

پروردگار شما کسی است که کشتی را در دریا برای شما به

حرکت در می آورد تا از فضل او برای خود بجوئید چرا که او

همواره به شما مهربان است.

معماری کشتی - هیدرو دینامیک ۱



یکشنبه (۸-۱۰)، سه شنبه (۸-۱۰)	ساعت کلاس
hajivand.kmsu@gmail.com	ایمیل

احمد حاجیوند

زمستان ۱۳۹۶

هدف درس

- ▶ آشنایی با مفاهیم و مولفه های مقاومت کشتی
- ▶ آشنایی با روش های تخمین مقاومت کشتی
- ▶ توانایی محاسبه مقاومت کل کشتی
- ▶ آشنایی با مفاهیم و عملکرد سیستم رانش

سرفصل مطالب

فصل اول : ►

1. مقدمه
2. اهمیت محاسبه توان مورد نیاز جهت رانش کشتی
3. روش‌های پیش‌بینی مقاومت کشتی
4. معادلات حاکم بر جریان سیال
5. آنالیز ابعادی و تشابه بین مدل و کشتی
6. تقسیم بندی مولفه های مقاومت

سرفصل مطالب

فصل دوم : ►

1. پیش بینی مقاومت با روابط تجربی (روابط آماری)
2. پیش بینی مقاومت با روابط تجربی (سری سیستماتیک)

سرفصل مطالب

فصل سوم : ►

1. تحلیل جریان ایده ال اطراف کشتی، در آب عمیق و سطح آزاد
2. بررسی الگوی موج اطراف بدنه کشتی و محاسبه مقاوت موجسازی،
3. شکست موج و اسپری
4. بررسی اثر بالبوس سینه

سرفصل مطالب

فصل چهارم : ►

1. تحلیل جریان واقعی اطراف کشتی
2. لایه مرزی، جریان روی صفحه تخت، اجسام دو بعدی
3. جریان اطراف اجسام سه بعدی، لایه مرزی اطراف کشتی،
4. زبری سطح

سرفصل مطالب

فصل پنجم : ►

1. مقاومت ملحقات
2. مقاومت اضافی موج
3. مقاومت هوا و باد
4. بررسی اثر عمق و کانال بر مقاومت کشتی

سرفصل مطالب

فصل ششم : ►

1. پیش بینی مقاومت با نتایج تست مدل
2. تشریح تجهیزات آزمایشگاهی
3. روش های تعمیم نتایج مدل به کشتی

سرفصل مطالب

فصل هفتم : ►

1. بررسی عملکرد سیستم رانش و اثرات تداخلی پروانه و بدنه
2. تشریح روند طراحی پروانه به کمک سری های استاندارد

ارزشیابی

کوبیز	آنمره
پروژه	آنمره ۳
امتحان میاخ ترم	آنمره ۴
امتحان پایاخ ترم	آنمره ۱۱

۶ جلسه غیبت موجب حذف درس می شود.

پروژه در تاریخ مقرر تحویل گرفته می شود.

پروژه: تهیه دفترچه مقاومت (ظرفیت گروه: ۴ نفر - ارائه و تهیه گزارش)

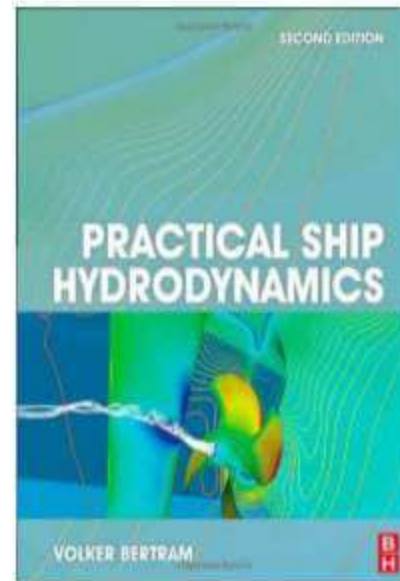
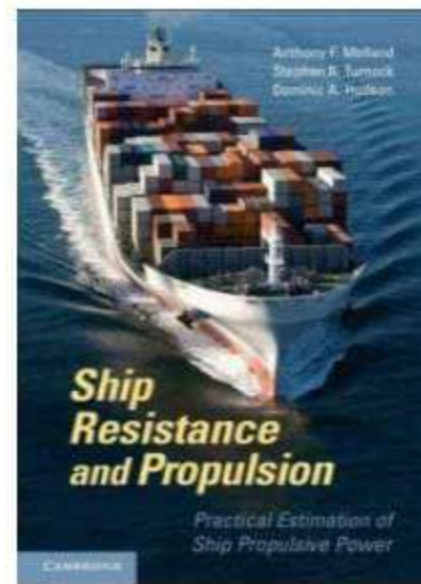
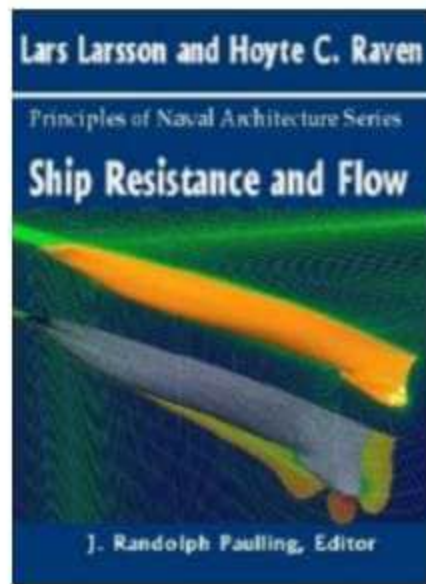
بخش اول: شامل محاسبه مقاومت بدنه برهنه با استفاده از روش هولتروپ و هولنباخ

بخش دوم: محاسبه مقاومت ملحققات با روابط تجربی (طراحی ملحققات شامل مکان، بیلج کیل، تراستر سینه، شفت، استرات شفت)

بخش سوم: محاسبه مقاومت باد و موج از روابط تجربی (در موج منظم و نامنظم)

بخش اختیاری: محاسبه مقاومت شناور با دینامیک سیالات محاسباتی (آنمره اضافی)

مهلت تحویل: آخرین جلسه کلاس درس



فصل اول - مقدمه ای بر هیدرودینامیک کشتی



معماری کشتی:

شاخه ای از مهندسی که به کاربرد تئوری کشتی در فرایند طراحی و ساخت مربوط می شود، با هدف پیش بینی مشخصات و کارایی یک کشتی قبل از ساخت.

