



تحلیل عددی استاتورهای پیش چرخش پروانه شناور

علیرضا نادری، حسن قاسمی*، حسن بهرامی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴

کلمات کلیدی:

استاتور پیش چرخش
بازده پروانه
بهبود سیستم رانش شناورها
ایزار ذخیره کننده انرژی

خلاصه: در این مقاله جریان حول استاتور پیش چرخش پروانه یک شناور کانتینر به صورت عددی شبیه سازی و تحلیل شده است. پارامترهای استاتور پیش چرخش بیان شده و دو تا از مهم ترین آن ها یعنی تعداد استاتور و زاویه حمله استاتور مورد تحلیل و بررسی قرار داده شده است. استاتورها در ۳ حالت چهار، شش و هشت تایی در پنج زاویه حمله ۱۰، ۱۱/۲۵، ۱۲/۵، ۱۳/۷۵ و ۱۵ درجه بررسی شدند. همچنین موقعیت قرارگیری استاتورها بسیار با اهمیت است که با توجه به نوع جریان در پاشنه شناور موقعیت قرارگیری این استاتورها تعیین گردیده است. پس از بررسی نتایج شبیه سازی جریان حول استاتورها، سه حالت استاتور که بهترین عملکرد از منظر افزایش بازده را دارا بودند به عنوان استاتور مرجع انتخاب شدند و ضریب پیشران، ضریب گشتاور برای کل پروانه و یک پره از پروانه و فشار در یک نقطه بر روی پره پروانه برای این سه حالت استاتور بررسی شده اند. از نتایج بدست آمده دیده شد که حالت هشت استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه تأثیر بهتر از منظر تغییر جهت جریان و ایجاد نیروی پیشران و گشتاور داشته است. در نتیجه بازده و توان تحویلی را به ترتیب ۳/۴۶ و ۴/۰۵ درصد بهبود بخشیده است. همچنین حالت چهار استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه نوسانات فشار را ۸/۴۵ درصد نسبت به حالت بدون استاتور بهبود بخشیده است.

۱- مقدمه

شناور فراهم می نماید. از این رو در این مقاله به بررسی یکی از ابزارهای کاهش مصرف سوخت کشتی ها پرداخته شده است. روش های متعددی برای کاهش مصرف سوخت شناورها وجود دارد. یکی از این روش ها بهبود عملکرد پروانه شناور است. عملکرد پروانه را می توان با روش های مختلف بهبود داد که در سال ۲۰۱۸ توسط نادری و همکاران دسته بندی و ارائه شدند [۳]. اما در مقاله حاضر، بطور تخصصی استاتور پیش چرخش^۳ به عنوان یکی از روش های بهبود عملکرد پروانه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این استاتورها در جلو (بالادست) پروانه شناور قرار می گیرند و با اعمال جریان چرخشی در خلاف چرخش پروانه، باعث کاهش اتلاف چرخشی پروانه و در نتیجه بهبود عملکرد هیدرودینامیکی آنها می گردند.

استاتورهای پیش چرخش از مدت ها پیش مورد بررسی و تحلیل دیگر پژوهشگران و صنعت گران قرار گرفته اند. ایده اصلی استاتورهای پیش چرخش از پروانه های معکوس گرد و گنر گرفته شده است [۴ و ۵]. سیستم فین اسوایی^۴ توسط مویس و پیتز در ۱۹۸۶ و سیستم استاتورهای

یکی از موضوعات مهم در زمینه محیط زیست، افزایش دما کره زمین به دلیل افزایش گازهای گلخانه ای^۱ موجود در جو است. صنعت حمل و نقل دریایی در سال ۲۰۰۷ حدود ۴ درصد از گاز دی اکسید کربن تولید شده در جهان را به خود اختصاص داد [۱]. بر اساس آمار ارائه شده توسط سازمان بین المللی دریانوردی^۲ در سال ۲۰۱۲ حدود ۱۰۱۶ میلیون تن گاز دی اکسید کربن در اثر تردد شناورها به اتمسفر کره زمین وارد شده است. طرح های کاهش مصرف سوخت شناور می توانند باعث کاهش نشر گاز دی اکسید کربن شود. مزیت دوم طرح های کاهش مصرف سوخت، مقرون ب صرفه بودن آنها از نظر اقتصادی است. هزینه اصلی مالک کشتی در یک سفر دریایی، هزینه سوخت مصرفی شناور است. مصرف سوخت کشتی امروزه در حدود ۵۰ درصد هزینه سفر، حتی بیشتر از هزینه خدمه کشتی را در بر می گیرد [۲]. در نتیجه با اعمال کمترین کاهش مصرف سوخت، سود قابل ملاحظه ای برای مالک

1 Green House Gases (GHG)

2 IMO

* نویسنده عهده دار مکاتبات: gasemi@aut.ac.ir



۲- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس استفاده شده است. شبیه‌سازی بصورت سه بعدی و با فرض تراکم‌ناپذیری سیال انجام شده است. روش‌های مختلف برای حل معادلات جریان آشفته وجود دارد که یکی از آن‌ها روش میانگین‌گیری رینولدز است. معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده در دستگاه مختصات دکارتی به صورت زیر بیان می‌شود.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \\ -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (2)$$

که x_i مختصات کارتزین، u_i مؤلفه سرعت و ρ چگالی آب است. p فشار، μ لزجت دینامیکی و $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ ترم تنش رینولدز است که با توجه به مقالات مرتبط، با استفاده از مدل آشفته‌گی کی-اومگا با جابجایی تنش برشی^۵ با تابع دیوار مناسب مدل می‌شود که مناسب برای شبیه‌سازی جریان اطراف پروانه است [۲۹]. این مدل آشفته‌گی توسط کمیته تخصصی دینامیک سیالات محاسباتی^۶ در هیدرودینامیک دریا در ۲۷-مین کنفرانس بین‌المللی حوضچه کشش^۷ توصیه شده است [۳۰]. در این مدل آشفته‌گی از مدل کی-اومگا در نواحی داخلی لایه مرزی و از مدل کی-اومگا^۸ برای نواحی با جریان برشی آزاد استفاده می‌شود [۳۱]. $R\bar{\alpha}$ در این پژوهش از نرم افزار استار سی‌سی‌ام استفاده شده است که معادلات را با استفاده از روش حجم محدود^۹ گسسته‌سازی می‌کند. جزئیات بیشتر اجرا در کتابچه راهنما نرم افزار موجود است [۳۲ و ۳۳]. علاوه بر این، کوپل سرعت با فشار و روش حل بر اساس روش نیمه ضمنی در الگوریتم معادله مرتبط شده فشار سیمپل^{۱۰} استفاده شده است. همچنین روش مرتبه دوم سیمپل برای ترم فشار

پیش چرخش دو در سال ۱۹۹۲ معرفی و ارائه شدند [۶ و ۷]. آن‌ها با قرار دادن استاتورهای ثابت در جلو پروانه با زاویه حمله مخالف زاویه پره پروانه، باعث ایجاد چرخش اولیه خلاف حرکت چرخشی پروانه شدند. در واقع آنها عملکرد ساده شده پروانه‌های وگنر را با استاتورهای ثابت انجام دادند. امروزه نیز پژوهش‌های زیادی بر روی این استاتورهای پیش‌چرخش انجام شده است که بصورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۱ دیده می‌شود که با طراحی صحیح استاتور، این ابزار می‌تواند با تغییر جهت جریان ورودی به پروانه، باعث بهبود پیشران پروانه و در نتیجه بهبود بازده سیستم رانش شناور گردد. در طراحی استاتور پیش‌چرخش پروانه، پارامترهای مختلفی می‌توانند مؤثر باشند که در صورت تعیین نادرست آنها، نه تنها استاتور بازده سیستم رانش شناور را بهبود نمی‌دهد بلکه می‌تواند باعث کاهش آن گردد. از این‌رو تعیین اندازه این پارامترها بسیار اهمیت دارند. همچنین تعیین اندازه این پارامترها با توجه به شرایط کارکردی استاتور و پروانه برای هر شناور متفاوت است. از جمله این پارامترها می‌توان به طول وتر استاتور، پهنا (شعاع) استاتور، فاصله قرارگیری استاتور نسبت به پروانه، زاویه حمله استاتور، نوع مقطع استاتور و تعداد استاتورهای استفاده شده اشاره نمود. در این مقاله، دو پارامتر مهم طراحی استاتور یعنی زاویه حمله استاتور و تعداد استاتور با نوع چیدمان استاتورها که تأثیر بسزایی در نتایج طراحی دارند مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش جریان حول یک شناور کانترینر با نام کریسو^۱ شبیه‌سازی شده است. این شناور در موسسه ملی تحقیقات دریایی ژاپن^۲ آزمایش شده است و نتایج مقاومت و جریان ویک پاشنه آن بصورت آزمایشگاهی ارائه شده است [۲۸]. همچنین از پروانه پنج پره با نام کی‌پی ۵۰۵ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. شبیه‌سازی در نرم افزار استار سی‌سی‌ام انجام شده و جهت تولید شبکه از شبکه بندی با ساختار بریده شده^۳ استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی شده و همچنین بررسی شبکه نیز به روش شاخص همگرایی شبکه^۴ انجام شده است. سپس دو پارامتر تعداد استاتور و زاویه حمله استاتور در پنج سطح مختلف شبیه‌سازی شدند و نتایج آنها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

5 Shear Stress Transport (k- ω SST)
6 Computational Fluid Dynamic (CFD)
7 International Towing Tank Conference (ITTC)
8 k- ϵ
9 Finite Volume Method (FVM)
10 SIMPLE

1 Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO) Container Ship
2 NMRI
3 Trimmed mesh
4 Grid Convergence Index (GCI)

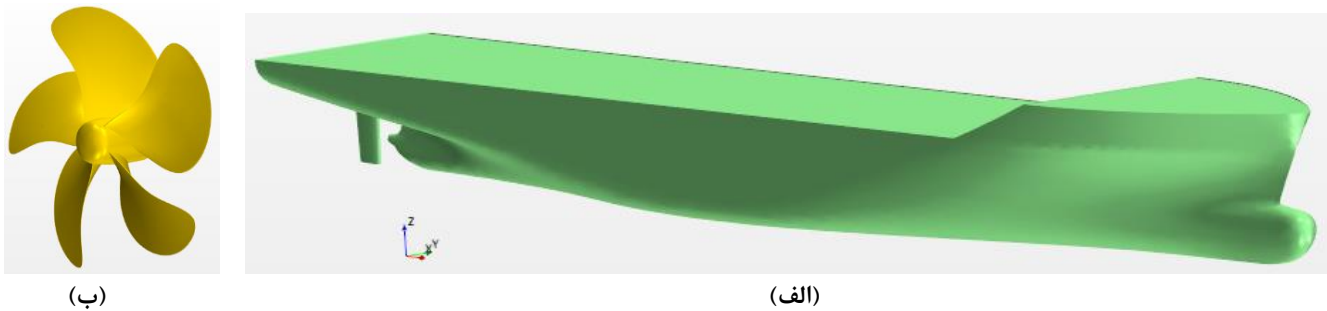
جدول ۱. مروری بر پژوهش‌های انجام شده بر استاتورهای پیش‌چرخش

