



Inference System Based on Fuzzy Clustering to Display the Flow Field Changes in the Rotor Outlet of Centrifugal Turbomachinery

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Dalilsafaei S.^{*1} MSc,
Montazerin N.¹ PhD,
Fazel Zarandi M.H.² PhD

How to cite this article

Dalilsafaei S, Montazerin N, Fazel Zarandi M.H. Inference System Based on Fuzzy Clustering to Display the Flow Field Changes in the Rotor Outlet of Centrifugal Turbomachinery. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(6):1495-1505.

ABSTRACT

In this paper, a fuzzy clustering system is presented to display the flow field changes in the rotor outlet of centrifugal turbomachinery. What is important in the research done in the field of turbomachinery is the need for all the fields to properly understand the phenomena of flow inside the turbomachines, which has complexities. For this reason, the most advanced laboratory equipment is used in this regard, which is associated with issues such as time consuming, high costs, and a large number of required tests, and doubles the importance of simulating and observing current phenomena through artificial intelligence algorithms. The present system operates on the basis of fuzzy clustering so that the spatial data (from the PIV measurement system) by the number of specific clusters to the field display in the initial time; then, by applying changes to the cluster related to the time series (from the system measurement of LDA) that contains the recorded changes of the current during the time of the data mining, the new field data are obtained at a new time step and the clustering of the data shows the variation of the flow field in the fuzzy environment. In this paper, the flow field was investigated for 6 successive steps, and the results of the system output showed the variation of the flow field from the rotor rotation at different angles.

Keywords Centrifugal Turbomachinery; Turbulent Flow Field; Inference System; Fuzzy Clustering; Laser Measuring Systems

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

²Industrial Engineering Department, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

dalilsafaei@aut.ac.ir

Article History

Received: August 09, 2018

Accepted: December 16, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Application of particle image displacement ... [2] Flow structure in a radial flow pumping ... [3] Quantitative visualization of the flow in ... [4] Quantitative visualization of the flow ... [5] The effect of inlet guide vanes wake impingement ... [6] Stereo PIV measurements in an enclosed rotor-stator ... [7] Application of SPIV in ... [8] Three-dimensional flow field characteristics ... [9] Application of stereoscopic particle ... [10] Measurement of the flow field after the Squirrel Nest fan ... [11] Measurement of the turbulent field ... [12] Fuzzy sets ... [13] Prediction of turbulence statistics behind a square ... [14] Using a fuzzy piecewise regression ... [15] Fuzzy prediction of AWJ turbulence ... [16] Classification of turbulent flow patterns ... [17] A new approach to ... [18] FCM: The fuzzy c-means clustering ... [19] An automatic approach to continuous stress assessment ... [20] Fuzzy clustering with biological knowledge ... [21] Extracting optimal fuzzy knowledge ... [22] Designing a hierarchical neural network ... [23] A multiobjective spatial fuzzy ... [24] Colour image segmentation using ... [25] Robust fuzzy clustering-based ... [26] Clustering customers of Refah Bank branches ... [27] A high-order multi-variable fuzzy time ... [28] A clustering based forecasting ... [29] A non-linear clustering method for fuzzy ... [30] Measurements of the mean flow ... [31] Particle image velocimetry: A ... [32] Laser Doppler anemometry: Recent ... [33] A new convergence proof of fuzzy ... [34] Principles of fuzzy set theory and its ... [35] A new method of choosing the number ... [36] A validity measure for fuzzy ... [37] Cluster validity index for fuzzy ... [38] Generalized possibilistic fuzzy ...

ارایه یک سیستم استنتاجی براساس خوشه‌بندی فازی برای پیدایش تغییرات در میدان جریان خروجی روتور توربوماشین گریز از مرکز

سیف دلیل صفائی * MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

نادر منتظرین PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

محمدحسین فاضل زرنندی PhD

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به ارایه سیستمی بر مبنای خوشه‌بندی فازی برای نمایش تغییرات میدان جریان در ناحیه خروجی روتور توربوماشین گریز از مرکز پرداخته شده است. آنچه در پژوهش‌های انجام‌گرفته در حوزه توربوماشین‌ها حایز اهمیت است، نیاز تمامی زمینه‌ها به درک صحیح از پدیده‌های جریان داخل توربوماشین است که از پیچیدگی‌هایی برخوردار است. به همین سبب از پیشرفته‌ترین تجهیزات آزمایشگاهی در این راستا استفاده می‌شود که با مسایلی از قبیل زمان‌بری، هزینه بالا و تعداد زیاد آزمایش‌های مورد نیاز همراه است که اهمیت شبیه‌سازی و رصد پدیده‌های جاری در آن را به واسطه الگوریتم‌های هوش مصنوعی دوچندان می‌کند. سیستم حاضر براساس خوشه‌بندی فازی به‌گونه‌ای عمل می‌کند که داده‌های مکانی (از سیستم اندازه‌گیری تصویر ذره‌ای) توسط تعداد خوشه معین به نمایش میدان در زمان اولیه می‌پردازد، سپس با اعمال تغییرات در خوشه مربوط به رشته داده‌های زمانی (از سیستم اندازه‌گیری بادنسجی لیزری) که حاوی تغییرات ثبت‌شده از جریان در طول زمان داده‌برداری است، داده‌های جدید میدان در گام زمانی جدید حاصل می‌شود و با خوشه‌بندی مجدد داده‌ها، نمایش تغییرات میدان جریان در فضای فازی صورت می‌پذیرد. در مقاله حاضر، میدان جریان برای شش گام زمانی پیاپی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج خروجی سیستم، تغییرات میدان جریان ناشی از چرخش روتور در زوایای مختلف را در ناحیه داده‌برداری شده نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: توربوماشین گریز از مرکز، میدان جریان آشفته، سیستم استنتاجی، خوشه‌بندی فازی، سیستم‌های اندازه‌گیری لیزری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

*نویسنده مسئول: dalilsafaei@aut.ac.ir

۱- مقدمه

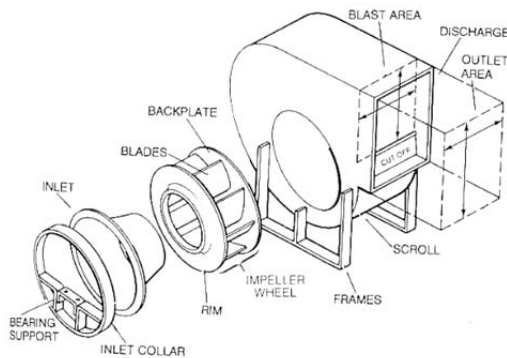
پژوهش‌های انجام‌گرفته در حوزه توربوماشین‌ها، اهداف متفاوتی را به دنبال دارند. افزایش کارایی، کاهش وزن، کاهش حجم، کاهش نویز، افزایش مقاومت مکانیکی در برابر تنش‌ها و غیره، زمینه‌های تحقیقاتی مطرح توربوماشین‌ها به حساب می‌آیند. اما آنچه در این بین حایز اهمیت بوده، نیاز کلیه این زمینه‌ها به درک صحیح جریان سیال داخل ماشین است. از همین رو، پیشرفته‌ترین روش‌های آزمایشگاهی و عددی بررسی جریان سیال، در توربوماشین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از تکنیک تصویر ذره‌ای (PIV) برای بررسی میدان جریان در توربوماشین‌ها برای اولین بار در تحقیقات آزمایشگاهی توسط پاون و همکاران^[1] صورت گرفت که در آن به بررسی دنباله در جریان خروجی از کانال بین دو پره در یک کمپرسور سانتریفیوژ پرداخته شد. بعد از آن اکین و راکول^[2] با استفاده از یک مدل پروانه به بررسی دنباله و برخورد آن با پره‌های ثابت دیفیوزر در یک ماشین چرخان پرداخته‌اند. در سال‌های بعد نیز استفاده از این روش به‌طور جدی‌تری مورد توجه قرار گرفت، به‌طوری که سینها و کتر^[3] و

همچنین سینها و همکاران^[4] به بررسی الگوی جت- دنباله و برخورد دنباله به پره‌های استاتور در یک پمپ سانتریفیوژ پرداخته‌اند.

سورانا و همکاران^[5] با اعمال اندازه‌گیری PIV در یک توربوماشین محوری دو مرحله به بررسی جریان در لبه ورودی و خروجی پره‌های روتور که بعد از پره‌های راهنمای ورودی قرار گرفته‌اند، پرداخته و تحلیل‌های مفصلی در مورد خصوصیات میدان توربولانسی و اثر دنباله بر آن ارایه داده‌اند. بریکاد و همکاران^[6] نیز با استفاده از یک رویکرد سه‌بعدی، اقدام به اخذ میدان سرعت لحظه‌ای و متوسط بین پره‌های روتور و استاتور در یک توربین فشار بالا نموده‌اند و لئو و همکاران^[7] با کاربرد یک ترکیب هندسی دقیق‌تر این سیستم به بررسی جریان بین پره‌های پروانه یک کمپرسور محوری کم‌سرعت پرداخته‌اند. اولین تحقیقات در زمینه بررسی جریان در فن‌های گریز از مرکز با استفاده از تکنیک‌های تصویر ذره‌ای توسط دنگر و مک‌براید^[8] صورت گرفت که در آن به بررسی ساختارهای جت- دنباله در نواحی نزدیک‌تر به صفحه پشتی روتور با تحلیل انرژی جنبشی شعاعی در جریان خروجی از روتور انجام شده است. چو و همکاران^[9] از روش SPIV به اندازه‌گیری میدان سرعت در مقاطع داخلی و خارجی روتور پرداخته و پیچیدگی‌های جریان جت دنباله را در این دو مقطع مقایسه کردند. در تحقیق‌های داخلی نیز مطالعاتی توسط کبر/زاده و همکاران^[10] و با استفاده از تکنیک‌های تصویر ذره‌ای با هدف شناخت جریان خروجی از روتور صورت گرفته است که کمیت‌های توربولانسی را به‌صورت مقدماتی مورد بررسی قرار دادند. همچنین در پژوهشی که توسط کبری^[11] انجام شده است، مطالعه‌ای مفصل روی مشخصه‌های بنیادین جریان جت- دنباله مانند میدان سرعت و تغییر شکل سیال، آنیزوتروپی جریان و اثر تقابل جت- دنباله و حلزونی بر آن صورت گرفت.

