



استفاده از استاتور پیش چرخش پروانه به منظور کاهش حرکت دورانی (رول) زیرسطحی و افزایش بازده پروانه

حسن بهرامی^۱، علیرضا نادری^۱، علی اصغر مقدس آهنگری^۲، حسن قاسمی^{۳*}

۱- دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴

کلمات کلیدی:

استاتور پیش چرخش
کاهش حرکت دورانی زیرسطحی
ضرایب هیدرودینامیکی
کاهش گشتاور اضافی پروانه
بازده سیستم رانش

خلاصه: استاتورهای پیش چرخش می‌توانند به عنوان یک ابزار برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی پروانه و کاهش گشتاور اضافی پروانه در زیرسطحی‌ها عمل کنند. این گشتاور اضافی در زیرسطحی‌ها با مقطع دایره‌ای می‌تواند باعث ایجاد حرکت غلتشی (حرکت دورانی حول محور طولی) شود. مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامتر در طراحی این نوع از استاتورها طول کورد، فاصله استاتور تا پروانه و زاویه حمله استاتور است. در این مقاله به بررسی این پارامترها با استفاده از روش تاگوچی جهت استفاده از استاتور برای یک زیرسطحی به منظور کاهش حرکت دورانی حول محور طولی زیرسطحی (کاهش گشتاور اضافی پروانه) و افزایش بازدهی سیستم رانش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی با کمک نرم افزار تجاری استار سی‌سی‌ام پرداخته شده است. به منظور اعتبارسنجی محاسبات، نتایج شبیه‌سازی یک پروانه سری بی با نتایج آزمایش تجربی مقایسه شده است، نتایج شبیه‌سازی با خطای کمتر از ۱۰ درصد نسبت به داده‌های تجربی بدست آمده است. همچنین به منظور اطمینان از استقلال نتایج بدست آمده از شبکه‌بندی، از روش همگرایی شبکه استفاده شده است. استاتور نهایی طراحی شده برای زیرسطحی در عین حال که گشتاور را ۴۴/۴۷ درصد نسبت به حالت بدون استاتور کاهش می‌دهد، بازدهی سیستم رانش را نیز ۲/۲۹ درصد بهبود داده است. همچنین استاتور طراحی شده باعث کاهش گردابه (ورتکس) نوک پره و هاب پروانه شده است.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرودینامیکی زیرسطحی‌ها حرکت آنها در مسیر تعیین شده می‌باشد. از آنجا که چرخش پروانه باعث ایجاد گشتاور حول محور آن می‌گردد، این گشتاور می‌تواند باعث حرکت دورانی حول محور طولی زیرسطحی گردد. در شناورهای سطحی به علت وجود سطح آزاد و غیر دوار بودن بدنه آنها، این گشتاور اضافی خود به خود از بین می‌رود. اما این پارامتر در زیرسطحی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استاتورها می‌توانند یکی از گزینه‌های مناسب برای کاهش این گشتاور و همچنین افزایش بازده سیستم رانش باشند.

از استاتورها می‌توان در دو موقعیت جلوی پروانه (بالادست) و عقب پروانه (پایین دست) استفاده نمود. استاتورهایی که در جلوی پروانه قرار می‌گیرند را استاتورهای پیش چرخش^۱ و استاتورهایی که در عقب پروانه

قرار می‌گیرند را استاتورهای پس چرخش^۲ می‌نامند. شکل ۱ دو استاتور پیش چرخش و پس چرخش را نشان می‌دهد. هر کدام از این استاتورها مزایا و معایب مشخص خود را دارا هستند. با بررسی‌های انجام شده، این مزایا و معایب در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در این مقاله استاتورهای پیش چرخش بررسی گردیده است. این استاتورها در جلوی پروانه قرار می‌گیرند و معمولاً بین ۲ تا ۶ پره دارند. پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی زیادی بر روی استاتورهای پیش چرخش شناورهای سطحی انجام شده است. اولین بار مویس و پیتز [۳] در سال ۱۹۸۶ میلادی سیستم استاتور نوآورانه به نام اسویی^۳ برای کاهش تلفات چرخشی ارائه کردند. ایده استاتور در جلوی پروانه بر اساس روش سطح بالابرد^۴ توسط وان و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است. علاوه بر این، یک سری آزمایش مدل برای یافتن ترکیبی بهینه از استاتور و پروانه

2 Post-Swirl Stator

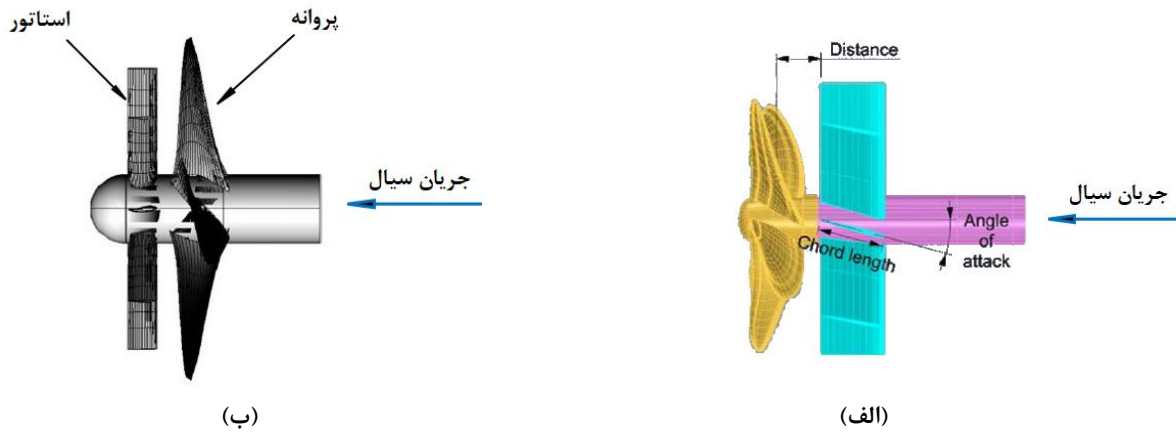
3 Schiffbau-Versuchsanstalt – Shipbuilding Research Institute

4 Lifting Surface Method

1 Pre-Swirl Stator

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gasemi@aut.ac.ir





شکل ۱. موقعیت قرارگیری استاتور و پروانه (الف) استاتور پیش چرخش [۱]، (ب) استاتور پس چرخش [۲].

Fig. 1. Stator and propeller position: (a) Pre-swirl stator [1], (b) Post-swirl stator [2]

جدول ۱. مزایا و معایب استاتورهای پیش چرخش و پس چرخش

Table 1. Advantages and disadvantages of pre-swirl and post-swirl stator

استاتور پس چرخش		استاتور پیش چرخش	
معایب	مزایا	معایب	مزایا
رانش پرسر و صدا بدلیل سرعت بالای جریان آب بر روی این استاتورها [۱۴]	تولید نیروی پیشران در صورت طراحی مناسب [۲] حدود ۲۵ درصد در تولید نیروی پیشران مشارکت می‌کند [۱۴].	ایجاد درگ [۱۴]	بازیابی تلفات انرژی چرخشی با ایجاد چرخش در خلاف پروانه [۳]
ورود گردابه‌های جریانی به داخل پروانه [۱۴]	کاهش بارگذاری بر روی پروانه [۱۵]	بازده کمتر در مقایسه با استاتورهای پس چرخش [۱۴]	رانش آرام‌تر و کم صداتر به دلیل حذف گردابه‌ها قبل از ورود به روتور [۱۵]
تولید یک نوع نویز (نوارباریک ^۱) در فرکانس‌های نرخ پره بدلیل قرار گرفتن در ویک بالک و سیل ^۲ زیرسطحی [۱۴]	کاهش کاویتاسیون [۱۵]	جریان خروجی چرخشی	کمتر بودن سرعت جریان بر روی این استاتورها نسبت به استاتورهای پس چرخش، لذا آرام‌تر کارکردن آنها [۱۴]
-	راندمان بالاتر [۱۴]	تضعیف عملکرد کاویتاسیون پروانه [۱۴]	ایجاد گشتاوری مخالف با گشتاور پروانه برای حذف ناپایداری گشتاور زیرسطحی [۱۶]
-	ایجاد گشتاوری مخالف با گشتاور پروانه برای حذف ناپایداری گشتاور زیرسطحی [۱۶]	-	ایجاد بارگذاری بیشتر بر روی پروانه در مقایسه با استاتورهای پس چرخش [۱۵]
-	کاربری بیشتر در پروانه‌های داکت‌دار [۱۷]	-	-

پژوهشی بر روی طراحی استاتورهای پیش‌چرخش زیرسطحی‌ها با دیدگاه بررسی همزمان کاهش گشتاور و افزایش بازده سیستم رانش آنها انجام نشده است. مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامتر در طراحی استاتور یک شناور، طول کورد استاتور، فاصله استاتور تا پروانه و زاویه حمله است که در این مقاله به آنها پرداخته شده است. در ابتدا شبیه‌سازی یک پروانه سری بی در آب آزاد با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. سپس پارامترهای طول وتر استاتور، فاصله استاتور از پروانه، زاویه حمله استاتور با استفاده از روش تاگوچی بررسی شده است. در نهایت با طراحی استاتور نهایی به مقایسه عملکرد آن در پشت بدنه زیرسطحی نسبت به حالت بدون استاتور پرداخته شده است.

