

تأثیر فاصله پروانه و حلزونی الکتروپمپ شناور بر مشخصه‌های پمپ

سید سعید بحرینیان*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، bahrainian@scu.ac.ir

امین محمدی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، amin_mohammadi90@yahoo.com

محمد رضا صفاریان

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، m_r_saffarian@yahoo.com

چکیده

جریان درون یک الکتروپمپ شناور گریز از مرکز شبیه‌سازی شده است. هدف این پژوهش یافتن تأثیر تغییر فاصله محوری بین پروانه و حلزونی بر عملکرد پمپ می‌باشد. جریان درون پروانه و حلزونی پمپ به صورت عددی با نرم افزار Fluent شبیه‌سازی شده است. روش عددی حجم محدود به همراه مدل آشفتگی K- ω SST برای حل عددی جریان مورد استفاده قرار گرفته است. برای سنجش نتایج شبیه‌سازی، مقادیر هد، توان و راندمان در حالت فاصله پیش فرض طراحی، محاسبه و با یک معادله تجربی و نیز نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. سپس، در پنج فاصله محوری دیگر شبیه‌سازی انجام و تأثیر تغییر فاصله محوری بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فاصله پروانه از حلزونی هر سه مشخصه هد، توان و راندمان دچار کاهش خواهند شد، به نحوی که با افزایش فاصله از ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر، سبب کاهش ۳۳ درصدی هد، ۱۸ درصدی توان و ۲۰ درصدی راندمان نسبت به حالت اولیه می‌شود. همچنین تأثیر تغییرات فاصله محوری بر گردابه‌های ایجاد شده در سیال عبوری از پروانه و نیز نیروی محوری وارد شده بر پروانه محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: الکتروپمپ شناور، شبیه‌سازی جریان، حجم محدود، مشخصه‌های پمپ، گردابه، نیروی محوری.

Effect of impeller and scroll spacing on flow characteristics of electrical submersible pump

S. S. Bahrainian
A. Mohammadi
M. R. Saffarian

Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Abstract

Flow in a centrifugal electrical submersible pump is simulated. The purpose of this study is to find the effect of changing the axial distance between impeller and scroll on pump's operation. Flow in the impeller and scroll is simulated with the Fluent software. Finite volume method with SST k- ω turbulence model is used for numerical solution. In order to evaluate the simulation results, values of head, power and efficiency are calculated at the design conditions and are compared to the experimental results. Simulations are then performed with different impeller to scroll axial distances. The results show that by increasing the distance between impeller and scroll, each of the three properties, head, power and efficiency will decrease. Increasing the distance between impeller and scroll from 0.5 to 5.0 mm, head, power and efficiency will drop by 33%, 18% and 20% respectively. Also, effect of changing the axial distance between impeller and scroll on vortices created in the fluid passing through the impeller and the axial force imposed on the impeller are calculated.

Keywords: Electrical submersible pump, Flow simulation, Finite volume, Pump characteristics, Vortex, Axial force.

۱- مقدمه

وارده بر پروانه و شفت، افزایش ارتعاشات، بازچرخش و کاویتاسیون از جمله این مشکلات می‌باشند [۲].

هدف اصلی این پژوهش، مدل‌سازی هندسی و شبیه‌سازی جریان در پروانه و پوسته حلزونی شکل الکتروپمپ شناور به منظور یافتن تأثیر تغییر فاصله بین پروانه و حلزونی بر عملکرد الکتروپمپ می‌باشد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در خصوص پمپ‌های گریز از مرکز و انواع آن از جمله پمپ‌های شناور صورت گرفته است. این مطالعات هم به صورت تجربی و با کمک تجهیزات آزمایشگاهی و هم به صورت تئوری و به کمک CFD انجام شده‌اند. کاربرد و کنری [۳] رفتار یک الکتروپمپ دوفازی را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند. هدف، به دست آوردن توزیع فشار، میدان سرعت سیال و کسرتخلخل گازی (GVF) درون پروانه یک الکتروپمپ شناور بود. دبی جریان، قطر حباب‌ها و GVF در قسمت مکش پمپ به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. منحنی‌های عملکردی پمپ بر حسب تغییرات دبی، قطر حباب و درصد‌های مختلف GVF ارائه شد.

الکتروپمپ‌های شناور مجموعه‌ای است از یک پمپ گریز از مرکز عمودی که به طور مستقیم با موتور الکتریکی شناور کوپل شده و کل مجموعه، درون سیال به صورت شناور قرار می‌گیرند. این پمپ‌ها جهت پمپاژ آب از ایستگاه‌های آبیاری و زهکشی، استخراج، حوضچه‌های آب و فاضلاب، و چاه‌های عمیق و نیمه عمیق طراحی شده‌اند. با پیشرفت فناوری‌های مهندسی و تولید و براساس تجربه‌های طولانی، روش‌های مختلف نصب و بهره برداری از این پمپ‌ها تدوین شده است. آبدهی تا ۳ متر مکعب در ثانیه و ارتفاع ۳۰۰ متر، محدوده قابل توجهی است که توسط انواع مختلف الکتروپمپ‌های شناور پوشش داده می‌شود [۱]. یکی از مشکلات شایع در پمپ‌های گریز از مرکز، تغییر فاصله محوری بین پروانه و حلزونی به علت خرابی یا تاقان، خوردگی پروانه، سایش آبدن مکانیکی و تعمیرات دوره‌ای می‌باشد.

عدم رعایت فاصله مناسب بین پروانه و حلزونی سبب بروز مشکلاتی در عملکرد پمپ می‌شود. افت هد و راندمان، افزایش نیروهای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: bahrainian@scu.ac.ir