Table 1. Review of pre-swirl stator research

نتایج	سرعت کشتی	نوع کشتی	سال	نام نویسنده
یافتن یک ترکیب مناسب بین استاتور و پروانه	-	-	۱۹۹۷	ون و همکاران [۸ و ۹]
استاتور می‌تواند در قدرت موتور یکسان، سرعت شناور را افزایش بدهد.	-	تانکر و شناور ماهیگیری	۲۰۰۷	کلیک و گانر [۱۰]
بهبود توان خروجی در تانکر نسبت به کانتینررها بیشتر است.	-	تانکر و کانتینریر	۲۰۱۱	هلنباخ و رینهلز [۱۱]
تا ۵ درصد انرژی شناور توسط استاتور ذخیره شده است.	سرعت طراحی	کانتینریر	۲۰۱۱	زاندروان و همکاران [۱۲]
بازده سیستم رانش توسط استاتور ۳ تا ۸ درصد بهبود یافته است.	۱۶ تا ۲۷ گره	کانتینریر	۲۰۱۵	شین و همکاران [۱۳]
استاتور جهت جریان عرضی را تغییر می‌دهد و بنابراین نتایج مفیدی در مؤلفه پیشران سیستم رانش ایجاد می‌کند.	۷/۹۷۴ متر بر ثانیه	تانکر سایز بزرگ	۲۰۱۵	پارک و همکاران [۱۴]
استاتور طراحی شده برای یک سرعت خاص، می‌تواند در سرعت دیگر هم مفید و بهبود دهنده باشد.	سرعت طراحی و سرعت غیره	کانتینریر	۲۰۱۶	سیتون و همکاران [۱۵]
یک روش طراحی شرح داده شده است.	سرعت طراحی	-	۲۰۱۷	کروول و همکاران [۱۶]
توان خروجی ۴ تا ۵ درصد بهبود یافته است.	-	-	۲۰۱۷	استرکوال و کیدینگ [۱۷]
توان تحویلی و نیروی سکان ارائه شدند و کجی نوک استاتور (وینگلت) نیز بررسی شد.	ضریب پیشروی ۰/۷ تا ۰/۹	کانتینریر	۲۰۱۹	لی و همکاران [۱۸]
بهبود ۲/۳ درصد در توان تحویلی توسط استاتور	سرعت طراحی	-	۲۰۲۰	نادری و قاسمی [۱۹]
تولید پیشران بیشتر در هر دو بررسی آزمایشگاهی و عددی و تنظیم جریان ورودی به پروانه توسط استاتور	بین ۱/۷۰۹ تا ۲/۳۳۱ متر بر ثانیه	تانکر سایز بزرگ	۲۰۲۰	سو و همکاران [۲۰]
پارامترهای استاتور بررسی شده و نشان داده شده که تغییر این پارامترها تأثیر زیادی در بهبود بازدهی سیستم رانش دارند.	ضریب پیشروی بین ۰/۲ تا ۱/۲	زیرسطحی	۲۰۲۰	یو و همکاران [۲۱]
ترکیب روش المان مرزی ^۱ و میانگین‌گیری رینولدز ^۲ برای طراحی استاتور با روش سعی و خطا و ادعا رسیدن به بهبود بازده ۸ درصدی	عدد فرود بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۷	کشتی فله‌بر	۲۰۲۰	فورکاس و گائرو [۲۲]
تولید ۵ نوع استاتور و بهبود توان سیستم رانش بین ۲/۲ تا ۳/۲ درصد	سرعت بین ۱۲ تا ۱۶ گره دریایی	-	۲۰۲۰	کوشان و همکاران [۲۳]
تأثیر استاتور پیش‌چرخش را با داکت تنظیم‌کننده جریان و ترکیب این دو باهم مقایسه نمودند و نشان دادند که ترکیب این دو ابزار می‌تواند مفید باشد.	سرعت طراحی	کانتینریر	۲۰۲۱	نادری و همکاران [۲۴]
تعداد پره‌های استاتور پیش‌چرخش بررسی شده و نشان داده شد که افزایش تعداد پره سبب کاهش نرخ تغییرات سرعت در پایین دست روتور می‌شوند و باعث بهبود ورتکس ویک روتور می‌شود.	ضریب پیشروی ۰/۲ تا ۱/۲	زیرسطحی	۲۰۲۱	هان لی و همکاران [۲۵]
استفاده از یک ماده انعطاف‌پذیر برای ساخت استاتور پیش‌چرخش بر روی شناور کانتینریر و به صورت تجربی و عددی نشان داده شد که ماده انعطاف‌پذیر باعث بهبود ۰/۵ درصدی بازدهی سیستم رانش شده است.	۲۴ گره دریایی	کانتینریر	۲۰۲۱	کانگ و همکاران [۲۶]
کاهش ۴/۷ درصدی توان تحویلی توسط استاتور پیش‌چرخش	۱۶/۵ گره دریایی	کانتینریر	۲۰۲۲	باکیکا و همکاران [۲۷]

¹ Boundary Element Method (BEM)

² Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations (RANSE)



شکل ۱. نمای مدل کشتی کانتینربر کریسو و پروانه کی پی ۵۰۵: (الف) کشتی کانتینربر کریسو، (ب) پروانه کی پی ۵۰۵

Fig. 1. 3D-View of the model of KRISO container ship and KP505 propeller: (a) KRISO container ship, (b) KP505 propeller

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (۶)$$

$$P_d = 2\pi nD \quad (۷)$$

که D قطر پروانه بر حسب متر، n دور چرخش پروانه بر حسب دور بر ثانیه، Q گشتاور پروانه بر حسب نیوتن متر، T پیشران پروانه بر حسب نیوتن و V_a سرعت پیشروی بر حسب متر بر ثانیه است.

۳- مشخصات شناور و پروانه

در این پژوهش جریان حول یک شناور کانتینربر با نام کریسو شبیه‌سازی شده است. این شناور در موسسه ملی تحقیقات دریایی ژاپن آزمایش شده است و نتایج مقاومت و جریان ویک پاشنه آن بصورت آزمایشگاهی ارائه شده است [۲۸]. همچنین در این مقاله از پروانه پنج پره با نام کی پی ۵۰۵ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج آزمایش این پروانه نیز توسط فوجیسو در ژاپن ارائه شده است [۳۵]. شکل ۱ نمای مدل کشتی کانتینربر کریسو و پروانه کی پی ۵۰۵ را نشان می‌دهد. مشخصات مدل این شناور و پروانه در جدول ۲ ارائه شده است. هندسه شناور و پروانه از مرجع [۳۶] استخراج شده است.

و انتقال^۱ و روش تفاضل مرکزی مرتبه دوم برای ترم انتشار^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. سطح آزاد با استفاده از مدل چند فاز حجم مایع^۳ بر اساس رابط تصویربرداری با وضوح بالا^۴ شبیه‌سازی شده است.

نتایج شبیه‌سازی انجام شده بصورت ضریب پیشران پروانه (K_T)، ضریب گشتاور پروانه (K_Q)، بازده پروانه (η)، ضریب پیشروی (J) و توان تحویلی پروانه (P_d) ارائه شده است که بصورت زیر تعریف می‌شوند [۳۴]:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (۳)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (۴)$$

$$\eta = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (۵)$$

-
- 1 Convection
 - 2 Diffusion
 - 3 Volume of Fluid (VOF)
 - 4 High Resolution Interface Capturing (HRIC)

جدول ۲. مشخصات مدل کشتی کانتینربر کریسو و پروانه کی پی ۵۰۵

Table 2. Specifications of KRISO container ship model and KP505 propeller

پروانه کی پی ۵۰۵		کشتی کانتینربر کریسو	
قطر ۰/۲۵ متر		طول بین دو عمود ۷/۲۷۸ متر	
۵	تعداد پره	طول خط آبخور بارگذاری شده ۷/۳۵۷ متر	
۰/۹۵	نسبت گام متوسط	عرض ۱/۰۱۹ متر	
۰/۱۸	نسبت هاب	ارتفاع ۰/۶۰۱۳ متر	
۰/۸	نسبت سطح گسترش یافته	آبخور ۰/۳۴۱۸ متر	
۶۶کا	نوع مقطع	حجم جابجایی ۱/۶۴۹ متر مکعب	

۴- اعتبارسنجی و مطالعه شبکه شبیه‌سازی

است. در این جدول دیده می‌شود که با شبکه متوسط N_p ، مقدار بازده پروانه و مقاومت کل شناور به ترتیب $۰/۶۱۹$ و $۰/۰۲۶$ درصد خطا دارند که مقدار قابل قبولی برای شبیه‌سازی‌های عددی است.

در شبیه‌سازی اول مدل کشتی کانتینربر کریسو در سطح آزاد بدون موج در سرعت $۲/۱۹۶$ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده است. برای تولید شبکه بهتر در ناحیه موج تشکیل شده توسط شناور، از حجم کنترل‌های تعیین شده در راستای تشکیل موج استفاده شده است. در شکل ۲ حجم کنترل‌های استفاده شده برای تولید شبکه بهتر جهت تشکیل موج و سطح آزاد نشان داده شده است. همچنین لایه مرزی بر روی سطح شناور ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و برای کاهش مقدار y^+ بر روی سطح بدنه شناور، از شش شبکه در این ناحیه با نسبت افزایش $۱/۵$ استفاده شده است. با این تنظیمات مقدار y^+ بر روی سطح شناور کمتر از ۱۸۰ بدست آمده است.

مقدار گام زمانی برای شبیه‌سازی شناور کریسو با طول $۷/۲۷۸$ متر، $۰/۰۴$ ثانیه در نظر گرفته شد و نتایج شبیه‌سازی پس از ۱۶۰ ثانیه همگرا شده است. در جدول ۴ ضریب مقاومت بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی حوضچه کشش مارینتک^۱ کشور نروژ [۳۹] مقایسه شده است. در این جدول دیده می‌شود که مقاومت بدست آمده بطور میانگین $۲/۳۴$ درصد خطا نسبت به نتیجه آزمایشگاهی دارد که برای ادامه محاسبات عددی، مقدار قابل قبولی است.

