

مدل سازی عددی دائم و غیر دائم عملکرد واترجت با توپی غیر استوانه ای شرایط غیر کاویتاسیونی و کاویتاسیونی با استفاده از روش حجم محدود

محمود رستمی ورنوسفادرائی^۱، بهنام افشاری^۲

rostamivf@aut.ac.ir

۱- استادیار گروه مهندسی دریا، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی دریا، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

تئوری حاکم بر سیستم رانش واترجت ترکیبی از دانش مرتبط با پمپ و پروانه است. فشار در ناحیه مکش پروانه‌ها در سرعت‌های بالای دورانی کمتر از فشار اشباع می‌شود و در نتیجه کاویتاسیون به وجود می‌آید. اما سیستم رانش واترجت می‌تواند تا سرعت‌های دورانی بالاتری در برابر وقوع کاویتاسیون مقاومت کند. در این مقاله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پارامترهای گشتاور، بازده و هد در شرایط غیر کاویتاسیونی در حالت دائم و غیر دائم پیش‌بینی شده و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین در شرایط کاویتاسیونی جریان به صورت دوفازی مدل شده و با حالت غیر کاویتاسیونی مقایسه شده است. الگوی ایجاد کاویتاسیون بر روی روتور در شکل نشان داده شده و با حل عددی مقایسه شده است. سپس در ضریب جریان دیگری نقطه شکست رانش بدست آمده است. همچنین مطالعه پارامتریک شامل بررسی نقش استاتور در خنثی‌سازی اثر گشتاور-روتور انجام شده است. حل عددی با استفاده از شبکه ساختاریافته، دستگاه مرجع چرخان، دامنه پریودیک، به صورت دائم و غیر دائم با استفاده از مدل توربولانسی SST انجام گردیده است. این پژوهش نشان می‌دهد که استاتور تا حد قابل توجهی گشتاور پیچشی روتور را خنثی می‌کند. همچنین تاثیر منفی کاویتاسیون بر عملکرد سیستم و نقش آن در کاهش راندمان به خوبی نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: واترجت با توپی غیر استوانه ای، پارامترهای هیدرودینامیکی، SST، کاویتاسیون، جریان غیر دائم.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۶/۰۲

۱- مقدمه

واترجت یک سیستم‌های رانش است که نسبت به سایر سیستم‌ها مزیت‌هایی همچون سرعت بالا، مانور خوب، سر و صدا و ارتعاش کم، حرکت در عمق کم و ... دارد. واترجت به خوبی قادر است مانع ایجاد کاویتاسیون در سرعت‌های بالای چرخش روتور شود. پدیده کاویتاسیون عموماً یک پدیده هم‌زمان با توربولانس است که این امر موجب پیچیده شدن این پدیده می‌گردد. در این میان دینامیک پیچیده سطح مشترک دو فاز بخار و مایع که به آثار متقابل دو فاز وابسته است نیز مطرح است. در سال‌های اخیر شبیه‌سازی‌های عددی بسیاری در مراکز علمی جهان انجام شده است که نتایج آن باعث افزایش دقت طراحی و کاهش هزینه‌ها شده است.

چسناکاس [۱] جزئیات تست واترجت 2-AXWJ-ONR در تونل کاویتاسیون را به‌طور کامل گزارش کرده است. در این تست توان عملکرد واترجت در شرایط کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی بررسی شده است. مارکوات و همکاران [۲] در یک گزارش جامع نتایج حاصل از تحلیل عددی واترجت 2-AXWJ را با نتایج بدست آمده از دو تونل کاویتاسیون رول رویز و آزمایشگاه نیروی دریایی آمریکا مقایسه کردند. لینداو یو و همکاران [۳] با استفاده از حل عددی، واترجت 2-AXWJ را در شرایط کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی بررسی کردند. در این پژوهش در دو ضریب جریان با کاهش فشار کل ورودی وقوع کاویتاسیون و الگوی تشکیل حباب‌های کاویتاسیونی مورد بررسی قرار گرفت.

لو و همکاران [۴] مشخصه‌های جریان را در یک پمپ جت با استفاده از مدل کاویتاسیون Zwart-Gerber-Belamri (Z-G-B) که بر پایه رینولدز متوسط است شبیه‌سازی عددی کردند. مطالعات آنها نشان داد کاویتاسیون در لبه حمله و در نزدیکی نوک پرده اتفاق می‌افتد. هانگ و همکاران [۵] برای کمک به بهینه شدن بیشتر طراحی از پنج الگوریتم و روش ترکیب شده شامل طراحی آزمایشات (DOE)، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، روش طراحی معکوس، روش پاسخ سطحی (RSM) و الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده کردند.

چان و همکاران [۶] با استفاده از یک حل‌گر بر پایه رینولدز متوسط، جریان بین روتور و استاتور را مدل کردند. آن‌ها از چندین بلوک شبکه غیر متعامد و متحرک برای شبکه‌بندی

استفاده کردند. قسمت اول به‌صورت گذرا و قسمت دوم یک مقدار جانبی متوسط در نظر گرفته شد. بریوتون و همکاران [۷] برای کاهش دامنه حل و افزایش سرعت رسیدن به جواب از مرزهای پرپودیک استفاده کردند. اسکودر و همکاران [۸] از دینامیک سیالات محاسباتی چند فازی بر پایه حل گر میدان باز استفاده کردند. آن‌ها از نرم‌افزار غیرتجاری اپن فوم برای شبیه‌سازی جریان در واترجت جریان محوری AXWJ1 استفاده کردند.

کیناس و همکاران [۹] روش پنل را برای پیش‌بینی عملکردهای واترجت و تعامل بین روتور و استاتور استفاده کردند. سان [۱۰]، سان و کیناس [۱۱] و کیناس و همکاران [۱۲] جریان ویسکوز را اطراف واترجت خالی، داکت دار و واترجت AXWJ1 را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها همچنین تأثیر لایه‌مرزی بر روی کاویتاسیون در پره‌ها را بررسی کردند.

چانگ [۱۳] در رساله دکترای خود با استفاده از روش پنل بر پایه تئوری پتانسیل به بررسی پدیده کاویتاسیون در واترجت پرداخت. او از جریان پتانسیل برای بررسی فعل‌وانفعال بین پره‌ها، هاب و کیسینگ پرداخت. او همچنین به بررسی تأثیر تغییر فاصله بین نوک پره و محفظه کیسینگ نیز پرداخت.

سوماشکار و همکاران [۱۴] پدیده کاویتاسیون را در پمپ‌های جریان محوری شبیه‌سازی عددی کردند. آن‌ها برای شبکه‌بندی از توربوگرید و برای شبیه‌سازی توربولانس از مدل (k-ε) استاندارد استفاده کردند. سپس نتایج هد پمپ و NPSH را با روش آزمایشگاهی مقایسه نمودند. وان جی پارک و همکاران [۱۵] تقابل جریان سه‌بعدی را با داکت ورودی، روتور، استاتور و نازل بررسی کردند. آن‌ها همچنین عملکرد رانش و گشتاور پیچشی را مورد بررسی قرار دادند.

