



Experimental and Numerical Investigation of Using Coanda Effect for Producing Underwater Propulsion

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gandomkar M.^{*1} PhD,
Amini Foroushani J.¹ MSc

How to cite this article

Gandomkar M, Amini Foroushani J. Experimental and Numerical Investigation of Using Coanda Effect for Producing Underwater Propulsion. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):777-786.

¹Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Ferdowsi Boulevard, Shahinshahr, Iran
Phone: +98 (31) 45914541
Fax: +98 (31) 45227135
mgd_gandomkar@mut-es.ac.ir

Article History

Received: December 1, 2018
Accepted: July 28, 2019
ePublished: March 01, 2020

ABSTRACT

In this study, the Coanda effect phenomenon and its advantages to produce underwater propulsion have been evaluated experimentally and numerically. The Coanda effect is the tendency of a jet flow to follow a convex surface. This effect is used to multiply the flow volume rate through a nozzle-diffuser channel. A ring shape jet flow is injected toward the throat, which follows the curved surface along the channel. Surrounding fluid sucked into the nozzle was pushed toward the exit section of the diffuser. The flow is several times more than the jet flow rate therefore it can be used as a propulsion system. A series of experimental Bollard tests were performed to investigate the system behavior with respect to the different size of the gap and the jet flow rate. Also, a numerical model was used for simulating the tests for similar conditions. A good agreement is observed between numerical and experimental results. The numerical tool was then used to predict the amount of thrust where free stream velocity was 2.5m/s. the Comparison of the flow multiplier performance with a regular propeller shows that it is possible to use of the water flow multipliers as underwater propulsion systems with acceptable performance.

Keywords Flow Multiplier; Coanda Effect; Underwater Propulsion; Computational Fluid Dynamics; Bollard Pull Test

CITATION LINKS

[1] Marine propellers and ... [2] Device for deflecting a stream of elastic fluid projected into an elastic ... [3] Performance analysis of a horn-type rudder implementing the Coanda ... [4] Pulse width modulation of water jet propulsion systems using high-speed coanda-effect ... [5] Aerodynamics and flight mechanics of MAV based on ... [6] Water jet propulsion mechanism for low speed ... [7] Mav propulsion system using the coanda ... [8] Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda ... [9] Mathematical model of a constructal Coanda effect ... [10] Application of Coanda jet for generating lift of micro air vehicles-Preliminary design ... [11] On some recent applications of the coanda ... [12] Noise generated by a Coanda wall jet circulation ... [13] Industrial jet noise: Coanda ... [14] The aeroacoustics and aerodynamics of ... [15] Coanda effect in coastal ... [16] Experimental and numerical POD study ... [17] The compressible Coanda wall jet-an experimental ... [18] Wall roughness effect on Coanda fluid ... [19] An experimental investigation of the water jet ... [20] Simulation of an unmanned aerial vehicle ... [21] An innovative technique to increase lift ... [22] The investigation of using water instead ... [23] Report on the first European Mechanics Colloquium ... [24] An analysis of the efficiency of the functional matching ... [25] An analysis of the efficiency of the functional matching ... [26] A parametric study of a thick, incompressible flow ... [27] A new mathematical model for high thickness ... [28] Improvement of a wing's aerodynamic efficiency using ... [29] Fuselage airstream simulation for a ... [30] On the possibility of using Coanda effect for ... [31] Emerging technologies in UAV ... [32] Numerical analysis of a turbulent flow with Coanda effect ... [33] Improvement of a wing's aerodynamic efficiency ... [34] Power-saving device for air bubble generation using ... [35] Influence of Coanda surface curvature on performance of ... [36] Numerical aerodynamic evaluation and noise investigation ... [37] Fan size and energy ... [38] PIV measurements and analysis of transitional flow ... [39] Design, modeling, fabrication, and evaluation of the air amplifier for improved detection of ... [40] Richmond Hill: Nex ... [41] ANSYS fluent theory ... [42] A one-equation turbulence model for aerodynamic ... [43] Perspective: Validation—What does it ... [44] A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based ... [45] Evaluation of numerical error estimation based on grid refinement studies ... [46] Fluid mechanics, fundamentals and ... [47] KT, KQ and efficiency curves for the Wageningen ...

بررسی آزمایشگاهی و عددی استفاده از پدیده اثر کواندا در ایجاد نیروی پیشران زیرسطحی

محمد گندم‌کار* PhD

مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، ایران

جواد امینی فروشانی MSc

مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، ایران

چکیده

در این مقاله به معرفی سامانه تقویت‌کننده جریان آب به‌عنوان پیشران زیرسطحی پرداخته شده و عملکرد آن با استفاده از آزمون تجربی و تحلیل عددی بررسی شده است. در این سامانه از پدیده اثر کواندا برای تقویت جریان سیال استفاده می‌شود. اثر کواندا با ایجاد خلأ نسبی روی سطح منحنی محدب باعث انحراف جت سیال از مسیر مستقیم خود شده به‌نحوی که جریان سیال، سطح منحنی را دنبال می‌کند. آب تحت فشار از یک شکاف حلقوی به‌صورت جت پرسرعت در ناحیه قبل از گلوگاه یک مجرای همگرا-واگرا تزریق می‌شود. بر اساس پدیده اثر کواندا، جریان جت، انحنای مسیر تا گلوگاه و بعد از آن را می‌پیماید. حجم بیشتری از آب در قسمت همگرای مجرا از محیط مکیده شده و از قسمت دم‌ش به بیرون رانده می‌شود و جریان آب ایجادشده باعث تولید نیروی پیشران می‌شود. این سامانه به‌منظور ارزیابی عملکرد در ایجاد نیروی پیشران، در آب ساکن (بولارد) مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار نیروی پیشران برای حالات مختلف اندازه دهانه و دبی جت سیال ورودی به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شد. مدل‌سازی عددی در شرایط مشابه با آزمایش تجربی صورت گرفت و نتایج مقایسه شد. تطابق خوبی بین هر دو دسته از نتایج دیده می‌شود. سپس از ابزار عددی برای تحلیل وسیله در سرعت جریان آزاد ۲/۵ متر بر ثانیه استفاده شد. نتایج آن با نمودارهای یک پروانه چرخشی معمولی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان از این سیستم در تولید نیروی پیشران زیر سطح آب با کارایی قابل قبول استفاده نمود. **کلیدواژه‌ها:** تقویت‌کننده جریان سیال، اثر کواندا، سامانه پیشران زیرسطحی، دینامیک سیالات محاسباتی، آزمون بولارد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶

*نویسنده مسئول: mgd_gandomkar@mut-es.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از بخش‌های سیستم‌های رانش دریایی قسمتی است که با آب در تماس بوده و باعث راندن آب به سمت عقب شناور برای تولید نیروی پیشران می‌شود. تاکنون سیستم‌های مختلفی به این منظور در محیط آب مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به رانش پدالی (پارویی و چرخ آبی)، رانش به کمک پروانه‌های چرخشی یا پمپ جت، رانش جت آب و رانش مگنتو هیدرودینامیک (MHD) اشاره کرد^[1]. در این میان استفاده از پروانه‌های چرخشی کاربرد وسیع‌تری در تولید نیروی پیشران پیدا کرده و تحقیقات متنوعی روی آن انجام می‌شود. سایر سیستم‌ها در مقایسه با پروانه‌های چرخشی، قابلیت‌های کمتری از خود نشان داده و صرفاً به دلیل برخی مزایای خاص توسعه پیدا کرده‌اند.

با وجود قابلیت‌های فراوان، از محدودیت‌های استفاده از پروانه می‌توان به مواردی مانند نیاز به آب‌بندی در قسمت‌های چرخان

(مانند محور)، ارتعاشات ناشی از دوران مجموعه رانش، امکان درگیرشدن پروانه با اجرام معلق در آب و بروز پدیده کاویتاسیون در لبه‌های پروانه اشاره کرد.

