

طراحی معکوس پروفیل مجرای نصف‌النهاری چرخ پمپ گریز از مرکز با استفاده از الگوریتم گلوله - اسپاین

سالار طالبی¹، هادی فلاح اردشیر²، میربیوک احقاقی^{3*}، مهدی نیلی احمد آبادی⁴

- 1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
 - 2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
 - 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
 - 4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
- * تبریز، صندوق پستی 5166614766 ehghaghi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 شهریور 1395
پذیرش: 10 آبان 1395
ارائه در سایت: 21 آذر 1395

چکیده

در کار حاضر، روش طراحی معکوس گلوله-اسپاین برای اصلاح هندسه پمپ گریز از مرکز بصورت شبه سه‌بعدی در صفحه نصف‌النهاری و در مرجع دوار و رژیم جریان لزج تراکم‌ناپذیر با هدف بهبود عملکرد آن توسعه یافته است. در این روش، تحلیل عددی جریان لزج روی یک صفحه نازک جریان بین دو پره توسط یک حلگر لزج سه بعدی با اصلاح هندسه دیواره حفاظ جلو و حفاظ پشتی پروانه توسط الگوریتم گلوله-اسپاین ترکیب می‌شود. به عبارت دیگر، به جای حل معادلات غیرلزج شبه سه‌بعدی جریان روی صفحه نصف‌النهاری، معادلات کامل سه بعدی ناپرواستوکس آشفته روی صفحه جریان حل می‌گردند. نخست پمپ گریز از مرکز بصورت عددی مطالعه شده و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند و میدان جریان در پروانه پمپ با استفاده از روش شبه سه بعدی در صفحه نصف‌النهاری به دست می‌آید. قابلیت الگوریتم طراحی معکوس با بررسی آن در هندسه دوار و انتخاب فشار استاتیک و فشار کاهش یافته به عنوان پارامتر هدف ارزیابی می‌شود. سپس با تعریف توزیع فشار هدف روی سطوح حفاظ جلو و حفاظ پشتی مجرا و تلاش جهت حذف گرادین‌های اضافی فشار، هندسه چرخ جدید مطابق با توزیع فشار اصلاح شده حاصل می‌گردد. نتایج بدست آمده بیانگر سرعت همگرایی و پایداری مطلوب روش گلوله-اسپاین در طراحی مجرای دوار با جریان لزج تراکم‌ناپذیر می‌باشد. افزایش فشار استاتیک در طول خط جریان، افزایش 1 درصد هد کل پمپ و تاخیر در شروع کابیناسیون پمپ از جمله نتایج این پژوهش می‌باشند.

کلید واژگان:
پمپ گریز از مرکز
طراحی معکوس
نصف‌النهاری
بهینه‌سازی

Inverse Design of Meridional Flow Passage Shape of Centrifugal Pump Impeller Using Ball-Spine Algorithm

Salar Talebi¹, Hadi Fallah Ardeshir¹, Mir Biuk Ehghaghi^{1*}, Mahdi Nili Ahmad Abadi²

- 1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 - 2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
- * P.O.B. 5166614766, Tabriz, Iran, ehghaghi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 September 2016
Accepted 31 October 2016
Available Online 11 December 2016

Keywords:
Centrifugal pump
Inverse Design
Meridional
Optimization

ABSTRACT

In the present work, an inverse design algorithm called Ball-Spine (BSA) is developed as a quasi-3D method on the meridional plane of a centrifugal pump impeller with rotating frame and incompressible viscous flow within it, with the aim of improving its performance. In this method, numerical analysis of viscous flow on a thin plane of flow between two blades using a 3D viscous flow solver is combined with BSA, which modifies hub and shroud geometries. Namely, instead of solving inviscid quasi-3D flow equations in the meridional plane, full 3D Navier-Stokes equations is solved on the thin plane of flow. To show the validity of the present work, centrifugal pump is numerically evaluated and numerical results are compared with experimental results, and flow field in the meridional plane of pump impeller is obtained using quasi-3D method. By studying the algorithm in the rotating geometry and choosing static pressure and reduced pressure as target parameters, the ability of performance of the algorithm is assessed. After that, the new impeller geometry is obtained in conformity with the modified pressure distribution by defining target pressure distribution on the hub and shroud surfaces of the conduit and trying to eliminate excess pressure gradients. Obtained results indicate good rate of convergence and desirable stability of BSA in the design of rotating conduits with incompressible viscous fluids. By using the above-mentioned optimization method the following results were observed: increase of static pressure along streamline, 1% increase in the pump total head, delay in impeller cavitation inception.

1- مقدمه

مساله بهینه‌سازی مرتبط با طراحی پمپ‌ها به دلیل پیچیدگی‌های هندسی و الگوی جریان در ماشین‌های دوار فرآیندی پیچیده است. یکی از پارامترهای مهم در طراحی چرخ تعیین پروفیل صفحه نصف‌النهاری آن می‌باشد چرا که اثر مهمی در توزیع سرعت و الگوی جریان داخل چرخ متحرک دارد که در عملکرد هیدرولیکی پمپ نقش مهمی را ایفا می‌کند. همچنین سرعت در حفاظ جلویی در رخدادهای کاویتاسیون و مقدار هد مکشی خالص مثبت پمپ اثر گذار خواهد بود. در مکانیک سیالات یکی از مسائل کاربردی، طراحی معکوس مجاری سیال براساس جریان‌های داخلی می‌باشد. اغلب در این گونه مسائل هندسه دیواره‌ها مجهول بوده و توزیع فشار و یا سرعت چرخشی متوسط در راستای مورد نظر معلوم است و هدف تعیین هندسه‌ای است که این تابع هدف را ارضا نماید. به‌طور اساسی مسائل طراحی شکل بوسیله دو دسته روش حل می‌گردند [1]: تکراری (غیرکوپل) و غیرتکراری (کوپل) یا مستقیم. در روش‌های غیرتکراری، شکلی از فرمولاسیون مساله به کار برده می‌شود که در آن مختصات نقاط مرزی بصورت متغیرهای وابسته (صریح یا ضمنی) در معادله دیفرانسیل حاکم پدیدار می‌گردند. روش‌های تکراری با یک حدس اولیه شروع می‌شوند و دنباله‌ای از حل میدان جریان و در نتیجه تغییر شکل مرزها برای رسیدن به توزیع پارامتر هدف صورت می‌گیرد. روش‌های تصحیح باقیمانده دسته‌ای از روش‌های تکراری هستند. در این روش‌ها مساله اساسی نحوه ارتباط بین تفاوت‌های محاسبه شده (اختلاف بین مقدار پارامتر هدف و توزیع محاسبه شده) با تغییرات مورد نیاز در هندسه است. روش‌های تصحیح باقیمانده سعی دارند که از روش‌های تحلیلی به عنوان یک جعبه سیاه برای حل مساله طراحی معکوس استفاده کنند. ارتباط ضعیف‌تر بین پارامترهای هندسه و متغیرهای جریان، موجب افزایش زمان همگرایی روش‌های تکراری نسبت به روش‌های کوپل شده است. اما با توجه به سادگی معادلات حاکم می‌توان از این روش‌ها برای طراحی هندسه‌های پیچیده با معادلات حاکم بر میدان جریان پیچیده‌تر (نظیر معادلات اویلر و ناویر استوکس) استفاده کرد که از مزایای برتر این روش نسبت به روش‌های غیرتکراری است. از طرفی در روش‌های تکراری اثر پارامترهای هندسه بر میدان جریان را می‌توان مشاهده کرد.