از جمله نوآوری‌های این مقاله می‌توان به بررسی تأثیر استاتور بر عملکرد سیستم اشاره کرد که در هیچ یک از مقالات پیشین بحث نشده است. همچنین حل عددی غیر دائم و دائم جریان درون واترجت با جزئیات دقیق و درصد خطا در هر ضریب جریان در این پژوهش نشان داده شده است. علاوه بر آن الگوی تشکیل حباب‌های کاویتاسیون در ضریب جریان ۰/۷۳ و عددهای کاویتاسیون مختلف به طور دقیق مقایسه شده است.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) = \frac{\dot{m}}{\rho_L} \quad (۶)$$

معادله بقای جرم، مومنتوم و کسر حجمی بخار در بالا آورده 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 نیروهای کوریولیس و نیروهای گریز از مرکز است. γ کسر حجمی آب است که با کسر حجمی بخار به شکل زیر مربوط می شود.

$$\gamma + \alpha = 1 \quad (۷)$$

چگالی ترکیبی ρ و μ ویسکوزیته دینامیکی جریان آرام به صورت زیر تعریف می شود.

$$\rho = \gamma \rho_L + (1 - \gamma) \rho_V \quad (۸)$$

$$\mu = \gamma \mu_L + (1 - \gamma) \mu_V \quad (۹)$$

\dot{m} نرخ انتقال جرم است که سه صورت مدل می شود. مدلی که نرم افزار تجاری از آن استفاده می کند مدل Zwart است این مدل از ساده سازی مدل رالی پلیست به دست می آید [۱۶].

$$\dot{m} = \begin{cases} -F_e \frac{3r_{nuc}(1-\alpha)\rho_V}{R_B} \sqrt{\frac{2P_V-P}{3\rho_L}} & \text{if } P < P_V \\ F_c \frac{3\alpha\rho_V}{R_B} \sqrt{\frac{2P-P_V}{3\rho_L}} & \text{if } P \geq P_V \end{cases} \quad (۱۰)$$

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 بخار شدن و چگالش است. در این حل ضرایب بالا به صورت پیش فرض به این صورت در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} r_{nuc} &= 5 * 10^{-4} & R_B &= 2 * 10^{-6} m \\ F_e &= 50 & F_c &= 0.01 \end{aligned}$$

۲-۳- مدل توربولانس SST

جریان در توربوماشین ها به صورت آشفته است. برای حل جریان آشفته نیاز به مدل توربولانس مناسب 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 گردان های فشار معکوس انجام می دهد. رابطه ویسکوزیته توربولانس در این مدل عبارت است از:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (۱۱)$$

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حل در شرایط غیر کاویتاسیونی، معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم برای سیال تراکم ناپذیر است که با استفاده از روش حجم محدود حل می شوند. در شرایط کاویتاسیونی معادلات در حالت دوفازی حل می شوند. در این مقاله از نرم افزار Ansys-cfx برای حل عددی استفاده شده است.

۲-۱- معادله بقای اندازه حرکت

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial X_j} (\rho u_i u_j) \quad (۱)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial X_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial X_j} + \rho g_i + F_i$$

p فشار استاتیک، ρ چگالی، τ_{ij} تانسور تنش، g_i نیروی ثقلی و F_i نیروهای خارجی در جهت i است. τ_{ij} توسط رابطه (۲) (برای سیال نیوتونی) مشخص می شود.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial X_i} \delta_{ij} \quad (۲)$$

μ ویسکوزیته دینامیکی و τ ترم دوم معادله تأثیر انبساط حجمی است که به دلیل تراکم ناپذیر بودن سیال آب صفر است.

۲-۲- معادله بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho u_i) = S_m \quad (۳)$$

S_m جرم افزوده به فاز پیوسته است، که در تحلیل عددی جریان سیال در واترجت صفر است. چون هیچ چشمه و چاهی در مدل وجود ندارد. معادلات حاکم بر حل، معادلات ناویر استوکس است. برای شبیه سازی از نرم افزار تجاری استفاده شده است. این نرم افزار از روش حجم محدود استفاده می کند. در شبیه سازی کاویتاسیون معادلات ناویر استوکس در دو فاز بخار و مایع حل می شود؛ گسسته سازی معادلات با استفاده از روش حجم محدود انجام می شود. معادلات ناویر استوکس برای دو فاز بخار و مایع به صورت زیر هستند:

$$\nabla \cdot U = \dot{m} \left(\frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_V} \right) \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) &= -\nabla P + \nabla \\ &\cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla U + (\nabla U)^T)] \\ &+ S \end{aligned} \quad (۵)$$

شکل (۱) الگوریتم حل در نرم افزار سی اف ایکس را نشان می‌دهد.

۳- مدل‌سازی عددی و معتبر سازی

۳-۱- مدل‌سازی هندسی

آنچه در این مقاله مورد تحلیل قرار گرفته است واترجت مدل ONR-AXWJ-2 است که بر اساس اطلاعات موجود در گزارش چسناکس و همکاران [۱] مدل‌سازی شده است. از ویژگی‌های بارز این واترجت، توپی غیر استوانه‌ای آن است. این ویژگی روند مدل‌سازی را با چالش روبرو می‌کند. مشخصات این واترجت در جدول (۱) آمده است. در شکل (۲) هندسه واترجت مشاهده می‌شود که شامل محفظه، روتور، استاتور و توپی غیراستوانه‌ای هست. در شکل (۳) هندسه توپی غیر استوانه‌ای واترجت بصورت مجزا نشان داده شده است. شکل (۴) روتور با هیدروفویل‌ها تشکیل دهنده آن و در شکل (۵) استاتور با هیدروفویل‌های تشکیل دهنده آن نشان داده شده است.

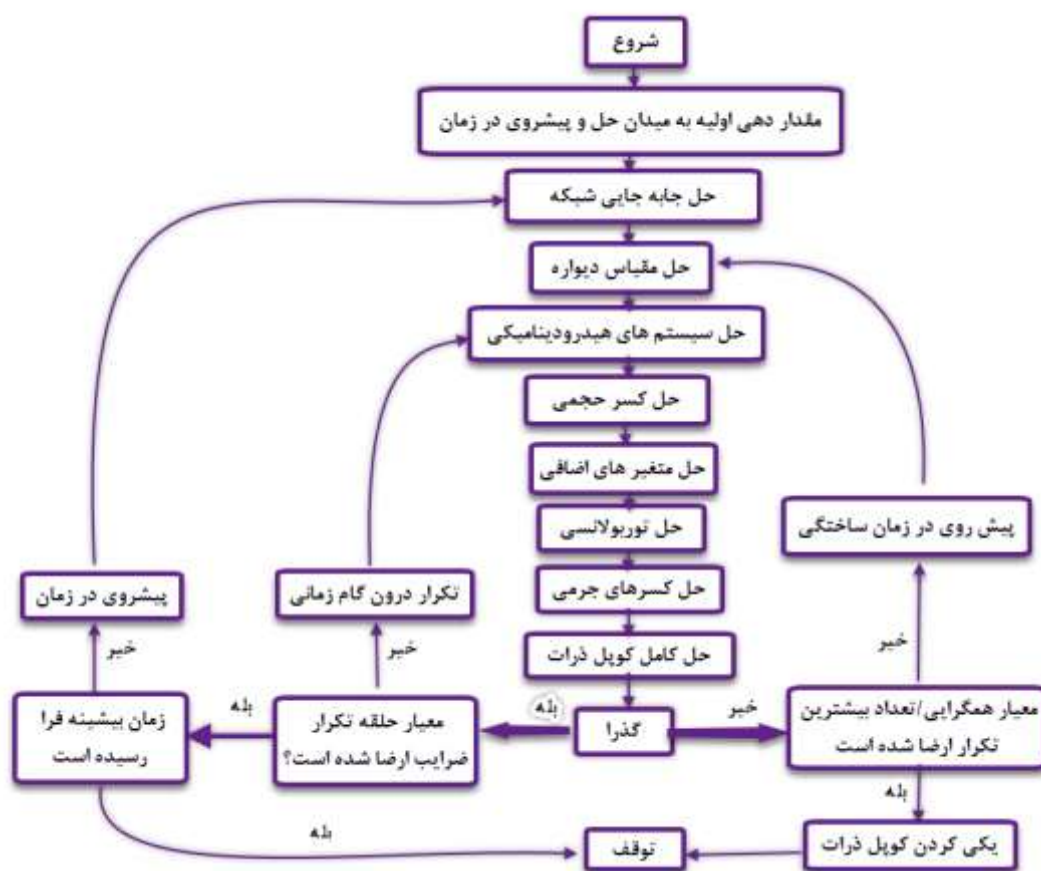
که در آن α ثابت مدل، F_2 ضریب ترکیب و S نرخ تغییر کرنش است. مدل توربولانسی SST ترکیبی از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ است. که ضعف مدل توربولانسی $k-\omega$ در نواحی دورتر از لایه مرزی را با مدل $k-\epsilon$ جبران می‌کند. بنابراین برای افزایش دقت حل و با توجه به سایر مقالات که غالباً از این مدل توربولانسی برای تحلیل عددی این واترجت استفاده کرده بودند. از این مدل توربولانسی استفاده شد.