۲- معادلات حاکم

محاسبات عددی با استفاده از نرم افزار تجاری استار سی‌سی‌ام^۳ انجام شده است. در این مدل‌سازی، بر خلاف روش‌های تقریبی موجود، مانند روش‌های مبتنی بر تئوری پتانسیل، که در آنها سیال ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود و ویسکوزیته صفر لحاظ می‌شود برای مدل‌سازی شرایط واقعی جریان، معادلات ناویر-استوکس غیر پایا با دارا بودن ترم‌های دیفرانسیلی غیر خطی باید به روش عددی حل شود [۱۸]. برای حل معادلات ناویراستوکس دو روش متداول وجود دارد. روش اول که حل عددی مستقیم^۴ نام دارد، نیازمند آن است که دامنه محاسباتی به اندازه کوچکترین ابعاد گردابه‌ها تقسیم شود تا بتواند تمامی مقیاس‌های گردابه‌های موجود را در شبکه محاسباتی گنجانده و معادلات را در آنها حل کند که این امر نیازمند کامپیوترهای بسیار قوی‌تر و با هزینه محاسباتی چندین ده برابری نسبت به روش دیگر یعنی روش مبتنی بر میانگین‌گیری^۵ می‌باشد. در معادلات مبتنی بر روش میانگین‌گیری، پارامترهای دخیل از جمله سرعت و فشار در معادلات ناویراستوکس را به صورت مجموع دو ترم میانگین و مقدار نوسانات تعریف می‌گردد. در مجموع مدل‌های توربولانس به دنبال اصلاح معادلات پایه ناویراستوکس با این رویکرد و محاسبه متغیرهای جدید وارد شده به روش‌های آماری می‌باشند [۱۹]. هنگامی که معادلات متوسط زمانی رینولدز برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده می‌شود، معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی در دستگاه مختصات دکارتی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۹]:

توسط وان و لی [۵] انجام شد. عملکرد استاتور پیش‌چرخش برای یک کشتی کانتینربر توسط شین و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ میلادی بررسی شده است. آن‌ها با استفاده از استاتورهای پیش‌چرخش حدود ۳ تا ۸ درصد انرژی شناور را ذخیره‌سازی نمودند. در همان سال پارک و همکاران [۷] یک روش جدید برای مدل‌سازی در اندازه اصلی کشتی‌های بزرگ حامل نفت خام^۱ مجهز به استاتورهای پیش‌چرخش توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از این استاتورها یک تغییر در جهت جریان متقاطع پیدا کردند. سیتون و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ میلادی از روش شبکه ورتکس^۲ و رویکردهای مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی یک طرح هیدرودینامیکی استاتور پیش‌چرخش در شرایط عملیاتی مختلف استفاده نمودند. استرکوال و کیدینگ [۹] در سال ۲۰۱۷ میلادی نشان دادند که پتانسیل استاتور پیش‌چرخش به طور قابل توجهی بزرگ می‌شود اگر به درستی در برابر گردابه‌های هاب پروانه کار کند و می‌تواند ۴ تا ۵ درصد در مصرف انرژی صرفه جویی کند. اخیراً عملکرد هیدرودینامیکی پروانه با استاتور پیش‌چرخش تحت جریان نوسانی توسط نادری و قاسمی [۱۰] در سال ۲۰۲۰ میلادی انجام شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که راندمان تحت تأثیر استاتور است و توان تحویلی نیز تا ۲/۳ درصد بهبود یافته است. همچنین آنها در یک تحقیق دیگر به مروری بر طرح‌هایی برای افزایش بازدهی و بهبود عملکرد پروانه و کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها پرداخته‌اند. یکی از طرح‌های بیان شده در این تحقیق، استاتور پیش‌چرخش بوده که باعث بهبود عملکرد پروانه و کاهش اتلاف چرخشی می‌شود [۱۱]. در همین سال کوشان و همکاران [۱۲] یک تحقیق تجربی و عددی بر روی استاتور پیش‌چرخش یک تانکر شیمیایی انجام دادند. تجزیه و تحلیل عددی شناور با و بدون استاتور در اندازه مدل و اندازه واقعی انجام شد. اندازه‌گیری‌ها بهبود قابل توجهی را در عملکرد کشتی مجهز به استاتور نشان داد و همچنین دیده شد که اثر مقیاس نقش مهمی در عملکرد این ابزار ایفا می‌کند. آنالیزهایی بر روی یک شناور حامل سنگ معدنی به طول ۲۵ متر (یعنی مدل در مقیاس بزرگ) برای بررسی مکانیزم عملکرد یک استاتور پیش‌چرخش و یک سکان دارای انحنا توسط سو و همکاران [۱۳] نیز در همین سال انجام شد. آن‌ها دریافتند که این ابزارها می‌توانند به طور مؤثر جریان لغزش پروانه را بهبود بخشند و بر بدنه در مقیاس بزرگ تأثیر مثبت بگذارند. آن‌ها نیز تا ۳ درصد بطور میانگین انرژی شناور را ذخیره نمودند.

پژوهش‌های زیادی بر روی طراحی استاتورهای پیش‌چرخش شناورهای سطحی با دیدگاه افزایش بازده سیستم رانش آنها انجام شده است. اما تاکنون

3 STAR-CCM+

4 DNS

5 RANS

1 VLCC

2 Vortex Lattice Method

حل براساس روش سیمپل^۳ در نظر گرفته شده است.

مشخصات عملکردی پروانه را می‌توان به صورت ضریب بدون بعد ذیل تعریف نمود که به ترتیب عبارت‌اند از ضریب پیشروی، ضریب پیشران، ضریب گشتاور و راندمان:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (۴)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (۵)$$

$$J = \frac{V}{nD} \quad (۶)$$

$$\eta = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (۷)$$

در روابط فوق، n دور چرخش پروانه، V سرعت پیشروی، D قطر پروانه، T نیروی پیشران، Q گشتاور تولیدی و η بازده پروانه می‌باشد.

۳- هندسه زیرسطحی

در این مقاله، از زیرسطحی با بدنه نوع مایرینگ در بسیاری از زیرسطحی‌های اتوماتیک^۴، زیرسطحی‌های کنترل از راه دور^۵ و زیردریایی‌ها از جمله رموس [۲۱]، استفاده شده است. بدنه‌های از نوع مایرینگ به بخش دنباله و دماغه مایرینگ تقسیم می‌شوند که با یک بخش میانی استوانه‌ای به هم متصل می‌شوند که در شکل ۲ نشان داده شده است.

دماغه این بدنه با استفاده از فرمول، همچنین دنباله این بدنه با استفاده از فرمول توصیف می‌شوند:

$$r(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (۸)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho u_i u_j}) = \\ - \frac{\partial (\bar{p})}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (۲)$$

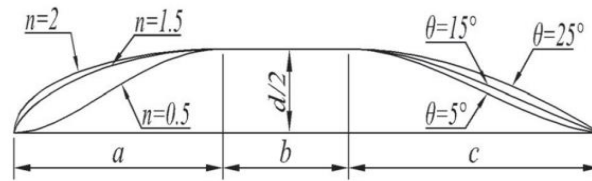
که x_i و x_j مربوط سیستم مختصات دکارتی، u_i و u_j مولفه‌های مربوط به سرعت و ρ ، μ ، p به ترتیب فشار، چگالی و ویسکوزیته نامیده می‌شوند. تنها بخش بحث برانگیز در معادله معرفی شده ترم $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ می‌باشد. این ترم را تانسور تنش‌های رینولدز نامگذاری کرده‌اند. در این مقاله برای محاسبه این تانسور از فرضیه ویسکوزیته گرداب‌های استفاده شده است. این فرضیه تانسور تنش‌های رینولدز را به گرادیان‌های سرعت میانگین و ویسکوزیته گرداب‌های مربوط می‌کند و برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر ظاهر می‌شود [۱۹]:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (۳)$$

که μ_t ویسکوزیته گرداب‌های نامیده می‌شود. با استفاده از این معادلات، نوسانات آشفتگی جریان به صورت تابعی از متغیرهای میانگین و ویسکوزیته گرداب‌های نوشته می‌شوند. بنابراین می‌توان با محاسبه ترم ویسکوزیته گرداب‌های، تانسور تنش رینولدز را با استفاده از این معادلات محاسبه نمود. برای این منظور مدلهایی بسط داده شده‌اند که از پرکاربردترین آنها از نظر دقت حل و هزینه محاسبات می‌توان به مدل‌های کی-اومگا^۱ و کی-اومگا اس‌اس‌تی^۲ اشاره نمود. هر کدام از این مدل‌ها دارای نقاط ضعف و نقاط قوتی هستند و می‌توانند در فیزیک خاصی از جریان کاربرد داشته باشند. در این مقاله از مدل کی-اومگا اس‌اس‌تی به عنوان مدل آشفتگی به علت جواب قابل قبول‌تر استفاده شده است [۲۰]. همچنین کوپل فشار-سرعت در روند

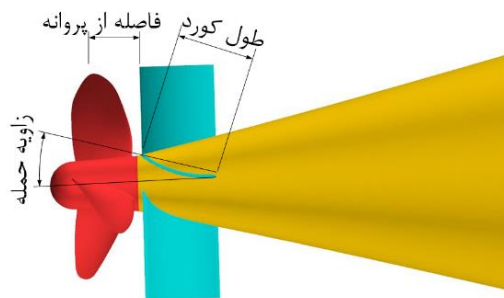
3 SIMPLE
4 Autonomous underwater vehicle
5 Unmanned underwater vehicle

1 $k-\varepsilon$
2 $k-\omega$ SST



شکل ۲. شماتیک بدنه از نوع مایرینگ [۲۲].

Fig. 2. Myring body schematic [22]



شکل ۳. شماتیک استاتور طراحی شده در جلو پروانه و تعریف پارامترهای بررسی شده

Fig. 3. The schematic of the designed stator in front of the propeller and the definition of the examined parameters

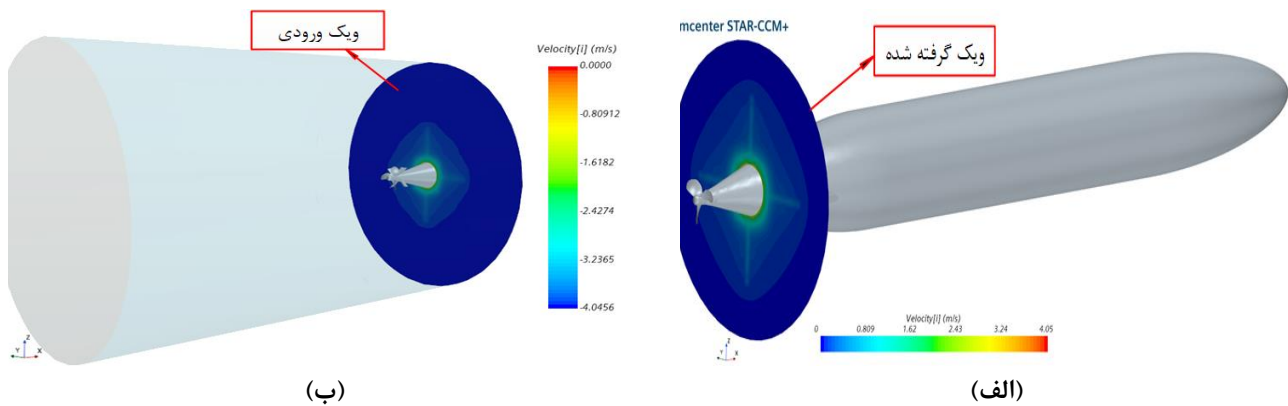
۴- روش حل

استاتور می‌تواند جهت کاهش گشتاور تولیدی و همچنین افزایش بازدهی سیستم رانش استفاده شود. پارامترهای زیادی در بهبود عملکرد استاتورها مؤثر هستند. با توجه به مطالعات انجام شده، طول کورد استاتور، فاصله از پروانه و زاویه حمله استاتور مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار می‌باشند که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در این مقاله به بررسی این پارامترها با استفاده از روش تاگوچی پرداخته شده است.