بررسی مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهد بر خلاف سادگی ساخت، فرآیند جریان در توربوماشین‌ها پیچیده است. رویکرد کنونی رصد پدیده‌های میدان جریان، تست دستگاه در شرایط واقعی با استفاده از ابزار اندازه‌گیری پیشرفته لیزری است. در حالی که این روش تحقیقاتی، با مشکلات زیادی از قبیل زمان‌بری، هزینه بالا و تعداد زیاد آزمایش‌های مورد نیاز همراه است. همین نکته، شبیه‌سازی و بررسی میدان جریان با استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی را به امری حایز اهمیت مبدل می‌سازد. از موثرترین سیستم‌های هوش مصنوعی، الگوریتم‌های مبتنی بر منطق فازی است که توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی و امروزه به‌طور وسیعی در علوم مختلف به کار گرفته می‌شود^[12]. در زمینه مکانیک سیالات نیز استفاده از منطق فازی به‌دلیل بررسی و مطالعه جریان توربولانس، طی سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. پانیکراهی و همکاران^[13] به پیش‌بینی پارامترهای آماری توربولانس از قبیل پروفیل سرعت متوسط و تنش رینولدزی در یک کانال مربعی با دو الگوریتم فازی و شبکه عصبی پرداختند. در نتایج تحقیق صورت‌گرفته نشان داده شد که مدل‌سازی با منطق فازی، عملکرد موفق‌تری با توجه به حجم محاسباتی کمتر و ضریب همبستگی بالاتر، نسبت به مدل شبکه عصبی دارد. تی‌سنگ و همکاران^[14] طی پژوهشی به بررسی آنالیز رگرسیون چندضابطه‌ای فازی با روش تغییر اتوماتیک نقطه تشخیص در پیش‌بینی سری زمانی غیرخطی برای یک جریان توربولانسی نزدیک دیواره پرداختند و اثر مطلوب مدل استفاده‌شده در این پژوهش نشان داده شد. همچنین لیانگ و همکاران^[15] پیش‌بینی فازی مشخصه‌های

صدای کمتر و حجم کوچک فن مورد بررسی باعث کاربری فراوان، به‌خصوص در صنعت تهویه مطبوع شده که کولرهای آبی، فن‌کویل‌ها و هواسازها از جمله موارد استفاده از آن است (شکل ۱).

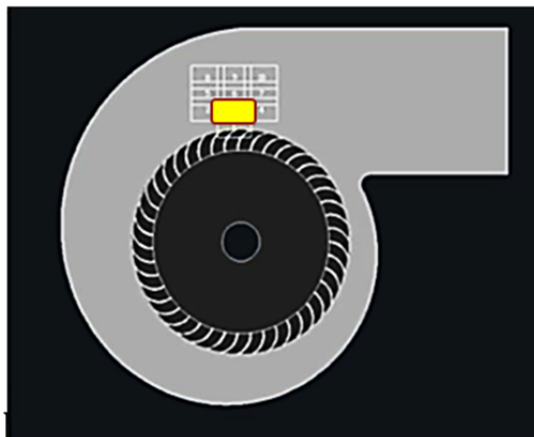


شکل ۱) اجزا و قسمت‌های یک فن قفس سنجابی

نکته قابل توجه در مورد روتور فن‌های گریز از مرکز، وجود الگوی جت- دنباله در جریان خروجی از آن است که در عملکرد و راندمان توربوماشین اثر بسزایی خواهد داشت و اهمیت آن موجب مطالعات و پژوهش‌های متعدد در این راستا شده است [30].

۲-۲- داده‌های تکنیک تصویر ذره‌ای

این روش یک تکنیک نوری غیرمداخله‌گر اندازه‌گیری سرعت است که توانایی ثبت توزیع سرعت‌های لحظه‌ای در یک سطح مقطع محدود و صفحه‌ای میدان جریان را فراهم می‌سازد. روش اندازه‌گیری PIV براساس تعقیب ذرات موجود در جریان در یک فاصله زمانی بسیار کوتاه بنا شده است. این ذرات معمولاً به‌صورت خارجی در جریان تزریق می‌شود و ناحیه مورد نظر برای اندازه‌گیری توسط یک صفحه لیزر با ضخامت قابل تنظیم روشن خواهد شد. بدین ترتیب، ذرات موجود در این صفحه برای دوربین قابل رویت می‌شوند. معمولاً برای روشن کردن ناحیه، از لیزری با قابلیت تولید دوپالسی در فاصله زمانی بسیار کوتاه (میکروثانیه) استفاده می‌شود. به‌کاربردن دوربین‌هایی با توانایی عکس‌برداری دو فریمی باعث افزایش دقت در به‌دست‌آوردن بردارهای سرعت می‌شود. در این شرایط، نور پخش‌شده از ذرات در دوپالسی مجزای لیزر توسط فریم‌های مستقل دوربین، دریافت و در CCD ذخیره می‌شود (شکل ۲) [31].



شکل ۲) موقعیت مکانی نواحی اندازه‌گیری‌شده در توربوماشین توسط سیستم PIV

توربولانسی در سیستم واترجت برشی را با هدف بهبود بخشیدن عملکرد ماشین، مورد بررسی قرار دادند. ویریت و کاپ [16] نیز طی پژوهشی با طبقه‌بندی الگوهای جریان توربولانسی توسط سیستم خوشه‌بندی فازی به بررسی یک تکنیک تشخیص الگو برای شناسایی نقاط بحرانی در جریان آشفته براساس خوشه‌بندی C میانگین فازی پرداختند.

سیستم خوشه‌بندی یکی از الگوریتم‌های حایز اهمیت فازی است که نخستین بار توسط راسپینی معرفی شد [17]. خوشه‌بندی به مفهوم دسته‌بندی اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم براساس تشابه بین آنها است، به‌طوری که عضوهای متعلق به یک خوشه (دسته) براساس معیارها و ویژگی‌های مورد نظر، بیشترین شباهت را داشته باشند و همچنین عضوهای یک دسته با دسته دیگر بیشترین تفاوت ممکن را داشته باشند. خوشه‌بندی فازی نیز یکی از روش‌های مطرح برای تعیین ساختار سیستم‌های فازی بوده و از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت و فرآیند خودکاری است که طی آن، نمونه‌ها به دسته‌هایی که اعضای آن مشابه یکدیگر هستند، تقسیم می‌شوند. الگوریتم پایه و پرکاربرد خوشه‌بندی در فازی، سیستم خوشه‌بندی C میانگین است [18] و در مسایل متنوعی مانند تشخیص استرس [19]، انتخاب ژن [20]، وزن‌دهی لایه‌های مکانی در محیط GIS [21]، عیب‌یابی و تشخیص خطا [22]، پردازش تصویر [23-25]، پردازش اطلاعات مشتریان بانکی [26] و پیش‌بینی سری‌های زمانی فازی [27-29] مورد توجه قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر، برای اولین بار در بررسی میدان جریان خروجی روتور توربوماشین گریز از مرکز، با بهره‌گیری از الگوریتم خوشه‌بندی C میانگین فازی، سیستم استنتاجی طراحی شده است که با ایجاد ارتباط میان داده‌های مکانی و زمانی، تغییرات میدان جریان در طول زمان را در محیط فازی ارائه می‌دهد. نوآوری صورت‌گرفته طی این پژوهش به این دلیل حایز اهمیت است که پیدایش و رصد تغییرات میدان جریان توسط سیستم استنتاجی فازی نسبت به روش تحقیقاتی براساس ابزار آزمایشگاهی پیشرفته لیزری، بار مالی و صرف زمانی بسیار کمتری را به‌همراه دارد.

سیستم استنتاجی ارائه‌شده، متشکل از سه فرآیند اصلی زیر است که هر یک با هدف خاص خود بر مبنای خوشه‌بندی فازی عمل می‌کنند:

- ۱- فرآیند شبیه‌سازی میدان جریان در فضای فازی با استفاده از داده‌های مکانی تکنیک تصویر ذره‌ای (گام ابتدایی و چهارم)
- ۲- فرآیند تعیین قرارگیری نقاط داده‌های زمانی تکنیک بادنسی دپلر لیزری (LDA) در خوشه‌های ایجادشده (گام دوم)
- ۳- فرآیند تعیین رفتار داده‌های مکانی خوشه‌ها توسط اطلاعات مبتنی بر داده‌های زمانی و تشکیل داده‌های جدید میدان جریان (گام سوم).

عملکرد سیستم براساس فرآیندهای فوق، طی چهار گام صورت می‌پذیرد که در ادامه به‌طور مفصل هر یک از چهار گام تشریح و در نهایت، نتایج خروجی سیستم برای نمایش تغییرات میدان جریان طی ۶ درجه چرخش روتور توربوماشین مورد نظر ارائه خواهد شد.