۴-۲- روش حل عددی

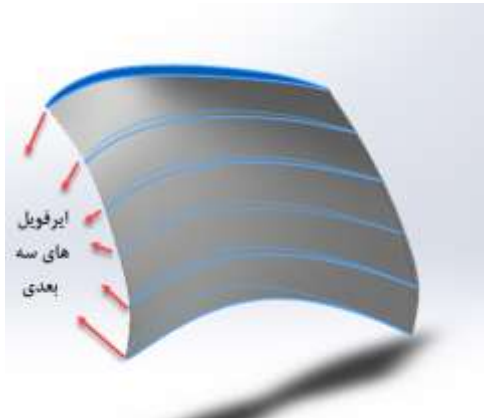
فلوچارت میدان عمومی حل را در سی اف ایکس شرح می‌دهد. این الگوریتم شامل دو عملیات سنگین عددی است.

تولید ضرایب: در این مرحله معادلات غیرخطی، خطی شده و در ماتریس جواب قرار می‌گیرند.

حل معادله: در این مرحله معادلات خطی به روش جبری چند شبکه‌ای حل می‌شود.

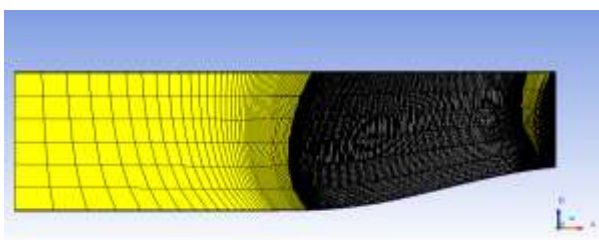


شکل (۱) الگوریتم حل در نرم افزار cfx.

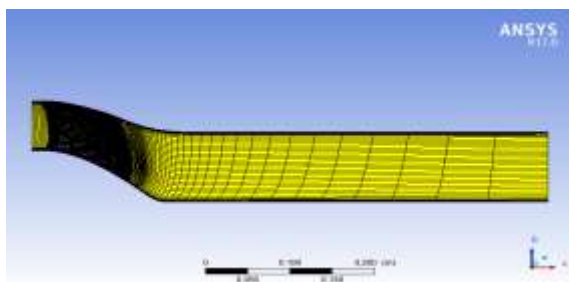


شکل (۵) استاتور با هیدروفویل‌های تشکیل دهنده آن.

شبکه ساختاریافته علاوه بر افزایش سرعت همگرایی، دقت بالایی دارد و اجازه می‌دهد در نواحی که تغییرات جریان در آن زیاد است از لایه مرزی مناسب‌تری استفاده شود. در مدل توربولانس SST، Y^+ عددی بی بعد است که فاصله اولین لایه مرزی از سطح را نشان می‌دهد. در این پژوهش عدد رینولدز برابر با $2/5$ میلیون و Y^+ برای نواحی حساس مانند نوک و ریشه روتور برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. حل به صورت پرودیک انجام می‌گیرد بنابراین لازم است تنها یک پره روتور و یک پره استاتور مش زده شود. ایجاد شبکه مناسب تأثیر زیادی بر همگرایی حل دارد. روتور و استاتور به صورت جداگانه شبکه‌بندی شده است. شکل (۶) شبکه ایجاد شده در نرم‌افزار تجاری ((الف) روتور و (ب) استاتور) را نشان می‌دهد.



(الف)

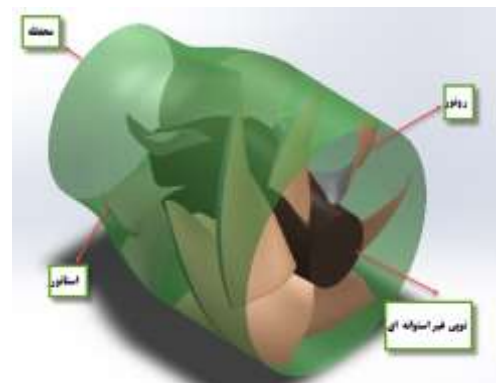


(ب)

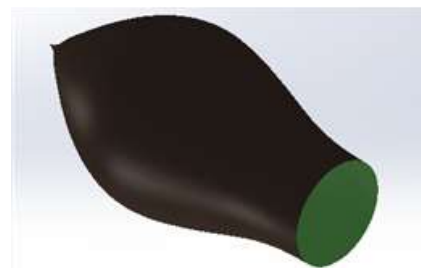
شکل (۶) شبکه ایجاد شده در توربوگرید (الف) روتور (ب) استاتور.

جدول (۱) مشخصات واترجت AXWJ-2.

مشخصات	AXWJ-2
تعداد پره‌های روتور	۶
تعداد پره‌های استاتور	۸
شعاع روتور	۰/۱۵۲۴ متر
شعاع دهانه ورودی	۰/۱۵۲۴ متر
نسبت مساحت ورودی به مساحت نازل	۱/۸۵
سطح گسترش یافته روتور	۱/۹۴۷
سطح گسترش یافته استاتور	۱/۲۸۷
لقی نوک تیغه روتور	۰/۵۰۸ میلی‌متر



شکل (۲) واترجت AXWJ-2.



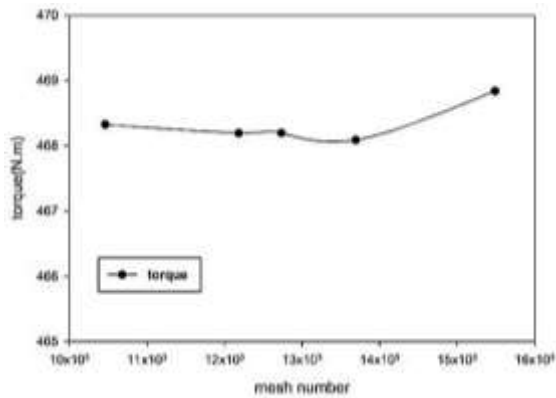
شکل (۳) هاب واترجت AXWJ-2.



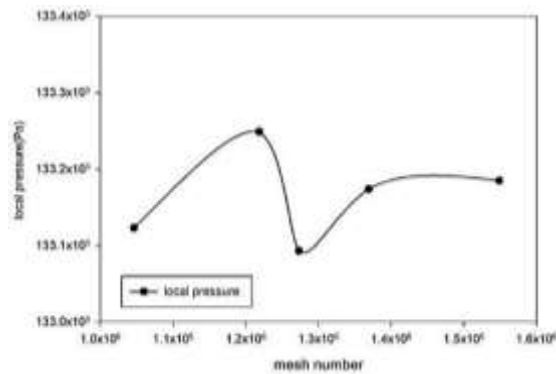
شکل (۴) روتور با هیدروفویل‌ها تشکیل دهنده آن.