تئوری کشتی:

علم توضیح رفتار فیزیکی کشتی، از طریق استفاده از ریاضیات یا داده های تجربی.

هنر معماری کشتی در حال تبدیل شدن به یک ترکیب عاقلانه از عوامل بسیاری است تا محصولی تولید کند که نه تنها زیبایی ظاهر دارد، بلکه می تواند عملکرد خود را با حداکثر کارایی و توجیه اقتصادی انجام دهد.

هیدرودینامیک کشتی

```
graph TD; A[هیدرودینامیک کشتی] --> B[مانور]; A --> C[دریامانی]; A --> D[رانش]; A --> E[مقاومت]
```

مانور

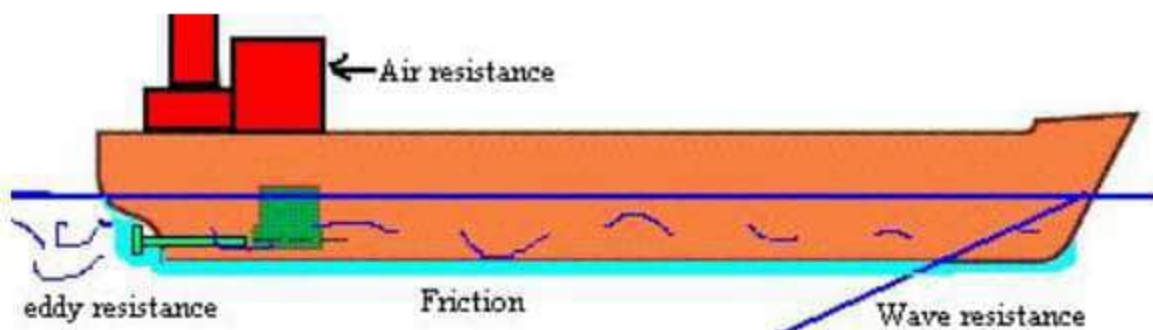
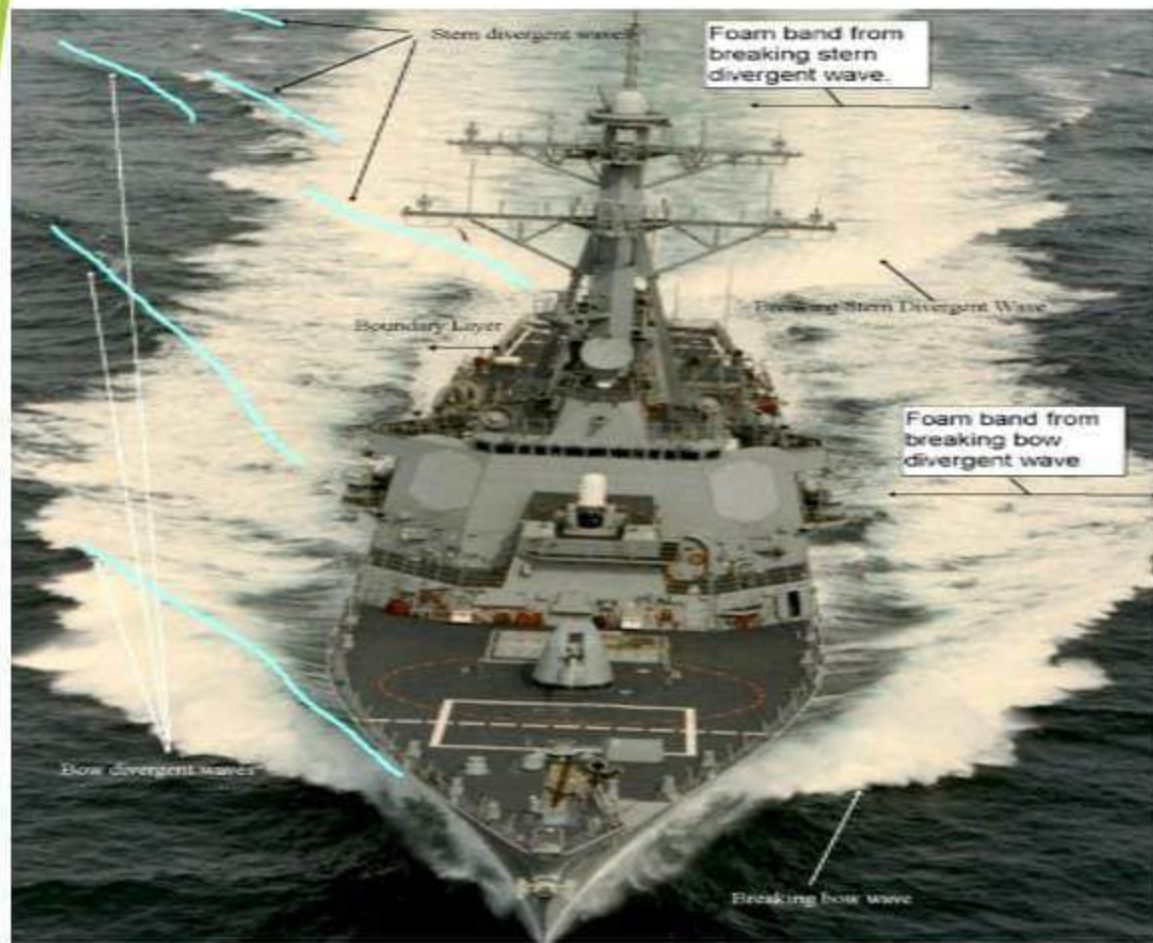
دریامانی

