



Numerical Investigation of Cavitation Effect on the Performance of Waterjet Propulsion System by Computational Fluid Dynamics

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Afshari B.¹ MSc,
Rostami Varnousfaaderani M.*¹
PhD

How to cite this article

Afshari B, Rostami Varnousfaaderani M. Numerical Investigation of Cavitation Effect on the Performance of Waterjet Propulsion System by Computational Fluid Dynamics. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(7):1779-1788.

ABSTRACT

The numerical simulation of cavitation phenomenon in waterjet propulsion system, due to destructive effects and complicated and two-phase nature, is one of the greatest challenges in engineering and numerical modeling. Due to needing of very much cost for experimental studying this phenomenon in the cavitation tunnel, in this paper, the happening of cavitation in axial flow waterjet was simulated by computational fluid dynamics. The head, torque, and thrust due to cavitation and ignoring that were calculated in 3 flow rate values. The result showed good agreement with experimental data. One of the new studies in this paper is the investigation of the pattern of cavitation bulb forming on the tip and suction side of the rotor's blade. Numerical simulation was performed, using the rotor and stator and with rotor only. Numerical solution is performed, using a the structured grid, the rotating reference frame, the periodic domain, and SST turbulence model in the steady form.

Keywords Cavitation; Hydrodynamic Performance; Waterjet; CFD; Two-Phase Flow; Turbulence

¹Mechanics Faculty, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanics Faculty, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin-Shahr, Isfahan, Iran
Phone: +98 (31) 45914446
Fax: +98 (31) 45914126
rostamivf@aut.ac.ir

Article History

Received: September 17, 2018
Accepted: January 19, 2019
ePublished: July 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Marine propellers and propulsion [2] Design of the ONR AxWJ-2 Axial flow Water Jet pump [3] Summary of two independent performance measurements of the ONR Axial Waterjet 2 (AxWJ-2) [4] Performance evaluation of the ONR Axial Waterjet 2 (AxWJ-2) [5] Toward predicting performance of an Axial flow waterjet including the effects of cavitation and thrust breakdown [6] Modeling of cavitating flow through waterjet propulsors [7] Numerical simulation on the cavitation of waterjet propulsion pump [8] CFD prediction and simulation of a pumpjet propulsor [9] Net and gross thrust in waterjet propulsion [10] Design method of water jet pump towards high cavitation performances [11] OpenFOAM investigations of cavitation in a flushed water-jet inlet [12] Thrust characteristics and nozzle role of water jet propulsion [13] Numerical hydraulic efficiency analysis of waterjet propulsion [14] Nozzle optimization for water jet propulsion with a positive displacement pump [15] Scaling and numerical analysis of nonuniform waterjet pump inflows

بررسی عددی تاثیر کاویتاسیون بر عملکرد سیستم رانش و اترجت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

بهنام افشاری MSc

دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

محمود رستمی ورنوسفادری * PhD

دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده

مدل سازی پدیده کاویتاسیون در سیستم رانش و اترجت به دلیل اثرات مخرب و ماهیت دو فازی و پیچیده آن یکی از بزرگترین چالش های مهندسی و مدل سازی عددی است. از آنجایی که مطالعه این پدیده به صورت آزمایشگاهی در تونل کاویتاسیون مستلزم هزینه های فراوان است. بنابراین در این پژوهش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی وقوع کاویتاسیون در یک و اترجت جریان محوری شبیه سازی شد. مقدار هد، گشتاور و رانش بر اثر کاویتاسیون و همچنین بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون در سه مقدار از دبی جریان به دست آمد. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی داشتند. یکی از مطالعات جدید در این پژوهش بررسی الگوی تشکیل حباب های کاویتاسیون در نوک پره روتور و قسمت مکش آن است. مدل سازی عددی یک بار برای روتور و استاتور و یک بار برای روتور بدون در نظر گرفتن استاتور انجام شده است. حل عددی با استفاده از شبکه ساختاریافته، دستگاه مرجع چرخان، دامنه پرئودیک، به صورت پایا و با استفاده از مدل توربولانسی SST انجام شده است.

کلیدواژه ها: کاویتاسیون، عملکرد هیدرودینامیکی، و اترجت، دینامیک سیالات محاسباتی، جریان دو فازی، توربولانس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

* نویسنده مسئول: rostamivf@aut.ac.ir

۱- مقدمه

هنگامی که فشار استاتیک موضعی آب در یک ناحیه کاهش پیدا می کند به طوری که فشار آب کمتر از فشار اشباع در دمای متناظر شود ذرات آب مایع به بخار تبدیل می شوند. این بخارها حباب تشکیل می دهند و هنگامی که به نواحی پرفشار می رسند، نویز و ضربه زیادی تولید می کنند. این پدیده را کاویتاسیون می نامند. کاویتاسیون را عموماً می توان در جریان آب اطراف پره های چرخان، باله ها و گلوگاه یک نازل همگرا، توربو ماشین ها یا حتی بدن انسان مشاهده نمود. تعریف بیان شده از کاویتاسیون سبب شکل گیری مفهومی با عنوان (فشار سرحد) می شود، به طوری که در فشارهای زیر این فشار، نیروی پیوستگی مولکول های مایع کاهش می یابد. تا آنجایی که در نقاط شکل گیری حباب های اولیه بخار آب، این نیرو از بین می رود. فروپاشی حباب های شکل گرفته در کاویتاسیون موجب آسیب دیدن اجزای ماشین هایی می شود که در آن شرایط کار می کنند. امروزه برای بررسی پدیده کاویتاسیون هر دو روش عددی و تجربی مورد استفاده قرار می گیرد. از شبیه سازی عددی برای تعیین موقعیت شکل گیری اولیه کاویتاسیون و خصوصیات کویتی تشکیل شده در ماشین های آبی استفاده می شود. به کمک نتایج حاصله می توان طراحی های مناسبی روی اجزای مختلف ماشین های در کنار موارد ذکر شده انجام داد. پدیده کاویتاسیون عموماً یک پدیده هم زمان با توربولانس است که این امر موجب پیچیده شدن این پدیده می شود. در این میان دینامیک پیچیده سطح مشترک دو فاز بخار و مایع که به اثرات متقابل دو فاز وابسته است نیز مطرح است.

تاریخچه کاویتاسیون به میانه قرن هجده باز می گردد. در قرن ۱۹ نیز رینولدز با یک سری از مقالات به موضوع افزایش سرعت

موتورها در کشتی های بخار مجهز به پروانه اسکرو پرداخت. او در این مقالات در مورد پدیده کاویتاسیون و تاثیرات آن بر عملکرد پروانه ها پرداخت و به این موضوع اشاره کرد که هنگامی که کاویتاسیون در سطح گسترده رخ می دهد سرعت شفت دورانی نسبت به زمانی که شفت در حال معمولی می چرخد افزایش می یابد [1]. پروژه طراحی یک و اترجت قدرتمند در سازمان تحقیقات دریایی آمریکا کلید خورد. این سازمان در اطلاعیه ای درخواست خود را برای طراحی و اترجت به طور گسترده اعلام کرد و رسماً با مرکز جنگ های سطحی نیروی دریایی آمریکا برای طراحی و اترجتی به نام ONR-AxWj-2 قرارداد بست [2]. پس از پایان طراحی و اترجت، به طور هم زمان در دو تونل آزمایشگاهی مرکز جنگ سطحی و مرکز تحقیقات هیدرودینامیکی رولز رویس تست شد. در هر یک از این آزمایشگاه ها ابعاد مختلفی از و اترجت ONR-AxWj-2 مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرکز جنگ سطحی یک و اترجت با ورودی ۳۰۴/۸ میلی متر و در رولز رویس یک و اترجت با ورودی ۲۰۰ میلی متر تست شد. در این آزمایش ها پایگاه داده برای و اترجت جمع آوری شد. که می تواند برای اعتبار سنجی به طور موثر استفاده شود. هدف اصلی از آزمایش های این دو آزمایشگاه به دست آوردن توان عملکرد و پارامترهای مختلف در شرایط کاویتاسیون بود. توان عملکرد در شرایط غیر کاویتاسیونی شامل نرخ جریان، سرعت شافت روتور، گشتاور و هد است. به علاوه مناطق حبابی کاویتاسیون با عکس و فیلم مستند شد [3]. این و اترجت شامل یک روتور و یک استاتور است که روتور ۶ پره و استاتور ۸ پره دارد.

