

## تحلیل نتایج آزمایش مدل یک زیردریایی در حوضچه کشش و مقایسه با روش CFD و سایر روابط تجربی

محمد مونسان<sup>۱</sup>، مهراں جوادی<sup>۲</sup><sup>۱</sup>عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر ؛ m\_moonsun@yahoo.com<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر mehran.javadi@yahoo.com

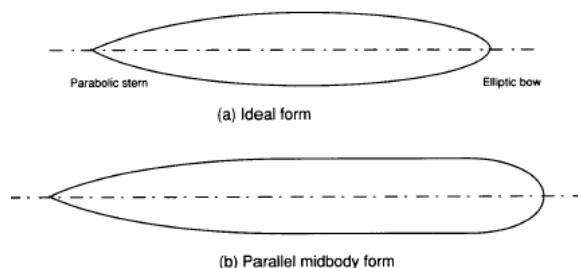
## چکیده

هدف از این مقاله، تحلیل و ارائه مقایسه ای بین نتایج آزمایش مدل در حوضچه کشش، نتایج مدلسازی CFD و نتایج بدست آمده از روابط تجربی موجود در زمینه مقاومت زیردریایی ها در عمق آب می باشد. در پایان این مقاله، میزان دقت هریک از این روش ها در مورد یک زیردریایی ۳۲ متری ارائه می گردد. ابتدا روش انجام آزمایش مدل در زیر سطح آب بررسی می شود. برای آزمایش مدل در این حالت، تشابه فرود ناکارآمد است و از طرفی امکان برقراری تشابه رینولدز نیز وجود ندارد. این مقاله به ارائه روشی برای چگونگی تعمیم نتایج بین مدل و زیردریایی واقعی در عمق آب می پردازد. همچنین شرایط غوطه وری کامل و حداقل فاصله از سطح آب جهت حذف اثر سطح آزاد نیز بررسی شده است. برای آزمایش مدل در حوضچه، یک مدل یک متری از زیردریایی ساخته شده و در سرعت های مختلف آزمایش شده است. نتایج این آزمایشات، استخراج و به زیردریایی واقعی تعمیم داده شده است. در مرحله بعد، نتایج بدست آمده از مدل سازی در محیط CFD نیز ارائه و مقایسه می شود. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل شده، از چهار دسته روابط ریاضی موجود برای محاسبه مقاومت زیردریایی ها در عمق آب استفاده می شود که بر اساس تجربه و تست مدل استخراج شده اند و استفاده از آنها در طراحی زیردریایی ها رایج است. این مقاله با ارائه جداول و نمودارهای مقایسه ای بین این عرروش و پیشنهاد ضریب مقاومت مناسب برای زیردریایی در حالت زیر آب جمع بندی می شود.

**کلمات کلیدی:** زیردریایی، آزمایش مدل، مقاومت، CFD، روابط تجربی، تحلیل نتایج

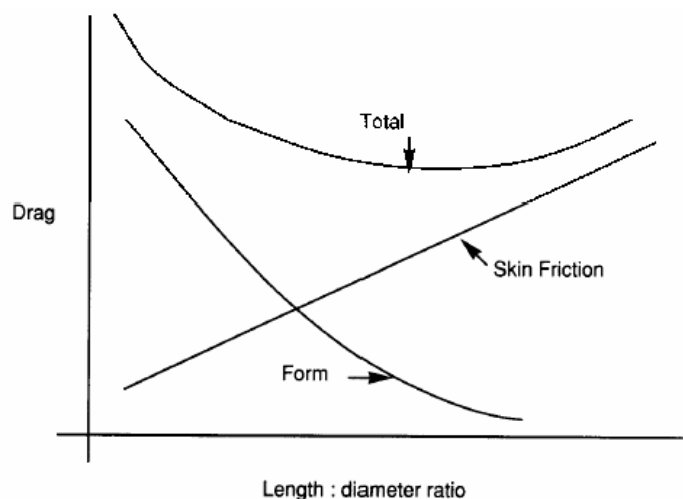
## مقدمه

ایده آل ترین شکل برای حرکت در زیر آب، شکلی شبیه شکل الف می باشد که به آن حالت «دوکی شکل» گویند. این شکل دارای مقاومت ویسکوز فشاری برابر ۱۰ درصد مقاومت کل است که نشان از مناسب بودن این شکل برای زیر آب دارد.