رانش

مقاومت

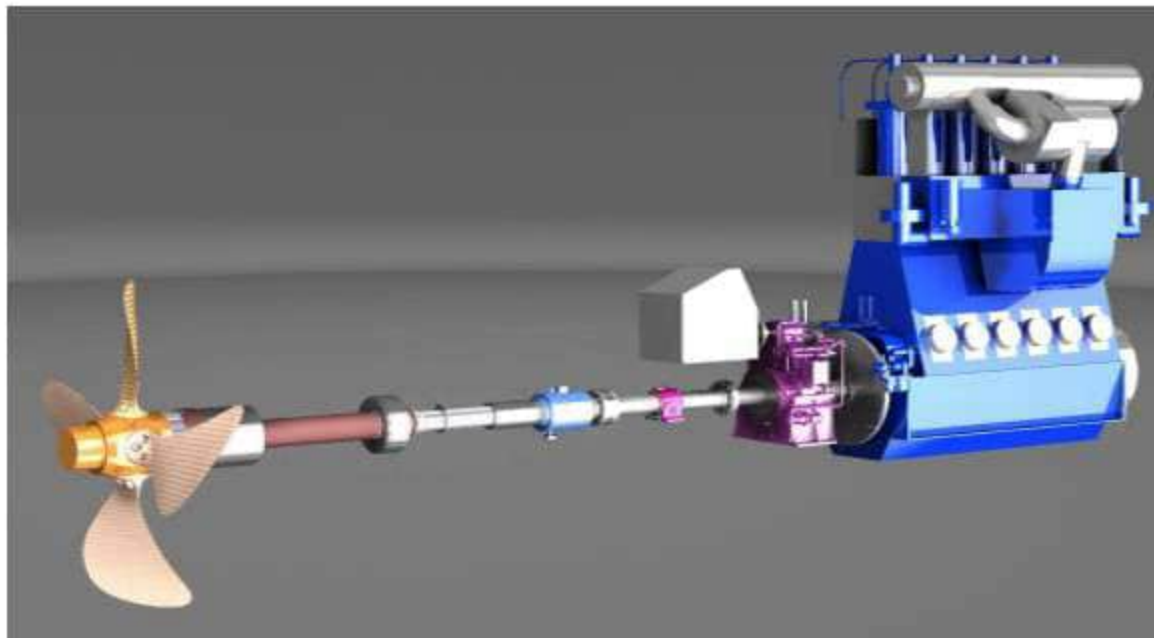
مقاومت

نیروی مورد نیاز برای کشیدن کشتی در آب آرام در سرعت ثابت



رانش

مکانیزم یا سیستم تولید تراست جهت حرکت کشتی در دریا



دریامانی

بررسی نیروها و حرکات وارد شده از طرف موج دریا به کشتی



مانورپذیری

بررسی توانایی کشتی در حفظ مسیر، تغییر مسیر و تغییر سرعت



روشهای بررسی هیدرودینامیک کشتی