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی پروانه از شبیه‌سازی در جریان آب آزاد

جهت تولید شبکه از شبکه‌بندی با ساختار بریده شده استفاده شده است. شبیه‌سازی همزمان پروانه در پشت کشتی و حرکت کشتی در یک جریان دو فازی که دارای سطح آزاد است، به علت افزایش تعداد شبکه برای دریافت جزئیات موج تشکیل شده و شبیه‌سازی دقیق پره‌های پروانه و همچنین به علت کوچک بودن گام زمانی پروانه (به علت سرعت چرخش زیاد پروانه، گام زمانی پروانه از گام زمانی شبیه‌سازی کشتی در سطح آزاد کوچکتر است) بسیار پرهزینه و نیازمند سیستم محاسباتی بسیار قوی است. از این رو برای کاهش هزینه محاسباتی شبیه‌سازی و بررسی پروانه در جریان ویک شناور، ابتدا یک شناور کانتینربر بدون پروانه در جریان دو فازی آب و هوا همراه با سطح آزاد در سرعت مورد نظر شبیه‌سازی شده است. سپس ویک ورودی به پروانه در مقطع مورد نظر دریافت گردیده و در یک شبیه‌سازی تک فازی آب و بدون سطح آزاد به عنوان ورودی به پروانه داده شده است. با این روش ضمن کاهش هزینه محاسباتی، پروانه در ویک شناور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. پس در این مقاله دو شبیه‌سازی جداگانه انجام شده است و هر دو شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی و مطالعه شبکه انجام شده است.

به منظور بررسی کیفیت شبکه شبیه‌سازی‌ها از روش شاخص همگرایی شبکه پیشنهاد شده توسط کلیک و همکاران [۳۷] برای ضریب پیشران، ضریب گشتاور و بازده پروانه و مقاومت کل شناور استفاده شده است. نتایج بررسی کیفیت شبکه شبیه‌سازی‌ها در مقاله قبلی نویسنده و جدول ۳ ارائه شده است [۳۸]. توضیحات پارامترهای جدول ۳ در مرجع [۳۸] ارائه شده

جدول ۳. بررسی کیفیت شبکه شبیه‌سازی پروانه در جریان آب آزاد در ضریب پیشروی ۰/۴۵ و شبیه‌سازی مدل شناور کریسو در سرعت ۲/۱۹۶ متر بر ثانیه [۳۸].

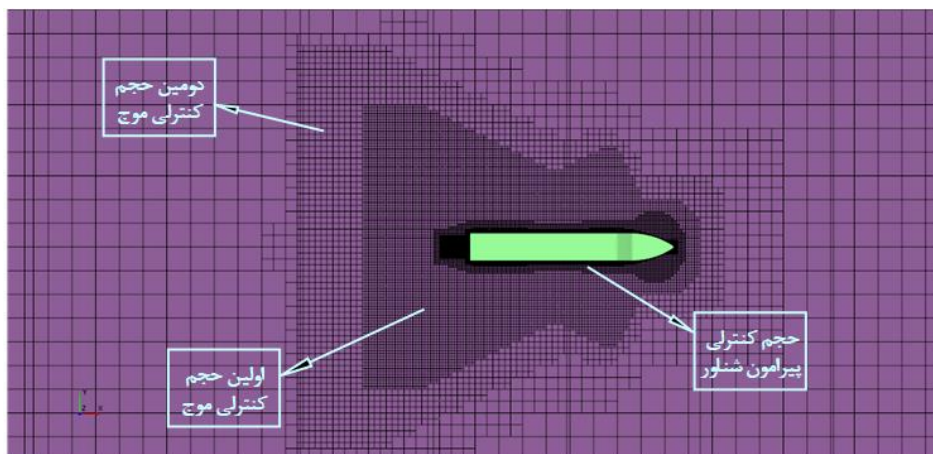
Table 3. Investigating the quality of the propeller simulation mesh in open water flow at the advance coefficient of 0.45 and the simulation of the KRISO container ship model at the speed of 2.196 m/s [38].

مقاومت کل شناور R_T	بازده پروانه η	ضریب گشتاور پروانه K_Q	ضریب پیشران پروانه K_T	پارامتر
۵۶۴۱۱۴۶	۳۷۴۵۸۲۰	۳۷۴۵۸۲۰	۳۷۴۵۸۲۰	تعداد شبکه (ریز) N_1
۲۷۲۴۳۷۸	۱۱۶۸۹۵۶	۱۱۶۸۹۵۶	۱۱۶۸۹۵۶	تعداد شبکه (متوسط) N_p
۱۰۲۷۹۰۶	۴۴۰۶۰۷	۴۴۰۶۰۷	۴۴۰۶۰۷	تعداد شبکه (درشت) N_r
۱/۲۷۴۵	۱/۴۷۴۲	۱/۴۷۴۲	۱/۴۷۴۲	نسبت اندازه شبکه ریز r_{r1}
۱/۳۸۳۸	۱/۳۸۴۳	۱/۳۸۴۳	۱/۳۸۴۳	نسبت اندازه شبکه درشت r_{r3}
۸۴/۳۱۷۷	۰/۴۶۸۹۴۲	۰/۰۴۶۳۱۶۲	۰/۳۰۳۲۶۳	جواب شبکه ریز φ_1
۸۴/۲۱۱۵	۰/۴۶۶۴۱۸۸	۰/۰۴۶۵۷۷۲	۰/۳۰۳۳۳۱	جواب شبکه متوسط φ_p
۸۵/۵۲۱۰	۰/۴۶۲۲۹۱	۰/۰۴۶۸۱۸۸	۰/۳۰۲۲۰۶	جواب شبکه درشت φ_r
۷/۹۲۳۲	۱/۸۹۴۵۱	۰/۲۷۹۸	۸/۵۵۲	نسبت ظاهری s_a
۸۴/۳۳۵۹	۰/۴۷۱۲۶۴۷	۰/۰۴۴۰۴۱	۰/۳۰۳۲۶	مقدار برون‌یابی شده φ_{ext}^{T1}
۰/۱۲۶۰۵۶	۰/۵۳۸۰۶۲۸	۰/۵۶۳۵۱۷	۰/۰۲۲۴۲۲	خطای نسبی تقریبی e_p^{T1}
۰/۰۲۱۵۹۲	۰/۴۹۲۸۶۴۲	۵/۱۶۵۰۲۵	۰/۰۰۰۸۴۱	خطای نسبی برون‌یابی شده e_{ext}^{T1}
۰/۰۲۶	۰/۶۱۹	۶/۱۳۹	۰/۰۰۱	درصد خطای شبکه بندی متوسط GCI_{medium}^{T1}

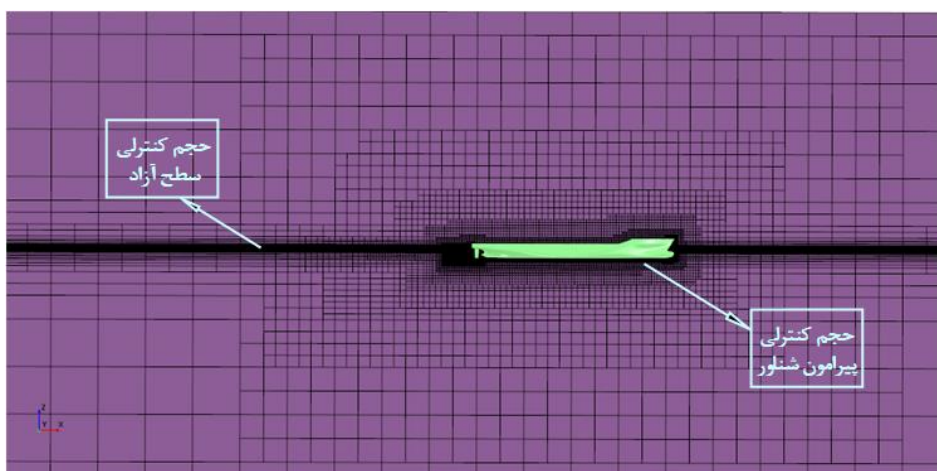
جدول ۴. مقایسه مقاومت شبیه‌سازی شناور با نتایج آزمایشگاهی

Table 4. Comparison of ship simulation resistance with laboratory results

درصد خطا	ضریب مقاومت آزمایشگاهی شناور [۳۹]	ضریب مقاومت عددی شناور	عدد فرود
۰/۶۳	۰/۰۰۳۸۵۴	۰/۰۰۳۸۷۹	۰/۰۹۴۶
۲/۹۷	۰/۰۰۳۵۴۴	۰/۰۰۳۴۳۸	۰/۱۷۷۵
۳/۴۲	۰/۰۰۳۷۱۶	۰/۰۰۳۵۸۹	۰/۲۵۹۸



(الف)



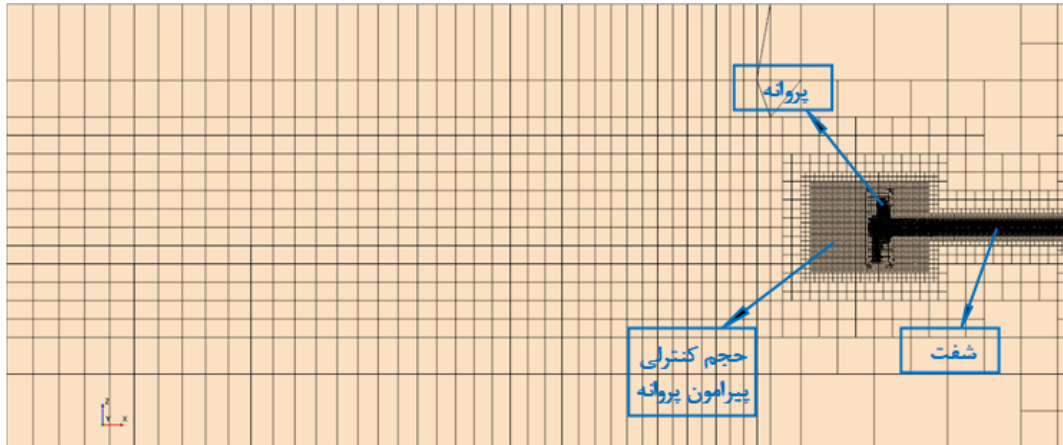
(ب)

شکل ۲. شبکه‌بندی شبیه‌سازی شناور در جریان دو فاز آبی و هوایی: (الف) حجم کنترلی برای شبیه‌سازی بهتر موج تشکیل شده توسط شناور، (ب) حجم کنترلی برای شبیه‌سازی دقیق‌تر سطح آزاد

Fig. 2. Ship simulation mesh generation in two-phase water-air flow: (a) Control volume for better simulation of the wave formed by the float, (b) Control volume for more accurate simulation of the free surface