شکل ۱: شکل های مناسب برای بدنه زیردریایی

در واقع این شکل برای حرکت در محیط یک نوع سیال (آب یا هوا) که مرز مشترک دو سیال و سطح آزاد نداشته باشد، مناسب است، بنابراین برای هواپیما نیز این شکل بدنه مناسب است. از آنجا که ساخت این بدنه و ایجاد انحنای آن کاری دشوار است، از شکلی مناسب تر مطابق شکل ب استفاده می شود که به آن «بدنه میانی استوانه ای» می گویند. امروزه اغلب زیردریایی ها و هواپیماها را به این شکل می سازند. اگر یک شناور بخواهد در مرز مشترک دو سیال مانند هوا و آب حرکت کند، شکل بدنه شبیه کشتی ها با سینه تیز، مناسب و ایده آل خواهد بود. در این باره در قسمت های بعد بیشتر صحبت خواهد شد. اگر یک بدنه دوکی شکل برای یک زیردریایی در عمق آب در نظر بگیریم، بدلیل دور بودن از سطح آزاد، مقاومت موج سازی وجود ندارد و فقط مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری وجود دارد. مقاومت ویسکوز فشاری نیز همان مقاومت شکلی است. تغییرات مقاومت اصطکاکی و شکلی نسبت به تغییرات طول به قطر  $(L/D)$  را می توان در شکل ۱ مشاهده کرد. با زیاد شدن نسبت  $(L/D)$ ، مقاومت اصطکاکی افزایش و مقاومت شکلی کاهش می یابد. بنابراین اثر  $(L/D)$  بر این دو مؤلفه از مقاومت، متناقض است. بنابراین باید یک نقطه بهینه ای در این بین وجود داشته باشد به گونه ای که مجموع دو مقاومت اصطکاکی و شکلی، باعث کمترین مقاومت کل شود. نمودار مقاومت کل همان نمودار سهمی شکل موجود در شکل ۲ است. پائین ترین نقطه این سهمی، نقطه ایده آل نسبت  $(L/D)$  است که برای بدنه دوکی شکل، این نسبت برابر ۶ و برای بدنه میانی استوانه ای برابر ۱۰ است.



شکل ۲: تغییرات مقاومت زیردریایی با نسبت (L/D)

در زیردریایی های نظامی می توان به صورت تقریبی درصد سهم مقاومت هریک از ضمامم و ملحقات بدنه را که مجموعا حدود ۳۵ درصد از مقاومت کل است را به صورت زیر نشان داد [۱]:

جدول ۱: درصد سهم مقاومت هریک از ضمامم و ملحقات بدنه

Main body	Bridge fin	Stern planes	Bow planes	Upper rudder	Lower rudder	Sonar fairing	keel	Total (%)
65.5	7.67	7.61	3.44	5.24	1.71	2.78	6.05	100

زیردریایی مورد بررسی در این مقاله دارای ابعاد زیر است (واحدها در سیستم SI)

جدول ۲: ابعاد زیردریایی مورد بررسی در مقاله

نوع شکل زیردریایی	طول کلی	قطر بدنه	تناژ	طول سینه	طول استوانه‌ای	طول مخروطی پاشنه	زاویه مخروطی پاشنه (درجه)
بدنه میانی استوانه‌ای	۳۲	۳/۶	۲۳۵	۵	۲۱	۶	۱۶/۷

بدنه این زیردریایی از نوع بدنه میانی موازی است که نسبت  $L/D$  آن برابر  $۸/۸۸$  می باشد که بدلیل محدودیت های سایر مؤلفه های طراحی از نسبت  $L/D$  بهینه برای این نوع شکل بدنه ها فاصله دارد. شکل سینه آن بیضوی کامل و پاشنه آن مخروطی کامل است. این زیردریایی دارای یک عرشه روی بدنه به طول ۲۸ متر و ارتفاع ۰/۴ متر و برجک به طول ۳/۲ متر و ارتفاع ۳ متر است. حداکثر سرعت زیرآبی آن ۱۴ گره و مساحت سطح خیس کل ۴۵۰ مترمربع می باشد. کلیه ابعاد این زیردریایی برای آزمایش مدل به اندازه (۱:۳۲) مقیاس شده اند. برای آزمایش مدل از حوضچه کشش دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده که ابعاد این حوضچه به همراه ابعاد سایر حوضچه های کشش ایران در جدول ۳ ارائه شده است.

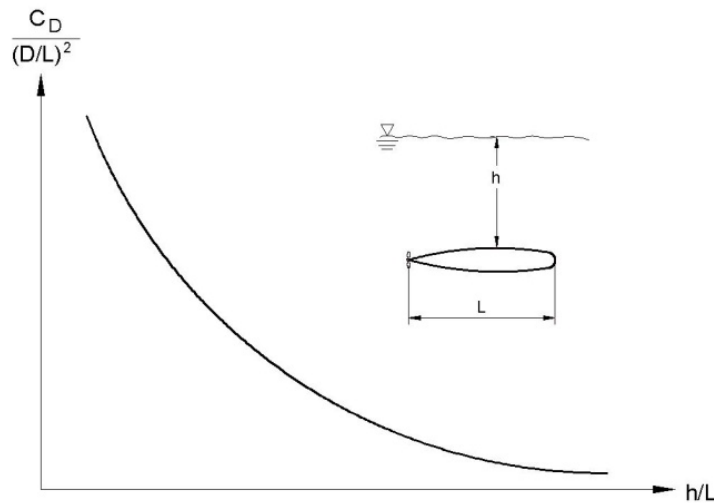
جدول ۳: مشخصات حوضچه های کشش ایران

محل	طول (متر)	عرض (متر)	عمق (متر)	حداکثر سرعت ازابه (m/s)
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی مالک اشتر (در حال ساخت)	۱۴۰	۷	۳	بیش از ۱۰
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان	۱۰۷	۳	۲/۲	۳
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی شریف	۲۵	۲/۵	۲/۵	۶
حوضچه کشش دانشگاه نوشهر	۲۳	۲/۵	۲	۳

