



بهینه‌سازی هندسی جریان مغشوش درون دیفیوزرهای حلقوی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی تقریبی

مصطفی دهقانی¹، حسین عجم^{2*}، سعید فراهت³

1- دانشجوی دکتری، تبدیل انرژی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* مشهد، 91775-1111، h.ajam@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 بهمن 1393

پذیرش: 02 خرداد 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

دیفیوزر حلقوی

مدل‌های توربولانسی

مدل تقریبی کریگینگ

شیوه بهبود مورد انتظار

پارامتری‌سازی با اسپلاین نربز

چکیده

به منظور ارزیابی اثر مدل‌های توربولانسی در پیش‌بینی ساختار جریان با گرادیان فشار معکوس، معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط در حالت دائم برای یک دیفیوزر حلقوی تقارن محوری حل شدند. پس از انتخاب بهترین مدل توربولانسی شیوه‌ای برای بهینه‌سازی شکل دیفیوزرهای حلقوی ارائه شده است. هدف حداکثر کردن عملکرد دیفیوزر یا به عبارت دیگر افزایش بازیابی فشار درون دیفیوزر بر اساس بهینه‌سازی هندسه است. روش بهینه‌سازی مبتنی بر طراحی دیواره یک دیفیوزر حلقوی با نسبت سطح و طول ثابت می‌باشد. در الگوریتم توسعه یافته از نرم‌افزار انسیس فلوئنت برای تحلیل هیدرودینامیکی و از مدل‌سازی تقریبی و یک شیوه بهبود مورد انتظار برای بهینه‌سازی استفاده شده است. از اسپلاین نربز برای نمایش شکل دیواره دیفیوزر با دو تا ده متغیر طراحی استفاده شده است. به منظور مدیریت زمان حل مسأله، از مدل تقریبی کریگینگ به عنوان مدلی جهت پیش‌بینی پاسخ‌های حل دقیق استفاده شده است. با اعمال فرمان‌های کنترلی از طریق نرم‌افزار متلب، نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی و مدل کریگینگ برای اجرای کاملاً خودکار با یکدیگر ترکیب شده‌اند. به منظور برقراری توازن بین جستجوی محلی و سرتاسری از معیار نمونه تطبیقی استفاده شده است. با توجه به نتایج حل، طراحی بهینه یک بهبود عملکرد منطقی را در مقایسه با طراحی اولیه نشان می‌دهد.

Geometry optimization of turbulent flow inside annular diffusers by CFD analysis and surrogate modeling

Mostafa Dehghani¹, Hossein Ajam^{2*}, Saied Farahat¹

1- Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91775-1111 Mashhad, Iran, h.ajam@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 February 2015
Accepted 23 May 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Annular Diffuser
Turbulence Models
Kriging Surrogate Model
Expected Improvement Approach
NURBS Parameterization

ABSTRACT

In order to assess the effect of turbulence models in prediction of flow structure with adverse pressure gradient, steady state Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations in an annular axisymmetric diffuser are solved. After selecting the best turbulence model, an approach for the shape optimization of annular diffusers is presented. The goal in our optimization process is to maximize diffuser performance and, in this way, pressure recovery by optimizing the geometry. Our methodology is the optimization through wall contouring of a given two-dimensional diffuser length and area ratio. The developed algorithm uses the CFD software: Fluent for the hydrodynamic analysis and employs surrogate modeling and an expected improvement approach to optimization. The non-uniform rational basic splines (NURBS) are used to represent the shape of diffuser wall with two to ten design variables, respectively. In order to manage solution time, the Kriging surrogate model is employed to predict exact answers. The CFD software and the Kriging model have been combined for a fully automated operation using some special control commands on the Matlab platform. In order to find a balance between local and global search, an adaptive sample criterion is employed. The optimal design exhibits a reasonable performance improvement compared with the reference design.

1- مقدمه

از ورود به محفظه احتراق، خروجی توربین‌های گاز و نیز درون تونل‌های باد اشاره کرد. یک دیفیوزر با طراحی نامناسب سبب جدایش جریان و افزایش توان پمپاژ می‌شود. همچنین این موضوع می‌تواند سبب توزیع نامناسب

دیفیوزرها بخش جدایی‌ناپذیر بسیاری از سیستم‌های جریان هستند. از جمله موارد کاربرد دیفیوزرها می‌توان به استفاده از آنها در خروجی کمپرسور و پیش

Please cite this article using:

M. Dehghani, H. Ajam, S. Farahat, Geometry optimization of turbulent flow inside annular diffusers by CFD analysis and surrogate modeling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 371-384, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

توسط مدسون و همکاران [13] مورد استفاده قرار گرفت. بهینه‌سازی دیفیوزر با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان¹ توسط فن و همکاران [14] انجام شده است. روش بهینه‌سازی کلی مؤثر برای بهینه‌سازی شکل دیفیوزر اس شکل توسط هایوگیل بای و همکارانش [15] مورد استفاده قرار گرفته است. آنها شعاع کانال اس شکل را با استفاده از تابع هیکس-هن² با دو متغیر طراحی کنترل نمودند.

در تحقیق پیش رو از آنجا که اغلب مطالعات گذشته مبتنی بر مدل توربولانسی استاندارد k-ε و استفاده از الگوریتم های تکاملی نظیر ژنتیک هستند، بخش اول به مطالعه عددی دقت مدل‌های توربولانسی درون دیفیوزر حلقوی اختصاص یافته است. به منظور شناسایی مدل‌های توربولانسی مناسب دو نمونه دیفیوزر حلقوی دوبعدی مطالعه و نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در بخش دوم این مقاله، یک شیوه بهینه‌سازی آیرودینامیکی کاملاً خودکار درون نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. مدول پارامتری‌سازی شکل، مدول تولید مش باسازمان با نرم‌افزار گمبیت، شبیه‌ساز آیرودینامیکی انسیس فلوئنت و مدول بهینه‌سازی مبتنی بر مدل تقریبی کریگینگ چهار مؤلفه اصلی این شیوه را تشکیل می‌دهند. به منظور ارزیابی کارایی روش مطرح شده در بهینه‌سازی، از این شیوه در بهینه‌سازی شکل برای یک دیفیوزر حلقوی نمونه با هدف افزایش ضریب بازیافت فشار متوسط سطحی استفاده شده است. نتایج نشان دادند بهبود عملکرد آیرودینامیکی دیفیوزر امکان‌پذیر است. در پایان، جزئیات فرایند بهینه‌سازی برای وضعیت بهترین عملکرد دیفیوزر ارائه شده است.

2- تعریف مسأله

هندسه دیفیوزر بررسی شده هندسه دیفیوزر حلقوی استفاده شده توسط استیونز و ویلیام [4] است. استیونز و ویلیام جریان درون دیفیوزرهای حلقوی با دو هندسه متفاوت با نسبت های سطح ثابت $AR=2$ و شعاع ورودی $R_i/R_o=0/83$ را با شرایط مرزی ورودی متفاوت مطالعه نمودند. دلیل انتخاب این نسبت شعاع ورودی استفاده متداول در کاربردهای مرتبط با توربوماشین ها و دلیل استفاده از نسبت سطح دو حدی بودن این مقدار در طراحی ها مطرح شده است. همچنین طول دیفیوزرها (زوایای واگرایی دیفیوزرها) بر اساس نمودارهای عملکردی سوران و کلامپ [2] به نحوی انتخاب شدند تا شرایط جریان با جدایش و در مرز جدایش را فراهم کنند. علاوه بر بازیافت فشار آنها میدان‌های سرعت و تنش‌های رینولدز را نیز بررسی نمودند. دیفیوزر مدل شامل بخش‌های ورودی و خروجی استوانه‌ای بود. جریان ورودی تراکم‌ناپذیر و کاملاً مغشوش با عدد رینولدز 2×10^5 براساس قطر هیدرولیکی (Re_H) می‌باشد. جزئیات هندسی و قیود در شکل 1 نشان داده شده‌اند.

در هر دو حالت شرایط مرزی ورودی در 76 میلی‌متر بالادست ورودی دیفیوزر اعمال شده‌اند. فشار خروجی از دیفیوزر به وسیله شیرهای فشار در انتهای بخش واگرایی دیفیوزر اندازه‌گیری شده‌اند. برای تعیین مؤلفه سرعت در جهت x از قانون توانی استفاده شده است.

$$v_x / U_0 = \eta^{1/7}; \eta = y / \delta \quad (1)$$

به نحوی که y فاصله عمودی از دیوار، δ ضخامت لایه مرزی و U_0 سرعت هسته جریان است. از آنجا که جریان ورودی کاملاً توسعه یافته است، ضخامت لایه مرزی در ورودی برابر نصف ارتفاع حلقه جریان ورودی می‌باشد. شدت توربولانس در ورودی با استفاده از رابطه (2) که مربوط به یک کرلیشن

جریان در پایین‌دست شود که در بسیاری از کاربردها قابل قبول نیست. بعلاوه، معمولاً یک قید طول و نسبت سطح معین در طراحی وجود دارد. در نتیجه طراحی شکل بهینه دیفیوزر به موضوع تحقیق بسیاری از مهندسان در چندین دهه گذشته تبدیل شده است.

مطالعات تجربی و تئوری دیفیوزرها با هندسه‌های نسبتاً ساده در سال‌های 1950 و 1960 انجام شده است. کلین و همکارانش [1] در زمینه دیفیوزرهای مخروطی و سوران و کلامپ [2] در رابطه با دیفیوزرهای حلقوی نقش تأثیرگذاری را ایفا نموده‌اند. مروری بر این مطالعات اولیه و سایر تحقیقات انجام شده تا اوایل سال 1980 توسط ژاپیکس [3] ارائه شده است. در این میان اشاره به تحقیق استیونز و ویلیام [4] که بصورت آزمایشگاهی به مطالعه اثر شرایط ورودی روی عملکرد دیفیوزر پرداختند حائز اهمیت است. در یک دیفیوزر صفحه‌ای نامتقارن البحری و مفرح [5] با مقایسه شش مدل توربولانسی نتیجه گرفتند که مدل‌های توربولانسی SST k-ω، V2F، و مدل استاندارد k-ω هنگام وجود گرادیان فشار معکوس به مراتب بهتر عمل می‌کنند. در این مطالعه مدل‌های استاندارد و رینولدز پایین k-ε عملکرد بسیار ضعیفی ارائه نمودند.

پروفل یک دیفیوزر صفحه‌ای با پهنا و طول معلوم به منظور دستیابی به افزایش فشار استاتیک حداکثر توسط کابوک و مودی [6] بهینه‌سازی شده است. معادلات ناویر استوکس حالت دائم برای مدل نمودن جریان درون دیفیوزر با در نظر گرفتن شرایط دوبعدی، جریان آرام و تراکم‌ناپذیر استفاده شده‌اند. مجموعه‌ای از معادلات الحاقی به منظور دستیابی به جهت و اندازه نسبی تغییر در پروفل دیفیوزر حل شده‌اند. بهینه‌سازی هندسه جریان لزج توسط اسوینگسن و همکاران [7] با استفاده از روش آنالیز حساسیت شبه‌تحلیلی انجام شده است. هدف آنها افزایش بازیافت فشار با بهینه‌سازی دیواره واگرایی دیفیوزر آرام دوبعدی بود. نتایج آنها افزایش 5% در ضریب بازیافت فشار در مقایسه با دیفیوزر با دیواره مستقیم را نشان داد. چولاسک و همکاران [8] با بهره‌گیری از شیوه طراحی آزمایش بهینه‌سازی یک جریان پتانسیل و دو دیفیوزر جریان آرام را انجام دادند.

در سال‌های اخیر بهینه‌سازی مبتنی بر تحلیل جریان در حوزه طراحی مهندسی بسیار متداول شده است. در برخی از موارد الگوریتم‌های تکاملی به منظور اطمینان از رسیدن به پاسخ بهینه کلی استفاده شده‌اند. الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار تجاری فلوئنت مبتنی بر مدل توربولانسی استاندارد k-ε برای بهینه‌سازی یک دیفیوزر صفحه‌ای دوبعدی توسط گوش و همکاران [9] استفاده شده است. آنها در فرایند بهینه‌سازی شکل خود نسبت طول و نسبت سطح دیفیوزر را ثابت در نظر گرفتند. ماریوتی و همکاران [10] شیوه کنترل غیرفعال جدایش لایه مرزی آرام در یک دیفیوزر صفحه‌ای متقارن دوبعدی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار تجاری فلوئنت انجام دادند. شیوه کنترلی آنها متشکل از اصلاح هندسه دیواره‌های دیفیوزر با استفاده از حفره‌های با شکل مناسب بود.