در این تحقیق به بررسی سیستم تقویت‌کننده جریان سیال پرداخته می‌شود که می‌تواند به‌عنوان تولیدکننده نیروی پیشران در زیر آب مورد استفاده قرار گیرد و معایب ناشی از قطعات چرخان را نداشته باشد. در سیستم تقویت‌کننده جریان سیال از پدیده اثر کواندا (Coanda) برای تولید نیروی پیشران در زیر آب استفاده می‌شود. اثر کواندا، به تمایل جریان سیال برای دنبال کردن سطح یک منحنی بدون جدایش از سطح گفته می‌شود که اولین بار توسط یک مهندس رومانیایی به نام هنری کواندا/شناخته و معرفی شد^[2]. بیش از صد سال از کشف پدیده اثر کواندا می‌گذرد و مطالعات پدیده‌شناسی و کاربردی آن همچنان ادامه دارد. استفاده از این اثر در افزایش کارایی سکان شناورهای دریایی به روش تجربی و عددی بررسی شده است^[3]. همچنین تحقیقاتی برای هدایت روندهای زیرسطحی بدون استفاده از سطوح کنترل و قطعات جانبی انجام شده است^[4, 5]. ایجاد نیروی پیشران برای روندهای زیرسطحی هوشمند در مطالعه‌های تجربی و عددی نیز از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه است^[6, 7]. کاهش نیروی پسای شناور نیز با استفاده از اثر کواندا مورد بررسی قرار گرفته^[8] و تحقیقاتی نیز بر ایجاد نیروی بالابر برای کاربردهای هوافضایی و دریایی صورت گرفته است^[9]. حمد و همکاران^[10]، گزارش جامعی از زمینه‌های تحقیقاتی در مورد اثر کواندا و کاربردهای آن ارائه نموده است. در مورد نویز ایجادشده توسط وسایلی که از اثر کواندا استفاده می‌کنند نیز مطالعات مختلفی انجام شده است^[11-14]. مطالعات پدیده‌شناسی که نحوه عمل اثر کواندا و تاثیر تراکم‌پذیری در جدایش جریان از سطح و تاثیر زبری سطح را به روش عددی و تجربی بررسی نموده‌اند نیز انجام شده است^[15-19]. نجفی و جهانمیری^[20, 21]، مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی یک پرند بدون سرنشین که از اثر کواندا بهره می‌برد را بررسی نمودند. همچنین گندم‌کار و امینی^[22]، با معرفی یک سامانه تقویت‌کننده جریان آب که از اثر کواندا برای تولید نیروی پیشران زیرسطحی استفاده می‌کند، عملکرد آن را بررسی کردند.

امروزه با استفاده از این پدیده، تجهیزات مختلفی ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است^[23] که در این میان می‌توان به پرندهای دیسکی‌شکل^[24] و ریزپرنده‌ها^[25] اشاره کرد. از این پدیده برای افزایش نیروی برآ در برخی از وسایل پرند^[26, 27] یا تغییر پروفیل آیرودینامیکی برای بهبود عملکرد در وسایلی مانند پرندهای بدون سرنشین^[28-31] استفاده شده است. در برخی وسایل مانند هواپیما و بالگرد، جریان هوا روی سطوح منحنی بالای بال پرند هوایی و سطح بالای ملخ گردان، تحت اثر کواندا دچار انحراف شده و در سطح آزاد خود فشار منفی تولید می‌کند که باعث افزایش نیروی بالابر در وسایل نقلیه هوایی شده است.

در علم هیدرودینامیک مشابه کاربردهای آیرودینامیکی، از پدیده اثر کواندا استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال در تولید نیروهای

ایجاد شده در آب ساکن استخراج شد. سپس برای اطمینان از صحت تحلیل عددی، آزمایش اندازه‌گیری نیروی پیشران در آب ساکن یا آزمون بولارد نیز انجام شد و نتایج تحلیل عددی با نتایج حاصل از آزمون تجربی مقایسه شده و صحت‌سنجی آن انجام شد. در ادامه با استفاده از تحلیل عددی، نیروی پیشران در سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه نیز استخراج شد و نتایج آن با نمودارهای یک پروانه چرخشی معمول مقایسه شد. نتایج نشان داد که این سیستم می‌تواند در تولید نیروی پیشران زیر سطح آب قابل استفاده باشد. استفاده از این سیستم به‌عنوان پیشران برای شناورهای زیرسطحی با مزایای زیر همراه خواهد بود:

- حساسیت ناچیز به آلودگی‌ها و اجرام معلق در آب در مقایسه با پروانه چرخشی؛
- عدم نیاز به خنثی‌سازی گشتاور شافت در مقایسه با پروانه چرخشی؛
- امکان تولید نیروی پیشران بدون برخورد با پدیده کاویتاسیون؛ چرا که در بررسی نتایج تحلیل عددی این نکته مشاهده شد که فشار داخل و خارج سیستم، در حد اتمسفر یا بالاتر از آن است و هیچ گونه محیطی با فشار کم، مناسب برای ایجاد کاویتاسیون مشاهده نمی‌شود. این نکته در آزمون بولارد نیز مشاهده و تایید شد؛
- حذف جریان‌ات چرخشی پشت قسمت پیشران که به افزایش اختفای وسیله کمک خواهد کرد؛
- جایگزینی سیستم انتقال قدرت با یک سیستم لوله‌کشی آب تحت فشار که از انعطاف بیشتری برخوردار است؛
- سهولت تغییر جهت نیروی پیشران با چرخش قطعه اصلی تقویت‌کننده آب و حذف سکان؛
- امکان استفاده از چند تقویت‌کننده جریان در قسمت‌های مختلف شناور که با یک سیستم تامین آب تحت فشار تغذیه می‌شوند که باعث افزایش مانورپذیری وسیله خواهد شد؛
- امکان ایزوله‌کردن کامل سیستم پمپ آب و کاهش نویز ایجاد شده توسط سیستم پیشران؛
- فیلتراسیون حجم کوچکی از سیال جریان‌یافته نسبت به سیستم‌های دمنده مانند واتر جت (در سیستم واتر جت لازم است تمام حجم آب جریان‌یافته از جلو مکیده شود. بنابراین باید جهت جلوگیری از ورود اجرام معلق در آب، تمام حجم آب فیلتر شود. اما این وسیله فقط به حجم کمی از آب تحت فشار احتیاج دارد و بنابراین حجم کمی از آب جریان‌یافته نیاز به فیلتراسیون دارد).

۲- انجام آزمایش

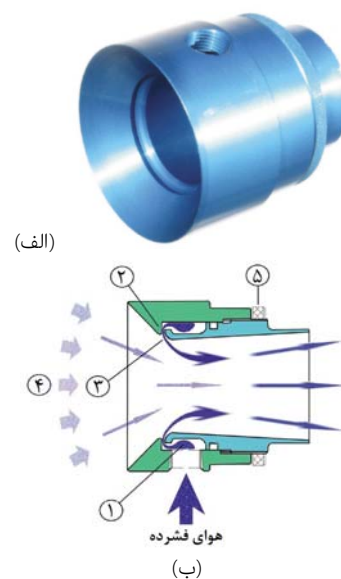
در این بخش مراحل انجام آزمون بولارد سیستم تقویت‌کننده جریان آب شرح داده می‌شود.

۲-۱ آماده‌سازی سیستم آزمایش

در این آزمایش که تجهیزات آن به‌صورت شماتیک در شکل ۲ دیده می‌شود، از یک مخزن آب به شکل مکعب روباز (شماره ۱) به طول ۲/۲، عرض ۱/۵ و ارتفاع ۱/۵ متر استفاده شده است.

هیدرودینامیکی [32]، کنترل دقیق حرکات یک رونده زیرسطحی [33] و افزایش بازدهی حرکت وسیله با کاهش نیروی پسا در یک رونده زیرسطحی [34]، استفاده شده است. در تجهیزات صنعتی و خانگی، می‌توان به پنکه‌های بدون پره [35] و تحقیقات به‌منظور کاهش نویز این نوع پنکه‌ها [36]، افزایش حجم هوا در فن‌های خنک‌کننده [37] و سیستم‌های تهویه صنعتی [38] اشاره کرد که عمل تولید یا تقویت جریان هوا را بدون استفاده از قطعات متحرک انجام داده و از خطرات وجود سیستم‌های پره‌دار کاسته شده است.