### مقاومت موج سازی زیردریایی در عمق آب

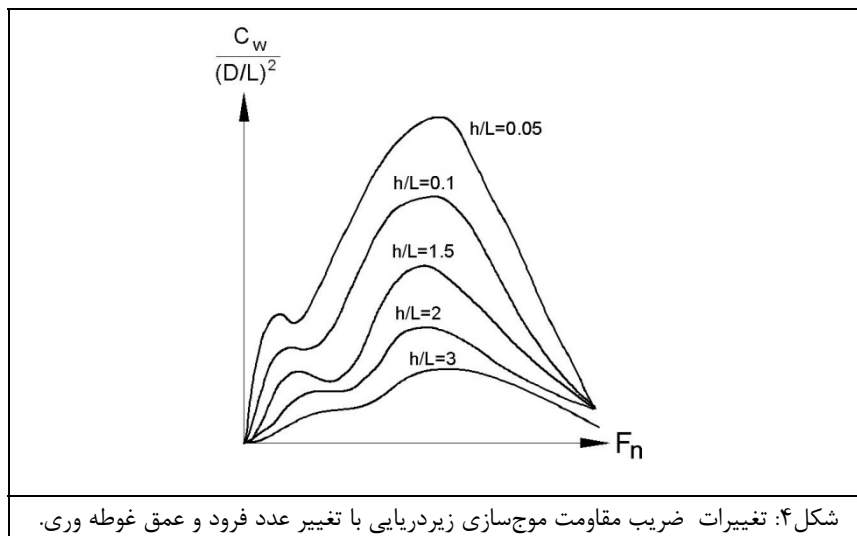
تولید موج در سطح مشترک دو سیال با چگالی متفاوت انجام می شود. اگر یک کشتی روی سطح آب حرکت کند در واقع در سطح مشترک سیال آب و هوا حرکت کرده و تولید موج می کند. حال اگر یک زیردریایی ابتدا روی سطح آب حرکت کند و اندک اندک از سطح آب فاصله بگیرد

و به عمق آب برود، اثر مقاومت موج سازی اندک اندک کاهش یافته تا جائیکه این مؤلفه مقاومت کاملاً حذف می شود. نمودار شکل ۳ بیان کننده کاهش ضریب مقاومت کل با افزایش عمق زیردریایی است.



شکل ۳: تغییرات ضریب مقاومت کل زیردریایی با افزایش عمق

در این نمودار  $C_D$  ضریب مقاومت کل،  $h$  عمق غوطه وری زیردریایی،  $L$  طول و  $D$  حداکثر قطر زیردریایی است. همچنین نمودار شکل ۴ بیان کننده تغییرات ضریب مقاومت موج سازی بر حسب تغییرات عمق است. محور افقی نمودار نیز عدد فرود می باشد.



شکل ۴: تغییرات ضریب مقاومت موج سازی زیردریایی با تغییر عدد فرود و عمق غوطه وری.

اعداد نوشته شده بر روی نمودار، نسبت  $(h/L)$  هستند. بنابراین مقاومت موج سازی زیردریایی با افزایش عمق، کاهش می یابد تا جائیکه کاملاً حذف می شود. این عمق در منبع [۵] برابر نصف طول زیردریایی  $\{h=(L/2)\}$  و در منبع [۴] سه برابر قطر بدنه زیردریایی  $(h=3D)$  و در منبع [۲] معادل ۵ برابر قطر بدنه  $(h=5D)$  در نظر گرفته شده است. مشخص است که مقاومت شکست موج در زیر سطح آب وجود ندارد و فقط مقاومت موج سازی وجود دارد. مقاومت موج سازی برای یک زیردریایی که زیر سطح آب قرار گرفته به صورت امواج کوچک در سطح آب مشخص می شود.

#### روش تعمیم نتایج مدل سازی در حالت غوطه وری و زیر سطح آب در حوضچه کشش

برای آزمایش در زیر آب، نمی توان از تشابه فرود استفاده کرد چراکه اثر سطح آزاد وجود ندارد. از طرفی امکان برقراری تشابه رینولدز نیز در آزمایش مدل وجود ندارد چراکه با فرض یکسان بودن ویسکوزیته آب حوضچه و دریا داریم:

$$(Rn)_m = (Rn)_s \quad V_m = V_s \cdot (L_s/L_m) \quad (1)$$

یعنی در این زیردریایی که سرعت اصلی ۱۴ گره  $(7/2)$  متر بر ثانیه است و از مقیاس  $(1:32)$  استفاده شده، سرعت مدل باید ۳۲ برابر سرعت زیردریایی اصلی یعنی  $230/4$  متر بر ثانیه باشد که در عمل امکان پذیر نیست. از طرفی با توجه به موارد زیر معلوم می گردد که نیازی به این تشابه وجود

