳۸۳ | ۰/۰۱۶۰ | ۰/۰۳۲۰ | ۰/۰۷۷۱                | ۰/۰۱۱۷ | میانگین انحراف نسبی مطلق |   |                  |  |
| ۰/۹۹۷۲  | ۰/۹۹۴۷ | ۰/۹۹۵۶ | ۰/۹۹۵۷ | ۰/۹۹۵۵                | ۰/۹۹۷۵ | ضریب همبستگی             |   | داده‌های آزمون   |  |
| ۰/۵۴۷۴  | ۰/۵۷۲۶ | ۰/۴۶۴۰ | ۰/۵۰۰۹ | ۰/۵۰۳۰                | ۰/۴۱۹۹ | خطای مربع میانگین ریشه   |   |                  |  |
| ۰/۵۴۵۴  | ۰/۵۵۸۹ | ۰/۴۶۰۷ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۵۰۲۶                | ۰/۴۱۸۹ | انحراف استاندارد         |   |                  |  |
| ۰/۰۱۸۰  | ۰/۷۳۹۶ | ۰/۱۲۳۶ | ۰/۱۶۶۱ | ۰/۰۰۵۵                | ۰/۲۵۷۹ | میانگین انحراف نسبی مطلق |   |                  |  |
| ۰/۹۹۸۵  | ۰/۹۹۷۰ | ۰/۹۹۸۳ | ۰/۹۹۷۵ | ۰/۹۹۵۸                | ۰/۹۹۸۷ | ضریب همبستگی             |   | کل داده‌ها       |  |
| ۰/۲۸۴۵  | ۰/۴۱۰۱ | ۰/۳۰۳۸ | ۰/۳۷۲۶ | ۰/۴۷۷۸                | ۰/۲۶۸۷ | خطای مربع میانگین ریشه   |   |                  |  |
| ۳/۰۱۳۳  | ۸/۰۸۱۹ | ۳/۶۱۰۲ | ۱/۹۹۲۷ | ۱/۵۰۹۰                | ۱/۹۵۵۴ | انحراف استاندارد         |   |                  |  |
| ۰/۰۰۷۶  | ۰/۱۷۸۱ | ۰/۰۳۷۴ | ۰/۰۵۸۷ | ۰/۰۶۲۸                | ۰/۰۶۰۸ | میانگین انحراف نسبی مطلق |   |                  |  |
| ۴۶      | ۳۰     | ۶۲۵    | ۲۵۶    | ۱۲۹۶                  | ۱۲۹۶   | تعداد قواعد ایجاد شده    |   |                  |  |

## بحث و نتایج

عضویت با روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای، یک مدل با استفاده از روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی و یک مدل با استفاده از روش الگوریتم خوشه‌بندی اختیاری ساخته شد. به عبارت دیگر از هر سه روش مدل‌سازی با روش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی استفاده شده است.

برای پیش‌بینی اختلاف دمای خروجی با استفاده از روش الگوریتم خوشه‌بندی اختیاری، تعداد خوشه‌ها از ۵ تا ۴۵ عدد مورد بررسی

به دنبال مطالعات مدل‌سازی و پیش‌بینی اختلاف دمای خروجی در لوله‌های گردابه‌ای با روش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، خلاصه‌ای از بهترین نتایج به دست آمده در جدول ۳ ارائه شده است. مدل‌سازی با شش روش انجام شد و بهترین نتایج برحسب بیشترین مقدار ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۵ در جدول ۳ آورده شده است. چهار مدل با نوع و تعداد مختلف توابع

۰/۴۱۸۹ و ۰/۲۵۷۹ به‌دست آمدند. در نمودار ۲- الف انطباق داده آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده و در نمودارهای ۲- ب و ۲- پ ضرایب همبستگی برای داده‌های آموزش و آزمون نمایش داده شده است. به‌دلیل تراکم داده‌ها و هم‌پوشانی نقاط در نمودارهای ضرایب همبستگی داده‌های آموزش و آزمون، جهت مشاهده بهتر نمودار در اطراف خط رگرسیون خطی، قسمتی از نمودار با بزرگ‌نمایی نشان داده شده است.

#### تابع مطلوبیت

نقطه عمل اصلی روش تابع مطلوبیت تبدیل مسایل با پاسخ چندگانه به مسایل با پاسخ واحد با استفاده از روش تحلیلی است. این پاسخ‌های چندگانه ممکن است به یکدیگر نزدیک باشند یا روند واحدی را دنبال نکنند. بنابراین توابع تحلیلی کلی و فردی برای این کار تعریف شده است. مقدار تابع مطلوبیت بین صفر تا یک است. به‌منظور بیشینه یا کمینه‌کردن پاسخ‌ها، تابع مطلوبیت هر پارامتر با استفاده از معادلات ۱۱ و ۱۲ و تابع مطلوبیت کلی با استفاده از معادله ۱۳ محاسبه شده است [36].

$$d_{imax} = \frac{y-L}{U-L} \quad (11)$$

$$d_{imin} = \frac{U-y}{U-L} \quad (12)$$

$$D_{final} = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/z} \quad (13)$$

به‌منظور مقایسه عملکرد پیش‌بینی مدل‌های توسعه‌یافته با چند پارامتر آماری، ابتدا با استفاده از معادلات ۱۱ تا ۱۳ مطلوبیت جزیی هر کدام از پارامترها، با سه نوع طبقه‌بندی داده‌های آموزش، آزمون و کل داده‌ها انجام شد. مطلوبیت جزیی پارامترهای آماری کل داده‌ها برای هر شش مدل شبیه‌سازی‌شده در نمودار ۳- الف نمایش داده شده است. در نمودار ۳- الف مشخص است که مطلوبیت جزیی پارامترهای آماری ضریب همبستگی و خطای مربع میانگین ریشه در روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت نوع شبه پی، انحراف استاندارد در روش الگوریتم خوشه‌بندی اختیاری و میانگین انحراف نسبی مطلق در روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی برای کل داده‌ها بیشترین مقادیر را دارا هستند. مطلوبیت جزیی کلیه پارامترهای آماری یا به عبارتی مطلوبیت جزیی هر کدام از شش روش انجام‌شده در یک طبقه‌بندی سه‌گانه داده‌های آموزش، آزمون و کل داده‌ها در نمودار ۳- ب نمایش داده شده است. در نمودار ۳- ب مشخص است که مطلوبیت جزیی روش‌های الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی، الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت نوع شبه پی و الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی به‌ترتیب با مقادیر ۱، ۰/۸۸ و ۰/۶۷ برای داده‌های آموزش، آزمون و کل داده‌ها بیشترین مقدار را دارا است. همان‌گونه که در نمودار ۳- ب که قابل مشاهده است، مطلوبیت تقریباً یکسانی بین دو روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی و الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت نوع گاوسی برای کل داده‌ها وجود دارد. مقدار این مطلوبیت ۰/۶۷ است. توابع مطلوبیت جزیی  $d_1 \dots d_z$  در مقیاس صفر تا یک هستند و برای