بررسی پارامترهای استاتور در پشت زیرسطحی در حالت شبیه‌سازی به صورت خودرانش نیازمند هزینه محاسباتی سنگین و زمان حل زیاد می‌باشد. بدین منظور برای کاهش زمان حل شبیه‌سازی‌ها، از دو شبیه‌سازی جداگانه همانند شکل ۴ به منظور بررسی استاتورها استفاده شده است. در شبیه‌سازی اول شکل ۴ (الف) شبیه‌سازی زیرسطحی به صورت خودرانش بدون استاتور در سرعت مورد نظر انجام شده است و پروفیل سرعت ورودی (ویک ورودی)

$$r(x) = \frac{1}{2}d - \left(\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan \theta}{c} \right) (x - a - b)^2 + \left(\frac{d}{c^3} - \frac{\tan \theta}{c^2} \right) (x - a - b)^3 \quad (9)$$

که x فاصله محوری نقاط منحنی از دماغه زیرسطحی، a ، b و c به ترتیب طول دماغه، قسمت میانی و دنباله، d قطر قسمت میانی، θ نیم زاویه القایی دنباله و n متغیر تعریفی تغییر شکل دماغه می‌باشند. با تغییر هر یک از این پارامترها می‌توان شکل‌های مختلفی از بدنه ایجاد کرد. در زیرسطحی بررسی شده در این مقاله، نیم زاویه القایی دنباله زیرسطحی برابر با ۱۰ درجه و متغیر تغییر شکل دماغه برابر با ۱/۸ می‌باشد. همچنین از یک پروانه سری بی با قطر ۰/۱۷ متر در پشت زیرسطحی استفاده شده است.



شکل ۴. شبیه‌سازی دو قسمتی زیرسطحی جهت بررسی استاتور (الف) شبیه‌سازی اول زیرسطحی به صورت خودرانیش جهت دریافت پروفیل سرعت (ویک) (ب) شبیه‌سازی دوم قسمت عقب شناور با پروانه و استاتور به همراه پروفیل سرعت ورودی جهت بررسی استاتور

Fig. 4. Two-part simulation of the underwater vehicle to examine the stator: (a) The first simulation of the self-propulsion underwater vehicle to obtain the velocity distribution (wake), (b) The second simulation of the rear part of the underwater vehicle with propeller and stator along with the input velocity distribution to check the stator

۵- نتایج

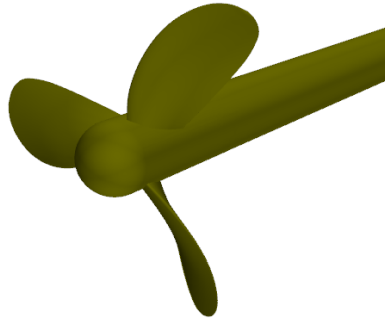
۵-۱- شبکه‌بندی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی مدل، باید داده‌های تجربی مدل و نمودارهای ضرایب هیدرودینامیکی آن موجود باشد. بدین منظور ابتدا یک پروانه سری بی سه پره با قطر ۲۴ سانتی متر با نسبت سطح گسترش یافته ۰/۳ جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، مورد تحلیل قرار گرفته است. هندسه پروانه سری بی در شکل ۵ و مشخصات اصلی پروانه در جدول ۲ ارائه شده است.

برای تعیین محدوده دامنه محاسباتی جریان از یک استوانه استفاده شده است. بدین منظور فاصله مرز ورودی از مرکز هاب ۵ برابر قطر پروانه، مرز خروجی ۱۳ برابر قطر پروانه و قطر استوانه ۱۰ برابر قطر پروانه در نظر گرفته شده است. به طور کلی شبیه‌سازی جریان حول پروانه با توجه به اینکه مرزهای جامد در سیال دارای حرکت دورانی هستند، با دو رویکرد متفاوت قابل تحلیل است، رویکرد اول دستگاه مختصات متحرک و رویکرد دوم روش دینامیک (پره متحرک) می‌باشد. دستگاه مختصات چرخان در مسائلی استفاده می‌شود که میدان سیال در حین حرکت تغییر شکل نداشته باشد و جریان نسبت به دستگاه مختصات پایا خواهد بود و فقط ترم‌های اضافی شتاب به معادلات اضافه می‌شود. در این مقاله با بررسی فیزیک مسئله از رویکرد دوم روش دینامیک (پره متحرک) استفاده شده است. همچنین دامنه

نشان داده شده در شکل ذخیره گردیده است. سپس این پروفیل سرعت در شبیه‌سازی دوم شکل ۴ (ب) به عنوان ورودی به شبیه‌سازی قسمت عقب زیرسطحی همراه با استاتور و پروانه چرخان استفاده گردیده است. با این کار در شبیه‌سازی دوم، قسمت عقب شناور و پروفیل سرعت ورودی آن که دارای اهمیت است، وجود دارند و قسمت جلوی شناور به علت کاهش زمان محاسبات حذف گردیدند. در این حالت در زمان بسیار کمتر می‌توان با دقت بالا و خطای محاسباتی بسیار کم پروانه و استاتور را مورد بررسی قرار داد. این نمونه شبیه‌سازی‌های جداگانه در مراجع [۱] و [۲۷-۲۳] نیز ارائه شده است.

دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی پروانه همراه با قسمت عقب شناور و استاتور در شکل ۴ (ب) قابل مشاهده است. برای شبیه‌سازی زیرسطحی و دریافت ویک نیز از دامنه محاسباتی با ابعاد $L_8 \times L_p \times L_f$ استفاده شده است (که L طول زیرسطحی است). بر اساس کنفرانس بین‌المللی حوضچه کشش^۱، مقدار گام زمانی در شبیه‌سازی باید طوری انتخاب شود که پروانه در هر گام زمانی بین ۰/۵ تا ۲ درجه دوران کند [۲۸]. با توجه به این موضوع مقدار گام زمانی ۰/۰۰۰۲۷۸ ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی پس از همگرا شدن حل در زمان میانگین گرفته شده است.



شکل ۵. هندسه پروانه سری بی

Fig. 5. B series propeller geometry

جدول ۲. مشخصات اصلی پروانه سری بی

Table 2. The main specifications of the B series propeller

مقدار	مشخصات
۲۴۰	قطر (میلیمتر)
۳	تعداد پره
۰/۲	نسبت قطرهاب به قطر پروانه (d/D)
۱/۳	نسبت میانگین پیچ به قطر پروانه (P/D)
۰/۳	نسبت سطح گسترش یافته (AE/AO)
راستگرد	جهت چرخش پروانه

مقایسه شده‌اند. شکل ۸ نمودارهای بررسی استقلال از شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸ تغییر شبکه‌بندی از ۳/۵ میلیون به شبکه‌بندی ۴/۵ و ۷/۵ میلیون، ضرایب پیشران و گشتاور تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد. لذا، شبکه با تعداد ۳/۵ میلیون برای دامنه محاسباتی انتخاب شده است. همچنین ۴ شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی پشت بدنه زیرسطحی به همراه ویک ورودی برای بررسی استقلال از شبکه شبیه‌سازی تولید شده است. شکل ۸ نمودار ضرایب پیشران و گشتاور پروانه در پشت زیرسطحی در ضریب پیشروی ۰/۸۵ در ۴ شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۸ تغییر از شبکه‌بندی ۲/۵ میلیون به شبکه‌بندی ۴ و ۷ میلیون، در ضرایب پیشران و گشتاور تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. لذا، شبکه با تعداد ۲/۵ میلیون برای دامنه محاسباتی انتخاب شده است.

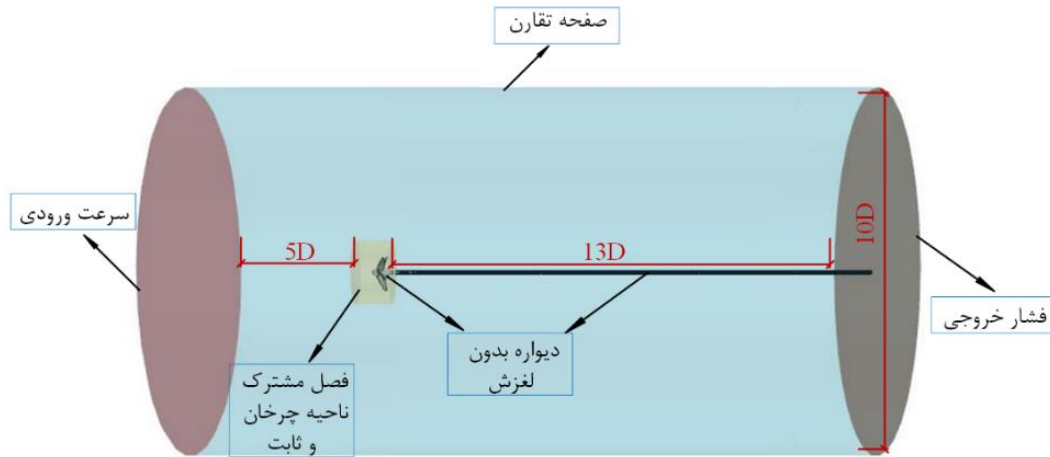
به منظور اطمینان از صحت بررسی استقلال از شبکه از روش همگرایی

محاسباتی شرایط مرزی بکار رفته شده در شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است.

برای شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی از شبکه‌بندی سازمان یافته در نرم‌افزار استار سی‌ام‌سی‌ام استفاده شده است. اندازه شبکه در محل‌هایی چون نزدیک جسم، درون ناحیه چرخان و همچنین ناحیه پشت جسم ریزتر شده است. همچنین فاصله اولین شبکه محاسباتی از دیواره ۰/۰۸ میلیمتر و تعداد شبکه‌های داخل لایه مرزی ۴ شبکه در نظر گرفته شده است. مقدار فاصله بدون بعد^۱ در نزدیک دیواره کمتر از ۴۰ می‌باشد. شکل ۷ شبکه‌بندی دامنه محاسباتی بر روی سطح پروانه را نشان می‌دهد.