ندارد. هدف اصلی از تشابه رینولدز، اطمینان از اغتشاش جریان روی مدل است که این هدف را می توان با روش های مختلفی از جمله زبر کردن قسمت سینه مدل انجام داد. بدین ترتیب می توان مطمئن بود که جریان هم در مدل و هم در زیردریایی اصلی آشفته است. در زیر آب نیز فقط مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری وجود دارد و مقاومت موج وجود ندارد. تغییرات ضریب مقاومت اصطکاکی و ضریب مقاومت ویسکوز فشاری پس از رینولدز بحرانی (که جریان آشفته است)، در ناحیه زبر هیدرولیک تقریباً به صورت افقی و یکسان است. این تغییرات به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به موارد بیان شده می توان طبق مراحل زیر، نتایج مدل را به زیردریایی اصلی تعمیم داد [۶]:

(۱) ایجاد زبری در مدل و اطمینان از آشفتگی جریان

(۲) محاسبه ضریب مقاومت کل مدل از روش انجام آزمایش در حوضچه کشش ( $C_{Tm}$ )

(۳) محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی مدل از روش ITTC در رینولدز بحرانی

(۴) محاسبه ضریب مقاومت ویسکوز فشاری مدل و زیردریایی:  $C_{Vp} = C_{Tm} - C_{fm}$

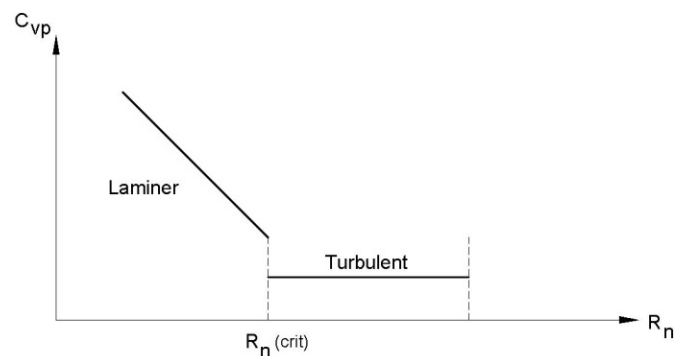
(۵) برابر قراردادن ضریب ویسکوز فشاری مدل و زیردریایی:  $C_{Vp} = (C_{Vp})_m = (C_{Vp})_s$

(۶) محاسبه ضریب مقاومت زیردریایی در رینولدز واقعی به روش ITTC

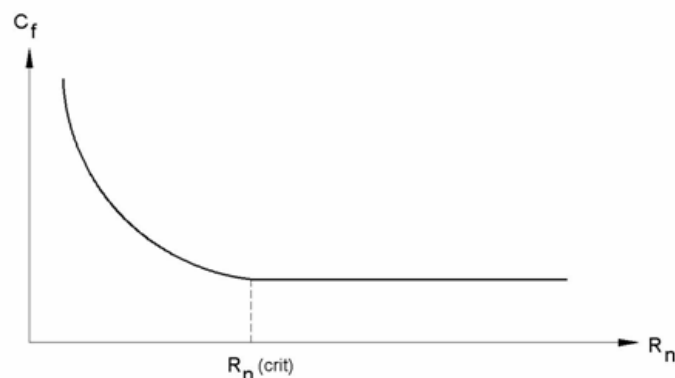
(۷) محاسبه ضریب مقاومت کل زیردریایی:  $C_{TS} = C_{Fs} + C_{Vp}$

(۸) محاسبه مقاومت کل زیردریایی:  $R_T = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$

بدین ترتیب با استفاده از مراحل بالا می توان به تقریب مناسبی از تعمیم نتایج بین مدل و زیردریایی دست یافت.



شکل ۵: نمودار تغییرات ضریب مقاومت ویسکوز فشاری بر حسب رینولدز



شکل ۶: نمودار تغییرات ضریب مقاومت اصطکاکی بر حسب رینولدز

### روش های مختلف محاسبه مقاومت

برای محاسبه مقاومت یک زیردریایی در زیر آب و غوطه وری کامل (بدون اثر امواج سطحی)، یک سری روابط مهندسی وجود دارد که بر اساس تجربه و آزمایش بدست آمده اند و استفاده از آنها رایج است. این روش ها در کنار روش آزمایش مدل و روش CFD می توانند تخمین مناسبی از مقاومت و توان مورد نیاز ارائه دهند. طبیعی است که نتایج این روش ها دقیقاً به هم منطبق نخواهند بود و لذا با حذف نتایج دور از ذهن و واگرا، می توان به تخمین مطلوب رسید.

روش اول) این روش که مقاومت بدنه لخت را می‌دهد، در منبع [۱] ذکر شده و دارای نمودارهای متعددی است که در اینجا ذکر نمی‌گردد. در این روش داریم:

$$C_T = C_f + C_{VP} + C_A$$

که ضریب مقاومت اصطکاکی ( $C_f$ ) از روش ITTC بدست می‌آید و ضریب مقاومت ویسکوز فشاری ( $C_{VP}$ ) و ضریب مجاز برای مدل کردن در مقیاس کامل ( $C_A$ ) از نمودارهای ارائه شده در منبع اصلی استخراج می‌گردد [۱].