۱-آزمایشگاهی

بر مبنای تشابه دینامیکی مدل و کشتی



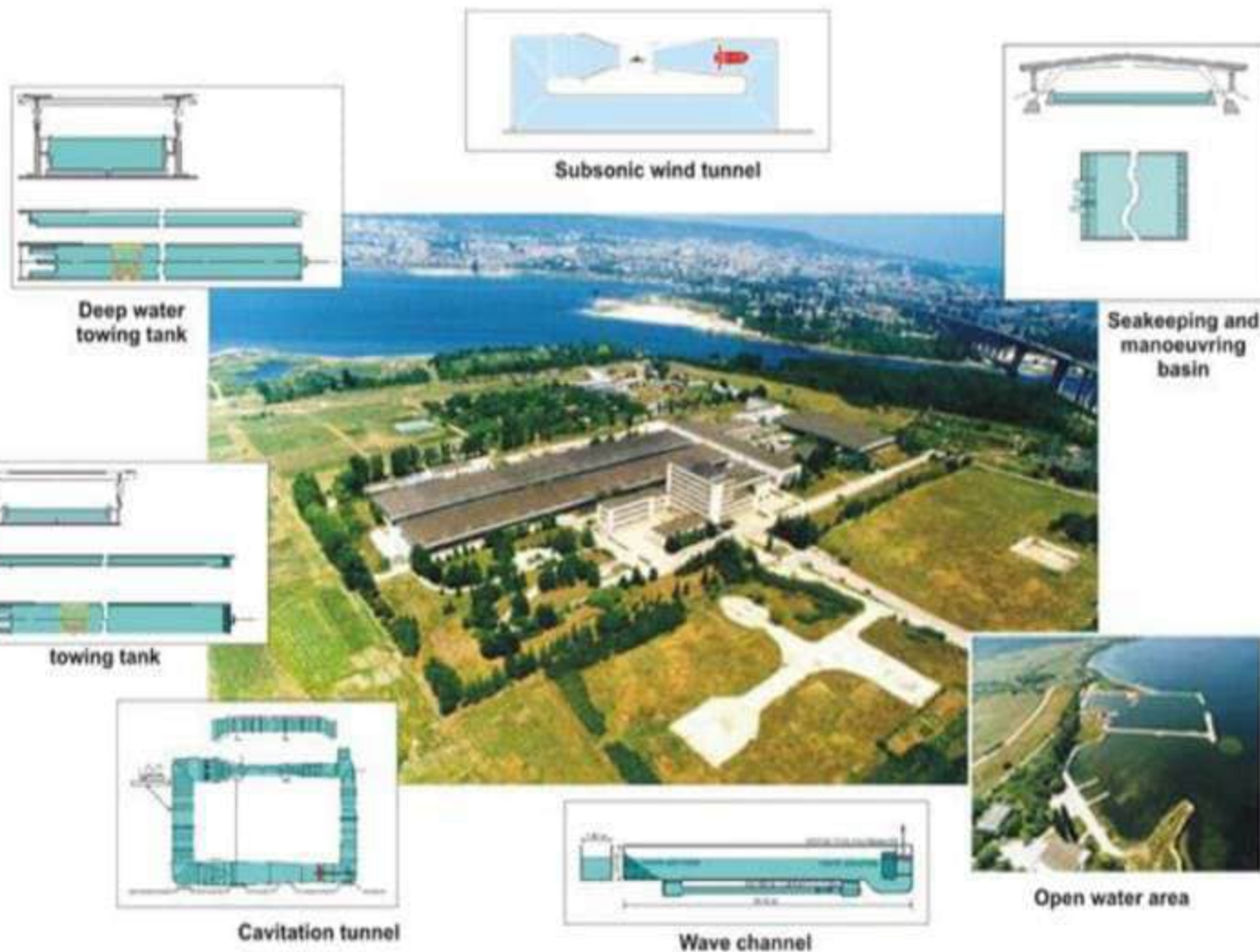
- حوضچه کشش متداول و حوضچه با اهداف خاص

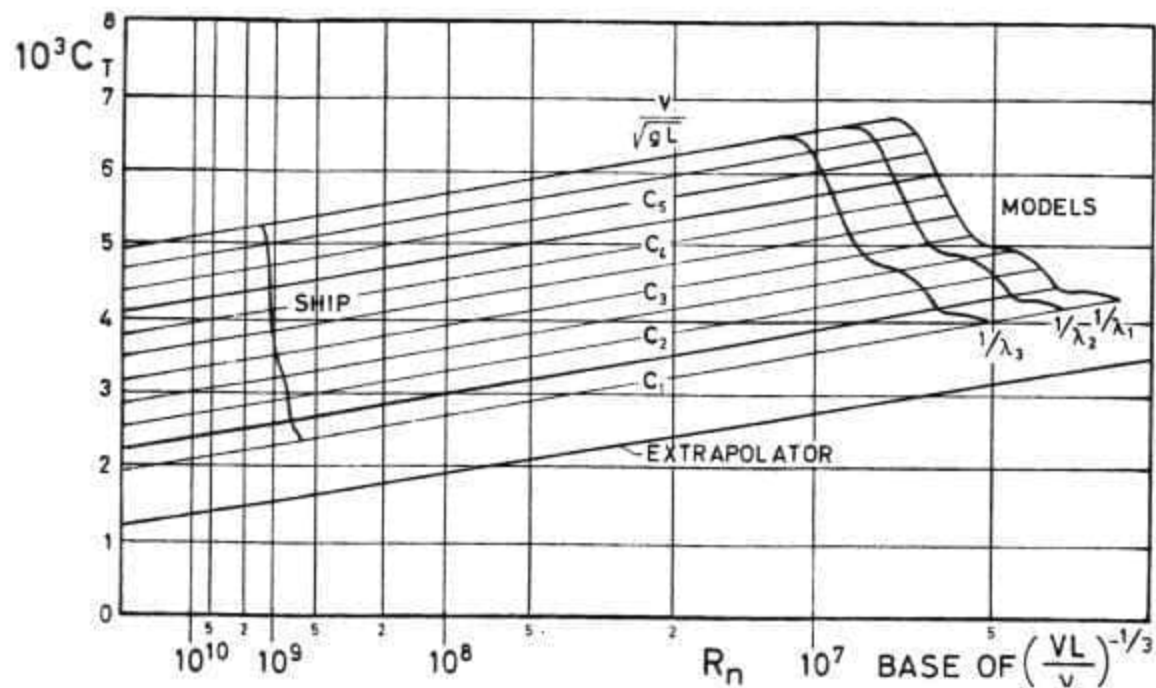
- تونل های کاویتاسیون

- حوضچه های دریامانی و مانور

- کانال آب

- تونل باد



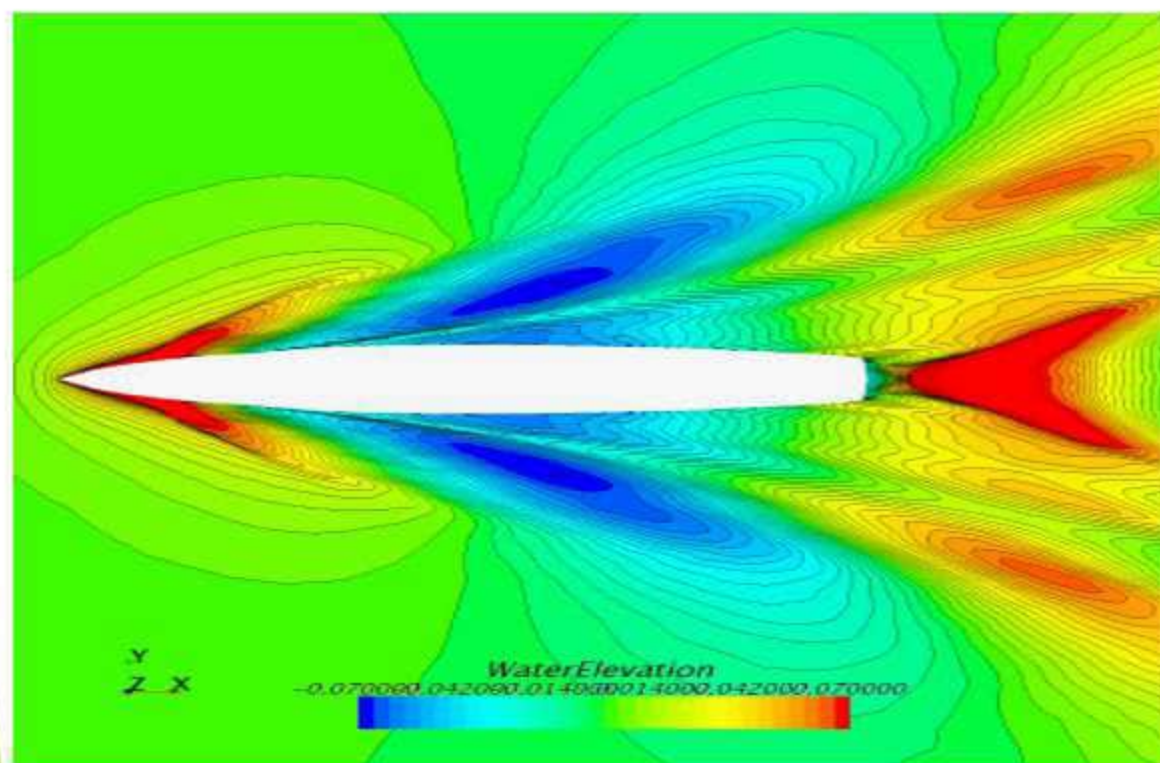
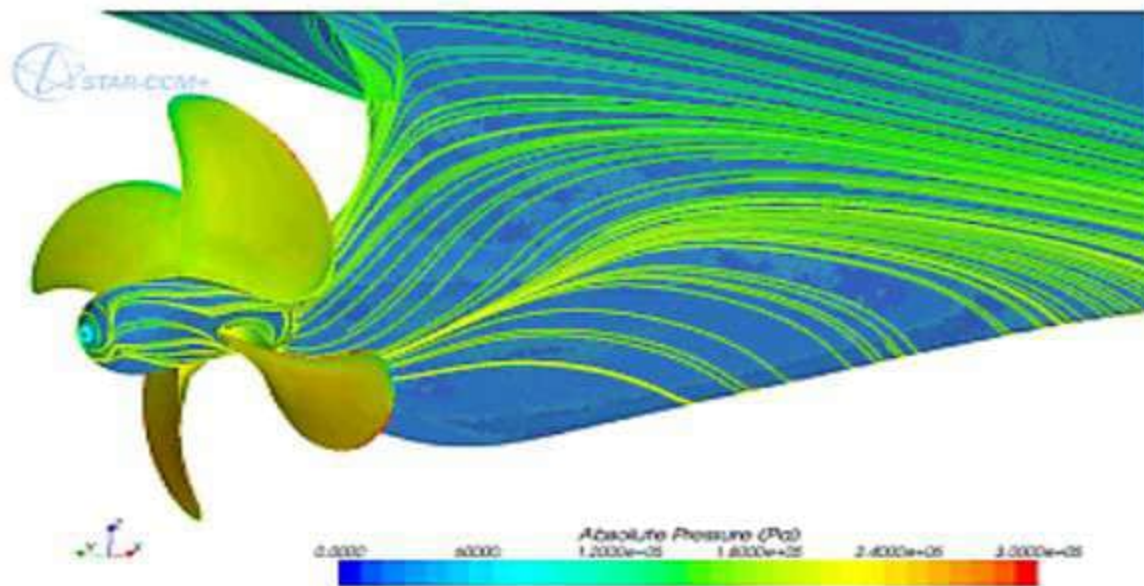