۲- تشریح توربوماشین و داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی

۲-۱- فن قفس سنجابی

توربوماشین گریز از مرکز مورد بررسی، فن قفس سنجابی است که از خانواده فن‌های جریان شعاعی به حساب می‌آید. فن‌های جریان شعاعی از یک حلزونی و یک پروانه تشکیل می‌شود که درون حلزونی به چرخش در می‌آید. ساخت راحت و کم‌هزینه، ایجاد

۳- تشریح مفاهیم و الگوریتم‌ها

۳-۱- سیستم خوشه‌بندی فازی C میانگین

سیستم خوشه‌بندی فازی C میانگین از یک الگوریتم تکرارشونده تشکیل شده است و به یک نقطه (کمینه موضعی یا یک نقطه زینی) همگرا می‌شود. روند عملکرد خوشه‌بندی C میانگین فازی نیز مشابه الگوریتم C میانگین کلاسیک، به گونه‌ای است که تعداد خوشه‌ها (C) در ورودی سیستم مشخص می‌شود. تابع هدف تعریف شده برای این الگوریتم به صورت زیر است و این تابع هدف کمینه می‌شود تا خوشه‌هایی با بیشینه فشردگی تولید کند [33].

$$J(U, V; X) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \|x_k - v_i\|_A^2 \quad (1)$$

در معادله ۱، m یک عدد حقیقی بزرگ‌تر از یک است که در اکثر موارد، عدد ۲ براساس تعریف اولیه صورت گرفته توسط نزدیک انتخاب می‌شود.

X_k نمونه kام است و V_i نماینده یا مرکز خوشه iام است. U_{ik} میزان تعلق نمونه iام در خوشه kام را نشان می‌دهد. علامت $\|*\|$ میزان تشابه نمونه با مرکز یا فاصله آن از مرکز خوشه است. می‌توان از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد، استفاده کرد و به صورت زیر تعریف نمود:

$$\|\vec{x}_k - \vec{v}_i\|_A^2 = (\vec{x}_k - \vec{v}_i)^T A (\vec{x}_k - \vec{v}_i) \quad (2)$$

نیز یک ماتریس $r \times r$ Ar می‌توان به ماتریس کواریانس با فاصله ماهالانویس که خوشه‌های بیضوی تولید می‌کند اشاره کرد:

(۳)

$A = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\vec{x}_k - \vec{v}) (\vec{x}_k - \vec{v})^T \right)^{-1}$, $\vec{v} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \vec{x}_k$ از روی U_{ik} می‌توان یک ماتریس U تعریف نمود که دارای C سطر و n ستون است و مولفه‌های آن هر مقداری بین صفر تا یک می‌تواند باشد. در صورتی که تمامی مولفه‌های ماتریس U به صورت صفر یا یک باشند، الگوریتم، مشابه C میانگین کلاسیک خواهد بود.

مولفه‌های ماتریس U می‌توانند هر مقداری بین صفر تا یک را اختیار کنند، اما مجموع مولفه‌های هر یک از ستون‌ها باید برابر با یک باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \forall k = 1, \dots, n \quad (4)$$

شرط ۲-۳ به این معنا خواهد بود که مجموع تعلق هر نمونه به C خوشه باید برابر با یک باشد.

حال با استفاده از شرط فوق و مینیمم کردن تابع هدف ۳-۱، u_{ik} و v_i به صورت زیر ظاهر می‌شود:

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{2/(m-1)}} \quad (5)$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^n u_{ik}^m} \quad (6)$$

۳-۱-۱- مراحل الگوریتم

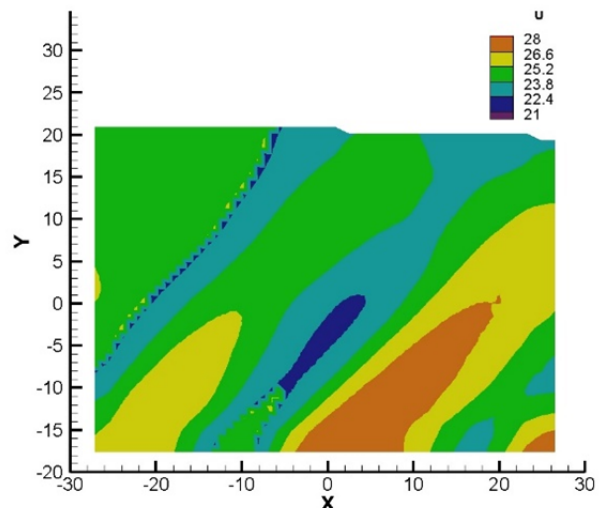
الگوریتم خوشه‌بندی C میانگین فازی از چهار مرحله اصلی تشکیل می‌شود که به شرح زیر است:

۱- مقداردهی اولیه برای C، m و همچنین U^0 خوشه‌های اولیه حدس زده می‌شوند.

۲- مراکز خوشه‌ها محاسبه می‌شوند (محاسبه v_i ها).

داده‌های مورد استفاده از این سیستم که اطلاعات میدان جریان را به همراه خود دارد، شامل مختصات مکانی هر نقطه از میدان جریان و سرعت متناظر آن در راستاهای مختلف است.

طی این مقاله، داده‌های مکانی سرعت جریان در راستای U که شامل ۳۱۹۹ نقطه در صفحه است، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نرم‌افزار Tecplot 360، داده‌های این روش اندازه‌گیری به صورت کانتوری نمایش داده می‌شود (نمودار ۱).



نمودار ۱) نمایش کانتوری میدان جریان در راستای U از داده‌های سیستم اندازه‌گیری PIV

۳-۲- داده‌های تکنیک بادنسی دپلر لیزری

داده‌های استفاده شده از تکنیک بادنسی دپلر لیزری که اطلاعات جریان برای یک مختصات مکانی ثابت در طول زمان اندازه‌گیری را به همراه خود دارد، شامل فواصل زمانی داده‌برداری از زمان شروع برحسب میکروثانیه و سرعت‌های متناظر با هر زمان ثبت شده است. در آزمایشات انجام گرفته برای هر دور چرخش کامل روتور، ۸۱ میلی‌ثانیه ثبت شده است.

روش بادنسی دپلر لیزری، ابزاری است که مزیت آشفته‌نساختن روش‌های اپتیکی را دارد و کمیت سرعت‌ها را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌کند. همچنین این ابزار، توانایی دریافت سریع را داشته و برای اندازه‌گیری افت و خیزهای مغشوش فرکانس بالا نیز مناسب است.

روش این سیستم به گونه‌ای است که یک نور توسط یک دستگاه لیزر، ایجاد و از میان یک سلول بزرگ (سلول براگ) گذشته و به دو اشعه با شدت یکسان تقسیم می‌شود. سپس یک منشور، نور را به طول موج‌های جداگانه تقسیم می‌کند و اشعه به سمت پراپ‌ها از طریق فیبر نوری با شاخص مدرج، فرستاده می‌شود. نور پراکنده شده به وسیله یک فیبر دریافتی، جمع‌آوری و با یک جداکننده دو رنگ‌نما (آشکارساز)، تقسیم‌بندی و در نهایت، در دیود حساسی نسبت به نور متمرکز می‌شود.

این سیگنال به سمت پردازشگر شماره‌گر عبور کرده و پردازشگر به وسیله تقسیم‌بندی فاصله‌ها، سرعت را محاسبه می‌کند. سرعت‌ها نیز به یک کامپیوتر فرستاده می‌شوند، به طوری که آنها همزمان علایم را رمزگذاری می‌کنند. در این سیستم، اندازه‌گیری‌ها در نقاط امتداد خط متقاطع انجام می‌شود تا یک تصویر میانگین زمانی از سرعت جریان میانگین ایجاد شود [32].

بیشتر است. بنابراین مینیمم‌کردن تابع زیر می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی خوشه‌بندی و تعداد خوشه‌ها باشد [36]:

$$V_{XB}(U; V; X) = \frac{\sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^N u_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2}{n(\min\{v_i - v_j\})} \quad (10)$$

۳-۲-۳- تابع معیار Kwon

این تابع هم همانند توابع معرفی شده فوق با خاصیت مینیمم‌شدن در خوشه مطلوب، از دیگر روابط معیار کارایی است.

$$CVI_K = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C u_{ij}^m \|\bar{x}_j - \bar{v}_i\|_A^2 + \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \|\bar{v}_i - \bar{v}\|_A^2}{\min_{i,j=1} \{\|\bar{v}_i - \bar{v}_j\|_A^2\}, i \neq j} \quad (11)$$

مخرج کسر در رابطه ۹، نشان‌دهنده جدایی خوشه‌ها و صورت آن معیاری برای فشردگی خواهد بود. بنابراین با کوچک‌تر شدن صورت کسر که نشان‌دهنده فشردگی بیشتر خوشه‌ها و بزرگ‌تر شدن مخرج کسر که جدایی بیشتر خوشه‌ها را نشان می‌دهد، تابع به سمت مینیمم‌شدن میل می‌کند و در کوچک‌ترین مقدار خود، مقدار مطلوب تعداد کلاستر را نشان خواهد داد [37].

۳-۲-۴- تابع معیار CVI2

هدف از ارایه این ایندکس، ایجاد یک تابع معیار برای داده‌هایی با نویز بالا بوده است و تابع آن بر خلاف سایر توابع معرفی شده، در حالت ماکزیمم خود، تعداد کلاستر مطلوبی را ارایه می‌دهد. به‌طوری که:

$$CVI_2 = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N |f(u_{kj}, t_{kj}) - f(u_{ij}, t_{ij})|^{g(m,\eta)} \quad (12-الف)$$

$$g(m, \eta) = m, f(u_{ij}, t_{kj}) = u_{ij}, f(u_{ikj}, t_{kj}) = u_{kj}$$

معرفی می‌شوند، بنابراین:

$$CVI_2 = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N |u_{kj} - u_{ij}|^m \quad (12-ب)$$

بر این اساس، معیار جدایی به‌عنوان اختلاف کلی بین u_{ij} و t_{ij} هر ترکیب مناسبی از این دو بر واحد خوشه تعریف می‌شود که باید پیشینه شود تا جدایی پیشینه شود [38].