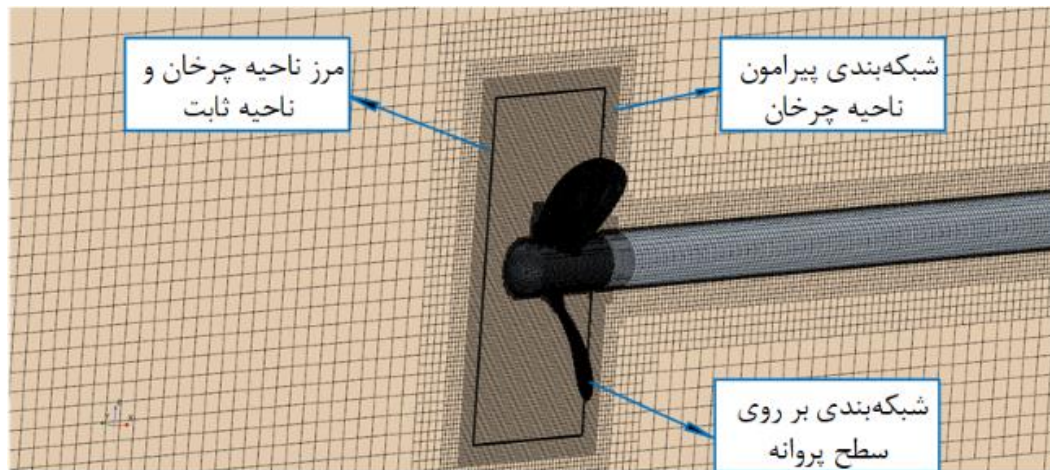
به منظور اطمینان از استقلال نتایج بدست آمده از شبکه، ۴ تعداد شبکه تولید شده و مقدار ضرایب پیشران و گشتاور در ضریب پیشروی ۰/۸ با هم

1 Y⁺



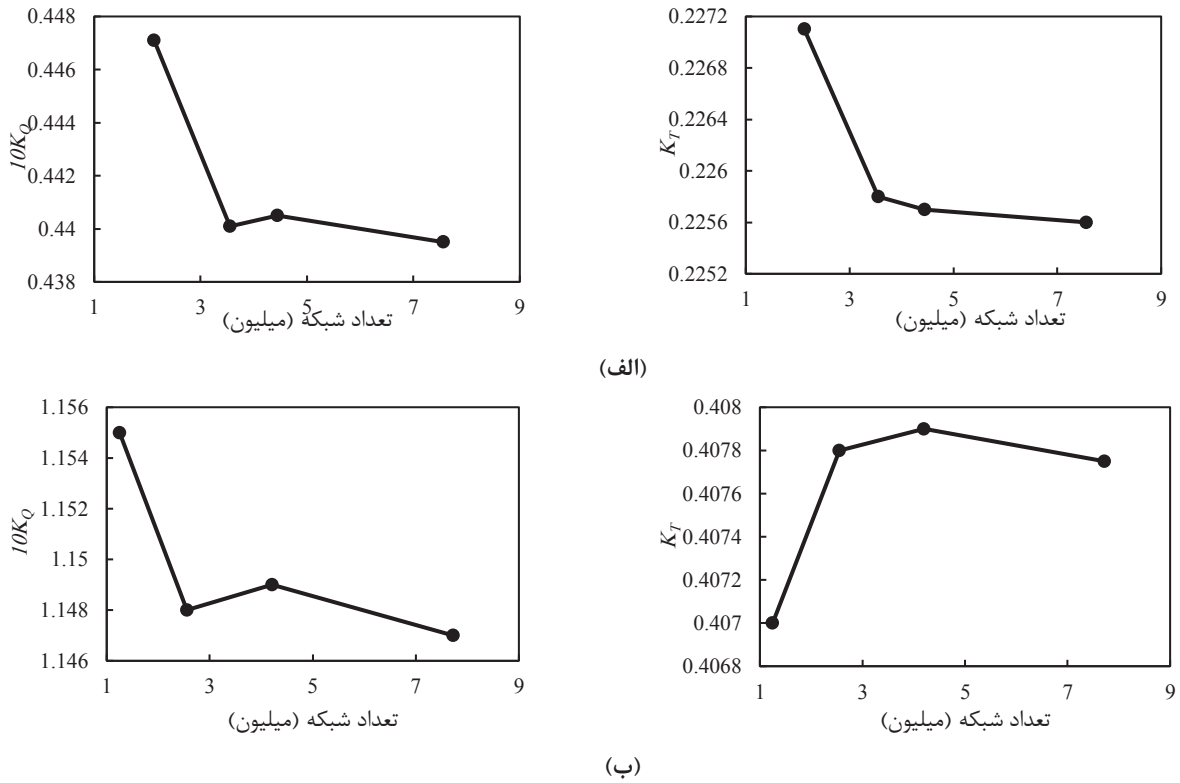
شکل ۶. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی بکار رفته شده در شبیه‌سازی

Fig. 6. Computational domain and boundary conditions of simulation



شکل ۷. شبه‌بندی بر روی پروانه و دامنه محاسباتی

Fig. 7. Mesh generation on the propeller and computational domain



شکل ۸. نمودار بررسی استقلال از شبکه (الف) برای پروانه سری بی (ب) برای شبیه‌سازی پشت بدنه زیرسطحی به همراه ویک ورودی، سمت راست: ضریب پیشران-سمت چپ: ضریب گشتاور

Fig. 8. Mesh independency diagram: (a) B series propeller, (b) behind the underwater vehicle with velocity wake inlet, right side: thrust coefficient and left side: torque coefficient

شبهه^۱ نیز (جدول ۳) استفاده شده است. این روش در سال ۲۰۰۸ میلادی توسط کلیک ارائه شده است که جزئیات فرمول‌بندی این روش در مرجع [۲۹]، ارائه شده است. در این مقاله بطور خلاصه این پارامترها معرفی می‌گردند.

N تعداد شبکه‌بندی، h اندازه میانگین شبکه، r نسبت میانگین شبکه، φ مقدار ضریب پیشران و یا گشتاور پروانه، ε اختلاف ضریب پیشران و یا گشتاور پروانه در اندازه شبکه‌های مختلف و p مرتبه ظاهری است که فرمول آن در زیر ارائه شده است.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (10)$$

1 Grid Convergence Index (GCI)

که:

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (11)$$

$$s = 10 \operatorname{sgn} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) \quad (12)$$

که در آن، فاکتور r برای سه شبکه مختلف، یعنی (۱) ریز، (۲) متوسط و (۳) درشت $r_{21} = \frac{h_2}{h_1}$ ، $r_{32} = \frac{h_3}{h_2}$ (که h_i مقدار میانگین اندازه شبکه که از تعداد شبکه (N_i) و دامنه محاسباتی تعیین شده است) می‌باشد. پارامتر ε به صورت $\varepsilon_{r1} = \varphi_r - \varphi_1$ ، $\varepsilon_{r3} = \varphi_r - \varphi_3$ است که در آن φ_i نشان‌دهنده جواب (در اینجا K_Q و K_T) روی تعداد شبکه‌بندی مورد

جدول ۳. خطای گسسته‌سازی شبیه‌سازی بر اساس روش همگرایی شبکه

Table 3. Discretization error of simulation based on the Grid Convergence Index (GCI)

پارامتر	ضریب پیشران در شبیه‌سازی پروانه سری B	ضریب پیشران در شبیه‌سازی پروانه سری B	ضریب پیشران در شبیه‌سازی قسمت عقب شناور همراه با ویک ورودی	ضریب پیشران در شبیه‌سازی قسمت عقب شناور همراه با ویک ورودی
تعداد شبکه (ریز) N_1	۷۵۵۸۲۴۵	۷۵۵۸۲۴۵	۷۷۲۴۲۵۷	۷۷۲۴۲۵۷
تعداد شبکه (متوسط) N_2	۳۵۵۴۷۵۸	۳۵۵۴۷۵۸	۲۵۵۵۱۳۳	۲۵۵۵۱۳۳
تعداد شبکه (درشت) N_3	۲۱۲۶۶۵۸	۲۱۲۶۶۵۸	۱۲۴۹۱۴۵	۱۲۴۹۱۴۵
نسبت اندازه شبکه‌بندی ریز r_{21}	۱/۲۸۵۹	۱/۲۸۵۹	۱/۴۴۵۹	۱/۴۴۵۹
نسبت اندازه شبکه‌بندی درشت r_{32}	۱/۱۸۶۸	۱/۱۸۶۸	۱/۲۶۹۴	۱/۲۶۹۴
جواب شبکه‌بندی ریز φ_1	۰/۲۲۵۶	۰/۴۳۹۵	۱/۱۴۷	۰/۴۰۷۷۵
جواب شبکه‌بندی متوسط φ_2	۰/۲۲۵۸	۰/۴۴۰۱	۱/۱۴۸	۰/۴۰۷۸
جواب شبکه‌بندی درشت φ_3	۰/۲۲۷۱	۰/۴۴۷۱	۱/۱۵۵	۰/۴۰۷
نسبت ظاهری ρ	۱۱/۴۷۶۷	۱۴/۶۹۱۲	۸/۵۵۷۸	۱۱/۴۱۸
خطای نسبی تقریبی e_a^{21}	۰/۰۸۸۷	۰/۱۳۶۵	۰/۰۸۷۲	۰/۰۱۲۲۶
خطای نسبی برون‌یابی شده e_{ext}^{21}	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۸۸	۰/۰۰۰۱۹
درصد خطای شبکه‌بندی متوسط GCI_{Mean}^{21}	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۰۲

آمده است که مقدار مطلوبی است.

شکل ۹ مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی پروانه سری بی در آب آزاد را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی با درصد خطای کم نسبت به داده‌های تجربی [۳۰] بدست آمده است. لازم به ذکر است بیشینه اختلاف در بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی در ضریب پیشروی ۱/۲ می‌باشد، که درصد اختلاف برای ضریب پیشران ۹ درصد، برای ضریب گشتاور ۸ درصد و برای بازده پروانه ۶ درصد نسبت به داده‌های تجربی می‌باشد.

۵-۲- مطالعه پارامترهای استاتور با استفاده از روش تاگوچی

همانطور که در بالا بیان شده است پارامترهای زیادی در بهبود عملکرد استاتورها تاثیرگذار هستند. طبق مطالعات انجام شده سه پارامتر طول کورد استاتور، فاصله استاتور از پروانه و زاویه حمله استاتور می‌توانند یکی از مهمترین پارامترهای قابل بررسی باشند. به منظور بررسی پارامترها، هر یک با سه اندازه (مقدار) مختلف در نظر گرفته شده که در جدول ۴ ارائه شده است (R بیانگر شعاع پروانه می‌باشد).