در گزارش دیگری که از سوی چسناکاس [4] منتشر شد، جزئیات تست و اترجت ONR-AXWJ-2 به طور کامل بیان شده است. پارامترهای مورد اندازه گیری شامل قدرت، برآورد سرعت و افت رانش در کاویتاسیون است. آزمایش ها در رنج فشار کل ۲۴۱ تا ۳۴۵ کیلو پاسکال انجام شده است. برای به دست آوردن توان عملکردی سرعت روتور ۱۴۰۰ دور در دقیقه و برای به دست آوردن افت رانش بر اثر کاویتاسیون ۲۰۰۰ دور بر دقیقه لحاظ شده است. الگوی کاویتاسیون نیز در دبی های مختلف روی پره روتور نشان داده شده است. شرودر و همکاران [5] کاویتاسیون و افت رانش را برای این و اترجت با استفاده از نرم افزار غیر تجاری اوپن فوم بررسی کردند. آنها در نتیجه گیری به این نکته اشاره می کنند که انتخاب مدل توربولانس مناسب تاثیر زیادی در حل دارد. در این تحقیق از دو مدل توربولانسی K-ε و K-ω استفاده و نتایج آن با هم مقایسه شد. لیندو و یو و همکاران [6]، کاویتاسیون را برای دو ضریب جریان در و اترجت AxWj-2 بررسی کردند. آنها نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. الگوی کاویتاسیون سطح مکش و نوک تیغه نیز با عکس های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

شیبا و همکاران [7] کاویتاسیون را در سه نقطه عملیاتی در یک سیستم رانش و اترجت بررسی و عملکرد و اترجت را در شرایط کاویتاسیون مشاهده کردند. لو و همکاران [8] یک سیستم رانش پمپ جت را تحلیل عددی کردند آنها در حل خود از مدل توربولانسی SST K-W و مش ساختاریافته استفاده کردند و بازده و ضرایب هیدرودینامیکی را به دست آورده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. اسلام دوست و همکاران [9] پارامترهایی را که در فعل و انفعال بدنه و اترجت نقش اساسی را ایفا می کنند مورد بررسی قرار داده اند. کاتو [10] عوامل مختلف موثر در کاهش راندمان همچون کاویتاسیون را مورد بررسی قرار داده است. گترنجیری و همکاران [11] با استفاده از نرم افزار

نیروهای کوریولیس و نیروهای گریز از مرکز است). γ کسر حجمی آب است که با کسر حجمی بخار به شکل زیر مربوط می‌شود:

$$(۴)$$

$$\gamma + \alpha = 1$$

چگالی ترکیبی ρ و ویسکوزیته دینامیکی جریان آرام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \gamma\rho_L + (1 - \gamma)\rho_V \quad (۵)$$

$$\mu = \gamma\mu_L + (1 - \gamma)\mu_V \quad (۶)$$

\dot{m} نرخ انتقال جرم است که سه صورت مدل می‌شود. مدلی که نرم افزار CFX از آن استفاده می‌کند مدل Zwart است این مدل از ساده سازی مدل رالی پلیست به دست می‌آید (رابطه ۷):

$$(۷)$$

$$\dot{m} = \begin{cases} -F_e \frac{3r_{nuc}(1 - \alpha)\rho_V}{R_B} \sqrt{\frac{2P_V - P}{3\rho_L}} & \text{if } P < P_V \\ F_c \frac{3\alpha\rho_V}{R_B} \sqrt{\frac{2P - P_V}{3\rho_L}} & \text{if } P \geq P_V \end{cases}$$

در معادله بالا P_V فشار بخار است، r_{nuc} مکان هسته کسر حجمی، R_B شعاع سایت هسته است. F_e و F_c دو ضریب تجربی کالیبره شده برای بخارشدن و چگالش است. در سی اف ایکس ضرایب بالا به صورت پیش فرض به صورت زیر است:

$$(۸)$$

$$r_{nuc} = 5 * 10^{-4}, R_B = 2 * 10^{-6}m, F_e = 50, F_c = 0.01$$

۲-۱- مدل توربولانس SST

همان طور که بیان شد کاپیتاسیون همواره با آشفتگی جریان همراه است. برای حل جریان آشفته به مدل توربولانس مناسب نیاز است. مدل توربولانس SST که بر پایه مدل $k-\omega$ است رابطه انتقال تنش برشی توربولانس را نیز در بردارد و تخمین بسیار دقیقی از شروع و میزان جدایش جریان را در گردانهای فشار معکوس انجام می‌دهد. در این مدل، رفتارهای انتقالی مناسب تری توسط یک رابطه محدودکننده ویسکوزیته توربولانس به وجود می‌آید. این رابطه عبارت است از:

$$(۹)$$

$$\vartheta_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 w, SF_2)}$$

α ثابت مدل و F_2 ضریب ترکیب و S نرخ تغییر کرنش است. مدل SST ترکیبی از مدل های $k-\omega$ و $k-\epsilon$ است؛ بنابراین هر دو مزایای هر دو مدل یعنی قدرت بالای همگرایی مدل $k-\epsilon$ و رفتار اتوماتیک دیوار $k-\omega$ را دارد.

۳- مدل سازی هندسی

در این مقاله واترجت 2-ONR AXWJ مورد تحلیل قرار گرفت. قطر روتور برابر با ۳۰۴/۸ میلی متر است. ویژگی منحصر به فرد این واترجت طراحی آن بر با هاب غیرسیلندری است که موجب افزایش فشار در ریشه روتور و در نتیجه به تاخیر افتادن کاپیتاسیون می‌شود. این ویژگی طراحی آن را به مراتب مشکل تر می‌کند (شکل ۱).

غیرتجاری اوپن فوم، کاپیتاسیون را در ورودی یک سیستم رانش واترجت بررسی کردند. نی و همکاران^[12] در پژوهش خود دو نکته را بررسی کردند ابتدا این که چرا تراست محاسبه شده در حالت واقعی با تراست به دست آمده از حل تئوری متفاوت است همچنین نقش نازل را در سیستم رانش واترجت بررسی کردند. کائو و همکاران^[13] با استفاده از حل سی اف دی نشان دادند ۵۰٪ راندمان واترجت بر اثر عوامل مختلف اتلاف می‌شود. یانگ و همکاران^[14] نازل را برای بالابردن راندمان و به تاخیر انداختن کاپیتاسیون بهینه کردند. دویبر و همکاران^[15] اثر جریان غیریکنواخت ورودی به واترجت را بررسی کردند. آنها نشان دادند غیریکنواختی جریان ورودی می‌تواند ایجاد نویز کرده و کاپیتاسیون را بیشتر کند. تحلیل عددی آنها به صورت گذرا صورت گرفته است.