همچنین میزان حباب‌های گاز تولید شده در اطراف پره‌های پروانه را محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در دبی‌های یکسان هرچه درصد GVF افزایش یابد، اندازه حباب‌های گازی نیز افزایش می‌یابد. احقاقی و همکاران [۴] در مطالعه خود به بررسی تاثیر تعداد پره‌ها بر عملکرد پمپ گریز از مرکز پرداختند. آن‌ها پروانه‌های مختلفی با ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ پره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش تعداد پره، هد تولید شده پمپ افزایش و راندمان کاهش می‌یابد. اگرچه پروانه با ۶ پره دارای بیشترین راندمان بود اما به دلیل داشتن کمترین فشار ایجاد شده در ورودی پروانه، نسبت به سایر پروانه‌ها بیشتر در معرض کاویتاسیون قرار خواهد گرفت. شجاعی فرد و همکاران [۵] در پژوهشی به بررسی اثر هندسه چرخ متحرک (پروانه) بر عملکرد یک پمپ گریز از مرکز که حاوی سیال با لزجت بالا بود، به دو روش عددی و تجربی پرداختند. مشخصه های هندسی که مورد بررسی قرار گرفت، شامل زاویه خروجی پره و پهنای پاساژ چرخ متحرک بود. آن‌ها به کمک حل عددی، ۶ زاویه و ۲ پهنای پاساژ مختلف را مورد بررسی قرار دادند و به ازای هر حالت مختلف، میزان توان مصرفی و راندمان پمپ محاسبه شد. در نهایت زاویه و پهنای مناسب به ازای بالاترین راندمان معرفی گردید. سان و پرادو [۶] پژوهشی در خصوص تغییرات هد در پمپ‌های شناور انجام دادند. آن‌ها یک معادله دیفرانسیل معمولی (ODE) جدیدی برای تخمین فشار در پمپ‌های شناور با در نظر گرفتن افت اصطکاکی و افت ناشی از شوک ارائه کردند. احقاقی و همکاران [۷] در پژوهشی دیگر، تاثیر تغییر هندسه پروانه پمپ گریز از مرکز را بر پدیده کاویتاسیون بررسی کردند. آن‌ها برای این منظور موقعیت ورودی پمپ را در سه راستا تغییر دادند. تغییر موقعیت یکبار در راستای توپی، یکبار در راستای پوشش و در آخر در کل راستا، انجام شد. مقادیر هد و راندمان پمپ و همچنین مقدار کمترین فشار روی پره برای ۶ پمپ مختلف، با مختصات ورودی مختلف محاسبه شد. هدف محاسبه میزان افزایش فشار کمینه در حالت‌های مختلف بود که نتایج نشان داد تغییر موقعیت در راستای توپی تاثیر بسزایی در افزایش فشار کمینه خواهد داشت. اوزتورک و همکاران [۸] تاثیر تغییر فاصله شعاعی پره‌های پروانه و پره‌های ثابت حلزونی را بر رفتار سیال در یک پمپ گریز از مرکز در سه حالت مختلف بررسی کردند. پروانه مورد مطالعه دارای ۵ پره متحرک با سرعت ۸۹۰ دور بر دقیقه و حلزونی دارای ۹ پره ثابت می‌باشد. آن‌ها سه فاصله ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد شعاع پروانه را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در فاصله ۲۰ درصد شعاع پروانه، بیشترین راندمان خروجی حاصل می‌شود. استل و همکاران [۹] جریان سیال در یک الکتروپمپ شناور چندمرحله‌ای را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و بر پایه روش حجم محدود شبیه‌سازی نمودند. هدف آن‌ها یافتن تاثیر مدل آشفتگی بر دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی بود. آن‌ها به منظور مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی، شبیه‌سازی را با ۶ مدل آشفتگی انجام دادند و مدل SST k- ω را به عنوان مناسب‌ترین مدل آشفتگی معرفی کردند.

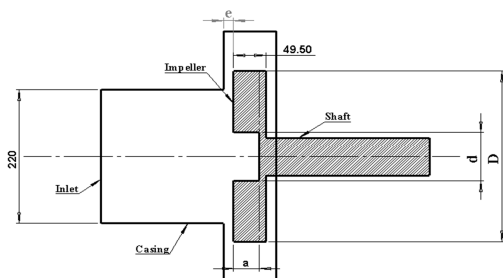
در این پژوهش سعی شده است تاثیر یکی از مشخصه‌های هندسی مهم در پمپ شناور گریز از مرکز که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی شود. تغییر فاصله محوری بین پروانه و پوسته اگرچه اندک باشد، می‌تواند سبب افت عملکرد پمپ شده و در مواردی باعث خرابی و از کار افتادن قطعات پمپ گردد. با توجه به هزینه‌بر بودن

آزمایش‌های تجربی، با بررسی این موضوع به کمک دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان در زمان و هزینه صرف شده صرفه‌جویی کرد. فرآیند طی شده در این پژوهش شامل سه بخش اصلی مدل‌سازی هندسی، تولید شبکه محاسباتی و شبیه‌سازی جریان می‌باشد. الکتروپمپ مورد نظر با نام تجاری RS 135 SW از محصولات شرکت راصد صنعت توسعه داده و توان آن ۲۲ کیلووات می‌باشد. مدل‌سازی هندسی به کمک نرم افزار Solidworks و حل عددی جریان با استفاده از کد تجاری Fluent انجام شده است. ابتدا شبیه‌سازی در فاصله پیش فرض طراحی بین پروانه و حلزونی انجام شده و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و یک معادله تجربی مقایسه شده‌اند. سپس در ۵ فاصله دیگر شبیه‌سازی انجام و تاثیر تغییر فاصله بر مشخصه‌های پمپ، شدت گردابه‌ها و نیروی محوری وارد پروانه بررسی شده است.

۲- مدل‌سازی هندسی و تولید شبکه محاسباتی

۲-۱-۲- مدل‌سازی هندسی

قسمت‌های اصلی الکتروپمپ شناور شامل پروانه و حلزونی می‌باشند. پروانه این پمپ از نوع نیمه باز^۱ بوده و دارای ۶ پره عقب رونده^۲ می‌باشد. حلزونی فاقد پره بوده و سطح مقطع آن بر حسب یک تابع لگاریتمی تا دهانه خروجی افزایش می‌یابد. ابعاد پمپ با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری به دست آمده و در نرم افزار Solidworks مدل هندسی سه بعدی پروانه و حلزونی ترسیم شده است. در شکل ۱ فاصله محوری بین پروانه و حلزونی با حرف e نشان داده شده است. یافتن تاثیر تغییر این فاصله بر عملکرد پمپ، هدف اصلی این پژوهش می‌باشد.

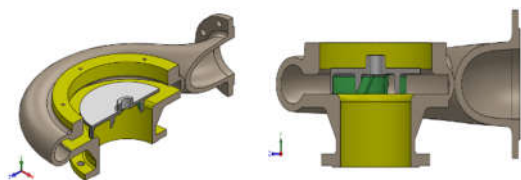


شکل ۱- فاصله محوری بین پروانه و حلزونی

در شکل ۲ مراحل مدل‌سازی پروانه نشان داده شده است. در تصویر الف، هاب پروانه به تنهایی مدل‌سازی شده است. سپس یک پره بر روی آن قرار داده شده است (تصویر ب). به دلیل نیمه باز بودن پروانه، دسترسی به سطح بالایی پره امکان‌پذیر بوده و می‌توان انحنا پره را با دقت مناسبی به دست آورد. در مرحله بعد، ۵ پره مشابه دیگر با فواصل یکسان نسبت به هم ترسیم شده‌اند. تصویر ج مدل‌سازی نهایی پروانه را نشان می‌دهد.