هزینه‌های محاسباتی بالا در رابطه با ارزیابی تعداد زیادی تابع هدف مانع از بکارگیری الگوریتم‌های تکاملی برای مسائل عملی طراحی مهندسی می‌شود. بنابراین به منظور کاهش تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف می‌توان از روش‌های تقریبی استفاده نمود. کوئیپو و همکاران [11] و سیمپسون و همکاران [12] مروری بر مدل‌های تقریبی استفاده شده در طراحی مهندسی ارائه نموده‌اند. به منظور یافتن دیفیوزر صفحه‌ای بهینه، تقریب‌های سطح پاسخ و یک الگوریتم بهینه‌سازی استاندارد با مدل توربولانسی استاندارد k-ε

1- Support vector machines
2- Hicks-Henne bump function

$$\frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial x} (y v_x v_x) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (y v_y v_x) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{y \rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[y \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{y \rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[y \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] \quad (8)$$

همچنین رابطه (9) معادله مومنتم در جهت شعاعی را نشان می دهد.

$$\frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial x} (y v_x v_y) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (r v_y v_y) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{y \rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[y \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{y \rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[y \mu \left(2 \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - \frac{\mu v_y}{\rho y^2} + \frac{2 \mu}{3 y \rho} (\nabla \cdot \vec{v}) \quad (9)$$

به نحوی که:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{v_y}{y} \quad (10)$$

4- ارزیابی مدل های توربولانسی

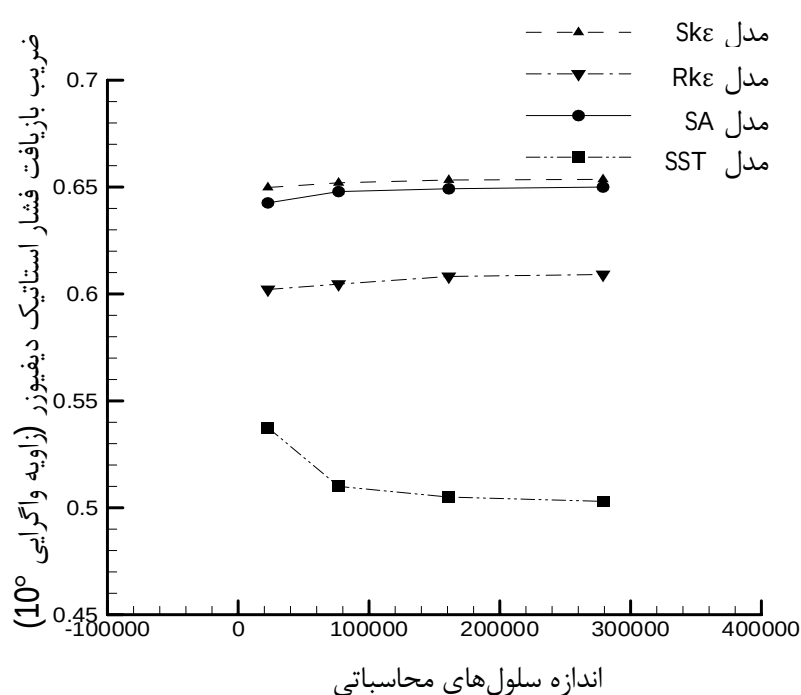
به منظور شناسایی مدل های توربولانسی مناسب برای پیش بینی دقیق عملکرد دیفیوزر حلقوی چندین مدل توربولانسی مورد ارزیابی قرار گرفته اند:

- مدل توربولانسی استاندارد k-ε (Skε)
- مدل توربولانسی اسپالارت-آلماراس (SA)
- مدل توربولانسی کی-اُپسیلن تحقق پذیر (Rkε)
- مدل توربولانسی SST kω

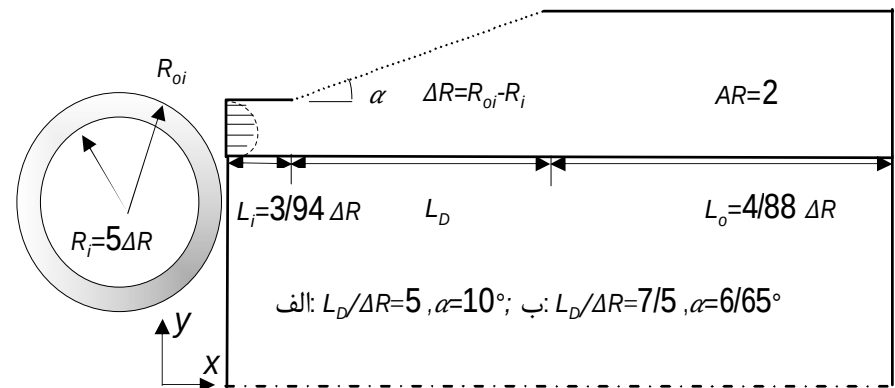
در محاسبات انجام شده با تمامی مدل های توربولانسی یک معادله ای و دو معادله ای فوق ارتفاع سلول نزدیک دیواره شرط $y^+ \approx 1$ را ارضا می کند. برای تمامی حل ها از مش جبری نوع H استفاده شده است.

به منظور ارزیابی استقلال نتایج عددی نسبت به اندازه شبکه محاسباتی، با شروع از یک شبکه مبنا اندازه تعداد المان های شبکه برای طول لوله حلقوی ورودی، طول دیفیوزر، طول لوله حلقوی خروجی و ارتفاع جریان در هر مقطع به ترتیب دو، سه و چهار برابر شدند. شکل 2 نحوه تغییرات ضرایب بازیافت فشار استاتیک دیفیوزر اول با زاویه واگرایی 10° را بر حسب اندازه شبکه برای مدل های توربولانسی مختلف نشان می دهد.

نحوه تغییرات ضرایب اصطکاک سطحی روی دیواره بالایی دیفیوزر اول با زاویه واگرایی 10° بر حسب اندازه های مختلف شبکه برای مدل توربولانسی SST k-w در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 2 نحوه تغییرات ضرایب بازیافت فشار دیفیوزر اول بر حسب اندازه شبکه



شکل 1 طرح شماتیکی از دیفیوزر حلقوی مورد مطالعه، مرجع [4]

تجربی می باشد، برای جریان های داخل لوله قابل محاسبه است.

$$I = 0.16 (\text{Re}_H)^{-1/8} \quad (2)$$

از آنجا که گردابه های آشفته نمی توانند بزرگتر از ارتفاع کانال باشند، مقیاس طول توربولانس بصورت رابطه (3) تعریف می شود.

$$\ell = 0.07 D_H \quad (3)$$

برای خط مرکزی دیفیوزر شرط مرزی محور تقارن و بر روی دیواره ها شرط مرزی عدم لغزش در نظر گرفته شده است. از آنجا که دیفیوزر بطور مستقیم به محیط تخلیه می شود، فشار خروجی بر اساس شرایط محیط تنظیم می شود. پس از حل مسأله میدان های سرعت و فشار از ورودی تا خروجی معین می شوند. افزایش فشار درون دیفیوزر تابعی از دبی جریان است که بر حسب عدد رینولدز قابل بیان می باشد. افزایش فشار بی بعد به وسیله ضریب بازیافت فشار C_p به صورت رابطه (4) تعریف می شود.

$$C_p = (P_o - P_i) / \left(\frac{1}{2} \rho (v_x)_i^2 \right) \quad (4)$$

به نحوی که P_o و P_i به ترتیب فشارهای استاتیک متوسط سطحی در خروجی و ورودی دیفیوزر و مخرج کسر هد دینامیک متوسط جرمی در ورودی دیفیوزر است.

همچنین ضریب اصطکاک C_f بر روی دیواره های بالایی و پایینی دیفیوزر حلقوی مورد مطالعه به صورت رابطه (5) محاسبه می شود.

$$C_f = \tau_{wx} / \left(\frac{1}{2} \rho (v_x)_i^2 \right) \quad (5)$$

به نحوی که wT معرف تنش برشی دیواره در جهت محوری بوده و مخرج کسر نیز همچنان که قبلاً نیز اشاره شد، هد دینامیک متوسط جرمی در ورودی دیفیوزر است.

3- معادلات حاکم

در این مطالعه از معادلات ناویراستوکس رینولدز متوسط برای حل جریان درون دیفیوزر استفاده می شود. برای هندسه های دوبعدی تقارن محوری چون در جهت θ تغییراتی نیست، معادله پیوستگی برای سیال تراکم ناپذیر در شرایط دائم به فرم رابطه (6) تبدیل می شود.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{v_y}{y} = 0 \quad (6)$$

فرم کلی بقای مومنتم برای یک چارچوب مرجع اینرسی در حالت دائم و بدون وجود نیروهای حجمی بصورت رابطه (7) تعریف می شود.

$$\nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \cdot \left(\mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \right] \right) + \rho \vec{g} \quad (7)$$

در رابطه (7) عبارت داخل پرانتز در سمت چپ معادله تانسور تنش بوده و I تانسور واحد است.

بنابراین با استفاده از رابطه (7) معادله مومنتم در جهت محوری برای جریان تقارن محوری به فرم معادله (8) تبدیل می شود.

بیشترین اختلاف در مقادیر ضریب بازیافت فشار بین مدل توربولانسی SST k ω و سایر مدل ها در حالت جدایش جریان شدید رخ می دهد. این امر نشان دهنده دقت مناسب این مدل برای پیش بینی جریان های جدایشی و با گرادیان فشار معکوس است.

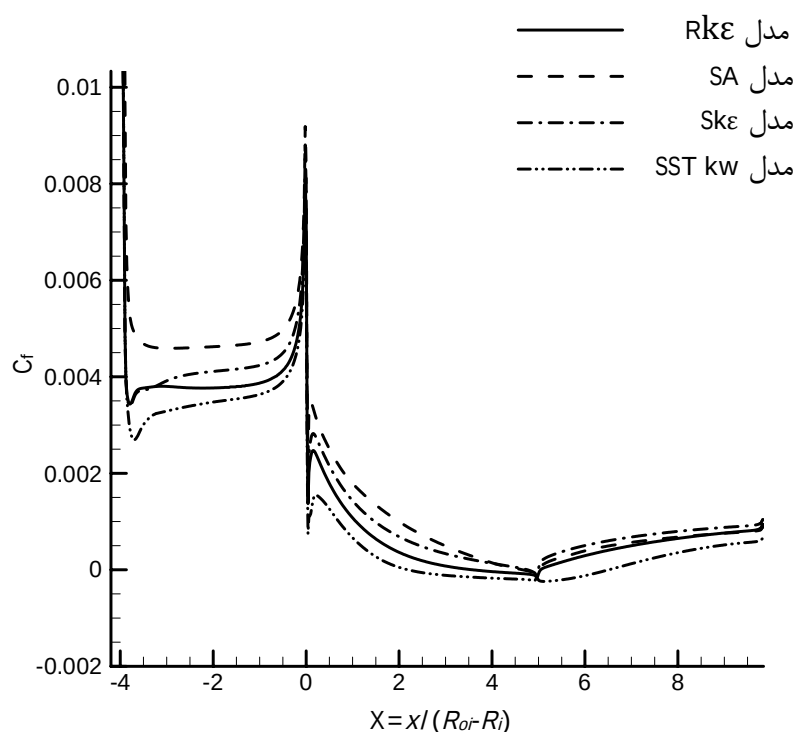
مقایسه ضرایب اصطکاک سطحی برای لوله حلقوی ورودی با نتایج تجربی بیانگر دقت قابل قبول مدل های دومعادله ای در پیش بینی ضریب اصطکاک سطحی دیواره است. همچنین با توجه به نتایج جدول 2 مقدار ضریب اصطکاک سطحی پیش بینی شده توسط مدل توربولانسی SA بسیار بزرگتر از مقدار تجربی است که بیانگر دقت پایین تر این مدل نسبت به سایر مدل های بررسی شده است.

به منظور ارزیابی نقاط جدایش و اتصال مجدد پیش بینی شده توسط مدل های توربولانسی مختلف نمودار تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برای هر چهار مدل بر روی دیواره های بالایی (برای هندسه اول با زاویه واگرایی 10°) در شکل 4 ترسیم شده و نقاط جدایش و اتصال مجدد با یکدیگر در جدول 3 مقایسه شده اند.

نتایج جدول 3 نشان می دهد که بزرگترین ناحیه جدایش پیش بینی شده متعلق به مدل توربولانسی SST kw است و سایر مدل های توربولانسی بویژه مدل توربولانسی SA و مدل توربولانسی k- ϵ استاندارد ناحیه جدایش را بسیار کوچکتر تخمین می زنند.

جدول 2 مقایسه ضرایب اصطکاک سطحی عددی و آزمایشگاهی

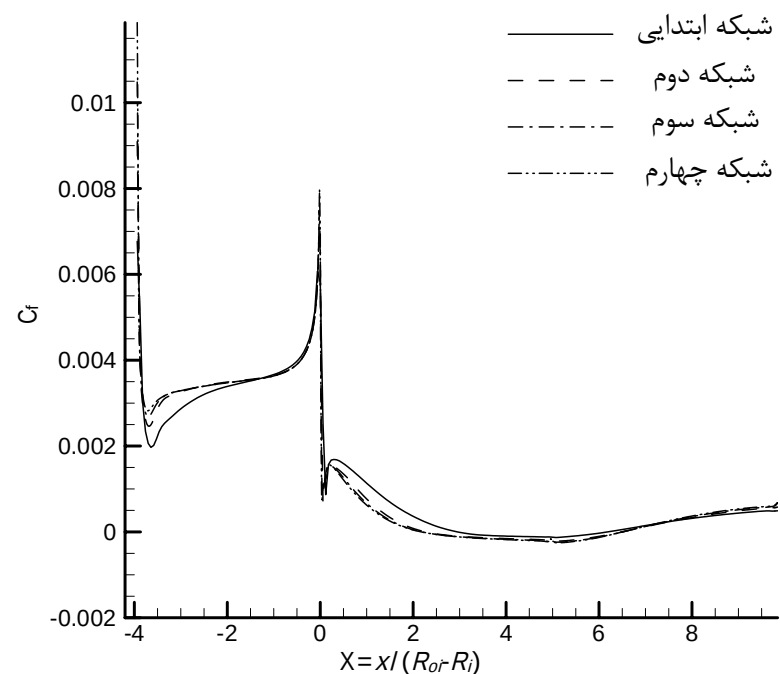
هندسه دیفیوزر	ضریب اصطکاک سطحی لوله حلقوی ورودی	زاویه واگرایی
اندازه گیری [16]	SST k ω Rk ϵ SA Sk ϵ	
10°	0/00374 0/004010/00364 0/00503 0/00427	
6/65°	0/00374 0/003960/00361 0/00497 0/00421	



شکل 4 نحوه تغییرات ضرایب اصطکاک سطحی روی دیواره بالایی دیفیوزر برای مدل های توربولانسی مختلف

جدول 3 نقاط جدایش و اتصال مجدد جریان پیش بینی شده توسط مدل های

دیفیوزر اول با زاویه واگرایی 10°	SST k ω	Rk ϵ	SA	Sk ϵ
نقطه جدایش جریان (m)	0/056	0/091	0/1185	0/1215
نقطه اتصال مجدد جریان (m)	0/165	0/128	0/127	0/1265



شکل 3 نحوه تغییرات ضرایب اصطکاک سطحی روی دیواره بالایی دیفیوزر برحسب اندازه های مختلف شبکه، مدل SST k- ω

با توجه به شکل 2 با افزایش تعداد سلول های دیفیوزر اول با زاویه واگرایی 10° به بیش از $1/61 \times 10^5$ ضریب بازیافت فشار برای تمامی مدل های توربولانسی تقریباً مستقل از اندازه شبکه محاسباتی می شود. همچنین با توجه به شکل 3 ضرایب اصطکاک سطحی دیواره های بالایی لوله حلقوی ورودی، دیفیوزر و لوله حلقوی خروجی با افزایش تعداد مش های محاسباتی برای شبکه دوم به بعد ثابت شده و مستقل از کیفیت شبکه می شود. در نتیجه شبکه سوم به عنوان شبکه مبنا برای این دیفیوزر انتخاب شده است. بطور مشابه، برای هندسه دوم نیز با شروع از یک شبکه اولیه به ترتیب اندازه المان های شبکه در هر دو راستا دو و سه برابر شده و نحوه تغییرات ضریب بازیافت فشار استاتیک و ضریب اصطکاک سطحی دیواره ها بر حسب کیفیت شبکه مقایسه شدند. برای هندسه دیفیوزر دوم با زاویه واگرایی 6/65° نتایج حل برای شبکه ای با تعداد المان $1/91 \times 10^5$ مستقل از کیفیت شبکه می شود.