در این مقاله با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب مدل هندسی سه بعدی واترجت با هاب غیراستوانه ای به دست می‌آید. تحلیل عددی این واترجت در نرم افزار سی اف ایکس با در نظر گرفتن پدیده دو فازی کاپیتاسیون و بدون آن در ضرایب جریان مختلف انجام می‌شود و سپس معتبر سازی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی پیشین صورت می‌گیرد. از جمله مطالعات جدید در این پژوهش می‌توان به طراحی واترجت با هاب غیراستوانه ای، شبیه سازی عددی روتور در شرایط وجود و عدم وجود استاتور و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر و حل عددی دقیق تر نسبت به مطالعات پیشین اشاره کرد.

۲- معادلات حاکم

در شبیه سازی کاپیتاسیون معادلات ناویر استوکس در دو فاز بخار و مایع حل می‌شود؛ گسسته سازی معادلات با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌شود که الگوریتم حل شامل سه مرحله است:

- ۱) انتگرال گیری کلی معادلات حاکم بر جریان سیال، روی تمام حجم های کنترل مربوط به میدان حل به دست می‌آید.
 - ۲) گسسته سازی، شامل جایگذاری تقریبها در معادله انتگرالی حاصله که بیانگر فرآیندهای جریان مثل جابه جایی، نفوذ و چشمه ها است. این عمل معادلات انتگرالی را به یک سیستم معادلات جبری تبدیل می‌کند.
 - ۳) حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار
- معادلات ناویر استوکس برای دو فاز بخار و مایع به صورت زیر هستند:

$$(۱)$$

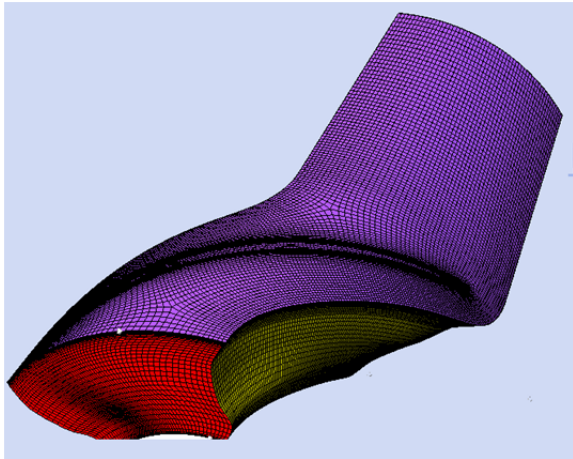
$$\nabla \cdot U = \dot{m} \left(\frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_V} \right)$$

$$(۲)$$

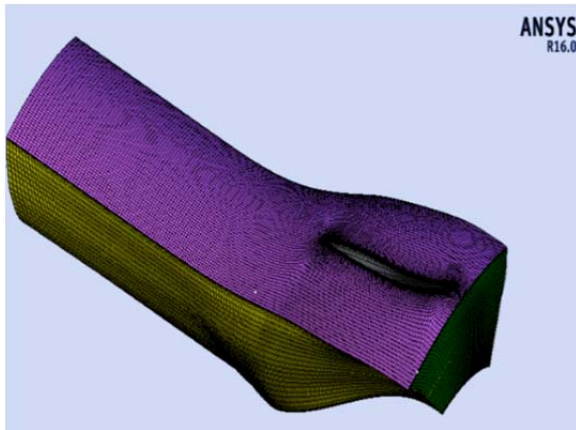
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) &= -\nabla P \\ &+ \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla U + (\nabla U)^T)] + S \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) = \frac{\dot{m}}{\rho_L}$$

معادله بقای جرم، مومنتوم و کسر حجمی بخار در بالا ذکر شده است. در معادله بالا ρ_V و ρ_L به ترتیب چگالی بخار و مایع است. U سرعت متوسط و P فشار متوسط است (S نیز شامل

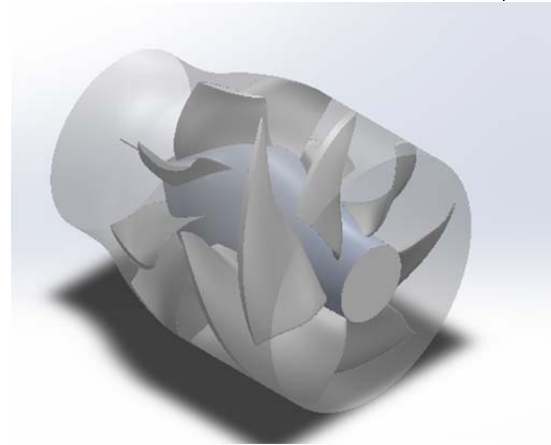


(الف)



(ب)

شکل ۳) شبکه ایجادشده در توربوگیرید (الف) روتور (ب) استاتور



شکل ۱) هندسه طراحی شده در نرم افزار سالیدورکز

۴- ایجاد شبکه

ایجاد شبکه مناسب تاثیر زیادی بر همگرایی حل دارد. پس از آماده سازی هندسه، برای مش زدن از نرم افزار توربوگیرید استفاده شد. این نرم افزار در ایجاد شبکه ساختاریافته توانایی بالایی دارد. مش ساختاریافته دقت بالاتری دارد و همچنین اجازه می دهد از لایه مرزی بهتری استفاده شود. برای مش بندی عدد رینولدز برابر $10^6 * 2/5$ روی پره روتور و $7+$ برابر یک در نظر گرفته شد. روتور و استاتور به صورت جداگانه شبکه بندی شده است. مشکل اصلی در ایجاد شبکه اسکيو بالای پره ها است که باعث می شود در برخی از قسمت ها نتوان از شبکه مناسب استفاده کرد. برای کاهش اسکيو در طول پره و افزایش کیفیت از الگوریتم (GGI) بر پایه درون یابی در مرز پریودک استفاده می شود. این درون یابی به مرز پریودیک اجازه می دهد تا غیرهم شکل باشند و انعطاف بیشتری در به وجود آوردن شبکه ساختاریافته داشته باشد. شکل ۲ الگوریتم شبکه بندی GGI و شکل ۳ شبکه ایجادشده در توربوگیرید (الف) روتور (ب) استاتور را نشان می دهند.

۵- شرایط جریان و مشخصات حل

آب با چگالی ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سینماتیکی $10e-6 m^2/s$ در نظر گرفته شده است. روتور با سرعت دورانی ثابت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در حال چرخش و حل به صورت پایا انجام شده است. مدل توربولانسی SST مورد استفاده قرار می گیرد. شرایط مرزی در ورودی به صورت فشار کل ورودی و در خروجی دبی جریان است.