روش‌های مختلف برای بررسی تأثیر یک پارامتر وجود دارد. در حالت

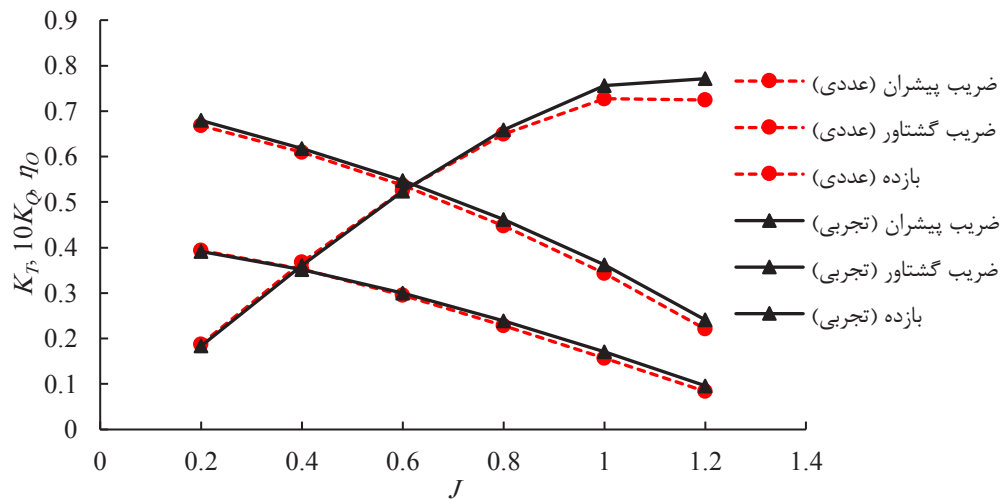
بررسی است. حال خطای نسبی تقریبی (e_a^{22}) ، خطای نسبی برون‌یابی (e_{ext}^{22}) و ضریب همگرایی شبکه بصورت زیر بدست می‌آید.

$$e_a^{32} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_2} \quad (13)$$

$$e_{ext}^{32} = \frac{\varphi_{ext}^{23} - \varphi_2}{\varphi_{ext}^{23}} \quad (14)$$

$$GCI_{Mean}^{32} = \frac{1.25e_a^{32}}{r_{32}^p - 1} \quad (15)$$

مقدار ضریب همگرایی شبکه‌بندی متوسط برای ضریب پیشران و ضریب گشتاور پروانه سری بی در ضریب پیشروی ۰/۸ به ترتیب ۰/۰۰۶۶ و ۰/۰۰۴۴ درصد و برای ضریب پیشران و گشتاور شبیه‌سازی قسمت عقب شناور در ضریب پیشروی ۰/۸۵ به ترتیب ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۴۹ درصد بدست



شکل ۹. مقایسه نتایج عددی و داده‌های تجربی برای پروانه سری بی در آب آزاد

Fig. 9. Comparison of numerical results and experimental data for B series propeller in open water

جدول ۴. مقادیر در نظر گرفته شده هر یک از پارامترهای استاتور

Table 4. The considered values of each of the stator parameters

زاویه حمله [درجه]	طول کورد	فاصله از پروانه	سطح
۱۲/۵	۰/۴۹R	۰/۳۹R	۱
۱۵	۰/۶۵R	۰/۴۷R	۱
۱۷/۵	۰/۸۲R	۰/۵۴R	۱

معنی ۱۸ آزمایش) است. آرایه‌های دیگری مانند $L_4, L_8, L_9, L_{12}, L_{16}$ با توجه به وجود سه پارامتر در سه سطح بررسی از L_9 برای شبیه‌سازی با استفاده از جداول اورتوگونال استفاده شده است. با قرارگیری سطوح هر پارامتر، مقادیر آنها برای هر آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است.

به دو روش می‌توان تأثیر حالات مختلف استاتور را با یکدیگر مقایسه نمود. در روش اول می‌توان فرض نمود که قدرت موتور شناور ثابت است و شبیه‌سازی با این هدف انجام می‌شود که با همان توان موتور به بیشینه سرعت ممکن رسیده شود. پس در این حالت باید گشتاور و دور موتور در هر شبیه‌سازی ثابت باشند. اما در حالت دوم فرض می‌گردد سرعت شناور ثابت است و هدف این است شناور با بیشینه بازده (کمینه توان موتور) در سرعت

عادی اگر از روش فاکتوریل استفاده گردد، در صورت بررسی سه پارامتر در سه سطح مختلف در مجموع باید $3^3=27$ شبیه‌سازی انجام گردد. اما برای صرفه جویی در زمان و انجام محاسبات، در اینجا از روش تاگوچی برای بررسی این سه پارامتر استفاده گردیده است. تاگوچی برای طراحی و اجرای آزمایش‌ها، طبق قواعد خاصی مجموعه‌ای از جدول‌ها با عنوان آرایه متعامد (اورتوگونال) تهیه کرد. آرایه‌های متعامد این امکان را فراهم می‌کنند تا با انجام دادن کمترین تعداد آزمایش، اثرهای اصلی و متقابل بررسی شوند. دو فاکتور دو سطحی با چهار روش به صورت $(1,1), (2,1), (1,2), (2,2)$ ترکیب می‌شوند. زمانیکه دو ستون یک آرایه این ترکیبات را در دفعات یکسانی نشان دهد، به ستون‌ها متعامد یا بالانس شده می‌گویند. متداول‌ترین مدل‌های آرایه متعامد L_8 (به معنی ۸ آزمایش)، L_{16} (به معنی ۱۶ آزمایش) و L_{18} (به

جدول ۵. مقادیر پارامترهای استاتور در شبیه‌سازی به روش تاگوچی

Table 5. Values of stator parameters in simulations based on Taguchi method

شماره شبیه‌سازی	فاصله از پروانه	طول کورد	زاویه حمله (درجه)
شبیه‌سازی اول	۰/۳۹R	۰/۴۹R	۱۲/۵
شبیه‌سازی دوم	۰/۳۹R	۰/۶۵R	۱۵
شبیه‌سازی سوم	۰/۳۹R	۰/۸۲R	۱۷/۵
شبیه‌سازی چهارم	۰/۴۷R	۰/۴۹R	۱۵
شبیه‌سازی پنجم	۰/۴۷R	۰/۶۵R	۱۷/۵
شبیه‌سازی ششم	۰/۴۷R	۰/۸۲R	۱۲/۵
شبیه‌سازی هفتم	۰/۵۴R	۰/۴۹R	۱۷/۵
شبیه‌سازی هشتم	۰/۵۴R	۰/۶۵R	۱۲/۵
شبیه‌سازی نهم	۰/۵۴R	۰/۸۲R	۱۵

$$\eta_{B-p} = \frac{J K_{T_p}}{2\pi K_{Q_p}} \quad (21)$$

$$\eta_{B-t} = \frac{J K_{T_t}}{2\pi K_{Q_p}} \quad (22)$$

مورد نظر حرکت کند. پس در این حالت سرعت حرکت شناور و در نتیجه نیروی پیشران کل سیستم رانش در هر شبیه‌سازی باید با هم برابر باشند. در جدول ۶ نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است. در این جدول دیده می‌شود که با تغییر دور چرخش پروانه، در همه حالت‌ها نیروی پیشران کل تقریباً یکسان و برابر ۱۳۵/۸ نیوتن شده است. در این بخش ضریب گشتاور پروانه و استاتور، ضریب پیشران پروانه و استاتور و بازده سیستم رانش با استفاده از فرمول‌های ۱۶ تا ۲۲ بدست آمده است.

در فرمول‌های بالا زیرنویس p برای پروانه، s برای استاتور و t برای پروانه با استاتور است. لازم به ذکر است که در فرمول به علت اینکه گشتاور استاتور تاثیری در بازده سیستم رانش و نوع موتور ندارد و صرفاً گشتاور اضافی بدنه شناور را خنثی می‌کند، در نتیجه در این فرمول در نظر گرفته نشده است.

به طور کلی، تاگوچی دو روش را برای تحلیل نتایج ارائه داده است؛ روش اول روش استاندارد است که بر مبنای محاسبه اثر فاکتورها و انجام تحلیل واریانس انجام می‌پذیرد. روش دوم که تاگوچی آن را برای آزمایش‌های همراه با تکرار بسیار توصیه کرده است، روش نسبت سیگنال به نویز^۱ است. این تحلیل با استفاده از تغییر نتایج، بهترین و قوی‌ترین شرایط کاری را تعیین می‌کند. به عبارت دیگر، این نسبت پراکندگی در اطراف یک مقدار مشخص را بیان می‌کند. هر چه این نسبت بیشتر باشد، پراکندگی کمتر بوده

$$K_{T_p} = \frac{T_p}{\rho n_p^2 D_p^4} \quad (16)$$

$$K_{T_s} = \frac{T_s}{\rho n_s^2 D_p^4} \quad (17)$$

$$K_{T_t} = K_{T_p} + K_{T_s} \quad (18)$$

$$K_{Q_p} = \frac{Q_p}{\rho n_p^2 D_p^5} \quad (19)$$

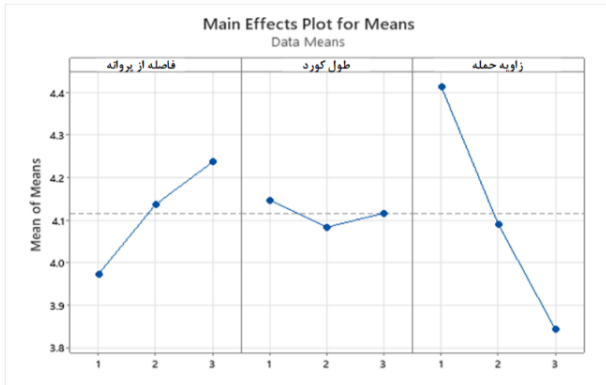
$$K_{Q_s} = \frac{Q_s}{\rho n_s^2 D_p^5} \quad (20)$$

1 Signal to Noise Ratio

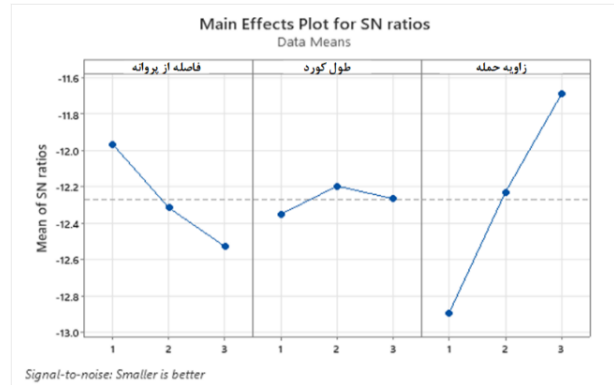
جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی‌های تاگوچی در سرعت ۴/۵ m/s

Table 6. The results of simulations based on Taguchi method at the speed of 4.5 m/s