قرار گرفت. تعداد خوشه‌ها، تعداد قوانین و توابع عضویت را در تولید سیستم استنتاج فازی مربوطه مشخص می‌کنند. بهترین نتایج برای روش الگوریتم خوشه‌بندی اختیاری در تعداد خوشه ۳۰ به‌دست آمد. در این شرایط پارامترهای آماری ضریب همبستگی، خطای مربع میانگین ریشه، انحراف استاندارد و میانگین انحراف نسبی مطلق برای داده‌های آزمون به‌ترتیب ۰/۹۹۴۷، ۰/۵۵۸۹/۵۷۲۶ و ۰/۷۳۹۶ به‌دست آمدند. در این روش ۳۰ قانون برای ایجاد سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی مورد نظر ایجاد شد. مقدار ضریب همبستگی برای داده‌های آموزش و آزمون در این روش به‌ترتیب ۰/۹۹۷۷ و ۰/۹۹۴۷ است.

سیستم استنتاج فازی استفاده شده دیگر، روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی است. بهترین مدل به‌دست‌آمده در این روش دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل قبلی است. در این روش مقدار شعاع نفوذ در فاصله‌ی ۱/ تا ۳۸/ مورد بررسی قرار گرفت و بهترین نتیجه برای شعاع نفوذ با مقدار ۲۴۵/ به‌دست آمد. در این شرایط پارامترهای آماری ضریب همبستگی، خطای مربع میانگین ریشه، انحراف استاندارد و میانگین انحراف نسبی مطلق برای داده‌های آزمون به‌ترتیب ۰/۹۹۷۲، ۰/۵۴۷۴، ۰/۵۴۵۴ و ۰/۱۸۰ به‌دست آمدند. در این روش ۴۶ قانون برای ایجاد سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی مورد نظر ایجاد شد. یک قانون یک عبارت ریاضی است که مقدار یک پارامتر را اصلاح می‌کند و شکل ارتباطی بین پارامترهای مختلف را تعیین می‌نماید.

الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای یک ساختار استنتاج فازی نوع تاکاگی-سوگنو تک‌خروجی را به‌عنوان شرایط اولیه برای آموزش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی با استفاده از شبکه‌بندی داده‌ها تولید می‌کند. در این روش نوع توابع عضویت ورودی‌ها به چهار شکل مثلثی، زنگوله‌ای، گاوسی و شبه پی و نوع توابع عضویت خروجی به دو شکل ثابت و خطی در نظر گرفته شد. تعداد قوانین ایجادشده برای این مدل‌ها به‌ترتیب ۶۲۵، ۲۵۶، ۱۲۹۶ و ۱۲۹۶ است. نتایج بهترین مدل‌سازی‌ها با الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای برای نوع و تعداد مختلف توابع عضویت به همراه مقادیر پارامترهای آماری در جدول ۳ آورده شده است. از بین چهار نوع تابع عضویت ذکرشده برای روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای، تابع عضویت ورودی نوع شبه پی با تعداد ۵ عدد تابع عضویت، خروجی نوع خطی و تعداد ۱۲۹۶ قانون ایجاد شده دارای بیشترین ضریب همبستگی با مقدار ۰/۹۹۷۵ و کمترین خطای میانگین مربعات ریشه با مقدار ۰/۴۱۹۹ برای داده‌های آزمون بوده است. بنابراین از بین سه روش ذکرشده، روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت نوع شبه پی دارای بهترین عملکرد در مدل‌سازی بوده است و نمودار انطباق داده‌های آزمایشگاهی و آزمون و نمودارهای ضرایب همبستگی فقط برای این مدل رسم شده است. در این شرایط پارامترهای آماری ضریب همبستگی، خطای مربع میانگین ریشه، انحراف استاندارد و میانگین انحراف نسبی مطلق برای داده‌های آزمون به‌ترتیب ۰/۹۹۷۵، ۰/۴۱۹۹،

دارای یک افزایش ۱۱، ۱۶ و ۱۸ درصدی به میزان ۳، ۴ و ۵ درجه کلون است. مقدار اختلاف دمای خروجی سرد برای دبی جرمی سرد از ۳/۰ تا ۴/۰، برای همین سه محدوده فشار ثابت و برابر ۳۰، ۲۸ و ۳۲ درجه کلون است. اُفت اختلاف دمای خروجی سرد برای مقدار دبی جرمی هوای سرد بیشتر از ۴/۰ اتفاق می‌افتد. اختلاف دمای خروجی سرد برای دبی جرمی سرد ۴/۰ تا یک در سه محدوده فشار ذکر شده به ترتیب دارای یک کاهش ۵۳، ۲۸ و ۲۷ درصدی به میزان ۱۶، ۸ و ۹ درجه کلون است.

با توجه به نمودار ۶- الف مشخص است که بیشینه اختلاف دمای خروجی سرد در تمامی دبی‌های جرمی سرد، در محدوده فشار ۵۵/۰ تا ۶/۰ مگاپاسکال اتفاق می‌افتد و برابر مقدار ۳۲ درجه کلون است. میزان اُفت اختلاف دمای خروجی سرد در این فشار نسبت به دو محدوده فشار دیگر کمتر و در حدود ۲۷٪ است. بنابراین عملکرد لوله گردابه‌ای در فشارهای بالا بهتر است و توصیه می‌شود از مجموعه در فشارهای بالا استفاده نمود.