ضریب جریان و عدد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می شود:

$$(10)$$

$$Q^* = \frac{Q}{nD^3}$$

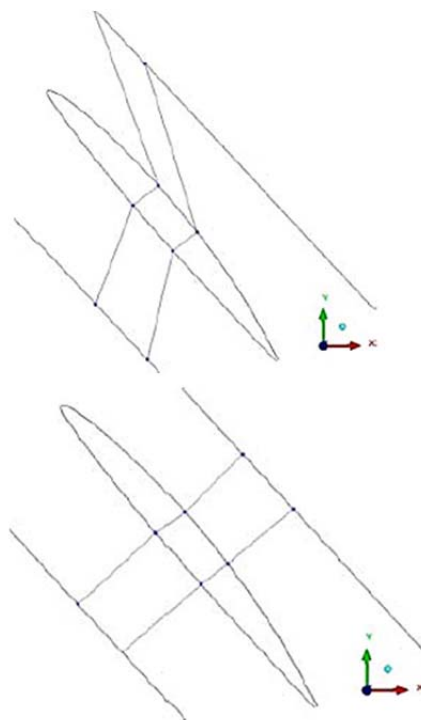
$$(11)$$

$$N^* = \frac{P_T - P_v}{\rho(nD)^2}$$

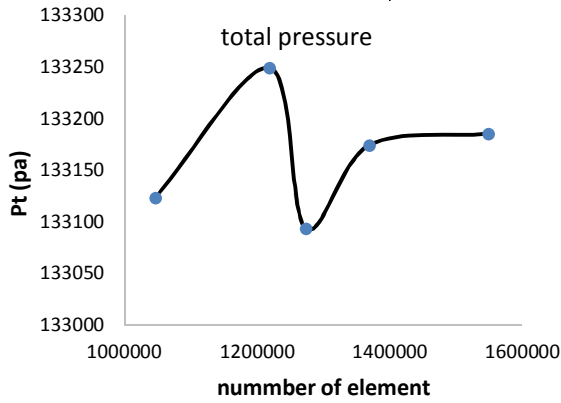
در معادله (۱۳) P_T فشار کل ورودی، P_v فشار بخار، D قطر روتور، n دور روتور بر حسب دور بر ثانیه و ρ چگالی آب است. شکل ۴ دامنه حل در نرم افزار سی اف ایکس را نشان می دهد. معادلات حاکم بر مساله، معادلات ناویر استوکس، پیوستگی به همراه معادلات مدل اغتشاشی SST است.

۶- استقلال از شبکه و بررسی $y+$

بررسی استقلال از شبکه در دینامیک سیالات محاسباتی اهمیت ویژه ای دارد. زیرا زمان و هزینه حل را بدون کاهش محسوس دقت



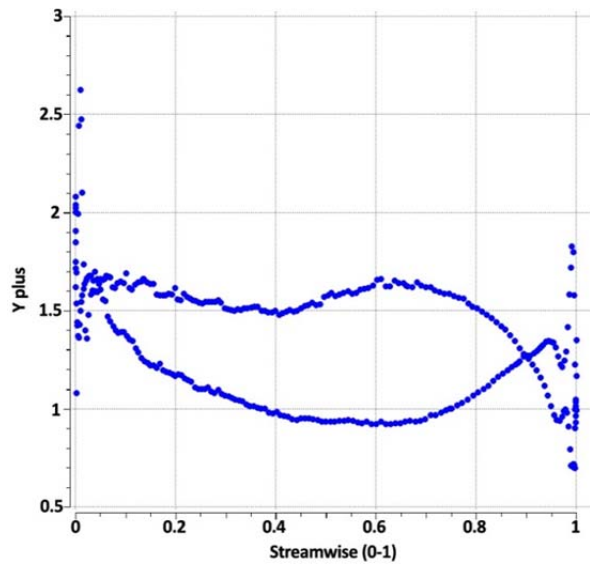
شکل ۲) الگوریتم شبکه بندی GGI



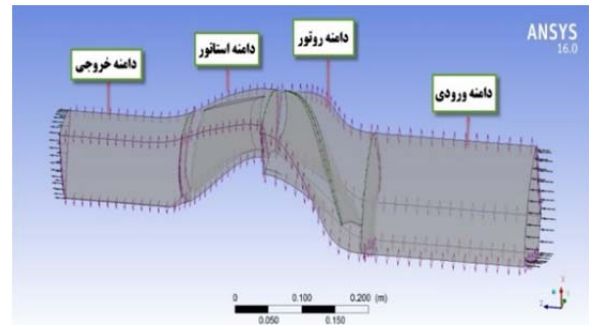
نمودار (۳) استقلال از شبکه برای فشار کل

کاهش می‌دهد. در این پژوهش سه پارامتر رانش، گشتاور و فشار کل بررسی شده است. پنج سری شبکه‌بندی انجام شده است که تعداد شبکه‌ها به ترتیب ۱۰۴۶۲۷۰، ۱۲۱۸۳۹۶، ۱۲۷۳۱۶۸، ۱۳۶۹۲۴۷ و ۱۵۴۸۷۷۶ هستند. نمودارهای ۱ و ۲ استقلال از شبکه را به ترتیب برای رانش، گشتاور نشان می‌دهد. در این اشکال دیده می‌شود که نتایج برای تعداد شبکه‌های ۱۲۱۸۳۹۶، ۱۲۷۳۱۶۸، ۱۳۶۹۲۴۷ به هم نزدیک هستند در نمودار ۳ استقلال از شبکه برای فشار کل مورد بررسی قرار گرفت. در این نمودار نتایج تعداد شبکه‌های ۱۳۶۹۲۴۷ و ۱۵۴۸۷۷۶ به یکدیگر نزدیک هستند. بنابراین ۱۳۶۹۲۴۷ تعداد سلول به‌عنوان شبکه نهایی انتخاب شد.

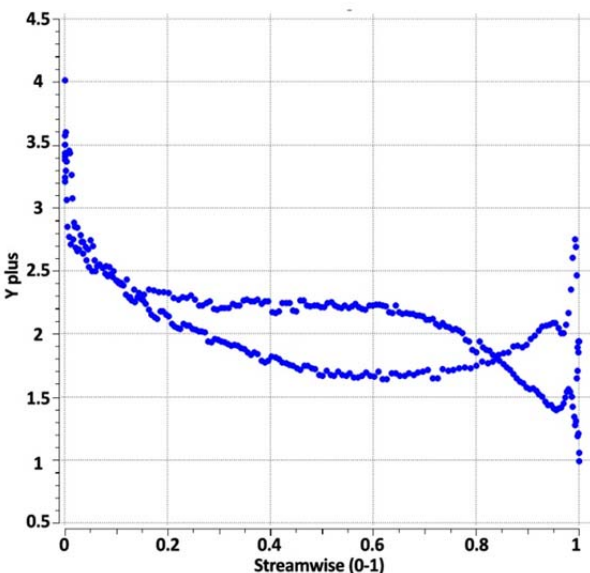
در مدل SST توصیه شده است که میزان y^+ کمتر از ۲ باشد تا تغییرات فشار نزدیک دیواره به‌خوبی دیده شود. نمودارهای ۴ و ۵ توزیع y^+ را در (الف) ریشه روتور (ب) نوک روتور نشان می‌دهد.