¹ Semi-Open

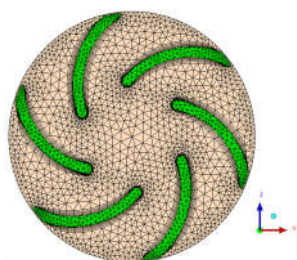
² Backward



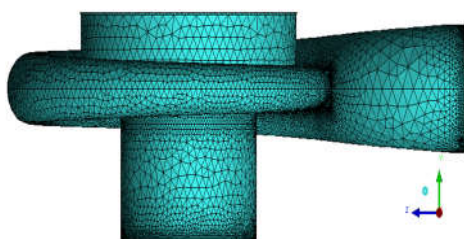
شکل ۴- موقعیت پروانه درون حلزونی

۲-۲- تولید شبکه محاسباتی

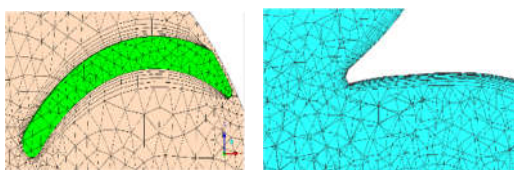
شبکه تولید شده از نوع بی‌سازمان و با المان‌های ۴ وجهی مثلثی^۱ می‌باشد. به منظور حل دقیق جریان در مجاورت دیواره‌ها از شبکه لایه مرزی با ۱۰ لایه به نرخ رشد ۱/۲ استفاده شده است. در قسمت پروانه به دلیل حرکت چرخشی و ایجاد گرادیان‌های شدید سرعت و فشار شبکه ریزتر شده است. شکل‌های ۵ تا ۷، شبکه محاسباتی را برای پروانه و حلزونی نشان می‌دهند.



شکل ۵- شبکه محاسباتی در پروانه

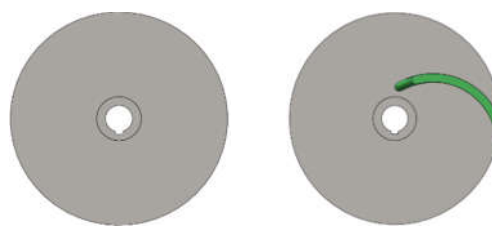


شکل ۶- شبکه محاسباتی در حلزونی



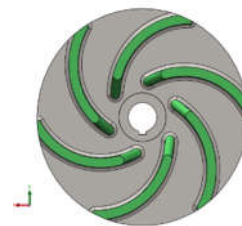
شکل ۷- شبکه لایه مرزی در (الف) پروانه (ب) حلزونی

شکل ۷- شبکه لایه مرزی در (الف) پروانه (ب) حلزونی



(الف)

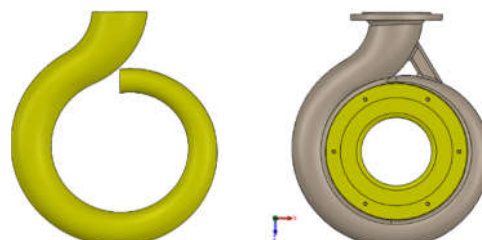
(ب)



(ج)

شکل ۲- مدل‌سازی پروانه

سپس، حلزونی پمپ شناور مدل‌سازی شده است. برای این منظور ابتدا ۵ سطح مقطع به عنوان سطوح مبنا حلزونی انتخاب شده است. اولین سطح مقطع مربوط به کوچک‌ترین سطح مقطع درون حلزونی و آخرین سطح مقطع مربوط به بزرگ‌ترین سطح مقطع درون حلزونی یعنی دهانه خروجی پمپ می‌باشد. سه سطح مقطع دیگر در موقعیت‌های ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به اولین سطح مقطع در نظر گرفته شده‌اند. این ۵ سطح مقطع با استفاده از یک مسیر راهنما به یکدیگر متصل می‌شوند. با به هم وصل کردن این سطوح، فضای درون حلزونی پمپ حاصل می‌شود. شکل ۳ مدل‌سازی حلزونی مورد نظر را نشان می‌دهد.



(الف)

(ب)



(ج)

شکل ۳- مدل‌سازی حلزونی

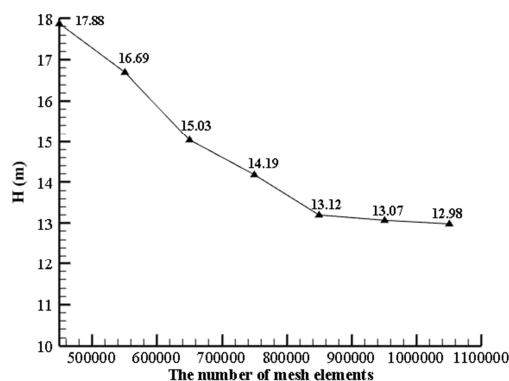
پس از مدل‌سازی حلزونی، پروانه درون آن جاگذاری می‌شود. فاصله پیش فرض طراحی بین پروانه و حلزونی ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۴ موقعیت پروانه درون حلزونی را نشان می‌دهد.

^۱ Tetrahedral

دو بخش پروانه و حلزونی به وسیله یک صفحه میانی^۱ به هم مرتبط شده‌اند. با اعمال تنظیمات مورد نیاز در تولید شبکه، فضای محاسباتی به ۹۵۶۰۱۶ سلول چهاروجهی مثلثی تقسیم گردید. کیفیت ۹۶ درصد سلول‌های شبکه از منظر معیار کشیدگی سلول^۲ در محدوده خوب و عالی قرار دارد.

۲-۳- مطالعه شبکه محاسباتی

برای اطمینان از عدم تاثیر شبکه بر حل جریان، در نقطه BEP پمپ، مقدار هد در اندازه‌های مختلف شبکه بررسی شده است. مقدار هد پمپ نباید با تغییر اندازه شبکه تغییر کند. با کاهش اندازه سلول، هد پمپ برای تعداد سلول‌های مختلف بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده که در شکل ۸ نشان داده شده است، تغییرات هد بعد از ۸۵۴۰۱۶ سلول ناچیز بوده و دقت مناسبی نیز دارد. بنابراین این شبکه به عنوان شبکه محاسباتی انتخاب شد.



شکل ۸- هد پمپ در تعداد سلول‌های مختلف شبکه

۲-۴- مشخصات هندسی پمپ

ابعاد هندسی پمپ در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی پمپ

۲۲۰	قطر ورودی (mm)
۱۳۵	قطر خروجی (mm)
۲۸۰	قطر پروانه (mm)
۸۲/۲۵	قطر چشم پروانه (mm)
۳۸/۵	عرض خروجی سیال از پروانه (mm)
۱۲	ضخامت پره (mm)
۶	تعداد پره

۳- معادلات حاکم

معادلات اساسی حاکم بر مسئله شامل بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی می‌باشد. به دلیل تغییرات اندک دما در پمپ، معادله انرژی حل نمی‌شود. روابط (۱) و (۲) به ترتیب معادلات پیوستگی و بقای

مومنتم را با فرض جریان پایا برای یک سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر در حجم کنترل نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') + f \quad (2)$$

در این معادله τ تانسور تنش و f نیروهای حجمی وارد بر سیال می‌باشند و از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$\bar{\tau}_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$f = -\rho \left[2\bar{\Omega} \times \bar{u} + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}) \right] \quad (4)$$

که در این روابط $\bar{\Omega}$ معرف سرعت زاویه‌ای و \bar{r} تیبانگر بردار جابه‌جایی سیال می‌باشد. عبارت اول در سمت راست معادله (۴) نیروی کریولیس^۳ و عبارت دوم نیروی گریز از مرکز می‌باشد [۱۰].