جدول ۴: نتایج حاصل از روش اول

V (knot)	V (m/s)	Re	Cfs	Cr	Ca	Ct	Rt(KN)
1	0.514	14964364	0.0028	0.0007	0.0004	0.0039	0.238
2	1.029	29928727	0.0025	0.0007	0.0004	0.0036	0.881
3	1.543	44893091	0.0023	0.0007	0.0004	0.0035	1.897
4	2.058	59857455	0.0022	0.0007	0.0004	0.0034	3.275
5	2.572	74821818	0.0022	0.0007	0.0004	0.0033	5.005
6	3.086	89786182	0.0021	0.0007	0.0004	0.0032	7.081
7	3.601	104750545	0.0021	0.0007	0.0004	0.0032	9.498
8	4.115	119714909	0.0020	0.0007	0.0004	0.0031	12.252
9	4.630	134679273	0.0020	0.0007	0.0004	0.0031	15.340
10	5.144	149643636	0.0020	0.0007	0.0004	0.0031	18.758
11	5.658	164608000	0.0019	0.0007	0.0004	0.0031	22.505
12	6.173	179572364	0.0019	0.0007	0.0004	0.0030	26.578
13	6.687	194536727	0.0019	0.0007	0.0004	0.0030	30.974
14	7.202	209501091	0.0019	0.0007	0.0004	0.0030	35.692

روش دوم) استفاده از روش منبع [۲]

شرط استفاده از این روش به صورت زیر است:

$$5 \langle \frac{L}{D} \rangle 7$$

۱- نسبت طول به قطر بدنه در محدوده زیر باشد:

$$h \geq 5D$$

۲- عمق حرکت زیردریایی بیش از ۵ برابر قطر بدنه باشد:

اگر شروط فوق برقرار بود طی مراحل زیر مقاومت بدنه لخت زیردریایی محاسبه می‌گردد:

۱- محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی از رابطه ITTC-57:

$$C_{Fo} = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2} \quad (2)$$

۲- ضریب مقاومت افزوده ناشی از زبری سطح معادل ۵ درصد ضریب مقاومت اصطکاکی:

$$\delta C_F = 0.05 C_f$$

$$C_F = C_{Fo} + \delta C_F \quad (3)$$

۳- محاسبه ضریب شکل (K) از رابطه زیر:

$$K = \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^3 \quad (4)$$

L: طول زیردریایی و D: قطر بدنه زیردریایی

۴- ضریب مقاومت فشاری (شکلی) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_{VP} = C_{Form} = K \cdot C_{Fo} \quad (5)$$

۵- محاسبه ضریب مقاومت کل:

$$C_T = C_F + C_{VP} \quad (6)$$

۶- محاسبه مقاومت کل بدنه لخت زیردریایی از رابطه زیر:

$$R_T = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (7)$$

که A مساحت سطح خیس است. برای محاسبه مقاومت کلی زیردریایی باید مقاومت ملحقات نیز به مقدار فوق اضافه گردد.

جدول ۵: نتایج حاصل از روش دوم

V (knot)	V (m/s)	Re	Cf0	$\partial Cf$	Cf	k	C form	Ct	Rt(KN)
1	0.514	14964364	0.0028	0.0001	0.0029	0.1146	0.0003	0.0033	0.199
2	1.029	29928727	0.0025	0.0001	0.0026	0.1146	0.0003	0.0029	0.710
3	1.543	44893091	0.0023	0.0001	0.0025	0.1146	0.0003	0.0027	1.500
4	2.058	59857455	0.0022	0.0001	0.0024	0.1146	0.0003	0.0026	2.553
5	2.572	74821818	0.0022	0.0001	0.0023	0.1146	0.0002	0.0025	3.858
6	3.086	89786182	0.0021	0.0001	0.0022	0.1146	0.0002	0.0025	5.409
7	3.601	104750545	0.0021	0.0001	0.0022	0.1146	0.0002	0.0024	7.200
8	4.115	119714909	0.0020	0.0001	0.0021	0.1146	0.0002	0.0024	9.225
9	4.630	134679273	0.0020	0.0001	0.0021	0.1146	0.0002	0.0023	11.482
10	5.144	149643636	0.0020	0.0001	0.0021	0.1146	0.0002	0.0023	13.965
11	5.658	164608000	0.0019	0.0001	0.0020	0.1146	0.0002	0.0023	16.674
12	6.173	179572364	0.0019	0.0001	0.0020	0.1146	0.0002	0.0022	19.604
13	6.687	194536727	0.0019	0.0001	0.0020	0.1146	0.0002	0.0022	22.754
14	7.202	209501091	0.0019	0.0001	0.0020	0.1146	0.0002	0.0022	26.121

روش سوم) استفاده از اولین روش منبع [۳]

در این روش، مقاومت کلی زیردریایی بر اساس ضریبی از مقاومت اصطکاکی ارائه شده است. با استفاده از مراحل زیر می توان به محاسبه پرداخت:

۱ - محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی از ITTC-57

$$C_{Fo} = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2} \quad (8)$$

۲ - محاسبه ضریب مقاومت کل:

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

۳ - محاسبه مقاومت کل بدنه لخت زیردریایی:

$$R_T = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (10)$$

در این رابطه A مساحت سطح خیس است. مقاومت ملحقات باید به مقدار فوق اضافه گردد.