نوربخش و همکاران [2] یک مقایسه بین الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی و روش‌هایی بر مبنای حساسیت ناقص در بهینه‌سازی پره‌های شعاعی توربوماشین‌ها انجام دادند. زهرو و همکاران [3] طراحی پارامتریک چرخ پمپ گریز از مرکز و بهینه‌سازی آن را توسط روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار دادند. درخشان و همکاران [4] با به کارگیری الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی و شبکه عصبی مصنوعی در فاز بهینه‌سازی یک روش کارآمد برای طراحی چرخ پمپ گریز از مرکز توسعه دادند، که نتیجه آن افزایش 3.59 درصد راندمان پمپ می‌باشد. یانگ و همکاران [5] بهینه‌سازی چرخ پمپ گریز از مرکز را بر مبنای طراحی معکوس به همراه شبه مدل سطح پاسخ انجام دادند که منجر به افزایش راندمان آن شد. صمد و همکاران [6] با استفاده از مدل جایگزین چندگانه طراحی چرخ پمپ گریز از مرکز را بهینه‌سازی کردند و راندمان آن را 2.32 درصد افزایش دادند. ژانگ و همکاران [7] بهینه‌سازی طراحی چرخ پمپ گریز از مرکز دومکته را بر مبنای شبه مدل تابع پایه شعاعی انجام دادند. مقایسه نتایج تست تجربی مدل نمونه و شبیه‌سازی عددی حاکی از انطباق خوب در نقطه طراحی است. ژو و همکاران [8] چرخ پمپ گریز از مرکز را به کمک روش تشخیصی شار

ورتکس‌های مرزی بازطراحی نمودند و راندمان آن را 2.8 درصد بهبود بخشیدند. نیلی [9] روش طراحی معکوس دو بعدی به نام الگوریتم ریسمان انعطاف‌پذیر برای رژیم‌های جریان داخلی با جریان تراکم‌پذیر ایده‌آل مادون صوت را معرفی کرد و در ادامه برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر لزج [10] توسعه داد. نیلی و همکاران [1] با معرفی الگوریتم طراحی معکوس گلوله-اسپاین و ترکیب آن با کد تحلیل شبه سه‌بعدی در صفحه نصف‌النهاری کمپرسور گریز از مرکز، حفاظ جلویی و پشتی پروانه را با هدف افزایش بازده بهینه‌سازی کردند و با تحلیل عددی هندسه اصلاح شده 0.7 درصد افزایش بازده کل کمپرسور را پیش‌بینی نمودند. نیلی و همکاران [11] با ترکیب الگوریتم گلوله-اسپاین و تحلیل شبه سه بعدی به‌عنوان حلگر جریان این روش را بر روی خم 90 درجه بین دیفیوزر شعاعی و دیفیوزر محوری یک کمپرسور گریز از مرکز در حالی که جریان ورودی به مجرای خم دارای چرخش است، توسعه دادند که نتیجه آن افزایش 4 درصدی ضریب بازیابی فشار مجرای خم 90 درجه بود.

در این پژوهش، روش طراحی معکوس گلوله-اسپاین بصورت شبه سه بعدی بر روی صفحه نصف‌النهاری چرخ پمپ گریز از مرکز در مرجع دوار و رژیم جریان تراکم‌ناپذیر لزج توسعه داده می‌شود. فرآیند طراحی معکوس با ترکیب الگوریتم گلوله-اسپاین به عنوان اصلاح‌کننده شکل، که در قالب یک کد در نرم افزار متلب نوشته شده با حلگر شبه سه بعدی جریان به‌دست می‌آید در این روش، تحلیل عددی جریان لزج روی یک صفحه نازک جریان بین دو پره انجام می‌شود. به‌عبارت دیگر، به جای حل معادلات غیرلزج شبه سه‌بعدی جریان روی صفحه نصف‌النهاری، معادلات کامل سه‌بعدی ناویراستوکس آشفتگی روی یک رویه سه بعدی (صفحه جریان) حل می‌گردد. با توجه به دوار بودن مرجع مورد مطالعه، توزیع فشار استاتیکی کاهش یافته به عنوان پارامتر هدف معرفی و در طراحی معکوس به کار برده می‌شود. پس از توسعه روش اصلاح هندسه قابلیت عملکرد آن در طراحی صفحه نصف‌النهاری ارزیابی می‌گردد. به این منظور عملکرد آن در هندسه دوار مطالعه می‌شود. همچنین، اثر پارامتر فشار هدف و اندازه شبکه محاسباتی نیز تحقیق می‌شود. سپس اصلاح هندسه مجرای جریان با هدف کاهش نوسانات فشار، افزایش فشار خروجی و کاهش گردابه‌های جریان انجام می‌گیرد. درنهایت، جهت مشاهده نتایج ناشی از طراحی معکوس شبه سه‌بعدی بر عملکرد هندسه واقعی، پمپ گریز از مرکز با چرخ بهینه‌سازی شده به‌صورت سه‌بعدی تحلیل عددی می‌شود.

2- تعریف هندسه

چرخ متحرک تنها بخش چرخان پمپ می‌باشد که انرژی را به سیال منتقل می‌کند. "شکل 1" نمای نصف‌النهاری چرخ پمپ گریز از مرکز را نشان می‌دهد. چرخ متحرک شامل گذرگاه‌های شعاعی است که توسط حرکت چرخشی پره‌ها روی یک دایره شکل می‌گیرد. پره‌ها از جلو توسط حفاظ جلو و از عقب توسط حفاظ پشت پوشانده می‌شوند. مطابق "شکل 1" جریان در نزدیک مرکز چرخش به‌صورت محوری وارد می‌شود و در داخل چرخ متحرک در جهت شعاعی می‌چرخد. دیواره‌های حفاظ جلویی و پشتی چرخ پروفیل‌های بزرگ هستند که امکان کنترل سطح مقطع جریان را به‌دست می‌دهند. در کار حاضر به منظور بررسی عددی میدان جریان پمپ گریز از مرکز و اصلاح مقطع نصف‌النهاری آن از هندسه پمپ نوع ETA 65-200 استفاده می‌شود.

$$\Delta S = \frac{1}{2} \frac{\Delta P \times A \times \cos \theta}{\rho_b \times A} (\Delta t)^2 = \frac{(\Delta t)^2}{2\rho_b} \times \Delta P \times \cos \theta \quad (3)$$

در هندسه مقطع نصف‌النهاری که اسپاین‌ها به صورت خطوط عمود بر مقطع جریان در هر نقطه تعریف می‌شود، تغییر مکان در هر دو جهت افقی و عمودی مولفه خواهد داشت. لذا مختصات جدید نقاط از رابطه (4) و (5) بدست می‌آید:

$$X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + \Delta S \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

$$Y_{\text{new}} = Y_{\text{old}} + \Delta S \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

در روابط فوق زاویه α بیانگر زاویه اسپاین نسبت به افق می‌باشد. در این روش باقیمانده طبق رابطه (6) برای هر یک از دیواره‌ها تعریف می‌شود و با کاهش دو مرتبه‌ای خطا برای هر دو دیواره فرآیند اصلاح هندسه متوقف می‌شود و هندسه مطلوب حاصل می‌گردد. همچنین با هدف وصول به سرعت همگرایی و دقت بالاتر، از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس به عنوان حلگر جریان و قالب طراحی معکوس استفاده شده است.

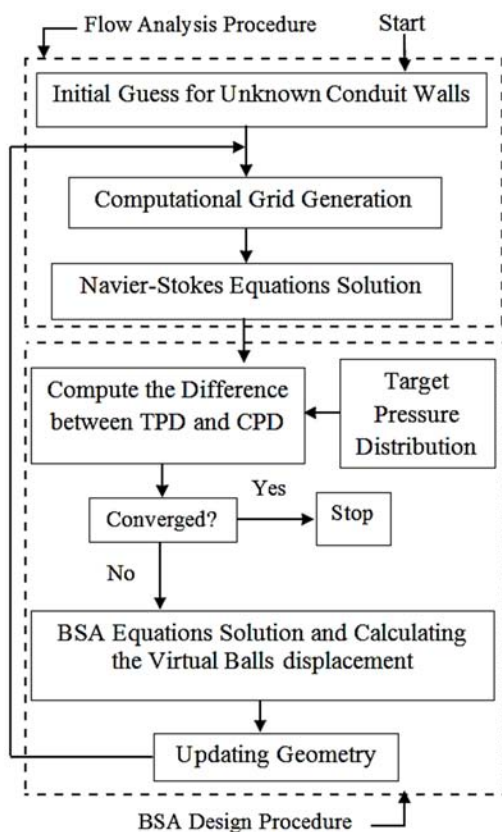


Fig. 2 Implementation of the Inverse Design Algorithm

شکل 2 پیاده سازی الگوریتم طراحی معکوس

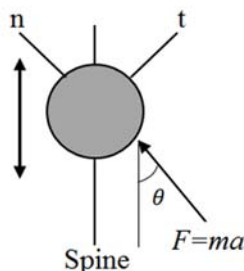


Fig. 3 Free Body Diagram of a Ball [1]

شکل 3 دیاگرام آزاد یک گلوله [1]