به منظور بسته شدن دستگاه معادلات و همچنین تحلیل آشفتگی در جریان، نیاز به یک مدل آشفتگی مناسب با فیزیک مسئله می‌باشد. با توجه به ماهیت جریان و پژوهش‌های پیشین صورت گرفته مانند مرجع [۹]، مدل آشفتگی SST k- ω برای این منظور در نظر گرفته شده است. این مدل قدرت بالایی در حل جریان‌های چرخشی و جریان در لایه مرزی دارد. روابط (۵) و (۶) معادلات انتقال برای مدل آشفتگی SST k- ω را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

در این معادلات G_k و G_ω تولید انرژی جنبشی آشفتگی k و ω هستند. Γ_k ، Γ_ω ، Y_k و Y_ω به ترتیب نفوذ موثر^۴ و اتلاف آشفتگی k و ω می‌باشند. D_ω معرف جمله پخش ω و ضرایب S_k و S_ω مربوط به جملات چشم می‌باشند [۱۱].

گسسته‌سازی معادلات به روش حجم محدود انجام شده است. الگوریتم coupled برای حل همزمان سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم بر خلاف الگوریتم simple معادلات را به صورت مستقیم و همزمان حل می‌کند [۱۲].

۳-۱- شرایط مرزی

برای حل معادلات نیاز به بکارگیری شرایط مرزی می‌باشد. ناحیه‌های حل شامل ورودی، پروانه و حلزونی می‌باشد. قسمت‌های ورودی و حلزونی جزو دامنه ثابت و بخش پروانه جزو دامنه متحرک می‌باشند. جریان در نواحی ثابت با استفاده از دستگاه مختصات ثابت و در ناحیه متحرک با استفاده از دستگاه مختصات چرخان حل شده است. نواحی پروانه و حلزونی با استفاده از یک صفحه میانی به یکدیگر متصل شده‌اند. شرط مرزی سرعت در ورودی و جریان خروجی در خروجی پمپ در نظر گرفته شده است. بر صفحه رابط بین این دو

³ coriolis

⁴ Effective Diffusivity

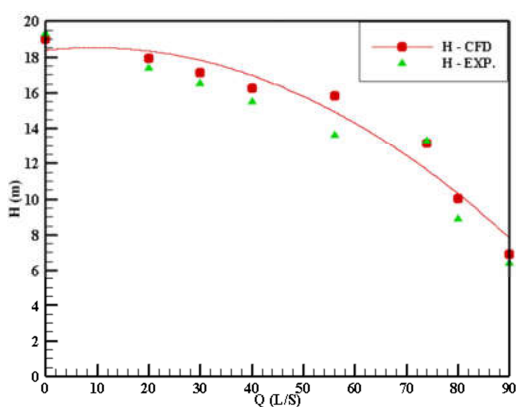
² Interface

² Skewness

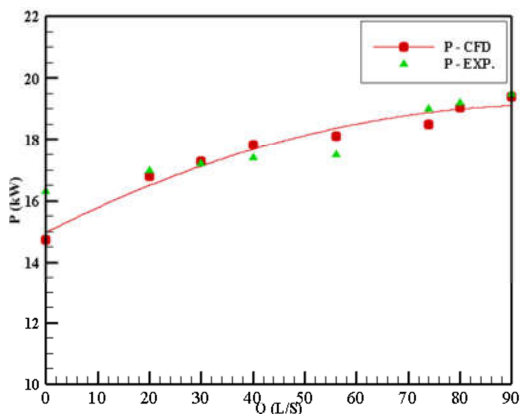
۴- نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی جریان در حالت پیش فرض طراحی

در ابتدا به منظور سنجش پمپ مدل شده با نمونه واقعی، جریان سیال درون پمپ در حالت پیش فرض طراحی و بدون تغییر در فاصله پروانه و حلزونی شبیه‌سازی شده است. جریان در ۷ دبی مختلف حل و منحنی‌های عملکردی پمپ به دست آمده است. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج تجربی که از شرکت سازنده پمپ به دست آمده است، بیشترین راندمان در دبی ۷۴ l/s و هد ۱۳/۲۹ متر حاصل می‌شود. به این نقطه BEP یا بیشینه کارایی پمپ گفته می‌شود و پمپ می‌بایست در این دبی کار کند. در جدول ۲، درصد خطای نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در دبی ۷۴ l/s نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نمودار هد - دبی



شکل ۱۱- نمودار توان مصرفی - دبی

ناحیه نیز شرط شار جریان ثابت اعمال شده است. همچنین در سطح دیواره‌ها از شرط عدم لغزش استفاده شده است.

۳-۲- روابط هیدرولیکی پمپ

عملکرد یک پمپ با استفاده از چند پارامتر یا مشخصه اصلی هیدرولیکی بیان می‌شود. هد، توان ورودی و راندمان مهمترین مشخصه‌های یک پمپ می‌باشند. معمولاً تغییرات این مشخصه‌ها را بر حسب افزایش دبی بیان می‌کنند. هد پمپ که بیانگر اختلاف هد ورودی و خروجی سیال به پمپ می‌باشد، از رابطه برنولی محاسبه می‌شود.

$$H_{net} = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{out} - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{in} + H_{Loos} \quad (7)$$

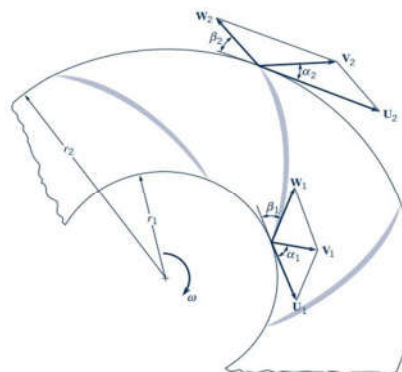
از آنجایی که اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی پمپ ناچیز بوده از ترم هد ارتفاع صرف نظر شده است.