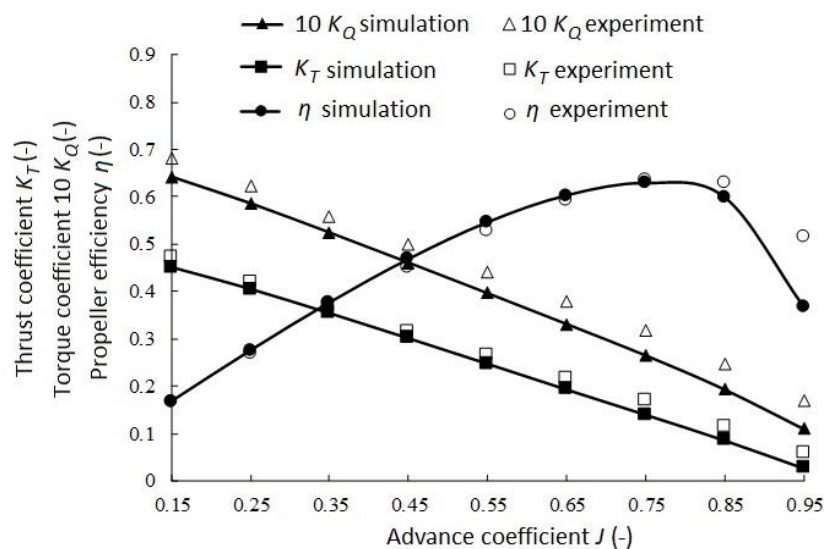
که در شکل ۵ مشخص است از یک مکعب مستطیل برای تعیین محدوده دامنه محاسباتی جریان استفاده شده است. بدین منظور فاصله مرز ورودی از مرکز هاب $D5$ ، مرز خروجی $D13$ و فاصله دیواره‌های کناری $D5$ در نظر گرفته شده است (که D قطر پروانه است). فاصله دیواره کناری به این صورت انتخاب شده است که این دیواره تأثیر بر شبیه‌سازی نداشته باشد. ابعاد مرز ورودی و خروجی با این شرط انتخاب شدند که شرایط ورودی و خروجی جریان بصورت مستقیم بر شبیه‌سازی تأثیرگذار نباشند. همچنین برای نیل به این اهداف از کتابچه راهنما نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام برای تعیین ابعاد شبیه‌سازی پروانه نیز استفاده شده است. همچنین از شرط مرزی دیواره

استفاده شده است. در این شبیه‌سازی پروانه در سرعت‌های مختلف جریان ورودی قرار گرفته است و در نتیجه نتایج شبیه‌سازی در ضریب پیشروی‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. تولید شبکه پروانه به علت سرعت چرخش زیاد آن، باید از دقت بیشتری برخوردار باشد. از این رو تعداد شبکه استفاده شده برای شبیه‌سازی پروانه نصف شبیه‌سازی کل شناور در نظر گرفته شده است. همچنین گام زمانی حل شبیه‌سازی پروانه با توجه به توصیه کنفرانس بین‌المللی حوضچه کشش، 0.0005 ثانیه در نظر گرفته شده است تا پروانه در هر گام زمانی کمتر از 2° درجه بچرخد که این گام زمانی در مقایسه با شبیه‌سازی شناور بسیار کوچکتر است [۳۳]. همانطور



شکل ۳. تولید شبکه شبیه‌سازی پروانه در جریان آب آزاد

Fig. 3. Mesh generation of propeller simulation in open water flow

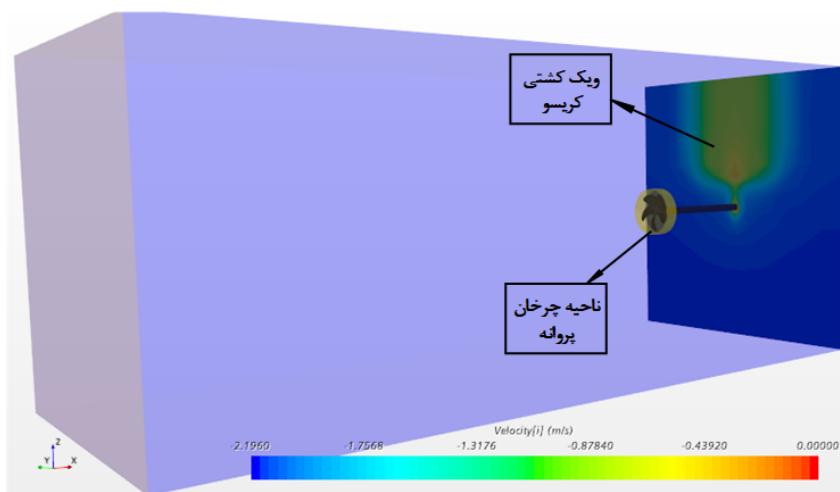


شکل ۴. مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی شبیه‌سازی پروانه با نتایج آزمایشگاهی [۳۸].

Fig. 4. Comparison of hydrodynamic coefficients of the propeller simulation with experimental data [38].

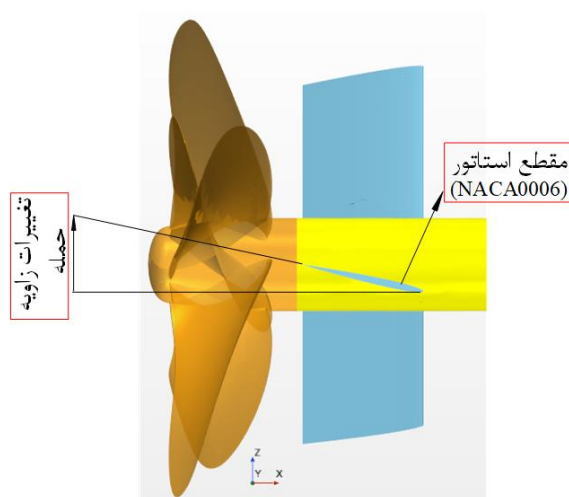
تولید شبکه شبیه‌سازی پروانه را نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که برای شبیه‌سازی با دقت بالاتر در پیرامون پروانه، از حجم کنترلی در تولید شبکه با دقت بیشتر استفاده شده است. نتایج ضریب پیشران (K_p)، ضریب گشتاور (K_Q)، بازده پروانه (η) در شکل ۴ و مقاله قبلی نویسنده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند [۳۸]. از مقایسه نتایج در شکل ۴ دیده می‌شود که نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

بدون لغزش برای پروانه، شرط مرزی سرعت ورودی برای ناحیه ورودی (همانطور که در ابتدای بخش ۴ توضیح داده شده و یک شبیه‌سازی شده پاشنه شناور به عنوان جریان ورودی به پروانه وارد شده) و از شرط مرزی فشار خروجی برای ناحیه خروجی جریان استفاده شده است. علاوه بر این برای جلوگیری از محاسبات غیرضروری اثرات لایه مرزی از شرط مرزی سرعت ورودی در مرزهای کناری، بالا و پایین استفاده شده است. شکل ۳



شکل ۵. شبیه‌سازی پروانه در ویک پاشنه شناور کریسو

Fig. 5. Simulation of the propeller in the KRISO ship stern wake



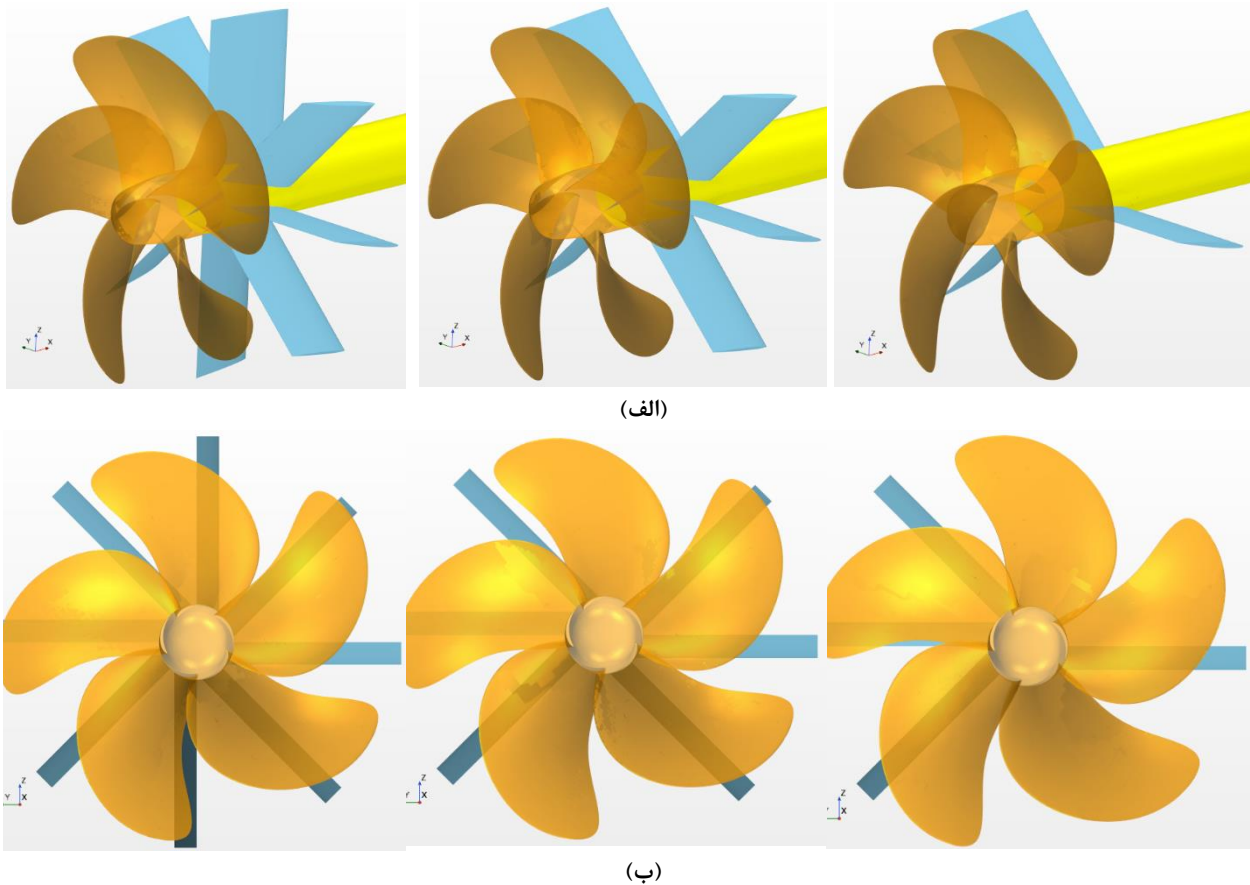
شکل ۶. شماتیک پروانه، مقطع استاتور و تغییرات زاویه حمله

Fig. 6. Schematic of the propeller, stator cross-section and its angle of attack

که این فرضیات بسیار در کاهش هزینه محاسباتی کمک می‌کند. نتایج ویک ورودی به پاشنه در مقاله قبلی نویسنده با نتایج آزمایشگاهی ویک پاشنه کشتی کریسو همراه با پروانه مقایسه شده است که نشان می‌دهد این نوع شبیه‌سازی همخوانی خوبی با عملکرد پروانه در پاشنه شناور دارد [۳۸]. در اینجا سه حالت قرارگیری مختلف استاتور با تعداد ۴، ۶ و ۸ استاتور در زاوایای حمله ۱۰، ۱۱/۲۵، ۱۲/۵، ۱۳/۷۵ و ۱۵ درجه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. شکل ۶ شماتیک مقطع استاتور و تغییرات زاویه حمله را نشان