با توجه به نمودار ۶- ب مشخص است که در مقدار زاویه نازل از ۲۰ تا ۳۰ درجه مقدار اختلاف دمای خروجی سرد در دبی جرمی سرد ۳/۰ به بیشترین مقدار خود می‌رسد و برابر ۴۵ درجه کلون است. از مقدار ۳/۰ تا یک دبی جرمی سرد، اختلاف دمای خروجی اُفت شدید در حدود ۵۵٪ دارد. از مقدار زاویه نازل ۳۰ تا ۵۰ درجه برای دبی جرمی سرد صفر تا ۶/۰، مقدار اختلاف دمای خروجی سرد تقریباً یکنواخت و با شیب ملایم از ۲۵ تا ۳۰ درجه افزایش می‌یابد و در مقدار دبی جرمی سرد ۷/۰ به مقدار بیشینه ۴۱ درجه کلون می‌رسد. در مقدار زاویه نازل از ۵۰ تا ۸۰ درجه بیشترین مقدار اختلاف دمای خروجی سرد در مقدار دبی جرمی سرد ۳/۰ رخ می‌دهد. تغییرات اختلاف دمای خروجی سرد در مقدار زاویه ذکر شده از مقدار دبی جرمی سرد صفر تا ۳/۰ مثبت و از ۳/۰ تا یک منفی است.

با توجه به توضیحات بالا می‌توان نتیجه گرفت برای کاربردهای صنعتی که میزان دبی جرمی سرد بیشتری مورد نیاز است، لوله گردابه‌ای در مقدار زاویه نازل ۲۵ تا ۳۵ بهترین عملکرد را دارا است. برای کاربردهای آزمایشگاهی که مقدار دبی جرمی سرد کمتر از ۵/۰ مد نظر است، در زاویه خروجی نازل بین ۲۰ تا ۳۰ درجه، لوله گردابه‌ای بهترین عملکرد را دارا است. با توجه به نمودار ۶- پ مشخص است، زمانی که تعداد نازل‌ها ۵ یا ۶ عدد باشد، لوله گردابه‌ای دارای عملکرد بهتری است و مقدار اختلاف دمای خروجی به بیشترین مقدار خود در حدود ۳۴ درجه کلون برای دبی جرمی سرد ۳/۰ می‌رسد. بنابراین توصیه می‌شود جهت کاربردهای آزمایشگاهی لوله گردابه‌ای از تعداد ۵ یا ۶ نازل استفاده شود. در کاربردهای صنعتی می‌توان هم از تعداد نازل کم در حد ۳ نازل یا از تعداد نازل بیشتر در حد ۵ یا ۶ نازل استفاده کرد.

رسیدن به تابع مطلوبیت نهایی می‌توان آنها را با استفاده از فرمول ۱۳ با یکدیگر ترکیب نمود. برای هر مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، ۱۲ تابع به عنوان توابع مطلوبیت جزئی (چهار پارامتر آماری) طبقه‌بندی سه‌گانه داده‌های آموزش، آزمون و کل داده‌ها) تعریف شده است. مقدار صفر برای هر کدام از این توابع ( $d_z$ ) می‌تواند تابع مطلوبیت کلی را صفر کند.

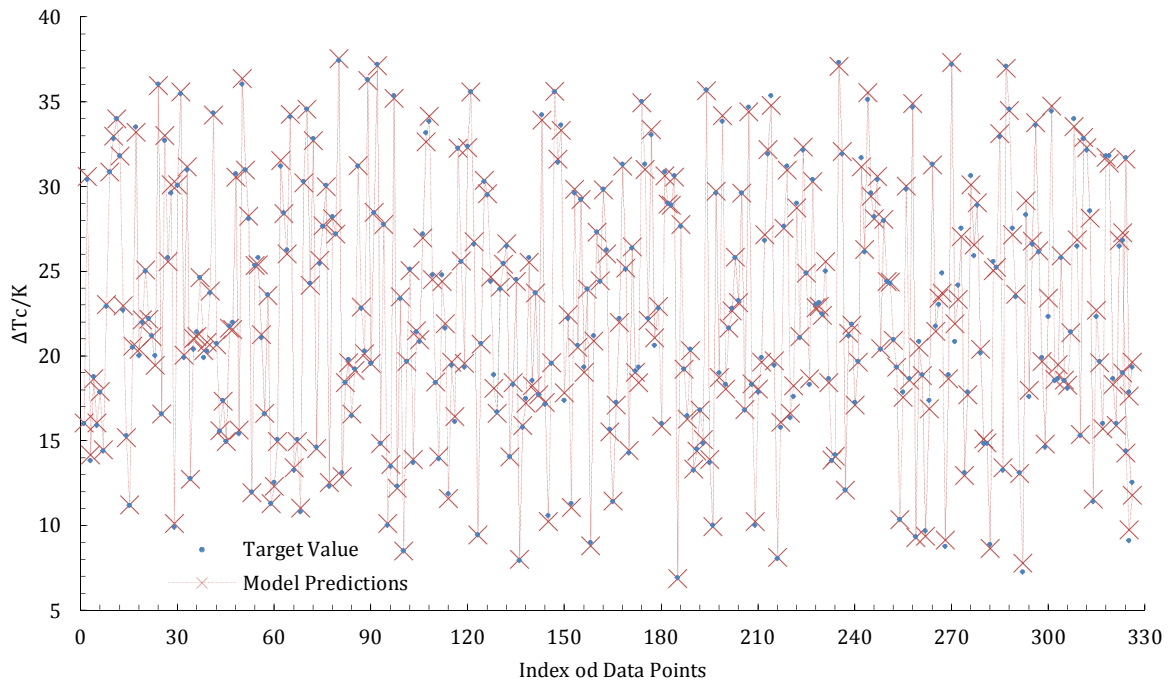
همان طور که در نمودار ۴ قابل مشاهده است، مطلوبیت کلی در مدل‌های سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی توسعه‌یافته مبتنی بر الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی و الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت نوع زنگوله‌ای منجر به صفر شده است. بهترین مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی توسعه‌یافته برای برآورد اختلاف دمای خروجی سرد در لوله‌های گردابه‌ای مبتنی بر روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت ورودی نوع شبه پی با مقدار مطلوبیت کلی ۷۱/۰ است. برای مدل ذکر شده مقدار ضریب همبستگی داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۹۹۹۲/۰ و ۹۹۷۵/۰ است. روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت ورودی نوع گاوسی و روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی با مقدار مطلوبیت ۶۹/۰ و ۵۷/۰ از نظر اعتبار پیش‌بینی نتایج در جایگاه دوم و سوم قرار می‌گیرند. با توجه به توضیحات بالا ثابت شد که مدل‌سازی با استفاده از روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای و تابع عضویت ورودی از نوع شبه پی معتبرترین روش برای پیش‌بینی نتایج است.