در رابطه فوق، H_{Loos} معرف هد افت‌های موضعی در پمپ می‌باشد. این افت برابر مجموع اتلاف‌های اصلی (اصطکاک سطوح) و اتلاف‌های فرعی (تغییر سطح مقطع کانال‌های عبوری سیال، اتصالات و زانویی‌ها) می‌باشد. بنا به اطلاعات داده شده از شرکت سازنده، میزان اصطکاک در شرایط آزمایشگاهی ناچیز بوده و فقط ضریب افت‌های جزئی قابل ملاحظه بوده که برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

توان مصرفی پمپ که معادل توان داده شده به شفت از طریق موتور الکتریکی می‌باشد، وابسته به سرعت چرخش پروانه و گشتاور وارد بر آن توسط سیال بوده و از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\dot{W}_{shaft} = \Omega T_{shaft} = \Omega \rho Q (r_2 V_{2\theta} - r_1 V_{1\theta}) \quad (8)$$

که در این رابطه $V_{2\theta}$ و $V_{1\theta}$ به ترتیب سرعت مماسی سیال در ورود و خروج از پروانه می‌باشد [۱۳]. در شکل ۹ بردارهای سرعت سیال در حین عبور از پروانه رسم شده است.

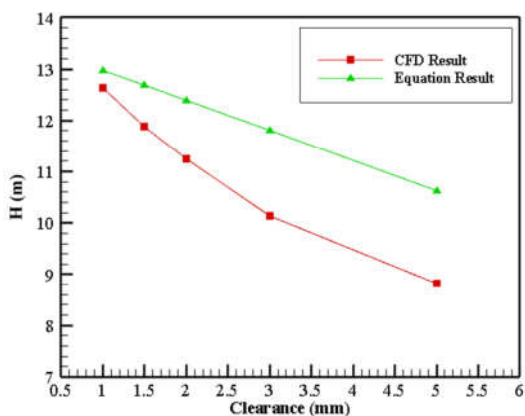


شکل ۹- بردارهای سرعت سیال در پروانه

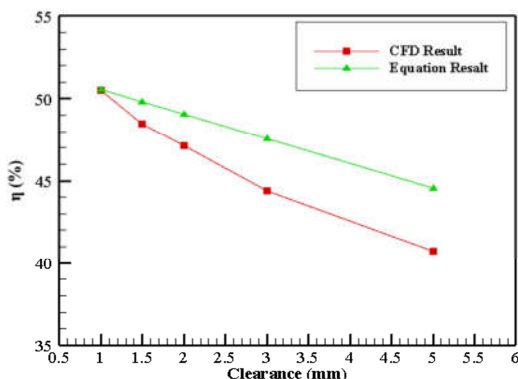
گشتاور وارد شده بر شفت وابسته به دبی سیال و سرعت مماسی سیال در حین خروج از پروانه می‌باشد. راندمان پمپ نیز برابر است با نسبت توان خروجی پمپ به توان داده شده به پمپ و از رابطه (۹) قابل اندازه‌گیری است [۱۳].

$$\eta = \frac{\rho g Q H_{net}}{\Omega T_{shaft}} \quad (9)$$

همچنین سرعت چرخش پروانه برابر ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد.



شکل ۱۳- مقادیر هد محاسبه شده از حل عددی و رابطه تجربی

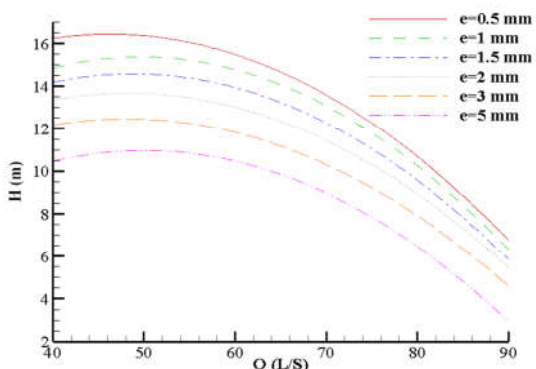


شکل ۱۴- مقادیر راندمان محاسبه شده از حل عددی و رابطه تجربی

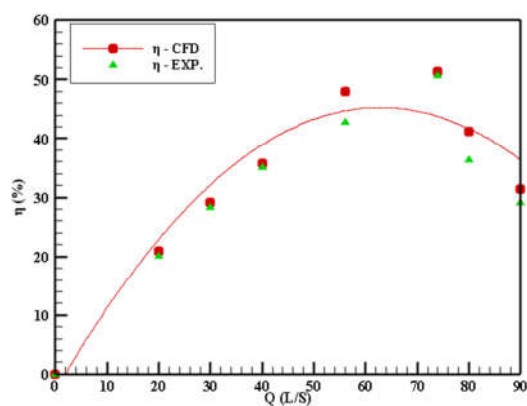
همان‌طور که از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایان است در فواصل کمتر، نتایج به دست آمده از حل عددی و رابطه تجربی بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

۴-۲- شبیه‌سازی در فاصله‌های مختلف

در این مرحله شبیه‌سازی در ۵ فاصله دیگر انجام شده است. این فاصله‌ها شامل ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۵ میلی‌متر می‌باشند. در هر مرحله مقادیر هد، توان مصرفی و راندمان محاسبه و نتایج آن‌ها در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ ارائه شده است. در ادامه شدت گردابه‌های به وجود آمده و برآیند نیروهای محوری اعمالی بر پروانه نیز محاسبه شده است.



شکل ۱۵- نمودارهای هد - دبی در پنج فاصله مختلف



شکل ۱۶- نمودار راندمان - دبی

جدول ۲- مشخصه‌های پمپ در دبی ۷۴ l/s

مشخصه	نتایج تجربی	نتایج شبیه‌سازی	درصد خطا
هد (m)	۱۳/۲۹	۱۳/۱۲	۱/۲۸
توان مصرفی (kW)	۱۹	۱۸/۴۹	۲/۶۹
راندمان (%)	۵۰/۷۸	۵۱/۴۱	۱/۲

درصد خطای حل عددی با نتایج تجربی در هر سه مشخصه هد، توان مصرفی و راندمان زیر ۳ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت مناسب حل عددی می‌باشد.

