

بررسی خطای روابط تجربی و شبیه سازی عددی در محاسبه توان شناورهای زیرسطحی با استفاده از نتایج تست میدانی

سجاد اردشیری^۱، سید حسین موسوی زادگان^۲، سعید خردمند^۳، فرزاد اسکندری^۴، احمد کمالی^۵

sajjad_ardeshiri@yahoo.com

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
- ۴- کارشناس ارشد مخابرات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۵- کارشناسی ارشد برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

محاسبات مقاومت و توان برای طراحی انواع شناورها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این محاسبات برای شناورهای زیرسطحی با توجه به محدودیت‌های آرشیتکتوری و چیدمانی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مقاله محاسبات توان یک نمونه AUV بررسی شده است. ابتدا فرمول‌های تجربی برای محاسبات توان شناورهای زیرسطحی ارائه شده است. سپس با روش CFD، شبیه‌سازی عددی جریان اطراف AUV به همراه پروانه آن انجام شده است تا با در نظر گرفتن نیروهای برهمکنش هیدرودینامیکی بین بدنه و پروانه، مقاومت و توان مورد نیاز شناور مورد بررسی قرار گیرد. تست میدانی و کارآزمایشگاهی جهت محاسبات توان و راندمان شناور مورد نظر انجام شده و تحلیل نتایج تست میدانی شناور و کارآزمایشگاهی ارائه شده است. در پایان توان محاسبه شده از روش‌های تجربی و روش CFD با روش تست میدانی اعتبار سنجی شده است و میزان خطای هرکدام از این روش‌ها ارائه شده است.

واژگان کلیدی: رانش، شناور زیرسطحی، CFD، تست میدانی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۲/۰۵

۱ - مقدمه

تخمین مقاومت مربوط به انواع شناورها و بطور ویژه در شناورهای زیرسطحی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. این محاسبات در زیرسطحی‌ها به علت جانمایی فشرده آن فضای مورد نیاز موتور به عنوان یکی از مهمترین اقلام در آرشیوتکتوری از حساسیت بیشتری برخوردار است. هدف محققین آن است که روشی مورد استفاده قرار بگیرد تا بتوان با صرف حداقل زمان و هزینه، بهترین تخمین را از مقاومت یک شناور بخصوص در مرحله طراحی مفهومی، بدست آورند.

تعیین چیدمانی زیرسطحی‌ها مستلزم انجام چندین مرحله سعی و خطا در بدست آوردن بهترین نوع چیدمانی است و ممکن است که باعث تغییر شکل بدنه شناور زیرسطحی اعم از تغییر در طول، قطر و ملحقیات آن گردد. تغییر در ابعاد بدنه شناور زیرسطحی بر روی مقدار مقاومت و توان مورد نیاز تاثیر خواهد گذاشت. این به معنای آن است که توان موتور و در نتیجه ابعاد موتور باید متناسب با آن تغییر یابد. موتور با ابعاد جدید چیدمانی را تحت تاثیر قرار خواهد داد. این قید تنها یکی از چندین قیدی است که ممکن است منجر به تغییر در چیدمانی شود.

در نظر گرفتن سایر پارامترهای مورد نیاز در طراحی، منجر به این نتیجه خواهد شد که چندین مرحله سعی و خطا در چیدمانی باید انجام شود. در هر کدام از این مراحل باید مقاومت شناور و توان مورد نیاز محاسبه گردد و با توجه به فرآیند فوق، اگر از روش‌های آزمایشگاهی استفاده شود، این روش‌ها، مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد و ممکن است طراحی مفهومی (اولیه) مدتها بطول انجامد.

به این علت سعی می‌شود که در مرحله طراحی مفهومی از روش‌های ساده‌تر یعنی روش‌های تجربی و عددی استفاده شود. در سال ۱۹۹۲ گوتیمر^۱ و همکارانش [۱] با نوشتن یک کد جریان لزج ضریب فشار وارد بر هندسه یک شناور زیرآبی را محاسبه و صحت نتایج خود را با آزمایش آن در تونل باد تایید نمودند. در سال ۱۹۹۳ ناهن^۲ [۲] از بسته نرم‌افزاری دات کام^۳ برای تخمین ضرائب هیدرودینامیکی

یک نمونه شناور زیرآبی استفاده کرد. سایر^۴ [۳] در سال ۱۹۹۶ با استفاده از نرم افزار فلونت، ضریب نیروی درگ وارد بر ROV سوپراکوریپو^۵ را محاسبه نمود و با نتایج حاصل از آزمایش مدل یک چهارم شناور مقایسه کرد که اختلاف ناچیزی را نشان می‌داد. در سال ۲۰۰۱ کلاوس^۶ و همکارانش [۴] تحقیق هیدرودینامیکی و دینامیکی کاملی برای بدست آوردن بهترین طراحی ممکن روی ROV مدوس^۷ انجام دادند.

به این منظور، چهار هندسه مختلف تهیه و توسط نرم افزار فلونت تحلیل شد که طراحی نهایی این ROV کاهش بیش از ۲۰٪ درگ در حرکت افقی شناور را به همراه داشت. کلاوس و همکاران نتایج این تحلیل هیدرودینامیکی را با نتایج حاصل از آزمایش مدل واقعی ROV مقایسه کردند و صحت جوابها را نشان دادند. در سال ۲۰۰۵ ایوب^۸ و همکارانش [۵] به کمک نرم افزار فلونت جریان اطراف شناور زیرآبی دارپا^۹ اثر افزایش یا کاهش طول را با در نظر گرفتن سه طول مختلف از شناور تحلیل کردند. پژوهشگران دیگری نیز نظریات خود را در این مورد ارائه کرده‌اند که جند نمونه در مراجع [۶-۱۲] موجود است.

استفاده از فرمولهای تجربی و همچنین روش‌های عددی همواره با خطا همراه است و مطالعات در زمینه کاهش میزان خطا و افزایش دقت این محاسبات ادامه دارد.

در این مقاله ابتدا روابط تجربی مرسوم برای محاسبات توان شناورهای زیرسطحی، ارائه شده است. در ادامه معادلات حاکم بر مسئله بیان شده و شبیه‌سازی با روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^{۱۰}) با استفاده از نرم‌افزار فلونت، ارائه خواهد گردید. سپس داده‌های بدست آمده از روش تست میدانی ارائه شده و نتایج تحلیل داده‌ها، ارائه شده است. در پایان با محاسبه توان مورد نیاز، از روش‌های مختلف، به بررسی میزان خطای محاسبات عددی و سایر روابط تجربی در تخمین توان شناور زیرسطحی مورد نظر، در مقایسه با نتایج بدست آمده از تست میدانی شناور پرداخته می‌شود.