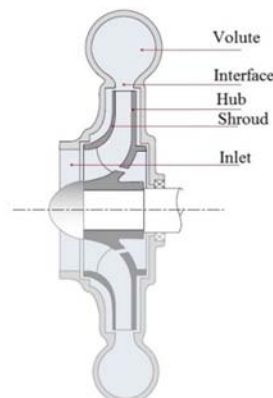


Fig. 1 schematic of Centrifugal Pump

شکل 1 شماتیک پمپ گریز از مرکز

3- الگوریتم طراحی معکوس گلوله-اسپاین

روش گلوله اسپاین جز روش‌های تکرار و تصحیح باقیمانده است. "شکل 2" پروسه کلی مورد نیاز برای اصلاح هندسه را نشان می‌دهد. در این روش دیواره مجهول مجرای جریان از تعداد معینی گلوله فرضی با جرم مشخص که می‌توانند آزادانه در راستای مشخص اسپاین‌ها جابجا شوند، تشکیل شده است. عبور جریان از داخل مجرا باعث می‌شود یک توزیع فشار (موجود) به سطح تر شده مجرا اعمال شود. اگر یک توزیع فشار مطلوب به سطح بیرونی دیواره مجرا اعمال شود، منطقی است که دیواره انعطاف‌پذیر طوری تغییر شکل دهد که توزیع فشار روی سطح تر شده، همان توزیع فشار مطلوب باشد. به عبارت دیگر، نیروی ناشی از اختلاف بین توزیع فشار موجود و مطلوب در هر نقطه از دیواره به گلوله فرضی متناظر در آن نقطه اعمال می‌شود و باعث جابجایی آن می‌شود. به محض اینکه شکل مطلوب حاصل شود، اختلاف فشار به صفر رسیده و باعث توقف جابه‌جایی گلوله‌ها می‌شود. "شکل 3" دیاگرام آزاد یک گلوله فرضی را نشان می‌دهد. اگر گلوله‌ها در راستای نیروی اعمال شده جابجا شوند، ممکن است گلوله‌های مجاور به هم برخورد کنند و یا از یکدیگر دور شوند. برای جلوگیری از این مشکل، هر گلوله در کل فرآیند جابجایی فقط در یک راستای مشخص بنام اسپاین می‌تواند حرکت کند. "شکل 4" راستای اسپاین‌ها را در یک مجرای نصف‌النهاری نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر با توجه به هندسه مورد مطالعه اسپاین‌ها به صورت خطوط عمود بر جریان در هر نقطه تعریف می‌شود. برای این که شرط یکتا بودن جواب نیز برای مساله طراحی معکوس ارضا گردد بایستی طول مشخصه‌ای از مجرا ثابت باشد که در مطالعه حاضر طول محوری مجرا در طی فرآیند اصلاح هندسه ثابت می‌ماند. با توجه به "شکل 3" رابطه (1) جابه‌جایی گلوله در هر اصلاح هندسه را به شکل تابعی از فشار نشان می‌دهد. در این رابطه پارامتر C ضریب اصلاح هندسه می‌باشد. هر چقدر این مقدار کوچکتر باشد، نرخ همگرایی کندتر خواهد بود. البته در صورتی که مقدار C از حدی بیشتر شود این الگوریتم واگرا می‌شود. یافتن مقدار بهینه این ضریب که به وسیله آن همگرایی در کوتاه‌ترین زمان ممکن رخ دهد اهمیت ویژه‌ای دارد. جزئیات کامل الگوریتم گلوله-اسپاین در مرجع [1] بیان شده است و در ادامه معادلات اساسی آن به طور مختصر ذکر می‌شود. با فرض آن که جابه‌جایی گلوله‌ها فقط در اثر نیروی حاصل از اعمال اختلاف فشار باشد رابطه 1 از روابط 2 و 3 بدست می‌آید:

$$\Delta S_i = C \times \Delta P_i \quad (1)$$

$$F = \Delta P \times A \times \cos \theta = m \times a \rightarrow a = \frac{\Delta P \times A \cos \theta}{m} \quad (2)$$

1-4- شبکه بندی

با توجه به نوع هندسه‌های ایجاد شده برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار انسیس میش³ استفاده شده است. در تولید شبکه برای تطابق هرچه بهتر هندسه با شبکه محاسباتی در نزدیکی دیواره‌ها از شبکه با سازمان استفاده می‌شود تا امکان بررسی تغییرات لایه مرزی فراهم گردد. اما در خارج از آن از شبکه‌بندی بی‌سازمان بهره گرفته می‌شود. در تولید شبکه بی‌سازمان از المان‌های شش وجهی، هرمی و گوه‌ای استفاده شده است. "شکل 6" مش بندی استفاده شده برای تحلیل جریان را نشان می‌دهد. در این شبکه‌بندی وای پلاس⁴ متوسط دیواره‌ها 1.5 و وای پلاس بیشینه دیواره‌ها کمتر از 5 است.

2-4- شرط مرزی

شرایط مرزی به کار گرفته شده در مرزهای ورود و خروج پمپ برای حل میدان جریان در جدول 1 آورده شده است. شرط مرزی در مرز ورودی به پمپ (ورود به چرخ متحرک) با فشار استاتیکی مخزن مشخص می‌شود. با فرض به این که جریان ورودی به پمپ از مخزن مکش با حجم بالا صورت می‌گیرد که جریان آن قبلاً توسط سپرهای آرام شده است، شدت آشفتگی به طور متوسط 1 درصد در نظر گرفته می‌شود. در صفحه خروجی لوله متصل به حلزونی دبی جرمی یا سرعت خروجی تعریف می‌شود که در این تحقیق مقدار آن متناظر با عملکرد پمپ در بهترین نقطه بازده⁵ انتخاب شده است. همچنین پره چرخ متحرک و بخش دوار در مختصات دوار و حلزونی و لوله متصل به آن در مختصات ثابت مدل می‌شوند. با توجه به اینکه در این تحلیل کل پمپ مدل می‌گردد، در مرزهای جامد که شامل بدنه، پره چرخ متحرک و حلزونی می‌باشد شرط عدم لغزش اعمال می‌گردد. در ناحیه برخورد بین بخش‌های ثابت و دوار سرعت مماسی متوسط بین این دو بخش با حل همزمان این دو ناحیه توسط مدل فروزن روتور⁶ تعیین می‌شود. مدل فروزن روتور یک الگوریتم شبه پایدار را به کار می‌گیرد که به واسطه آن روتور و استاتور در سطح برخورد مشترک در یک جهت گیری معین نسبت به یکدیگر مدل می‌شوند و هر کدام یک وضعیت نسبی ثابت در محاسبات دارند. ترم‌های دورانی در مرجع متحرک محاسبه شده ولی از اثرات گذرا صرف‌نظر می‌شود.

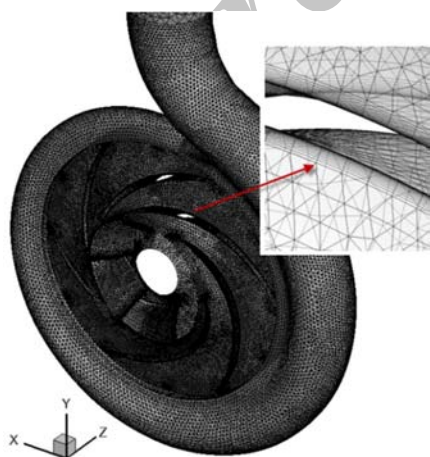


Fig. 6 Mesh Configuration Used for Flow Analysis

شکل 6 مش بندی استفاده شده برای تحلیل جریان

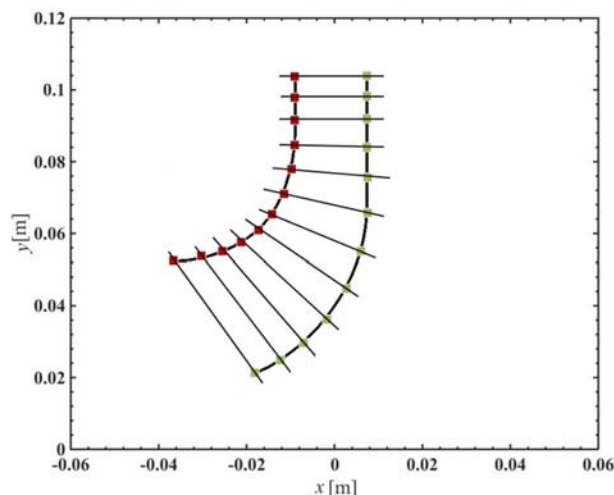


Fig. 4 Schematic of a Meridional Duct

شکل 4 شماتیک یک مجرای نصف‌النهاری

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N [P_i - (P_{target})_i]}{\sum_{i=1}^N [(P_{target})_i]} \quad (6)$$