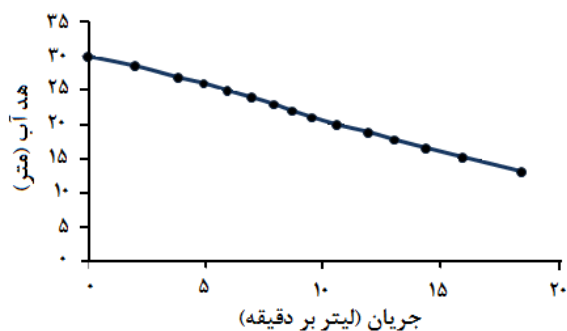
از کاربردهای این پدیده که در این تحقیق از آن استفاده شده است، سیستم تقویت‌کننده جریان سیال [39] بوده که یک نمونه از آنها در شکل ۱ نشان داده شده است [40]. در سیستم تقویت‌کننده جریان سیال که در شکل ۱-الف دیده می‌شود، دمش سیال یا مکش آن با استفاده از حجمی از سیال تحت فشار صورت می‌گیرد. در اثر تزریق جریان سیال تحت فشار در گلوگاه نازل، جریانی مخروطی‌شکل با سرعت زیاد، درون گلوگاه تولید می‌شود. در برخورد جریان ایجاد شده با سطح کواندا و تغییر مسیر در جهت آن، سیال انحراف یافته و به راستای محور نازل تغییر جهت می‌دهد. به دلیل افت فشار ناشی از اثر کواندا در سطوح آزاد جریان، سیال محیط، در قسمت مکش (شکل ۱-ب) از محیط مکیده شده و همراه با حجم سیال تحت فشار مصرفی از سمت دمش به بیرون جریان می‌یابد. این جریان ایجاد شده درون تقویت‌کننده باعث تولید نیروی پیشران خواهد شد.



شکل ۱ تقویت‌کننده جریان؛ الف: تصویر قطعه اصلی، ب: شماتیک حجم سیال عبوری [40]؛ ۱- محفظه رینگ تغذیه هوای فشرده، ۲- شکاف قابل تنظیم تغذیه هوای فشرده، ۳- محل خارج شدن هوا به درون گلوگاه نازل، ۴- قسمت مکش و هوای مکیده شده، ۵- پیچ قفل پس از تنظیم شکاف

ایده استفاده از این سیستم به‌منظور ایجاد نیروی رانش در زیر آب، باعث شد تا امکان استفاده از این سیستم در تولید نیروی پیشران در رونده‌های زیرسطحی بررسی شود. در این تحقیق، با استفاده از تحلیل عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، نیروی

آب و تجهیزات اندازه‌گیری، به‌منظور کاهش خطای انجام آزمایش، در ابتدا منحنی عملکرد پمپ به‌صورت تجربی به‌دست آمد. برای این منظور از شیر کنترل جریان جهت تنظیم دبی و دو فشارسنج جهت اندازه‌گیری فشار آب قبل و بعد از شیر کنترل استفاده شد. فشارسنج قبل از شیر کنترل به هدف تعیین فشار جریان استفاده شده و دبی حجمی در هر فشار با اندازه‌گیری حجم آب در بازه زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. این منحنی در نمودار ۱ دیده می‌شود که از آن به‌عنوان منحنی عملکرد پمپ استفاده می‌شود. فشارسنج دوم قبل از وسیله نصب شده و فشار جریان واردشونده به وسیله را اندازه‌گیری می‌کند. فشارسنج‌های استفاده‌شده در این آزمایش با دقت $\pm 0.5\%$ آب و نیروسنج نیز با دقت $\pm 0.5\%$ نیوتون هستند که قبل از آزمایش به کمک وزنه‌های مشخص و فشار استاتیکی آب کالیبره شده‌اند.

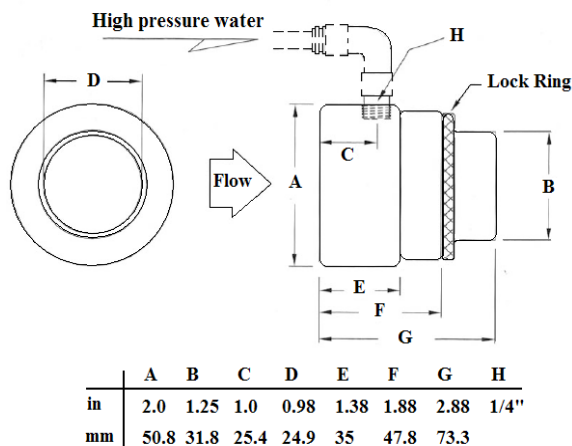


نمودار ۱) منحنی عملکرد پمپ به‌کاررفته در آزمون بولارد

۳- انجام تحلیل عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

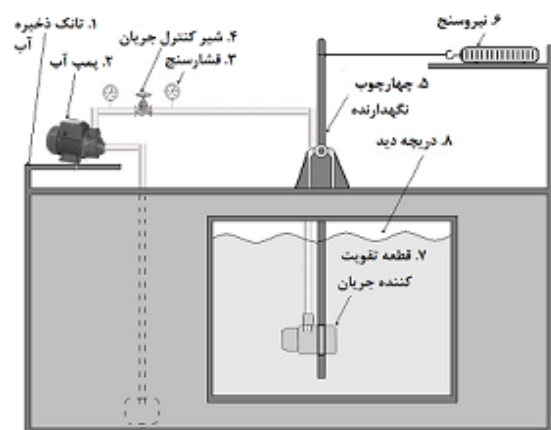
۳-۱- هندسه و ابعاد تقویت‌کننده جریان

ابعاد و هندسه تقویت‌کننده جریان مورد استفاده در این تحقیق که در شکل ۲ نشان داده شده است، مطابق ابعاد تقویت‌کننده جریان هوا مدل ۴۰۰۰۱ [۴۰] ساخته و استفاده شده است. در شکل ۴، نام‌گذاری بخش‌های اصلی در گلوگاه سیستم تقویت جریان سیال که دارای هندسه متقارن محوری است، دیده می‌شود.



شکل ۴) ابعاد سیستم تقویت‌کننده جریان آب به‌کاررفته در این تحقیق مطابق با ابعاد تقویت‌کننده جریان هوا مدل ۴۰۰۰۱ [۴۰]

در ارتفاع 0.5% متر از سطح آب یک صفحه به‌منظور قراردادن نیروسنج (شماره ۶)، تعبیه شده است. یک پمپ سانتریفیوژ که با شماره ۲ مشخص شده است، توسط موتور الکتریکی به حرکت در می‌آید و آب تحت فشار برای تزریق به درون گلوگاه تقویت‌کننده را تامین می‌کند. آب پمپ‌شده توسط لوله به تقویت‌کننده فرستاده می‌شود. قطعه تقویت‌کننده جریان آب (شماره ۷) روی یک چهارچوب (شماره ۵) قرار گرفته است که تقویت‌کننده را درون مخزن به‌صورت معلق نگه داشته و محور افقی چهارچوب، روی تکیه‌گاه بالای مخزن لولا شده است. نیروی پیشران تولیدشده، توسط میله عمودی این چهارچوب به نیروسنج منتقل شده و اندازه‌گیری می‌شود. شیر اصلی کنترل جریان (شماره ۴) پس از پمپ قرار دارد. دو فشارسنج (شماره ۳) یکی در ابتدای مسیر و قبل از شیر کنترل و دیگری پس از شیر کنترل قرار دارد که با تغییر دبی توسط شیر کنترل جریان و مشاهده فشار این دو فشارسنج، می‌توان دبی عبوری از شیر کنترل و فشار سیال ورودی به وسیله را به‌دست آورد. مخزن آزمون بولارد مطابق شماتیک آن برای استخراج نتایج تجربی ساخته شده که در شکل ۳ دیده می‌شود.