جدول ۶: نتایج حاصل از روش سوم

V (knot)	V (m/s)	Re	Cf0	Ct	Rt (KN)
1	0.514	14964364	0.00280	0.00299	0.182
2	1.029	29928727	0.00250	0.00267	0.651
3	1.543	44893091	0.00235	0.00250	1.374
4	2.058	59857455	0.00225	0.00240	2.338
5	2.572	74821818	0.00217	0.00232	3.533
6	3.086	89786182	0.00212	0.00226	4.954
7	3.601	104750545	0.00207	0.00221	6.593
8	4.115	119714909	0.00203	0.00217	8.448
9	4.630	134679273	0.00200	0.00213	10.515
10	5.144	149643636	0.00197	0.00210	12.789
11	5.658	164608000	0.00194	0.00207	15.270
12	6.173	179572364	0.00192	0.00205	17.953
13	6.687	194536727	0.00190	0.00202	20.838
14	7.202	209501091	0.00188	0.00200	23.922

روش چهارم) استفاده از دومین روش منبع [۳]

این روش همانند روش قبل است با این تفاوت که ضریب مقاومت کل بدنه لخت از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C_T = C_F \left( 3 \left( \frac{D}{L} \right) + 4.5 \left( \frac{D}{L} \right)^{0.5} + 21 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \right) \quad (11)$$

و سپس استفاده از رابطه زیر که در آن S، مساحت مقطع عرضی زیردریایی است:

$$R_T = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (12)$$

جدول ۷: نتایج حاصل از روش چهارم

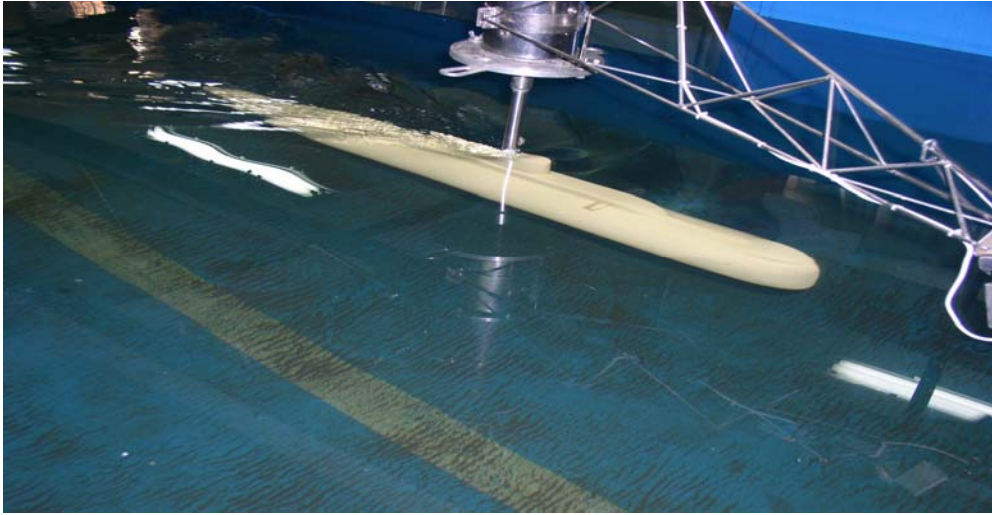
V (knot)	V (m/s)	Re	Cf0	Ct	Rt(KN)
1	0.514	14964364	0.00280	0.00592	0.361
2	1.029	38533236	0.00240	0.00508	1.238
3	1.543	57799855	0.00226	0.00477	2.619
4	2.058	77066473	0.00216	0.00457	4.460
5	2.572	96333091	0.00209	0.00443	6.745
6	3.086	1.16E+08	0.00204	0.00431	9.460
7	3.601	1.35E+08	0.00200	0.00422	12.597
8	4.115	1.54E+08	0.00196	0.00414	16.146
9	4.630	1.73E+08	0.00193	0.00407	20.101
10	5.144	1.93E+08	0.00190	0.00401	24.456
11	5.658	2.12E+08	0.00187	0.00396	29.206
12	6.173	2.31E+08	0.00185	0.00391	34.346
13	6.687	2.5E+08	0.00183	0.00387	39.872
14	7.202	2.7E+08	0.00181	0.00383	45.780

#### ارائه نتایج بدست آمده از روش تست مدل و مدل سازی در محیط CFD

روش پنجم) روش آزمایش مدل در حوضچه و روش ششم، روش مدل سازی در محیط CFD است. نتایج حاصل از روش اول مطابق جدول ۴ است و نتایج حاصل از روش پنجم مطابق جدول ۸ است. برای انجام آزمایش، قسمت سینه زیردریایی به طور کامل زیر شده و بنابراین حتی در سرعت های کم نیز جریان آشفته می باشد. زیردریایی شامل تمام ضمامم بوده و در عمق آب و شرایط غوطه وری کامل آزمایش شده است.