بیشترین بازدهی	کمترین گشتاور	شبیه‌سازی نهم	شبیه‌سازی هشتم	شبیه‌سازی هفتم	شبیه‌سازی ششم	شبیه‌سازی پنجم	شبیه‌سازی چهارم	شبیه‌سازی سوم	شبیه‌سازی دوم	شبیه‌سازی اول	بدون استاتور	
۱۸/۵۹۲	۱۸/۱۸۱	۱۸/۴۲۵	۱۸/۵۷۲	۱۸/۳۱۲	۱۸/۵۵۷	۱۸/۲۴۶	۱۸/۳۷۷	۱۸/۲۲۲	۱۸/۲۸۹	۱۸/۴۱۷	۲۰	دور چرخش پروانه n [rps]
۱۴۲/۷۲	۱۵۶/۰۴	۱۴۹/۴	۱۴۴/۳۱	۱۴۹/۱۹	۱۴۶/۴۱	۱۵۴/۰۱	۱۴۶/۴۹	۱۵۹/۳۳	۱۵۰/۸۸	۱۴۴/۸۴	۱۳۶/۰۸	پیشران پروانه T_p [N]
-۷/۱۷	-۲۰/۲۸	-۱۳/۸۳	-۸/۶۶	-۱۳/۴۵	-۱۰/۸۶	-۱۸/۳۲	-۱۰/۸	-۲۳/۵	-۱۴/۹۸	-۹/۱۱	-	پیشران استاتور T_s [N]
۱۳۵/۵۵	۱۳۵/۷۶	۱۳۵/۵۷	۱۳۵/۶۵	۱۳۵/۷۴	۱۳۵/۵۵	۱۳۵/۶۹	۱۳۵/۶۹	۱۳۵/۸۳	۱۳۵/۹	۱۳۵/۷۳	۱۳۶/۰۸	پیشران کل T_t [N]
۶/۴۶	۶/۹۹	۶/۷۷	۶/۵۴	۶/۷۵	۶/۶۴	۶/۹۹	۶/۶۱	۷/۲۱	۶/۷۶	۶/۵۴	۶/۵۲	گشتاور پروانه Q_p [N.m]
-۱/۹۵	-۳/۳۷	-۲/۵۷	-۲/۰۳	-۲/۷۵	-۲/۲۰	-۳/۱۷	-۲/۴۶	-۳/۵	-۲/۸۴	-۲/۲۵	-	گشتاور استاتور Q_s [N.m]
۴/۵۱	۳/۶۲	۴/۲	۴/۵۱	۴/۰۰	۴/۴۴	۳/۸۲	۴/۱۵	۳/۷۱	۳/۹۲	۴/۲۹	۶/۵۲	گشتاور کل Q_t [N.m]
۳۰/۸۲	۴۴/۴۷	۳۵/۵۸	۳۰/۸۲	۳۸/۶۵	۳۱/۹۰	۴۱/۴۱	۳۶/۳۴	۴۳/۰۹	۳۸/۸۷	۳۴/۲۰	-	بهبود گشتاور کل [%]
۰/۴۹۵	۰/۵۶۵	۰/۵۲۸	۰/۵۰۱	۰/۵۳۳	۰/۵۱۰	۰/۵۵۵	۰/۵۲۰	۰/۵۷۵	۰/۵۴۱	۰/۵۱۲	۰/۴۰۷	ضریب پیشران پروانه K_{T_p} [-]
-۰/۰۲۴	-۰/۰۷۳	-۰/۰۴۸	-۰/۰۳۰	-۰/۰۴۸	-۰/۰۳۷	-۰/۰۶۶	-۰/۰۳۸	-۰/۰۸۴	-۰/۰۵۳	-۰/۰۳۲	-	ضریب پیشران استاتور K_{T_s} [-]
۰/۴۷۱	۰/۴۹۲	۰/۴۷۹۲	۰/۴۷۰۹	۰/۴۸۴۹	۰/۴۷۲۲	۰/۴۸۹	۰/۴۸۱۶	۰/۴۹۰۵	۰/۴۸۸	۰/۴۷۹۷	۰/۴۰۷	ضریب پیشران کل K_{T_t} [-]
۰/۱۳۱	۰/۱۴۹	۰/۱۴۱	۰/۱۳۴	۰/۱۴۲	۰/۱۳۶	۰/۱۴۸	۰/۱۳۸	۰/۱۵۳	۰/۱۴۲	۰/۱۳۶	۰/۱۱۵	ضریب گشتاور پروانه K_{Q_p} [-]
۰/۵۴۶	۰/۵۶۳	۰/۵۵۱	۰/۵۴۷	۰/۵۵۶	۰/۵۴۷	۰/۵۵۶	۰/۵۵۵	۰/۵۵۸	۰/۵۶۰	۰/۵۵۳	۰/۴۷۹	بازده پروانه η_{B-p} [-]
۰/۵۱۸۶	۰/۴۹۰	۰/۴۹۹۶	۰/۵۱۳۳	۰/۵۰۴۸	۰/۵۰۶۲	۰/۴۸۹۲	۰/۵۱۳۳	۰/۴۷۵۷	۰/۵۰۵	۰/۵۱۸۳	۰/۴۷۹	بازده کل η_{B-t} [-]
۸/۲۶	۲/۲۹	۴/۳۰	۷/۱۶	۵/۳۸	۵/۶۷	۲/۱۲	۷/۱۶	-۰/۶۸	۵/۴۲	۸/۲۰	-	بهبود بازدهی [%]
۷۵۴/۹	۸۰۰	۷۸۴/۰۰	۷۶۳/۴۸	۷۷۶/۴۸	۷۷۳/۹۱	۸۰۱/۲۳	۷۶۳/۴	۸۲۵/۰۵	۷۷۸/۰۱	۷۵۶/۸۱	۸۱۹/۳۲	توان تحویلی P_D [W]

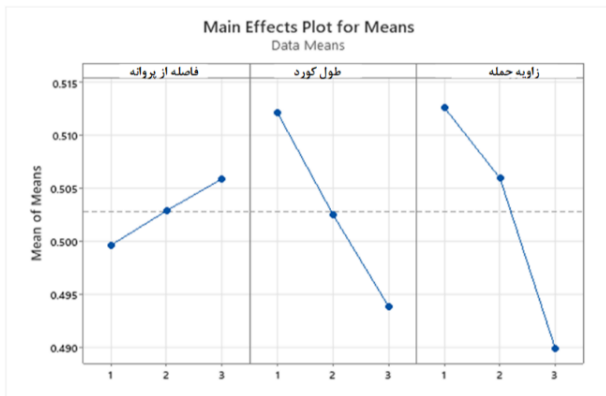


مقدار متوسط

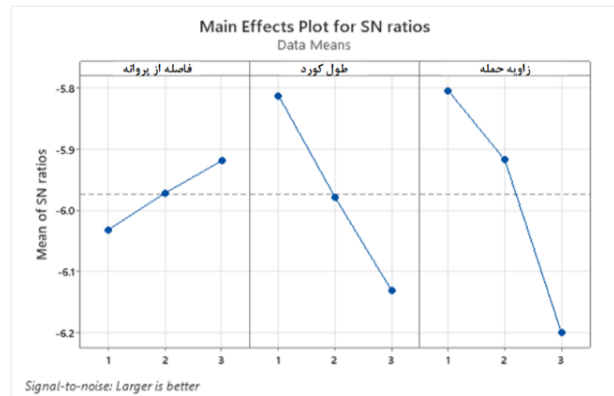


نسبت سیگنال به نویز

(الف)



مقدار متوسط



نسبت سیگنال به نویز

(ب)

شکل ۱۰. نتایج روش تاگوچی (الف) از نظر کمینه گشتاور (ب) از نظر بیشینه بازده کل، سمت راست: نسبت سیگنال به نویز و سمت چپ: مقدار متوسط

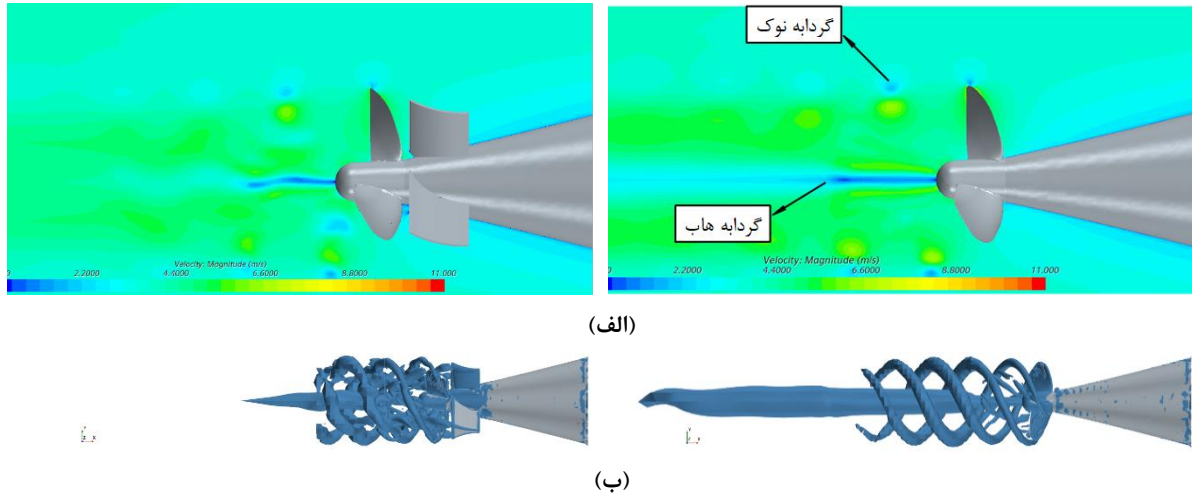
Fig. 10. Taguchi results: (a) in terms of minimum torque (b) in terms of maximum total efficiency, right side: signal to noise ratio and left side: average value

حالاتی از شبیه‌سازی است که پارامتر مورد نظر در آن سطح قرار داشته است. پس در صورت نیاز به بیشینه مقدار جواب (برای مثال در شکل ۱۰ (ب) هدف دستیابی به بیشینه مقدار بازده است)، هر چه مقدار میانگین جواب برای سطح بیشتر باشد آن سطح عملکرد بهتری برای دستیابی به هدف نهایی خواهد داشت. اما در شکل ۱۰ (الف) از آنجا که هدف دستیابی به کمینه گشتاور است، هر چه مقدار میانگین جواب برای سطح کمتر باشد آن سطح عملکرد بهتری برای دستیابی به هدف نهایی دارد.

با تحلیل نتایج به روش تاگوچی برای بدست آوردن کمینه گشتاور در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می‌شود که در صورتیکه فاصله استاتور از پروانه در سطح یک (که در جدول ۴ سطح یک فاصله استاتور از پروانه نزدیکترین

و اثر آن متغیر مهم‌تر خواهد بود. نتایج تحلیل روش تاگوچی برای دو حالت کمینه گشتاور و بیشینه بازده در شکل ۱۰ ارائه شده است.