7 MODUS

8 Ayub

9 DARPA-2

10 Computational Fluid Dynamic

1 Gotimer

2 Nahen

3 Datcom

4 Sayer

5 Super Scorpio

6 Claus

۲- مشخصات شناور مورد مطالعه

هندسه مسئله حاضر شامل دو عضو اصلی است. ۱- هندسه بدنه و بالکها ۲- هندسه پروانه. مشخصات هندسی در جدول (۱) و در جدول (۲) مشخصات پروانه ارائه گردیده است. شکل (۱) نمایی از بدنه شناور مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در جدول (۲)، D_p قطر پروانه، مقدار η_0 راندمان اوپن واتر پروانه، Z تعداد پره، EAR نسبت سطح گسترش یافته، P/D نسبت پیشروی، J ضریب پیشروی، K_T ضریب تراست و K_Q ضریب گشتاور پروانه است.

۳- روش‌های تجربی

۳-۱- روش اول - روش منبع (Concept) [۱۳]

ضریب مقاومت کل به شکل زیر بیان می‌شود:

$$C_T = C_A + C_R + C_{F_s} + C_r \quad (1)$$

(۱) که C_{F_s} : ضریب مقاومت اصطکاکی، C_R : ضریب مقاومت باقیمانده (ویسکوزیته فشاری)، C_A : ضریب مجاز برای مدل کردن در مقیاس کامل است. مقدار C_R از آزمایشات مقاومت مدل بدست می‌آید و فرض شده است که مستقل از عدد رینولدز باشد یعنی $C_{RS} = C_{RM}$. خطاهای همراه این فرض در ضریب C_A در نظر گرفته می‌شود.

C_{RS} : مقاومت باقیمانده شناور و C_{RM} : مقاومت باقیمانده مدل است. ضریب C_A از انجام اولین آزمایشات زیردریایی جدید بدست می‌آید، هر چند که در مرحله طراحی و ساخت مدل، مقدار مناسب C_A براساس زیردریایی‌های پیشین یک مقدار مناسب در نظر گرفته می‌شود. به عنوان نمونه مقدار مجاز ضریب C_A ممکن است بین $(0.4 \times 10^{-3} - 0.6 \times 10^{-3})$ باشد. C_r ضریب کثیفی سطح تا ۱۸۰ روز پس از آب اندازی است.

در شکل (۲) محدوده مقادیر $(C_A + C_R)$ بازه $(0.9 - 1.2) \times 10^{-3}$ در ازای محدوده بزرگی از ضریب ظرافت آورده شده است. محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی ملحقات: بدنه لخت و هر یک از ملحقات بدنه دارای یک عدد رینولدز خاص هستند که براساس طول کل، روکش و طول کورد متوسط^۱ هر یک از ملحقات می‌باشد و هر یک از اینها ضرایب خاص را خواهند داشت و تناسب با هر یک به مساحت سطح خیس کل (که به عنوان سطح مرجع (S_{REF}) شناخته می‌شود) به یکدیگر افزوده خواهند شد یعنی:

$$C_F = C_{FHull} \times \left(\frac{\text{مساحت محل اتصال ملحقات به بدنه - خیس سطح بدنه}}{S_{REF}} \right) + C_{Fbridge} \times \frac{\text{سطح خیس پل}}{S_{REF}} + \dots + 2 \times C_{Fbowplan} \times \frac{\text{سطح خیس روی یک بالک سینه}}{S_{REF}}$$

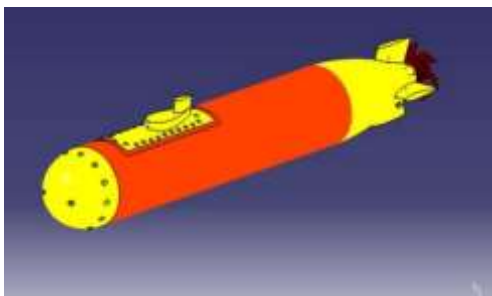
که (S_{REF}) مساحت کل سطح خیس بدنه لخت^۲ (بدنه بدون ملحقات) و روکش آن بعلاوه سطح خیس همه ملحقات، منهای مساحت محل اتصال به بدنه می‌باشد. ضریب مجاز برای کثیفی بدنه باید برای کثیفی بدنه در آبهای مختلف یا ضریبی برابر ۱/۸ درصد برای هر روز تا ۱۸۰ روز پس از خارج شدن از داک در نظر گرفته شود.

جدول (۱) مشخصات هندسی کلی شناور زیرسطحی.

طول کل	۲/۸۵ متر
قطر بدنه	۰/۴۵ متر
طول قسمت دماغه	۰/۲۸۵ متر
طول پاشنه	۰/۷۲ متر
تعداد بالک	۴ عدد
سطح خیس بدنه	۴ متر مربع
سطح هر بالک	۰/۰۲۹ متر مربع
حجم کل	۰/۳۸۷ مترمکعب

جدول (۲) مشخصات پروانه.

$D_p(m)$	۰/۲۸
η_0	۰/۴۶۵
Z	۶
EAR	۰/۵۷
P/D	۱/۳
J	۰/۸
K_T	۰/۱۲
K_Q	۰/۰۳۱



شکل (۱) هندسه AUV مورد مطالعه.

² BareHull¹ Mean Chord Length

مراحل انجام محاسبات درگ در این روش به شرح ذیل است.

محاسبه ضریب اصطکاک: از فرمول ITTC'57 (Rn عدد رینولدز می باشد):

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}^{R_n-2})^2} \quad (11)$$

Rn عدد رینولدز، V سرعت جسم (شناور)، L طول شناور و ρ چگالی سیال است.