شکل ۲) شماتیک مخزن و متعلقات آن جهت اندازه‌گیری نیروی پیشران تقویت‌کننده جریان آب ساکن



شکل ۳) مخزن ساخته‌شده جهت انجام آزمون آب ساکن

۲-۲- کالیبراسیون سیستم

در این آزمایش از یک پمپ سانتریفیوژ با موتور 0.5% اسب بخار و حداکثر هد آب 3% متر استفاده شد. پس از تهیه مخزن و نصب پمپ

حجم محدود جهت گسسته‌سازی معادلات به کار می‌رود. تحلیل مبتنی بر فشار و با استفاده از الگوریتم سیمپل انجام می‌شود. گسسته‌سازی بر اساس روش بالادست مرتبه دوم صورت گرفته و تحلیل پایا است. ملاک همگرایی، کاهش باقیمانده‌ها در حل معادلات و همچنین ثابت شدن مقدار نیروی وارد بر وسیله است. برای انجام حل عددی از نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت استفاده می‌شود. به علت تقارن موجود در فیزیک وسیله و همچنین جهت ساده‌سازی و کاهش حجم محاسباتی، تحلیل به صورت تقارن محوری انجام می‌شود.

شبکه تولیدشده به علت متقارن- محوری بودن تحلیل، به صورت دوبعدی تولید می‌شود. شبکه از نوع هیبرید است؛ به طوری که در قسمت لایه مرزی با ایجاد شبکه سازمان‌یافته، حداکثر تعامد ممکن در شبکه ایجاد شده است و سعی شده تا شبکه با دیوار مجاور نیز متعامد باشد. با دور شدن از مرزهای جامد، گرادیان‌های سرعت کاهش می‌یابند و می‌توان از شبکه درشت‌تری استفاده کرد. در این نواحی از شبکه بدون سازمان استفاده شده است. این روش علاوه بر کاهش حجم کلی شبکه باعث ارتقای کیفیت از لحاظ پیچش (Skewness) و نسبت منطری سلول‌ها می‌شود. همچنین نرخ رشد اندازه شبکه با فاصله گرفتن از دیوارهای جامد حداکثر ۱/۲ است و اندازه بزرگترین سلول‌ها در منطقه دور دست به ۵ سانتی‌متر محدود شده است. شبکه با استفاده از نرم‌افزار انسیس مشینگ تولید می‌شود.

خطاهای عددی از نگرانی‌های همیشگی موجود در استفاده روش‌های عددی است. خطاها معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: خطای گردکردن، خطای تکرار و خطای ناشی از عدم استقلال شبکه [43]. با استفاده از متغیرهای با دقت مضاعف می‌توان خطای گردکردن را تا دقت دستگاه محاسبه‌گر کاهش داد. به لحاظ نظری، خطای تکرار نیز می‌تواند تا دقت دستگاه کاهش داده شود ولی معمولاً در مسائل پیچیده عملی نبوده و لزومی نیز بر این کار نیست [44]. کاهش تا سه مرتبه بزرگی در باقیمانده‌ها می‌تواند دقت لازم را برای کاهش مناسب خطای تکرار به دنبال داشته باشد. در صورتی که خطای تکرار دو تا سه مرتبه بزرگی نسبت به خطای گسسته‌سازی کوچک‌تر باشد، قابل قبول است [45]. خطای گسسته‌سازی یا خطای ناشی از عدم استقلال شبکه در بخش بعد بررسی می‌شود.

۴-۳- مطالعه شبکه

به منظور مطالعه شبکه از سه شبکه مختلف درشت، متوسط و ریز استفاده شد که در هر مرحله ریز شدن تراکم شبکه در مقطع تقارن محوری دو برابر شده است. از یک شبکه اضافی نیز با تراکم چهار برابر نسبت به شبکه ریز استفاده شد که به عنوان شبکه بسیار ریز معرفی می‌شود. تراکم در هر راستا بر اساس پیشنهاد سنج [46] به صورت سیستماتیک ریز شده است. از تحلیل شبکه بسیار ریز، به عنوان ملاک سنجش خطای دیگر شبکه‌ها و دقیق‌ترین تخمین از حل عددی استفاده می‌شود. همچنین از نتایج تجربی با صرف نظر

۲-۳- معادلات حاکم بر مساله

به دلیل اینکه سیال، آب است از معادلات ناویر- استوکس برای جریان تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود. جریان سیال، سه‌بعدی در نظر گرفته شده و به دلیل سرعت بالای جت تزریق‌شده، جریان کاملاً آشفته است. از این رو معادلات حاکم بر مساله شامل معادله پیوستگی، اندازه حرکت در سه جهت اصلی و معادلات اضافه جهت مدل‌سازی آشفتگی است.

مدل توربولانسی استفاده‌شده، مدل اسپالارت آلماراس است. اگرچه این مدل بیشتر در جریان‌های تراکم‌پذیر و در مسائل هوافضا به کار می‌رود، ولی ویژگی‌هایی دارد که استفاده از آن را در مورد سیستم تقویت‌کننده جریان آب مناسب می‌سازد از جمله اینکه:

- در مورد مسائل لایه مرزی در حضور گرادیان فشار معکوس نتایج خوبی نشان می‌دهد؛

- برای جریان‌ات داخلی یا محصورشده توسط دیوارها طرح شده است؛
- فرضیه بوزینسک در مواردی که ویسکوزیته توربولانسی ایزوتروپیک است به کار می‌رود؛ این فرض در مورد بسیاری از مسائل دارای جریان‌ات برشی که عمدتاً شامل یک تنش برشی توربولانسی غالب هستند مانند لایه مرزی، لایه اختلاط و جت‌ها که در کارکرد این وسیله یافت می‌شوند به خوبی عمل می‌کند [41]؛

- مقایسه نتایج عددی و تجربی در تحقیق حاضر نشان داد که این مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی جریان در سامانه تقویت‌کننده مناسب است. این مدل همچنین وقتی با تابع دیوار به کار رود، نسبت به مقدار y^+ در اولین ردیف سلول‌های محاسباتی مجاور دیوار حساس نیست [41].

معادلات حاکم با فرض تنش‌های متوسط رینولدز برای مدل‌سازی توربولانس به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} \right) - \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

با استفاده از فرضیه بوزینسک تنش‌های رینولدز به صورت معادله ۳ بازنویسی می‌شوند. معادله انتقال جهت محاسبه ویسکوزیته توربولانسی توسط اسپالارت و آلماراس [42] به صورت معادله ۴ است.

$$\rho \frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \frac{\partial \mu_t u_i}{\partial x_i} = G_\mu + \frac{1}{\sigma_{\mu_t}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \mu_t}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{b2}}{\rho} \left(\frac{\partial \mu_t}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\mu \quad (4)$$

در رابطه ۴، عبارت G_μ تولید و Y_μ انهدام ویسکوزیته توربولانسی را در مجاورت دیوار بر اثر میرایی ناشی از لزجت نشان می‌دهند. C_{b2} و σ_{μ_t} ضرایب ثابت هستند. μ نشان‌دهنده لزجت مولکولی و μ_t لزجت توربولانسی را نشان می‌دهد. جزییات توابع و ثوابت به کاررفته در مراجع آورده شده‌اند [41، 42].

۳-۳- مدل‌سازی عددی سیستم تقویت‌کننده جریان آب

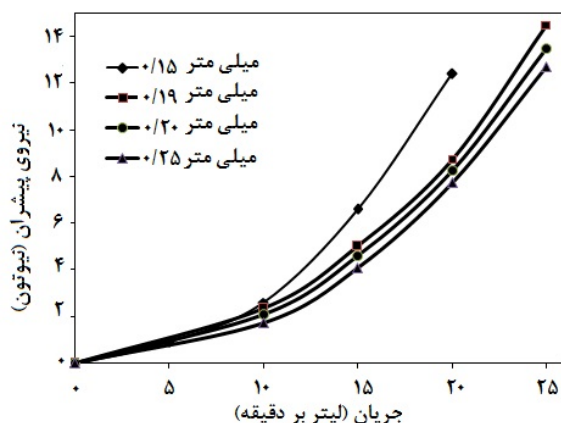
با استفاده از حل عددی روی شبکه محاسباتی، معادلات حاکم به صورت گسسته‌سازی شده و کوپل با یکدیگر حل می‌شوند. روش

به لحاظ مهندسی، مقدار خطای زیر ۱۰٪ برای شبیه‌سازی موجه محسوب می‌شود و شبکه‌ای که با کمترین هزینه، دقت مذکور را تامین کند مناسب تشخیص داده می‌شود. با مقایسه خطاهای نسبی (نسبت به ریزترین شبکه یا نتیجه تجربی)، دیده می‌شود که شبکه با عنوان ریز جهت شبیه‌سازی کارکرد وسیله گزینه مناسب است.