در قسمت (راست) شکل ۱۰ مقدار سیگنال به نویز تحلیل به روش تاگوچی ارائه شده است. مقدار سیگنال به نویز هر چه بزرگتر باشد آن سطح از پارامتر تاثیر مفید برای دستیابی به هدف مورد نظر دارد. همچنین با بررسی شیب این نمودار می‌توان به میزان حساسیت جواب نسبت به تغییر سطوح پارامتر مورد نظر دست یافت. برای مثال در شکل ۱۰ (راست) دیده می‌شود که نتیجه شبیه‌سازی به تغییرات زاویه حمله استاتور حساسیت بیشتر نسبت به دیگر پارامترها دارد. اما در قسمت (چپ) شکل ۱۰ مقدار متوسط هر سطح دیده می‌شود. مقدار متوسط هر سطح در واقع میانگین جواب مورد نظر در



شکل ۱۱. (الف) سرعت جریان و گردابه ایجاد شده در نوک و هاب پروانه در پشت زیرسطحی (ب) توزیع گردابه با معیار $Q=1000 \text{ s}^{-2}$ ، سمت راست: بدون استاتور - سمت چپ: همراه با استاتور طراحی شده

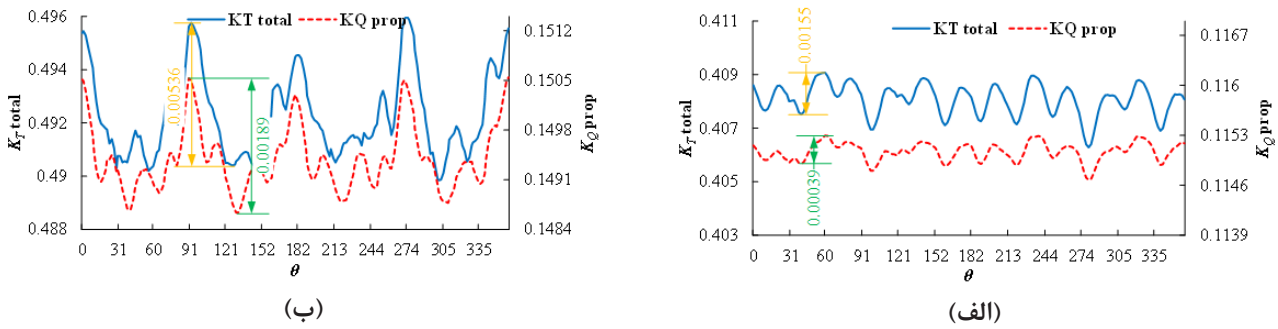
Fig. 11. (a) Flow velocity and vorticity created at the tip and hub of the propeller behind the underwater vehicle (b) Distribution of vorticity with $Q=1000 \text{ s}^{-2}$ criterion, right side: without stator and left side: with stator

۸۰۰ وات است، یعنی $2/3$ درصد باعث کاهش توان موتور گردیده است. همچنین لازم به ذکر است که این نتایج بدست آمده محدود به دامنه تغییرات پارامترها در جدول ۵ است.

۵-۳- بحث و مقایسه

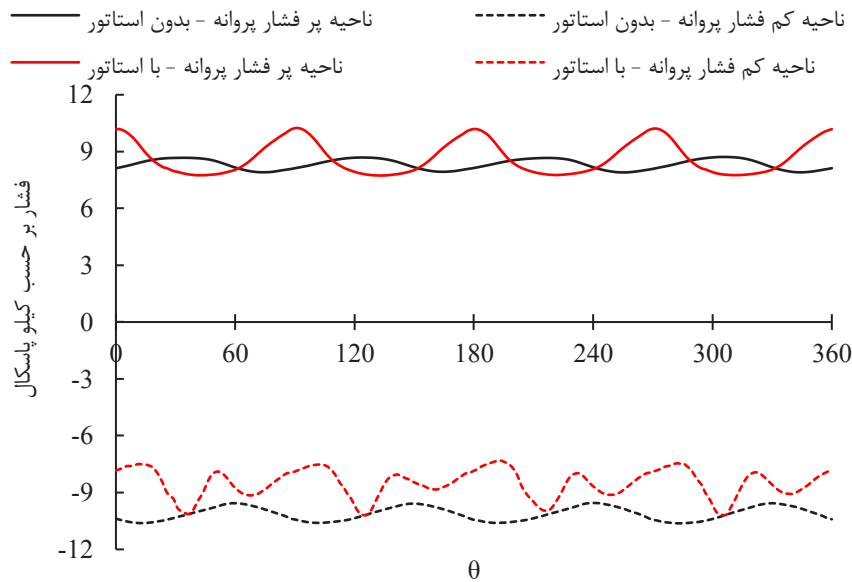
با توجه بر اینکه هدف از این پژوهش کاهش حرکت دورانی حول محور طولی زیرسطحی و بدون کاهش بازده پروانه بوده است، پس استاتور طراحی شده از نتایج روش تاگوچی از نظر کمینه گشتاور کل که مقدار گشتاور را $44/47$ درصد کاهش و بازدهی سیستم رانش را $2/29$ درصد افزایش داده است، به عنوان بهینه‌ترین استاتور انتخاب شده است که در این بخش عملکرد آن در پشت زیرسطحی با حالت بدون استاتور مقایسه و مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل ۱۱ سرعت جریان و گردابه ایجاد شده در قسمت نوک و هاب پروانه و توزیع گردابه پروانه با معیار Q ، در پشت زیرسطحی در حالت با و بدون استاتور طراحی شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود استاتور طراحی شده باعث کاهش گردابه ایجاد شده در نوک و هاب پروانه می‌شود. شکل ۱۲ ضریب پیشران کل و گشتاور پروانه در یک دور چرخش پروانه در پشت زیرسطحی در حالت بدون استاتور و همراه با استاتور را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود استاتور طراحی شده، درحالی‌که مقدار متوسط نیروی پیشران کل و گشتاور پروانه را در یک دور چرخش بترتیب $21/4\%$ و $29/6\%$

فاصله به پروانه یعنی $R/39$ (تعریف شده است)، قرار داشته باشد و طول کورد استاتور در سطح دو و زاویه حمله استاتور در سطح سه قرار داشته باشد، مقدار گشتاور کل باقیمانده در کمترین حالت خود قرار خواهد گرفت. اما با تحلیل نتایج به روش تاگوچی برای بدست آوردن بیشینه بازده در شکل ۱۰ (ب) مشاهده می‌شود که در صورتیکه فاصله استاتور از پروانه در سطح ۳ (بیشترین فاصله)، طول کورد در سطح ۱ (کوچک‌ترین طول کورد) و زاویه حمله استاتور در سطح ۱ (کوچک‌ترین زاویه حمله) باشد مقدار بازده در بیشینه حالت قرار خواهد گرفت. از این رو دو شبیه‌سازی با قرار گرفتن پارامترها در این سطوح انجام شده است و نتایج آنها در جدول ۶ مشاهده می‌شود که در صورتیکه استاتور در نزدیکترین فاصله از پروانه ($R/39$) قرار داشته باشد و طول کورد آن $R/65$ باشد و دارای زاویه حمله $17/5$ درجه باشد، مقدار گشتاور کل $44/47$ درصد کاهش یافته است و نکته قابل توجه افزایش همزمان بازده سیستم رانش است که $2/29$ درصد بهبود یافته است. در حالت بیشینه بازده، مقدار بازده $8/26$ درصد افزایش یافته است اما مقدار گشتاور کل $30/82$ درصد کاهش یافته است. پس در صورت نیاز به بازده بیشتر می‌توان از حالت بیشینه گشتاور استفاده نمود و با صرف نمودن $13/65$ درصد از گشتاور کل، مقدار $5/97$ درصد به بازده افزود. آنچه که حائز اهمیت است مربوط به توان تحویلی به پروانه است که بدون استاتور توان تحویلی $819/32$ وات است در حالی‌که با استفاده از استاتور مقدار توان برابر



شکل ۱۲. ضریب پیشران کل و ضریب گشتاور پروانه در یک دور چرخش پروانه (الف) بدون استاتور (ب) همراه با استاتور طراحی شده

Fig. 12. The total thrust coefficient and the propeller torque coefficient in one revolution of the propeller (a) without stator (b) with stator



شکل ۱۳. نوسانات فشار برای یک دور چرخش پروانه در $r/R=0.7$ و $C=0.4$

Fig. 13. Pressure fluctuations for one revolution of the propeller at $r/R=0.7$ and $C=0.4$

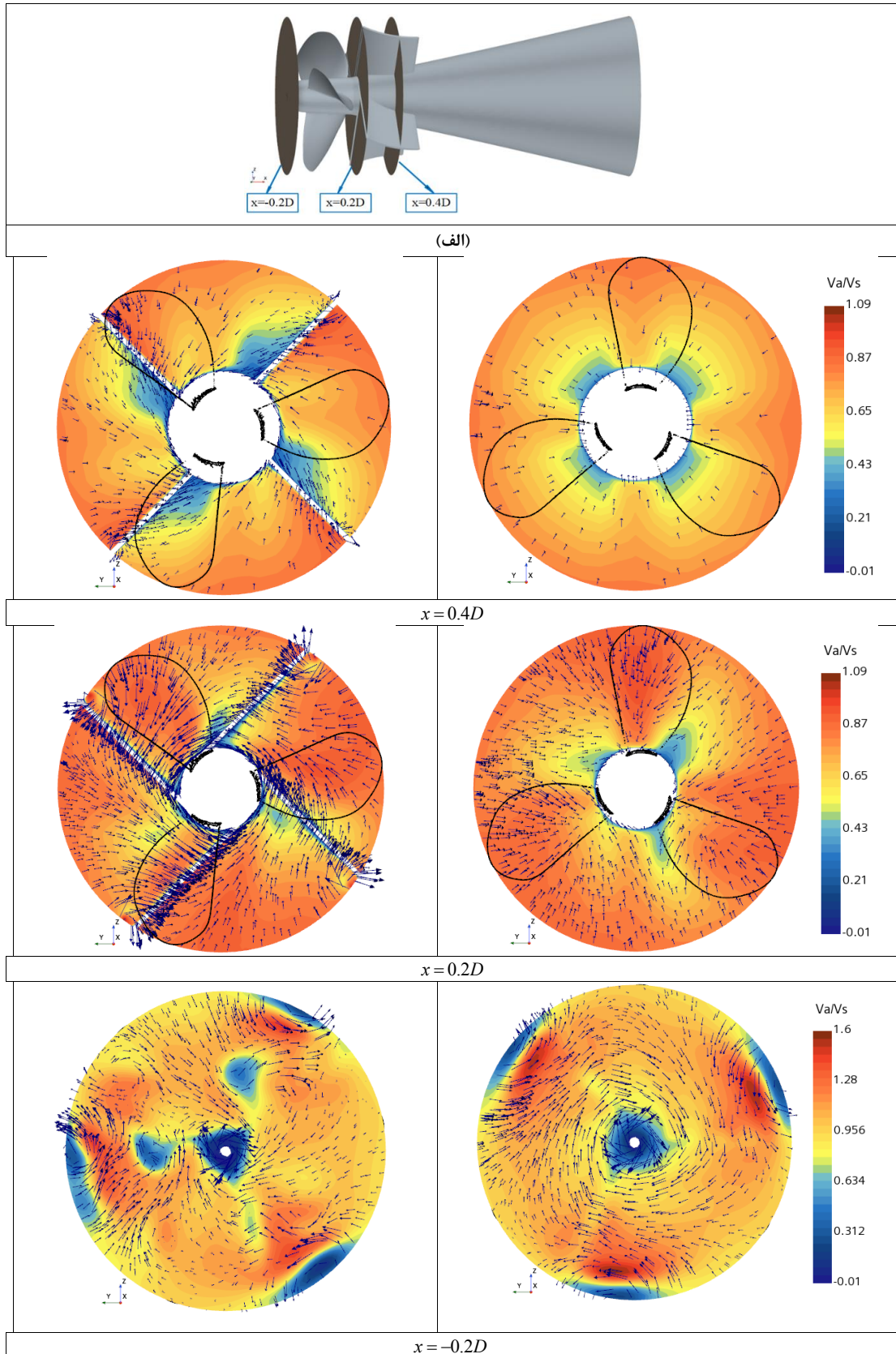
طول کورد پروانه در $r/R=0.7$ می‌باشد). مشاهده می‌شود استاتور طراحی شده باعث افزایش نوسانات فشار در ناحیه رخ و پشت پروانه در یک دور چرخش شده ولی تأثیر چندانی بر اختلاف فشار بین ناحیه رخ و پشت پروانه نمی‌گذارد. این نوسانات ناشی از فاصله کم بین استاتور و پروانه و همچنین تغییر جهت جریان ورودی به پروانه ایجاد شده است.