۵- بررسی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

همانطور که بیان گردید در این مقاله ابتدا شناور کانتینربر کریسو در سرعت ۲/۱۹۶ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده و سپس ویک پاشنه آن دریافت شده و به عنوان ویک ورودی به شبیه‌سازی پروانه داده شده است. شکل ۵ شبیه‌سازی پروانه در جریان ویک پاشنه کشتی کریسو را نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه چرخان پیرامون پروانه نیز مشخص شده است که شبیه‌سازی بدون سطح آزاد، بدون حرکت شناور و فقط با چرخش پروانه انجام می‌گردد



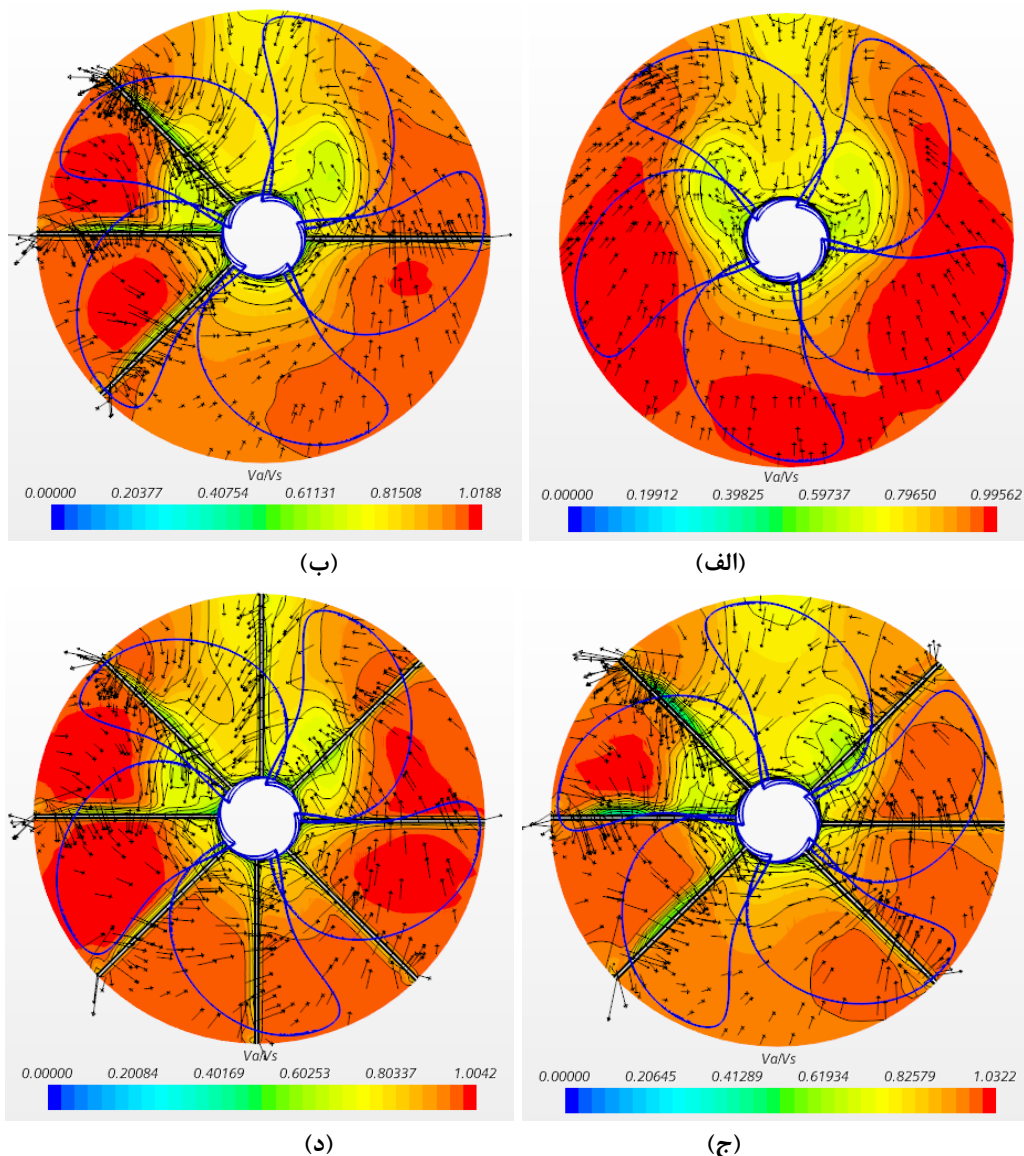
شکل ۷. موقعیت قرارگیری استاتورها؛ راست: چهار استاتور، وسط: شش استاتور و چپ: هشت استاتور: (الف) نمای سه بعدی، (ب) نمای از پشت شناور

Fig. 7. Position of stators; Right: Four stators, middle: six stators and left: eight stators: (a) 3D view, (b) Back view

کند. از این رو در شکل ۷ (الف) موقعیت قرارگیری ۴ استاتور بدین صورت انتخاب گردید که در سمت چپ، تعداد استاتور بیشتر قرار بگیرد تا بتواند مانع این لغزش موجود بشود. در حالت بعد، در شکل ۷ (ب) شش استاتور بطور متقارن قرار گرفته است تا جهت جریان در سمت راست را نیز بهبود ببخشد. همچنین در شکل ۷ (ج) نیز دو استاتور در بالا و پایین قرار گرفته است تا جهت جریان در تمامی نواحی بهبود یابد. تأثیر چهار، شش و هشت استاتور بر روی سرعت جریان ورودی به پروانه به ترتیب در شکل ۸ (ب)، (ج) و (د) ارائه شده است. در شکل ۸ (د) دیده می شود که حالت هشت استاتور بخوبی جهت جریان عرضی ورودی به پروانه را در تمامی نواحی بهبود بخشیده است.

در جدول ۵ نتایج نیروی پیشران، گشتاور و بازده پروانه همراه با این ۱۵ حالت استاتور نشان داده شده است. نکته مورد اهمیت وجود مقاومت این

می دهد. همچنین شکل ۷ موقعیت قرارگیری استاتورها با تعداد مختلف را نشان می دهد. اما علت انتخاب این نوع موقعیت قرارگیری استاتور به نوع و یک پاشنه شناور وابسته است. شکل ۸ جریان ورودی به پروانه در بالا دست پروانه در فاصله $0.2D$ (که D قطر پروانه است) از مرکز پروانه را نشان می دهد. در شکل ۸ (الف) دیده می شود که جریان عرضی از کف شناور به سمت بالا در حرکت است. همانطور که از مقطع پروانه نمایان است، پروانه بصورت راستگرد در حال چرخش است. در نتیجه در سمت راست شکل، جریان به سمت بالا و حرکت پروانه به سمت پایین است و این حرکت در خلاف یکدیگر باعث بهبود عملکرد پره پروانه می شود. اما سمت چپ شکل ۸ (الف) دیده می شود که جهت جریان به سمت بالا است و حرکت پره پروانه نیز به سمت بالا است. در اینجا در واقع یک نوع لغزش بوجود می آید و پره پروانه نمی تواند به خوبی جریان را بشکافد و نیروی پیشران مورد نظر را تولید



شکل ۸. سرعت محوری (کانتور) و سرعت عرضی (بردارها) در مقطع در فاصله 0.2D در بالا دست پروانه: (الف) بدون استاتور، (ب) چهار استاتور، (ج) شش استاتور، (د) هشت استاتور

Fig. 8. Axial velocity (contour) and transverse velocity (vectors) in a section at a distance of 0.2D upstream of the propeller: (a) Without stator, (b) Four stators, (c) Six stators, (d) Eight stators

پیشران کل به عدد $76/4534$ نیوتن شبیه‌سازی اول رسیده شده باشد. حال نتایج در سرعت و پیشران برابر که مقاومت استاتور را نیز شامل است با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. در اینجا دیده می‌شود که حالت چهار استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه، حالت شش استاتور با زاویه حمله ۱۲/۵ درجه و حالت هشت استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه بیشینه افزایش بازده را ایجاد نمودند. در نتیجه در ادامه پژوهش نتایج این سه حالت استاتور با حالت بدون استاتور بررسی و مقایسه می‌گردند.

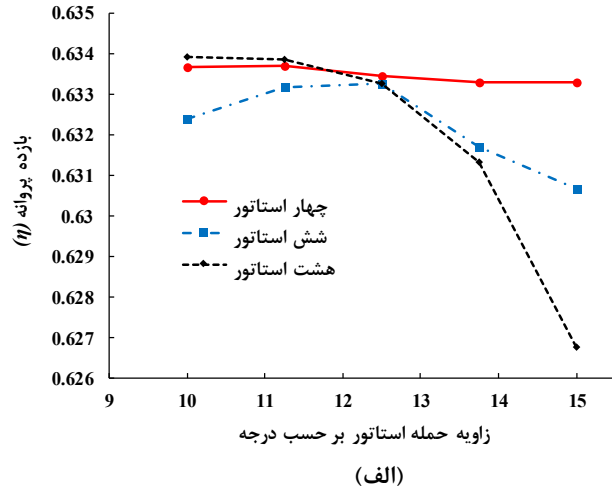
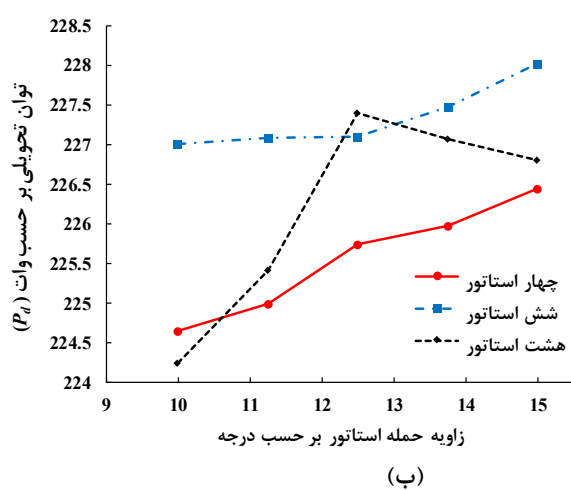
در شکل ۹ بازده و توان تحویلی این ۱۵ حالت استاتورها با یکدیگر