۲-۳- ایجاد شبکه

پس از مدل‌سازی، برای حل نیاز به ایجاد شبکه مناسب داریم.



شکل (۸) بررسی استقلال از شبکه برای گشتاور.



شکل (۹) بررسی استقلال از شبکه برای فشار محلی.

۵-۳- اعتبار سنجی نتایج در حالت غیر کاویتاسیونی

در این قسمت نتایج این کار با نتایج آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حل عددی به شکل زیر است در نمودارهای زیر هد، گشتاور و بازده که از حل عددی در حالت غیر دائم و دائم به دست آمده است با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

شکل (۱۱) هد بدست آمده از حل عددی در حالت دائم و غیردائم را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌کند. همانطور که در شکل مشهود است خطای حل عددی بسیار ناچیز است. در این حالت به طور میانگین خطای شبیه سازی دائم و غیر دائم نسبت به نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۱/۱۸ و ۰/۸۶ درصد است. در شکل (۱۲) بدست آمده از حل عددی در حالت دائم و غیر دائم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که میزان خطای حل عددی در حالت غیر دائم کمی بیشتر از نتایج حل دائم است. میزان خطای حل عدد دائم و غیر دائم نسبت به نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۴۲ و ۱/۱۰۶ به دست آمده است.

۳-۳- شرایط جریان و مشخصات حل

برای محاسبه هد، توان، بازده، ضریب گشتاور و ضریب تراست در شرایط غیر کاویتاسیونی آب با چگالی ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سینماتیکی $10e-6$ m²/s در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت دورانی روتور در شرایط غیر کاویتاسیونی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه در حالت دائم و غیر دائم و در شرایط کاویتاسیونی سرعت دورانی روتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و حل به صورت دائم انجام شده است. شرایط مرزی در ورودی به صورت فشار کل ورودی و در خروجی دبی جریان است. ضریب جریان و عدد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود.

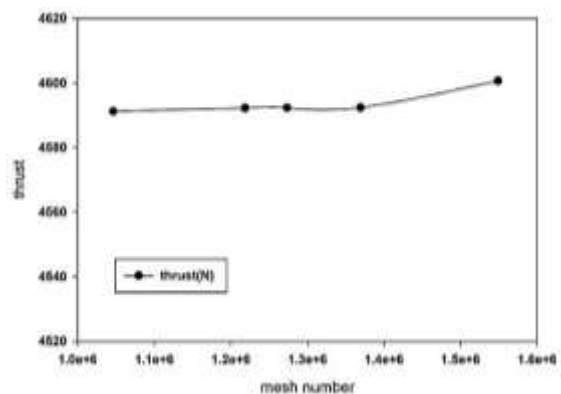
$$Q^* = \frac{Q}{nD^3} \quad (12)$$

$$N^* = \frac{P_T - P_v}{\rho(nD)^2} \quad (13)$$

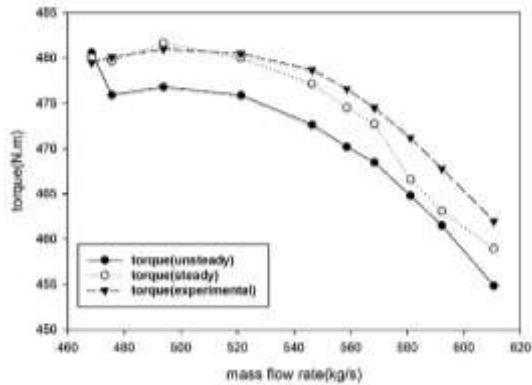
در معادله (۱۳) P_T فشار کل ورودی، P_v فشار بخار، D قطر روتور، n دور روتور بر حسب دور بر ثانیه و ρ چگالی آب است.

۴-۳- بررسی استقلال از شبکه

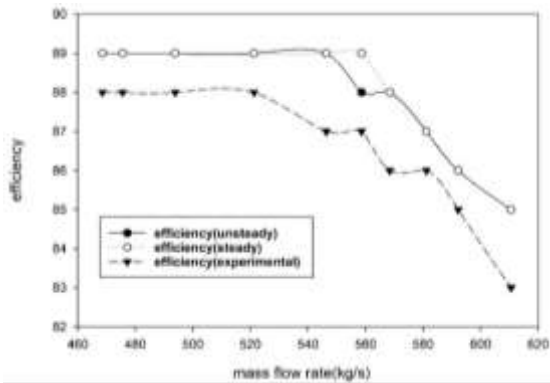
بررسی وضعیت استقلال از شبکه، در دینامیک سیالات محاسباتی اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا که زمان و هزینه حل را بدون کاهش محسوس دقت کاهش می‌دهد. در این پژوهش سه پارامتر رانش، گشتاور و فشار کل بررسی شده است. اشکال (۷) تا (۹) استقلال از شبکه را به ترتیب برای پارامترهای رانش، گشتاور و فشار محلی نشان می‌دهند که در آن‌ها ۱۳۶۹۲۴۷ تعداد سلول به عنوان شبکه نهایی انتخاب شد. شکل (۹۱۰) توزیع y^+ را در (الف) ریشه روتور و (ب) نوک روتور نشان می‌دهد.



شکل (۷) بررسی استقلال از شبکه برای رانش.



شکل (۱۲) مقایسه گشتاور به دست آمده از حل عددی در حالت دائم و غیر دائم و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در حالت غیر کاویتاسیونی.

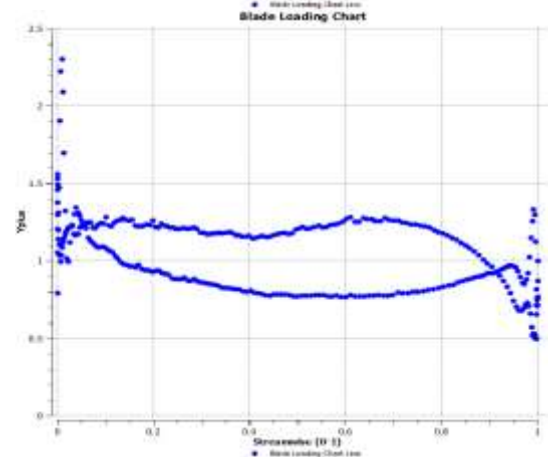
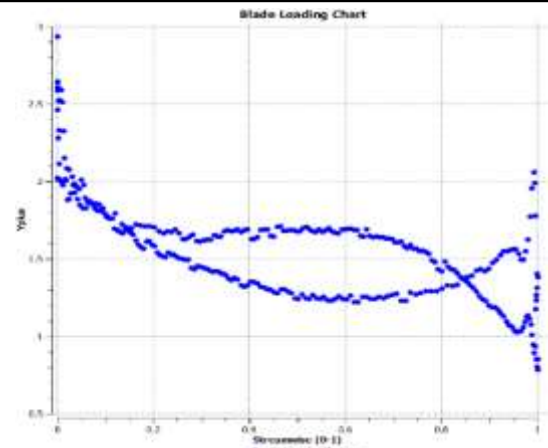


شکل (۱۳) مقایسه بازده به دست آمده از حل عددی در حالت دائم و غیر دائم و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در حالت غیر کاویتاسیونی.