۴- تشریح عملکرد سیستم استنتاجی ایجادشده

روش مورد نظر در این مقاله به‌منظور نمایش تغییرات میدان جریان، ایجاد ارتباط میان اطلاعات دو داده مکانی و زمانی با استفاده از خوشه‌بندی فازی است. بر این اساس، روند سیستم به‌شکل زیر صورت می‌پذیرد:

گام اول: ایجاد الگوی میدان جریان، با استفاده از خوشه‌بندی فازی داده‌های صفحه PIV

گام دوم: تعیین موقعیت نقطه اندازه‌گیری شده LDA در تصویر ایجادشده در گام نخست

گام سوم: پیش‌بینی رفتار داده‌های خوشه مربوطه براساس تغییرات نقطه معلوم در طول زمان

گام چهارم: جایگزین نمودن تغییرات صورت‌گرفته بر داده‌های اولیه و نمایش تغییرات میدان با خوشه‌بندی داده‌های جدید.

۴-۱- ایجاد الگوی میدان جریان

با بهره‌گیری از خوشه‌بندی، به ایجاد تصویر الگوی جریان معادل در قالب فازی خواهیم پرداخت. پیش‌بینی تغییرات میدان جریان در

۳- محاسبه ماتریس تعلق از روی خوشه‌های محاسبه‌شده در مرحله ۲

۴- تحقق شرط $\|U+1-U\| \leq \varepsilon$ برای خاتمه الگوریتم (در غیر این صورت، بازگشت به مرحله ۲).

با در نظر گرفتن معیار تشابه در تابع هدف براساس فاصله می‌توان از مدل‌های گوناگون استفاده کرد که در طول پروژه حاضر، توابع زیر مورد بررسی قرار گرفت:

فاصله ماهالانوبیس:

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{(\vec{x} - \vec{y})^T S^{-1} (\vec{x} - \vec{y})} \quad (7)$$

فاصله اقلیدسی:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

۳-۲- توابع معیارهای کارایی

خوشه‌بندی به روش C میانگین، باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که دو ویژگی مهم زیر را در خود داشته باشد:

۱- نمونه‌های موجود در یک خوشه تا حد امکان شبیه به یکدیگر باشند.

۲- نمونه‌های متعلق به خوشه‌های متفاوت تا حد امکان با یکدیگر نامتشابه باشند. به عبارت دیگر، خوشه‌ها باید ماکزیمم فشردگی را داشته باشند و تا حد امکان جدایی آنها نیز زیاد باشد [34].

اگر تنها، معیار فشردگی مورد استفاده قرار گیرد، در آن صورت، هر داده می‌تواند به‌صورت یک خوشه در نظر گرفته شود، چرا که هیچ خوشه‌ای فشردتر از خوشه‌ای با یک داده نیست. اگر تنها، معیار جدایی در نظر گرفته شود، در این صورت، بهترین خوشه‌بندی، با قراردادن کل داده‌ها در یک خوشه صورت می‌گیرد، با این فرض که فاصله هر خوشه از خودش صفر است. برای تعیین تعداد خوشه‌های مناسب با خصایص فوق در یک مجموعه داده، توابع متعددی تاکنون ایجاد و مورد استفاده قرار است که با عنوان تابع معیار کارایی از آن یاد می‌شود. در این پژوهش، چهار تابع مطرح برای سنجش تاثیر تعداد خوشه‌ها بر کیفیت خوشه‌بندی داده‌های میدان جریان اولیه، تشریح خواهد شد و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲-۱- تابع معیار Fukuyama and Sugeno

در این تابع، میانگین $\bar{v}$ کل نمونه‌ها است و انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب با مینیمم‌کردن تابع به دست می‌آید. تعداد خوشه‌هایی که به‌ازای آنها تابع حاضر، کمترین مقدار را داشته است، به‌عنوان تعداد خوشه‌های مناسب برای آن مساله مورد استفاده قرار می‌گیرد [35].

$$V_{FS,m}(U, V; X) = \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^N u_{ik}^m (\|x_k - v_i\|^2 - \|\bar{v}_i - \bar{v}\|_A^2) \quad (9)$$

در واقع، جمله اول در تابع فوق معیاری برای فشردگی خوشه‌ها و جمله دوم، معیاری برای جدایی خوشه‌ها از هم خواهد بود. هر چه خوشه‌ها فشردتر باشند، جمله اول کوچک‌تر و هر چه جمله دوم بزرگ‌تر باشد، جدایی خوشه‌ها بیشتر است. بنابراین مینیمم‌کردن تابع فوق می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی خوشه‌بندی و تعداد خوشه‌ها باشد.

۳-۲-۲- تابع معیار Xie and Beni

انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب در این تابع نیز با مینیمم‌کردن تابع به دست می‌آید. در واقع، صورت کسر تابع فوق معیاری برای فشردگی خوشه‌ها و مخرج کسر، معیاری برای جدایی خوشه‌ها از هم است. هر چه خوشه‌ها فشردتر باشند، صورت کسر کوچک‌تر خواهد بود و هر چه مخرج کسر بزرگ‌تر باشد، جدایی خوشه‌ها

معیار کارآیی برای بررسی کارآیی سیستم نسبت به تعداد متفاوتی از کلاسترها استفاده می‌شود. در نهایت، خوشه‌بندی صورت گرفته باید به گونه‌ای باشد که تصویر حاصل از آن، خطوط اصلی جریان صفحه مورد نظر را نمایش دهد (جدول‌های ۱ و ۲).

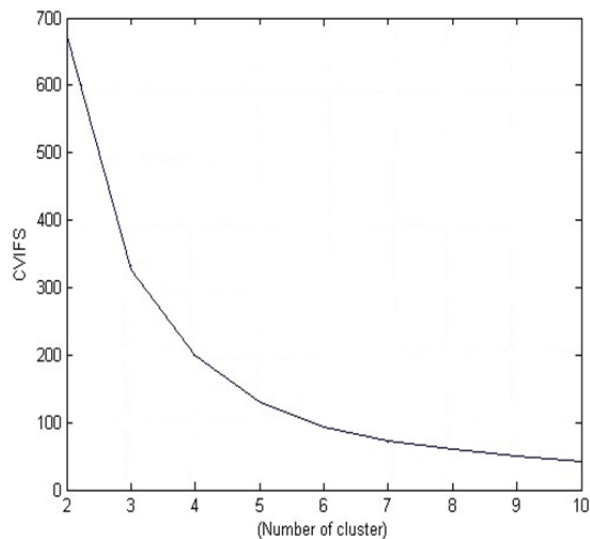
زوایای دیگر چرخش روتور نیز بر مبنای این الگو صورت خواهد گرفت. برای یک سیستم فازی C میانگین، خوشه‌ها باید طوری تعیین شوند که بیشترین تجمع داده‌ها به مراکز مربوطه و جدایی مطلوب مراکز خوشه‌ها از یکدیگر در نظر گرفته شود. طی این بخش، از توابع

جدول (۱) مقادیر توابع معیار در تعداد خوشه‌های ۲ تا ۱۰ برای اندازه سرعت (U) با Mahalanobis distance

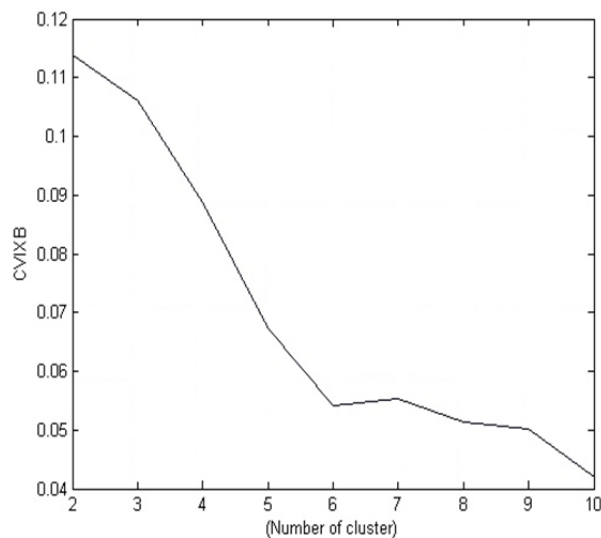
مدل‌های اجرا	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
CVI2	۲/۳۹۸۱e+۰۳	۲/۹۶۲۱e+۰۳	۳/۲۲۲۲e+۰۳	۳/۵۳۳۳e+۰۳	۳/۷۱۴۳e+۰۳	۳/۸۰۶e+۰۳	۳/۸۲۶e+۰۳	۳/۸۶۰۱e+۰۳	۳/۹۵۶e+۰۳
CVIFS	۶۷۵/۹۶۷۲	۳۲۷/۱۶۶۱	۱۹۹/۸۲۱۶	۱۲۹/۴۴۷۹	۹۳/۰۷۳۷	۷۲/۴۰۵۹	۵۹/۴۷۵۴	۴۹/۵۵۰۳	۴۱/۴۹۱۸
CVIXB	۰/۱۱۳۹	۰/۱۰۶۱	۰/۰۸۸۷	۰/۰۶۷۳	۰/۰۵۴۲	۰/۰۵۵۴	۰/۰۵۱۴	۰/۰۵۰۱	۰/۰۴۲۰
CVIKW	۳۶۴/۸۲۸۰	۳۴۰/۳۳۹۶	۲۸۵/۲۴۱۱	۲۱۷/۳۶۷۴	۱۷۵/۵۹۳۲	۱۸۰/۰۹۰۵	۱۶۷/۶۴۳۹	۱۶۴/۰۹۴۴	۱۳۸/۲۲۱۳

جدول (۲) مقادیر توابع معیار در تعداد خوشه‌های ۲ تا ۱۰ برای راستای (U) با Euclidean distance