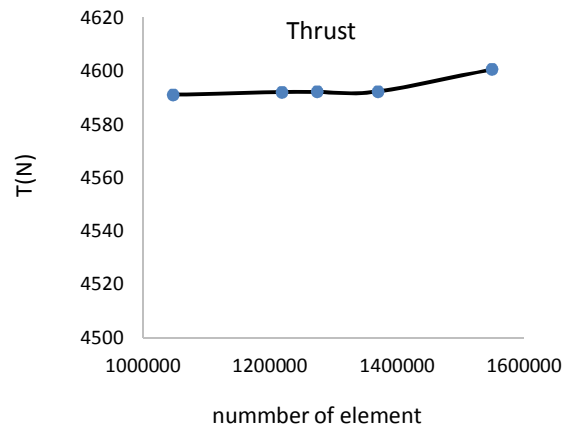
نمودار (۴) توزیع y^+ در ریشه روتور



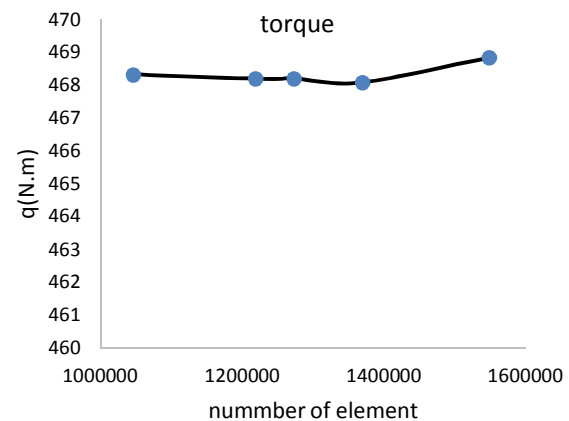
شکل (۴) دامنه حل در نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس



نمودار (۵) توزیع y^+ در نوک روتور



نمودار (۱) بررسی استقلال از شبکه برای رانش



نمودار (۲) استقلال از شبکه برای گشتاور

۷- اعتبارسنجی

مارکورات^[3] در گزارشی که منتشر کرد داده‌های حاصل از تست تجربی واترجت AXWJ-2 انجام شده در دو آزمایشگاه متفاوت یکی

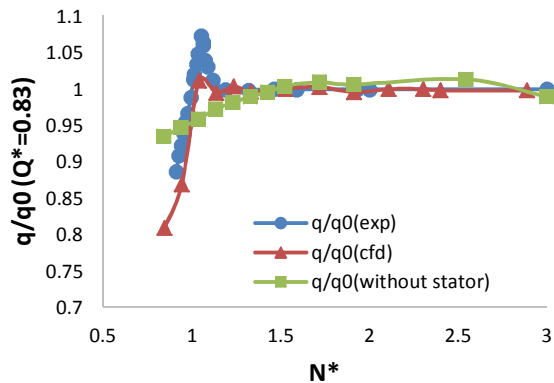
نقطه گشتاور دچار افت زود هنگام می شود و روند افت با شیب ملایم افزایش می یابد.

در نمودار ۷ نسبت دو مقدار رانش با در نظر گرفتن کاویتاسیون (T) و رانش بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (T_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.83$ نشان می دهد.

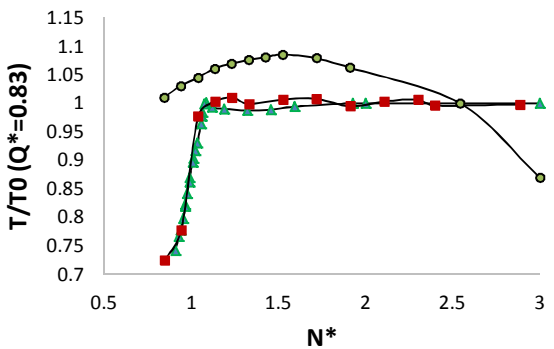
در شبیه سازی عددی روتور و استاتور میزان رانش کمی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی پیش بینی شده است. نتایج شبیه سازی روتور بدون استاتور، تطابق خوبی با نتایج تونل کاویتاسیون ندارد.

در نمودار ۸ نسبت دو مقدار هد با در نظر گرفتن کاویتاسیون (H) و هد بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (H_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. در این نمودار نتیجه فوق با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.83$ نشان داده شده است. افت رانش در نمودار نتایج آزمایشگاهی در عدد کاویتاسیون $1/0.3$ اتفاق می افتد که میزان هد ۳٪ دچار افت می شود. در شبیه سازی عددی روتور و استاتور این افت رانش در عدد کاویتاسیون 0.92 اتفاق می افتد.

در نمودار ۹ نسبت دو مقدار گشتاور با در نظر گرفتن کاویتاسیون (q) و گشتاور بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (q_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.774$ نشان می دهد.



نمودار ۶) مقایسه گشتاور بی بعد شده در تست آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در ضریب جریان 0.83



نمودار ۷) مقایسه نسبت رانش بی بعد شده بر حسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در ضریب جریان 0.83

NSWCCD و دیگری RRRNI را مقایسه کرد. آنچه به عنوان نتایج تجربی برای اعتبار سنجی در این مقاله استفاده شده نتایج حاصل از تست در تونل کاویتاسیون NSWCCD است. در شرایط کاویتاسیون اختلاف فشار بین ناحیه مکش و فشار کاهش می یابد، هرچه کاویتاسیون پیشرفت می کند این اختلاف فشار کمتر می شود؛ و سطح روتور توسط حباب های کاویتاسیون پوشانده می شود. اختلاف فشار بین ناحیه فشار و مکش روتور به طور فراوانی افت می کند. همچنین این افت را می توان در گشتاور و رانش روتور نیز مشاهده کرد. تست افت رانش در سه ضریب جریان در اندازه های مختلف نازل الحاقی انجام می شود. نازل الحاقی برای منظم کردن جریان خروجی به نازل اصلی متصل می شود. برای حالتی که قطر نازل الحاقی هم اندازه نازل خروجی باشد ضریب جریان برابر با 0.83 ، برای حالتی که قطر نازل الحاقی برابر با 0.90 نازل خروجی باشد ضریب جریان برابر با 0.774 و برای حالتی که این قطر 0.80 نازل خروجی باشد ضریب جریان 0.71 در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است در شرایط تست در آزمایشگاه با کاهش فشار و وقوع کاویتاسیون میزان ضریب جریان نیز کاهش می یابد.

مطالعه آزمایشگاهی نشان می دهد که رانش، گشتاور و هد و اترجت نیز بر اثر کاویتاسیون کاهش می یابد. کاهش عملکرد پمپ یا همان (افت رانش) به روش های مختلف تعریف می شود. معمولاً 0.1 افت در گشتاور، 0.3 افت در هد یا 0.1 افت در بازده را افت رانش می نامند. در این میان 0.1 افت در گشتاور بیشتر مورد اهمیت است؛ زیرا کمیتی است که به طور مستقیم محاسبه می شود؛ و به پارامترهای دیگر وابسته نیست. در تونل کاویتاسیون روتور و استاتور برای بررسی افت رانش مورد ارزیابی قرار گرفته است. با کاهش تدریجی فشار در ضریب جریان های مختلف تاثیر وقوع کاویتاسیون بر گشتاور، رانش و هد بررسی شده است. همچنین پارامترهای ذکر شده در شرایط غیر کاویتاسیون (فشار بالا) نیز به دست آمده است، سپس نمودارهای نسبت رانش، گشتاور و هد در شرایط کاویتاسیون به شرایط غیر کاویتاسیونی (نرمالیزه شده) در عدد کاویتاسیون های مختلف گزارش شده است که مبنای صحت سنجی حل عددی است. در این پژوهش شبیه سازی عددی وقوع کاویتاسیون یک بار برای روتور بدون در نظر گرفتن اثر استاتور و یک بار برای روتور و استاتور انجام و نتایج آن با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