4- مدل‌سازی سه بعدی

در این پژوهش، قبل از اصلاح هندسه نصف‌النهاری، حل عددی سه‌بعدی پمپ گریز از مرکز جهت ارزیابی عملکرد پمپ موجود و مقایسه نتایج عددی و تجربی صورت می‌گیرد. به منظور بررسی عددی میدان جریان پمپ گریز از مرکز از هندسه پمپ نوع ETA 65-200 استفاده می‌شود. هندسه واقعی پمپ که مدل‌سازی می‌شود شامل سه بخش چرخ متحرک، حلزونی و لوله خروجی می‌باشد که بعد از مدل‌سازی به منظور تشکیل میدان جریان به یکدیگر پیوند داده می‌شوند. هندسه چرخ متحرک توسط قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس بلید-چن¹ تولید می‌شود و حلزونی پمپ نیز توسط نرم‌افزار گمبیت² مدل‌سازی می‌شود. در "شکل 5" نمای کلی پمپ مدل شده نشان داده شده است.

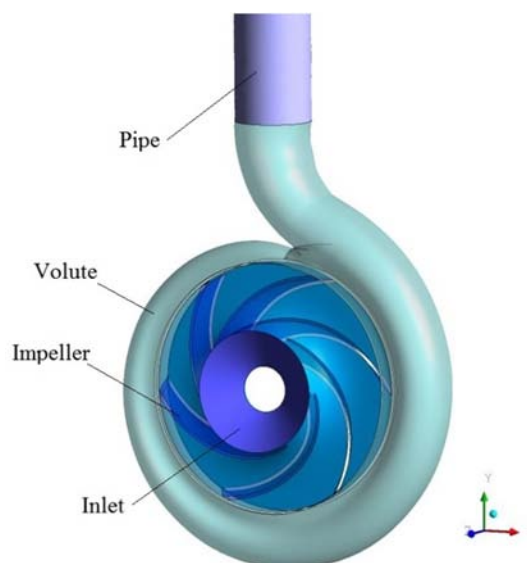


Fig. 5 General View of the Centrifugal Pump Model

شکل 5 نمای کلی پمپ گریز از مرکز مدل شده

³ ANSYS Mesh

⁴ Y plus (y⁺)

⁵ Best Efficiency Point (BEP)

⁶ Frozen Rotor

¹ ANSYS BladeGen

² Gambit

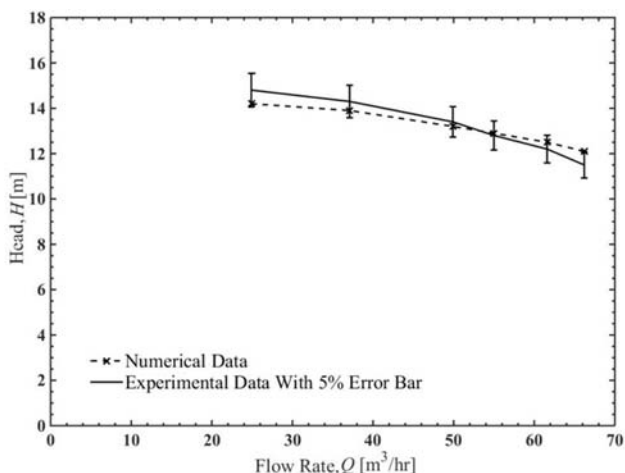


Fig. 7 Comparison of Numerical Results and Experimental Results

شکل 7 مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی

داده شده است، اختلاف بین نتایج در حد معقول و در بازه 5 درصد می‌باشد و در نقطه کاری مورد مطالعه خطا کمتر از 1 درصد است.

5- پیاده سازی الگوریتم

فرایند طراحی معکوس تکراری شامل دو جز اساسی حلگر جریان و الگوریتم اصلاح هندسه است. نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس به‌عنوان حلگر جریان معرفی شد و الگوریتم اصلاح هندسه در خارج نرم‌افزار و در قالب یک کد به زبان متلب نوشته می‌شود. در این برنامه، ابتدا توزیع فشار هدف و حدس اولیه با یکدیگر مقایسه می‌شوند و به‌دلیل اختلاف توزیع فشار هدف و تکرار، معادلات اصلاح هندسه بر روی دیواره پایین و بالا اعمال شده و هندسه جدید تولید می‌گردد. سپس هندسه تولید شده در نرم‌افزار گمبیت شبکه‌بندی می‌شود و جریان درون آن به وسیله نرم‌افزار سی اف ایکس تحلیل گردیده و توزیع فشار تکرار هندسه جدید بر روی دیواره‌های بالا و پایین استخراج می‌شود. این پروسه تا کاهش باقیمانده به کمتر از حد مطلوب تعریف شده ادامه می‌یابد. در این روش، هندسه در هر مرحله تکرار مجدداً شبکه‌بندی می‌شود و امکان استفاده از فیلتراسیون بر روی هندسه برای رفع ناهمواری هندسه و تغییر ضریب اصلاح هندسه برای افزایش یا کاهش نرخ همگرایی وجود دارد.

5-1- ایجاد مجرای شبه سه بعدی و شرایط مرزی

با توجه به این‌که هندسه چرخ و جریان ورودی به آن تقارن محوری دارند برای کاهش زمان حل، مساله بصورت شبه سه بعدی حل می‌شود. در اصلاح هندسه مجرا، توجه به تغییرات در صفحه نصف‌النهاری معطوف شده و مشخصات هندسه در صفحه پره به پره ثابت می‌ماند و لذا توزیع زاویه مماسی مجرا در طول مسیر، پس از اصلاح هندسه تغییر نمی‌کند. به‌عبارت دیگر، اسپاین‌ها به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که زاویه مماسی مجرا تغییری نکند و فقط هندسه نصف‌النهاری تغییر کند. هندسه شبه سه بعدی مجرا در نرم‌افزار گمبیت تولید می‌شود به این صورت که تصویر دیواره جانبی هندسه پره بر روی صفحه به اندازه دو درجه حول محور پمپ دوران کرده و میدان جریان را روی صفحه جریان ایجاد می‌کند. "شکل 8" مجرای شبه سه‌بعدی ایجاد شده یا همان رویه سه بعدی صفحه جریان را نشان می‌دهد. در این مجرا دیواره‌های بالا و پایین با فرض عدم لغزش و سطوح کناری با فرض لغزش آزاد جریان بر روی دیواره تحلیل می‌شود. به این ترتیب، اثرات لزجت فقط

این مدل یک روش موثر برای محاسبه فعل و انفعال بین چرخ و حلزونی بدست می‌دهد.

تحلیل جریان به‌صورت لزج انجام می‌شود و سیال استفاده شده در شبیه‌سازی عددی، آب در دمای 25 درجه سانتی‌گراد با چگالی 997 kg/m^3 و لزجت دینامیکی 0.0008899 kg.m/s می‌باشد. همچنین مدل آشفتگی به کار گرفته شده نیز مدل آشفتگی انتقال تنش‌های برشی¹ می‌باشد [12]. در تمامی تحلیل‌های جریان، ملاک همگرایی، کاهش باقیمانده مومنتوم و پیوستگی به کمتر از 10^{-5} است.

4-3- استقلال شبکه

استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن فشار خروجی به عنوان پارامتر ارزیابی برای شرایط ورودی در بهترین نقطه عملکرد برای سه شبکه متفاوت بررسی می‌شود. جدول 2 تعداد شبکه‌های مستقل به همراه مقادیر پارامتر ارزیابی برای پمپ گریز از مرکز مدل شده را نشان می‌دهد. تعداد المان‌ها شامل مجموع المان‌ها در چرخ متحرک، حلزونی و لوله خروجی می‌باشد. با توجه به جدول فوق در تعداد المان‌های 2173604 تغییرات زیادی در فشار خروجی حاصل نمی‌شود لذا شبکه‌بندی با 2173604 المان از لحاظ هزینه محاسباتی مناسب به نظر می‌رسد.