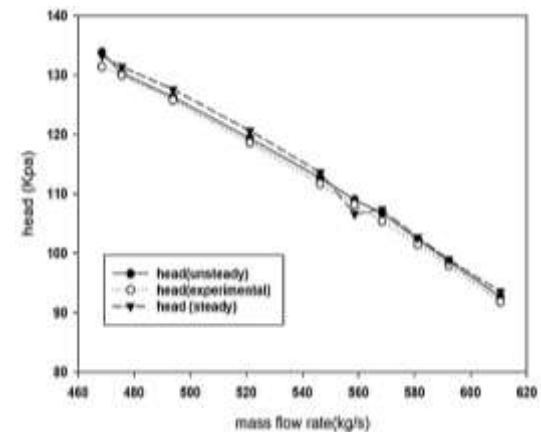
بازده در حالت دائم و غیر دائم در یک نقطه با هم اختلاف دارند. در جدول (۲) مقادیر گشتاور، در جدول (۳) هد و بازده و در جدول (۴) درصد خطا نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در حل عددی دائم نشان داده شده‌اند. جدول (۵) نیز مقادیر گشتاور، جدول (۶) هد و در جدول (۷) بازده و درصد خطا نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در حل عددی غیردائم نشان می‌دهند.

۶-۳- تأثیر وجود استاتور بر عملکرد سیستم در حالت غیر کاویتاسیونی و دائم

استاتور جزء ثابت سیستم واتر جت است. به‌طور معمول تعداد پره‌های استاتور بیشتر از روتور است. این پره‌ها همواره عکس پره‌های روتور هستند. این بدان معنی است که اگر پره‌های روتور راست‌گرد باشند پره‌های استاتور به‌صورت چپ‌گرد طراحی می‌شوند.



شکل (۱۰) بررسی $\gamma + \alpha$ ریشه روتور (ب) نوک روتور.



شکل (۱۱) مقایسه هد به دست آمده از حل عددی در حالت دائم و غیر دائم و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در حالت غیر کاویتاسیونی.

در شکل (۱۳) بازده بدست آمده از حل عددی در حالت دائم و غیر دائم با بازده بدست آمده از تست آزمایشگاهی مقایسه شده است. درصد خطا در حل عددی در حالت دائم و غیر دائم به ترتیب $1/52$ و $1/43$ است. بازده عددی غیر دائم خطای بیشتری نسبت به بازده عددی دائم دارد.

جدول (۵) مقدار گشتاور حاصل از حل عددی غیردائم و خطای آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دردی‌های مختلف.

درصد خطا	گشتاور (نیوتون متر)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۰/۲۳٪	۴۸۰/۶۰۶	۴۶۸/۴۹۰
۰/۸۷٪	۴۷۵/۹۲۰	۴۷۵/۵۶۹
۰/۲/۸۷	۴۷۶/۸	۴۹۳/۸۱۴
۰/۲/۹۶	۴۷۵/۸۸	۵۲۱/۲۳۱
٪۱	۴۷۲/۶۳	۵۴۶/۳۵۶
۱/۳۴٪	۴۷۰/۲۰	۵۵۸/۶۱۹
۱/۲/۲۷	۴۶۸/۴۷	۵۶۸/۳۸۹
۱/۲/۳۵	۴۶۴/۸۰	۵۸۱/۱۵۱
۱/۳۴٪	۴۶۱/۵۰	۵۹۲/۲۱۸

جدول (۲) مقدار گشتاور حاصل از حل عددی دائم و خطای آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دردی‌های مختلف.

درصد خطا	گشتاور (نیوتون متر)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۰/۱۱٪	۴۸۰/۰۷۴	۴۶۸/۴۹۰
۰/۲/۰۸۵	۴۷۹/۶۸۷	۴۷۵/۵۶۹
۰/۲/۱۳	۴۸۱/۶۶۲	۴۹۳/۸۱۴
۰/۲/۱۰	۴۸۰/۰۰	۵۲۱/۲۳۱
۰/۲/۲۳	۴۷۷/۱۴	۵۴۶/۳۵۶
۰/۲/۴۳	۴۷۴/۵۴۳	۵۵۸/۶۱۹
۰/۲/۳۷	۴۷۲/۷۱۴	۵۶۸/۳۸۹
۰/۲/۹۶	۴۶۶/۶۳۸	۵۸۱/۱۵۱
٪۱	۴۶۳/۰۹۶	۵۹۲/۲۱۸
۰/۲/۶۵	۴۵۸/۹۶۴	۶۱۰/۵۶۲

جدول (۶) مقدار هد حاصل از حل عددی غیردائم و خطای آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دردی‌های مختلف.

درصد خطا	هد (کیلو پاسکال)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۰/۲/۰۱۴	۱۳۳/۸۲۶	۴۶۸/۴۹۰
۰/۲/۰۱۰	۱۳۰/۲۹۹	۴۷۵/۵۶۹
۰/۲/۰۱۴	۱۲۶/۲۷۶	۴۹۳/۸۱۴
۰/۲/۰۱۷	۱۱۹/۳۳۶	۵۲۱/۲۳۱
۰/۲/۰۱۷	۱۱۲/۶۹۱	۵۴۶/۳۵۶
۰/۲/۰۱۴	۱۰۹/۰۱۲	۵۵۸/۶۱۹
۰/۲/۰۱۸	۱۰۶/۷۸	۵۶۸/۳۸۹
۰/۲/۰۱۱	۱۰۲/۳۶۸	۵۸۱/۱۵۱
۰/۲/۰۱۰	۹۸/۶۸۷	۵۹۲/۲۱۸
۰/۲/۰۱۸	۹۲/۶۵۱	۶۱۰/۵۶۲

جدول (۳) مقدار هد حاصل از حل عددی دائم و خطای آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دردی‌های مختلف.

درصد خطا	هد (کیلو پاسکال)	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۱/۲/۴	۱۳۳/۲۸۷	۴۶۸/۴۹۰
۰/۲/۰۱۰	۱۳۱/۳۹۵	۴۷۵/۵۶۹
۰/۲/۰۱۴	۱۲۷/۶۰۵	۴۹۳/۸۱۴
۰/۲/۰۱۷	۱۲۰/۶۲۹	۵۲۱/۲۳۱
۰/۲/۰۱۷	۱۱۳/۶۰۱	۵۴۶/۳۵۶
۰/۲/۰۱۴	۱۰۶/۶۴۸	۵۵۸/۶۱۹
۰/۲/۰۱۸	۱۰۷/۳۲۵	۵۶۸/۳۸۹
۰/۲/۰۱۱	۱۰۲/۷۰۱	۵۸۱/۱۵۱
۰/۲/۰۱۰	۹۸/۹۰۵	۵۹۲/۲۱۸

جدول (۷) مقدار بازده حاصل از حل عددی غیردائم و خطای آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دردی‌های مختلف.

درصد خطا	بازده	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۱/۳۱٪	٪۸۹	۴۶۸/۴۹۰
۰/۲/۸۱	٪۸۹	۴۷۵/۵۶۹
۰/۲/۹۸	٪۸۹	۴۹۳/۸۱۴
۱/۳۱٪	٪۸۹	۵۲۱/۲۳۱
۱/۲/۸۳	٪۸۹	۵۴۶/۳۵۶
۲/۲/۳۱	٪۸۸	۵۵۸/۶۱۹
۱/۸۳٪	٪۸۸	۵۶۸/۳۸۹
۱/۲/۹۳	٪۸۷	۵۸۱/۱۵۱
۱/۹۱٪	٪۸۶	۵۹۲/۲۱۸
۲/۲/۲٪	٪۸۵	۶۱۰/۵۶۲

جدول (۴) مقدار بازده حاصل از حل عددی دائم و خطای آن نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دردی‌های مختلف.