شکل ۱۴ تأثیر استاتور طراحی شده بر سرعت جریان محوری و متقاطع در سه موقعیت مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود استاتور

افزایش داده است، مقدار نوسانات گشتاور و نیروی پیشران را نیز در یک دور چرخش پروانه افزایش داده است.

شکل ۱۳ نوسانات فشار در یک نقطه در ناحیه رخ^۱ و پشت^۲ پروانه را نشان می‌دهد. موقعیت شعاعی این نقطه در $r=0.7R$ و موقعیت محوری آن در $C=0.4$ نسبت به لبه حمله است (که R بیانگر شعاع پروانه و C بیانگر

- 1 Face side
- 2 Back side



شکل ۱۴. (الف) موقعیت برش صفحات (ب) کانتورهای سرعت جریان محوری و متقاطع بدون استاتور (راست) و با استاتور طراحی شده (چپ) در موقعیت مختلف

Fig. 14. (a) Position of plates (b) contours of axial and cross flow velocity without stator (right) and with designed stator (left) in different positions

۷- فهرست علائم

J	ضریب پیشروی پروانه
T	نیروی پیشران پروانه در آب آزاد
T_p	نیروی پیشران پروانه در پشت بدنه
T_s	نیروی پیشران استاتور در پشت بدنه
T_t	نیروی پیشران کل در پشت بدنه
Q	گشتاور پروانه در آب آزاد
Q_p	گشتاور پروانه در پشت بدنه
Q_s	گشتاور استاتور در پشت بدنه
Q_t	گشتاور کل
P_D	توان تحویلی
K_T	ضریب پیشران پروانه در آب آزاد
K_{T_p}	ضریب پیشران پروانه در پشت بدنه
K_{T_s}	ضریب پیشران استاتور در پشت بدنه
K_{T_t}	ضریب پیشران کل در پشت بدنه
K_Q	ضریب گشتاور پروانه در آب آزاد
K_{Q_p}	ضریب گشتاور پروانه در پشت بدنه
K_{Q_s}	ضریب گشتاور استاتور در پشت بدنه
n	دور چرخش پروانه
D_p	قطر پروانه
V	سرعت زیرسطحی
N	تعداد شبکه
R	شعاع پروانه
c	طول کورد پره پروانه
x	فاصله محوری نقطه تخمین فشار تا لبه حمله پروانه
GCI	شاخص همگرایی شبکه علائم یونانی
η_o	بازده آب آزاد
η_{B-t}	بازده کل (پروانه و استاتور) در پشت بدنه
η_{B-p}	بازده پروانه در پشت بدنه
ρ	چگالی آب
π	عدد ثابت پی

باعث تغییر جهت جریان نسبت به پروانه شده است. استاتور جریان را خلاف جهت چرخش پروانه هدایت می‌کند که سبب کاهش افت لغزش پروانه در نتیجه بهبود عملکرد آن می‌شود و همچنین سبب کاهش حرکت دورانی حول محور طولی زیرسطحی می‌شود.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی استاتور پیش‌چرخش برای شناور زیرسطحی با دیدگاه بررسی همزمان کاهش گشتاور و افزایش بازده سیستم رانش پرداخته شده است. در بخش اول این مقاله به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی یک پروانه سری بی مورد شبیه‌سازی در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام قرار گرفته و نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی با درصد خطای کمتر از ۱۰ درصد نسبت به داده‌های تجربی بدست آمده است. در ادامه به طراحی استاتور جهت کاهش گشتاور تولیدی بدون کاهش بازدهی سیستم پیشران پرداخته شده است. بر اساس محاسبات عددی بدست آمده، نتایج زیر حاصل شده است:

- استاتور نهایی طراحی شده باعث کاهش ۴۴/۴۷٪ از مقدار گشتاور وارد به بدنه و همچنین بهبود ۲/۲۹٪ در بازده سیستم رانش شده است.
- متوسط نیروی پیشران و گشتاور نوسانی پروانه در یک سیکل چرخش نشان می‌دهد که با استفاده از استاتور در صورت یکسان بودن دور چرخش پروانه، مقدار نیروی پیشران ۲۱/۴٪ و مقدار گشتاور ۲۹/۶٪ افزایش می‌یابد.
- بر اساس ۹ شبیه‌سازی انجام شده با تغییر دور چرخش پروانه، در همه حالت‌ها نیروی پیشران کل تقریباً یکسان و برابر ۱۳۵/۸ نیوتن بدست آمده است.
- نتیجه مهم مربوط به توان تحویلی به پروانه است که بدون استاتور و با استاتور توان تحویلی به پروانه بترتیب برابر با ۸۱۹/۳۲ وات و ۸۰۰ وات که در نهایت منجر به کاهش ۲/۳ درصد از توان موتور گردیده است.

- of the Ship Propeller under Oscillating Flow with and Without Stator, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8 (2020) 56-61.
- [11] A. Nadery, H. Ghassemi, An overview of plans to increase efficiency and improve propeller performance and reduce ship fuel consumption, in: 20th Marine Industries Conference, Tehran, Iran, 2018, (in persian).
- [12] K. Koushan, V. Krasilnikov, M. Nataletti, L. Sileo, S. Spence, Experimental and numerical study of pre-swirl stators PSS, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (2020).
- [13] Y.m. Su, J.f. Lin, D.g. Zhao, C.y. Guo, H. Guo, Influence of a pre-swirl stator and rudder bulb system on the propulsion performance of a large-scale ship model, *Ocean Engineering*, 218 (2020) 108189.
- [14] M. Renilson, *Submarine Hydrodynamics*, 2 ed., Springer Cham, 2018.
- [15] G. Clarke, The choice of propulsor design for an underwater weapon, in: UDT conference, London, 1988.
- [16] M. Guner, E.J. Glover, Design method for propeller/propulsors on axisymmetric bodies, *Marine, Offshore and Ice Technology*, 5 (1994) 245-253.
- [17] S.A. Huyer, Postswirl Maneuvering Propulsor, *Journal of Fluids Engineering*, 137 (2015).
- [18] CD-Adapco., User guide STAR-CCM+ Version 13.0.6, in, 2017.
- [19] J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Elsevier, 2001.
- [20] T.N. Tu, Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method, *Alexandria Engineering Journal*, 58 (2019) 531-537.
- [21] T. Prester, Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model, University of California, Davis, 1994.
- [22] T. Gao, Y. Wang, Y. Pang, J. Cao, Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10(1) (2016) 599-607.
- [23] A. Nadery, H. Ghassemi, Numerical Investigation of the Hydrodynamic Performance of the Propeller behind the
- [1] A. Nadery, H. Ghassemi, L. Chybowski, The effect of the PSS configuration on the hydrodynamic performance of the KP505 propeller behind the KCS, *Ocean Engineering*, 234 (2021) 109310.
- [2] F. Çelik, M. Güner, Energy saving device of stator for marine propellers, *Ocean Engineering*, 34(5-6) (2007) 850-855.
- [3] F. Mewis, H. Peters, Power Savings through a Novel Fin System, in: SMSSH Conference, Varna, Bulgaria., 1986, pp. 9.
- [4] S.H. Van, M.C. Kim, J.T. Lee, Some remarks on the powering performance prediction method for a ship equipped with a preswirl stator-propeller system, in: 20st International Towing Tank Conference, San Francisco, California, 1993.
- [5] S.H. Van, J.T. Lee, A powering performance extrapolation method for a preswirl stator propeller system, in: 21st International Towing Tank Conference, Trondheim, Norway, 1996.
- [6] Y.-J. Shin, M.-C. Kim, W.-J. Lee, K.-W. Lee, J.-H. Lee, Numerical and Experimental Investigation of Performance of the Asymmetric Pre-Swirl Stator for Container Ship, in: Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp'15, Austin, Texas, 2015, pp. 305-310.
- [7] S. Park, G. Oh, S. Hyung Rhee, B.Y. Koo, H. Lee, Full scale wake prediction of an energy saving device by using computational fluid dynamics, *Ocean Engineering*, 101 (2015) 254-263.
- [8] S. Saettone, P.B. Regener, P. Andersen, Pre-swirl stator and propeller design for varying operating conditions, in: Proceedings of the 13th International Symposium on PRACTICAL Design of Ships and Other Floating Structures, 2016.
- [9] H. Streckwall, Y. Xing-Kaeding, On the working principle of pre-swirl stators and on other application benefit and design targets, *International Shipbuilding Progress*, 63 (2017) 87-107.
- [10] A. Nadery, H. Ghassemi, Hydrodynamic Performance

- Environment, 232 (2018) 307-330.
- [27] M.B. Wilson, SIMULATION OF SHIP WAKES IN WATER TUNNEL CAVITATION TESTING OF MODELS, in: American Towing Tank Conference, 22nd, Newfoundland, Canada, 1989.
- [28] ITTC, 9.1.0__Practical Guidelines for Ship CFD Applications, in: ITTC – Recommended Procedures and Guidelines ITTC, 2011, pp. 1-8.
- [29] I.B. Celik, U. Ghia, P.J. Roache, C.J. Freitas, H. Coleman, P.E. Raad, Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, Journal of Fluids Engineering, 130(7) (2008) 078001-078004.
- [30] M.M. Bernitsas, D. Ray, P. Kinley, KT, KQ and Efficiency curvers for Wag b-series, in: University of Michigan, 1981, pp. 102.
- Ship with and without WED, Polish Maritime Research, 27 (2020) 50-59.
- [24] A. Nadery, H. Ghassemi, H. Nowruzi, Enhancement of the ship propeller hydrodynamic performance by different energy-saving devices mounted at the upstream zone, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43 (2021) 469.
- [25] W. Shi, B. Aktas, M. Atlar, D. Vasiljev, K. Seo, Stereoscopic PIV aided wake simulation of a catamaran research vessel using a dummy-hull model in a medium size cavitation tunnel, Journal of Marine Science and Technology (Japan), 23 (2018) 507-520.
- [26] G. Tani, M. Viviani, D. Villa, M. Ferrando, A study on the influence of hull wake on model scale cavitation and noise tests for a fast twin screw vessel with inclined shaft, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Bahrami, A. Nadery, A. Moghaddas Ahangari, H. Ghassemi, Using the Propeller Pre-Swirl Stator to Reduce Underwater Vehicle Roll Motion and Increase Propeller Efficiency, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(1) (2023) 123-142.

DOI: 10.22060/mej.2022.21210.7404