4-4- صحنه گذاری نتایج

در توربو ماشین‌ها به دلیل هندسه پیچیده و شرایط کاری سیال ارزیابی نتایج تحلیل عددی جریان سیال با نتایج تجربی مورد توجه و حائز اهمیت است. مبنای داده‌های تجربی استفاده شده، حاصل از تست عملکرد هیدرولیکی الکتروپمپ گریز از مرکز ETA 65-200، در آزمایشگاه شرکت صنایع پمپ‌سازی نوید سهند می‌باشد. که در آن چرخ آزمایش شده چرخ استاندارد پمپ تیپ ETA 65-200 با قطر خارجی 209 میلی‌متر، عرض پاساژ پروانه 17 میلی‌متر، زاویه خروجی پره 27.5 درجه، سرعت دورانی 1450 دور بر دقیقه و با توان الکتروموتور 4 کیلووات می‌باشد. سپس در ادامه مطابق با شرایط مرزی بیان شده در بخش 4-2 و قرار دادن شرط مرزی خروجی متناظر با دبی‌های نقاط تست شده حل عددی میدان جریان پمپ انجام می‌شود. "شکل 7" مقایسه نتایج داده‌های تجربی و عددی را با بررسی تغییرات هد پمپ بر حسب دبی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار نشان

جدول 1 شرایط مرزی استفاده شده برای تحلیل پمپ گریز از مرکز

Table 1 Boundary Condition for Numerical Study of Centrifugal Pump

مقدار	پارامتر
0.15 bar	فشار کل ورودی
1%	شدت توربولانس ورودی
15.5 kg/s	دبی خروجی در نقطه بهترین بازده
100 μm	زبری نسبی دیواره‌ها
1 atm	فشار مرجع
0.001 sec.	مقیاس زمانی فیزیکی

جدول 2 بررسی وابستگی به شبکه محاسباتی

Table 2 Evaluation of the Dependency of Mesh

فشار خروجی (Pa)	تعداد المان‌ها
180169	1842482
178888	2173604
178261	3277226

¹ Shear Stress Transport (SST)

اولیه، الگوریتم طراحی معکوس به خوبی همگرا می‌شود. همچنین با اعمال کردن فیلتراسیون به پروسه طراحی، الگوریتم به خوبی قادر به میرا کردن نوسان‌های ایجاد شده در طی فرآیند تغییر هندسه می‌باشد. "شکل 10" روند تغییر توزیع فشار دیواره‌های هندسه اولیه تا هندسه هدف را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد.

جهت بررسی اثر پارامتر هدف در عملکرد الگوریتم توزیع فشار استاتیک به‌عنوان پارامتر بارگذاری بر روی دیواره‌های مجرا انتخاب شده و برای مجرای هدف و حدس اولیه انتخاب شده با شبکه محاسباتی یکسان مجدداً پروسه طراحی معکوس اعمال می‌شود. اما با وجود شباهت در شکل توزیع فشار استاتیک و فشار کاهش یافته استاتیک روند تغییر شکل پس از 56 تکرار و تنها با کاهش یک مرتبه‌ای خطا به نقطه استال¹ رسیده و باقیمانده طراحی افزایش می‌یابد. "شکل 11" تغییر توزیع فشار استاتیک در تکرارهای مختلف

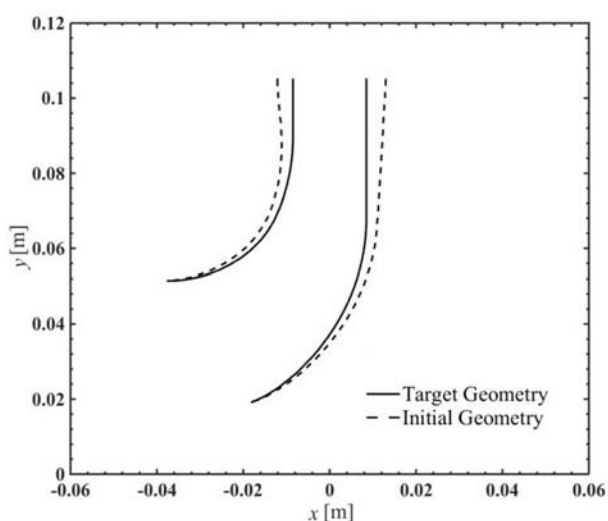


Fig. 9 Initial Guess and Target Geometry for Validation of Ball-Spine Algorithm in the Rotating Frame

شکل 9 هندسه حدس اولیه و هدف برای اعتبارسنجی الگوریتم گلوله-اسپاین در مرجع دوار

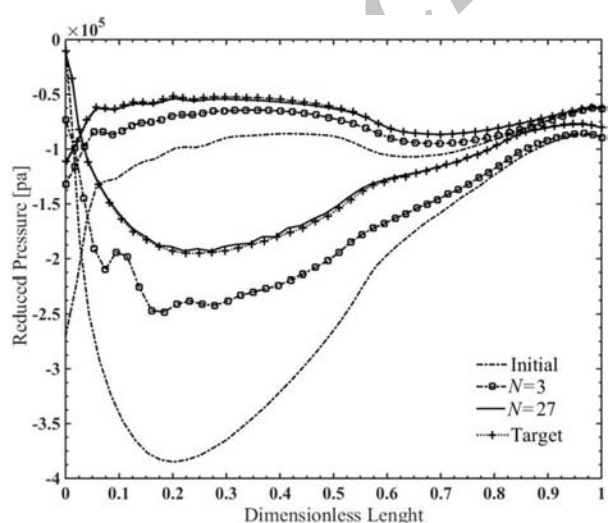


Fig. 10 Converging Process of Reduced Static Pressure Distribution From Initial Guess Geometry to the Target Geometry

شکل 10 روند همگرایی توزیع فشار استاتیک کاهش یافته از هندسه حدس اولیه به هندسه هدف

¹ Stall point

روی دیواره‌های حفاظ جلویی و حفاظ پشتی دیده می‌شود. شرط مرزی ورودی نیز فشار استاتیکی مخزن و شرط خروجی نیز سرعت خروجی شعاعی می‌باشد. از آنجا که در طراحی معکوس مجراها معمولاً دهانه ورودی مجرا ثابت و معین است، در روش مورد نظر نیز، در طول دیواره‌های مجهول مجرا، گلوله ابتدایی ثابت و سایر گلوله‌ها آزاد تحت تاثیر اختلاف توزیع فشار هدف و توزیع فشار داخل مجرا جابه جا می‌شوند. جهت تولید شبکه روی رویه سه بعدی صفحه جریان از نرم‌افزار گمبیت استفاده می‌شود. شبکه‌بندی کل ناحیه محاسباتی بصورت با سازمان انجام گرفته است.

6- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی و اثبات توانایی عملکرد روش گلوله-اسپاین در مجرای غیر دوار در مرجع [1] مطالعه شده است.

توانایی عملکرد الگوریتم گلوله-اسپاین در مجرای دوار با قرار دادن فشار استاتیک کاهش یافته به‌عنوان پارامتر هدف انجام می‌شود. همان‌طور که در یک مجرای ثابت از اختلاف فشار استاتیک برای اصلاح نقاط دیواره استفاده می‌شود در یک مجرای دوار، فشاری که توسط دیواره‌ها حس می‌شود فشار استاتیک کاهش یافته است و عامل افزایش ضخامت لایه مرزی روی دیواره‌ها، جدایش یا عدم جدایش جریان روی دیواره‌ها همان گرادین نامطلوب فشار استاتیک کاهش یافته می‌باشد [1]. در واقع استفاده از فشار استاتیک کاهش یافته مانند کاستن فشار هیدرواستاتیک برای حذف اثرات غیردینامیکی نیروهای گرانشی از سیال یکنواخت است [13]. با تعریف فشار استاتیک کاهش یافته مطابق رابطه زیر از آن برای اصلاح هندسه مجرای دوار استفاده می‌کنیم:

$$P_{\text{reduction}} = P - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (7)$$

شکل مقطع نصف‌النهاری پمپ 65-200 ETA به‌عنوان هندسه هدف در نظر گرفته می‌شود. سپس، هندسه حدس اولیه از اعمال یک توزیع جابه جایی خطی دلخواه روی دیواره‌های هندسه هدف در راستای خطوط عمود بر مقطع جریان در هر نقطه و یا به‌عبارت دیگر همان اسپاین‌ها ایجاد می‌شود. میزان جابه جایی اولیه گره‌های دیواره در راستای اسپاین‌ها در طول مسیر مجرا از ورود به خروج به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. رژیم جریان آرام، تراکم ناپذیر و با شرط مرزی سرعت ثابت ورودی 1.3 متر بر ثانیه و فشار نسبی خروجی صفر حل می‌گردد. شبکه محاسباتی مورد استفاده 25×50 می‌باشد. "شکل 9" مجرای حدس اولیه و هدف را نشان می‌دهد. روند طراحی معکوس پس از فقط 27 تکرار با کاهش دو مرتبه‌ای خطا به همگرایی مطلوب می‌رسد و علی‌رغم دوار بودن مجرا و همچنین جدایش جریان در هندسه