استاتور و تأثیر آن در نتایج است. از این‌رو برای بررسی نیروی پیشران پروانه از نیروی پیشران کل $(T_{propeller})$ استفاده شده است که $(T_{total} = T_{propeller} + T_{stator})$ استفاده شده است که T_{stator} مقاومت ایجاد شده توسط استاتور است که یک مقدار منفی است. همچنین در جدول ۵، شبیه‌سازی‌ها در سرعت یکسان $2/196$ متر بر ثانیه انجام شدند. پس از آنجا که مقاومت یک شناور در سرعت ثابت، تغییر نمی‌یابد پس پیشران کل همه شبیه‌سازی‌ها باید با شبیه‌سازی اول (بدون استاتور) برابر باشند. از این‌رو در اینجا با درون‌یابی خطی و انجام ۳ شبیه‌سازی برای هر استاتور تلاش شده است تا با تعیین دور چرخش پروانه،

جدول ۵. تأثیر استاتورها در زوایای حمله مختلف

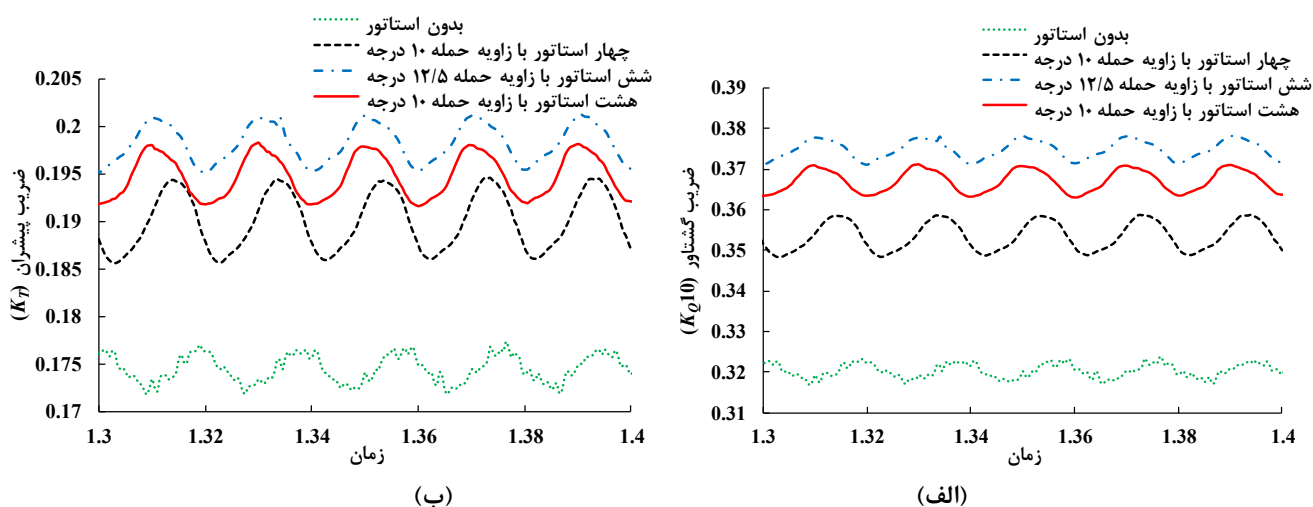
Table 5. Effect of stators under different attack angles

درصد افزایش بازده	بازده پروانه η (-)	گشتاور پروانه Q (Nm)	ضریب گشتاور پروانه $10K_Q$ (-)	پیشران T_{Total} (N)	ضریب پیشران K_T (-)	ضریب پیشروی J (-)	دور چرخش پروانه n (rps)	پارامتر
-	۰/۶۱۲۷	۳/۵۰۹۲	۰/۳۲۰۲	۷۶/۴۵۳۴	۰/۱۷۴۴	۰/۷۰۷	۱۰/۶۰	بدون استاتور
۳/۴۲	۰/۶۳۳۷	۳/۵۳۳۱	۰/۳۵۳۷	۷۵/۹۹۴۳	۰/۱۹۰۲	۰/۷۴۰	۱۰/۱۱	چهار استاتور، زاویه حمله ۱۰ درجه
۳/۳۷	۰/۶۳۳۴	۳/۵۸۰۹	۰/۳۵۷۴	۷۵/۵۵۱۱	۰/۱۹۱۰	۰/۷۴۵	۱۰/۰۹	چهار استاتور، زاویه حمله ۱۱/۲۵ درجه
۳/۳۸	۰/۶۳۳۵	۳/۵۷۹۷	۰/۳۶۴۳	۷۶/۳۳۴۸	۰/۱۹۴۲	۰/۷۴۶	۱۰/۰۳	چهار استاتور، زاویه حمله ۱۲/۵ درجه
۳/۰۲	۰/۶۳۳۳	۳/۵۲۹۴	۰/۳۶۸۲	۷۵/۶۲۰۹	۰/۱۹۵۳	۰/۷۵۲	۹/۹۹	چهار استاتور، زاویه حمله ۱۳/۷۵ درجه
۳/۳۶	۰/۶۳۳۳	۳/۶۳۳۳	۰/۳۷۸۶	۷۶/۵۵۳۳	۰/۱۹۹۵	۰/۷۵۵	۹/۹۱	چهار استاتور، زاویه حمله ۱۵ درجه
۳/۲۱	۰/۶۳۳۴	۳/۵۸۱۳	۰/۳۶۰۸	۷۶/۶۳۳۳	۰/۱۹۳	۰/۷۴۳	۱۰/۰۸	شش استاتور، زاویه حمله ۱۰ درجه
۳/۳۴	۰/۶۳۳۲	۳/۵۷۴۱	۰/۳۶۶۱	۷۶/۲۳۳۹	۰/۱۹۴۷	۰/۷۴۸	۱۰/۰۴	شش استاتور، زاویه حمله ۱۱/۲۵ درجه
۳/۳۵	۰/۶۳۳۳	۳/۶۲۸۴	۰/۳۷۴۹	۷۶/۷۷۱۶	۰/۱۹۸۳	۰/۷۵۲	۹/۹۶	شش استاتور، زاویه حمله ۱۲/۵ درجه
۳/۱۰	۰/۶۳۱۷	۳/۶۵۵۲	۰/۳۸۰۷	۷۶/۱۰۲۶	۰/۱۹۹۰	۰/۷۵۸	۹/۸۹	شش استاتور، زاویه حمله ۱۳/۷۵ درجه
۲/۹۳	۰/۶۳۰۷	۳/۶۸۹۷	۰/۳۹۱۰	۷۶/۷۶۷۵	۰/۲۰۳۴	۰/۷۶۲	۹/۸۳	شش استاتور، زاویه حمله ۱۵ درجه
۳/۴۶	۰/۶۳۳۹	۳/۵۷۳۵	۰/۳۶۷۳	۷۵/۸۸۴۹	۰/۱۹۵۰	۰/۷۵۰	۹/۹۸	هشت استاتور، زاویه حمله ۱۰ درجه
۳/۴۴	۰/۶۳۳۹	۳/۵۸۷۰	۰/۳۷۲۷	۷۵/۶۵۵۷	۰/۱۹۶۹	۰/۷۵۵	۹/۹۶	هشت استاتور، زاویه حمله ۱۱/۲۵ درجه
۳/۳۵	۰/۶۳۳۳	۳/۶۶۱۹	۰/۳۸۴۴	۷۶/۸۶۹۵	۰/۲۰۱۷	۰/۷۵۸	۹/۸۸	هشت استاتور، زاویه حمله ۱۲/۵ درجه
۳/۰۴	۰/۶۳۱۳	۳/۶۴۳۸	۰/۳۸۹۸	۷۶/۰۲۶۵	۰/۲۰۲۷	۰/۷۶۵	۹/۸۳	هشت استاتور، زاویه حمله ۱۳/۷۵ درجه
۲/۲۹	۰/۶۲۶۸	۳/۷۰۹۱	۰/۴۰۱۵۱	۷۵/۸۸۲۱	۰/۲۰۵۴	۰/۷۷۰	۹/۷۳	هشت استاتور، زاویه حمله ۱۵ درجه



شکل ۹. مقایسه تأثیر استاتورها بر بازده و توان تحویلی پروانه: (الف) توان تحویلی، (ب) بازده

Fig. 9. Comparison of the effect of stators on the efficiency and delivered power of the propeller: (a) Deliverable power, (b) Efficiency



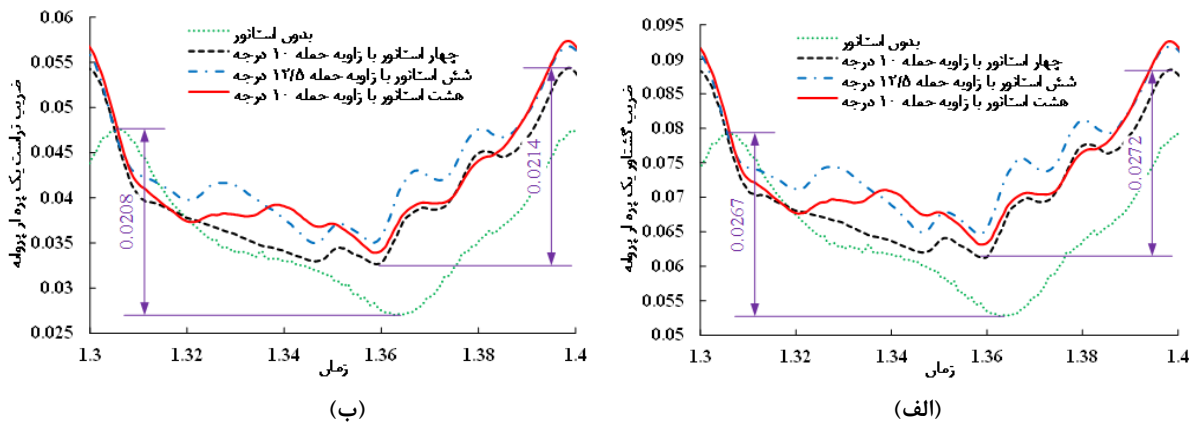
شکل ۱۰. مقایسه تأثیر استاتورها بر ضریب پیشران و ضریب گشتاور پروانه در یک دور چرخش پروانه: (الف) ضریب پیشران، (ب) ضریب گشتاور

Fig. 10. Comparison of the effect of stators on the thrust and the torque coefficient of the propeller in one revolution of the propeller: (a) Thrust coefficient, (b) Torque coefficient

نتایج ضریب پیشران و ضریب گشتاور در یک دور چرخش برای کل پروانه و یک پره از پروانه به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. از آنجا که دور چرخش پروانه در حالات مختلف پیرامون ۱۰ دور بر ثانیه است، پس در ۰/۱ ثانیه پروانه یک دور می‌چرخد. از این‌رو این نمودارها در بازه زمانی ۱/۳ تا ۱/۴ ثانیه برای یک دور چرخش پروانه ارائه شده‌اند. در شکل ۱۰ دیده می‌شود که میانگین ضریب پیشران و ضریب گشتاور پروانه در هر سه حالت استاتورها بیشتر از حالت بدون استاتور شده است. پس استاتورها باعث افزایش ضریب پیشران و ضریب گشتاور می‌گردند که در صورت طراحی مناسب می‌توان به بهبود بازده نیز دست یافت. همچنین با افزایش ضریب پیشران می‌توان در حالتی که قطر پروانه با محدودیت همراه است و نیاز به پیشران بیشتر است نیز استفاده نمود. اما با مقایسه استاتورها با یکدیگر نیز دیده می‌شود که شش استاتور با زاویه حمله ۱۲/۵ درجه، دارای ضریب پیشران و ضریب گشتاور بیشتر نسبت به دو حالت دیگر است. پس از آن، هشت استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه دارای ضرایب بیشتر است. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که زاویه حمله استاتورها تأثیر بیشتر نسبت به تعداد استاتورها در افزایش ضریب پیشران و ضریب گشتاور دارد.