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل عددی مقادیر ضریب بازیافت فشار استاتیک و نیز مقادیر ضریب اصطکاک سطحی در لوله حلقوی ورودی با نتایج تجربی مقایسه شده و در جدول های 1 و 2 ارائه شده اند.

مقادیر ضریب بازیافت فشار استاتیک تجربی برای دو هندسه نشان داده شده در شکل 1 از مرجع [4] استخراج شده اند.

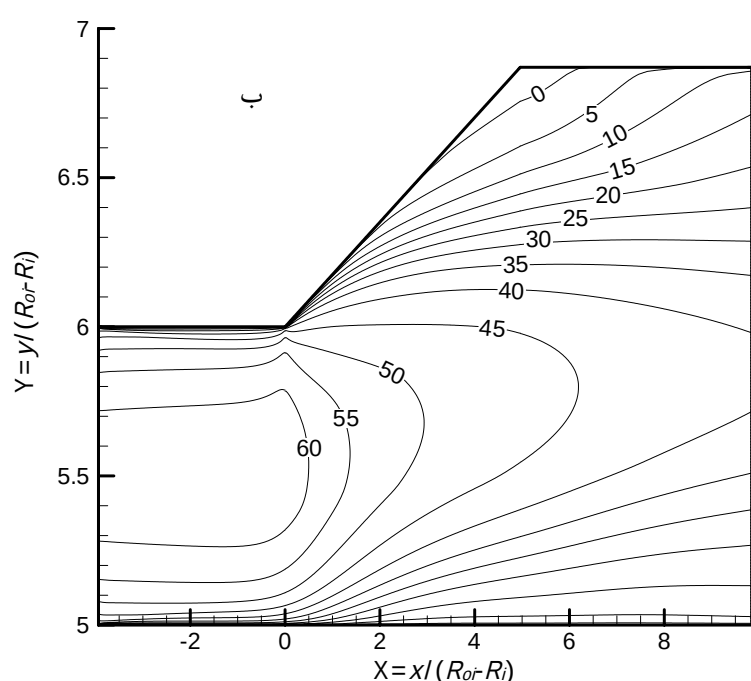
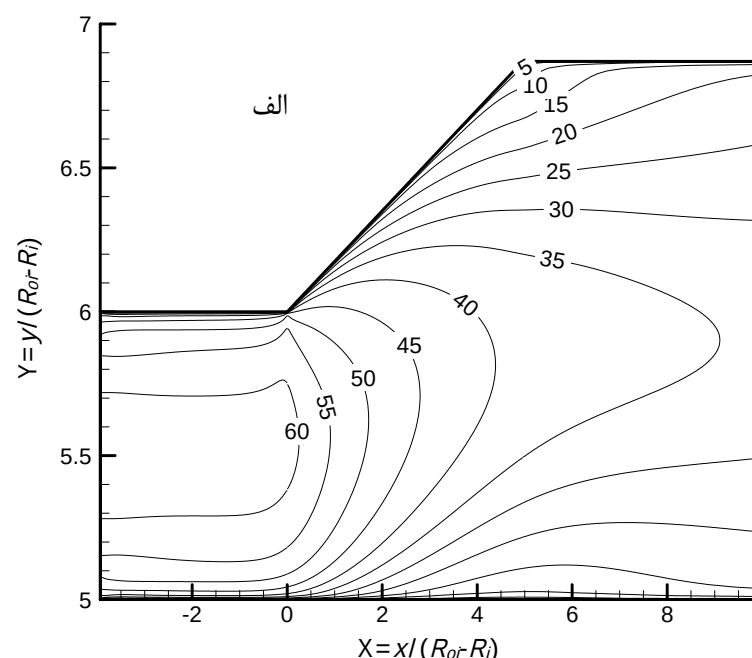
برای محاسبه ضریب اصطکاک فانیگ از رابطه تجربی بلازیوس [16] برای لوله های هموار استفاده شده است.

$$C_f = 0.0791 / Re^{0.25} \quad (11)$$

با توجه به نتایج جدول 1 مدل توربولانسی SST k ω کمترین خطا را در پیش بینی ضریب بازیافت فشار استاتیک به ویژه برای هندسه اول با زاویه واگرایی 10° در مقایسه با سایر مدل های توربولانسی ارائه می دهد. همچنین،

جدول 1 مقایسه ضرایب بازیافت فشار عددی و آزمایشگاهی

هندسه دیفیوزر	ضریب بازیافت فشار	زاویه واگرایی
اندازه گیری [4]	SST k ω Rk ϵ SA Sk ϵ	
10°	0/505 0/608 0/649 0/653	
6/65°	0/6013 0/655 0/671 0/6778	



شکل 6 خطوط هم تراز سرعت، الف) مدل توربولانسی k-ε استاندارد ب) مدل توربولانسی SST kw

کنتور مشابه برای مدل توربولانسی k-ε استاندارد مقدار 10 متر بر ثانیه را نشان می دهد. همچنین شکل 6 کاهش سرعت جریان با ورود به دیفیوزر را به خوبی نشان می دهد.

روند افزایش فشار با ورود جریان به درون دیفیوزر بخوبی در شکل 7 نشان داده شده است. همچنین در شکل 7-الف به دلیل ضعف مدل توربولانسی k-ε استاندارد در تخمین صحیح نقطه اتصال مجدد جریان و پیش بینی ناحیه جدایش کوچکتر در مقایسه با مدل توربولانسی SST kw در موقعیت های محوری مشابه خطوط هم تراز فشار مقادیر بالاتری دارا بوده و در نتیجه ضریب بازیافت فشار استاتیک به دست آمده نیز بالاتر است.

همچنان که قبلاً نیز اشاره شد خطوط هم تراز ورتیسسته پیش بینی شده توسط مدل توربولانسی k-ε استاندارد برای دیفیوزر با زاویه واگرایی 10° در شکل 8-الف و برای مدل توربولانسی SST kw در شکل 8-ب نشان داده شده است.

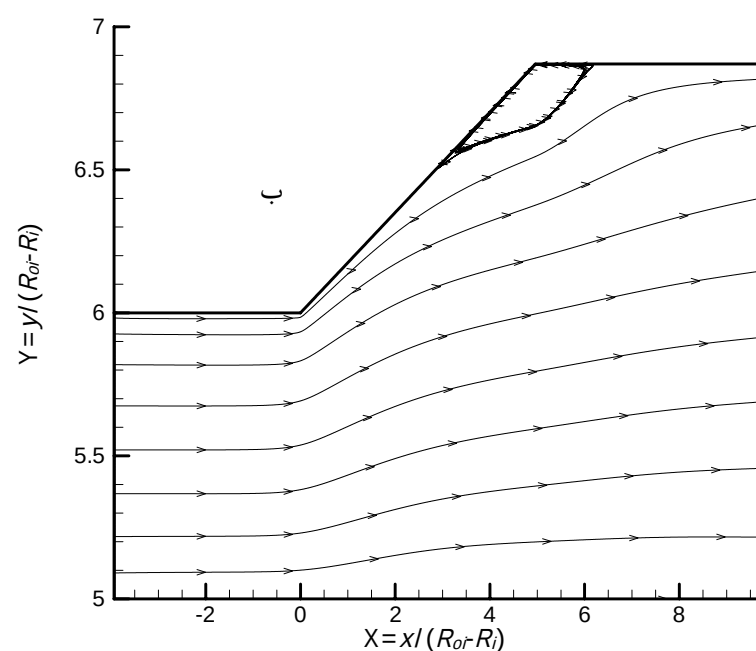
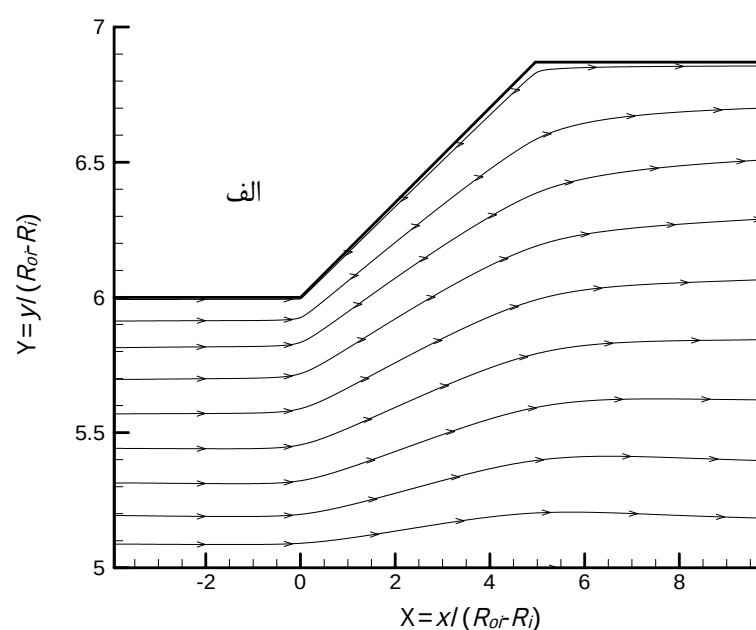
با توجه به شکل 8-الف اندازه ورتیسسته در مرکز دیفیوزر تقریباً صفر بوده و جریان تقریباً غیرچرخشی است. با نزدیک شدن به دیواره ها به دلیل افزایش گرادیان سرعت اندازه ورتیسسته و در نتیجه چرخش جریان به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. همچنین به دلیل عدم توانایی مدل توربولانسی k-ε استاندارد در پیش بینی جدایش جریان در انتهای دیواره واگرای دیفیوزر مقادیر اندازه ورتیسسته در این ناحیه و نزدیک دیواره بالا هستند.

با توجه به شکل 4 و نیز جدول 3 مشاهده می شود که مدل های توربولانسی SA، Skε و Rkε در پیش بینی نقطه اتصال مجدد جریان تقریباً مشابه با یکدیگر عمل نموده و این نقطه را در فاصله نزدیکتری از نقطه جدایش جریان تخمین می زنند. بنابراین این مدل ها نواحی جدایش جریان کوچکتر و ضرایب بازیافت فشار استاتیک بیشتری را در مقایسه با مدل توربولانسی SST kw پیش بینی می کنند.

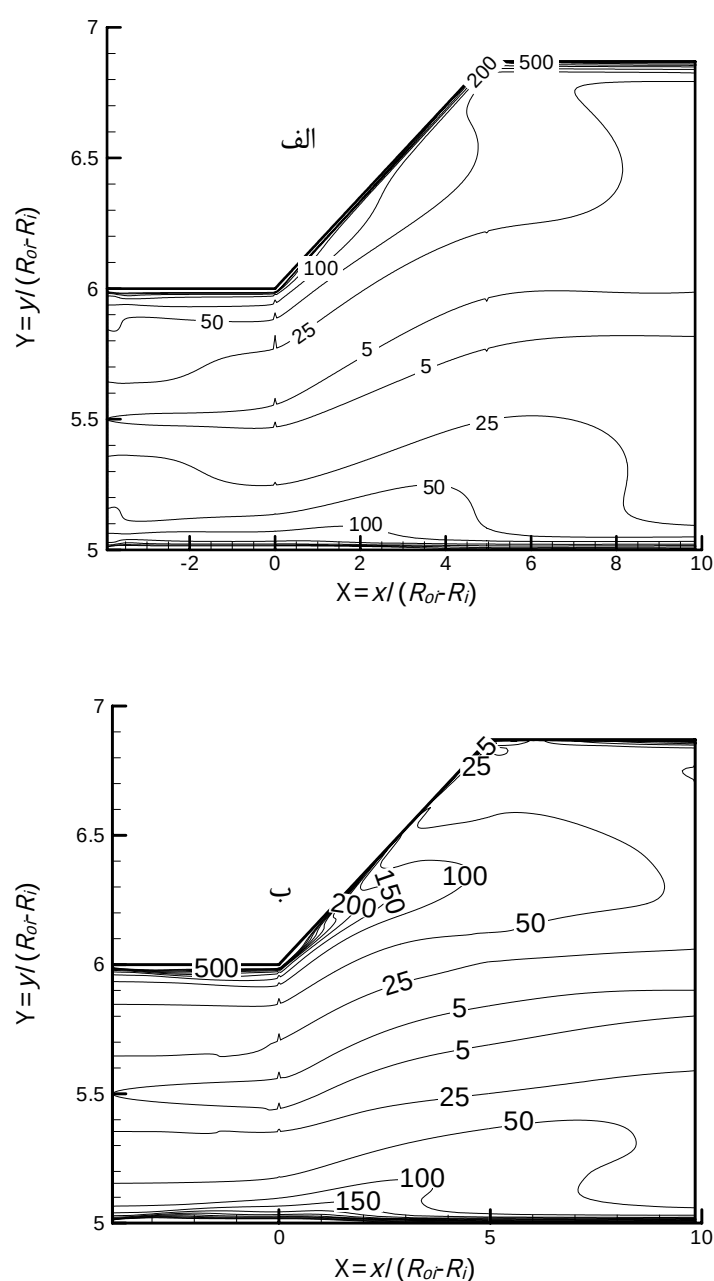
همچنین به منظور درک بهتر و مقایسه رفتار جریان پیش بینی شده، خطوط جریان و خطوط هم تراز سرعت و فشار و اندازه ورتیسسته پیش بینی شده توسط دو مدل توربولانسی SST kw و k-ε استاندارد در شکل های 5 تا 8 ارائه شده اند.