درصد خطا	بازده	دبی (کیلوگرم بر ثانیه)
۱/۲/۰۱	٪۸۹	۴۶۸/۴۹۰
۰/۲/۸۵	٪۸۹	۴۷۵/۵۶۹
۱/۲/۰۱	٪۸۹	۴۹۳/۸۱۴
۱/۲/۵۳	٪۸۹	۵۲۱/۲۳۱
۱/۲/۷۵٪	٪۸۹	۵۴۶/۳۵۶
۱/۲/۲۸	٪۸۶	۵۵۸/۶۱۹
۱/۲/۹۱	٪۸۸	۵۶۸/۳۸۹
۱/۸۶٪	٪۸۷	۵۸۱/۱۵۱
۱/۷۸٪	٪۸۶	۵۹۲/۲۱۸
۲/۲/۲۴	٪۸۵	۶۱۰/۵۶۲

هنگامی که گشتاور در شرایط کاویتاسیونی نسبت به شرایط غیر کاویتاسیونی به اندازه یک درصد دچار افت شود، این نقطه را شکست رانش یا افت رانش می نامند. در این قسمت شبیه سازی عددی کاویتاسیون برای ضریب جریان 0.83 انجام گرفت و نتایج آن با تست آزمایشگاهی مقایسه شد. این شبیه سازی در سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه انجام گرفت. معادلات حاکم بر حل در قسمت های قبل توضیح داده شده است. شبیه سازی در حالت دو فاز برای بخار و آب انجام شده است. نتایج شبیه سازی برای معتبر سازی با نتایج تست آزمایشگاهی چسناکس و همکارانش [۱] مقایسه شده است. در شبیه سازی عددی مقدار فشار کل ورودی را تاجایی کاهش می دهیم که پارامترهای گشتاور، تراست و هد به شدت دچار افت شود. آنچه در نمودار گزارش شده است پارامترهای گشتاور، تراست و هد است که بی بعدسازی (نسبت پارامتر در شرایط کاویتاسیونی به شرایط غیر کاویتاسیونی) شده است. پارامتر بی بعد در عددهای کاویتاسیون مختلف گزارش می شود. پس از اطمینان از صحت حل عددی، نتایج برای ضریب جریان 0.74 نیز بدست آمده و گزارش می شود.

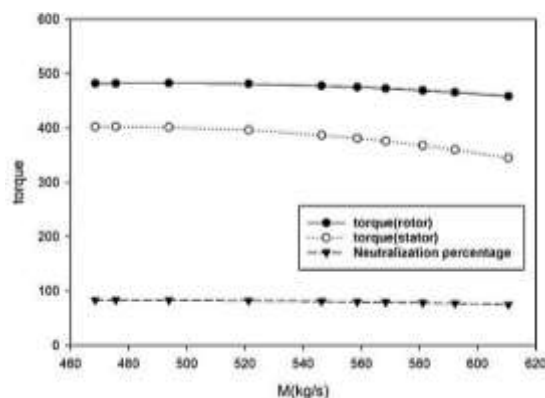
در شکل (۱۶) نسبت دو مقدار گشتاور با در نظر گرفتن کاویتاسیون (q) و گشتاور بدون در نظر گرفتن کاویتاسیون (q_0) را بر حسب عدد کاویتاسیون (N^*) در ضریب جریان 0.83 نشان داده شده است. داده های به دست آمده از تونل کاویتاسیون نشان می دهد در عدد کاویتاسیون $1/14$ میزان گشتاور در شرایط کاویتاسیونی به سرعت شروع به زیاد شدن می کند و سپس در عدد کاویتاسیون $1/06$ به حداکثر خود می رسد.

در این حالت q میزان ۷ درصد از q_0 بیشتر است. سپس با q/q_0 شیب زیاد افت می کند و در عدد کاویتاسیون 0.99 به نقطه افت رانش (جایی که گشتاور در شرایط کاویتاسیون یک درصد کمتر از گشتاور در شرایط کاویتاسیونی می شود) می رسد. در شبیه سازی عددی روتور و استاتور، نقطه اوج گشتاور ۳ درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی است. همچنین افت رانش در عدد کاویتاسیون $1/02$ اتفاق می افتد.

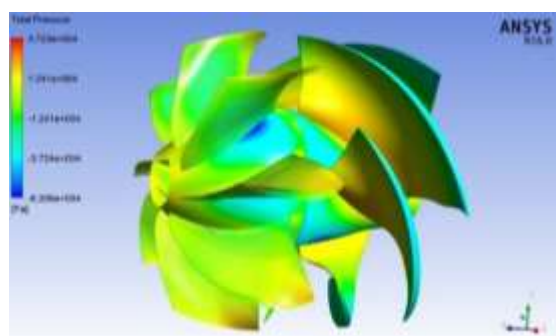
استاتور علاوه بر اینکه نقش نگهدارنده محفظه دور سیستم را ایفا می کند، تاثیر گشتاور حاصل از روتور بر روی سیستم را نیز خنثی می کند. همچنین پره های روتور طوری طراحی می شوند که فشار جریان با عبور از آن افزایش یافته و سرعت کاهش می یابد. گشتاور استاتور با علامت منفی به مفهوم عکس گشتاور روتور به دست می آید. اما در نمودار بالا قدر مطلق گشتاور نشان داده شده است. شکل (۱۴) خنثی سازی گشتاور روتور توسط استاتور را نشان می دهد.

۷-۳- بررسی تاثیر کاویتاسیون بر عملکرد سیستم در حالت دائم

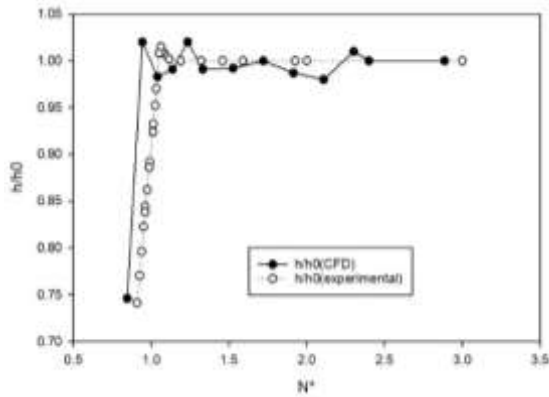
با افزایش سرعت دورانی روتور اختلاف فشار بین ناحیه فشار و مکش افزایش می یابد. افت شدید فشار باعث می شود فشار محیط کمتر از فشار اشباع آب شود در نتیجه تغییر فاز اتفاق می افتد و آب بخار شده و حباب های کاویتاسیونی تشکیل می شود. این حباب ها از لبه حمله شروع می شود و به سمت لبه فرار ادامه پیدا می کند و به تدریج سطح روتور را می پوشاند. پوشیده شدن سطح روتور، باعث کاهش شدید رانش و گشتاور روتور می شود.



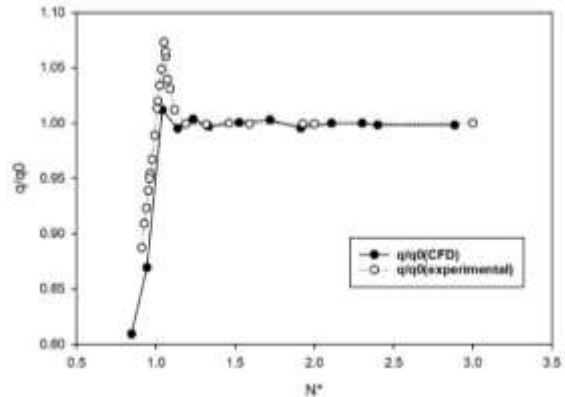
شکل (۱۴) خنثی سازی گشتاور روتور توسط استاتور.