زبری نسبی: ۰/۰۵ ضریب اصطکاک در نظر گرفته می شود:

$$\delta C_F = 0.05 C_{F_0} \quad (12)$$

ضریب اصطکاک کل: ضریب اصطکاک کل از رابطه مقابل محاسبه می گردد:

$$C_F = C_{F_0} + \delta C_F \quad (13)$$

فاکتور فرم بدنه: فاکتور فرم بدنه از طریق فرمول تجربی با رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$k = \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^3 \quad (14)$$

ضریب مقاومت فشاری (فرم):

$$C_{FORM} = k C_{F_0} \quad (15)$$

مقاومت اصطکاکی:

$$R_F = \frac{1}{2} \rho C_F V^2 S_{WET} \quad (16)$$

مقاومت فشاری:

$$R_{FORM} = \frac{1}{2} \rho C_{FORM} V^2 S_{WET} = \frac{1}{2} \rho k C_F V^2 S_{WET} \quad (17)$$

V سرعت شناور، S_{wet} سطح خیس و ρ چگالی سیال است. مقاومت کل از جمع مقاومت اصطکاکی و فشاری بدست می آید.

$$R_T = R_F + R_{FORM} \quad (18)$$

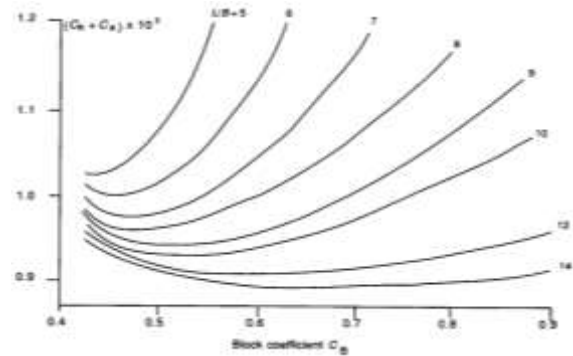
۳-۴- روش چهارم- روش اول هوانر [۱۵]

ضریب مقاومت اصطکاکی از روش ITTC'57 استفاده می گردد.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}^{R_n-2})^2} \quad (19)$$

محاسبه ضریب مقاومت کل: در این روش محاسبه ضریب درگ کل از رابطه ای که به ضریب اصطکاکی و ابعاد شناور (اندازه طولی) وابسته است محاسبه می شود و در محاسبه مقاومت سطح خیس شناور لحاظ می گردد که به صورت ذیل ارائه گردیده است.

$$C_T = C_F \left(1 + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 \left(\frac{D}{L}\right)\right) \quad (20)$$



شکل (۲) مقدار C_A+C_R بر حسب ضریب ظرافت C_B [۱۳].

مقاومت کل از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$R = \frac{1}{2} \rho C_T V^2 S_{WET} \quad (3)$$

۳-۲- روش دوم- روش منبع (Theory) [۱۴]

ضریب اصطکاک: در این روش از یکی از فرمول های ذیل ضریب اصطکاک را محاسبه می کنیم:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}^{R_n-2})^2} \quad (4)$$

$$C_F = \frac{0.455}{(\log_{10}^{R_n})^{2.58}} \quad (5)$$

$$C_F = \frac{1}{(3.46 * \log_{10}^{R_n} - 5.6)^2} \quad (6)$$

R_n: عدد رینولدز است.

$$R_n = \frac{VL}{\nu} \quad (7)$$

ضریب درگ کل: ضریب درگ کل که شامل ضریب اصطکاکی (C_F) و ضریب مقاومت باقی مانده (C_R) است، از رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$\frac{C_T}{C_F} = 1 + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^2 + 7 \left(\frac{D}{L}\right)^3 \quad (8)$$

$$C_T = C_F \left(1 + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^2 + 7 * \left(\frac{D}{L}\right)^3\right) \quad (9)$$

D: قطر زیر دریایی و L: طول زیر دریایی است.

سپس مقاومت کل از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$R = \frac{1}{2} \rho C_T V^2 S_{WET} \quad (10)$$

S_{wet}: سطح خیس شناور (m²)، C_T: ضریب مقاومت کل، V: سرعت شناور (m/s)، ρ: چگالی آب دریا (Kg/m³)

۳-۳- روش سوم- روش منبع (Some Aspect) [۱۵]

این روش و فرمول های مربوط برای شناورهایی با نسبت طول به قطر $5 < \frac{L}{D} < 7$ و در حالتی که $H > 5D$ (H عمق غوطه وری شناور می باشد) مورد استفاده قرار می گیرد.

n_f و n_a به ترتیب پری بدنه را در ناحیه سینه و پاشنه با تحت تاثیر قرار دادن انحنای سهمی‌ها، بیان می‌کند. شکل (۳) نشان دهنده تاثیر این ضرایب بر روی بدنه زیر دریایی است. مقاومت کل بدنه:

$$R_T = R_A + R_V \quad (28)$$

۳-۷- روش هفتم - روش MIT [۱۸]

در این روش با استفاده از ضرایب محاسبه شده به شرح ذیل توان کل مورد نیاز شناور محاسبه می‌شود.

محاسبه ضریب C_{ff} : این ضریب بیانگر ضریب مقاومت کل به ضریب مقاومت اصطکاکی می‌باشد.

$$C_{ff} = \frac{C_F + C_R}{C_F} = 1 + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 \left(\frac{D}{L}\right)^3 + 0.002(C_P - 0.6) \quad (29)$$

که در آن C_P از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$C_P = \frac{v}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L} \quad (30)$$

$$C_{ff} = [0.14 \sim 0.18] C_F$$

محاسبه درگ بر جک: برای محاسبه بر جک مساحت سطح بر جک در ضریب $C_{DS} = 0.009$ ضرب می‌شود ($A_S \cdot C_{DS}$).

محاسبه درگ ملحقات: برای محاسبه درگ ملحقات از روش زیر استفاده می‌شود:

$$A_{other} \cdot C_{other} = A_{PP} = \frac{L \cdot D}{1000} \quad (31)$$

مقاومت کل بدنه عبارت است از:

$$(S_{wet} \cdot (C_F \cdot C_{ff} + C_A) + (A_S C_{DS})) R_T = 0.5 \rho V^2 \quad (32)$$

۳-۸- روش هشتم - روش YEFIM'YEF [۱۹]

این روش مقاومت کل بدنه لخت به دو قسمت مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقیمانده تقسیم می‌شود، که هر کدام از مقادیر آن از رابطه های ذیل استخراج می‌شود. ضریب مقاومت اصطکاکی از رابطه ITTC'57 محاسبه می‌شود.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Rn) - 2)^2} \quad (33)$$

ضریب مقاومت باقیمانده از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$C_R = 0.009 \frac{A}{S_{wet}} \sqrt{\frac{\sqrt{A}}{2L_{RUN}}} \quad (34)$$

که می‌توان آن را بصورت ساده شده به شکل زیر نوشت.

$$C_R = \frac{0.000789}{\frac{L}{D} - 1.3606} \quad (35)$$

۳-۵- روش پنجم - روش دوم هوانر (مبتنی بر سطح مقطع عرضی) [۱۶]

ضریب مقاومت اصطکاکی از روش ITTC'57 استفاده می‌گردد.

محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (21)$$

محاسبه ضریب مقاومت کل: در این روش محاسبه درگ به سطح مقطع عرضی بستگی دارد و ضریب درگ کل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_T = C_F \left(3 \left(\frac{D}{L}\right) + 4.5 \left(\frac{D}{L}\right)^{0.5} + 21 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \right) \quad (22)$$

نکته ۱: ضریب مقاومت موج سازی برای عمق بیشتر از ۵ برابر قطر بدنه در این روش صفر در نظر گرفته شده است.