مقایسه خطوط جریان شکل 5 نشان می دهد که مدل توربولانسی SST kw بخوبی جدایش جریان را تسخیر نموده، اما مدل توربولانسی k-ε استاندارد قادر به پیش بینی گردابه های موجود در جریان برگشتی نمی باشد. همچنین مقایسه رفتار خطوط جریان نشان داده شده با نتایج ارائه شده در جدول 3 و شکل 4 نیز دلیلی بر این ادعا است.

مقایسه خطوط هم تراز سرعت پیش بینی شده توسط دو مدل توربولانسی SST kw و k-ε استاندارد بر روی دیواره بالایی و در نزدیکی خروجی دیفیوزر (انتهای قسمت واگرای دیفیوزر حلقوی) بیانگر دقت مناسبتر مدل توربولانسی SST kw در پیش بینی ناحیه گردش مجدد جریان است. به عبارت دیگر جایی که کنتور سرعت برای مدل توربولانسی SST kw مقدار صفر را نشان می دهد



شکل 5 خطوط جریان، الف) مدل k-ε استاندارد ب) مدل SST kw



شکل 8 خطوط هم‌تراز ورتیسسته، الف) مدل k-ε استاندارد ب) مدل SST kw

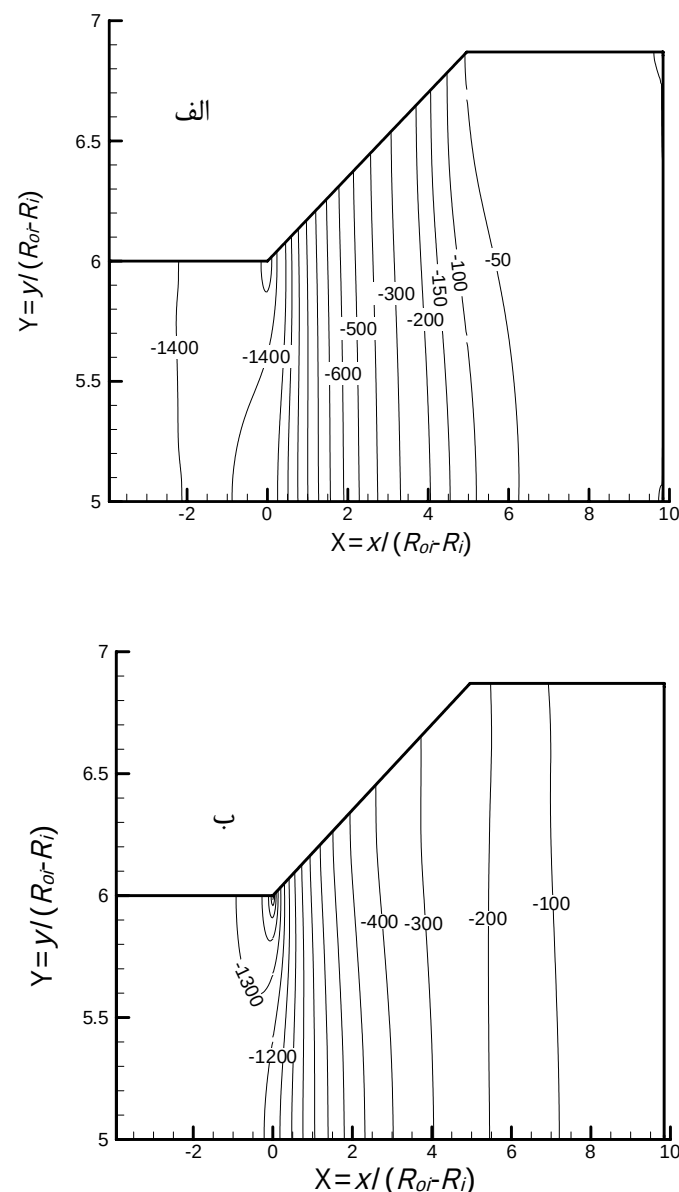
تطبیقی بر اساس اجزای فوق و ابداع یک الگوریتم محاسباتی جهت ترکیب نمودن تمامی مؤلفه‌های فوق بصورت یکپارچه برای انجام بهینه‌سازی کاملاً خودکار است. در ادامه تحقیق جزئیات بیشتری از مراحل بهینه‌سازی هندسی ارائه شده است.

5-1- پارامتری‌سازی هندسی

در مقاله حاضر از اسپلاین نربز برای نمایش دیواره دیفیوزر استفاده شده است. گرچه یک لبه با انحنای متغیر را می‌توان با منحنی متفاوتی نظیر اسپلاین یا منحنی بزیر نمایش داد اما اسپلاین نربز انعطاف‌پذیری بیشتری را ارائه می‌دهد. از آنجا که اسپلاین نربز از یک رابطه تابعی پارامتریک برای نقاط کنترلی معلوم استفاده می‌کند، در مواجهه با شیب‌های بسیار زیاد با مشکل روبرو نمی‌شود. از آنجا که منحنی به وسیله چندین چندجمله‌ای درجه پایین با استفاده از یک تعریف یکتا برای کل طول نمایش داده می‌شود، قادر به ترسیم هرگونه پیچیدگی هندسی می‌باشد.

به منظور بهینه‌سازی هندسه بر اساس طول و نسبت سطح ثابت دیفیوزر، نقاط کنترلی ابتدا و انتهای هر منحنی اسپلاین نربز دقیقاً بر روی ورودی و خروجی دیفیوزر ثابت شده‌اند. سایر نقاط کنترلی که متغیر هستند به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر متغیرهای طراحی همان مختصات مکانی متغیر X و Y دیواره و اگر ای دیفیوزر هستند.

نقاط کنترلی متغیر قادر به جابجایی در هر دو جهت افقی و عمودی هستند. در این تحقیق نقاط کنترلی به ترتیب با شروع از سه نقطه تا حداکثر



شکل 7 خطوط هم‌تراز فشار، الف) مدل توربولانسی k-ε استاندارد ب) مدل توربولانسی SST kw

با توجه به نتایج شکل 8- ب برای مدل توربولانسی SST kw نیز اندازه ورتیسسته در مرکز دیفیوزر تقریباً صفر بوده و جریان پیش‌بینی شده در این ناحیه غیرچرخشی است. اما مقادیر اندازه ورتیسسته در نزدیکی دیواره‌ها کاملاً متفاوت از مدل توربولانسی k-ε استاندارد است. در این نواحی تا زمانی که جدایش جریان رخ نداده است به دلیل گرادیان سرعت بالا در نزدیکی دیواره اندازه ورتیسسته بالا است، اما در ناحیه جدایش جریان (انتهای دیواره و اگر) به دلیل صفر شدن گرادیان سرعت محوری اندازه ورتیسسته در این ناحیه کاهش یافته است.

در نتیجه با توجه به نتایج جدول 3 و شکل‌های 4 تا 8 می‌توان علت ضریب بازیافت فشار استاتیک زیاد پیش‌بینی شده توسط مدل‌های توربولانسی k-ε استاندارد، SA و نیز Rkε را به عدم توانایی صحیح این مدل‌ها در پیش‌بینی ناحیه جدایش جریان موجود نسبت داد. به عبارت دیگر این مدل‌ها محدوده جدایش جریان کوچکتری را تخمین زده و در نتیجه ضریب بازیافت فشار بیشتری را پیش‌بینی می‌کنند. بنابراین در ادامه حل مدل توربولانسی SST kw به عنوان مدل مناسب‌تر جهت فرایند بهینه‌سازی دیفیوزر با جدایش جریان وسیع انتخاب شده است.

5- شیوه بهینه‌سازی

مؤلفه‌های اصلی شیوه بهینه‌سازی اتخاذ شده پارامتری‌سازی هندسی، تولید مش محاسباتی با سازمان، حل معادلات حاکم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (حل دقیق)، مدل‌سازی تقریبی به روش کریگینگ، بهینه‌سازی

توربولانسی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. اما در این تحقیق به منظور کاهش زمان حل مسأله، تولید مش با سازمان و با کیفیت در نزدیک دیواره مبنای تولید شبکه قرار داده شده است. به دلیل تغییر هندسی دیواره دیفیوزر برای کنترل کیفیت شبکه، مخصوصاً هنگام اعمال لایه مرزی بر روی دیواره‌ها انتخاب روش تولید مش مناسب بر اساس تجربه برحسب نسبت منظری صورت می‌گیرد. نسبت منظری به صورت نسبت طول به نسبت ارتفاع $(X_1-L_i)/(Y_1-R_{oi})$ تعریف می‌شود. اگر این نسبت منظری بزرگتر از 0/5 بود، از یک الگوریتم تولید مش محاسباتی و در غیر اینصورت از الگوریتم ثانویه تولید مش استفاده می‌شود.

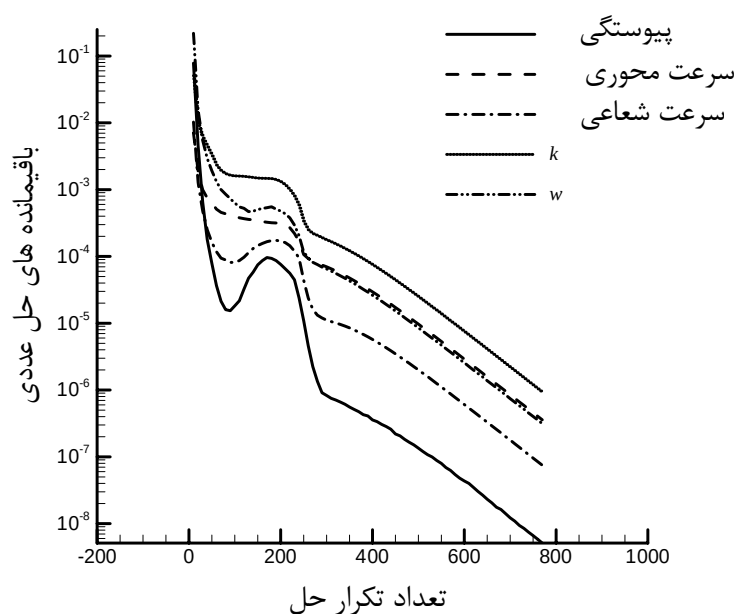
با توجه به این که جریان سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است، حل مسأله بصورت فشار مبنا و با در نظر گرفتن فضای حل دو بعدی تقارن محوری انجام شده است. برای معادلات مومنتم از شیوه گسسته‌سازی آپویند مرتبه دوم استفاده شده است. برای کوپلینگ فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. همچنین، معیار همگرایی کاهش باقی‌مانده‌ها به کمتر از 10^{-6} در نظر گرفته شده است (شکل 10).

3-5- مدل سازی تقریبی

روش‌های متعددی برای ساخت مدل‌های تقریبی وجود دارند [17-20]. تکنیک‌هایی نظیر کریگینگ یا ماشین‌های بردار پشتیبان به دلیل ارائه انعطاف بیشتر در تنظیم پارامترهای مدل و تامین بازه اطمینان برای خروجی پیش‌بینی شده برای بهینه‌سازی سراسری مناسبتر هستند. شبکه‌های عصبی نیازمند آموزش و اعتبارسنجی وسیع بوده ولی با این وجود به این عنوان یک روش متداول برای کاربردهای طراحی مخصوصاً در زمینه مدل‌سازی آیرودینامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه روش کریگینگ عمومی که اغلب برای تقریب مدل‌های محاسباتی استفاده شده است، بطور مختصر توضیح داده خواهد شد.

در شروع حل مجموعه‌ای از داده‌های مختصاتی بی‌بعد به صورت $A = \{a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(n)}\}^T$ با پاسخ‌های حاصل از حل دقیق $b = \{b^{(1)}, b^{(2)}, \dots, b^{(n)}\}^T$ در اختیار است. هدف از مدل‌سازی تقریبی پیش‌بینی مقدار پاسخ (تابع هزینه) به ازای بردار a جدید با بعدی برابر با تعداد متغیرهای طراحی است. به فرض اینکه پاسخ‌های به دست آمده حاصل از یک فرایند اتفاقی باشند، مجموعه‌ای از بردارهای اتفاقی در اختیار است:

$$B = (B(a^{(1)}) \dots B(a^{(n)}))^T \quad (16)$$



شکل 10 نمودار همگرایی حل عددی

هفت نقطه کنترل افزایش داده شده‌اند. بنابراین طبق رابطه (12) تعداد متغیرهای طراحی (n_{dv}) برای نقاط کنترلی فوق به ترتیب دو، چهار، شش، هشت و ده خواهند بود.

$$n_{dv} = (n_{cp} - 2) \times 2 \quad (12)$$

به منظور ارزیابی اثر متغیرهای طراحی روی نتایج، نقاط کنترلی به ترتیب با شروع از سه تا هفت نقطه کنترل افزایش یافتند. مختصات هر نقطه کنترلی توسط قیود مسأله محدود شده است. قیود مسأله کاملاً هندسی بوده و با توجه به معادلات (13) و (14) تعریف شده‌اند. قیود مسأله برای محدود نمودن فضای تغییرات متغیرهای هندسی x و y هر نقطه کنترلی اعمال شده‌اند بگونه‌ای که فرم اصلی دیفیوزر بودن مسأله حفظ شود.

$$L_i + (m-1)\left(\frac{L_D}{n_{cp}-2}\right) \leq x_m \leq L_i + m\left(\frac{L_D}{n_{cp}-2}\right) \quad (13)$$