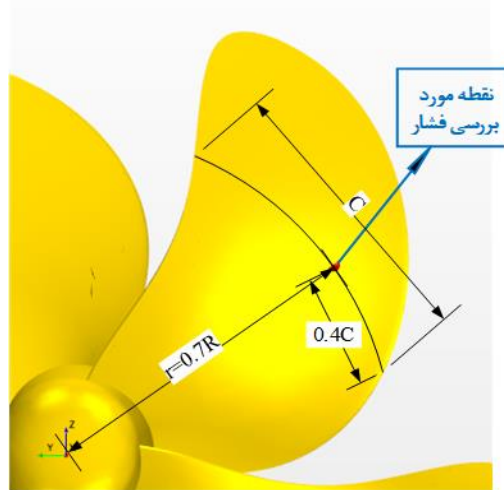
ضریب پیشران و ضریب گشتاور برای یک پره از پروانه در یک دور چرخش نیز در شکل ۱۱ ارائه شده است. در این شکل می‌توان نوسانات

مقایسه گردیده‌اند. در نتیجه در این شکل نرخ تغییرات بازده و توان تحویلی نسبت به تغییر زاویه حمله استاتورها قابل مشاهده است. در اینجا دیده می‌شود که حالت ۸ استاتور به علت تغییر جهت جریان ورودی در تمامی نقاط ورودی به پروانه، تأثیر بیشتر بر روی عملکرد پروانه داشته است. همچنین، این حالت هشت استاتور توانسته در زاویه حمله ۱۰ درجه بیشینه بهبود بازده و توان تحویلی را داشته باشد که به ترتیب ۳/۴۶ و ۴/۰۵ درصد آنها را نسبت به حالت بدون استاتور بهبود بخشیده است. اما نکته قابل تأمل در این نمودارها نرخ تغییرات آنها در زاویه حمله است که با افزایش زاویه حمله باعث کاهش بازده شده است. واضح است وجود این تعداد (هشت) استاتور و افزایش زاویه حمله آنها در جلوی پروانه شناور باعث افزایش مقاومت (درگ) شناور و در نهایت کاهش بازده سیستم شده است. اما در حالت ۶ استاتور دیده می‌شود که با کاهش دو استاتور می‌توان از زاویه حمله بالاتر برای بهبود جریان ورودی به پروانه استفاده کرد. حال با مقایسه حالت ۴ استاتور با حالت ۶ استاتور می‌توان دریافت که با بهبود موقعیت قرارگیری استاتورها و حذف استاتورهای با تأثیر کمتر، می‌توان به بازده بالاتر دست یافت. لذا، با مقایسه این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر زاویه حمله و تعداد استاتور به شدت به یکدیگر وابسته هستند و نمی‌توان از یک زاویه حمله مشخص برای هر تعداد استاتور در جلوی پروانه استفاده نمود.



شکل ۱۱. مقایسه تأثیر استاتورها بر ضریب پیشران و ضریب گشتاور یک پره از پروانه در یک دور چرخش پروانه: (الف) ضریب پیشران یک پره، (ب) ضریب گشتاور یک پره

Fig. 11. Comparing the effect of stators on the thrust and the torque coefficient of one blade of the propeller in one revolution of the propeller: (a) Thrust coefficient of one blade, (b) Torque coefficient of one blade

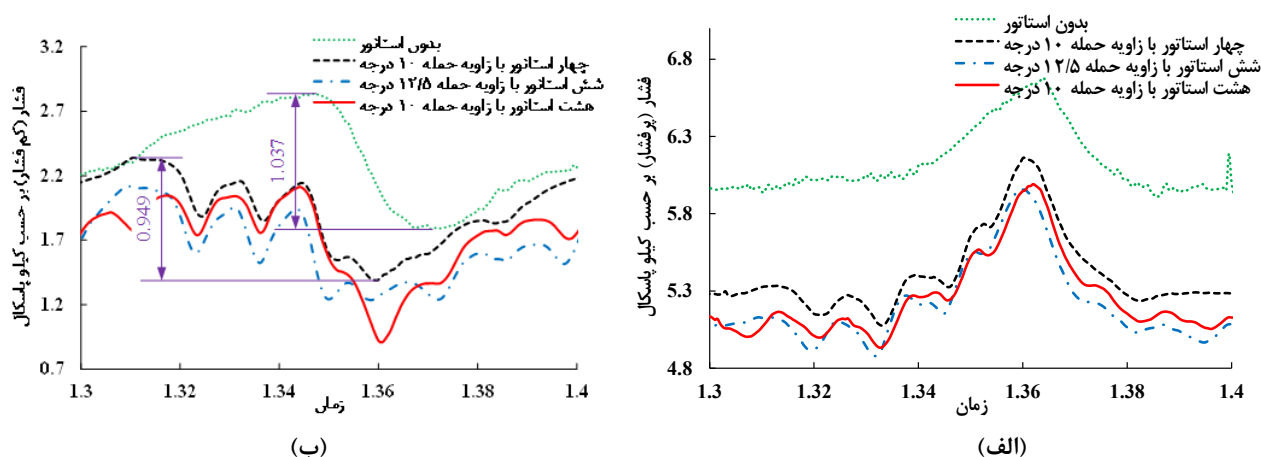


شکل ۱۲. موقعیت نقطه مورد بررسی فشار بر روی سطح پره پروانه

Fig. 12. The position of the point under pressure investigation on the surface of the propeller blade

در نتیجه در حالت چهار استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه، $2/73$ درصد نوسانات ضریب پیشران و $1/94$ درصد نوسانات ضریب گشتاور افزایش یافته است. فشار بر روی یک نقطه از سطح پره پروانه در شعاع $0.7R$ و فاصله $0.4C$ از لبه حمله پره نیز بررسی شده است. شکل ۱۲ این نقطه مورد نظر را نشان می‌دهد که در پشت و جلوی پره در همین موقعیت قرار گرفته است. نتایج بررسی فشار در این نقطه در جلو (ناحیه پر فشار) و پشت پره (ناحیه کم فشار) در شکل ۱۳ ارائه شده است. در بررسی فشار به علت پدیده کاویتاسیون، کمینه فشار بسیار با اهمیت است و با کم بودن کمینه

پیشران و گشتاور اعمالی به یک پره از پروانه در یک دور چرخش را بررسی نمود. بیشینه مقدار ضریب پیشران یا گشتاور در یک دور چرخش در واقع نوسان کلی وارد بر آن پره در آن دور چرخش است. در شکل ۱۱ مقدار نوسان کلی ضریب پیشران و ضریب گشتاور در حالت بدون استاتور و چهار استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه نشان داده شده است. در اینجا دیده می‌شود که پروانه در حالت بدون استاتور دارای $2/08 \times 10^{-2}$ و $2/67 \times 10^{-2}$ نوسان به ترتیب برای ضریب پیشران و ضریب گشتاور است که در حالت چهار استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه به ترتیب به $2/14 \times 10^{-2}$ و $2/72 \times 10^{-2}$ افزایش یافته است.



شکل ۱۳. مقایسه تأثیر استاتورها بر فشار کل نقطه‌ای بر روی پشت و جلو پره پروانه در شعاع $0.7R$ و فاصله $0.4C$ از لبه حمله پره پروانه در یک دور چرخش پروانه: (الف) فشار کل نقطه در پشت پره پروانه (کم‌فشار)، (ب) فشار کل نقطه در جلو پره پروانه (پرفشار)

Fig. 13. Comparison of the effect of stators on the total pressure at the point on the back and front of the propeller blade at a radius of $0.7R$ and a distance of $0.4C$ from the leading edge in one revolution of the propeller: (a) Total pressure at the point on the back of the propeller blade (low pressure), (b) Total pressure of the point on the face of the propeller blade (high pressure)

۱۳/۷۵ و ۱۵ درجه بررسی شدند. موقعیت قرارگیری استاتورها از اهمیت ویژه برخوردار است که با توجه به نوع جریان در پاشنه شناور موقعیت قرارگیری این استاتور تعیین گردید. پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی استاتورها، سه استاتور که بهترین تأثیر از منظر افزایش بازده را دارا بودند به عنوان استاتور مرجع انتخاب شدند و ضریب پیشران، ضریب گشتاور و فشار در یک نقطه بر روی پره پروانه برای آنها بررسی شدند. از محاسبات انجام شده، نتایج زیر حاصل شده است.