۲- داده های تجربی

بر مبنای نمودارها، روابط و جداول به دست آمده از آزمایش مدل

$$C_R = C_{R,Standard} \cdot C_{R,Fnkrit} \cdot k_L \cdot (T/B)^{b1} \cdot (B/L)^{b2} \cdot (L_{os}/L_{wl})^{b3} \cdot (L_{wl}/L)^{b4} \\ \cdot (1 + (T_A - T_F)/L)^{b5} \cdot (D_P/T_A)^{b6} \cdot (1 + N_{Rudd})^{b7} \\ \cdot (1 + N_{Brac})^{b8} \cdot (1 + N_{Boss})^{b9} \cdot (1 + N_{Thruster})^{b10}$$

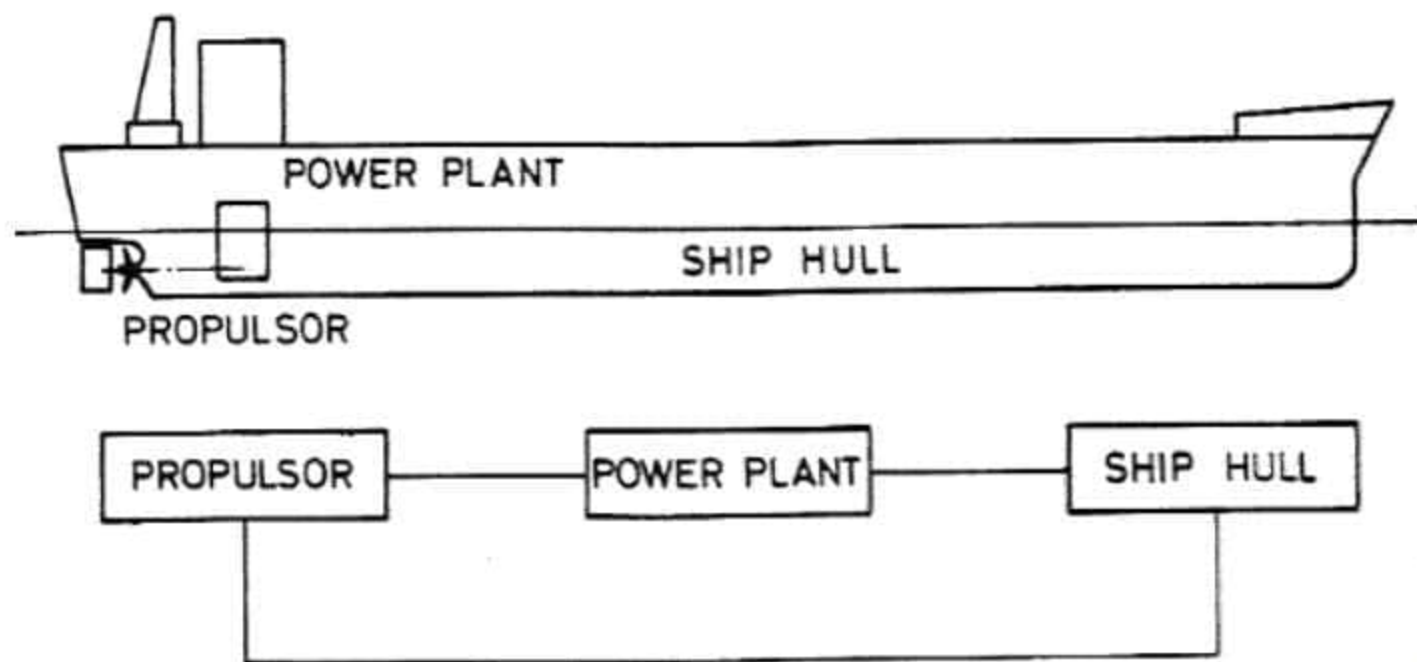
$$R_{total} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$



۳-تکنیکهای محاسباتی

بر مبنای حل عددی مدل ریاضی حرکت کشتی

- وظیفه مهندس معماری کشتی طراحی کشتی با بدنه ای با مقاومت پایین است
- سیستم رانش از سه بخش بدنه کشتی، محرک اصلی و پیش برنده (پروانه) است.
- محرک اصلی می تواند توربین بخار، توربین گاز، موتور دیزل و محرک هسته ای باشد.