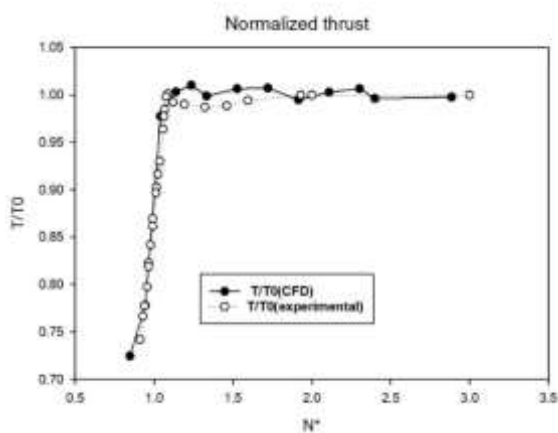
شکل (۱۵) توزیع فشار بر روی واترجت.



شکل (۱۷) مقایسه هد بی بعد شده برحسب عدد کاپیتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در ضریب جریان ۰/۸۳.



شکل (۱۶) مقایسه گشتاور بی بعد شده در تست آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در ضریب جریان ۰/۸۳.

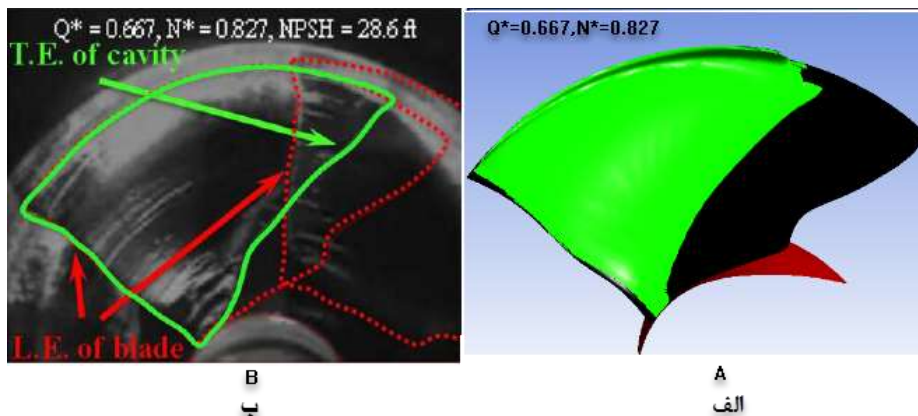


شکل (۱۸) مقایسه نسبت رانش بی بعد شده برحسب عدد کاپیتاسیون در تست آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در ضریب جریان ۰/۸۳.

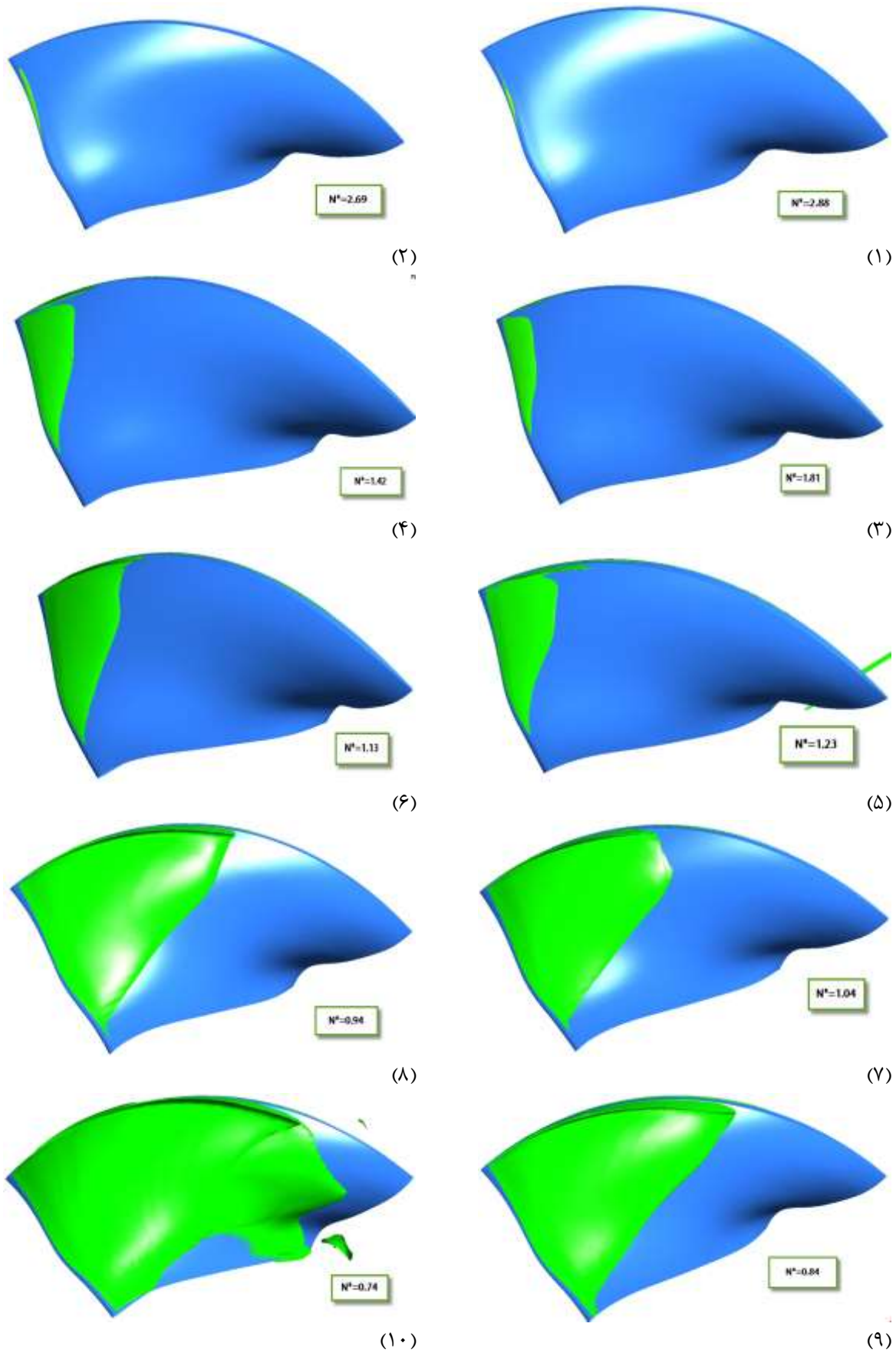
شکل (۱۸۱۹) سطح پوشیده شده توسط کاپیتاسیون را در عدد کاپیتاسیون ۰/۸۲۷ و ضریب جریان ۰/۶۶۷ نشان می دهد.

در شکل (۱۷) نسبت دو مقدار هد با در نظر گرفتن کاپیتاسیون (H) و هد بدون در نظر گرفتن کاپیتاسیون (H₀) را بر حسب عدد کاپیتاسیون (N*) نشان داده شده است. در این شکل نتیجه فوق با در نظر گرفتن روتور و استاتور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در ضریب جریان Q* = ۰/۸۳ گزارش شده است. ملاحظه می گردد که افت رانش در نمودار نتایج آزمایشگاهی در عدد کاپیتاسیون ۱/۰۳ اتفاق می افتد که میزان هد ۳ درصد دچار افت می شود. در شبیه سازی عددی این افت رانش در عدد کاپیتاسیون ۰/۹۲ اتفاق می افتد.

در شکل (۱۸) نسبت دو مقدار رانش با در نظر گرفتن کاپیتاسیون (T) و رانش بدون در نظر گرفتن کاپیتاسیون (T₀) را بر حسب عدد کاپیتاسیون (N*) در ضریب جریان Q* = ۰/۸۳ نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که در شبیه سازی عددی میزان رانش کمی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی پیش بینی شده است.



شکل (۱۹) سطح پوشیده شده توسط کاپیتاسیون در عدد کاپیتاسیون ۰/۸۲۷ و ضریب جریان ۰/۶۶۷ (الف) شبیه سازی با استفاده از CFX، (ب) نتایج آزمایشگاهی [۱].