۴- نتایج تحلیل عددی

تحلیل عددی نتایج نیروی پیشران در حالت ساکن به ازای اندازه شکاف ۰/۱۵، ۰/۱۹، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ میلی‌متر و در دبی‌های مختلف به دست آمد. نتایج مربوط به تحلیل در نمودار ۲، منحنی نیروی پیشران نسبت به دبی و اندازه شکاف نشان داده شده است. با استفاده از این نتایج داده‌های تحلیل عددی در این نمودار روشن می‌شود که هر چه دبی سیستم بالاتر رود، نیروی پیشران ایجاد شده نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین در صورتی که دبی لازم در فشار مناسب آن در نمودارها تامین شود، می‌توان به نیروهای پیشران بزرگ‌تری دست یافت. در شکل ۶، کانتورهای سرعت محوری و همچنین اندازه سرعت جریان آب حین خروج از شکاف نشان داده شده است. در شکل ۶ می‌توان انحراف جریان خروجی از شکاف، روی سطوح منحنی و دنبال کردن پروفیل گلوگاه را مشاهده کرد. در شکل ۷، کانتور فشار نسبی داخل و بیرون گلوگاه تقویت‌کننده در تحلیل عددی نشان داده شده است.

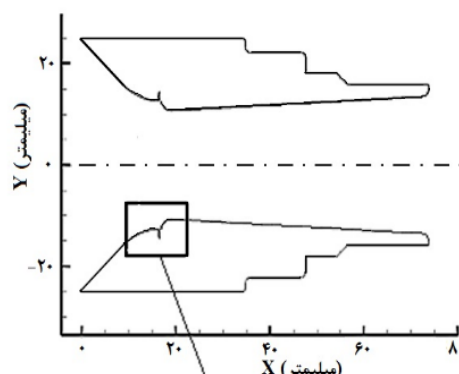
نکته‌ای که در این کانتور مشاهده می‌شود، این است که کمترین فشار نسبی جریان ۱۰۰۰- پاسکال و در حد اتمسفر بوده و مشخص است که این میزان فشار، بسیار بالاتر از فشار لازم جهت تبخیر آب در دمای محیط است و جهت بروز کاویتاسیون کافی نیست. پس با توجه به این مساله، می‌توان ادعا کرد که در این سیستم، تولید نیروی پیشران بدون ایجاد کاویتاسیون صورت خواهد گرفت که از مزایای این سیستم به‌شمار می‌آید. این مساله در آزمون تجربی که در ادامه خواهد آمد نیز با چشم قابل مشاهده است که هیچ گونه حبابی حین کارکرد سیستم تولید نمی‌شود. در ادامه، مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمون تجربی انجام شده است.



نمودار ۲) نتایج تحلیل عددی نیروی پیشران بر حسب دبی در آزمون بولارد در اندازه شکاف‌های مختلف

از خطاهای ممکن در آزمون تجربی به‌عنوان جواب درست جهت ملاک سنجش خطا استفاده می‌شود.

مشخصات تحلیل لازم برای مطالعه شبکه منطبق با یکی از حالات آزمون تجربی انتخاب می‌شود. در این حالت دبی حجمی سیال ۱۰ لیتر بر دقیقه است و همچنین عرض دهانه شکاف حلقوی جت برابر ۲mm قرار داده می‌شود. آب در اطراف وسیله ساکن (تست بولارد) و مرزهای دور دست به استثناء یکی از آنها دیوار فرض شده‌اند. مرز دیگر، به‌منظور تخلیه آب وارد شده توسط جت تزریق شده، به‌عنوان مرز خروجی فشار ثابت انتخاب شده است. ورود سیال در تیوب حلقوی قبل از جت به‌عنوان مرز نرخ جریان جرم انتخاب شده و معادل دبی جرمی آب وارد شده به وسیله، روی آن مرز قرار می‌گیرد. تیوب داخلی و مقطع وسیله در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده از شبکه‌های مختلف به‌همراه مقدار خطای نسبی آنها در جدول ۱ آورده شده است.

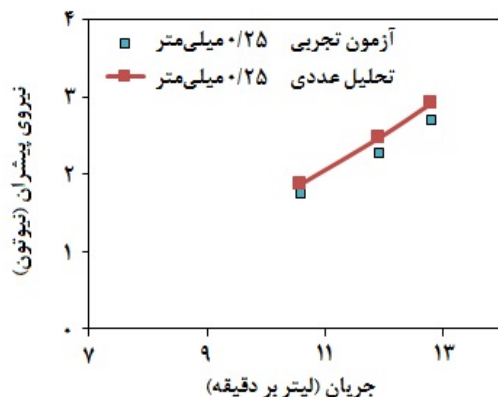
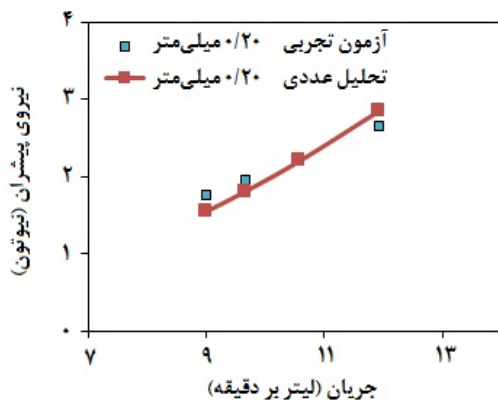
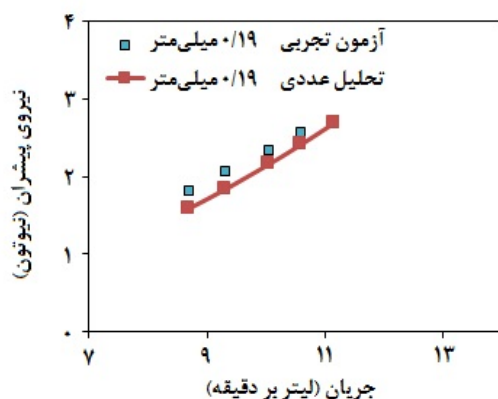
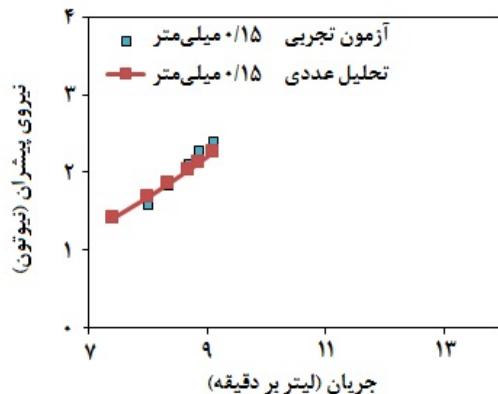


شکل ۵) هندسه متقارن محوری سیستم تقویت جریان سیال و نام‌گذاری قسمت‌های مختلف

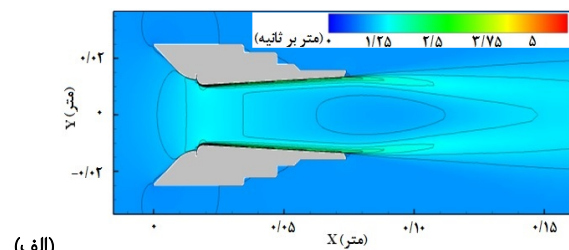
جدول ۱) نتایج مطالعه شبکه سیستم تقویت جریان آب در آزمون بولارد و خطاهای نسبی تحلیل روی شبکه‌های مختلف