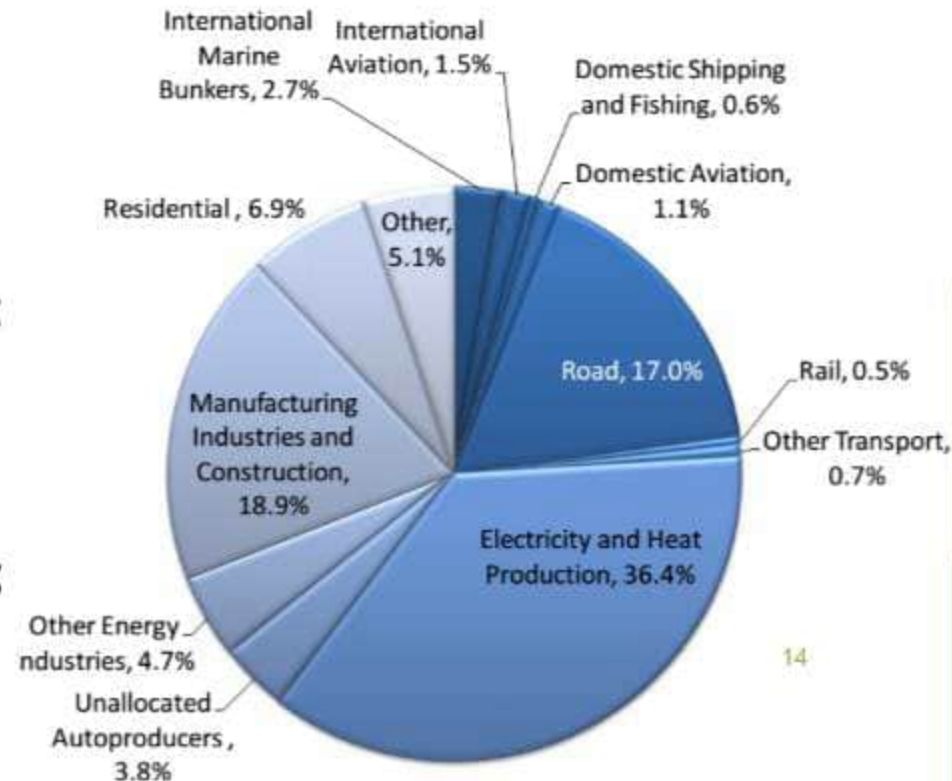
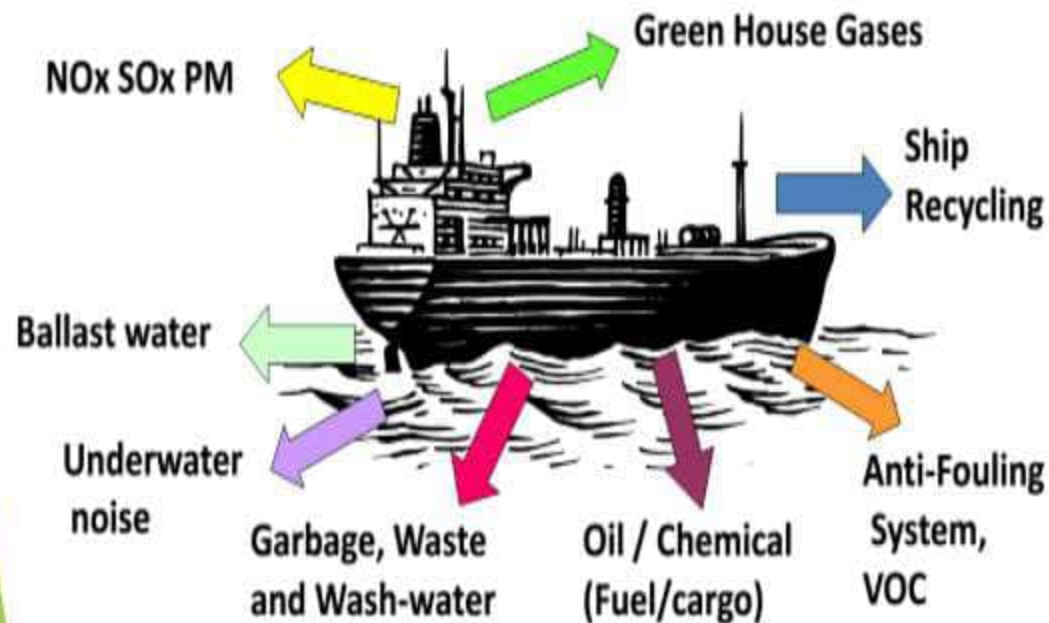
اهمیت تخمین دقیق توان و مقاومت:

- تعیین ابعاد و وزن موتورهای پیشران، تخمین میزان سوخت مصرفی، هزینه های عملیاتی
- ارائه پیشنهاد دقیق به مالک در تخمین توان مورد نیاز شناور(دوراهی طراحی)
- طراحی بدنه ای که در زمان حرکت در آب با حداقل مقاومت روبرو شود.

- کشتی رابطه شدیدی با محیط زیست (آب و هوا) در مراحل ساخت، عملیات و بازیافت دارد.
- محیط زیست محدود است.

← کشتی باید رابطه دوستانه ای با محیط زیست داشته باشد.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ from propulsion system} + CO_2 \text{ from auxiliary} - CO_2 \text{ emission reduction}}{DWT \times \text{Speed}}$$



عمل زیبایی بینی (کاهش ۸ درصدی مصرف سوخت شناور)