به نحوی که x_m معرف مؤلفه افقی m امین نقطه کنترل داخلی، L_i و L_D به ترتیب طول‌های ثابت دیفیوزر و لوله حلقوی ورودی و n_{cp} بیانگر تعداد کل نقاط کنترلی می‌باشند. همچنین به منظور حفظ فرم دیفیوزر، طبق رابطه (14) مؤلفه عمودی هر نقطه کنترل متغیر باید بزرگتر مساوی مؤلفه عمودی نقطه کنترل قبل از خودش باشد:

$$y_{m-1} \leq y_m \leq R_{oe} \quad 1 \leq m \leq n_{cp} - 2 \quad (14)$$

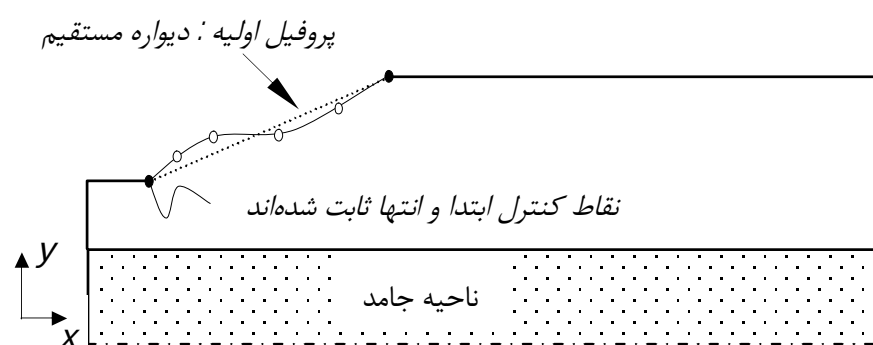
مثلاً وقتی 3 نقطه کنترلی باشد، طبق رابطه 12 تنها دو متغیر طراحی x_1, y_1 وجود دارند و هدف یافتن بهترین بردار متغیرهای طراحی $[x_1, y_1]$ است. همچنین با توجه به معادلات (13) و (14) کمیت $m=1$ می‌باشد، در نتیجه قیود مسأله با استفاده از روابط (13) و (14) به فرم معادلات (15) تبدیل می‌شوند.

$$L_i \leq x_1 \leq L_i + L_D, \quad R_{oi} \leq y_1 \leq R_{oe} \quad (15)$$

در شکل 9 پروفیل اولیه دیواره و منحنی بهینه‌سازی برای حالت استفاده از شش نقطه کنترل ($n_{cp}=6$) و هشت متغیر طراحی ($n_{dv}=8$) نشان داده شده است.

5-2- تولید کننده مش و حل کننده محاسباتی

بهترین طرح دیفیوزر باید بیشترین ضریب بازیافت فشار را داشته باشد. برای یافتن بیشترین ضریب بازیافت فشار حل معادلات بقای جرم و مومنتم همراه با شرایط مرزی مربوطه برای یک هندسه دیفیوزر معلوم ضروری است. بدین منظور از نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت استفاده شده است. این نرم‌افزار معادلات بقا را به شیوه حجم محدود گسسته نموده و آنها را حل می‌کند. مش محاسباتی مربوطه توسط نرم‌افزار گمبیت تولید می‌شود. در برخی موارد نظیر تحقیق [9] از مش بی سازمان مثلثی منطبق بر بدنه برای مدل



شکل 9 پارامتری سازی هندسی با شش نقطه کنترل

همبستگی حداکثر نماید. بدین منظور با اضافه نمودن پاسخ جدید $\hat{b}$ (که مقدارش باید تعیین شود) به داده‌های موجود b بردار $\tilde{b} = [b^T, \hat{b}^T]^T$ حاصل می‌شود. بردار همبستگی جدید بین داده‌های بررسی شده و پیش‌بینی جدید با رابطه 25 تعریف می‌شود.

$$\psi = \begin{pmatrix} \text{cor}[B(a^{(1)}), B(a)] \\ \vdots \\ \text{cor}[B(a^{(n)}), B(a)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi^{(1)} \\ \vdots \\ \psi^{(n)} \end{pmatrix} \quad (25)$$

سپس ماتریس همبستگی افزوده تولید می‌شود.

$$\tilde{\Psi} = \begin{pmatrix} \Psi & \psi \\ \psi^T & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

در نتیجه احتمال داده‌های لگاریتمی افزوده عبارت است از:

$$\ln(\lambda) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \ln |\tilde{\Psi}| - \frac{(\tilde{b} - 1\hat{\beta})^T \tilde{\Psi}^{-1} (\tilde{b} - 1\hat{\beta})}{2\hat{\sigma}^2} \quad (27)$$

برای محاسبه تابع هزینه جدیدی ($\hat{b}$) که مقدار احتمال لگاریتمی رابطه (27) را حداکثر کند، از رابطه (27) نسبت به $\hat{b}$ مشتق گرفته و با مساوی صفر قرار دادن عبارت حاصل مقدار تخمین احتمالی حداکثر برای $\hat{b}$ بصورت رابطه (28) به دست می‌آید.

$$\hat{b}(a) = \hat{\beta} \psi^T \Psi^{-1} (b - 1\hat{\beta}) \quad (28)$$

بنابراین به ازای هر بردار شامل متغیرهای طراحی جدید a مقدار پاسخ (یا تابع هزینه) پیش‌بینی شده توسط مدل تقریبی کریگینگ توسط رابطه (28) محاسبه می‌شود. چون مدل تقریبی $\hat{b}$ تنها تقریبی از تابع حقیقی b - که قصد بهینه‌سازی آن است - می‌باشد، ارتقای دقت مدل با استفاده از فراخوانی‌های حل دقیق بیشتر علاوه بر نمونه‌برداری اولیه (حل اولیه) ضروری است.

با استفاده از مدل تقریبی به دست آمده می‌توان به جستجوی متغیرهای طراحی جدید برای تحلیل پرداخت، اما از یک سو دقت کلی مدل تقریبی در دست نیست و نیاز به انجام حل دقیق به ازای متغیرهای طراحی جدیدی است که سبب افزایش دقت عمومی مدل شوند و از سوی دیگر برای یافتن سریع مقدار بهینه باید در ناحیه پیش‌بینی شده توسط مدل متغیرهای طراحی جدیدی با حل دقیق بررسی شود. بنابراین ایجاد توازن بین این دو حالت ضروری است. در نتیجه به جای اینکه مدل تقریبی حداکثر شود، بهبود انتظار حداکثر شده و بردار متغیرهای طراحی جدید به دست می‌آیند. حداکثرسازی بهبود مورد انتظار خود یک فرایند بهینه‌سازی است که در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای حداکثر سازی بهبود مورد انتظار استفاده شده است.

به ازای بردار متغیرهای طراحی دلخواه a ، مقدار بهبود مورد انتظار برای بهترین مقدار پاسخ به دست آمده تاکنون (کمترین مقدار تابع هزینه، $b_{\min}$) عبارتست از:

$$E[I(a)] = (b_{\min} - \hat{b}(a)) \phi\left(\frac{b_{\min} - \hat{b}(a)}{\hat{s}(a)}\right) + \hat{s} \phi\left(\frac{b_{\min} - \hat{b}(a)}{\hat{s}(a)}\right) \quad (29)$$

به نحوی که Φ و ϕ به ترتیب تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال توزیع نرمال استاندارد هستند. در رابطه (29) $\hat{S}$ جذر خطای متوسط مربعات مدل تقریبی کریگینگ تولید شده است. هنگامی که مقدار $\hat{S}(a)$ صفر شود

در رابطه (16) n برابر با تعداد پاسخ‌های حل دقیق موجود می‌باشد. این میدان اتفاقی یک متوسط 1β دارد که 1 یک بردار $n \times 1$ از مقادیر 1 است. متغیرهای اتفاقی از طریق رابطه پایه زیر در ارتباط هستند.

$$\text{cor}[B(a^{(i)}), B(a^{(j)})] = \exp\left(-\sum_{k=1}^{n_{dv}} \gamma_k |a_k^i - a_k^j|^2\right) \quad (17)$$

با توجه به رابطه (17) ماتریس همبستگی تمام داده‌های بررسی شده (با استفاده از حلگر دقیق) قابل تولید است.

$$\Psi = \begin{pmatrix} \text{cor}[B(a^{(1)}), B(a^{(1)})] \dots \text{cor}[B(a^{(1)}), B(a^{(n)})] \\ \vdots \\ \text{cor}[B(a^{(n)}), B(a^{(1)})] \dots \text{cor}[B(a^{(n)}), B(a^{(n)})] \end{pmatrix} \quad (18)$$

پس از محاسبه ماتریس همبستگی ماتریس کوواریانس به صورت رابطه (19) تعریف می‌شود:

$$\text{cov}(B, B) = \sigma^2 \Psi \quad (19)$$

با توجه به روابط فوق همبستگی‌ها وابسته به فاصله مطلق بین نقاط نمونه $|a_k^i - a_k^j|$ و پارامترهای γ_k است. در ادامه برای تعیین مقادیر γ باید احتمال b حداکثر شود. چون پاسخ‌ها از حل دقیق حاصل شده‌اند احتمال به صورت رابطه (20) بر حسب داده‌های نمونه بیان می‌شود.

$$\lambda = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2} |\Psi|^{1/2}} \exp\left[-\frac{(b - 1\beta)^T \Psi^{-1} (b - 1\beta)}{2\sigma^2}\right] \quad (20)$$

برای ساده‌سازی حداکثرسازی احتمال از رابطه (20) لگاریتم طبیعی گرفته می‌شود.

$$\ln(\lambda) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln |\Psi| - \frac{(b - 1\beta)^T \Psi^{-1} (b - 1\beta)}{2\sigma^2} \quad (21)$$

پس از مشتق‌گیری از رابطه (21) نسبت به β و σ^2 و مساوی صفر قرار دادن، تخمین‌های احتمال حداکثر برای β و σ^2 بصورت روابط (22) و (23) به دست می‌آیند.

$$\hat{\beta} = \frac{1^T \Psi^{-1} b}{1^T \Psi^{-1} 1} \quad (22)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(b - 1\hat{\beta})^T \Psi^{-1} (b - 1\hat{\beta})}{n} \quad (23)$$

پس از جایگزینی $\hat{\beta}$ و $\hat{\sigma}^2$ درون رابطه (21) و حذف ترم‌های ثابت تابع احتمال لگاریتمی متمرکز به دست می‌آید.

$$\ln(\lambda) \approx -\frac{n}{2} \ln(\hat{\sigma}^2) - \frac{1}{2} \ln |\psi| \quad (24)$$

مقدار این تابع وابسته به پارامترهای مجهول γ است. هدف یافتن مقادیری برای γ ‌ها است به نحوی که معادله (24) را حداکثر نماید. به دلیل اینکه نمی‌توان از معادله (24) مشتق گرفت از تکنیک‌های بهینه‌سازی عددی نظیر الگوریتم ژنتیک به این منظور استفاده می‌شود (محاسبه تابع احتمال لگاریتمی متمرکز اگر n و n_{dv} زیاد بزرگ نباشند سریع است).

پارامترهای همبستگی به صورتی انتخاب شدند که احتمال پاسخ‌های دقیق موجود، b را حداکثر کنند. یک پاسخ (تابع هزینه) جدید $\hat{b}$ به ازای متغیرهای طراحی دلخواه a باید با داده‌های بررسی شده و بنابراین با پارامترهای همبستگی انتخاب شده سازگار باشد. بنابراین پاسخی انتخاب می‌شود که احتمال داده‌های نمونه و پاسخ جدید را با معلوم بودن پارامترهای

مقدار بهبود مورد انتظار صفر در نظر گرفته می‌شود. خطای متوسط مربعات با استفاده از رابطه (30) محاسبه می‌شود.

$$\hat{s}^2(a) = \hat{\sigma}^2 [1 - \psi^T \psi^{-1} \psi + \frac{1 - 1^T \psi^{-1} \psi}{1^T \psi^{-1} 1}] \quad (30)$$

ترم اول در سمت راست معادله (29) اختلاف بین حداقل فعلی b_{min} و مقدار پیش‌بینی‌شده $\hat{b}(a)$ در a ضرب در احتمال کوچکتر بودن $\hat{b}(a)$ از b_{min} است. بنابراین ترم اول زمانی که $\hat{b}(a)$ کوچکتر از b_{min} باشد بزرگ است. ترم دوم در سمت راست معادله (29) حاصل ضرب جذر خطای متوسط مربعات $\hat{s}(a)$ و تابع چگالی نرمال $\phi(\cdot)$ است. این ترم هنگامی بزرگ است که مقدار $\hat{b}(a)$ به b_{min} نزدیک باشد و $\hat{s}(a)$ بزرگ باشد. بنابراین مقدار تابع بهبود مورد انتظار در نقطه‌ای با مقدار تخمینی کوچکتر از b_{min} و یا در نقطه‌ای با عدم قطعیت تخمینی زیاد بزرگ است. معادله (29) یک توازن هوشمند خودکار بین استخراج محلی و جستجوی سراسری را فراهم می‌نماید. بنابراین برداری از متغیرهای طراحی که مقدار تابع بهبود مورد انتظار به ازای آنها حداکثر شده است برای به روزرسانی مدل کریگینگ و در عین حال جستجوی مقدار بهینه استفاده شده‌اند.

5-4- الگوریتم بهینه‌سازی تطبیقی

روش بهینه‌سازی کلی به صورت زیر سازماندهی شده است:

1- تعریف مسأله بهینه‌سازی، شامل تعیین تابع هدف و پارامتری‌سازی بر اساس متغیرهای طراحی و قیود مسأله می‌باشد. در این مطالعه تابع هدف (1-Cp) است.

2- تولید نقاط نمونه‌برداری اولیه با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش، در این مقاله روش نمونه‌برداری لاتین هاپیرکیوب بر اساس معیار ماکسیمین [21] و تعریف گره‌بازکن و تابع معیار مقدار اسکالر [22] جهت رتبه‌بندی طرح‌های نمونه‌برداری در حال رقابت استفاده شده است. در حل کننده اولیه مسأله ابتدا برحسب متغیرهای طراحی و به تعداد نمونه‌برداری اولیه از فضای حل یک ماتریس از اعداد بدون بعد با استفاده از روش لاتین هاپیرکیوب تولید می‌شود. مثلاً وقتی برای 3 نقطه کنترلی (دو متغیر طراحی x_1, y_1) تعداد 20 نمونه‌برداری از فضای حل انجام شود، در ابتدای حل اولیه با استفاده از روش طراحی آزمایش مطرح شده یک ماتریس به ابعاد 20×2 شامل مختصات بی‌بعد متغیرهای طراحی تولید می‌شود.