شکل (۲۰) الگوی تشکیل حباب‌های کایتاسیون در عددهای کایتاسیون مختلف.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله مدل سازی عددی عملکرد یک سیستم رانش و اترجت در حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی در جریان های دائم و غیر دائم انجام گرفته است. حل عددی با استفاده از شبکه ساختاریافته، دستگاه مرجع چرخان، دامنه پرپودیک، به صورت پایا و غیر پایا و با استفاده از مدل توربولانسی SST انجام گردیده است.

در شرایط غیر کاویتاسیونی سرعت دورانی برابر با ۱۴۰۰ دور در دقیقه لحاظ شد و در ده ضریب جریان مختلف پارامترهای هد، گشتاور و بازده مورد بررسی قرار گرفت. حل در دو حالت پایا و گذرا انجام گرفت تا دقت حل ها با یکدیگر مقایسه شود. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان خطا در هر دو حالت پایا و گذرا به طور میانگین در حدود ۱/۵ درصد است که این نشانگر دقت بالای حل است. در شرایط کاویتاسیونی سرعت دورانی روتور به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه رسید. در این حالت پارامترهای گشتاور، هد و بازده در دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی بدست آمد و نسبت بی بعد شده آن در ضریب جریان ۰/۸۳ با حل آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حل عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. پس از اطمینان از صحت حل عددی، هد، گشتاور و بازده برای در ضریب جریان ۰/۷۴ در حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی به دست آمد. همچنین الگوی تشکیل کاویتاسیون در عددهای کاویتاسیون مختلف نشان داده شده است. هر چه عدد کاویتاسیون کوچکتر می شود (فشار کل ورودی کاهش می یابد) حباب های بیشتری سطح مکش پره روتور تشکیل می شود.

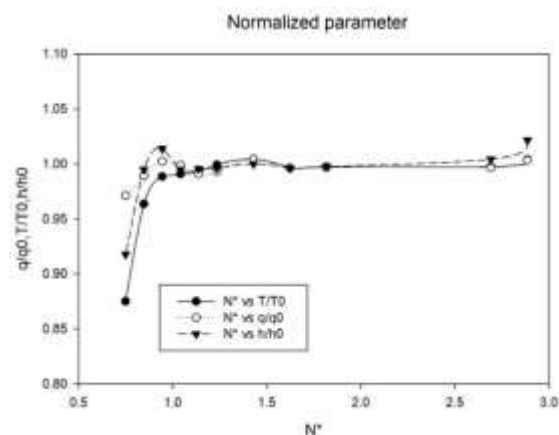
۷- مراجع

- [1] Chesnakas, C.J., "Performance Evaluation of the ONR Axial Waterjet 2 (AxWJ-2)", Naval Surface Warfare Center Carderock DIV Bethesda MD Total Ship Systems, 2009.
- [2] Marquardt, M.W., "Summary of Two Independent Performance Measurements of the ONR Axial Waterjet 2 (AxWJ-2)", Naval Surface Warfare Center Carderock DIV Bethesda MD, 2011.
- [3] Lindau, J.W., "Modeling of Cavitating Flow Through Waterjet Propulsors". International Journal of Rotating Machinery, 2012.
- [4] Lu, L., G. Pan, and P.K. Sahoo, "CFD Prediction and Simulation of a Pumpjet Propulsor". International Journal of Naval Arc. and Ocean Engineering, Vol.8, No.1, pp.110-116, 2016.

قسمت (الف) مربوط به شبیه سازی با استفاده از CFX و قسمت (ب) نتایج آزمایشگاهی است. سطح پوشیده شده روتور توسط حباب های کاویتاسیون که از حل عددی به دست آمده است با سطح پوشیده شده که از عکس برداری در آزمایشگاه به دست آمده مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند که هر قدر عدد کاویتاسیون کاهش می یابد سطح بیشتری از روتور توسط حباب های کاویتاسیون پوشانده می شود. ترکیدن این حباب ها می تواند علاوه بر ایجاد نویز، صدمات شدیدی به سیستم وارد کند.

پس از اطمینان از صحیح بودن حل عددی در قسمت قبل، در ضریب جریان ۰/۷۴، پارامترهای گشتاور، رانش و هد در شرایط کاویتاسیونی نسبت به شرایط غیر کاویتاسیونی مقایسه می گردد. در این حل، فشار ورودی آنقدر کاهش یافت تا کاویتاسیون اتفاق بیفتد. در شکل (۲۱) پارامترهای هیدرودینامیکی بی بعد شده گشتاور، هد و تراست در ضریب جریان ۰/۷۴ بر حسب عدد کاویتاسیون نشان داده شده اند. همانطور که از شکل ملاحظه می گردد، پارامترهای بی بعد شده هیدرودینامیکی با کم شدن عدد کاویتاسیون با هم اختلاف معناداری پیدا می کنند که این اتفاق خود ناشی از کاهش فشار و وقوع کاویتاسیون در عملکرد و اترجت است.

شکل (۲۱) روند تشکیل حباب های کاویتاسیون در سطح پره، در اعداد کاویتاسیون مختلف و در ضریب جریان ۰/۷۴ در ۱۰ شرایط مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود با کوچک شدن عدد کاویتاسیون، تشکیل حباب (بخش سبز رنگ) در سطح پره روتور افزایش پیدا می کند.



شکل (۲۱) گشتاور، هد و رانش بی بعد شده در ضریب جریان

۰/۷۴

- [5] Huang, D. and Z. Pan. "Numerical Analysis of Head Degrade Law under Cavitation Condition of Contra-Rotating Axial Flow Waterjet Pump", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2015.
- [6] Chun, H., W. Park, and J. Jun. "Experimental and cfd Analysis for Rotor-Stator Interaction of a Water-Jet Pump". 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, 2002.
- [7] Brewton, S., S. Gowing, and J. Gorski. "Performance Predictions of a Waterjet Rotor and Rotor/Stator Combination using Rans Calculations". 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, 2006.
- [8] Schroeder, S., S.E. Kim, and H. Jasak. "Toward Predicting Performance of an Axial Flow Waterjet Including the Effects of Cavitation and Thrust Breakdown", First International Symposium on Marine Propulsors, 2009.
- [9] Lindau, J.W., "Computation of Cavitating Flow Through Marine Propulsors", Proceedings of the 1st International Symposium on Marine Propulsors, 2009.
- [10] Sun, H., "Performance Prediction of Cavitating Propulsors Using a Viscous/Inviscid Interaction Method (UT-OE Report 08-2), PhD Thesis, Ocean Engineering Group, Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, University of Texas at Austin, 2008.
- [11] Sun, H. and S.A. Kinnas, "Performance Prediction of Cavitating Propulsors Using a Viscous/Inviscid Interaction Method in SNAME Annual Meeting and Ship Production Symposium, PhD Thesis, Ocean Engineering Group, Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, University of Texas at Austin, Austin: Houston, TX. 2008.
- [12] Kinnas, S.A., Steady and Unsteady Cavitating Performance Prediction of Ducted Propulsors, The 22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference and Exhibition. pp.1-6, 2012.
- [13] Chang, S.H., Numerical Simulation of Steady and Unsteady Cavitating Flows Inside Water-Jets, 2012.
- [14] Somashekar, D. and D.H. Purushothama, "Numerical Simulation of Cavitation Inception on Radial Flow Pump", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol.1, No.5, pp.21-26, 2012.
- [15] Park, W.G., "Numerical Flow and Performance Analysis of Waterjet Propulsion System". Ocean Engineering, Vol.32, No.14, pp.1740-1761, 2005.
- [16] Ansys, C., ANSYS CFX-solver theory guide. ANSYS CFX Release, p.724-746, 2009.