در رابطه با تغییرات هد و راندمان در اثر تغییر فاصله بین پروانه و حلزونی، مرجع [۱۳] یک رابطه تجربی بر حسب پارامترهای هندسی پروانه ارائه کرده است. البته با استفاده از این رابطه تغییر هد و راندمان را تنها می‌توان در دبی BEP محاسبه کرد اما با استفاده از حل عددی در هر دبی دلخواه می‌توان این تغییرات محاسبه نمود.

$$\frac{H_{e=0} - H_e}{H_{e=0}} = \frac{2 \cdot 5 \frac{e}{D}}{\sqrt{\frac{a}{D} \left(1 - \frac{d}{D}\right) n \left(\frac{t_n}{\pi D}\right)^{0.2} (\omega \frac{\sqrt{Q_{BEP}}}{H_{BEP}^{0.75}})^{0.1} (\sin \beta_2)^{1.2} (\sin \beta_1)^{0.4}}} \quad (10)$$

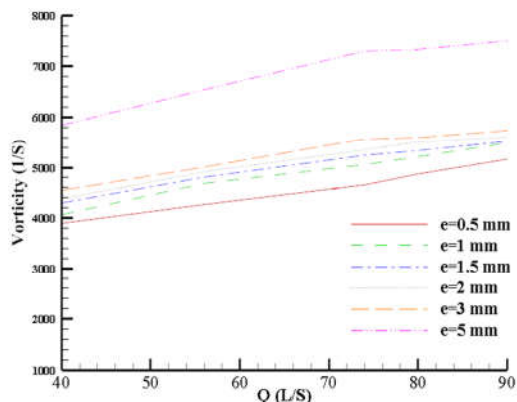
$$\frac{\eta_{e=0} - \eta_e}{\eta_{e=0}} = \frac{2 H_{e=0} - H_e}{3 H_{e=0}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۰) $H_{e=0}$ معرف هد در فاصله فرضی صفر می‌باشد که می‌توان از طریق قرار دادن مقدار هد در نقطه BEP در این رابطه مقدار هد در فاصله صفر را محاسبه نمود. همچنین با توجه به شکل ۱ مولفه a بیانگر عرض کانال خروجی سیال از پروانه، D و d به ترتیب قطر پروانه و چشم پروانه، n تعداد پره‌ها، t ضخامت پره و مقادیر β_1 و β_2 با توجه به شکل ۸ زوایای بین سرعت نسبی سیال (W) و جهت منفی سرعت پره (U) بوده که در پروانه مورد نظر به ترتیب برابر با ۴۰ و ۲۵ درجه می‌باشند. رابطه (۱۱) نیز تغییرات راندمان را به تغییر فاصله بین پروانه و حلزونی مرتبط می‌سازد. نتایج به دست آمده از محاسبه هد و راندمان در دبی BEP، به روش CFD و رابطه تجربی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

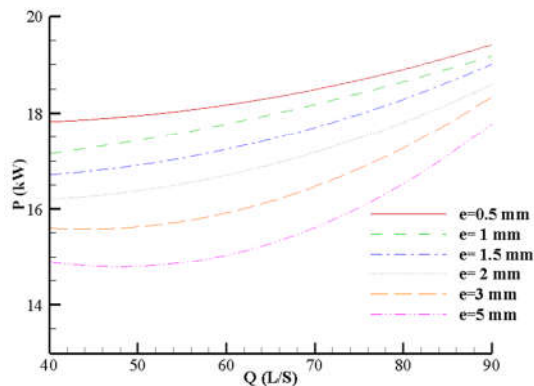
می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۱۵، هرچه دبی جریان افزایش یابد میزان افت هد پمپ در اثر افزایش لقی، کاهش می‌یابد. در واقع در دبی‌های کم میزان تاثیر افزایش فاصله بر هد پمپ بیشتر از دبی‌های زیاد می‌باشد. در شکل ۱۶ نیز مشاهده می‌شود که در دبی‌های کم، افزایش فاصله تاثیر بیشتری بر روی توان مصرفی پمپ دارد. با توجه به شکل ۱۷ موضوع فوق در مورد راندمان برعکس می‌باشد و در دبی‌های کم، افزایش فاصله تاثیر کمتری بر روی راندمان پمپ خواهد داشت. بنابراین هرچه دبی افزایش یابد، تاثیر افزایش فاصله بین پروانه و حلزونی در راندمان ملموس‌تر خواهد شد. این موضوع در خصوص هد و توان مصرفی برعکس بوده و در دبی‌های کم، تاثیر بیشتری مشاهده می‌شود.

وجود گردابان فشار، آشفتگی در جریان و نیروی لزجت اصطکاکی باعث پدید آمدن گردابه‌هایی در مسیر سیال شده که منجر به کاهش انرژی سیال می‌گردد. این گردابه‌ها در شرایط مختلف شدت و قدرت متفاوتی دارند [۱۴]. تغییر در فشار و سرعت سیال که در اثر تغییر فاصله بین پروانه و حلزونی به وجود می‌آید، یکی از عواملی است که بر گردابه‌ها اثر می‌گذارد. با دور شدن پروانه از حلزونی، میزان نشتی از کناره‌های پروانه افزایش یافته و بخشی از سیال بدون وارد شدن به درون پروانه از اطراف آن خارج می‌شود. همچنین احتمال بازگشت سیال از خروجی پروانه به سمت چشم پروانه افزایش یافته و در نتیجه میزان گردابه افزایش می‌یابد. این عوامل در نهایت سبب افت انرژی و کاهش راندمان پمپ خواهند شد. شکل ۱۸ میزان گردابه‌های تشکیل شده در اطراف پروانه را به ازاء فاصله‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش فاصله، میزان این گردابه‌ها نیز افزایش یافته و با بر هم زدن نظم جریان، سبب افزایش اتلافات پمپ می‌شود. نکته قابل توجه، افزایش چشمگیر گردابه در فاصله ۵ میلی‌متری پروانه از حلزونی می‌باشد.

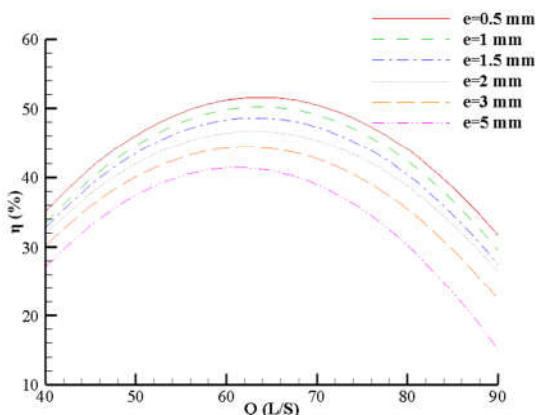
از آنجایی که در نزدیکی سطح کم فشار پره گردابان فشار بیشتر بوده، گردابه‌ها در این نواحی تشکیل می‌شوند. از سوی دیگر، در مجاورت هاب به دلیل لغزش کمتر مولکول‌های سیال بر روی یکدیگر، خطوط جریان با نظم بیشتری روی هم حرکت می‌کنند اما هرچه سیال از هاب دورتر می‌شود، به دلیل حرکت نامنظم خطوط جریان و برخورد مولکول‌ها به یکدیگر، آشفتگی در جریان افزایش یافته و گردابه‌ها به وجود می‌آیند. موقعیت تشکیل گردابه‌ها در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۸- شدت گردابه‌های تشکیل شده در پنج فاصله مختلف



شکل ۱۶- نمودارهای توان مصرفی - دبی در پنج فاصله مختلف



شکل ۱۷- نمودارهای راندمان - دبی در پنج فاصله مختلف

با افزایش فاصله میان پروانه و حلزونی سرعت سیال در خروج از پروانه کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت سیال دو نتیجه مهم در بر خواهد داشت. نخست اینکه باعث می‌شود گشتاور وارد شده بر پروانه نیز کاهش پیدا کند. بنابراین توان مصرفی پمپ افت می‌کند. در وهله دوم باعث کاهش انرژی جنبشی سیال شده و در نتیجه فشار تولیدی در حلزونی نیز کاهش پیدا می‌کند. کاهش فشار خروجی پمپ منجر به افت هد تولیدی پمپ می‌شود. میزان افت هد و توان مصرفی در پمپ به گونه‌ای است که در مجموع باعث کاهش راندمان شده است. بنابراین هر سه مشخصه هد، توان مصرفی و راندمان با افزایش فاصله کاهش می‌یابند. در جدول ۳ میزان کاهش هد و راندمان از ۰/۵ mm تا e = ۵ mm در دبی ۷۴ l/s بیان شده است.