نکته ۲: ملحقات ممکن است ۵۰٪ مقاومت بدنه را شامل شود.

$$R = \frac{1}{2} \rho C_T V^2 A \quad (23)$$

A: سطح مقطع عرضی شناور می‌باشد.

۳-۶- روش ششم - روش Virginia [۱۷]

در این روش مقاومت کل بدنه لخت به دو قسمت مقاومت ویسکوز (فشاری) و مقاومت ناشی از ضریب مجاز ($C_A = 0.004$) تقسیم می‌شود که هر کدام از مقادیر آن از رابطه های ذیل استخراج می‌شود.

مقاومت ضریب مجاز: مقاومت ناشی از ضریب مجاز (زبری بدنه) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R_A = 0.5 * \rho * V_1^2 * S_{wet} * C_A \quad (24)$$

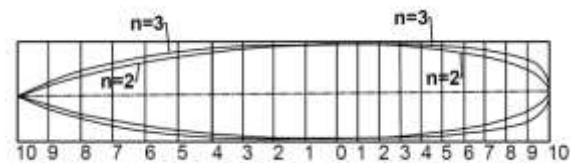
مقاومت ویسکوز: از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$R_V = 0.5 * \rho * V_1 * S_{wet} * C_F * \text{formfac} \quad (25)$$

که در آن:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Rn) - 2)^2} \quad (26)$$

$$\text{formfac} = 1 + 0.5 \left(\frac{D}{L}\right) + 3 \left(\frac{D}{L}\right)^{\left(7 - n_f - \frac{n_a}{2}\right)} \quad (27)$$



شکل (۳) تاثیر n_f و n_a بر شکل هندسی بدنه [۱۷].

¹ Front Area

این ضریب نشان دهنده نسبت مساحت سطح بدنه دوران به مساحت سطح یک استوانه مستقیم با همان شعاع حداکثر است. مقاومت کل بدنه:

$$R_T = R_F + R_r \quad (43)$$

۴- روش CFD

۴-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادله پیوستگی، معادله ناویر استوکس در حالت تراکم ناپذیر لزج و دائم و معادلات مدلسازی اغتشاش است که در ادامه به طور خلاصه به آن اشاره می شود.

معادله پیوستگی:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (44)$$

که ρ دانسیته سیال و \vec{v} بردار سرعت است.

معادله بقاء اندازه حرکت خطی:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \bar{\tau} \quad (45)$$

در این معادله P فشار و $\bar{\tau}$ تانسور تنش است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\vec{\nabla} \vec{v} + \vec{\nabla} \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \bar{I} \right] \quad (46)$$

در این رابطه μ لزجت مولکولی و \bar{I} تانسور واحد می باشد. معادلات اغتشاش جریان: مدل استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده شده، که شامل معادلات زیر است. معادله k :

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_b + G_k - \rho \varepsilon \quad (47)$$

معادله ε :

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (48)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (49)$$

در معادلات فوق C_1 و C_2 ضرایب تجربی بوده و σ_k و σ_ε اعداد اشمیت و پراندتل آشفته می باشند. ثابت های استفاده شده در این معادلات به صورت زیر تعریف می شوند:

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1, \sigma_\varepsilon=1.3 \quad (50)$$

ثابت $C_{1\varepsilon}$ در معادله ε اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می کند که به صورت زیر است:

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left[\frac{V}{u} \right] \quad (51)$$

G_k و G_b چشمه معادله k هستند که به ترتیب اثر شناوری و اثر گرادیان سرعت میانگین را در معادله بیان می کند.

A سطح مقطع ماکزیمم، S_{wet} مساحت سطح خیس و L_{RUN} طول بدنه عقب که برابر $0.4L$ است.

مقاومت کل بدنه:

$$R_T = R_F + R_r \quad (36)$$

۳-۹- روش نهم - روش DTMB [۲۰]

این روش مقاومت کل بدنه به دو قسمت مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقیمانده تقسیم می شود، که هر کدام از مقادیر آن از رابطه های ذیل استخراج می شود.

ضریب مقاومت اصطکاکی از رابطه ITTC'57 محاسبه می شود.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Rn)-2)^2} \quad (37)$$

ضریب مقاومت باقیمانده از رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$C_R = \frac{L}{D} \times 10^{-5} \quad (38)$$

مقاومت کل بدنه:

$$R_T = R_F + R_r \quad (39)$$

۳-۱۰- روش دهم - روش JACSON [۲۱]

این روش مقاومت کل بدنه لخت به دو قسمت مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقیمانده تقسیم می شود، که هر کدام از مقادیر آن از رابطه های ذیل استخراج می شود.

ضریب مقاومت اصطکاکی از رابطه ITTC'57 محاسبه می شود.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Rn)-2)^2} \quad (40)$$

ضریب مقاومت باقیمانده:

$$C_R = \frac{0.000789}{\frac{L}{D} - K_2} \quad (41)$$

که در آن:

$$K_2 = 6 - 3.6 * C_{sa} - 2.4 * C_{sf} \quad (42)$$

C_{sa} و C_{sf} (ضریب سطح قسمت پاشنه و سینه) از جدول (۳) استخراج می شوند.

جدول (۳) مقادیر انتخاب شده برای C_s .

بدنه جلو				
$n_f(n_a)$	۲	۲/۵	۳	۳/۵
C_{sf}	۰/۷۹۹۹	۰/۸۹۵	۰/۸۹۵۲	۰/۹۲۰۰
بدنه عقب				
$n_f(n_a)$	۲	۲/۵	۳	۳/۵
C_{sa}	۰/۶۷۱۵	۰/۷۲۶۴	۰/۷۶۴۳	۰/۷۹۳۴

کل دامنه محاسباتی شامل ۷۰ حجم یا بلوک است که دارای ۸/۴ میلیون شبکه محاسباتی است. ۳/۷ میلیون سلول مربوط به پروانه و بقیه سلولها مختص بقیه دامنه محاسباتی است. حداکثر $y^+ = 27/3$ و مقدار میانگین $y^+ = 11/6$ ملاحظه شده است.

۴-۳- داده‌های حاصل از روش CFD

با استفاده از روش حل عددی، محاسبات در چند سرعت انجام شد. شبیه‌سازی عددی جریان اطراف AUV به همراه پروانه آن انجام شده است. مبنای حل، برابری نیروی تراست تولید شده توسط پروانه با نیروی درگ محاسبه شده شناور در سرعت‌های مختلف می‌باشد. برای انجام این محاسبات بدین ترتیب عمل شد که میزان درگ در سرعت مورد نظر محاسبه و سپس دور مورد نیاز پروانه، جهت تولید نیروی تراست برابر با نیروی درگ محاسبه شده، بدست آمد.