3- مدول حل دقیق، پس از فراخوانی مختصات بی‌بعد متغیرهای طراحی به درون مدول حل دقیق با توجه به قیود مسأله این مختصات بعددار شده و سپس مختصات مکانی بر حسب میلی‌متر گرد می‌شوند تا امکان تولید هندسه با گمبیت فراهم شود. پس از تولید مش حل فلوئنت انجام شده و در ادامه مقادیر باقی‌مانده‌های حل کنترل می‌شوند. اگر همگرایی ارضا شده بود، مختصات نقاط و نیز بردار بی‌بعد متغیرهای طراحی و مقادیر لازم برای محاسبه ضریب بازیافت فشار ذخیره می‌شوند. در صورتی که حل فلوئنت به هر دلیل واگرا شده باشد (مقادیر باقی‌مانده‌ها پس از اتمام حداکثر تکرار تعریف شده برای حل بیش از 10^{-6} باشند) با استفاده از یک تابع جریمه مقدار ضریب بازیافت فشار برای بردار متغیرهای طراحی مربوطه حداقل در نظر گرفته می‌شود. در هر دو حالت واگرایی یا همگرایی حل، مختصات نقاط و نیز بردار بی‌بعد متغیرهای طراحی همراه ضرایب بازیافت فشار برای استفاده در حل کننده نهایی ذخیره خواهند شد. به عنوان مثال برای 3 نقطه کنترل (دو متغیر طراحی x_1, y_1) حل کننده اولیه پس از 20 بار حل فلوئنت خاتمه یافته و یک ماتریس 20×2 شامل ورودی‌های بی‌بعد مسأله و یک بردار

خروجی 20×1 شامل ضرایب بازیافت فشار محاسبه شده خواهیم داشت.
4- تولید مدل تقریبی کریگینگ بر اساس نقاط نمونه و پاسخ‌هایشان، در این قسمت با توجه به ماتریس ورودی‌های بی‌بعد مسأله و بردار خروجی، مدل تقریبی کریگینگ تولید می‌شود.

5- حداکثرسازی تابع بهبود مورد انتظار جهت تعیین نقطه نمونه‌برداری بعدی و محاسبه پاسخ آن با استفاده از حلگر دقت بالا در مدول حل دقیق.

6- بررسی شرایط خروج از حلقه تکرار، اگر معیار همگرایی ارضا شود یا هزینه محاسباتی خاتمه یابد برنامه متوقف می‌شود. در غیر این صورت نقاط طراحی جدید به مجموعه نقاط قبلی اضافه شده و برنامه به مرحله 4 باز می‌گردد. در این مسأله هزینه محاسباتی به میزان $20n_{dv}$ تکرار محدود شده است.

معیار همگرایی با توجه به گزارش هانگ و همکاران [23] به صورت رابطه (31) انتخاب شده است:

$$\zeta = \frac{E[I(a)]_{\max}}{|b_{\max} - b_{\min}|} \quad (31)$$

از مزایای این معیار همگرایی انتخاب تلورانس همگرایی توسط کاربر بدون نیاز به بررسی اندازه پاسخ‌ها برای مسائل بهینه‌سازی مختلف است.

در پایان الگوریتمی طراحی شده است تا مراحل مطرح شده در بالا با یکدیگر ترکیب شده و انتقال داده بین آنها بدون دخالت انسانی و بصورت کاملاً خودکار صورت پذیرد. در این بخش، چالش اصلی مربوط به تعبیه نرم افزارهای محاسباتی (انسيس فلوئنت و گمبیت) درون حلقه کنترل بود. این مهم به وسیله برنامه‌نویسی درون نرم‌افزار متلب محقق شد. الگوریتم ابداعی بطور شماتیک در شکل 11 نشان داده شده است.

همزمان با اجرای برنامه نرم‌افزارهای گمبیت و انسيس فلوئنت به ترتیب با فراخوانی ژورنال فایل‌های خود اجرا می‌شوند. ژورنال فایل گمبیت حاوی

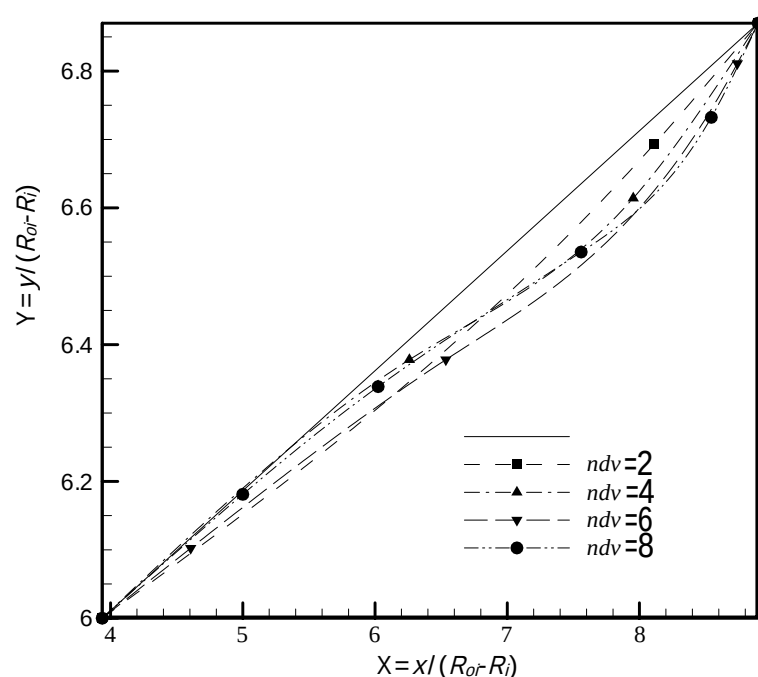


شکل 11 طرح شماتیک فرایند کلی بهینه‌سازی

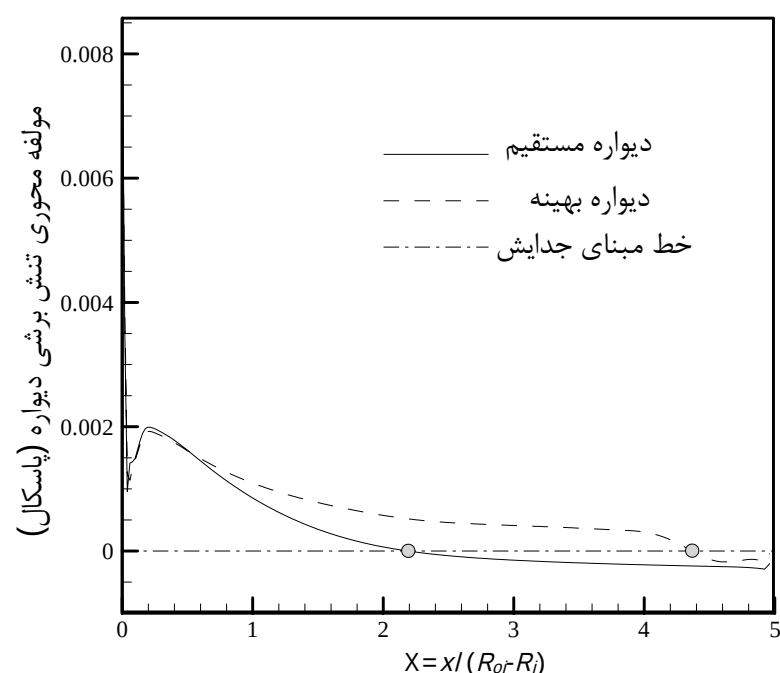
طبق انتظار، با افزایش تعداد نقاط کنترل شکل دیواره به موقعیت بهینه نزدیک می‌شود. همچنین، افزایش تعداد نقاط کنترل به بیش از 6 تغییری در مقدار ضریب بازیافت فشار ایجاد نمی‌کند. در مقایسه با دیفیوزر اولیه با دیواره مستقیم، دیفیوزر بهینه افزایشی در مقدار ضریب بازیافت فشار به میزان 4% را نشان می‌دهد. افزایش نسبتا جزئی در ضریب بازیافت فشار نشان دهنده وابستگی کمتر جریان‌های آشفته در مقایسه با جریان‌های آرام به هندسه جریان است.

شکل 12 فرم دیواره بهینه برای دو تا هشت متغیر طراحی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دو نکته حائز اهمیت است، شکل دیواره با افزایش تعداد نقاط کنترل به فرم بهینه خود می‌رسد و از سوی دیگر میزان تغییرات شکل دیواره در مقایسه با دیفیوزر با دیواره مستقیم کوچک است. همچنین نحوه تغییرات تنش برشی بر روی دیواره‌های بالایی دیفیوزرهای اولیه و بهینه در شکل 13 نشان داده شده است.

با توجه به شکل 13 موقعیت جدایش پیش‌بینی شده درون دیفیوزر بهینه به تعویق افتاده و از موقعیت بی‌بعد $x/\Delta R=2/2$ به فاصله بی‌بعد $x/\Delta R=4/38$ تغییر می‌کند. به منظور درک بهتر نتایج بهینه‌سازی، الگوی خطوط جریان و خطوط هم‌تراز فشار برای دیفیوزرهای مستقیم و بهینه به ترتیب در شکل‌های 14، 15 مقایسه شده‌اند.



شکل 12 فرم بهینه دیواره واگرا برای متغیرهای طراحی مختلف



شکل 13 تغییرات تنش برشی دیواره برای دیفیوزر با دیواره مستقیم و بهینه

تمامی دستورالعمل‌های لازم برای تولید مش با سازمان است. بطور مشابه ژورنال فایل انسیس فلوئنت دربرگیرنده تمامی دستورهای لازم برای حل میدان‌های سرعت و فشار و ذخیره‌سازی نتایج است. در قسمت ذخیره‌سازی، مقادیر فشار استاتیک متوسط سطحی در ورودی و خروجی دیفیوزر و نیز مقدار فشار دینامیک متوسط جرمی در ورودی دیفیوزر جهت محاسبه تابع هدف درون یک فایل متنی ذخیره می‌شوند.

6- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج بهینه‌سازی برای هندسه دیفیوزر اول مطالعه شده در بخش اول با $L_D/\Delta R=5$ و $\alpha=10^\circ$ ارائه شده است. همچنان که در بخش قبلی اشاره شد و در شکل 10 نیز نشان داده شده است، فرایند بهینه‌سازی با انتخاب متغیرهای طراحی یا نقاط کنترلی ($3 \leq n_{CP} \leq 7$) آغاز می‌شود. به منظور تولید مختصات هندسی اولیه، روش نمونه‌برداری لاتین هاپرکیوب با $10n_{dv}$ نمونه استفاده شده است.

بعد از پارامتری‌سازی هندسی، تولید مش و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدل تقریبی کریگینگ تولید شده و بهبود مورد انتظار حداکثر می‌شود. به منظور بیشینه‌سازی احتمال لگاریتمی متمرکز جهت تولید مدل کریگینگ و حداکثرسازی بهبود مورد انتظار برای یافتن بردار متغیرهای بعدی از الگوریتم ژنتیک با اندازه جمعیت 20، نرخ جهش 0/25، شیوه رتبه‌بندی وزنی و تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است. پس از تعیین بردار متغیرهای طراحی جدید پارامتری‌سازی هندسی، تولید مش و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی صورت می‌گیرد. در پایان مدل تقریبی کریگینگ بازسازی شده و بهینه‌سازی تا ارضای شرط توقف حلقه ادامه می‌یابد.

این بخش به مقایسه عملکرد دیفیوزر اولیه با دیواره مستقیم و دیفیوزر حاصل از بهینه‌سازی می‌پردازد. همچنین، برای تأکید بر نتایج حاصل از بهینه‌سازی ضرایب بازیافت فشار و خطوط جریان نیز مقایسه شده‌اند.

نتایج بهینه‌سازی برای نقاط کنترل مختلف و موقعیت بهینه آنها در جدول 4 ارائه شده است. به منظور تعمیم نتایج، مختصات نقاط به صورت تابعی از ارتفاع ورودی جریان (ΔR) نشان داده شده‌اند.