مدل‌های اجرا	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
CVI2	۲/۳۹۸۱e+۰۳	۲/۹۶۲۱e+۰۳	۳/۲۲۲۳e+۰۳	۳/۵۳۳۳e+۰۳	۳/۷۱۴۳e+۰۳	۳/۸۰۶۴e+۰۳	۳/۸۲۶۷e+۰۳	۳/۸۶۰۲e+۰۳	۳/۹۵۶۹e+۰۳
CVIFS	۲/۷۱۸۹e+۰۳	۱/۳۱۶۰e+۰۳	۸۰۳/۷۴۱۹	۵۲۰/۶۷۷۸	۳۷۴/۳۷۰۳	۲۹۱/۲۴۸۲	۲۳۹/۳۰۰۲	۱۹۹/۳۰۶۰	۱۶۶/۸۹۲۳
CVIXB	۰/۲۲۸۴	۰/۲۱۲۸	۰/۱۷۷۹	۰/۱۳۵۰	۰/۱۰۸۷	۰/۱۱۰۴	۰/۱۰۴۰	۰/۱۰۰۴	۰/۰۸۴۳
CVIKW	۷۳۱/۶۸۶۸	۶۸۲/۵۵	۵۷۲/۰۷	۴۳۵/۹۴۱۸	۳۵۲/۱۶۵۵	۳۵۸/۵۹۱۶	۳۳۸/۸۷۱۸	۳۲۹/۰۹۶۷	۲۷۷/۲۵۰۷

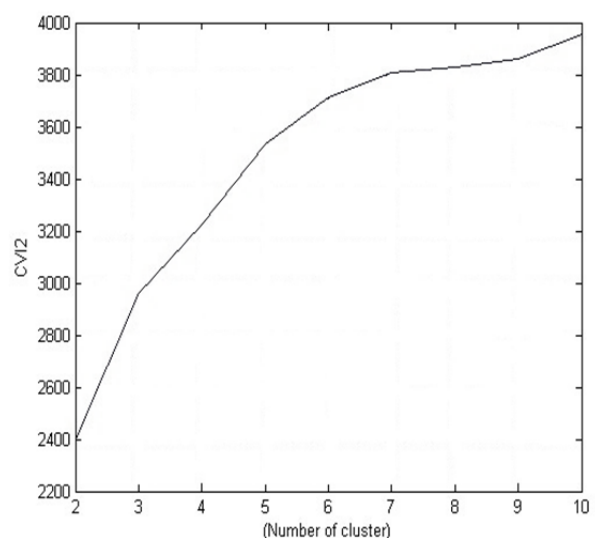


نمودار (۳) تابع معیار خوشه‌بندی Fukuyama and Sugeno

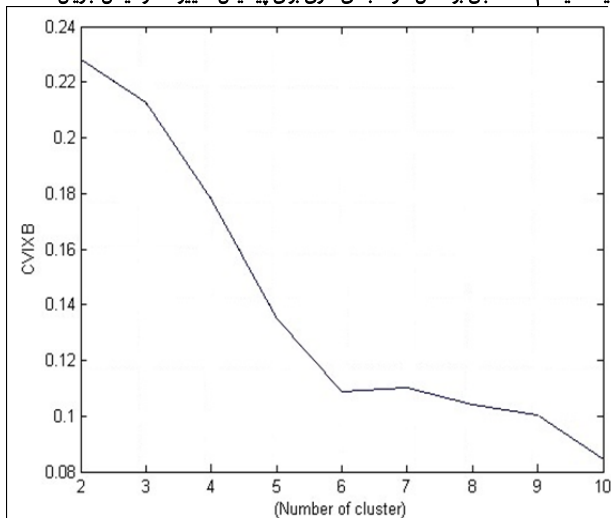


نمودار (۴) تابع معیار خوشه‌بندی Xie and Beni

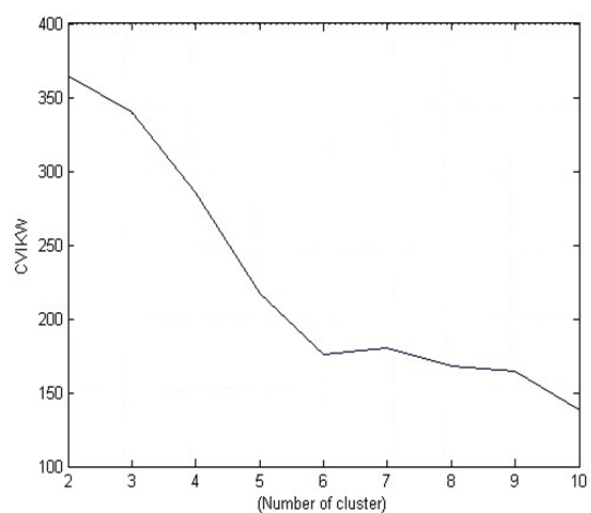
نتایج توابع معیار کارآیی تشریح شده در بخش ۳-۲، به صورت نمودارهایی برحسب تعداد خوشه‌ها ارائه می‌شود (نمودارهای ۹-۲). داده‌های مکانی میدان جریان در شرایط مختلف توسط چهار ایندکس مورد بررسی قرار گرفته شد. در هر مرحله تا ده خوشه، توابع کارآیی بررسی شد که نتایج خروجی از آن به دلیل تحلیل به صورت نمودارهایی ارائه شده شد. براساس آنچه در بخش ۳-۲ به طور مفصل ارائه شد، توابع معیار Fukuyama and Sugeno، Kwon و Xie and Beni تعداد بهینه خوشه را در حالت مینیم خود ارائه می‌دهند. نمودارهای این توابع تا ۱۰ مرحله پیشرفت، سیر تماماً نزولی داشته که حاکی از افزایش کیفی خوشه‌بندی با افزایش تعداد خوشه در داده‌های مکانی میدان جریان است. همچنین تابع معیار CVI2 که برای داده‌های نوین‌دار طراحی شده است، طی این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفت. طبق تعریف، این تابع در حالت ماکزیمم خود، تعداد کلاستر مطلوب را ارائه می‌دهد که نمودارهای آن سیر صعودی داشته و حاکی از افزایش کیفی خوشه‌بندی با افزایش تعداد خوشه در هر مرحله است.



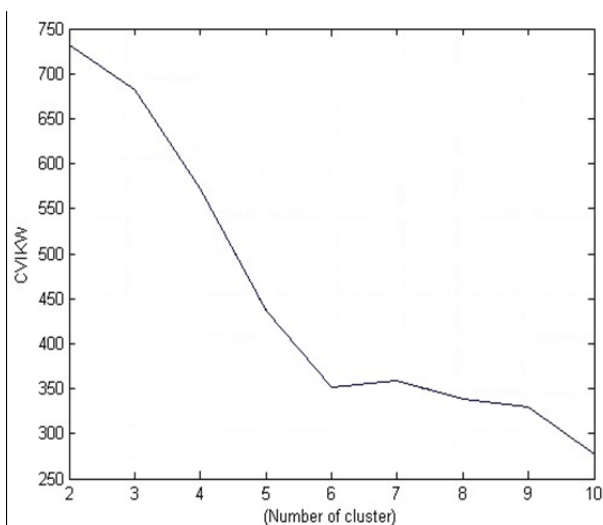
نمودار (۲) تابع معیار خوشه‌بندی CVI2



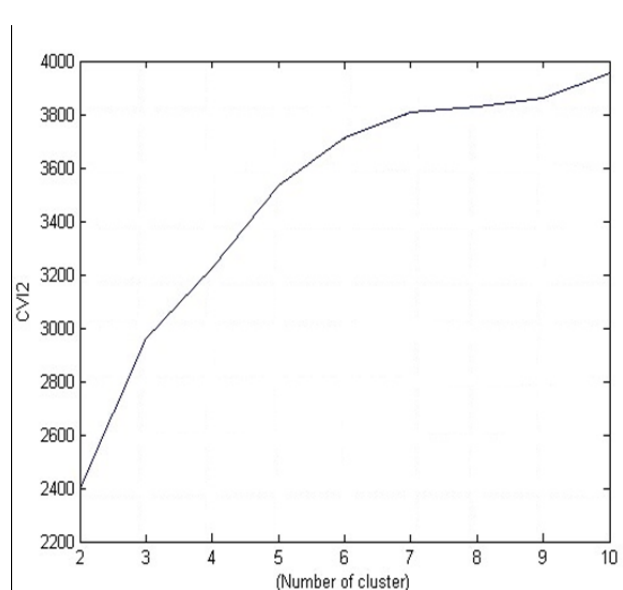
نمودار ۸) تابع معیار خوشه‌بندی Xie and Beni



نمودار ۵) تابع معیار خوشه‌بندی Kwon



نمودار ۹) تابع معیار خوشه‌بندی Kwon



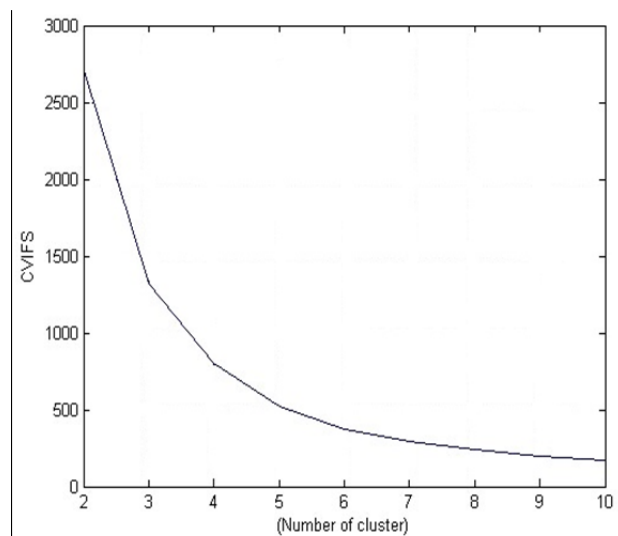
نمودار ۶) تابع معیار خوشه‌بندی CVI2

در پژوهش حاضر، هدف از خوشه‌بندی در مرحله نخست الگوریتم، ایجاد یک الگو از میدان جریان بوده و هدف نهایی، ایجاد ارتباط بین داده‌های مکانی و زمانی به‌منظور نمایش تغییرات میدان جریان نسبت به الگوی اولیه ایجاد شده است. بنابراین همان‌طور که افزایش تعداد خوشه‌ها براساس تابع معیار کارایی در کیفیت بهتر الگوی میدان جریان تأثیرگذار خواهد بود، تقسیم داده‌ها در خوشه‌های بیشتر و کم‌شدن داده‌های خوشه مربوط به اطلاعات نقطه LDA باعث کاهش سطح تغییرات در کل صفحه خواهد شد. بنابراین افزایش کلاستر را در سیستم خوشه‌بندی تا جایی ادامه می‌دهیم که:

۱- تصویر ایجادشده از خوشه‌بندی داده‌های PIV گویای رخداد پدیده جت- دنباله باشد.