شبکه	نیروی پیشران (N)	حجم شبکه	درصد خطای نسبی (ملاک آزمون تجربی)	درصد خطای نسبی (ملاک شبکه بسیار ریز)
درشت	۱/۵۸	۶۸۷۸	۲۴/۵۳	۲۱/۷۴
متوسط	۱/۷۳	۱۱۵۹۷	۱۷/۴۳	۱۲/۰۲
ریز	۱/۸۹	۲۱۱۴۲	۹/۷۲	۳/۳۶
بسیار ریز	۱/۹۶	۷۹۸۲۰	۶/۵۸۱	---
نتیجه تجربی	۲/۱	---	---	---

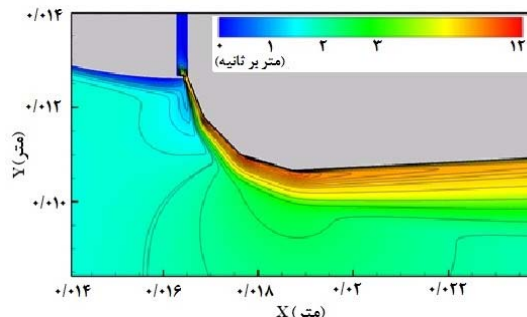
بررسی آزمایشگاهی و عددی استفاده از پدیده اثر کواندا در ایجاد نیروی پیشران زیرسطحی ۷۸۳
 اطمینان از تحلیل عددی، برای نقاطی که آزمون تجربی قادر به پاسخ‌گویی نیست، از تحلیل عددی استفاده شد.



نمودار (۳) نتایج تحلیل عددی نیروی پیشران در حالت سکون بر حسب دبی با اندازه شکاف‌های مختلف

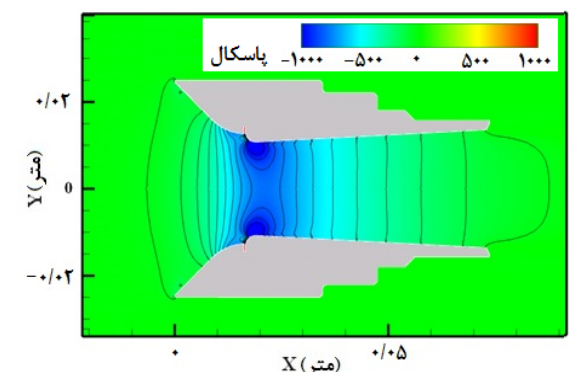


(الف)



(ب)

شکل (۶) کانتور سرعت محوری جریان آب در داخل و خارج تقویت‌کننده در اندازه شکاف ۰/۱۹ میلی‌متر و دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه؛ (الف) کانتور سرعت محوری و (ب) کانتور اندازه سرعت حین خروج آب از شکاف



شکل (۷) کانتور فشار نسبی جریان آب در داخل و خارج تقویت‌کننده در اندازه شکاف ۰/۱۹ میلی‌متر و دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه

۱-۴- مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمون تجربی

جهت انجام آزمایش ابتدا باید شکاف قطعه تقویت‌کننده جریان آب تنظیم شود. با استفاده از یک میکرومتر میزان اندازه شکاف تنظیم شده و اندازه‌های شکاف ۰/۱۵، ۰/۱۹، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ میلی‌متر برای ثبت نتایج انتخاب شد. انتخاب این اعداد، به واسطه تولید نیروی پیشران قابل ملاحظه در این گستره از اندازه شکاف بود که در حین آزمایش مشاهده شد.

در نمودار ۳، نتایج تجربی با نتایج تحلیل عددی و اندازه شکاف‌های متناظر با یکدیگر، مقایسه شده است. حداکثر خطای بین نتایج عددی نسبت به تجربی مقدار ۷٪ بوده است؛ بنابراین بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تحلیل عددی تطابق مناسبی برقرار است. مقایسه نمودارهای ۲ و ۳، نشان می‌دهد که آزمون تجربی در دامنه کوچک‌تری نسبت به تحلیل عددی قرار دارد؛ چراکه از نتایج آزمون تجربی برای صحت‌سنجی نتایج عددی استفاده شده و پس از حصول

$$\eta_p = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi} \quad (7)$$

حاصل می‌شوند که در آن پارامتر J یا نسبت پیشروی از رابطه:

$$J = \frac{v_0}{nD} \quad (8)$$

به‌دست می‌آید.

در این روابط، پارامترهای K_Q ، K_T و η_p از جداول مربوط به پروانه‌های چرخشی، از روی نمودارهای هر سری از پروانه استخراج می‌شوند که در اینجا از سری رایج پروانه یعنی سری B استفاده شده است.

پروانه با ابعادی مشابه ابعاد سیستم تقویت‌کننده آب با مشخصات قطر ۵ میلی‌متر، نسبت سطح گسترش‌یافته برابر $p/D = 0.6$ ، و تعداد پره ۵ عدد (که متوسط بین تعداد پره در این ابعاد است)، در نظر گرفته شده است. نمودار K_Q و K_T برای پروانه مورد نظر در نمودار ۵ دیده می‌شود که از مرجع [47] اخذ شده است. برای مقایسه در سرعت غیرصفر، سرعت (v_0) برابر $2/5$ متر بر ثانیه که در گستره سرعت روبات‌های زیرسطحی است انتخاب شد.

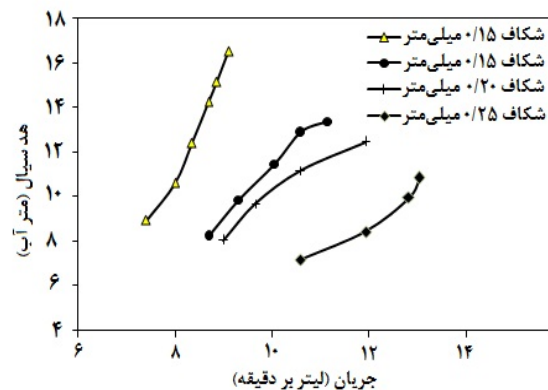
با توجه به نمودار ۵، مقدار J برابر 0.75 انتخاب می‌شود که بازده مناسبی در پروانه انتخاب‌شده دارد و جهت حصول به سرعت مورد نظر، سرعت زاویه‌ای دوران پروانه n برابر $66/7$ دور بر ثانیه به‌دست خواهد آمد. طبق نمودار پروانه سری B در نمودار ۵، مقدار K_T برابر 0.1682 استخراج می‌شود و با استفاده از این ضریب، مقدار نیروی پیشران برابر $4/67$ نیوتون به‌دست می‌آید. بازدهی پروانه انتخاب‌شده، مطابق نمودار ۵ به میزان 65% است و میزان توان داده شده به پروانه توسط شافت با استفاده از رابطه ۷ و ضرب آن در سرعت زاویه‌ای، برابر $17/41$ وات به‌دست خواهد آمد.

جهت انجام تحلیل عددی سیستم تقویت‌کننده، اندازه شکاف 0.25 میلی‌متر و دبی 25 لیتر بر دقیقه، انتخاب شد و در ادامه دیده می‌شود که توان مصرفی آن قابل مقایسه با پروانه مورد نظر است. پس از انجام تحلیل عددی، نیروی پیشران $4/99$ نیوتون در سرعت $2/5$ متر بر ثانیه به‌دست آمد. این مقدار با مقدار $4/67$ نیوتون در پروانه (با ابعاد مشابه در سری B) قابل مقایسه بوده و نشان‌دهنده این است که این سیستم می‌تواند در ابعاد مشابه با پروانه‌های چرخشی رایج، نیروی پیشران قابل قبولی برای کاربردهای زیرسطحی داشته باشد.