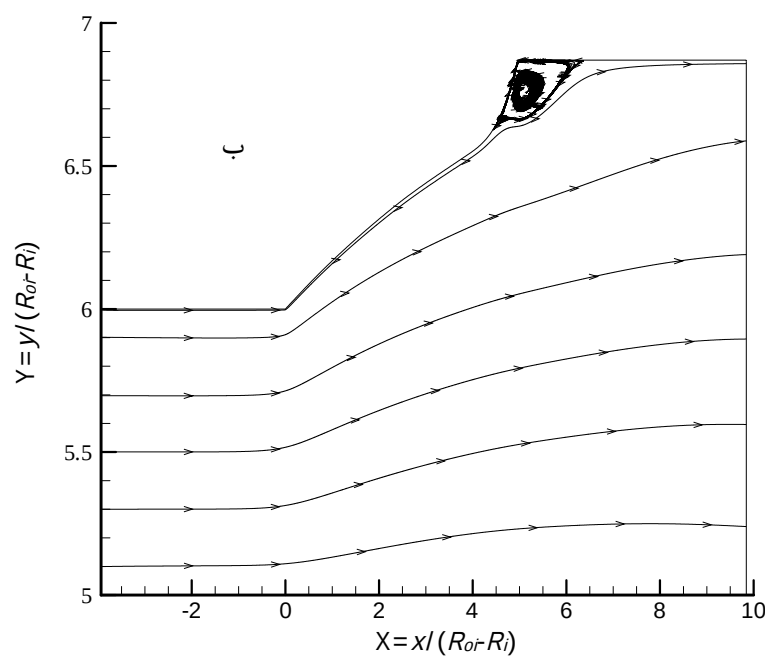
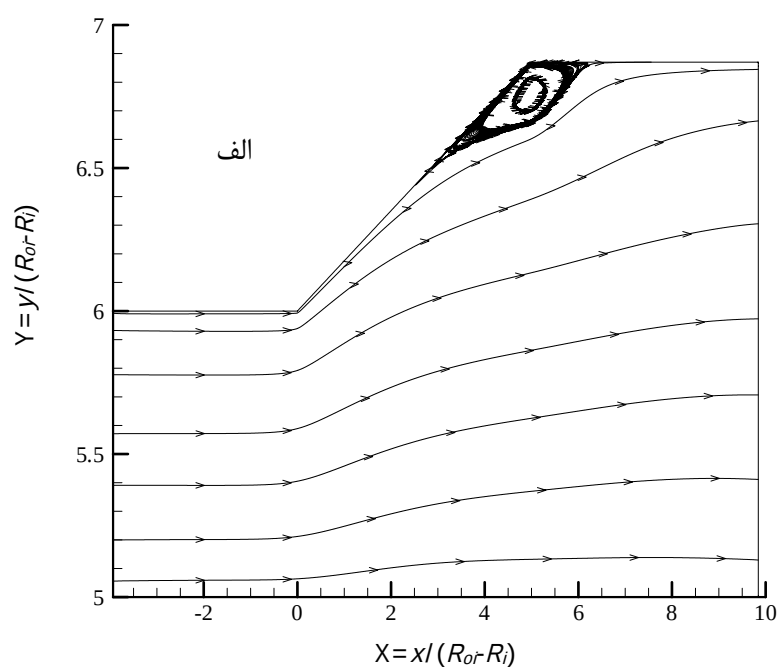
جدول 4 ضرایب بازیافت فشار و مختصات بهینه برای نقاط کنترل مختلف

n_{CP}	n_{dv}	C_p	نقطه کنترل	مؤلفه x	مؤلفه y
3	2	0/513	اول	$8/11\Delta R$	$6/69\Delta R$
4	4	0/522	اول	$6/26\Delta R$	$6/38\Delta R$
			دوم	$7/95\Delta R$	$6/61\Delta R$
			اول	$4/61\Delta R$	$6/1\Delta R$
5	6	0/523	دوم	$6/54\Delta R$	$6/38\Delta R$
			سوم	$8/74\Delta R$	$6/81\Delta R$
			اول	$5\Delta R$	$6/18\Delta R$
6	8	0/525	دوم	$6/02\Delta R$	$6/34\Delta R$
			سوم	$7/56\Delta R$	$6/54\Delta R$
			چهارم	$8/54\Delta R$	$6/73\Delta R$
			اول	$4/53\Delta R$	$6/1\Delta R$
			دوم	$5/83\Delta R$	$6/3\Delta R$
7	10	0/525	سوم	$6/41\Delta R$	$6/38\Delta R$
			چهارم	$7/8\Delta R$	$6/54\Delta R$
			پنجم	$8/66\Delta R$	$6/73\Delta R$

7- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک روش بهینه‌سازی هندسی در یک دیفیوزر حلقوی دوبعدی تقارن‌محوری مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی تقریبی مطرح شده است. هدف نهایی افزایش ضریب بازیافت فشار دیفیوزر با به تعویق انداختن و کاهش محدوده جدایش جریان است.

بخش اول تحقیق به مطالعه و انتخاب مدل توربولانسی مناسب برای جریان‌های با گرادیان فشار معکوس اختصاص یافته، درحالی‌که در قسمت دوم یک روش بهینه‌سازی خودکار برای طراحی دیفیوزرهای دوبعدی حلقوی ارائه شده است. شیوه بهینه‌سازی اتخاذ شده مبتنی بر پارامتری‌سازی هندسی بوسیله اسپلاین نرژ، تولید مش با سازمان توسط گمبیت، حل جریان با انسیس فلونت و مدل‌سازی تقریبی با کریگینگ درون نرم‌افزار متلب



شکل 14 خطوط جریان، الف) دیفیوزر اولیه ب) دیفیوزر بهینه

جدول 5 زمان حل مسأله بهینه‌سازی برای متغیرهای طراحی مختلف

تعداد متغیرهای طراحی (n_{dv})	زمان حل اولیه (ساعت)	زمان حل نهایی (ساعت)
2	5/6	8/9
4	9/8	17
6	14/7	29/1
8	19/7	41/7
10	27/3	66/4

با توجه به نتایج شکل 14 کاهش محدوده جدایش جریان درون دیفیوزر بهینه به وضوح قابل رویت است. همچنین با توجه به خطوط هم‌تراز فشار نشان داده شده در شکل 15 افزایش فشار در خروجی دیفیوزر بهینه در مقایسه با دیفیوزر با دیواره مستقیم قابل مشاهده است.

تغییرات پروفیل سرعت در خروجی دیفیوزر برای دو حالت وجود دیواره مستقیم و بهینه در شکل 16 نشان داده شده است. پروفیل سرعت در خروجی دیفیوزر بر اساس اندازه سرعت متوسط در ورودی دیفیوزر بی‌بعد شده است.

با توجه به شکل 16، پروفیل سرعت درون هر دو دیفیوزر یک ناحیه گردش مجدد را روی دیواره بالایی نشان می‌دهد. این نوع رفتار با خطوط جریان نشان داده شده در شکل 14 مطابقت دارد.

شکل 17 خطوط هم‌تراز سرعت را برای دیفیوزرهای اولیه و بهینه نشان می‌دهد. مقایسه خطوط هم‌تراز سرعت افزایش سرعت در مجاورت دیواره دیفیوزر بهینه را بخوبی نشان می‌دهد. همچنین کاهش محدوده جدایش جریان برای دیفیوزر بهینه به خوبی با مقایسه خطوط هم‌تراز سرعت صفر بر روی نمودارهای شکل 17 به خوبی قابل مشاهده است.

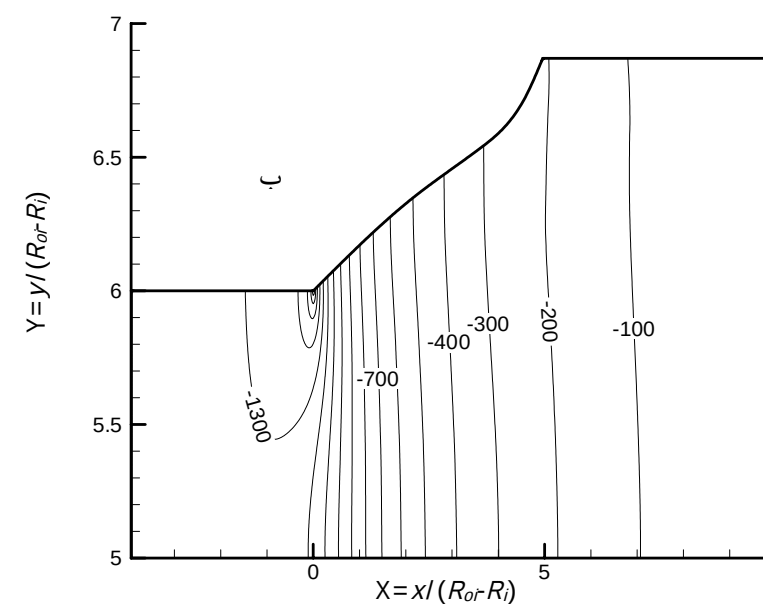
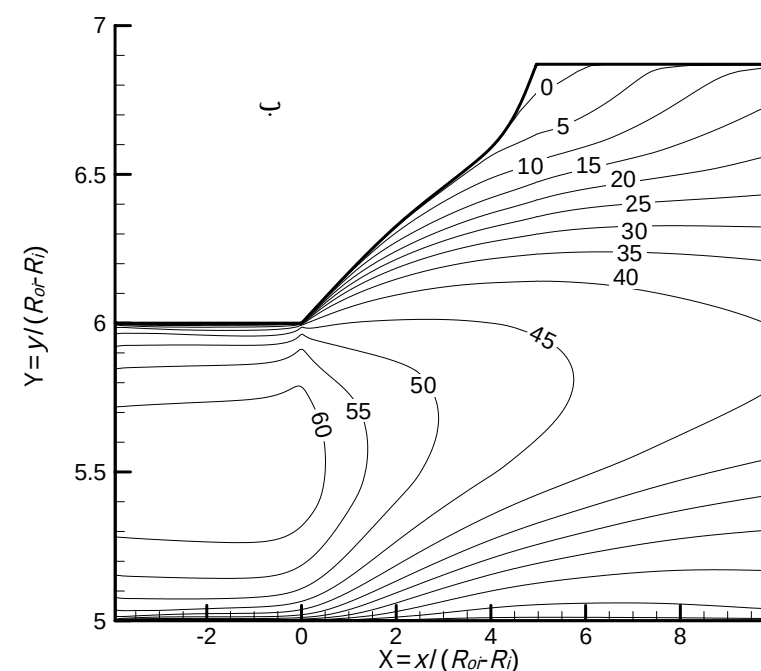
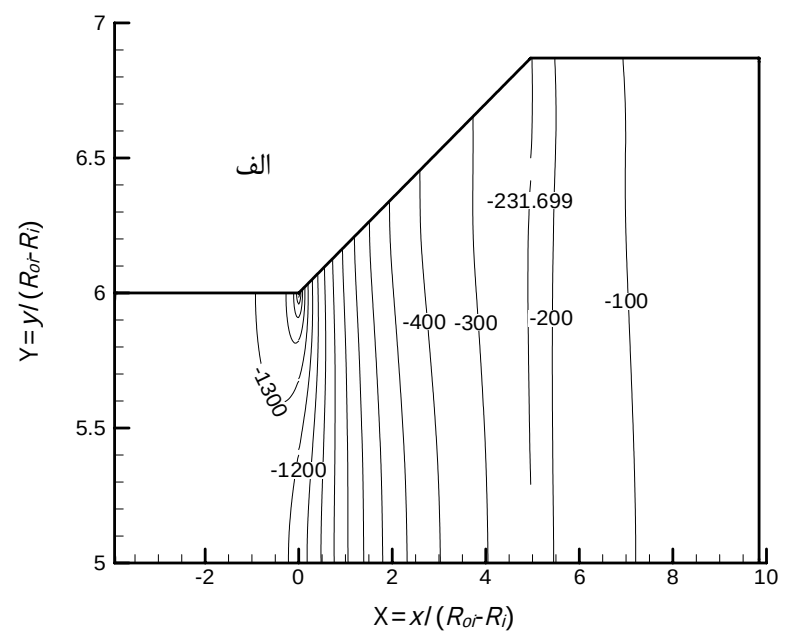
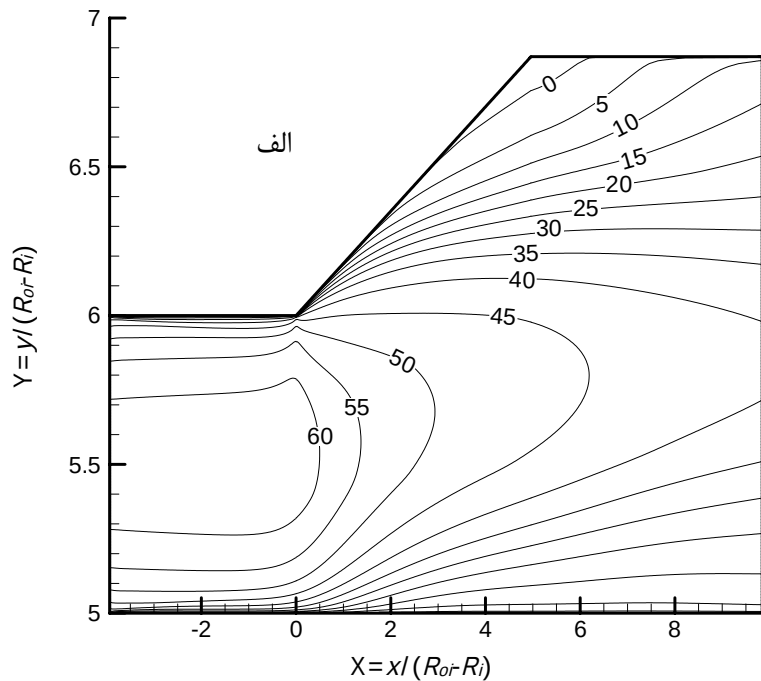
خطوط هم‌تراز ورتیسیته برای دیفیوزرهای مبنا و بهینه در شکل 18 مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل 18 اندازه ورتیسیته در مرکز دیفیوزرها تقریباً صفر بوده و جریان تقریباً غیرچرخشی است. با نزدیک شدن به دیواره‌ها به دلیل افزایش گرادیان سرعت اندازه ورتیسیته و در نتیجه چرخش جریان به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل جدایش جریان در انتهای دیواره واگرا و صفر شدن گرادیان سرعت محوری اندازه ورتیسیته در این نواحی کاهش یافته است. نمودارهای شکل 18 تقریباً مشابه یکدیگر بوده با این تفاوت که از وسعت ناحیه با ورتیسیته پایین در نزدیکی انتهای دیواره واگرا درون دیفیوزر بهینه کاسته شده است.

در پایان جزئیات فرایند بهینه‌سازی برای دیفیوزر حلقوی تقارن‌محوری در عدد رینولدز 2×10^5 و طول ثابت دیفیوزر $L_D = 5.4R$ برای حالت هشت متغیر طراحی ارزیابی شده است. همچنان که قبلاً نیز اشاره شد، برای این مسأله بهینه‌سازی با هشت متغیر طراحی با استفاده از روش نمونه‌برداری لاتین‌هایپرکیوب هشتاد نمونه اولیه (هشتاد هندسه هر کدام با هشت مؤلفه مختصاتی برای دیواره واگرای دیفیوزر) ایجاد شده است. با در نظر گرفتن شرط توقف حلقه 10^{-6} برای رسیدن به پاسخ بهینه نود و هفت تکرار لازم است. برای انجام محاسبات از یک کامپیوتر 8 هسته‌ای با 16 گیگ رم استفاده شده است. جدول 5 زمان تکرارها در حالت‌های مختلف بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

به دلیل دو مرحله اجرای الگوریتم ژنتیک برای یافتن پارامترهای مدل تقریبی و حداکثرسازی بهبود مورد انتظار زمان هر تکرار هنگامیکه متغیرهای طراحی زیاد باشند افزایش خواهد یافت. طبق گزارش گوش و همکاران [9] در یک مسأله بهینه‌سازی با استفاده از مدل توربولانسی K-ε استاندارد و الگوریتم ژنتیک با جمعیت اولیه 40 حداقل 17 نسل تکرار یا به عبارت دیگر 680 حل دقیق برای رسیدن به پاسخ نیاز است. در این روش تعداد کل تکرارها (مجموع اجراهای اولیه و نهایی) تقریباً یک چهارم تکرارهای لازم برای بهینه‌سازی تکاملی با الگوریتم ژنتیک است. بنابراین شیوه بهینه‌سازی مطرح شده به میزان چشمگیری اجراهای محاسباتی را کاهش می‌دهد. اهمیت استفاده از این الگوریتم بهینه‌سازی زمانی بیشتر می‌شود که هزینه محاسباتی هر اجرای حل دقیق بالا باشد.