جهت بررسی دقیق‌تر صحت نتایج مدل‌سازی، مقادیر حاصل از پیش‌بینی روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت ورودی نوع شبه پی با نتایج آزمایشگاهی در نمودار ۵ آورده شده است. نتایج برای فشار هوای ورودی ۵/۰ مگاپاسکال، تعداد نازل ۶، زاویه ۷۰ درجه و کسر جرمی سرد بین صفر تا یک محاسبه شده است. با توجه به نمودار ۵ مشخص است که مطابقت قابل قبولی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برقرار است و روند مشابهی را دنبال می‌نمایند.

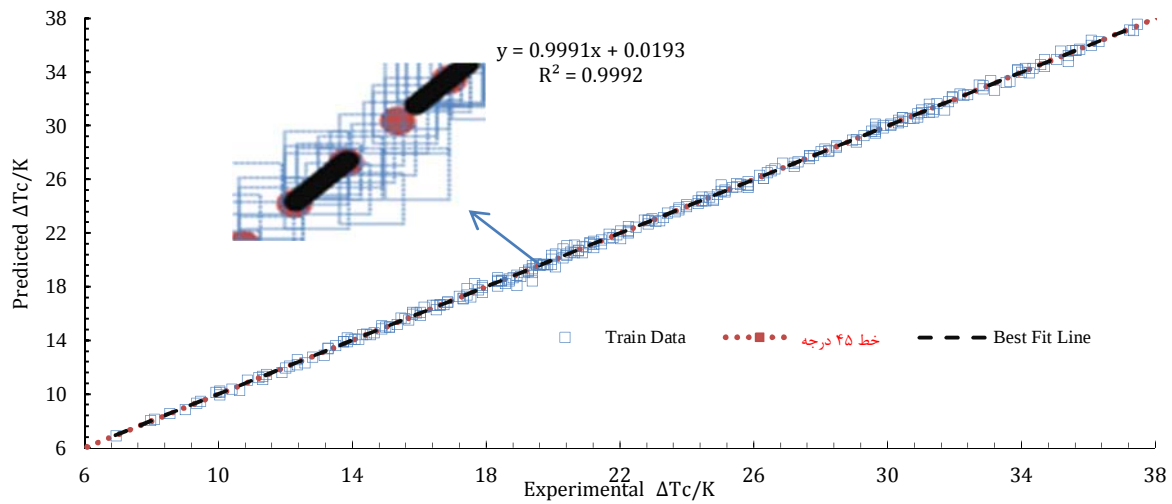
#### تحلیل نمودارهای خروجی نرم‌افزار متلب

تأثیر چهار متغیر ورودی فشار، تعداد نازل‌ها، زاویه نازل‌ها و کسر جرمی سرد بر اختلاف دمای خروجی سرد در اشکال سه‌بعدی به دست آمده از نرم‌افزار متلب برای پیش‌بینی نتایج با استفاده از روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت ورودی نوع شبه پی در نمودار ۶ نمایش داده شده است.

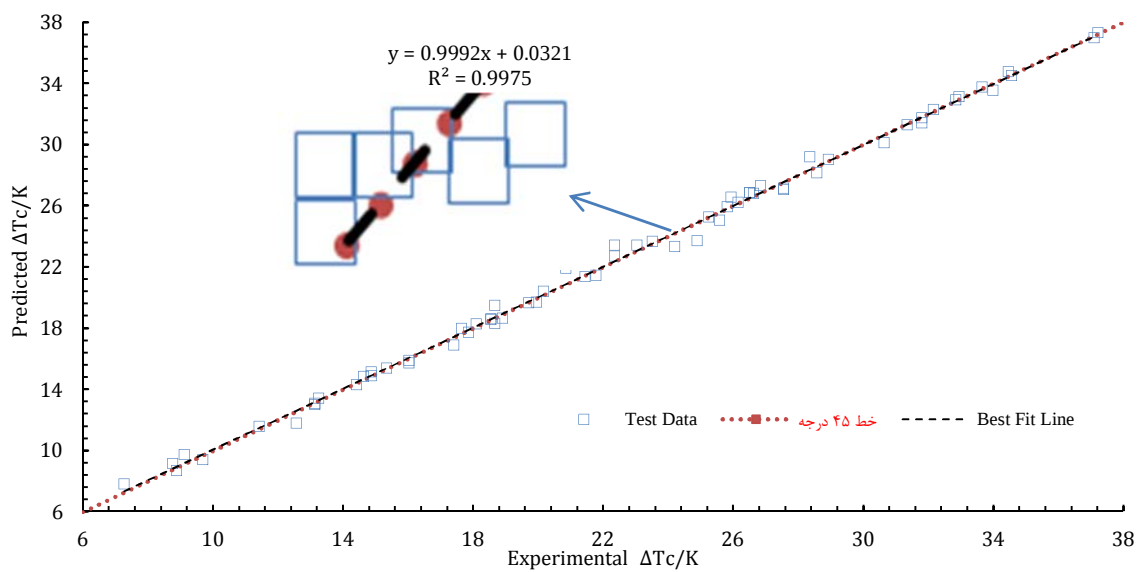
با توجه به نمودار ۶- الف، مشخص است که در تمامی فشارها با افزایش دبی جرمی سرد، اختلاف دمای خروجی سرد در ابتدا افزایش، سپس ثابت و بعد از آن کاهش می‌یابد. برای دبی جرمی سرد صفر تا ۳/۰، اختلاف دمای خروجی سرد در سه محدوده فشار صفر تا ۴۵/۰، ۴۵/۰ تا ۵۵/۰ و از ۵۵/۰ تا ۶/۰ مگاپاسکال، به ترتیب



(الف)