در تحلیل عددی تقویت‌کننده با استفاده از فشار جریان قبل از خروج از شکاف تقویت‌کننده که برابر 59000 پاسکال حاصل شده و دبی جریان 25 لیتر بر دقیقه، می‌توان میزان توان مصرف‌شده را برابر با 23 وات به‌دست آورد. توان ایجادشده توسط سیستم با نیروی پیشران $4/99$ نیوتون استخراج‌شده در سرعت $2/5$ متر بر ثانیه برابر $12/47$ وات به‌دست می‌آید و بنابراین بازدهی تقویت‌کننده برابر 54% خواهد بود. البته در این محاسبه، میزان بازدهی قسمت تولید آب تحت فشار یا همان پمپ آب لحاظ نشده است و با احتساب آن بازدهی حدود 30% را می‌توان تخمین زد که برای نمونه اول تقویت‌کننده آب می‌تواند رضایت‌بخش باشد.

از آنجا که در سیستم حاضر، تولید سیال تحت فشار، با استفاده از یک پمپ سانتریفوژ صورت گرفته است، اندازه‌گیری میزان توان مصرف‌شده واقعی به‌صورت تجربی و بررسی نسبت آن با میزان نیروی پیشران تولیدشده مقدور نیست. چراکه در مسیر اصلی انتقال سیال، تجهیزاتی مانند فشارسنج‌ها و شیر کنترل جریان قرار گرفته‌اند که در بررسی توان مصرفی خطای فراوانی تحمیل می‌کنند. در نمودار ۴، فشار خط جریان آب قبل از ورود به تقویت‌کننده نسبت به دبی و میزان شکاف‌های مختلف در آزمون آب ساکن دیده می‌شود.

جهت انجام مقایسه بین میزان نیروی پیشران و بازدهی تقویت‌کننده با پروانه‌های چرخشی، از تحلیل عددی سیستم تقویت‌کننده استفاده شده است. در تحقیقات آینده با استفاده از پمپ‌های جابجایی مثبت، به‌صورت تجربی به بررسی جایگاه سیستم حاضر از نظر بازدهی و نیروی پیشران در میان سایر سیستم‌های رانش پرداخته شده است.



نمودار ۴) میزان فشار خط لوله قبل از تقویت‌کننده بر حسب دبی در اندازه شکاف‌های مختلف در آزمون تجربی آب ساکن

۵- مقایسه سیستم تقویت‌کننده آب با سیستم‌های رانش پروانه‌ای

ابتدا، لازم به ذکر است که مقایسه نیروی پیشران سیستم‌های رانش مختلف در سرعت صفر، نتیجه مناسبی نخواهد داد. در این بخش برای برآورد کردن موقعیت سیستم تقویت‌کننده آب در میان سیستم‌های رایج پروانه‌ای، مقایسه‌ای در سرعت غیرصفر انجام گرفته است. در این بررسی، نیروی پیشران تولیدی و میزان بازدهی، برای هر دو سیستم رانش به‌دست آمده و مقایسه می‌شود. در پروانه‌های چرخشی، میزان نیروی پیشران و بازدهی سیستم به پارامترهای اندازه قطر پروانه (D)، گام پروانه (p)، تعداد پره‌ها (N_B)، نسبت سطح گسترش‌یافته پروانه (A_E/A_D)، سرعت چرخش پروانه (n) و سرعت حرکت وسیله (v_0) نسبت به آب بستگی دارد. با توجه به روابط عملکرد پروانه [1] مقدار نیروی پیشران پروانه با رابطه:

$$T = K_T \rho D^4 n^2 \quad (9)$$

و مقدار گشتاور منتقل‌شده به شافت پروانه از رابطه:

$$Q = K_Q \rho D^5 n^2 \quad (10)$$

و بازدهی از رابطه:

تشکر و قدردانی: مراتب قدردانی خود را نسبت به زحمات جناب آقای میثم ملحان که به عنوان تکنسین آزمایشگاه در انجام آزمایش‌های تجربی همکاری کردند اعلام می‌داریم.

تأییدیه اخلاقی: در جریان اجرای این تحقیق و تهیه مقاله، کلیه قوانین کشوری و اصول اخلاق حرفه‌ای مرتبط با موضوع تحقیق از جمله رعایت حقوق آزمودنی‌ها، سازمان‌ها و نهادها و نیز مولفین و مصنفین رعایت شده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافع در ارتباط با چاپ این مقاله ندارند.

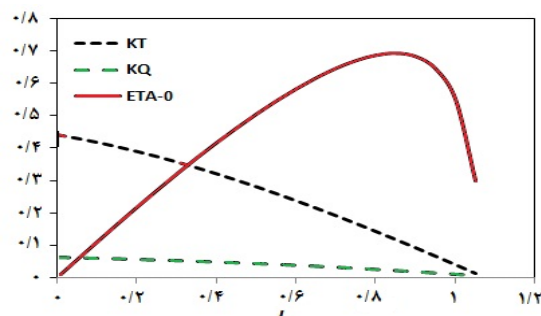
سهم نویسندگان: محمد گندم‌کار (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۶۰٪)، جواد امینی فروشانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)

منابع مالی: این مقاله بر اساس حمایت‌های صورت‌گرفته ذیل عنوان پژوهشی پیشران‌های نوین در مجتمع مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری دریایی صورت گرفته است.

منابع

- 1- Carlton JS. Marine propellers and propulsion. 3rd Edition. Oxford: Butterworth- Heinemann; 2012.
- 2- Henri C, inventor. Device for deflecting a stream of elastic fluid projected into an elastic fluid [Patent]. United States patent US 2052869. 1936 Sep 1.
- 3- Seo DW, Oh J, Jang J. Performance analysis of a horn-type rudder implementing the Coanda effect. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017;9(2):177-184.
- 4- Mazumdar A, Asada HH. Pulse width modulation of water jet propulsion systems using high-speed coanda-effect valves. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2013;135(5):051019.
- 5- Ahmed RI, Abu Talib AA, Mohd Rafie AM, Djojodihardjo H. Aerodynamics and flight mechanics of MAV based on Coandă effect. Aerospace Science and Technology. 2017;62:136-147.
- 6- Suzuki A, Kondo H, Osakabe M. Water jet propulsion mechanism for low speed AUV. International Symposium on Marine Engineering (ISME), 2017 October 15-19, Tokyo, Japan. Unknown Publisher; 2017.
- 7- Schroijen M, Van Tooren M. Mav propulsion system using the coanda effect. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009 August 2-5, Denver, Colorado. Reston: AIAA; 2009.
- 8- Geropp D, Odenthal HJ. Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect. Experiments in Fluids. 2000;28(1):74-85.
- 9- Trancossi M, Stewart J, Maharshi S, Angeli D. Mathematical model of a constructal Coanda effect nozzle. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2016;9(6):2813-2822.
- 10- Ahmed RI, Djojodihardjo H, Rahim bin Abu Talib ABD, Abd Hamid MF. Application of Coandă jet for generating lift of micro air vehicles-Preliminary design considerations. Applied Mechanics and Materials. 2014;629:139-144.
- 11- Lubert C. On some recent applications of the coanda effect. International Journal of Acoustics and Vibration. 2011;16(3):144-153.

با تغییر پروفیل‌های هندسی تقویت‌کننده و انتخاب پمپ مناسب، جهت افزایش بازدهی سیستم، انتظار می‌رود که بازدهی افزایش پیدا کند؛ بنابراین در آینده تحقیقات کامل‌تری در مورد آن صورت خواهد گرفت. به علاوه در مورد نوین هیدروپدینامیکی این سیستم نیز تحقیقات ادامه خواهد یافت و عملکرد تقویت‌کننده سیال جهت ایجاد نیروی پیشران زیرسطحی به‌طور مفصل‌تری بررسی خواهد شد.



نمودار ۵) نمودار K_T ، K_Q و بازدهی پروانه سری B بر اساس پارامتر J (تعداد پره عدد، A_E/A_0 برابر ۰/۶ و p/D برابر [47])

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به معرفی سیستم تقویت‌کننده جریان آب پرداخته شد که می‌تواند به عنوان تولیدکننده نیروی پیشران در زیر آب مورد استفاده قرار گیرد. سپس با انجام تحلیل عددی اندازه‌گیری نیروی پیشران در آب ساکن یا آزمون بولارد به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و مقایسه آن با نتایج تجربی، برآوردی از کارایی این سیستم صورت گرفت. سپس بین این سیستم و پروانه‌های چرخشی سری B مقایسه انجام شد.