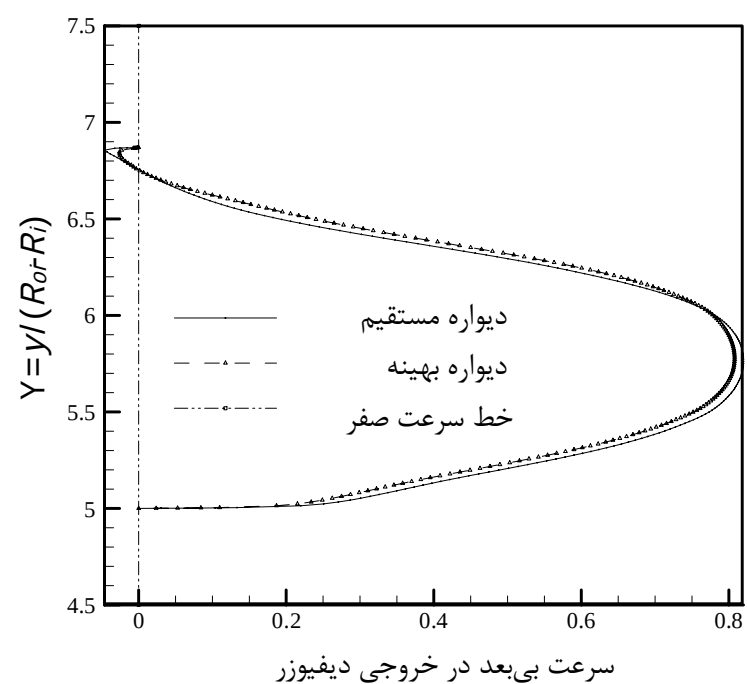
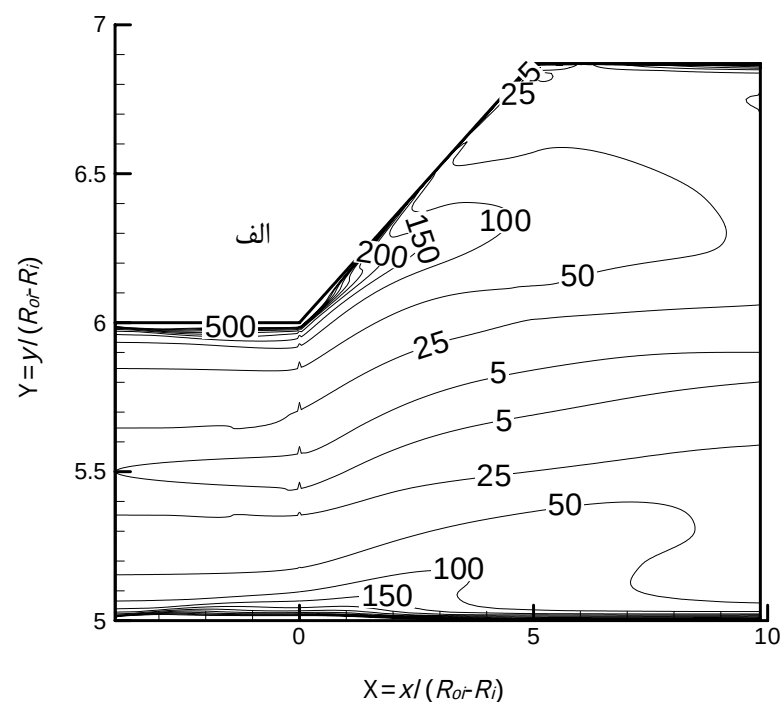
نتایج و توصیه‌های اصلی حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- مدل توربولانسی SST k ω با رفتار نزدیک دیواره مدل مناسبی برای مطالعه عددی دیفیوزر است.
- فرایند بهینه‌سازی بصورت کاملاً خودکار اجرا و جهت طراحی دیفیوزر



شکل 15 خطوط هم‌تراز فشار، الف) دیفیوزر اولیه ب) دیفیوزر بهینه

شکل 17 خطوط هم‌تراز سرعت، الف) دیفیوزر اولیه ب) دیفیوزر بهینه



شکل 16 پروفیل سرعت‌های بی‌بعد در خروجی دیفیوزر

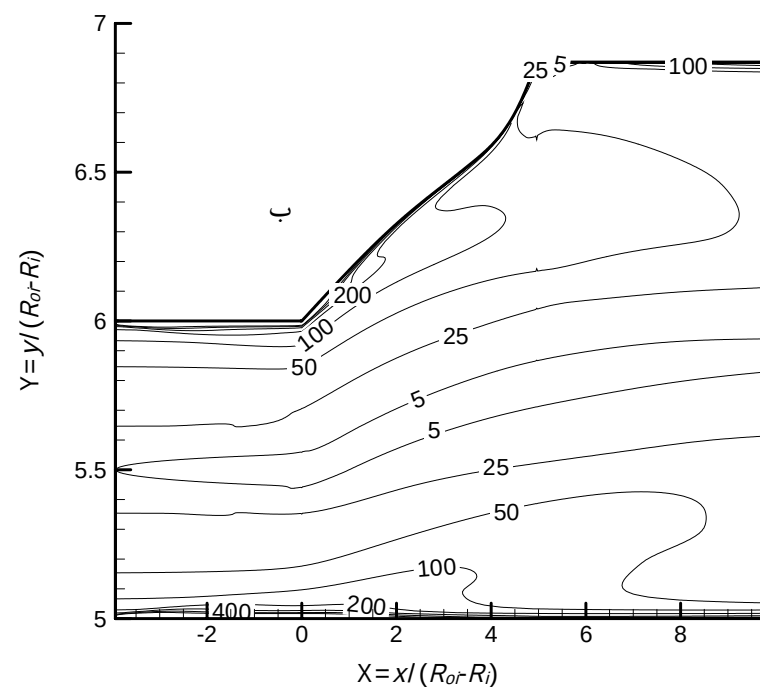
برنامه‌نویسی شده است.

براساس نتایج تحقیق، طراحی بهینه دیفیوزر با به تأخیر انداختن جدایش جریان سبب کاهش این محدوده درون دیفیوزر می‌شود. همچنین، شیوه بهینه‌سازی کاملاً خودکار مطرح شده کارایی خوبی برای طراحی دیفیوزر تقارن محوری نشان می‌دهد.

$\hat{S}(a)$	جذر خطای متوسط مربعات
U_0	سرعت هسته جریان (ms^{-1})
y^+	عدد رینولدز بر حسب سرعت اصطکاکی
علائم یونانی	
α	زاویه واگرایی دیفیوزر
δ	ضخامت لایه مرزی (m)
ζ	معیار توقف بهینه‌سازی
γ	بردار همبستگی
λ	احتمال لگاریتمی
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ℓ	مقیاس طول توربولانس (m)
Ψ	ماتریس همبستگی
Φ	تابع توزیع تجمعی
$\emptyset$	تابع چگالی نرمال
زیرنویس‌ها	
avg	مقدار متوسط
H	مقدار هیدرولیکی
min	حداقل
max	حداکثر
x	جهت محوری
y	جهت شعاعی

9- مراجع

- [1] S.J. Kline, D.E. Abbot, R.W. Fox, Optimum Design of Straight-Walled Diffusers, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 81, pp. 321-330, 1959.
- [2] G. Sovran, E.D. Klomp, Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-Section, *Fluid Dynamics of Internal Flow*, Elsevier Publishing Co, 1967.
- [3] D. Japikse, *Turbomachinery diffuser design technology*, Concepts ETI Inc., Norwich, Vermont, USA 05055, 1984.
- [4] S.J. Stevens, G.J. Williams, The Influence of Inlet Conditions on the Performance of Annular Diffusers, *Transactions of ASME, Journal of Fluid Engineering*, V. 102, pp. 357-363, 1980.
- [5] M El-Beheri, M.H. Hamed, A comparative study of turbulence models performance for separating flow in a planar asymmetric diffuser, *Computers & Fluids*; Vol. 44, pp. 248-257, 2011.
- [6] H. Çabuk, V. Modi, Optimum Plane Diffusers in Laminar Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 237, pp. 373-393, 1992.
- [7] K.H. Svenningsen, J.I. Madsen, N.H. Hassing, W.H.G. Päufer, Optimization of Flow Geometries Applying Quasi-Analytical Sensitivity Analysis, *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 20, pp. 214-224, 1996.
- [8] D. Cholaseuk, V. Srinivasan, V. Modi, Shape Optimization for Fluid Flow Problems Using Bezier Curves and Designed Numerical Experiments, *Proc. of the ASME Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, Nevada, pp. 12-15, 1999.
- [9] S. Ghosh, D.K. Pratihari, B. Maiti, P.K. Das, An evolutionary optimization of diffuser shapes based on CFD simulations, *International Journal For Numerical Methods In Fluids*, Vol. 63, pp. 1147-1166, 2010.
- [10] A. Mariotti, A.N. Grozescu, G. Buresti, M.V. Salvetti, Separation control and efficiency improvement in a 2D diffuser by means of contoured cavities, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 41, pp. 138-149, 2013.
- [11] N.V. Queipo, R.T. Haftka, W. Shyy, T. Goel, R. Vaidyanathan, P.K. Tucker, Surrogate based analysis and optimization, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-28, 2005.
- [12] T.W. Simpson, J.D. Peplinski, P.N. Koch, J.K. Allen, Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations, *Engineering with Computers*, Vol. 17, No. 2, pp. 129-150, 2001.
- [13] J.I. Madsen, W.R. Shyy, T. Haftka, Response surface techniques for diffuser shape optimization, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, pp. 1512-1518, 2000.
- [14] H.Y. Fan, G.S. Dulikravich, Z.X. Han, Aerodynamics data modeling using support machines, *Inverse Problem in Science and Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 261-278, 2005.
- [15] H.G. Bae, S.H. Park, J.H. Kwon, Efficient global optimization for S-duct diffuser shape design, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 227, No. 9,



شکل 18 خطوط هم‌تراز ورتیسسته، الف) دیفیوزر اولیه ب) دیفیوزر بهینه

استفاده شده است.

- با افزایش تعداد متغیرهای طراحی تا هشت فرایند بهینه‌سازی مستقل از تعداد متغیرهای طراحی می‌شود.
- برای یک نسبت سطح دو، مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی با نتایج مربوط به دیفیوزر با دیواره مستقیم بیانگر افزایش نسبی عملکرد دیفیوزر می‌باشد.
- تعداد کل تکرارهای حل دقیق در این روش تقریباً یک چهارم تعداد کل اجراهای الگوریتم تکاملی ژنتیک است.

8- فهرست علائم

AR	نسبت سطح
a	متغیرهای طراحی بی‌بعد
b	تابع هدف
C_p	ضریب باز یافت فشار دیفیوزر
D	قطر (m)
I	شدت توربولانس
L_j	طول ورودی (m)
L_o	طول خروجی (m)
L_D	طول دیفیوزر (m)
n	تعداد پاسخ‌های حل دقیق موجود
n_{dv}	تعداد متغیر طراحی
n_{cp}	تعداد نقاط کنترل
P_i	فشار استاتیک متوسط سطحی ورودی دیفیوزر
P_o	فشار استاتیک متوسط سطحی خروجی دیفیوزر
R_i	شعاع داخلی حلقه ورودی جریان (m)
R_{oi}	شعاع خارجی حلقه ورودی جریان (m)
R_{oe}	شعاع خارجی حلقه خروجی جریان (m)
Re	عدد رینولدز
v	بردار سرعت
X	طول بی‌بعد بر اساس ارتفاع حلقه ورودی جریان
Y	شعاع بی‌بعد بر اساس ارتفاع حلقه ورودی جریان

- [21] A.J. Booker, J.E. Dennis, P.D. Frank, D.B. Serafini, V. Torczon, M. Trosset, A rigorous framework for optimization of expensive functions by surrogates, *Structural Optimization*, Vol. 17, No. 1, pp. 1–13, 1999.
- [22] M.E. Johnson, L.M. Moore, D. Ylvisakar, Minimax and maximin distance designs, *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 26, pp. 131–148, 1990.
- [23] M.D. Morris, T.J. Mitchell, Bayesian design and analysis of computer experiments: Two examples, *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 43, pp. 381–402, 1995.
- [24] D. Huang, T.T. Allen, W.I. Notz, R.A. Miller, Sequential Kriging optimization using multiple-fidelity evaluations, *Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 32, No. 5, pp. 369–382, 2006.
- pp. 1516–1532, 2013.
- [16] W.H. Hager, Blasius: A life in research and education, *Experiments in Fluids*, Vol. 34, pp. 566–571, 2003.
- [17] D.R. Jones, A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces, *Journal of Global Optimization*, Vol. 21, pp. 345–383, 2001.
- [18] Y.A. Jin, Comprehensive survey of fitness approximation in evolutionary computation, *Soft Computing*, Vol. 9, No. 1, pp. 3–12, 2005.
- [19] A.J. Keane, P.B. Nair, *Computational approaches for aerospace design: The pursuit of excellence*, John Wiley & Sons, Inc., United Kingdom, 2005.
- [20] A. Forrester, A. Sobester, A. Keane, *Engineering design via surrogate modelling: A practical guide*, John Wiley & Sons, Inc., United Kingdom, 2008.