کاهش مقاومت دغذغه اصلی
طراحی هیدرودینامیکی



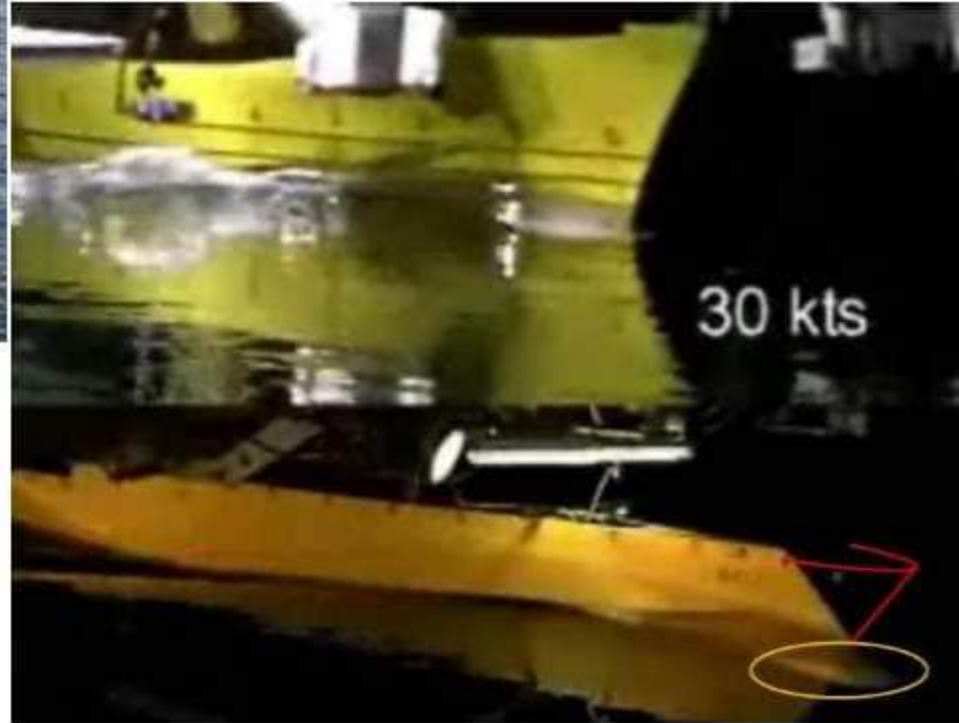
➤ نصب فلپ پاشنه (کاهش ۴ درصدی مصرف سوخت)

کاهش مقاومت دغده اصلی
طراحی هیدرودینامیکی



➤ سینه معکوس (کاهش مقاومت موجسازی شناور)

کاهش مقاومت دغدغه اصلی
طراحی هیدرودینامیکی



۱-۲ اهمیت تخمین دقیق توان و مقاومت

- ✓ در طراحی کشتی باید توان مورد نیاز جهت حرکت کشتی برآورد شود.
- ✓ جرم و ابعاد ماشین آلات تابعی از توان پیشران کشتی است
- ✓ مصرف سوخت مورد نیاز و ظرفیت مخازن سوخت تابعی از توان پیشران کشتی است.

توان رانش کشتی

توان اسمی:

Indicated Horsepower(IHP)

- توان تولیدی در موتور با صرف نظر از اصطکاک و اتلاف حرارتی در سیستم سیلندر و پیستون (توان تئوری)

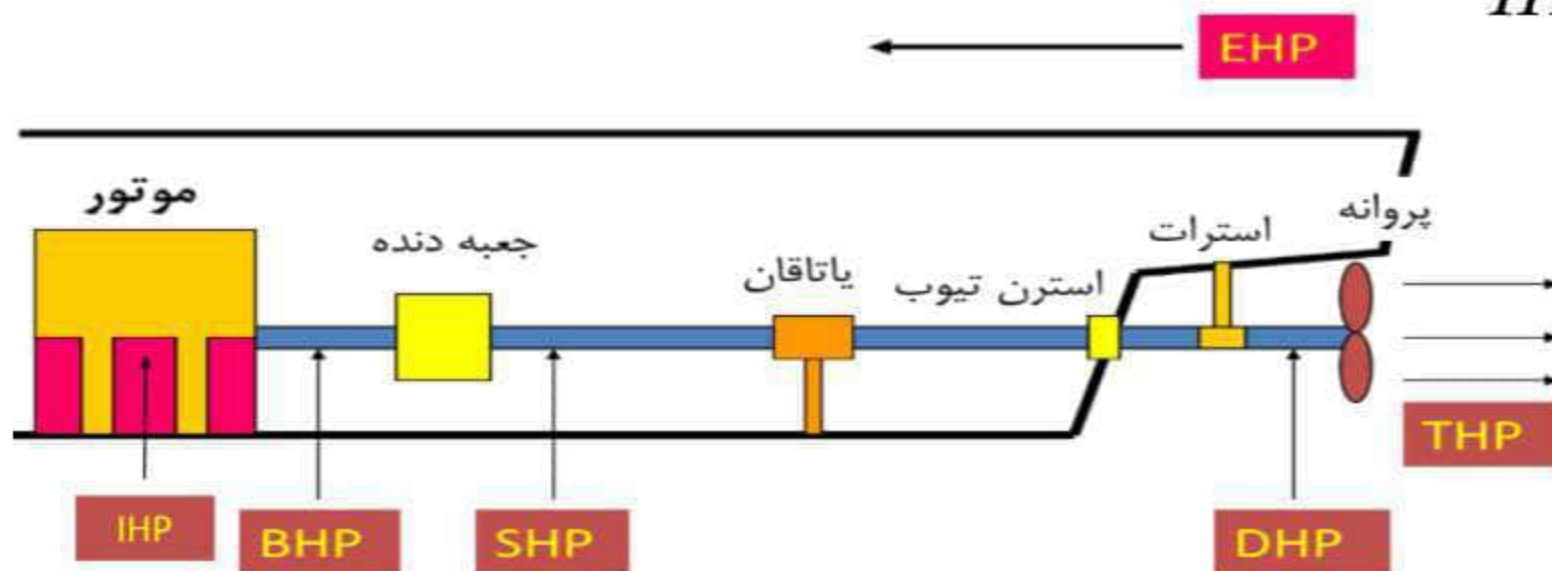
$$IHP = P_I = P \cdot A \cdot L \cdot N$$