۲- اختلاف پدیده‌های نمایش‌داده‌شده در تصویر میدان جریان نسبت به تصویر تعداد خوشه کمتر، محدود ارزیابی شود (ادامه افزایش تعداد کلاسترها بر کیفیت نمایش پدیده جت- دنباله میدان تأثیرگذار نباشد).

۳) مراکز خوشه‌های ایجادشده در فواصل منظمی نسبت به یکدیگر قرار گرفته باشند تا سطح تغییرات در میدان جریان با دقت



نمودار ۷) تابع معیار خوشه‌بندی Fukuyama and Sugeno

نهایت، داده‌های فوق متعلق به هر خوشه با کمترین فاصله از مرکز آن خواهد شد.

میانگین داده‌های نخست ثبت شده در هر دور LDA برای سرعت در راستای سرعت U برابر با ۱۹.۸۹ متر بر ثانیه است که از مقایسه با مراکز خوشه‌ها نیز متعلق به خوشه شماره یک خواهد بود.

۴-۳- تغییرات رفتار خوشه مربوط به نقطه LDA

در بخش گذشته، خوشه‌بندی فازی داده‌های صفحه PIV صورت گرفت. همان‌طور که تشریح شد، اساس خوشه‌بندی شدن داده‌ها رفتار و خصوصیات مشابه در یک خوشه است. از همین اصل، یکی دیگر از اهداف خوشه‌بندی فازی شکل می‌گیرد که در آن با داشتن داده‌های هر خوشه می‌توان به یک داده مجهول آن دست یافت یا با دراختیار داشتن رفتار یک داده از خوشه، سایر داده‌ها را پیش‌بینی کرد.

به‌منظور تحلیل داده‌ها در این بخش، هر یک از راستاهای داده‌برداری شده در سیستم LDA به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. داده‌های خروجی از این سیستم شامل سرعت در یک نقطه مکانی ثابت در دورهای متوالی از چرخش روتور است.

فاصله زمانی بین هر سرعت ثبت شده در واحد زمانی میلی‌ثانیه است و برای یک دور چرخش روتور به‌طور متوسط ۴۵۰ داده سرعت در فاصله ۸۱ میلی‌ثانیه گرفته می‌شود.

هر بار رسیدن به مبدا چرخش روتور در لیست با "sync1" مشخص می‌شود که سرعت صفر را در مقابل خود نشان می‌دهد. این همان جایی است که سرعت تمام نقاط توسط PIV ذخیره می‌شود.

هدف نهایی، بررسی تغییرات صفحه مرجع در طول یک دور چرخش روتور فن است. بدین منظور، یک رشته داده برای یک دور چرخش روتور را انتخاب و اولین نقطه بعد از "sync1" را به‌عنوان اطلاعات میدان جریان در صفحه PIV در نظر خواهیم گرفت. حال با استفاده از γ ، فاصله بین تمام نقاط درون خوشه در زمان مبدا را با نقطه LDA محاسبه می‌نماییم:

$$\gamma = 1/n \sum_{j=1}^n (v_j - v_0)^2 \quad (۱۳)$$

که در آن v_j اندازه سرعت نقاط خوشه و v_0 اندازه سرعت نقطه مبدا LDA است. همچنین n نیز نماینده تعداد نقاط خوشه مرتبط بوده که در خوشه یک در راستای سرعت U برابر با ۵۶۲ داده است. سپس درجه تعلق تمام نقاط درون خوشه نسبت به نقطه مبدا LDA برحسب رابطه ۱۴ محاسبه خواهد شد.

$$tvj = \left(1 - \left[\frac{1}{\gamma} \left((v_j - v_0)^2 \right) \right]^{\frac{1}{m-1}} \right)^{-1} \quad (۱۴)$$

یکی از خواص مهم خوشه‌بندی، رفتار مشابه داده‌ها در خوشه‌ها است. به‌طوری که از خوشه‌بندی داده‌ها می‌توان رفتار و تغییرات یک داده را به رفتار سایر اعضای آن خوشه تعمیم داد و برعکس اطلاعات مجهول مربوط به یک نقطه به دست آید.

اکنون به گام زمانی بعدی خواهیم رفت که در لحظه جدید سرعت برای نقطه مشخص (از سیستم LDA) و همچنین درجه تعلق نقاط خوشه با این نقطه را خواهیم داشت (tvj).

اندازه سرعت سایر نقاط خوشه v_j از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v_j = v + \left[\gamma \left(\frac{1}{tvj} - 1 \right)^{m-1} \right]^{-1} \quad (۱۵)$$

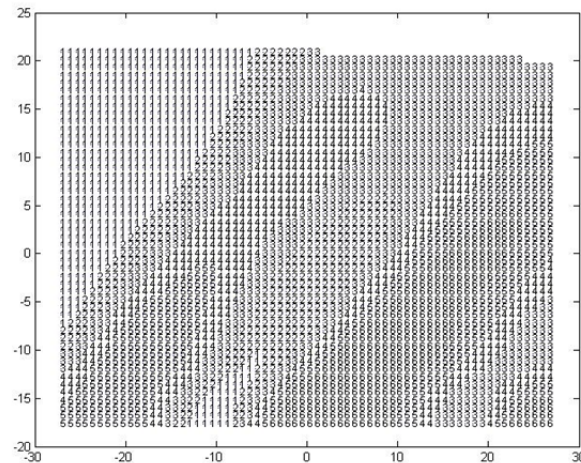
m در این رابطه، نشان‌دهنده درجه فازی است که به‌طور معمول، دو در نظر گرفته خواهد شد.

بیشتری نمایش داده شود.

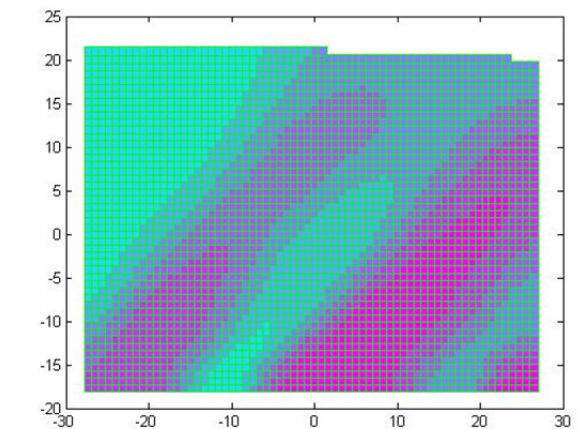
بدین منظور، داده‌های مکانی براساس FCM از ۲ تا ۶ کلاستر مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به موارد فوق، از الگوی میدان جریان با ۶ خوشه، در ادامه این تحقیق استفاده می‌شود (جدول ۳؛ نمودارهای ۱۰ و ۱۱).

جدول ۳) مشخصات خوشه‌های ایجاد در میدان جریان مورد بررسی

شماره خوشه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مرکز خوشه	۲۱.۷۴۸	۲۲.۶۸۵	۲۳.۷۴۵	۲۴.۶۵۴	۲۵.۸۴۱	۲۶.۹۱۸
رنگ خوشه	خوشه ۱: 	خوشه ۲: 	خوشه ۳: 	خوشه ۴: 	خوشه ۵: 	خوشه ۶: 



نمودار ۱۰) معرفی شماره خوشه هر نقطه از الگوی میدان جریان ایجاد شده



نمودار ۱۱) تصویر ایجاد شده از خوشه‌بندی فازی در راستای سرعت U با ۶ خوشه هر خوشه در رنگ‌های متفاوتی به نمایش در آمده است.

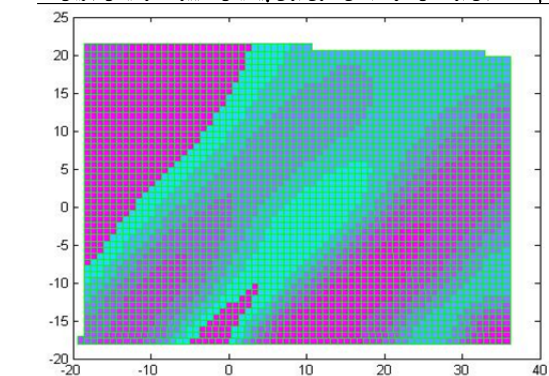
۴-۲- تعیین خوشه نقطه داده‌برداری شده توسط سیستم LDA

اهداف خوشه‌بندی صورت‌گرفته بر صفحه PIV مرجع است. داده‌های نخست ثبت شده در دورهای متوالی LDA را می‌توان مرز مشترک اطلاعات خروجی این سیستم با داده‌های ثبت شده توسط سیستم PIV دانست. چرا که داده‌های سیستم LDA متعلق به یک نقطه مکانی در صفحات PIV نیز هستند که در نخستین گام زمانی، بر مبنای سیستم LDA به ثبت رسیده است. بنابراین از این داده‌ها در دورهای متوالی، میانگین گرفته و به‌عنوان یکی از داده‌های صفحه PIV، با مراکز خوشه‌های ایجاد شده مقایسه می‌شود. در

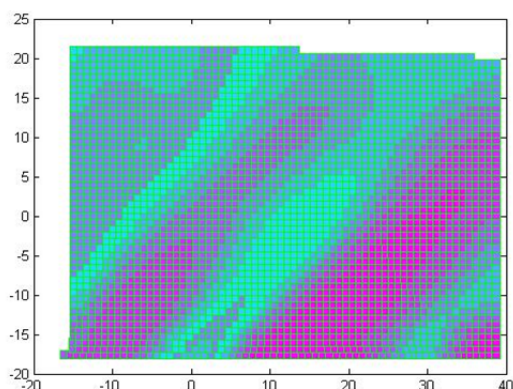
۴-۴- نمایش تغییرات میدان جریان

با توجه به مختصات مکانی معین از نقاط میدان جریان، سرعت‌های جدید به‌دست‌آمده در هر نقطه، جایگزین و میدان جریان جدید با همان تنظیمات مرحله نخست ارایه‌شده در بخش (۴-۱) مجدداً خوشه‌بندی می‌شود. نتیجه این امر، نمایش تغییرات صورت‌گرفته در صفحه میدان براساس رفتار داده‌های مورد نظر خواهد بود.