شکل ۷: ساخت مدل به صورت مقاطع - میله فلزی میانی طرح



شکل ۸: تست مدل در حوضچه

جدول ۸: نتایج حاصل از روش تست عملی مدل (روش پنجم)

V(knot)	V(m/s)	$Rt_m$	$C_{tm}=C_{ts}$
2.916019	1.5	4.43	0.003842
2.721617	1.4	3.9	0.003883
2.527216	1.3	3.42	0.003949
2.332815	1.2	2.96	0.004011
2.138414	1.1	2.48	0.003999
1.944012	1	2.05	0.004
1.749611	0.9	1.68	0.004047
1.55521	0.8	1.37	0.004177
1.360809	0.7	1.08	0.004301
1.166407	0.6	0.76	0.004119
0.972006	0.5	0.55	0.004293

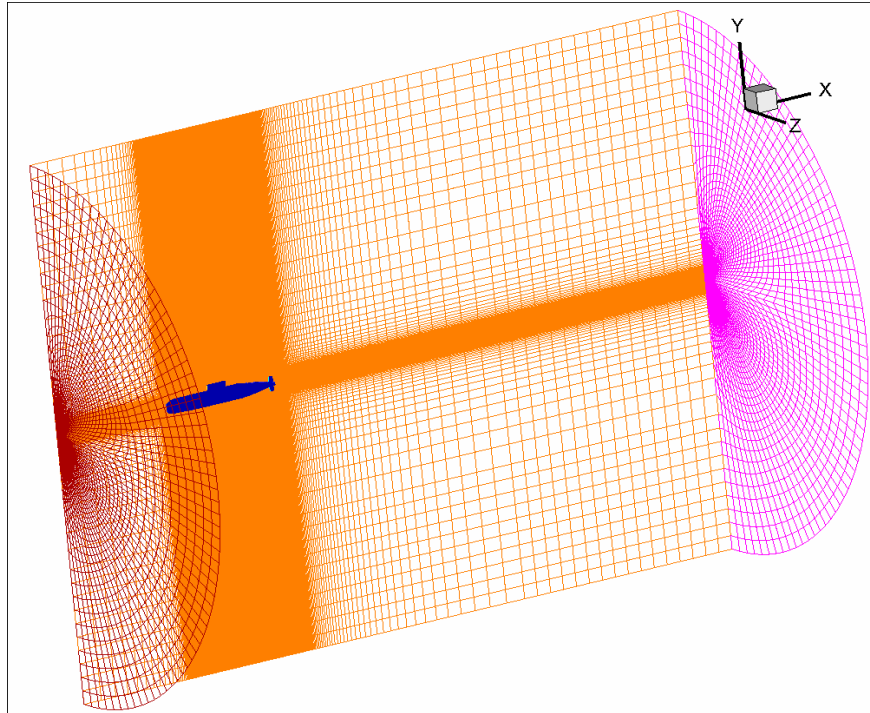
با توجه مطالبی که قبلا در مورد یکنواختی تغییرات ضرایب مقاومت اصطکاکی و فشاری پس از آشفتگی جریان بیان شد در جدول فوق، این واقعیت به وضوح ملاحظه می گردد. تغییرات ضریب مقاومت کل در این جدول در سرعت های بالا در حدود ۰.۰۳۹٪ می باشد. لذا با توجه به تغییرات جدول می توانیم ضریب مقاومت زیردریایی را تقریبا برابر این عدد بگیریم و در جدول زیر خواهیم داشت:

جدول ۹: نتایج تست مدل برای سرعت های ۱ تا ۱۴ گره

Vs(knot)	Vs(m/s)	$Rts$ (KN)
0	0	0.0000
1	0.5144	0.2380
2	1.0288	0.9520
3	1.5432	2.1420
4	2.0576	3.8080
5	2.572	5.9499
6	3.0864	8.5679
7	3.6008	11.6619
8	4.1152	15.2319
9	4.6296	19.2778
10	5.144	23.7998
11	5.6584	28.7977
12	6.1728	34.2717
13	6.6872	40.2216
14	7.2016	46.6476



روش ششم): نتایج حاصل از روش ششم مطابق جدول ۱۰ است. در این مدل سازی بدنه به همراه ضمامم بوده است.