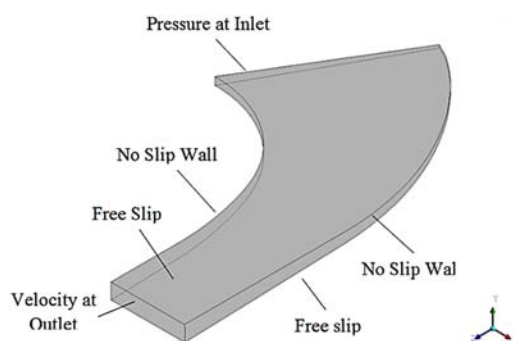


Fig. 8 Created Quasi-3D Duct with Boundary Conditions

شکل 8 مجرای شبه سه بعدی ایجاد شده به همراه شرایط مرزی

و افت‌ها اساساً خود را به‌صورت کاهش فشار نشان می‌دهند. سرعت‌های شدید محلی و افزایش یا کاهش‌های بی‌مورد شتاب نیز موجب تشدید افت‌ها می‌شود. پیک فشارهای منفی نوک تیز دلیلی بر وجود زاویه برخورد بالا، پروفیل دیواره و لبه ورودی نامناسب و یا توزیع زاویه پره نامناسب می‌باشد که بایستی اصلاح گردند. چنین نواقصی بایستی با اصلاح هندسه پره و یا مقطع نصف‌النهاری چرخ رفع شوند. به این منظور توزیع فشار دیواره‌ها مطابق "شکل 13" اصلاح می‌شود. مجرای متناظر با توزیع فشار اصلاح شده و مجرای فعلی در "شکل 14" نشان داده شده است. فرایند اصلاح هندسه پس از 34 تکرار اتمام می‌یابد. ضریب اصلاح به کار برده شده در این طراحی 10^{-8} است. جریان درون مجرای اصلاح شده، بدون هیچ تغییری در محدوده محاسباتی و اندازه شبکه به‌صورت شبه سه بعدی تحلیل می‌شود. همچنین برای مشاهده نتایج حاصل از طراحی معکوس و تحلیل شبه سه بعدی مجرای اصلاح شده در هندسه واقعی تحلیل سه بعدی پمپ با چرخ بهینه‌سازی شده صورت می‌گیرد تا عملکرد هیدرولیکی آن ارزیابی گردد. بررسی توزیع فشار استاتیک در "شکل 15" نشان می‌دهد که توزیع فشار در درون مجرای اصلاح شده به ویژه در ناحیه مکش بهبود پیدا کرده است. همچنین در رانش مجرای نیز فشار استاتیک افزایش یافته است. "شکل 16" توزیع سرعت نصف‌النهاری را در لبه خروجی چرخ نشان می‌دهد که برای چرخ بهینه شده توزیع سرعت دبی دهنده در لبه خروجی متعادل‌تر شده و مقدار آن افزایش پیدا کرده است. همچنین جدول 3 مقادیر ضریب جریان در لبه خروجی چرخ و ضریب هد را برای عملکرد دو پمپ نشان می‌دهد. گفتنی است که هد کل پمپ بهینه شده در نقطه بهترین بازده 1 درصد افزایش پیدا کرده است. در جدول 3 ضرایب بی بعد هد و جریان طبق روابط (8) و (9) تعریف شده‌اند [14].

$$\psi = \frac{gH}{u_2^2} \quad (8)$$

$$\phi = \frac{C_{m2}}{u_2} \quad (9)$$

که در این روابط H هد کل پمپ، u_2 سرعت چرخشی لبه خروجی چرخ و C_{m2} سرعت نصف‌النهاری در لبه خروجی چرخ می‌باشد. در نمودار "شکل 17" منحنی عملکرد با کواپتاسیون به‌صورت بدون بعد

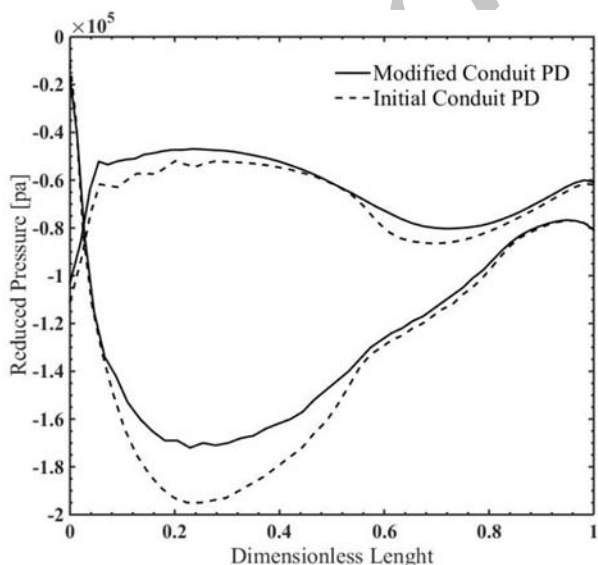


Fig. 13 Current and Modified Reduced pressure Distribution Along the Hub and Shroud

شکل 13 توزیع فشار استاتیک کاهش یافته اولیه و اصلاح شده در طول حفاظ جلویی و حفاظ پشتی

را نشان می‌دهد. برای بررسی اثر اندازه شبکه روی شکل نهایی طراحی شده، مقطع نصف‌النهاری علاوه بر شبکه محاسباتی قبلی به ازای دو شبکه 14×28 و 45×60 و همان توزیع فشار هدف مجدداً طراحی می‌شود. هندسه نهایی طراحی شده مربوط به شبکه 14×28 و 25×50 در "شکل 12" با هم مقایسه می‌شود. هندسه طراحی شده مربوط به شبکه 45×60 در این شکل رسم نشده است زیرا با هندسه مربوط به 25×50 منطبق است. به عبارت دیگر ریزتر کردن شبکه از یک حد بیشتر تاثیر چندانی در هندسه نهایی محاسبه شده ندارد که استقلال الگوریتم طراحی از شبکه را اثبات می‌کند.

7- اصلاح هندسه

پس از حصول اطمینان از عملکرد الگوریتم گلوله- اسپاین، می‌توان از این روش جهت اصلاح شکل مقطع نصف‌النهاری استفاده نمود. در چرخ‌های شعاعی با توجه به انحنا پروفیل صفحه نصف‌النهاری و هندسه پره‌ها یک ناحیه با انرژی کمینه یا گردابه در سمت مکش حفاظ جلویی تشکیل می‌شود

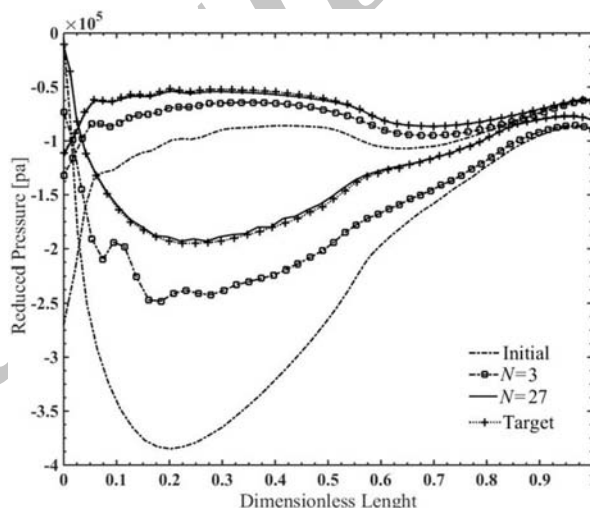


Fig. 11 Converging Process of Static Pressure Distribution From Initial Guess Geometry to the Target Geometry