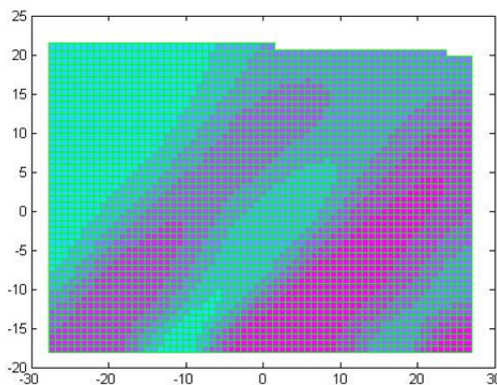
نتایج تغییرات میدان جریان در زوایای یک تا ۶ درجه از چرخش روتور، با اعمال تغییرات لازم در مختصات مکانی آنها ارایه خواهد شد که این تغییرات مکانی نیز براساس قرارگیری روتور در حال چرخش در زوایای مختلف است (نمودارهای ۱۸-۱۲).



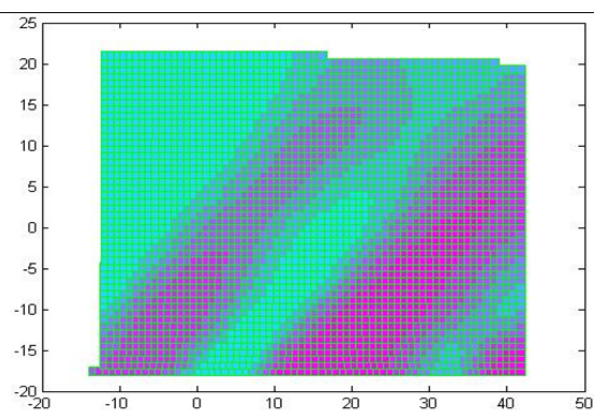
نمودار ۱۲) تصویر میدان در ۳ درجه از چرخش روتور؛ محور افقی و عمودی به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.



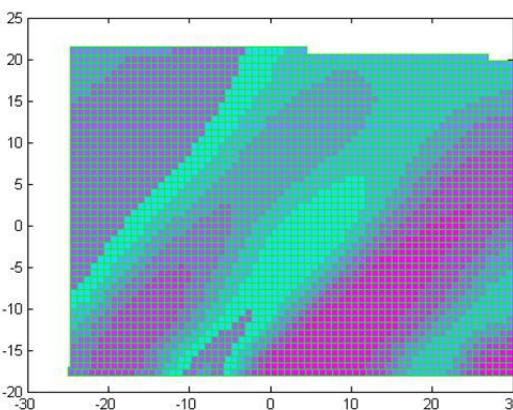
نمودار ۱۳) تصویر میدان در ۴ درجه از چرخش روتور؛ محور افقی و عمودی به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.



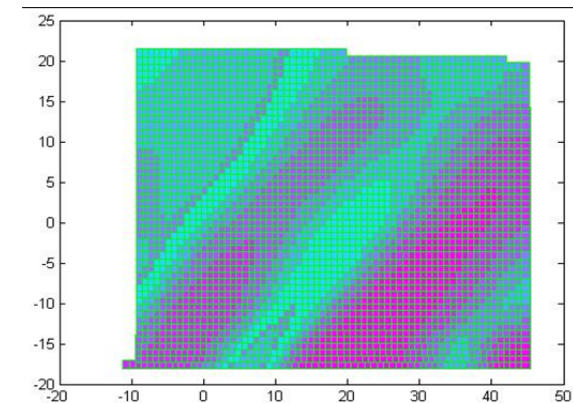
نمودار ۱۴) تصویر اولیه از میدان جریان؛ محور افقی و عمودی که به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.



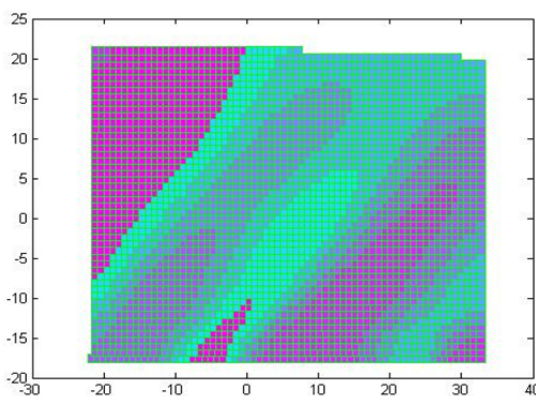
نمودار ۱۵) تصویر میدان در ۵ درجه از چرخش روتور؛ محور افقی و عمودی به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.



نمودار ۱۶) تصویر میدان در ۲ درجه از چرخش روتور؛ محور افقی و عمودی به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.



نمودار ۱۷) تصویر میدان در ۶ درجه از چرخش روتور؛ محور افقی و عمودی به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.



نمودار ۱۸) تصویر میدان در ۲ درجه از چرخش روتور؛ محور افقی و عمودی به‌ترتیب معرف Y.X نقاط صفحه است.

همچنین در تحلیل و بررسی عملکرد سیستم استنتاجی فازی ارایه شده، نکات زیر حایز اهمیت است:

۱- سیستم طراحی شده، یک سیستم تماماً مبتنی بر فازی است. به طوری که ارزش گذاری داده ها، خوشه بندی اولیه و ثانویه و اعمال تغییرات در خوشه ها براساس فازی انجام خواهد شد و در نهایت نتایج به دست آمده نیز در فضای فازی ارایه می شود.

۲- علی رغم استفاده از داده های ثبت شده در طول زمان برای پیش بینی در تغییرات داده های مکانی، پارامتر زمان مستقیماً به عنوان یک ورودی وارد محاسبات نمی شود که خود کاهش بار محاسبات را به همراه دارد.

۳- از آنجایی که تحلیل سیستم حاضر، تنها براساس داده های ثبت شده از واقعیت پدیده ها بوده، بدیهی است افزایش کیفی و کمی داده ها نقش بسزایی در بهبود کیفیت خروجی خواهد داشت، به طوری که برای پیش بینی دقیق تر میدان جریان، به اطلاعات رشته داده های مقیاس زمانی (LDA)، تمام خوشه های در نظر گرفته شده میدان جریان نیاز خواهد بود.

۴- بخشی از تحقیقات صورت گرفته مربوط به آزمایش ایندکس ها نسبت به داده های مکانی میدان جریان بوده که نتایج آزمایشات متعدد از چهار ایندکس مطرح شده نشان داد که افزایش تعداد خوشه ها در داده های PIV، دقت الگوی میدان جریان را افزایش می دهد چرا که:

الف- موجب نشان دادن جزئیات بیشتر در الگوی میدان جریان ایجاد شده می شود، ولی مستلزم تعداد داده ها با مقیاس زمانی بیشتر خواهد بود.

ب- همچنین کاهش فاصله مراکز خوشه ها موجب افزایش دقت سیستم می شود. زیرا می تواند رفتارهای جزئی تر داده های مقیاس زمانی را تحلیل و موثرتر واقع سازد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: سیف دلیل صفائی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳/۴٪)؛ نادر منتظرین (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳/۳٪)؛ محمدحسین فاضل زرنندی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۳/۳٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- Paone N, Riethmuller ML, Vandenbraembussche RA. Application of particle image displacement velocimetry to a centrifugal pump. Unknown City: Unknown Publisher; 1998.
- 2- Akin O, Rockwell D. Flow structure in a radial flow pumping system using high-image-density particle image velocimetry. Journal of Fluids Engineering. 1994;116(3):538-544.
- 3- Sinha M, Katz J. Quantitative visualization of the flow in a centrifugal pump with diffuser vanes-I: On flow structures and turbulence. Journal of Fluids Engineering. 2000;122(1):97-107.
- 4- Sinha M, Katz J, Meneveau Ch. Quantitative visualization of the flow in a centrifugal pump with diffuser vanes-II: Addressing passage-averaged and large-eddy simulation modeling issues in

از ∂x برای جابه جایی میدان جریان از چرخش روتور در زوایای مورد بررسی، از روابط هندسی حاصل می شود. در صفحات PIV، برای هر ۳۱۹۹ نقطه صفحه x, y نسبت به مرکز صفحه تعریف شده است، بنابراین می توان برای هر نقطه، نسبت به مرکز صفحه، زاویه ای تعریف نمود. به طوری که:

$$\alpha_n = \tan^{-1} \left(\frac{y_n}{x_n} \right) \quad (۱۶-الف)$$

$$\beta_n = \alpha_n - 1^\circ \quad (۱۶-ب)$$

حال در زاویه به دست آمده از هر نقطه، یک درجه چرخش را اثر داده و x جدید هر نقطه را به دست خواهیم آورد:

$$X_{new_n} = X_n \times \frac{\cos(\beta_n)}{\cos(\alpha_n)} \quad (۱۷)$$

همچنین میدان جریان ایجاد شده دارای حرکت ناشی از گردش پره ها حول مرکز روتور است. این جابه جایی در امتداد محیط دایره ای به شعاع خارجی روتور بوده که اثر آن در مختصات x, y نهایی نقاط میدان جریان ایجاد شده لحاظ خواهد شد. به طوری که:

$$X_{final} = X_{new_n} + \Delta x \quad (۱۸-الف)$$

$$\Delta x = R \times \sin(1^\circ) \quad (۱۸-ب)$$

R شعاع خارجی روتور مورد بررسی و برابر با ۱۷۵ میلی متر است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از سیستم خوشه بندی فازی به پیدایش تغییرات میدان جریان در خروجی روتور توربوماشین گریز از مرکز پرداخته شد.