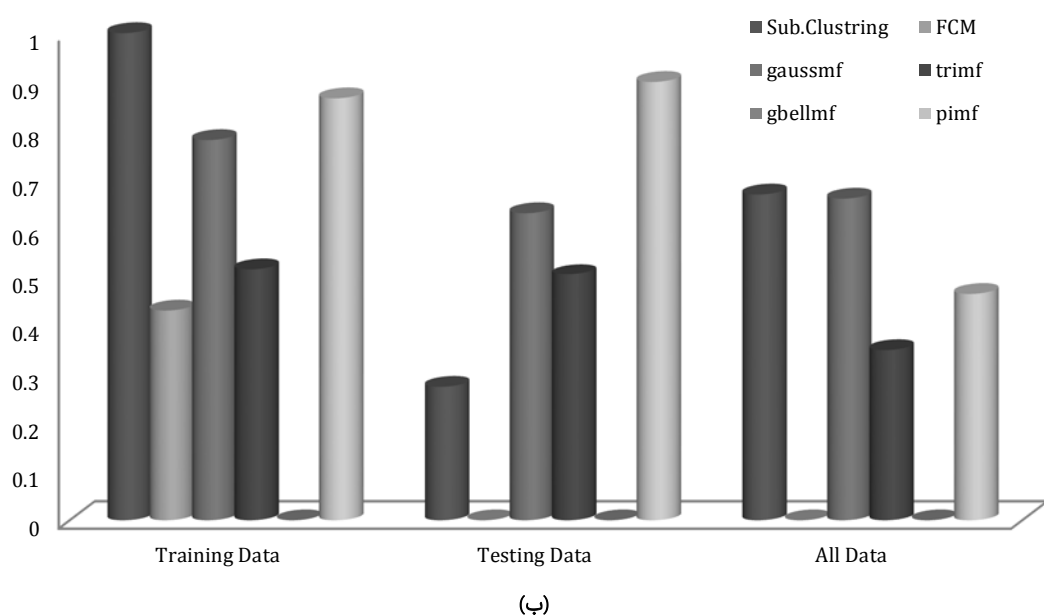
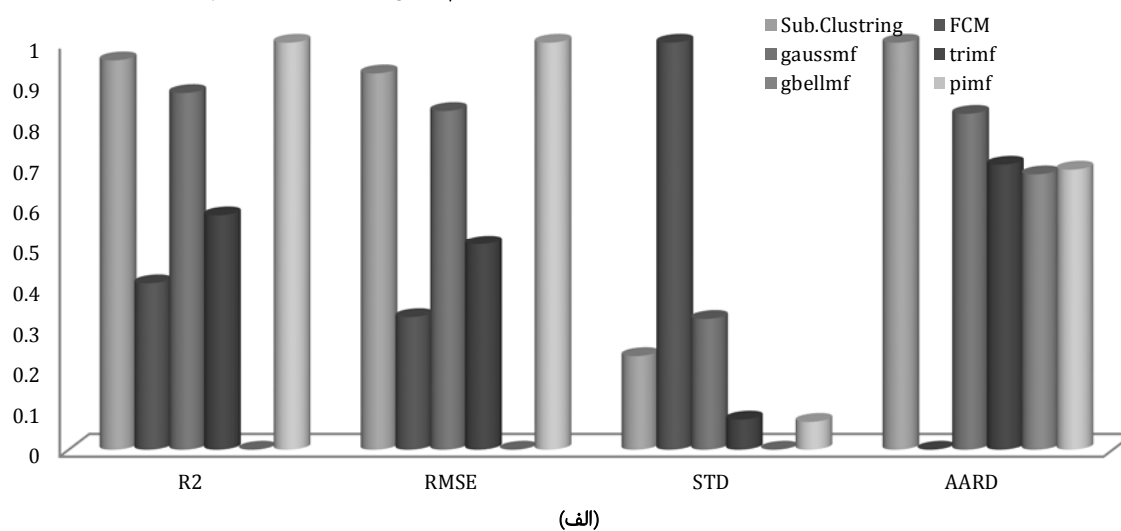


(ب)