در نمودار ۶ نسبت دو مقدار گشتاور با در نظر گرفتن کاویتاسیون (q) و گشتاور بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (q_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. در این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.83$ نشان می دهد. داده های به دست آمده از تونل کاویتاسیون نشان می دهند که در عدد کاویتاسیون $1/14$ میزان گشتاور در شرایط کاویتاسیونی به سرعت شروع به زیاد شدن می کند و سپس در عدد کاویتاسیون $1/0.6$ به حداکثر خود می رسد. در این حالت q به میزان 0.7 از q_0 بیشتر است. سپس q/q_0 با شیب زیاد افت می کند و در عدد کاویتاسیون 0.99 به نقطه افت رانش (جایی که گشتاور در شرایط کاویتاسیون 0.1 کمتر از گشتاور در شرایط کاویتاسیونی می شود) می رسد. در شبیه سازی عددی روتور و استاتور، نقطه اوج گشتاور 0.3 کمتر از نتایج آزمایشگاهی است. همچنین افت رانش در عدد کاویتاسیون $1/0.2$ اتفاق می افتد. در شبیه سازی روتور تنها تا قبل از عدد کاویتاسیون $1/43$ میزان گشتاور در شرایط کاویتاسیونی بیشتر از شرایط غیر کاویتاسیونی پیش بینی شده است، پس از این

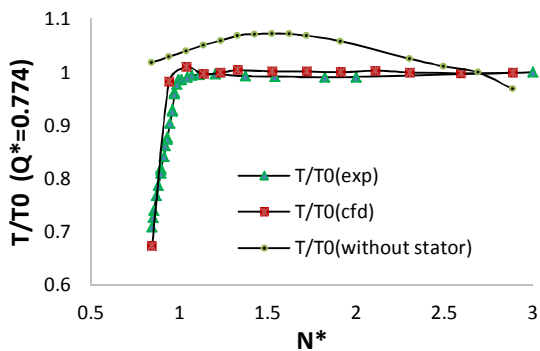
کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.774$ نشان می‌دهد. شبیه‌سازی عددی روتور و استاتور خطایی کمتر از ۲٪ دارد، اما روتور بدون استاتور بیش از ۸۰٪ خطا دارد.

در نمودار ۱۱ نسبت دو مقدار هد با در نظر گرفتن کاویتاسیون (H) و هد بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (H_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.774$ نشان می‌دهد این نمودار نشان می‌دهد در نتایج تست، در عدد کاویتاسیون یک به یکبار هد بر اثر کاویتاسیون دچار افت می‌شود. افت رانش در تست در ۰/۹۲ اتفاق می‌افتد اما در شبیه‌سازی روتور و استاتور افت رانش در ۰/۹۱ پیش‌بینی شده است.

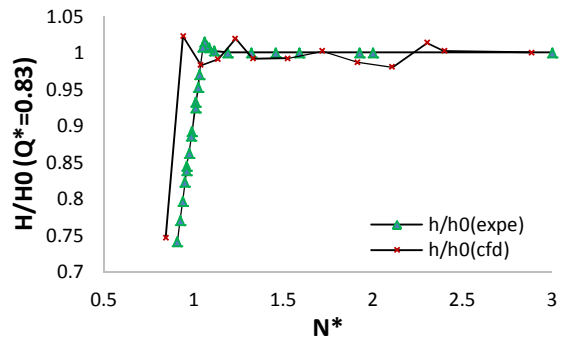
در نمودار ۱۲ نسبت دو مقدار گشتاور با در نظر گرفتن کاویتاسیون (q) و گشتاور بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (q_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. در این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.774$ نشان می‌دهد. در نتایج تست افت رانش در عدد کاویتاسیون ۰/۷۳ اتفاق می‌افتد. در شبیه‌سازی روتور و استاتور افت رانش در ۰/۸۱ اتفاق می‌افتد. نتایج نشان‌دهنده این است که هر چقدر دبی کمتر شود کاویتاسیون دیرتر اتفاق می‌افتد. نتایج مربوط به روتور بدون استاتور به علت خطای زیاد آورده نشده است.

در نمودار ۱۳ نسبت دو مقدار رانش با در نظر گرفتن کاویتاسیون (T) و رانش بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (T_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. در این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.774$ نشان می‌دهد.

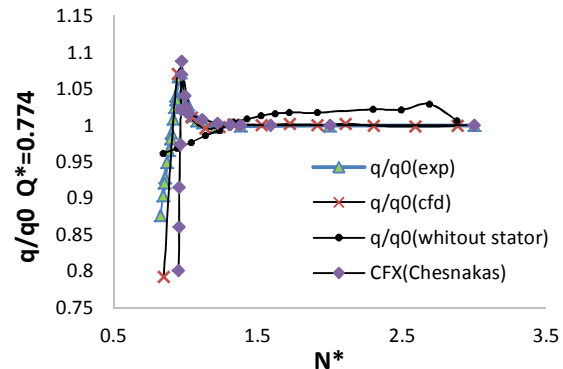
در نمودار ۱۴ نسبت دو مقدار هد با در نظر گرفتن کاویتاسیون (H) و هد بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (H_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) نشان داده شده است. این نمودار نتیجه فوق را با در نظر گرفتن روتور و استاتور و بدون در نظر گرفتن استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان $Q^*=0.774$ نشان می‌دهد. افت رانش در شرایط تست در عدد کاویتاسیون ۰/۹۱ اتفاق می‌افتد. در حل عددی هد در عدد کاویتاسیون ۰/۸۴، ۳٪ افت می‌کند.



نمودار ۱۰ مقایسه نسبت رانش بر حسب عدد کاویتاسیون در شرایط کاویتاسیون به رانش در شرایط غیرکاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در ضریب جریان ۰/۷۷۴



نمودار ۸ مقایسه نسبت هد بی‌بعد شده بر حسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در ضریب جریان ۰/۸۳



نمودار ۹ مقایسه گشتاور بی‌بعد شده بر حسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی^[۴]، شبیه‌سازی عددی توسط چسناکس^[۴] و نتایج عددی این مقاله در دو حالت روتور بدون استاتور و روتور با استاتور در ضریب جریان ۰/۷۷۴

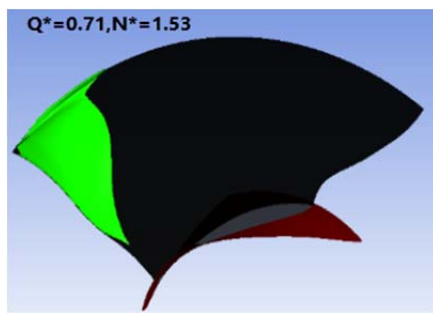
در جدول ۱ نتایج گشتاور بی‌بعد شده حاصل از شبیه‌سازی عددی روتور و استاتور در کنار نتایج تست در تونل کاویتاسیون و همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی آقای چسناکس برای مقایسه بهتر قرار گرفته است. در جدول ۱ خطاهای شبیه‌سازی عددی این پژوهش و نتایج آقای چسناکس در هشت نقطه محاسبه شده است. شبیه‌سازی از عدد کاویتاسیون ۳ شروع می‌شود به تدریج با کاهش فشار کل ورودی عدد کاویتاسیون نیز کوچک‌تر می‌شود. جدول ۱ نشان می‌دهد در شبیه‌سازی آقای چسناکس افت گشتاور در اثر کاویتاسیون بسیار با شیب تند اتفاق افتاده است که با نتایج تست اختلاف زیادی دارد. شبیه‌سازی روتور و استاتور (این مقاله) نسبت به شبیه‌سازی آقای چسناکس تطبیق بیشتری با نتایج تست دارد.