در روش آزمایشگاهی، برای بررسی پدیده های جاری در توربوماشین ها از دو سیستم اندازه گیری پیشرفته لیزری استفاده می شود که زمان بری، هزینه بالا و تعداد زیاد تست های مورد نیاز را به همراه دارد. داده های سیستم اندازه گیری PIV به ثبت بردارهای سرعت در راستاهای متفاوت برای تعداد زیادی مختصات مکانی ثبت شده در یک گام زمانی ثابت می پردازد و داده های سیستم اندازه گیری LDA، اطلاعات سرعت را برای یک نقطه از میدان جریان و در طول زمان به ثبت می رساند.

طی این پژوهش، با اتکا به رفتار داده های آزمایشگاهی در اختیار و تعریف زبان کیفی برای یادگیری و استنتاج در علم منطق فازی، به طراحی سیستمی برای برقراری ارتباط بین این دو دسته اطلاعات و ارایه تصاویر فازی از میدان جریان جدید در گام های زمانی متفاوت پرداخته شد. همان گونه که در نتایج خروجی سیستم مشخص است، میدان های جریان پیش بینی شده، تغییرات را طی چرخش روتور در زوایای مختلف نشان می دهند.

سطح میزان تغییرات در نواحی جانبی چپ تصاویر با شدت بیشتری قابل ملاحظه است که به درستی اشاره به تغییرات میدان جریان در این ناحیه از توربوماشین دارد که به واسطه فاصله بیشتر از دهانه، همواره میزان بیشتری از اختلاط جریان خروجی از روتور با جریان در حال گردش حلزونی اتفاق می افتد. قابل توجه است که در تمام میدان های ایجاد شده می توان پدیده جت- دنباله را مشاهده کرد که تغییرات آن در جهت خروجی فن، به میزان محدودتری قابل بررسی است. محدود بودن این تغییرات نیز علاوه بر نمایش تغییرات در گام های زمانی بسیار کوتاه (میلی ثانیه)، ناشی از موقعیت مکانی داده های مورد بررسی از میدان جریان توسط تکنیک تصویر ذره ای (شکل ۲) بوده که با فرم ثابت دیواره فوقانی حلزونی همراه است و تغییرات پدیده جت- دنباله در حجم نسبتاً ثابتی از حلزونی بررسی می شود.

- optimal fuzzy knowledge base for integration weighting and integrating spatial information of the geospatial information systems. The Journal of Spatial Planning. 2013;17(1):21-42. [Persian]
- 22- Eslamloueyan R. Designing a hierarchical neural network based on fuzzy clustering for fault diagnosis of the Tennessee-Eastman process. Applied Soft Computing. 2011;11(1):1407-1415.
- 23- Zhao F, Liu H, Fan J. A multiobjective spatial fuzzy clustering algorithm for image segmentation. Applied Soft Computing. 2015;30:48-57.
- 24- Sowmya B, Sheela Rani B. Colour image segmentation using fuzzy clustering techniques and competitive neural network. Applied Soft Computing. 2011;11(3):3170-3178.
- 25- Yang Z, Chung FL, Shitong W. Robust fuzzy clustering-based image segmentation. Applied Soft Computing. 2009;9(1):80-84.
- 26- Ghorbanpour A, tallai G, panahi M. Clustering customers of Refah Bank branches using combination of genetic algorithm and c-means in fuzzy environment. Organizational Resources Management Researchs. 2015;5(3):153-168. [Persian]
- 27- Askari S, Montazerin N. A high-order multi-variable fuzzy time series forecasting algorithm based on fuzzy clustering. Expert Systems with Applications. 2015;42(4):2121-2135.
- 28- Askari S, Montazerin N, Fazel Zarandi MH. A clustering based forecasting algorithm for multivariable fuzzy time series using linear combinations of independent variables. Applied Soft Computing. 2015;35:151-160.
- 29- Duru O, Bulut E. A non-linear clustering method for fuzzy time series: Histogram damping partition under the optimized cluster paradox. Applied Soft Computing. 2014;24:742-748.
- 30- Raj D, Swim WB. Measurements of the mean flow velocity and velocity fluctuations at the exit of an FC centrifugal fan rotor. Journal of Engineering for Power. 1981;103(2):393-399.
- 31- Raffel M, Willert CE, Scarano F, Kähler CJ, Wereley ST, Kompenhans J. Particle image velocimetry: A practical guide. 3rd Edition. Cham: Springer International Publishing; 2018.
- 32- Tropea C. Laser Doppler anemometry: Recent developments and future challenges. Measurement Science and Technology. 1995;6(6):605-619.
- 33- Groll L, Jakel J. A new convergence proof of fuzzy c-means. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2005;13(5):717-720.
- 34- Koorehpazan Dezfali A. Principles of fuzzy set theory and its applications in the modeling of water engineering problems. 2nd Edition. Tehran: Amir Kabir Jahad Daneshgani Department of Education; 2008. [Persian]
- 35- Fukuyama Y. A new method of choosing the number of clusters for the fuzzy c-mean method. In: Proceeding of 5th Fuzzy System Symposium. Unknown City: Unknown Publisher; 1989. pp. 247-250.
- 36- Xie XL, Beni G. A validity measure for fuzzy clustering. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991;13(8):841-847.
- 37- Kwon SH. Cluster validity index for fuzzy clustering. Electronics Letters. 1998;34(22):2176-2177.
- 38- Askari S, Montazerin N, Fazeli Zarandi MH. Generalized possibilistic fuzzy c-means with novel cluster validity indices for clustering noisy data. Applied Soft Computing. 2017;53:262-283.
- turbomachinery flows. Journal of Fluids Engineering. 2000;122(1):108-116.
- 5- Soranna F, Chow YC, Uzol O, Katz J. The effect of inlet guide vanes wake impingement on the flow structure and turbulence around a rotor blade. Journal of Turbomachinery. 2006;128(1):82-95.
- 6- Bricaud C, Richter B, Dullenkopf K, Bauer HJ. Stereo PIV measurements in an enclosed rotor-stator system with pre-swirled cooling air. Experiments in Fluids. 2005;39(2):202-212.
- 7- Liu B, Yu X, Liu H, Jiang H, Yuan H, Xu Y. Application of SPIV in turbomachinery. Experiments in Fluids. 2006;40(4):621-642.
- 8- Denger GR, McBride MW. Three-dimensional flow field characteristics measured in a forward-curved centrifugal blower using particle tracing velocimetry (PTV). American Society of Mechanical Engineers Fluids Engineering Division. 1990;95:49-56.
- 9- Cho GR, Kawahashi M, Hirahara H, Kitadume M. Application of stereoscopic particle image velocimetry to experimental analysis of flow through multiblade fan. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. 2005;48(1):25-33.
- 10- Akbarizade M, Montazerin N, Damangir E, Basirat Tabrizi H. Measurement of the flow field after the Squirrel Nest fan rotors using PIV in a fixed period phase. 11th Conference of Fluid Dynamics, 27-29 May, 2008, Tehran, Iran. Tehran: Khajeh Nasir Toosi University of Technology; 2008. [Persian]
- 11- Akbari G. Measurement of the turbulent field in a turbulent centrifugal turbine with SPIV method [Dissertation]. Tehran: Amirkabir University of Technology; 2013.
- 12- Goguen JA. LA Zadeh. Fuzzy sets. Information and control, vol. 8 (1965), pp. 338-353. LA Zadeh. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, Vol. 3 (1971), pp. 177-200. The Journal of Symbolic Logic. 1973;38(4):656-657.
- 13- Panigrahi PK, Dwivedi M, Khandelwal V, Sen M. Prediction of turbulence statistics behind a square cylinder using neural networks and fuzzy logic. Journal of Fluids Engineering. 2003;125(2):385-387.
- 14- Tseng YH, Durbin P, Tzeng GH. Using a fuzzy piecewise regression analysis to predict the nonlinear time-series of turbulent flows with automatic change-point detection. Flow Turbulence and Combustion. 2001;67(2):81-106.
- 15- Liang Z, Shan Sh, Liu X, Wen Y. Fuzzy prediction of AWJ turbulence characteristics by using typical multi-phase flow models. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2017;11(1):225-257.
- 16- Vernet A, Kopp GA. Classification of turbulent flow patterns with fuzzy clustering. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2002;15(3-4):315-326.
- 17- Ruspini EH. A new approach to clustering. Information and Control. 1969;15(1):22-32.
- 18- Bezdek JC, Ehrlich R, Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. Computers and Geosciences. 1984;10(2-3):191-203.
- 19- Pourmohammadi S, Maleki A. An automatic approach to continuous stress assessment during driving based on fuzzy c-means clustering. The Modares Journal of Electrical Engineering. 2013;13(1):9-17.
- 20- Ghosh S, Mitra S, Dattagupta R. Fuzzy clustering with biological knowledge for gene selection. Applied Soft Computing. 2014;16:102-111.
- 21- Alesheikh AA, Aslani M, Kalantari SM. Extracting