شکل 11 روند همگرایی توزیع فشار استاتیک از هندسه حدس اولیه به هندسه هدف

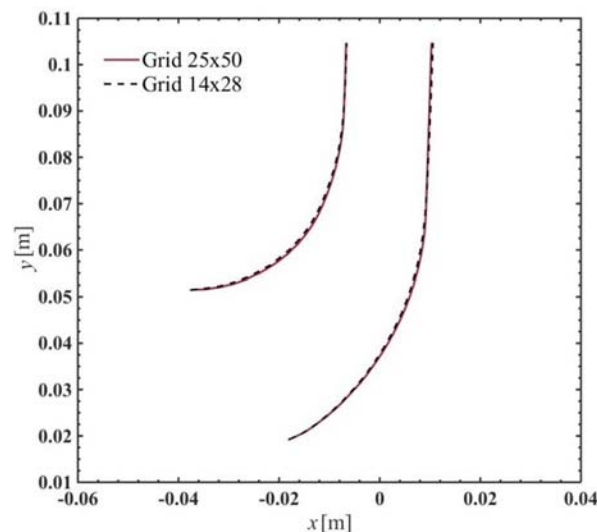


Fig. 12 Grid Study for Design of Meridional Plane in the Rotating Frame

شکل 12 اثر اندازه شبکه در طراحی صفحه نصف‌النهاری در مرجع دوار

اصلاح هندسه فراهم می‌کند. همچنین به کمک فیلتراسیون می‌توان ضریب اصلاح هندسه و در نتیجه نرخ همگرایی را افزایش داد. قابلیت عملکرد الگوریتم در هندسه دوار بررسی گردید. در هندسه دوار توزیع فشار استاتیک کاهش یافته به‌عنوان پارامتر هدف به‌کار برده شد و روند همگرایی اصلاح

جدول 3 مقادیر ضریب های بی بعد هد و جریان

Table 3 Values of Dimensionless Head and Flow coefficients

هندسه	ضریب جریان φ	ضریب هد، ψ
چرخ اولیه	0.102	0.577
چرخ بهینه شده	0.104	0.583

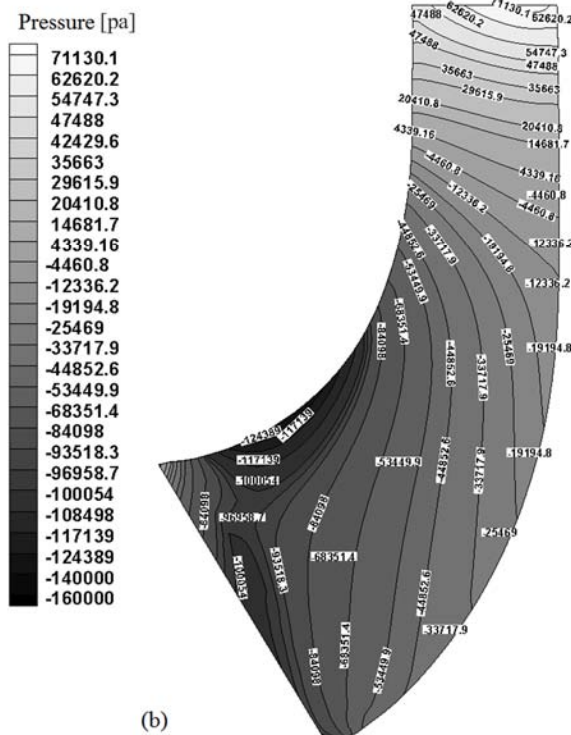
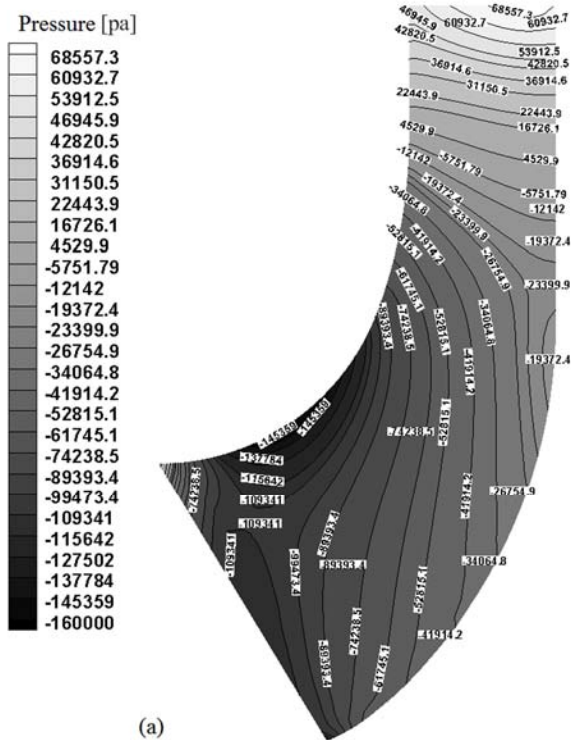


Fig. 15 Static Pressure Contour on the Created Quasi-3D Conduit: a) Initial Conduit b) Modified Conduit

شکل 15 کانتور فشار استاتیک در مجرای شبه سه بعدی ایجاد شده: الف) مجرای اولیه ب) مجرای اصلاح شده

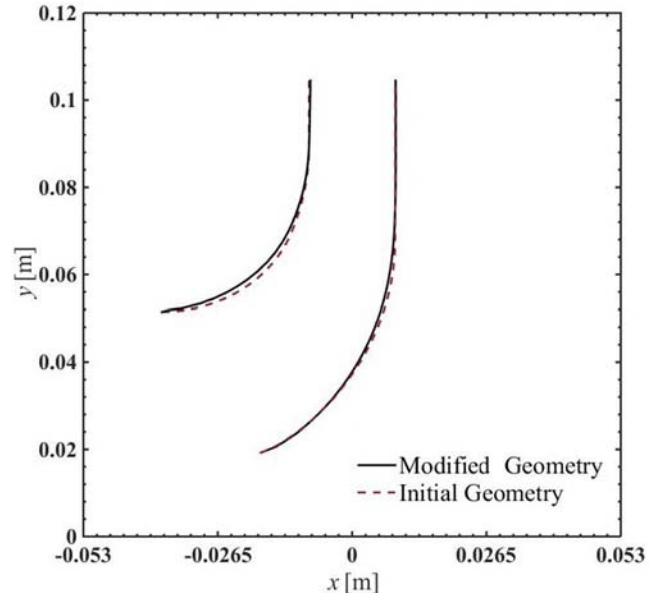


Fig. 14 Current and Modified Geometry of the Meridional plane

شکل 14 هندسه مقطع نصف‌النهاری طراحی شده و اولیه

برای پمپ بهینه شده و اولیه رسم شده است. در این منحنی ضریب ارتفاع برحسب عدد کاویتاسیون در ضریب جریان ثابت (دبی نقطه بهترین بازده) رسم شده است. موسسه استاندارد هیدرولیک¹، کاویتاسیون را به صورت 3 درصد کاهش هد پمپ تعریف کرده است [15]. در واقع در این نقطه کاویتاسیون شروع به گسترش می‌یابد و افت محسوس در عملکرد پمپ پدیدار می‌شود. در نمودار "شکل 17" مقادیر منحنی عملکرد با کاویتاسیون در 4 نقطه رسم شده است، که با شبیه‌سازی عددی عملکرد پمپ، با کاهش فشار رانش از 1.3 bar به 1.2، 1 و 0.65 بار انجام می‌شود تا فشار کل در ورودی پمپ به دست آید. محاسبه افت 3 درصد ضریب هد برای پمپ اولیه و بهینه شده و مقایسه عدد کاویتاسیون متناظر با آن‌ها نشان می‌دهد که شروع کاویتاسیون در چرخ بهینه‌سازی شده دیرتر رخ می‌دهد و پمپ بهینه شده نسبت به پمپ اولیه می‌تواند در فشار ورودی پایین‌تری مکش داشته باشد.