جدول ۱ مقایسه خطای شبیه‌سازی عددی برای q/q_0 در دو حالت شبیه‌سازی عددی روتور و استاتور (مطالعه حاضر) و شبیه‌سازی عددی توسط چسناکس^[۴]

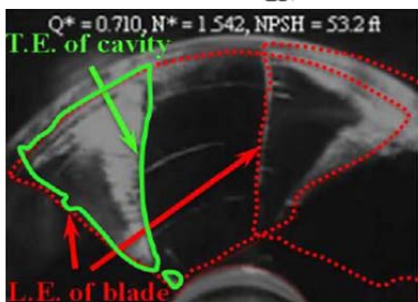
N^*	q/q_0 تست	q/q_0 شبیه‌سازی عددی (مطالعه حاضر)	درصد خطا	q/q_0 (چسناکس)	درصد خطا
۳	۱	۱	۰٪	۱	۰٪
۲	۱	۱	۰٪	۱	۰٪
۱/۵	۱	۱	۰٪	۱	۰٪
۱/۱	۱	۱	۰٪	۱/۰۰۹	۱٪
۱	۱/۰۳	۱/۰۱۸	۱٪	۱/۰۱۸	۱٪
۰/۹۶	۱/۰۷	۱/۰۸۹	۰٪	۱/۰۸۹	۲٪
۰/۹	۰/۹۹	-	۱٪	-	۱۰۰٪
۰/۸۷	۰/۹۵	-	۱۰٪	-	۱۰۰٪

در نمودار ۱۰ نسبت دو مقدار رانش با در نظر گرفتن کاویتاسیون (T) و رانش بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (T_0) را بر حسب عدد

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ سطح پوشیده شده توسط کاویتاسیون را در ضریب جریان و اعداد کاویتاسیون مختلف نشان می‌دهند. در هر یک از اشکال، قسمت (الف) مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از CFX و قسمت (ب) نتایج آزمایشگاهی هستند.

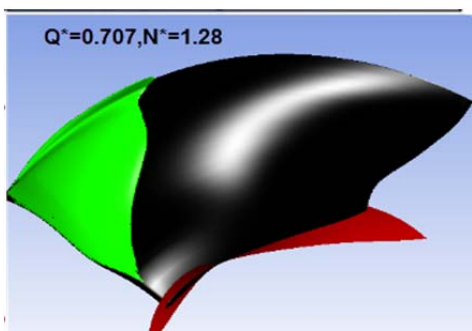


الف

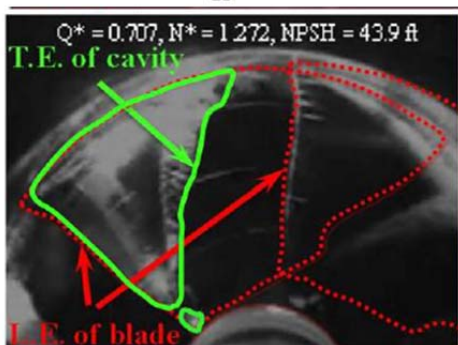


ب

شکل ۵) سطح پوشیده شده توسط کاویتاسیون در عدد کاویتاسیون ۱/۵۳ و ضریب جریان ۰/۷۱ (الف) مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از سی‌اف‌ایکس، قسمت (ب) نتایج آزمایشگاهی

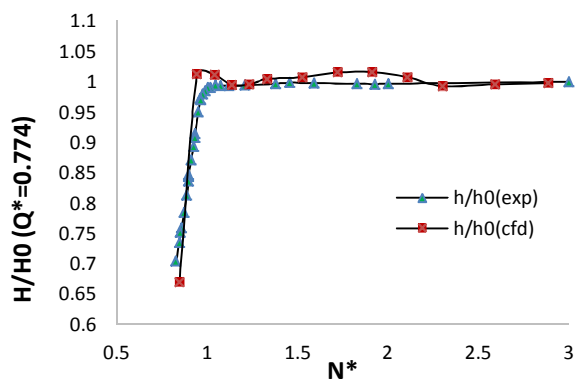


الف

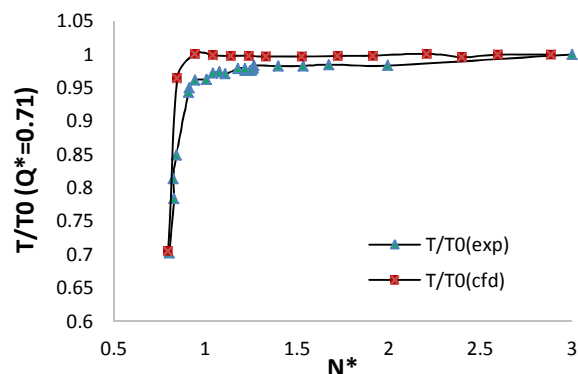


ب

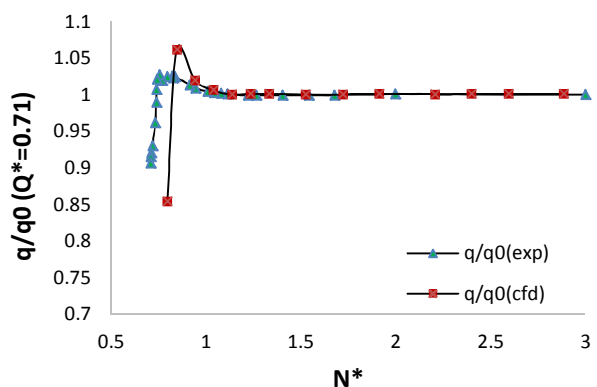
شکل ۶) سطح پوشیده شده توسط کاویتاسیون در عدد کاویتاسیون ۱/۲۸ و ضریب جریان ۰/۷۰۷ (الف) مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از سی‌اف‌ایکس، قسمت (ب) نتایج آزمایشگاهی [۷]



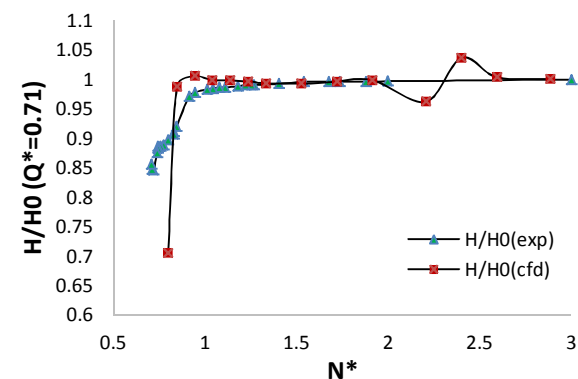
نمودار ۱۱) مقایسه هد بی‌بعد برحسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در ضریب جریان ۰/۷۷۴



نمودار ۱۲) مقایسه گشتاور بی‌بعد شده برحسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در ضریب جریان ۰/۷۱



نمودار ۱۳) مقایسه رانش بی‌بعد شده برحسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در ضریب جریان ۰/۷۱



نمودار ۱۴) مقایسه هد بی‌بعد شده برحسب عدد کاویتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در ضریب جریان ۰/۷۱

عکس برداری در آزمایشگاه به دست آمد، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که هرچه عدد کاویتاسیون کاهش می‌یابد سطح بیشتری از روتور توسط حباب‌های کاویتاسیون پوشانده می‌شود. ترکیدن این حباب‌ها می‌تواند علاوه بر ایجاد نویز، صدمات جبران‌ناپذیری به سیستم وارد کند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از آقایان مهندس سعید کرمی و مهندس امین مردان بابت رهنمودهای مفیدشان قدردانی نمایند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه دیگری انتشار نیافته و حاصل فعالیت علمی نویسندگان است.