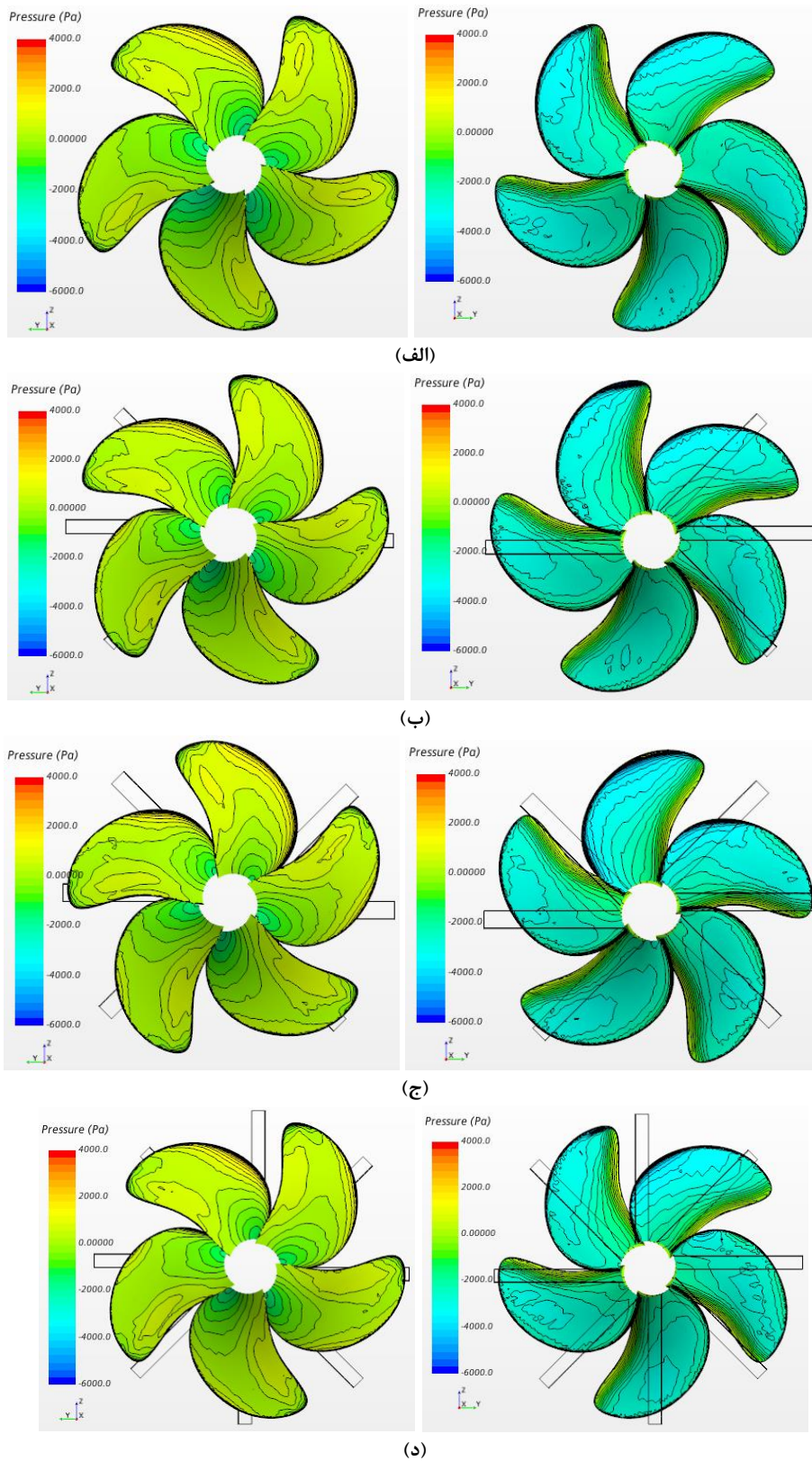
- حالت هشت استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه تأثیر بهتر از منظر تغییر جهت جریان سرعت و بهبود بازده و توان تحویلی داشته است. این حالت بازده و توان تحویلی را به ترتیب $3/46$ و $4/05$ درصد بهبود داده است.
- حالت ۶ استاتور با زاویه حمله ۱۲/۵ درجه میانگین نیروی پیشران بیشتری نسبت به حالت ۸ استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه تولید کرده است.
- اگرچه استاتورها باعث افزایش میانگین ضریب پیشران و گشتاور شده‌اند اما از طرف دیگر، سبب افزایش نوسانات این دو ضریب نیز شده‌اند.
- در بررسی فشار، حالت هشت استاتور تأثیر ضعیف‌تر نسبت به حالت چهار استاتور داشته است. در نتیجه می‌توان در حالتیکه پدیده کاویتاسیون دارای اهمیت نمی‌باشد از حالت هشت استاتور استفاده نمود و در حالتی که این پدیده دارای اهمیت است از چهار استاتور استفاده نمود.
- استفاده از چهار استاتور نوسانات فشار را $8/45$ درصد نسبت به

فشار، امکان تشکیل کاویتاسیون بالا می‌رود. در اینجا دیده می‌شود که همه استاتورها فشار موجود در این نقطه را کاهش داده‌اند و این کاهش فشار، امکان بوجود آمدن پدیده کاویتاسیون را افزایش می‌دهد. اما با مقایسه استاتورها با یکدیگر دیده می‌شود که حالت چهار استاتور از تأثیر بهتر نسبت به دیگر حالات برخوردار است. همچنین در شکل ۱۳ (الف) دیده می‌شود که در ناحیه کم فشار، حالت چهار استاتور دارای نوسان فشار 949 پاسکال است که نسبت به حالت بدون استاتور با نوسان فشار 1037 پاسکال، نوسان فشار بر روی نقطه مورد نظر $8/48$ درصد بهبود یافته است.

کانتور فشار پره پروانه به ترتیب برای ناحیه کم فشار و ناحیه پرفشار در سمت راست و چپ شکل ۱۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که فشار در شکل ۱۳ فشار کل است که برابر با جمع فشار موجود در شکل ۱۴ با فشار دینامیکی است. در شکل کانتور فشار می‌توان توزیع فشار در سطوح جلو و عقب پره را مشاهده نمود. در این شکل دیده می‌شود که استاتورها باعث توزیع بهتر فشار بر روی کل سطح پره شده‌اند.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله استاتورهای پیش‌چرخش پروانه یک شناور کانتینر بر در ۱۵ حالت مختلف تعداد استاتور و زاویه حمله استاتور بررسی شدند. استاتورها در ۳ حالت چهار، شش و هشت‌تایی در پنج زاویه حمله ۱۰، $11/25$ ، $12/5$ ،



شکل ۱۴. مقایسه تأثیر استاتورها بر کانتور فشار ناحیه کم فشار (پشت پره) در سمت راست و ناحیه پرفشار (جلو پره) در سمت چپ: (الف) بدون استاتور، (ب) چهار استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه، (ج) شش استاتور با زاویه حمله ۱۲/۵ درجه، (د) هشت استاتور با زاویه حمله ۱۰ درجه

Fig. 14. Comparing the effect of stators on the pressure contour of the low-pressure area (back of the blade) on the right and the high-pressure area (face of the blade) on the left: (a) Without stator, (b) Four stators with an angle of attack of 10 degrees, (c) Six stators with an angle of attack of 12.5 degrees, (d) Eight stators with an angle of attack of 10 degrees

marine propellers, *Ocean Engineering*, 34(5-6) (2007) 850-855.

حالت بدون استاتور کاهش داده است.

منابع

- [11] U. Hollenbach, O. Reinholz, Hydrodynamic Trends in Optimizing Propulsion, in 2nd International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, 2011.
- [12] G.-J. Zondervan, J. Holtrop, J. Windt, T. van Terwisga, On the Design and Analysis of Pre-Swirl Stators for Single and Twin Screw Ships, in 2nd International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, 2011.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] P. Król, T. Bugalski, M. Wawrzusiszyn, Development of numerical methods for marine propeller - pre-swirl stator system design and analysis, in Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors, Espoo, Finland, 2017.
- [17] 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.
- [18] K.J. Lee, H.D. Lee, S.H. Choi, A design and validation study of a non-axisymmetric preswirl stator, *Ocean Engineering*, 189 (2019) 106365.
- [19] A. Nadery, H. Ghassemi, Hydrodynamic Performance of the Ship Propeller under Oscillating Flow with and
- [1] G. Reynolds, The reduction of GHG emissions from shipping—A key challenge for the industry, in Proceedings of the World Maritime Technology Conference WMRC, WMRC, Mumbai, 2009.
- [2] M. Roe, Maritime economics, *Journal of Transport Geography*, 6 (1998) 311.
- [3] 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).
- [4] J.P. Ghose, R.P. Gokarn, Basic ship propulsion, Allied Publishers Pvt. Limited, Kharagpur, India, 2004.
- [5] R. Wagner, Rückblick und Ausblick auf die Entwicklung des Contrapropellers, in: *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Springer Berlin Heidelberg, 1929, pp. 195-256.
- [6] J.T. Lee, M.C. Kim, J.C. Suh, S.H. Kim, J.K. Choi, Development of a Preswirl Statorpropeller System for Improvement of Propulsion Efficiency: a Symmetric Stator Propulsion System, *Transaction of SNAK*, 29 (1992).
- [7] F. Mewis, H. Peters, Power Savings through a Novel Fin System, in SMSSH Conference, Varna, Bulgaria., 1986, pp. 9.
- [8] 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 20th International Towing Tank Conference, San Francisco, California, 1993.
- [9] 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.
- [10] F. Çelik, M. Güner, Energy saving device of stator for

- Flow around a Marine Propeller Using Unstructured Mesh-Based Navier-Stokes Solver, *JSME International Journal Series B*, 48 (2005) 562-570.
- [30] X. Chang, S. Sun, Y. Zhi, Y. Yuan, Investigation of the effects of a fan-shaped Mewis duct before a propeller on propulsion performance, *Journal of Marine Science and Technology*, (2018).
- [31] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, 32 (1994) 1598-1605.
- [32] CD-Adapco, User guide STAR-CCM+ Version 13.0.6, in, 2017.
- [33] I. Proceedings, Practical Guidelines for Ship CFD Applications ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, section 7.5-03-02-03, International Towing Tank Conference, 2014.
- [34] M.D. Turbo, Basic Principles of Ship Propulsion, Copenhagen, 2011.
- [35] J. Fujisawa, Y. Ukokn, K. Kume, H. Takeshi, Local Velocity Field Measurements around the KCS Model ((SRI M.S. No. 631) in the SRI 400m Towing Tank. Report of Ship Performance Division. SPD Report No. 00-003-2, Ship Performance Division. Ship Research Institute. Ministry of Transport, Shinkawa, 2000.
- [36] K.C.S. geometry, <http://www.simman2008.dk>, downloaded July 2013.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] V. Krasilnikov, Numerical Modeling of Ship-Propeller Interaction under Self-Propulsion Condition, STAR Global Conference 2014, Vienna, Austria, 2014.
- Without Stator, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8 (2020) 56-61.
- [20] 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.
- [21] H. Yu, N. Duan, H. Hua, Z. Zhang, Propulsion performance and unsteady forces of a pump-jet propulsor with different pre-swirl stator parameters, *Applied Ocean Research*, 100 (2020).
- [22] F. Furcas, S. Gaggero, Pre-swirl stators design using a coupled BEM-RANSE approach, *Ocean Engineering*, 222 (2021) 108579.
- [23] 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).
- [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] H. Li, Q. Huang, G. Pan, X. Dong, F. Li, Effects of blade number on the propulsion and vortical structures of pre-swirl stator pump-jet propulsors, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (2021).
- [26] J.G. Kang, M.C. Kim, I.R. Shin, W.S. Jin, Feasibility study on effect of structural flexibility of asymmetric pre-swirl stator on propulsion performance for KRISO container ship (KCS), *Brodogradnja*, 72 (2021) 103-119.
- [27] A. Bakica, N. Vladimir, Numerical estimation of Pre-Swirl Stator efficiency, 20th International Conference on Ships & Maritime Research, Genova - La Spezia, Italy, 2022.
- [28] N.M.R. Institute, <https://www.t2015.nmri.go.jp>, downloaded 2020.
- [29] S.H. RHEE, S. JOSHI, Computational Validation for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Nadery, H. Ghassemi, H. Bahrami, Numerical Analysis of Pre-Swirl Stators for Ship Propeller, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(11) (2023) 2459-2478.

DOI: 10.22060/mej.2022.20972.7351