8- نتیجه گیری

در این پژوهش روش طراحی معکوس گلوله-اسپاین بصورت شبه سه بعدی بر روی صفحه نصف‌النهاری چرخ پمپ گریز از مرکز در مرجع دوار و رژیم جریان تراکم‌ناپذیر لزج توسعه داده شد. همچنین در تحلیل عددی جریان به جای حل معادلات غیرلزج شبه سه بعدی جریان روی صفحه نصف‌النهاری، معادلات کامل سه بعدی ناپرواستوکس آشفته روی یک رویه سه بعدی جریان بین دو پره حل گردید. الگوریتم اصلاح هندسه در قالب یک کد به زبان متلب نوشته شد و در هر مرحله از روند اصلاح شکل، نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس به عنوان حلگر جریان جهت تحلیل جریان درون مجرا به کار برده شد. این روش امکان استفاده از فیلتراسیون و حذف ناهمواری‌های هندسه را در حین

¹ Hydraulic Standards Institute

شتاب جابه‌جایی گلوله فرضی (ms^{-2})	a
ضریب اصلاح هندسه ($\text{m}^2\text{s}^2\text{kg}^{-1}$)	C
نیروی وارد بر گلوله فرضی (N)	F
جرم گلوله فرضی (kg)	m
فشار استاتیک (Pa)	p
باقی مانده	RE
شعاع مجرا (m)	r
جابه‌جایی دیواره در هر اصلاح شکل (m)	S
زمان جابه‌جایی گلوله فرضی (s)	t
توزیع فشار هدف (Pa)	TPD
توزیع فشار محاسبه شده (Pa)	CPD
توزیع فشار (Pa)	PD
هد کل (m)	H
علائم یونانی	
چگالی (kgm^{-3})	ρ
چگالی سطحی (kgm^{-2})	ρ_b
زاویه راستای اسپاین ها (deg.)	α
سرعت زاویه‌ای (rads^{-1})	ω
ضریب بی بعد هد	Ψ
ضریب بی بعد جریان	φ
زیر نویس‌ها	
گلوله فرضی	B
شمارنده گلوله ها	I
کاهش یافته	reduction
هدف	target

10- مراجع

[1] M. Nili-Ahmadabadi, M. Durali, A. Hajilouy-Benisi, A novel quasi 3-D design method for centrifugal compressor meridional plane, *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. 919-931, 2010.

[2] S. Derakhshan, B. Mohammadi, A. Nourbakhsh, The comparison of incomplete sensitivities and Genetic algorithms applications in 3D radial turbomachinery blade optimization, *Computers & Fluids*, Vol. 39, No. 10, pp. 2022-2029, 2010.

[3] R. Zhang, K. Zheng, J. Yang, Investigation on parametric design of centrifugal pump impeller and its optimization with response surface method, *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. 529-533, 2012.

[4] S. Derakhshan, M. Pourmahdavi, E. Abdolahnejad, A. Reihani, A. Ojaghi, Numerical shape optimization of a centrifugal pump impeller using artificial bee colony algorithm, *Computers & Fluids*, Vol. 81, No. 13, pp. 145-151, 2013.

[5] W. Yang, R. Xiao, Multiobjective Optimization Design of a Pump-Turbine Impeller Based on an Inverse Design Using a Combination Optimization Strategy, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136, No. 1, p. 014501, 2013.

[6] S. A. I. Bellary, A. Samad, Improvement of efficiency by design optimization of a centrifugal pump impeller, *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. V02DT42A007-V02DT42A007, 2014.

[7] Y. Zhang, J. Wu, Y. Zhang, L. Chen, Design optimization of centrifugal pump using radial basis function metamodels, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 0, pp. 457542-457542, 2014.

[8] X. Zhou, Y. Zhang, Z. Ji, L. Chen, The impeller improvement of the centrifugal pump based on BVF diagnostic method, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 0, pp. 464363-464363, 2014.

[9] M. Nili-Ahmadabadi, M. Durali, A. Hajilouy-Benisi, F. Ghadak, Inverse design of 2-D subsonic ducts using flexible string algorithm, *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 1037-1057, 2009.

[10] M. Nili-Ahmadabadi, A. Hajilouy-Benisi, F. Ghadak, M. Durali, A novel 2D incompressible viscous inverse design method for internal flows using flexible string algorithm, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 132, No. 3, p. 031401, 2010.

[11] M. Shumal, M. Nili Ahmad Abadi, E. Shirani, Inverse design of 90-degree bend between radial and axial diffuser of a centrifugal compressor, *Modares*

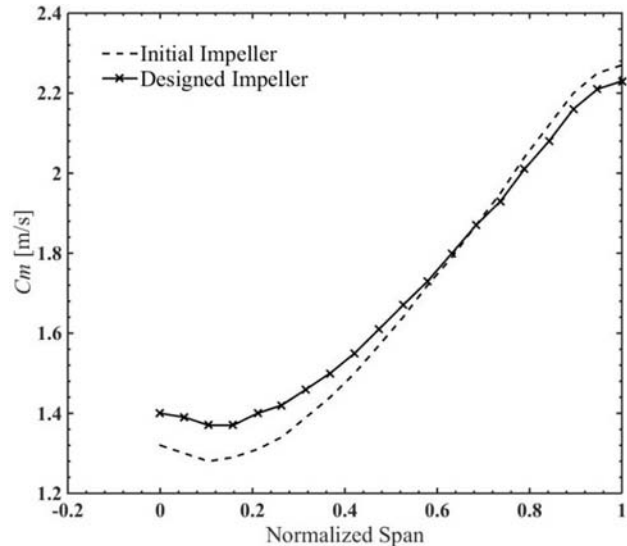


Fig. 16 Meridional Velocity at Leading Edge

شکل 16 نمودار سرعت نصف‌النهاری در لبه خروجی چرخ

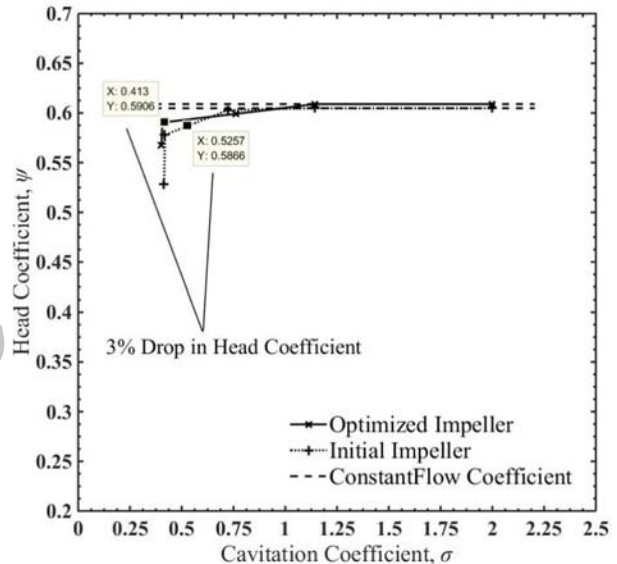


Fig. 17 Cavitation Operation curve for Optimized and current Impeller

شکل 17 منحنی عملکرد با کاویتاسیون برای چرخ بهینه سازی شده و چرخ اولیه

هندسه با حالتی که فشار استاتیکی به‌عنوان پارامتر هدف انتخاب شد مقایسه گردید و مطابق نتایج به‌دست آمده استفاده از فشار کاهش یافته روند همگرایی اصلاح هندسه را افزایش می‌دهد. بررسی اثر اندازه شبکه نشان داد که ریزتر کردن شبکه از یک حد بیشتر در هندسه نهایی محاسبه شده اثر محسوسی ندارد. در انتها با اصلاح فشار استاتیک کاهش یافته روی سطوح حفاظ جلو و پشتی مجرا نصف‌النهاری و استفاده از الگوریتم طراحی معکوس گلوله- اسپاین، هندسه چرخ جدید مطابق با توزیع فشار اصلاح شده و با هدف حذف گرادیان‌های اضافی فشار به‌دست می‌آید. مطالعه چرخ بهینه-سازی شده با مدل‌سازی سه بعدی پمپ گریز از مرکز و حل میدان جریان نشان داد که فشار در طول خط جریان در داخل چرخ افزایش می‌یابد که در قسمت مکش چرخ موجب تاخیر در شروع کاویتاسیون پمپ شده و همچنین موجب افزایش 1 درصدی هد پمپ گریز از مرکز می‌شود.

9- فهرست علائم

سطح مقطع گلوله فرضی (m^2)	A
--------------------------------------	-----

- [14] A. J. Stepanoff, *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design and Application*, Second Edition, pp. 43-181, New York: John Wiley And Sons, 1957.
- [15] H. Rahimzadeh, A. Masjedan Jezi, *Cavitation in Pump and Valve*, pp. 35-82, Tehran: Fadak Isatis, 2010. (in Persian فارسی)
- Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 371-378, 2015. (in Persian فارسی)
- [12] ANSYS CFX Tutorials. Release 15.0, ANSYS, Inc., 2013; <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
- [13] E. Greitzer, C. Tan, M. Graf, *Internal flow*, pp. 347-379, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2004.

Archive of SID