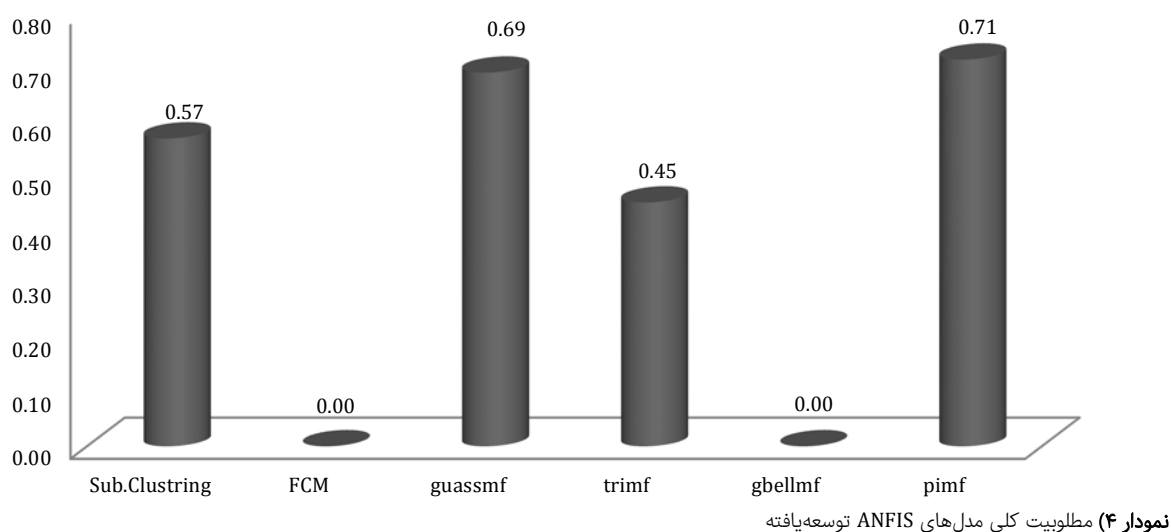


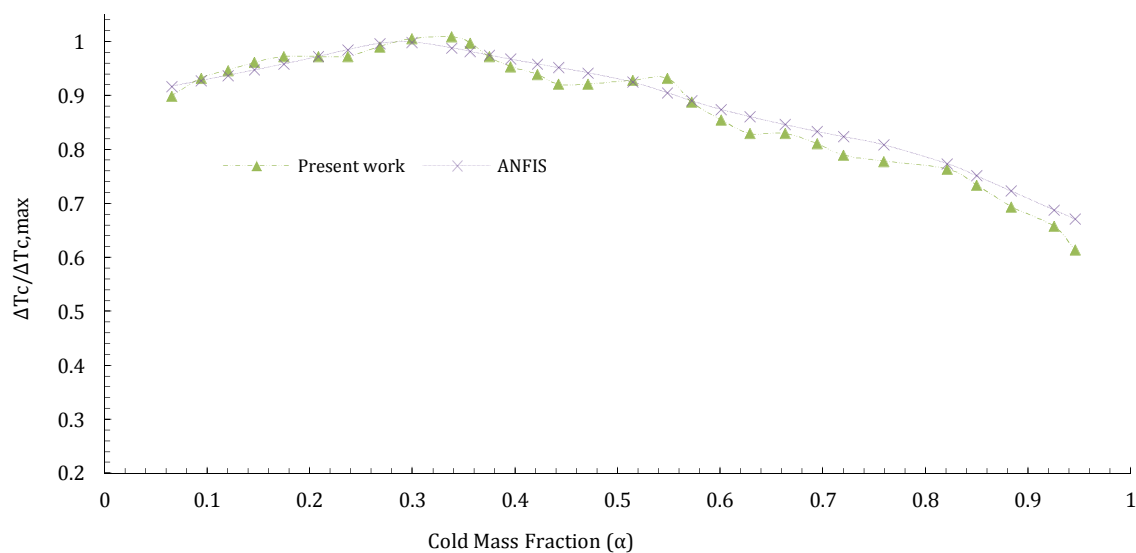
(پ)

**نمودار ۲)** پیش‌بینی نتایج با استفاده از روش GP (pimf): الف) مطابقت نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی مدل، ب) روابط بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی مدل برای داده‌های آموزش، پ) داده‌های آزمون

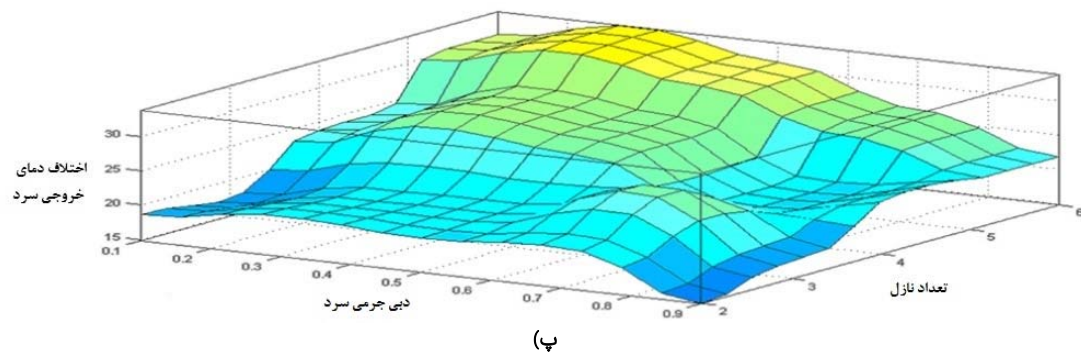
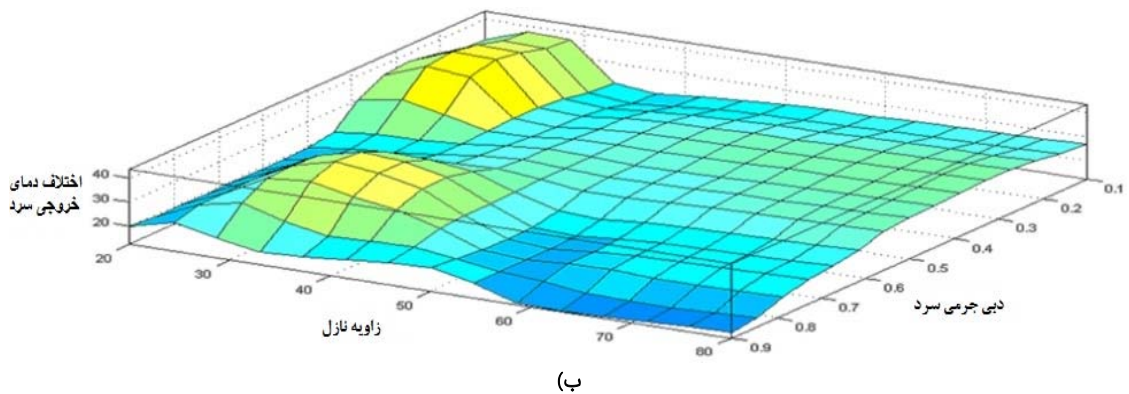
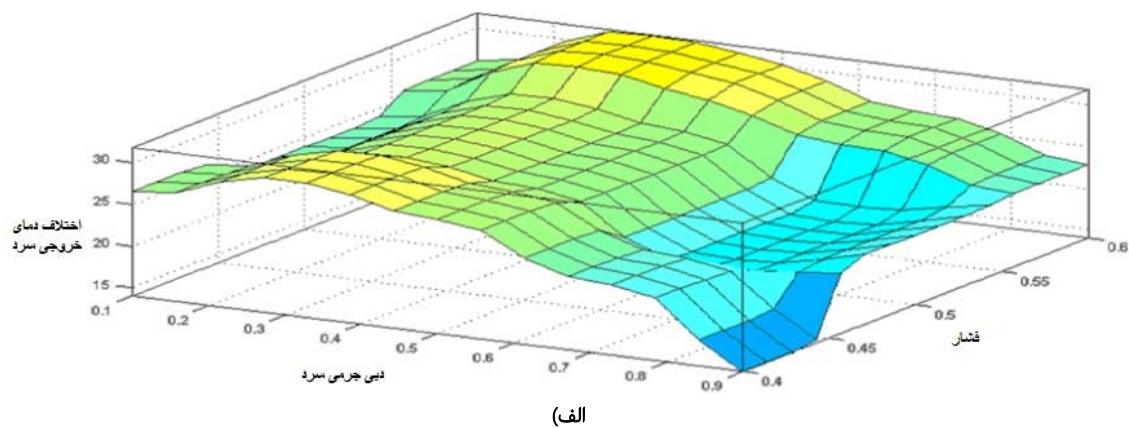


نمودار ۳) تابع مطلوبیت مدل ANFIS؛ الف) مطلوبیت جزئی پارامترهای آماری برای کل داده‌ها، ب) مطلوبیت کلی برای داده‌های آموزش، آزمون و کل داده‌ها