جدول ۳- تغییرات هد و راندمان در دبی ۷۴ l/s

مشخصه / فاصله	e = ۵	e = ۳	e = ۰/۵	هد (m)
توان مصرفی (kW)	۸/۸۲	۱۰/۱۳	۱۳/۱۲	
راندمان (%)	۴۰/۷۶	۴۴/۳۹	۵۱/۴۱	

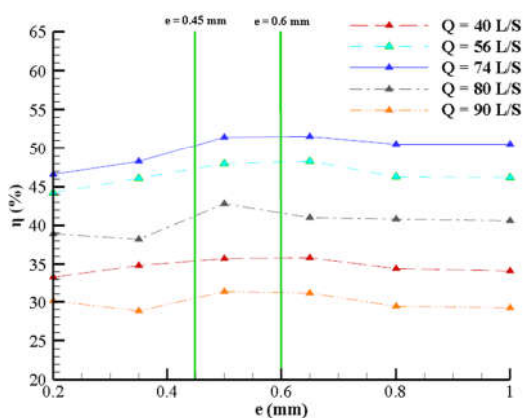
با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش فاصله از ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر سبب کاهش ۳۳ درصدی هد، ۱۸ درصدی توان و ۲۰ درصدی راندمان

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد افزایش فاصله بین پروانه و حلزونی باعث کاهش برآیند نیروهای محوری وارد شده بر پروانه می‌شود. دلیل این امر کاهش فشار در پمپ بر اثر افزایش فاصله می‌باشد. از سوی دیگر در فواصلی کمتر از فاصله طراحی، میزان نیروی محوری بیشتر از حالت استاندارد است. یعنی هرچه پروانه به کف حلزونی نزدیک‌تر شود، نیروی اعمالی بر پروانه بیشتر می‌شود. البته از آن جایی که فاصله بین پروانه و حلزونی در این پمپ در حالت طراحی اندک بوده، کاهش آن تاثیر کمی بر نیروی محوری دارد اما در پمپ‌هایی که فاصله ذکر شده قابل توجه باشد، کاهش این فاصله باعث افزایش قابل توجه نیروی محوری وارد آمده بر پروانه خواهد شد.

۳-۴- محدوده مجاز تغییرات فاصله

در این بخش یک محدوده مجاز برای تغییرات فاصله بین پروانه و حلزونی ارائه شده است. در این محدوده تاثیرات تغییر فاصله بر روی راندمان پمپ زیر ۳ درصد در نظر گرفته شده است. بدین منظور شبیه‌سازی در محدوده $0.2 \text{ mm} < e < 1 \text{ mm}$ و در ۵ فاصله مختلف انجام شده است. نتایج به دست آمده در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

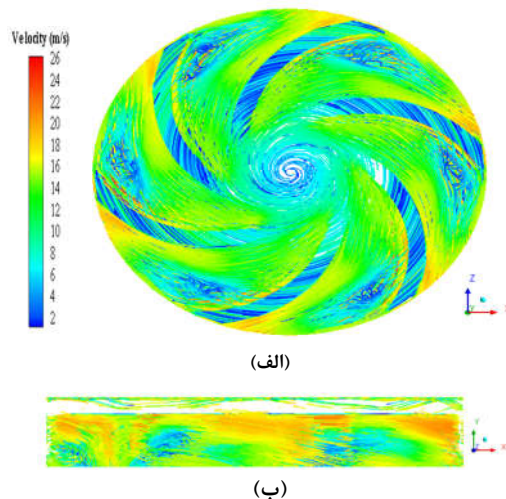
با توجه به نتایج حاصل، محدوده $0.45 \text{ mm} < e < 0.6 \text{ mm}$ را می‌توان به عنوان محدوده‌ایی که تغییرات فاصله، کمترین تاثیر را بر راندمان پمپ دارد در نظر گرفت. این محدوده می‌بایست پس از تعمیرات پمپ و قبل از راه‌اندازی توسط بهره‌بردار بررسی گردد.



شکل ۲۱- محدوده مجاز تغییرات فاصله

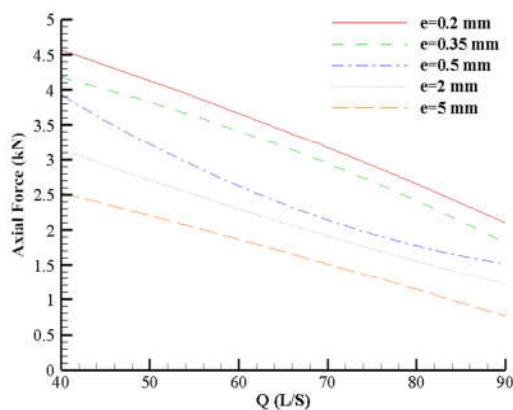
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی جریان در یک الکتروپمپ شناور ۲۲ کیلوواتی انجام شده است. مدل هندسی الکتروپمپ مورد نظر با استفاده هم‌زمان از ابزارهای اندازه‌گیری و نرم‌افزار طراحی به کمک رایانه به دست آمده است. به دلیل پیچیده بودن هندسه مجراهای سیال درون پمپ، فضای محاسباتی سه‌بعدی با استفاده از شبکه بی‌سازمان چهاروجهی گسسته‌سازی شده است. شبیه‌سازی با استفاده از کد تجاری فلونت انجام شده است. هدف این تحقیق بررسی تاثیر تغییر فاصله محوری بین پروانه و حلزونی بر عملکرد یک الکتروپمپ شناور می‌باشد. هد، توان مصرفی و راندمان به عنوان مشخصه‌های اصلی پمپ و همچنین گردابه و نیروی محوری وارد بر پروانه مورد