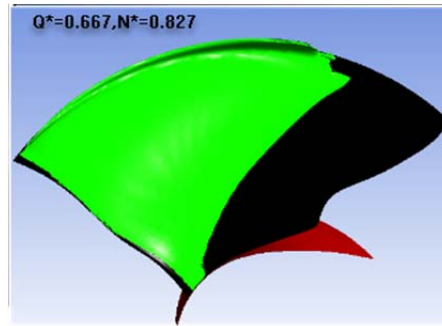
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: بهنام افشاری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ محمود رستمی و ورنوسفادرائی (نویسنده دوم)، نگارنده بحث (۵۰٪)

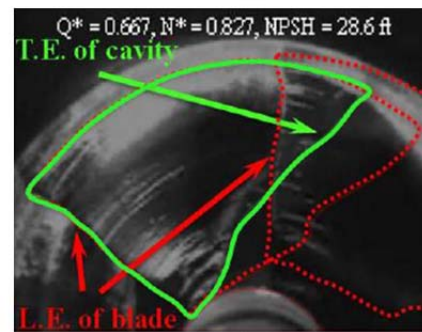
منابع مالی: منابع مالی خاصی برای این تحقیق استفاده نشده است.

منابع

- 1- Carlton J. Marine propellers and propulsion. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012.
- 2- Michael TJ, Schroeder SD, Becnel AJ. Design of the ONR AxWJ-2 Axial flow Water Jet pump [Internet]. West Bethesda MD: Naval Surface Warfare Center Carderock Division; 2008 [cited 2018 September 01]. Available from: https://archive.org/details/DTIC_ADA489739
- 3- Marquardt MW. Summary of two independent performance measurements of the ONR Axial Waterjet 2 (AxWJ-2) [Internet]. West Bethesda MD: Naval Surface Warfare Center Carderock Division; 2011 [cited 2018 September 01]. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/3cb8/e2bd527ba801c96a7a76c95671f5fe11345e.pdf>
- 4- Chesnakas CJ, Donnelly MJ, Pfitsch DW, Becnel AJ, Schroeder SD. Performance evaluation of the ONR Axial Waterjet 2 (AxWJ-2) [Internet]. West Bethesda MD: Naval Surface Warfare Center Carderock Division; 2009 [cited 2018 September 01]. Available from: https://archive.org/details/DTIC_ADA516369
- 5- Schroeder S, Kim SE, Jasak H. Toward predicting performance of an Axial flow waterjet including the effects of cavitation and thrust breakdown. First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway, June 2009. Unknown City: Unknown Publisher; 2009.
- 6- Lindau JW, Pena C, Baker WJ, Dreyer JJ, Moody WL, Kunz RF, et al. Modeling of cavitating flow through waterjet propulsors. International Journal of Rotating Machinery. 2012;2012:716392.
- 7- Xia CZ, Cheng L, Shang YN, Zhou JR, Yang F, Jin Y. Numerical simulation on the cavitation of waterjet propulsion pump. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2016;129(1):012011.
- 8- Lu L, Pan G, Sahoo PK. CFD prediction and simulation of a pumpjet propulsor. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2016;8(1):110-116.
- 9- Eslamdoost A, Larsson L, Bensow R. Net and gross thrust in waterjet propulsion. Journal of Ship Research. 2016;60(2):78-91.
- 10- Cao LL, Che BX, Hu LJ, Wu DZ. Design method of



A
الف



B
ب

شکل ۷) سطح پوشیده شده توسط کاویتاسیون در عدد کاویتاسیون ۰/۸۲۷ و ضریب جریان ۰/۶۶۷ (الف) مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از CFX، قسمت (ب) نتایج آزمایشگاهی^[۷]

سطح پوشیده شده روتور توسط حباب‌های کاویتاسیون که از حل عددی به دست آمده با سطح پوشیده شده که از عکس برداری در آزمایشگاه به دست آمده، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که هرچه عدد کاویتاسیون کاهش می‌یابد سطح بیشتری از روتور توسط حباب‌های کاویتاسیون پوشانده می‌شود. ترکیدن این حباب‌ها می‌تواند علاوه بر ایجاد نویز، صدمات جبران‌ناپذیری به سیستم وارد کند.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک واترجت جریان محوری با هاب غیراستوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس شبیه‌سازی عددی شد. برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار توربوگرید که شبکه ساختاریافته ایجاد می‌کند، استفاده شد. این شبیه‌سازی برای پیش‌بینی عملکرد واترجت در شرایط کاویتاسیون انجام شد. حل پایا و دامنه پریودیک در کاهش هزینه و زمان حل نقش بسیار پررنگی دارند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. نمودارهای رانش، گشتاور و هد نرمالیزه نیز رسم شد. نتایج حل عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. این مقایسه دقت بالای شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. مقدار هد، گشتاور و رانش بر اثر کاویتاسیون و همچنین بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون در سه مقدار از ضریب جریان به دست آمد. در ضریب جریان ۰/۷۷۴ حل نسبت به دو ضریب جریان دیگر دقت بالاتری دارد. نتایج شبیه‌سازی روتور و استاتور، نسبت به شبیه‌سازی روتور بدون استاتور به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک‌تر است. به دلیل اینکه در تونل کاویتاسیون روتور و استاتور با هم تست شده‌اند.

همچنین سطح پوشیده شده روتور توسط حباب‌های کاویتاسیون که از حل عددی به دست آمده بود با سطح پوشیده شده که از

efficiency analysis of waterjet propulsion. ISFMFE - 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, 22 Oct, 2014, Wuhan, China. London: IET; 2014.

14- Yang YS, Xie YC, Nie SL. Nozzle optimization for water jet propulsion with a positive displacement pump. China Ocean Engineering. 2014;28(3):409-419.

15- Duerr P, Von Ellenrieder KD. Scaling and numerical analysis of nonuniform waterjet pump inflows. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2015;40(3):701-709.

water jet pump towards high cavitation performances. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2016;129(1):012067.

11- Gattoronchieri A, Bensow R. OpenFOAM investigations of cavitation in a flushed water-jet inlet. Journal of Physics Conference Series. 2015;656:012059.

12- Ni Y, Liu W, Shen Z, Pan X. Thrust characteristics and nozzle role of water jet propulsion. International Journal of Fluid Machinery and Systems. 2017;10(1):47-53.

13- Cao P, Wang Y, Li G, Cui Y, Yin G. Numerical hydraulic