نمودار ۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل GP



نمودار ۶) منحنی سه بعدی مقایسه؛ الف) دبی جرمی سرد- فشار، ب) دبی جرمی سرد- زاویه نازل، پ) دبی جرمی سرد- تعداد نازل

#### فهرست علائم

|                     |                                 |
|---------------------|---------------------------------|
| <b>P</b>            | فشار (MPa)                      |
| <b>N</b>            | تعداد نازل                      |
| $\Delta T_c$        | اختلاف دمای خروجی سرد (K)       |
| <b>o</b>            | خروجی لایه                      |
| <b>z</b>            | مرکز تابع عضویت گوسین           |
| <b>x</b>            | پارامتر ورودی                   |
| <b>i</b>            | شمارنده                         |
| <b>m</b>            | وزن متغیر ورودی                 |
| <b>n</b>            | وزن متغیر ورودی                 |
| <b>p</b>            | وزن متغیر ورودی                 |
| <b>q</b>            | وزن متغیر ورودی                 |
| <b>r</b>            | وزن متغیر ورودی                 |
| $R^2$               | ضریب همبستگی                    |
| <b>AARD</b>         | میانگین انحراف نسبی مطلق        |
| <b>RMSE</b>         | انحراف استاندارد                |
| <b>STD</b>          | خطای مربع میانگین ریشه          |
| $d_i$               | مطلوبیت جزئی پارامتر آماری      |
| <b>y</b>            | مقدار پارامتر آماری             |
| <b>L</b>            | حداقل مقدار پارامتر آماری       |
| <b>U</b>            | حداکثر مقدار پارامتر آماری      |
| $D_{final}$         | مقدار مطلوبیت کلی پارامتر آماری |
| <b>t</b>            | تعداد کل داده‌ها                |
| <b>z</b>            | تعداد روش‌های مدل‌سازی          |
| <b>علائم یونانی</b> |                                 |
| $\theta$            | زاویه نازل                      |
| $\alpha$            | کسر جرمی سرد یا دبی جرمی سرد    |
| $\sigma$            | واریانس                         |
| <b>f</b>            | قانون                           |
| $\lambda$           | نتایج مدل عددی                  |
| $\bar{\lambda}$     | میانگین نتایج مدل عددی          |
| <b>زیرنویس‌ها</b>   |                                 |
| <b>Pred</b>         | پیش‌بینی                        |
| <b>EXP</b>          | آزمایشگاهی                      |
| <b>final</b>        | کلی                             |
| <b>c</b>            | سرد                             |

#### منابع

- 1- Li N, Jiang G, Fu L, Tang L, Chen G. Experimental study of the impacts of cold mass fraction on internal parameters of a vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 2019;104:151-160.
- 2- Xuea Y, Binnsa JR, Arjomandi M, Yanb H. Experimental investigation of the flow characteristics within a vortex tube with different configurations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;75:195-208.
- 3- Bazgir A, Heydari A, Nabhani N. Investigation of the thermal separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube with regard to different fin geometries located inside the coldtube length. *International*

#### نتیجه‌گیری

با استفاده از سه روش الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی، الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای و الگوریتم خوشه‌بندی اختیاری، اختلاف دمای خروجی سرد در لوله‌های گردابه‌ای شبیه‌سازی شده است. مدل‌سازی با روش الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای برای چهار حالت با توابع عضویت ورودی نوع گاوسی، زنگوله‌ای، مثلثی و شبه پی انجام شده و در مجموع نتایج برای شش حالت شبیه‌سازی ارایه شده است. بررسی و تحلیل توانایی پیش‌بینی مدل‌های ایجادشده با استفاده از چهار پارامتر آماری ضریب همبستگی، خطای مربع میانگین ریشه، انحراف استاندارد و میانگین انحراف نسبی مطلق انجام و مقایسه شد. برای هر شش حالت مقدار ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۵ به‌دست آمد و این نشان داد که تمامی روش‌ها برای پیش‌بینی اختلاف دمای خروجی لوله‌های گردابه‌ای پتانسیل خوبی دارند. با این حال، با استفاده از مفهوم تابع مطلوبیت ثابت شد که الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با استفاده از تعداد ۵ تابع عضویت ورودی نوع شبه پی برای هر کدام از ورودی‌ها، خروجی خطی و ۱۲۹۶ قانون ایجادشده، بهترین نتایج را به‌دست می‌دهد. در این روش مقدار مطلوبیت نهایی ۷۱٪ به‌دست آمد. مقدار پارامترهای آماری ضریب همبستگی، خطای مربع میانگین ریشه، انحراف استاندارد و میانگین انحراف نسبی مطلق در روش فوق برای کل داده‌ها به‌ترتیب ۰/۹۹۸۷، ۰/۲۶۸۷، ۰/۹۵۵۴ و ۰/۰۶۰۸ به‌دست آمد. الگوریتم منقطع‌سازی شبکه‌ای با تابع عضویت ورودی نوع گاوسی و الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی به‌ترتیب با داشتن مقدار تابع مطلوبیت کلی ۶۹٪ و ۵۷٪ از لحاظ اعتبار پیش‌بینی در جایگاه دوم و سوم قرار گرفتند. با تحلیل نمودارهای خروجی نرم‌افزار متلب مشخص شد که برای کاربردهای صنعتی لوله‌های گردابه‌ای که دبی جرمی سرد زیاد و در حدود ۷٪ مورد نیاز است، استفاده از ۳ یا ۶ عدد نازل، محدوده فشار ۵۵٪ تا ۶۰٪ مگاپاسکال و زاویه نازل ۲۰ تا ۳۰ درجه، بهترین عملکرد مجموعه را به‌دست می‌دهد. همچنین برای کاربردهای آزمایشگاهی زمانی که دبی جرمی سرد کم و در حدود ۳٪ مورد نیاز باشد، بهترین نتایج برای تعداد ۶ نازل، محدوده فشار ۵۵٪ تا ۶۰٪ مگاپاسکال و زاویه نازل ۲۵ تا ۳۵ درجه به‌دست آمد.