شکل ۱۹- خطوط جریان در فضای اطراف پروانه الف) نمای xz
ب) نمای yz

موضوع دیگری که در اثر تغییر فاصله بین پروانه و حلزونی حائز اهمیت بوده، میزان نیروی محوری وارد شده بر پروانه می‌باشد. این نیرو از آن جهت با اهمیت است که به طور مستقیم بر عملکرد یاتاقان موجود در پمپ اثر می‌گذارد و در صورت کاهش عمر و خرابی یاتاقان، ارتعاشات پروانه درون حلزونی افزایش یافته و عملکرد پمپ را شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد. مهمترین نیروهای محوری که بر پروانه اعمال می‌شود شامل نیروی ناشی از اختلاف فشار در دو طرف پروانه و نیروی تکانه در جهت برخورد سیال به پروانه می‌باشد. این دو نیرو در خلاف جهت یکدیگر بر پروانه وارد می‌شوند و با توجه به بزرگ‌تر بودن نیروی اعمالی ناشی از اختلاف فشار، نیروی برآیند هم جهت با نیروی اختلاف فشار و در راستای بردار نرمال سطح پروانه می‌باشد. نیروی تکانه فقط به دبی سیال وابسته بوده و تغییرات فاصله تاثیری بر آن ندارد اما با توجه به تغییر فشار سیال در اثر تغییر فاصله بین پروانه و حلزونی، نیروی فشاری وارد بر پروانه تغییر می‌کند. در شکل ۲۰ تغییرات نیروی محوری وارد شده بر پروانه در فواصل مختلف نشان داده شده است. به منظور یافتن تاثیر کاهش فاصله بر نیروی محوری اعمالی، شبیه‌سازی در فواصلی کمتر از فاصله طراحی نیز انجام شده است.



شکل ۲۰- نیروی محوری وارد بر پروانه در فواصل مختلف

۷- مراجع

- [1] Wall J., *Improvement of Efficiency in a Submersible Pump Motor*, MSc. Thesis, Dublin city university, 2008.
- [2] Takacs G., *Electrical Submersible Pumps Manual*, Gulf Professional Publishing, Burlington, 2009.
- [3] Caridad J. and Kenyery F., CFD Analysis of Electric Submersible Pumps (ESP) Handling Two-Phase Mixtures. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 126, pp. 99-104, 2004.
- [۴] احقاقی ب.، کوزه‌گر غیائی ک. و وجدی م.، بررسی تاثیر تعداد پره ها بر روی عملکرد پمپ گریز از مرکز، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۸۵، ج. ۴۸، ش. ۴، ص. ۳۹-۴۶، ۱۳۹۷.
- [۵] شجاعی فرد م.، طحانی م.، احقاقی ب.، بگلری م.، فلاح ه. و سلیمیان ریزی ب.، بررسی عددی و تجربی اثر هندسه چرخ متحرک بر عملکرد پمپ گریز از مرکز هنگام پمپاژ روغن، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۶۳، ج. ۴۲، ش. ۳، ص. ۳۳-۴۳، ۱۳۹۱.
- [6] Sun D. and Prado M., Single-Phase Model for Electrical Submersible Pump (ESP) Head Performance. *Journal of Society of Petroleum Engineers*, vol. 11, pp. 80-88, 2006.
- [۷] احقاقی ب.، کوزه‌گر غیائی ک. و وجدی م.، تاثیر تغییر هندسه پروانه پمپ گریز از مرکز در پدیده کاویتاسیون، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۸۴، ج. ۴۸، ش. ۳، ص. ۹-۱۸، ۱۳۹۷.
- [8] Ozturk A., Aydin K., Sahin B. and Pinarbasi, A., Effect of impeller- diffuser gap ratio in a centrifugal pump. *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 68, pp. 203-213, 2009.
- [9] Stel H., Sirino T., Ponce F.J., Chiva S. and Morales R.E.M., Numerical investigation of the flow in a multistage electric submersible pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 136, pp. 41-54, 2015.
- [10] Currie I.G., *Fundamental Mechanics of Fluids*, CRC Press, New York, 2012.
- [۱۱] حیدری‌نژاد ق.، مقدمه ای بر توربولانس. دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۸.
- [12] Fluent, ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15, 2013.
- [13] Güllich J.F., *Centrifugal Pumps*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [14] Wu J.Z., Ma H.Y. and Zhou M.D., *Vorticity and Vortex Dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هر سه مشخصه هد، توان مصرفی و راندمان در اثر افزایش فاصله دچار افت خواهند شد. دلیل آن افت سرعت سیال در خروج از پروانه می‌باشد که باعث کاهش انرژی جنبشی سیال و در نتیجه کاهش فشار تولیدی در پمپ می‌شود. علاوه بر آن کاهش سرعت در پروانه منجر به کاهش گشتاور وارد شده بر شفت شده و توان مصرفی پمپ را کاهش می‌دهد. تاثیر این عامل بر راندمان به گونه‌ای است که در مجموع باعث کاهش راندمان می‌شود. بر طبق نتایج به دست آمده افزایش فاصله بین پروانه و حلزونی از ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر باعث کاهش ۲۰ درصدی راندمان نسبت به حالت اولیه می‌شود. با محاسبه گردابه تشکیل شده در اطراف پروانه مشخص می‌شود که افزایش فاصله منجر به افزایش گردابه شده و در نتیجه انرژی بیشتری در پمپ هدر می‌رود. همچنین با توجه به نتایج، نیروی محوری وارد شده بر پروانه در اثر کاهش فاصله افزایش می‌یابد. بنابراین در پمپ‌هایی که فاصله طراحی بین پروانه و حلزونی نسبتاً زیاد می‌باشد، کاهش فاصله سبب اعمال نیروی قابل توجهی به پروانه و در نهایت یاتاقان شده و ارتعاشات را در پمپ افزایش می‌دهد. در نهایت محدوده $0.6 \text{ mm} < e < 0.45 \text{ mm}$ به عنوان بازه‌ای که در آن راندمان زیر ۳ درصد افت می‌کند، معرفی شد.

۶- نمادها

نماد	کمیت
a	عرض کانال خروجی سیال از پروانه
d	قطر چشم پروانه
D	قطر بیرونی پروانه
e	فاصله بین پروانه و حلزونی
f	برآیند نیروهای حجمی
g	شتاب گرانش
H	هد خالص
H _{Loss}	هد افت‌های موضعی
k	انرژی جنبشی آشفتگی
n	تعداد پره
P	فشار سیال
Q	دبی حجمی سیال
\dot{r}	بردار جابه‌جایی سیال
t	ضخامت پره
T	گشتاور شفت
\bar{u}	بردار سرعت سیال
V	سرعت مطلق سیال
V _θ	سرعت مماسی سیال
Z	هد ارتفاع

علائم یونانی

β	زاویه بین سرعت نسبی سیال و جهت منفی سرعت پره
η	راندمان
μ	لزجت دینامیکی
ρ	چگالی
τ	تنش برشی
$\bar{\Omega}$	بردار سرعت زاویه‌ای
ω	نرخ اتلاف مخصوص آشفتگی