توجه داریم که با توجه به متصل بودن بدنه و پروانه در انجام محاسبات، ملاحظاتی همچون ضریب ویک و ضریب کاهش تراست، در انجام محاسبات لحاظ شده است. با توجه به اینکه عمق کاری شناور و انجام آزمایشات در عمق ۱۰ متری انجام شده است، از اثرات کاپیتاسیون و سطح آزاد در شبیه‌سازی، صرف‌نظر شده است. شکل (۵) نمونه‌ای از کانتور فشار بدست آمده در اطراف بدنه و پروانه را نشان می‌دهند. در جدول (۴) نتایج نیروی درگ حاصل از محاسبات عددی در سرعت‌های مختلف ارائه شده است.

۵- تست میدانی

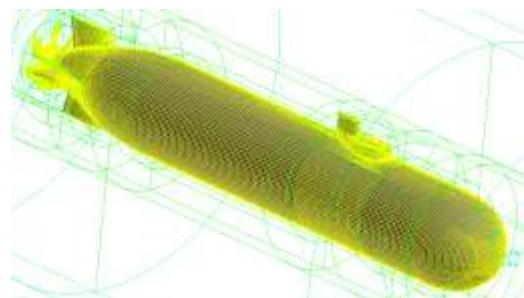
۵-۱- داده‌های حاصل از تست میدانی شناور

شکل (۶) تصویری از شناور در حرکت سطحی را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز جهت تحلیل رفتار شناور در سرعت‌های مختلف سرعت چرخش پروانه، ولتاژ و جریان خروجی از باتری‌ها به منظور بدست آوردن توان مورد نیاز موتور جهت حرکت وسیله در هر سرعت ثبت گردید. به منظور خلاصه سازی، توان محاسبه شده، که حاصل ضرب جریان در ولتاژ است، ارائه خواهد گردید. در جدول (۵) اطلاعات حاصل از تست میدانی، شامل سرعت حرکت شناور و توان مصرفی موتور در عمق ۱۰ متر ثبت گردیده است. نتایج ارائه شده، از ویرایش اطلاعات چندین بار انجام تست و حذف داده‌های پرت بدست آمده است.

۴-۲- روش CFD بلوک بندی و تولید شبکه محاسباتی

تحلیل جریان اطراف یک مدل هندسی به روش عددی نیازمند تولید دامنه محاسباتی اطراف آن است. یک دامنه محاسباتی فضایی است که معادلات حاکم در آن فضا حول جسم حل شده و نیروها و گشتاورهای اعمالی به جسم بدست آید. یک دامنه محاسباتی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اثرات جریان و گرادیان‌های اطراف مدل روی مرزها کاملاً از بین رود. برای حل مسئله، اندازه دامنه محاسباتی از جلو و عقب حدوداً ۲۰ برابر طول شناور و از اطراف ۴۰ برابر قطر شناور در نظر گرفته شده است. به واسطه پیچیدگی هندسه پروانه و همچنین شرایط حل، دامنه محاسباتی بلوک بندی و سپس هر بلوک به صورت جداگانه شبکه بندی شده است. شبکه بندی از جمله ملزومات یک حل عددی است. کل دامنه محاسباتی توسط شبکه بندی به سلولهای محاسباتی تقسیم می‌شوند و سپس معادلات حاکم بر مسئله به روش حجم محدود در این سلولها حل می‌گردد تا کل دامنه محاسباتی تحلیل گردد.

در این پروژه از شبکه محاسباتی ترکیبی با سازمان و بی سازمان به طور همزمان استفاده شده است به گونه‌ای که در بلوکهای اطراف و نزدیک بدنه و همچنین برجک و بالکها از شبکه با سازمان باتوپولوژی ترکیبی O و H استفاده شده است. پروانه به لحاظ وضعیت حرکتی متفاوت در یک بلوک استوانه‌ای مجزا قرار داده شده است و از شبکه بدون سازمان در آن استفاده گردیده است. سایر قسمتهای دامنه تا نقاط دور از جسم توسط سلولهای بی سازمان شبکه بندی شده است. در شکل (۴) بلوک بندی نزدیک بدنه نشان داده شده است. ایجاد شبکه چهار وجهی بر روی سطوح پروانه به خاطر پیچش سطح و زاویه عقبگرد زیاد آن شبکه مناسبی ایجاد نمی‌کند. بنابراین روی سطوح پروانه از شبکه مثلثی استفاده شده است.



شکل (۴) بلوک بندی دامنه محاسباتی در نزدیکی بدنه و شبکه محاسباتی بر روی بدنه زیر سطحی.

مقاومت کل شناور شامل بدنه و ملحقات از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$R_T = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 S_{wet} \quad (52)$$

S_{wet} : سطح خیس شناور (m^2)، C_D : ضریب درگ کل،
 V : سرعت شناور (m/s)، ρ : چگالی آب دریا (Kg/m^3)
 توان موثر (P_E):

$$P_E = R_T \cdot V \quad (53)$$

توان تراست (P_T):

$$P_T = T \cdot V_A \quad (54)$$

که در آن T میزان تراست پروانه (N) و V_A سرعت پیشروی است که از رابطه (۵۳) محاسبه می‌شود.

$$V_A = V_S \cdot (1 - w) \quad (55)$$

در رابطه فوق w ضریب ویک و V_S سرعت وسیله است.

توان تحویلی به پروانه (P_D):

$$P_D = \frac{P_E}{PC} \quad (56)$$

که در آن P_E توان موثر (w) و PC : ضریب رانش می‌باشد که از رابطه (۵۵) محاسبه می‌گردد.

$$PC = \eta_H \eta_o \eta_r \quad (57)$$

η_H راندمان بدنه^۲، η_o راندمان اوپن واتر^۳ و η_r راندمان چرخشی نسبی^۴ می‌باشد.

در ذیل روابط مربوط به محاسبه راندمان‌های فوق ارائه خواهد گردید.

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{1-t}{1-w} \quad (58)$$

$$\eta_o = \frac{T \cdot V_A}{2\pi n Q} = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (59)$$

$$\eta_r = \quad (60)$$

(توان جذب شده در میدان ویک در میانگین سرعت V_A)

(توان جذب شده در حالت اوپن واتر در سرعت V_A)

در روابط فوق t ضریب کاهش تراست، w فاکتور ویک، J ضریب پیشروی پروانه، K_T ضریب تراست پروانه، K_Q ضریب گشتاور پروانه، Q گشتاور پروانه ($N-m$) و n دور پروانه (rpm) می‌باشد.