نتایج مهم حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- مشاهده شد که در شکاف دهانه جت ثابت، با افزایش دبی جریان، مقدار نیروی پیشران افزایش می‌یابد.
- در دبی ثابت با افزایش اندازه شکاف دهانه جت نیروی پیشران کاهش می‌یابد.
- با افزایش سرعت آزاد جریان نسبت به وسیله، مقدار نیروی پیشران تولیدشده کاهش می‌یابد.
- مشاهده شد که نیروی پیشران تولیدشده در این سیستم می‌تواند قابل مقایسه با پروانه‌های چرخشی هم‌اندازه با خود باشد.
- بازدهی این سیستم در حال حاضر کمتر از پروانه‌های چرخشی به‌دست آمد که جهت افزایش آن می‌توان از بهبود پروفیل هندسی تقویت‌کننده و انتخاب پمپ مناسب استفاده کرد.
- جهت مدل‌سازی عددی وسیله، از مدل توربولانسی اسپالارت-آلماراس استفاده شد و تشخیص داده شد که استفاده از این مدل نسبت به دیگر مدل‌های توربولانسی برای شبیه‌سازی وسیله مناسب‌تر است.

با توجه به نتایج فوق، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات کامل‌تری روی بازده وسیله صورت گیرد. همچنین استخراج منحنی عملکرد وسیله و میزان نوین تولیدشده می‌تواند از دیگر زمینه‌های تحقیق روی این موضوع باشد.

investigation. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM). 2014;14(1):627-628.

31- Marques P. Emerging technologies in UAV aerodynamics. International Journal of Unmanned Systems Engineering. 2013;1(1):3-4.

32- De Lima Lemos R, Vieira RS, Isoldi LA, Oliveira Rocha LA, Dos Santos Pereira M, Dos Santos ED. Numerical analysis of a turbulent flow with Coanda effect in hydrodynamics profiles. FME Transactions. 2017;45:412-420.

33- Simpson RG, Ahmed NA, Archer RD. Improvement of a wing's aerodynamic efficiency using Coanda tip jets. Journal of Aircraft. 2000;37(1):183-184.

34- Kumagai I, Takahashi Y, Murai Y. Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships. Ocean Engineering. 2015;95:183-194.

35- Li G, Hu Y, Jin Y, Setoguchi T, Kim HD. Influence of Coanda surface curvature on performance of bladeless fan. Journal of Thermal Science. 2014;23(5):422-431.

36- Jafari M, Afshin H, Farhanieh B, Bozorgasareh H. Numerical aerodynamic evaluation and noise investigation of a bladeless fan. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2015;8(1):133-142.

37- Aynsley R. Fan size and energy efficiency. International Journal of Ventilation. 2002;1(1):33-38.

38- Van Hooff T, Blocken B, Defraeye T, Carmeliet JV, Van Heijst GJ. PIV measurements and analysis of transitional flow in a reduced-scale model: Ventilation by a free plane jet with Coanda effect. Building and Environment. 2012;56:301-313.

39- Robichaud G, Dixon RB, Potturi AS, Cassidy D, Edwards JR, Sohn A, et al. Design, modeling, fabrication, and evaluation of the air amplifier for improved detection of biomolecules by electrospray ionization mass spectrometry. International Journal of Mass Spectrometry. 2011;300(2-3):99-107.

40- nex-flow.com [Internet]. Richmond Hill: Nex Flow; 2019 [Unknown cited]. Available from: www.nex-flow.com.

41- ANSYS. ANSYS fluent theory guide [Internet]. Canonsburg: ANSYS; 2009 [Unknown cited]. Available from: <https://www.yumpu.com/en/document/view/5683311/ansys-fluent-120-sharcnet>.

42- Spalart PR, Allmaras SR. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992 January 6-9, Reno, USA. Reston: AIAA; 1992.

43- Roache PJ. Perspective: Validation—What does it mean?. Journal of Fluids Engineering. 2009;131(3):034503.

44- Eça L, Hoekstra M. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. Journal of Computational Physics. 2014;262:104-130.

45- Eça L, Hoekstra M. Evaluation of numerical error estimation based on grid refinement studies with the method of the manufactured solutions. Computers and Fluids. 2009;38(8):1580-1591.

46- Cengel YA, Cimbala JM. Fluid mechanics, fundamentals and applications. New York: McGraw-Hill Higher Education; 2006.

47- Barnitsas MM, Ray D, Kinley P. K_T, K_Q and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers. Ann Arbor: University of Michigan; 1981.

12- Howe MS. Noise generated by a Coanda wall jet circulation control device. Journal of Sound and Vibration. 2002;249(4):679-700.

13- Li P, Halliwell NA. Industrial jet noise: Coanda nozzles. Journal of Sound and Vibration. 1985;99(4):475-491.

14- Carpenter PW, Smith C. The aeroacoustics and aerodynamics of high-speed Coanda devices, part 2: Effects of modifications for flow control and noise reduction. Journal of Sound and Vibration. 1997;208(5):803-822.

15- Lalli F, Bruschi A, Lama R, Liberti L, Mandrone S, Pesarino V. Coanda effect in coastal flows. Coastal Engineering. 2010;57(3):278-289.

16- Allery C, Guérin S, Hamdouni A, Sakout A. Experimental and numerical POD study of the Coanda effect used to reduce self-sustained tones. Mechanics Research Communications. 2004;31(1):105-120.

17- Gregory-Smith DG, Gilchrist AR. The compressible Coanda wall jet—an experimental study of jet structure and breakaway. International Journal of Heat and Fluid Flow. 1987;8(2):156-164.

18- Marton J. Wall roughness effect on Coanda fluid amplifiers. IFAC Proceedings Volumes. 1975;8(1):487-492.

19- Oshima Y, Kinoshita O. An experimental investigation of the water jet in a Coanda effect fluidic device. IFAC Proceedings Volumes. 1975;8(1):493-502.

20- Jahanmiri M, Najafi M. Simulation of an unmanned aerial vehicle under the combined coanda and magnus effect. Conference on Modern Achievements on Aerospace and Related Science, 2015 September 11, Tehran, Iran. Tehran: Civilica; 2015. [Persian]

21- Najafi M, Jahanmiri M. An innovative technique to increase lift of a Coanda UAV. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2017;14(2):27-35.

22- Gandomkar M, Amini Foroushani J. The investigation of using water instead of air as fluid in air amplifier system and its performance evaluation for underwater propulsion. 18th Conference on Marine Industries, 2016 October 18, Kish Island, Iran. Tehran: Civilica; 2016. [Persian]

23- Wille R, Fernholz H. Report on the first European Mechanics Colloquium, on the Coanda effect. Journal of Fluid Mechanics. 1965;23(4):801-819.

24- Meadows FJ, Desmond ET, inventors; AVRO Aircraft Ltd, assignee. Disc-type aircraft with peripheral jet control [Patent]. United States patent US 3022963. 1962 Feb 27.

25- Boscoianu M, Cîrciu I. An analysis of the efficiency of the functional matching between a flying wing MAV airframe and different types of micro propellers. Incas Bulletin. 2011;3(1):23-29.

26- Dragan V. A parametric study of a thick, incompressible flow over a curved surface. Incas Bulletin. 2011;3(4):145-152.

27- Dragan V. A new mathematical model for high thickness Coanda effect wall jets. Review of the Air Force Academy. 2013;(1):23-28.

28- Simpson RG, Ahmed NA, Archer RD. Improvement of a wing's aerodynamic efficiency using Coanda tip jets. Journal of Aircraft. 2000;37(1):183-184.

29- Florescu D, Florescu I, Nedelcut F, Nedelcu I. Fuselage airstream simulation for a Coandă UAV. Review of the Air Force Academy. 2010;17(2):83-88.

30- Raşuo B, Mirkov N. On the possibility of using Coanda effect for unmanned aerial vehicles—a numerical