شکل ۹: مدل ستزی زیر دریایی در محیط CFD

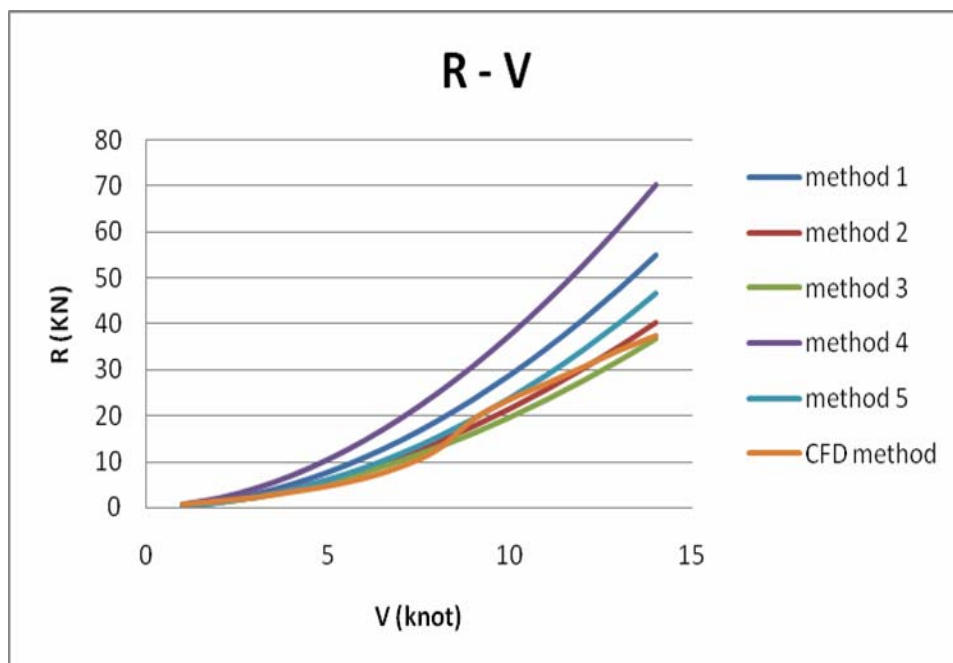
جدول ۱۰: نتایج حاصل از تحلیل CFD

velocity(knot)	R t(KN)
0	0
1	0.623
2	1.359
3	2.126
4	3.346
5	4.637
6	6.368
7	8.863
8	12.5553
9	19.24
10	23.552
11	26.982
12	30.567
13	34.254
14	37.386

بطور مثال سهم هریک از اجزاء مقاومت کل در سرعت ۸ گره از قرار زیر بوده است:

جدول ۱۱: سهم هریک از اجزاء مقاومت کل در سرعت ۸

Pressure force (N)	Viscous force (N)	Total force (N)
6749.1628	5804.1003	12553.2631



شکل ۹: نمودار مقایسه سرعت - مقاومت زیردریایی برای شش روش

#### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

قبل از نتیجه‌گیری ابتدا یادآوری می‌شود که روش اول تا چهارم فقط شامل مقاومت بدنه لخت (بدون ضمام) می‌باشد و روش پنجم و ششم شامل مقاومت کل زیردریایی است. اگر سهم مقاومت ضمام بدنه زیردریایی تقریباً برابر ۳۵ درصد در نظر گرفته شود باید نتایج روش‌های اول تا چهارم برای مقاومت کل بدنه اصلاح گردد.

V (knot)	method 1	method 2	method 3	method 4	method 5	method 6
1	0.36677514	0.30590877	0.2801496	0.5549127	0.2379978	0.623
2	1.35476246	1.09280212	1.0007824	1.9051925	0.9519911	1.359
3	2.91871624	2.30798527	2.1136407	4.0286747	2.14198	2.126
4	5.03809373	3.92753338	3.5968143	6.861308	3.8079645	3.346
5	7.69959057	5.93595174	5.4361133	10.376349	5.9499446	4.637
6	10.893471	8.32190174	7.6211537	14.554213	8.5679202	6.368
7	14.6121165	11.0765105	10.14381	19.379562	11.661891	8.863
8	18.8493033	14.1925298	12.997444	24.839863	15.231858	12.5553
9	23.5997927	17.6638582	16.176468	30.924559	19.27782	19.24
10	28.8590756	21.4852444	19.676073	37.624564	23.799778	23.552
11	34.6232042	25.6520906	23.492049	44.931916	28.797732	26.982
12	40.8886748	30.1603163	27.620659	52.839551	34.271681	30.567
13	47.6523432	35.0062596	32.058548	61.341124	40.221625	34.254
14	54.9113617	40.1866041	36.80268	70.430891	46.647565	37.386

با توجه به جدول فوق و نمودار شکل ۹، ملاحظه می‌گردد که به غیر از نتایج روش اول و چهارم، نتایج بقیه روش‌ها تقریباً به یکدیگر نزدیک است و دارای تفاوت کمتر از ۲۰ درصد هستند. لذا از بین نتایج تست مدل و CFD مقدار مقاومت کل بدنه و ضمام مجموعاً برابر ۴۵ کیلو نیوتن در نظر گرفته می‌شود.

- [1] Concepts in Submarine Design
- [2] Practical Ship Hydrodynamics/ V.Bertram / 2000
- [3] Underwater Vehicle Design with Regard to Power plant Selection/J.Pulmor/
- [4] Submarine Design Notes/ H.A.Jackson/1980
- [5] Basic Ship Theory-Vol2/ K.J.Rawson-E.C.Tupper

[6] کتاب جامع مهندسی معماری دریایی / محمد مونسان / ۱۳۸۸