توان موتور (P_M): تمامی راندمان‌های لازم برای محاسبات، در قالب دو راندمان مکانیکی (η_M) و الکتریکی (η_E) در نظر گرفته شده است.

$$P_M = \frac{P_D}{\eta_M \eta_E} \quad (61)$$

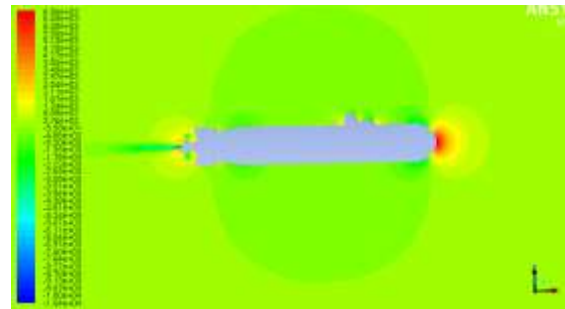
جدول (۴) نتایج حاصل از روش CFD در سرعت‌های مختلف.

۲	F(N)
2.5	21.59792
3.5	34.48436
4.5	44.96628
5.5	66.84671
6.5	85.16186
7.5	122.5134
9	167.8166
11	265.547
13	372.2554

جدول (۵) نتایج حاصل از تست میدانی در سرعت‌های مختلف

و عمق ۱۰ متر.

V(knot)	P _M (w)
2.3	73.36316
3.3	154.6625
5.6	603.6778
7	1155.478
8	1721.557
10.3	3914.002
10.8	4391.748
12.4	6425.668



شکل (۵) کانتور تغییرات فشار استاتیکی در صفحه تقارن بدنه.



شکل (۶) تصویر AUV در حرکت سطحی.

۶- تحلیل نتایج بدست آمده از تست میدانی

ابتدا معادلات مورد نیاز جهت تحلیل نتایج بدست آمده از تست را معرفی می‌کنیم.

³ Open Water Efficiency

⁴ Relative Rotative Efficiency

¹ Propulsion Coefficient

² Hull Efficiency

جدول (۶) مقادیر مورد نیاز برای انجام محاسبات توان.

w	0.34
t	0.096
η_r	1
η_H	1.37
PC	0.637
η_M	0.87
η_E	0.93

جدول (۷) محاسبات ضریب درگ، توان موثر با استفاده از روش

CFD

V(knot)	CD(-)	PE(w)
2.5	0.00638	27.75332
3.5	0.005328	62.03737
4.5	0.004202	104.007
5.5	0.004182	188.9757
6.5	0.003815	284.5258
7.5	0.004122	472.2893
9	0.003921	776.3195
11	0.004153	1501.403
13	0.004169	2487.41

جدول (۸) محاسبات توان موثر، نیرو و ضریب درگ با استفاده

از تست میدانی.

V (knot)	PM(w)	PE(w)	F(N)	CD(-)
2.3	73.36316	37.78203	31.95908	0.011434
3.3	154.6625	79.65119	46.95861	0.008161
5.6	603.6778	310.8941	108.0093	0.006518
7	1155.478	595.071	165.3894	0.006388
8	1721.557	886.6019	215.6133	0.006376
10.3	3914.002	2015.711	380.7394	0.006792
10.8	4391.748	2261.75	407.4344	0.006611
12.4	6425.668	3309.219	519.2072	0.006391

با توجه به آنکه درگ ملحقات در منابع مختلف بین ۱۵ تا ۵۰ درصد درگ کل پیش‌بینی شده است، اغلب میزان ۲۰٪ برای ملحقات در شناورهای مثل AUV ها پیشنهاد می‌شود. بنابراین، در محاسبات توان موثر روش‌هایی که برای محاسبات توان ملحقات روشی ارائه نموده‌اند، به میزان ۲۰٪ به توان محاسبه شده افزایش یافته است. مقادیر حاصل از روش تست میدانی و CFD از میان یابی داده‌های بدست آمده در نرم افزار متلب محاسبه شده است.

در شکل (۷) توان موثر محاسبه شده از روش‌های مختلف و در شکل (۸) ضریب درگ کل حاصل از روش‌های مختلف، که از تلفیق روابط (۵۰) و (۵۱) و داده‌های بدست آمده از روش‌های مختلف، بصورت مبسوط نشان داده شده است.

که در آن P_T توان کل $R_T(w)$ نیروی درگ کل (N) و V سرعت شناور (m/s) می‌باشد.

از آنجایی که راندمان چرخش نسبی دارای مقدار نزدیک به یک و مقدار آن معمولاً $0.96 < \eta_r < 1.04$ می‌باشد [۲۲]، در انجام محاسبات از محاسبه آن صرف نظر شده و مقدار آن را برابر یک فرض کردیم. سایر راندمان‌ها و مقادیر مورد نیاز برای انجام محاسبات توان در جدول (۶) ارائه شده است.

مقادیر η_M و η_E از کار آزمایشگاه بدست آمده است. بدین صورت که در شرایط آزمایشگاهی، با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خروجی از باتری‌ها، توان ورودی که حاصلضرب جریان در ولتاژ است محاسبه گردید ($P_{in}=VI$)، سپس با اندازه‌گیری میزان گشتاور خروجی و همچنین سرعت دوران بعد از موتور، بعد از شافت و بعد از آب بندها، توان خروجی در هر ایستگاه از رابطه $P_{out}=2\pi nQ$ محاسبه گردید. با تقسیم توان خروجی بر توان ورودی ($\eta=P_{out}/P_{in}$) راندمان‌ها محاسبه گردید. مقدار راندمان‌ها از باتریخانه تا لحظه تحویل به پروانه بصورت راندمان متوسط مکانیکی و الکتریکی در جدول (۶) ارائه شده است. با تلفیق معادلات (۵۶)، (۵۷) و (۶۱) خواهیم داشت:

$$\eta_H \eta_o \eta_r = P_M \cdot \eta_M \eta_E \cdot PC P_E = P_M \cdot \eta_M \eta_E \quad (62)$$

با استفاده از رابطه فوق می‌توان توان موثر را مستقیماً از توان موتور محاسبه کرد و همچنین بالعکس.

با استفاده از رابطه (۶۰) و رابطه (۵۰) و داده‌های جداول (۴) و (۶) می‌توان ضریب درگ، توان موثر و توان موتور را با استفاده از روش CFD بصورت جدول (۷) در سرعت‌های مختلف بدست آورد.