**تشکر و قدردانی:** از جناب آقای دکتر سید احسان رفیعی بابت همکاری قدردانی می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

**تعارض منافع:** هیچ گونه تعارض منافع با سازمان‌ها و اشخاص دیگر وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** محمدباقر محمدصادقی‌آزاد (نویسنده اول)، پژوهشگر

operation using vibration analysis. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):261-269. [Persian]

20- Jahanbakhshi A, Ahmadi Nadoshan A. Simulation of passive heating solar wall and prediction the temperature by Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy model (ANFIS). *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(2):159-169. [Persian]

21- Sedghee Rostami H, Rezaie B. Controlling state of quantum system using fuzzy controller. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(9):124-134. [Persian]

22- Saidi MH, Valipour MS. Experimental modeling of vortex tube refrigeration. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23(15):1971-1980.

23- Promvong P, Eiamsa-ard S. Investigation on the vortex thermal separation in a vortex tube refrigeration. *Science Asia Journal*. 2005;31(3):215-223.

24- Dincer K, Tasdemir S, Baskaya S, Uysal BZ. Modeling of the effects of length to diameter ratio and nozzle number on the performance of counterflow Ranque-Hilsch vortex tubes using artificial neural networks. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(17-18):2380-2390.

25- Tatar A, Barati-Harooni A, Najafi-Marghmaleki A, Mohebbi A, Ghiasi MM, Mohammadi AH, et al. Comparison of two soft computing approaches for predicting CO<sub>2</sub> solubility in aqueous solution of piperazine. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2016;53:85-97.

26- Najafi-Marghmaleki A, Khosravi-Nikou MR, Barati-Harooni A. A new model for prediction of binary mixture of ionic liquids+ water density using artificial neural network. *Journal of Molecular Liquids*. 2016;220:232-237.

27- Nasery S, Barati-Harooni A, Tatar A, Najafi-Marghmaleki A, Mohammadi AH. Accurate prediction of solubility of hydrogen in heavy oil fractions. *Journal of Molecular Liquids*. 2016;222:933-943.

28- Tatar A, Nasery S, Bahadori A, Bahadori M, Najafi-Marghmaleki A, Barati-Harooni A. Implementing radial basis function neural network for prediction of surfactant retention in petroleum production and processing industries. *Petroleum Science and Technology*. 2016;34(11-12):992-999.

29- Tatar A, Nasery S, Bahadori M, Bahadori A, Bahadori M, Barati-Harooni A, et al. Prediction of water removal rate in a natural gas dehydration system using radial basis function neural network. *Petroleum Science and Technology*. 2016;34(10):951-960.

30- Hilsch R. The use of expansion of gases in a centrifugal field as a cooling process. *Review of Scientific Instruments*. 1947;18(2):108-113.

31- Stephan K, Lin S, Durst M, Huang F, Seeer D. An investigation of energy separation in a vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1983;26(3):341-384.

32- Zadeh LA. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338-353.

33- Safari H, Nekoeian S, Shirdel MR, Ahmadi H, Bahadori A, Zendehboudi S. Assessing the dynamic viscosity of Na-K-Ca-Cl-H<sub>2</sub>O aqueous solutions at high-pressure and high-temperature conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014;53(28):11488-11500.

34- Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985;15(1):116-132.

35- Sharifi A, Aliyari Shoorehdeli M, Teshnehlab M. Semi-

*Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019;108:104273.

4- Hamdan MO, Al-Omari SAB, Oweimer AS. Experimental study of vortex tube energy separation under different tube design. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018;91:306-311.

5- Eiamsa-ard S. Experimental investigation of energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube with multiple inlet snail entries. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010;37(6):637-643.

6- Tiwari NK, Sihag P, Kumar S, Ranjan S. Prediction of trapping efficiency of vortex tube ejector. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2018;26(1):59-67.

7- Attalla M, Ahmed H, Ahmed MS, El-Wafa AA. An experimental study of nozzle number on Ranque Hilsch counter-flow vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017;82:381-389.

8- Pouraria H, Kia SM, Park WG, Mehdizadeh B. Modeling the cooling performance of vortex tube using a genetic algorithm based artificial neural network. *Thermal Science*. 2016;20(1):53-65.

9- Li N, Zeng ZY, Wang Z, Han XH, Chen GM. Experimental study of the energy separation in a vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 2015;55:93-101.

10- Han X, Li N, Wu K, Wang Z, Tang L, Chen G, et al. The influence of working gas characteristics on energy separation of vortex tube. *Applied Thermal Engineering*. 2013;61(2):171-177.

11- Valipour MS, Niazi N. Experimental modeling of a curved Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator. *International Journal of Refrigeration*. 2011;34(4):1109-1116.

12- Devade K, Pise A. Effect of cold orifice diameter and geometry of hot end valves on performance of converging type ranque hilsch vortex tube. *Energy Procedia*. 2014;54:642-653.

13- Rafiee SE, Sadeghiazad MM. Three-dimensional and experimental investigation on the effect of cone length of throttle valve on thermal performance of a vortex tube using K-ε turbulence model. *Applied Thermal Engineering*. 2014;66(1-2):65-74.

14- Sadi M, Gord Mahmood F. Introducing annular vortex tube and experimental comparison of its performance with vortex tube. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(11):166-167. [Persian]

15- Ahadiyan J. Application of anfis adaptive system to estimate the potential consolidation of clay soils. *Journal of Modeling in Engineering*. 2016;14(45):17-31. [Persian]

16- Koohsari H, Najafi A, Alielahi H, Adampira M. Evaluation of influential factors on the dynamic compaction operation of granular soils based on fuzzy method. *Journal of Modeling in Engineering*. 2016;13(43):143-158. [Persian]

17- Rafiee SE, Sadeghiazad MM. Experimental and 3D CFD investigation on heat transfer and energy separation inside a counter flow vortex tube using different shapes of hot control valves. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:648-664.

18- Salehi A, Montazeri M, Mohammadi E. Induction motor control using ANFIS controller and IWO optimization algorithm for using in HIL testing of turbojet FCU. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;13(11):77-87. [Persian]

19- Khajavi M, Nasernia E. Applications of intelligent methods in online diagnosis of tool wear in milling

36- Mostafaei M. ANFIS models for prediction of biodiesel fuels cetane number using desirability function. Fuel. 2018;216:665-672.

polynomial Takagi-Sugeno-Kang type fuzzy system for system identification and pattern classification. The Journal of Organic Chemistry. 2010;4(3):15-28. [Persian]