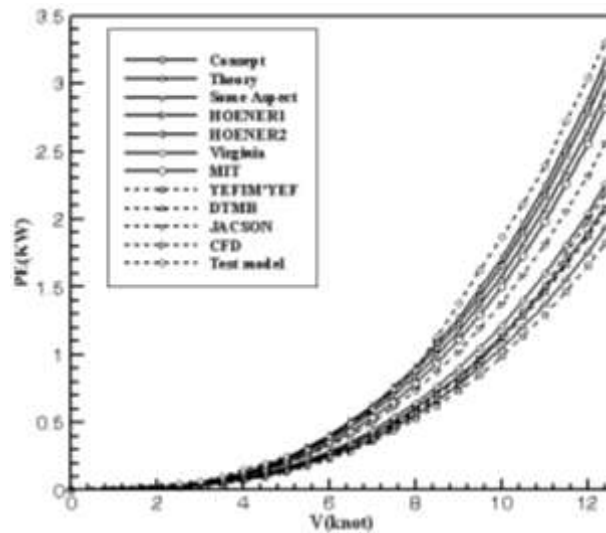
همچنین با استفاده از رابطه (۶۲) و رابطه (۵۲) و داده‌های جداول (۵) و (۶) می‌توان، توان موثر، نیرو و ضریب درگ را با استفاده از داده‌های تست میدانی بدست آورد که در جدول (۸) نتایج محاسبه شده در سرعت‌های مختلف خلاصه شده است.

۶- تحلیل نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف

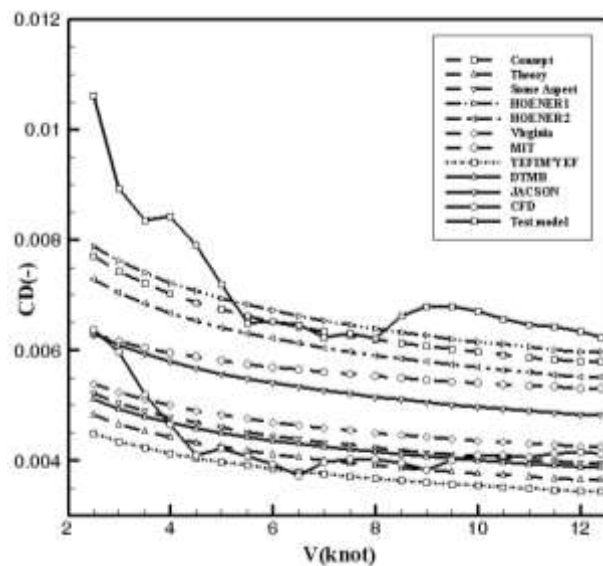
در جدول (۹) بطور خلاصه مقادیر بدست آمده با استفاده از روش‌های مختلف رادر سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اینکه حداکثر سرعت شناور در تست میدانی ۱۲/۴ نات ثبت گردیده، محاسبات تا این سرعت ارائه شده است.

جدول (۹) محاسبات توان موثر با استفاده از روش‌های مختلف.

روش	Method	V(knot)							
		2.5	4.5	6.5	7.5	9.5	10.5	11.5	12.4
۱	consept	0.03352	0.17426	0.49106	0.73559	1.43552	1.90597	2.46661	3.07072
۲	theory	0.02098	0.10974	0.30983	0.46430	0.90630	1.20327	1.55703	1.93821
۳	Some Aspect	0.02270	0.11875	0.33528	0.50244	0.98075	1.30210	1.68492	2.09742
۴	HOENER1	0.03428	0.17931	0.50627	0.75867	1.48091	1.96615	2.54420	3.16706
۵	HOENER2	0.03170	0.16580	0.46813	0.70152	1.36934	1.81803	2.35253	2.92847
۶	Virginia	0.02344	0.12446	0.35487	0.53384	1.04881	1.39632	1.81141	2.25755
۷	MIT	0.02736	0.14901	0.43159	0.65324	1.29633	1.73319	2.25709	2.81807
۸	YEFIM'YEF	0.01953	0.10264	0.29071	0.43619	0.85322	1.13380	1.46835	1.82854
۹	DTMB	0.02221	0.11638	0.32901	0.49329	0.96372	1.27997	1.65685	2.06281
۱۰	JACSON	0.02738	0.14390	0.40762	0.61162	1.19645	1.58996	2.05915	2.56428
۱۱	CFD	0.02775	0.10401	0.28453	0.47229	0.95759	1.32013	1.74790	2.19161
۱۲	test model	0.04616	0.20030	0.49358	0.74084	1.62298	2.11413	2.72002	3.30922



شکل (۷) نمودار سرعت-توان موثر.



شکل (۸) نمودار سرعت-ضریب درگ کل.

جدول (۱۰) درصد اختلاف توان موثر محاسبه شده با استفاده از روش های مختلف نسبت به روش تست مدل.

v(knot)	2.5	4.5	6.5	7.5	9.5	10.5	11.5	12.4
consept	27.38195	13.00268	0.50963	0.70808	11.55051	9.84601	9.31626	7.20710
theory	54.54563	45.21450	37.22694	37.32759	44.15795	43.08448	42.75669	41.42988
Some Aspect	50.81204	40.71446	32.07080	32.17973	39.57113	38.40948	38.05477	36.61897
HOENER1	25.72718	10.48005	-2.57169	-2.40722	8.75364	6.99958	6.46397	4.29594
HOENER2	31.32254	17.22406	5.15557	5.30765	15.62770	14.00579	13.51053	11.50583
Virginia	49.22291	37.86322	28.10331	27.94026	35.37727	33.95274	33.40438	31.77994
MIT	40.71439	25.60491	12.55841	11.82454	20.12665	18.01882	17.01918	14.84191
YEFIM'YEF	57.69058	48.75759	41.10136	41.12220	47.42889	46.37010	46.01682	44.74419
DTMB	51.89052	41.89909	33.34188	33.41449	40.62003	39.45611	39.08673	37.66490
JACSON	40.68989	28.15726	17.41548	17.44169	26.28041	24.79373	24.29650	22.51095
CFD	39.87042	48.07429	42.35460	36.24919	40.99792	37.55662	35.73922	33.77265

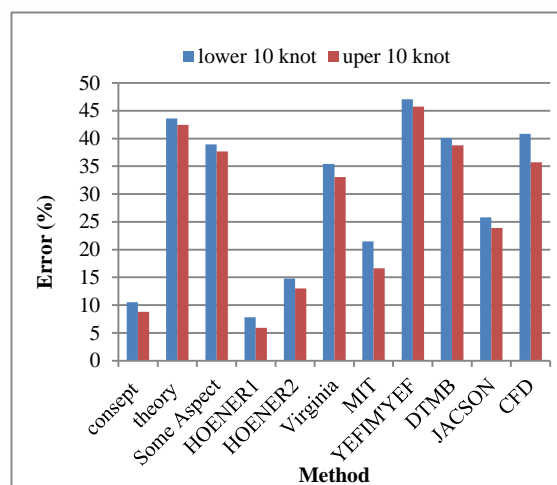
۷- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا روش های مختلف محاسبه یک وسیله زیرسطحی و محاسبات مقاومت توان از روش CFD ارائه گردید. سپس داده های بدست آمده از روش تست میدانی ارائه شد و نحوه استخراج و تحلیل نتایج بدست آمده ارائه شد. توان موثر شناور مورد نظر، از روش های مختلف محاسبه گردید و با توان موثر بدست آمده از روش تست میدانی مقایسه گردید. نتایج نشان می دهند که روش های hoener1، hoener2، CONCEPT و MIT به ترتیب کمترین خطا را داشته و میزان خطای آن ها کمتر از ۲۰ درصد می باشد. همچنین روش های YEFIM'YEF و THEORY با خطای بالاتر از چهار درصد به ترتیب بیشترین خطا را در انجام محاسبات دارند. بر مبنای محاسبات انجام شده، روش CFD دارای خطای حدود ۳۵ درصد نسبت به روش تست میدانی می باشد و برای سرعت های پایین تر از ۱۰ نات به ۴۰ درصد افزایش پیدا می کند.

۸- مراجع

- [1] Gotimer, E. H. and Lin, C. W., "Application of Computational Fluid Dynamics to Advanced Experimental Techniques", the Intl. Conf. on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Marine and Offshore Industries, Carderock, Maryland, pp. 1-13, 1992.
- [2] Nahon, M., "Determination of Undersea Vehicle Hydrodynamics Derivatives, Using the USAF Datcom", Engineering in Harmony with Ocean, Proceedings, Victoria, BC, Canada, pp.283-288, 1993.
- [3] Sayer, P., "Hydrodynamic Forces on ROV Near the Air-sea Interface", Int. J. Offshore and Polar Engineering, Vol. 6, No. 3, pp.177-183,1996.
- [4] Clouss, G. F. Hoog, S., Vannahme, M., Gerber, H., Gasparoni, F., and Calore, D., "MODUS: Space Shuttle for Deepwater Interventions", Offshore Technology Conference, Texas, U.S.A., 2002.

جدول (۱۰) درصد اختلاف توان محاسبه شده از روش های مختلف نسبت به روش تست میدانی را نشان می دهد. با توجه به جدول مشاهده می شود که در سرعت های ۶/۵ و ۷/۵ نات در روش hoener1 دارای مقادیر منفی شده است. یعنی به میزان ۲/۴ و ۲/۵ درصد توان محاسبه شده از این روش بیشتر از روش تست مدل بدست آمده است. با توجه به داده ها این نکته حاصل می شود که با افزایش سرعت میزان اختلاف کاهش پیدا کرده و در سرعت های پایین تر میزان اختلاف زیادتر است. در شکل (۹) میزان درصد اختلاف میانگین برای سرعت های پایین تر از ۱۰ نات و بالاتر از ۱۰ نات نشان داده شده است.



شکل (۹) میزان درصد اختلاف میانگین برای سرعت های پایین تر از ۱۰ نات و بالاتر از ۱۰ نات.

با توجه به نمودار مشخص است که در تمام روش های محاسبه شده خطای سرعت های پایین تر از سرعت ۱۰ نات بیشتر از خطای سرعت های بیشتر از ۱۰ نات می باشد.

- [22] Carlton, J. S., "Marine Propeller and Propulsion", Elsevier Ltd, Vol.1, pp. 87-132, 2007.
- [5] Ayub, A. M., Sohaib, M., Bilal, S., Zahir, S., and Khan, M. A., "Estimation of Hydrodynamic Coefficient of DARPA-2 and Their Geometry Dependence", National Engineering and Scientific Commission Magazine, Islamabad 43, 2005.
- [6] Jagadeesh, P., Murali, K. and Idichandy, V. G., "Experimental Investigation of Hydrodynamic Force Coefficients over AUV Hull Form", Ocean Engineering, Vol.36, pp.113-118, 2009.
- [7] Choi, S. K. and Ching, J. C., "Navier-Stokes Solution of Complete Turbulent Flow Past Finite Axisymmetric Bodies", AIAA Journal, Vol. 29, No.6, pp.998-1001, 1991.
- [8] Sung, C. H., Fu, T. C., Griffin, M. J. and Huang, T. T., "Validation of Incompressible Flow Computation of Forces and Moments on Axisymmetric Bodies Atincidence", 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 95-0528, pp. 1-13, 1995.
- [9] Mulvany, N., Tu, J.Y., Chen, L. and Anderson, B., "Assessment of Two Equation Turbulence Modeling for High Reynolds Number Hydrofoil flow", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 45, pp.275-299, 2004.
- [10] Das, H. N., Jayakumar, P. and Saji, V. F., "CFD Examination of Interaction of Flow on High-Speed Submerged Body with Pump Jetpropulsor", In 5th International Conference on High Performance Marine Vehicles, Australia, pp. 8-10, Nov 2006.
- [11] Adkins, D. and Yan, Y. Y. "CFD Simulation of Fish-like Body Moving Inviscous Liquid", Journal of Bionic Engineering, Vol. 3, pp.147-153, 2006.
- [12] Karim, M., Rahman, M. and Alim, A., "Numerical Computation of Viscous Drag for Axisymmetric under Water Vehicles", Journal Mechanical, Vol. 26, pp. 9-21, 2008.
- [13] Roy Burchur and Louis Rydill, "Concept in Submarine Design", Vol.1, pp.100-130, 1992.
- [14] Yuri N. Kormilitsin, Oleg A. K., "Theory of Submarine Design", Vol.1, pp.46-93, 2001.
- [15] Joubert, P. N., "Some Aspects of Submarine Design", University of Melbourne, Defence Science and Technology Organization, Vol.1, pp.100-190 2006.
- [16] Poter, H. and Reader, G., "Underwater Vehicle Design with Regard to Power Planet Selection", 2004.
- [17] Design Report - Ballistic Missile Defense Submarine SSBMD, Virginia University, Virginia Tech Team 1, pp. 59-68, 2008.
- [18] Stenard, J., "Comparative Naval Architecture of Modern Foreign Submarine", MIT, 1988.
- [19] Capitan Harry Jackson, "Submarine Design Notes", Vol.1, pp.50-135, 1982.
- [20] Grant B. T., "A Design Tool for the Evaluation of Atmosphere Independent Propulsion in Submarines", MIT, 1979.
- [21] Rawson K. J. and Tupper E. C., "Basic Ship Theory", Vol.2, 5th Edition, pp.427-468, 2001.