p: فشار اسمی سیلندر

A: مساحت پیستون

L: طول ضربه پیستون

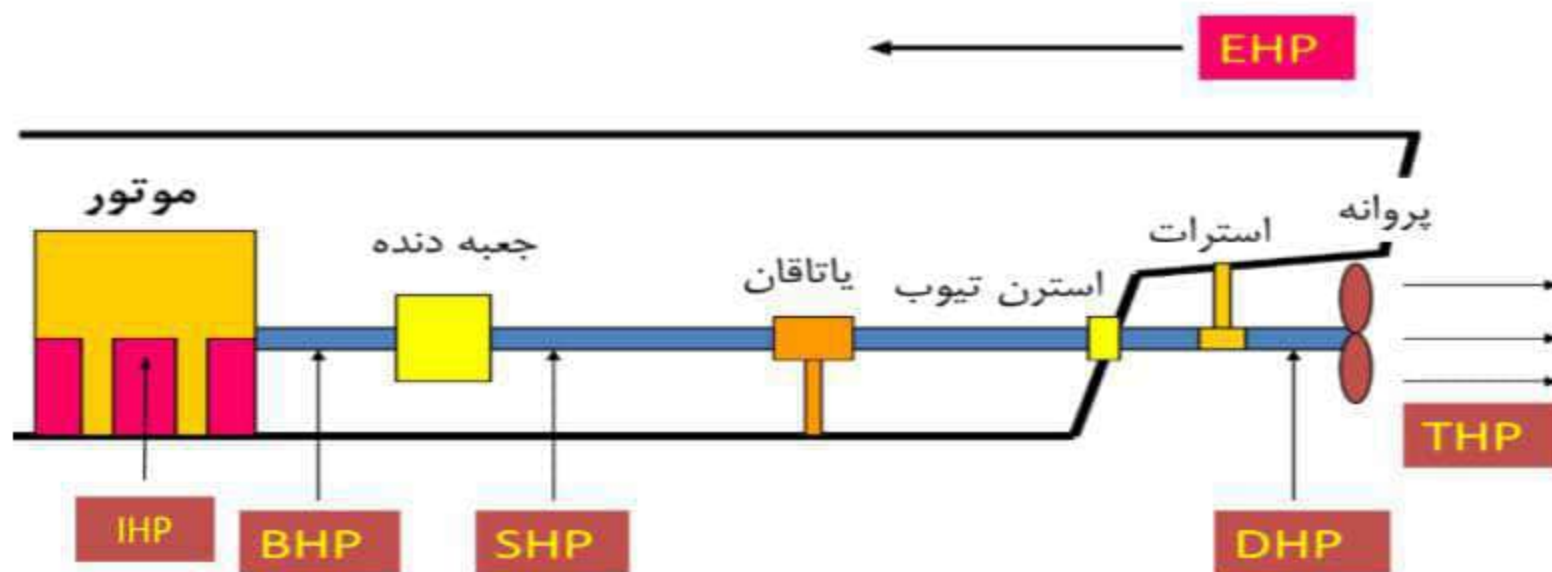
n: تعداد ضربه در ثانیه



توان رانش کشتی

توان ترمزی :

• توان خروجی از میل لنگ موتور قبل از ورود به جعبه دنده (افت در سیلندر و پیستون - $BHP = IHP$)



$$BHP = P_B = 2\pi nQ$$

n : دور موتور در یک ثانیه

Q : گشتاور ترمزی

توان رانش کشتی

توان محور :

• توان خروجی از جعبه دنده

$$P_s = \frac{(d_s)^4 G \theta n}{13,033 b L_s}$$

d_s : قطر محور

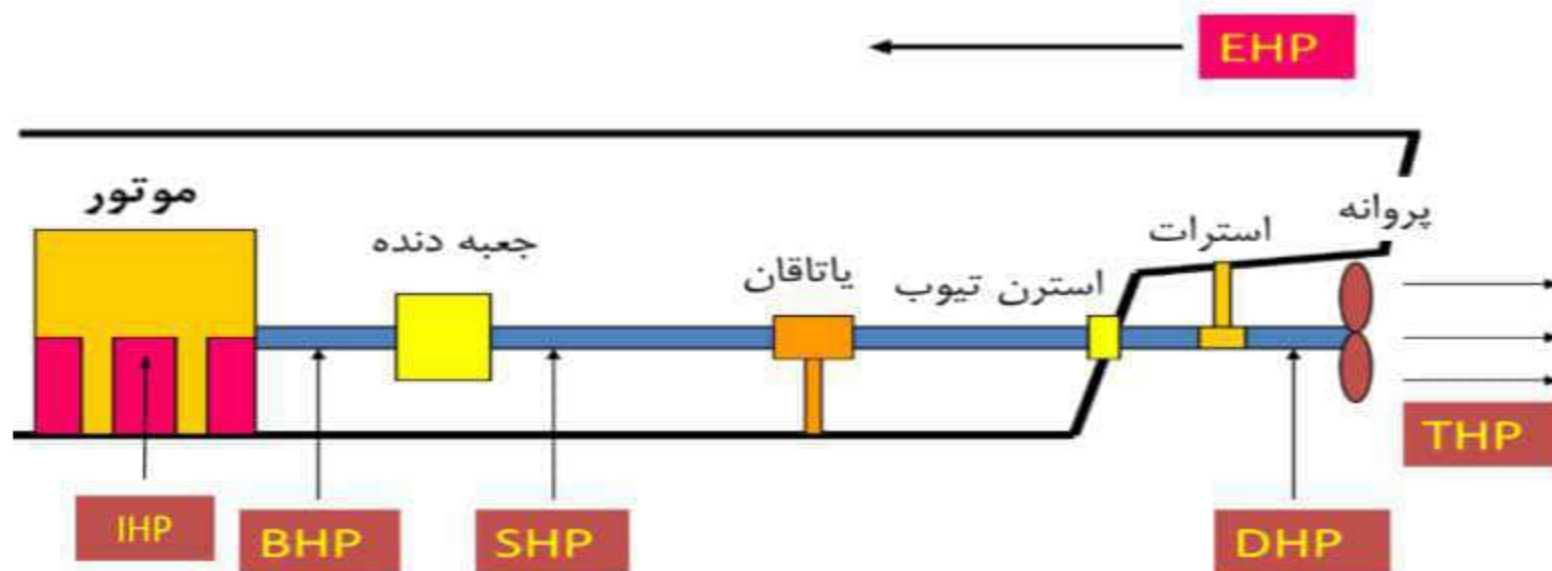
G : مدول برشی محور

θ : زاویه چرخش اندازه گیری شده

L_s : طول محور جهت اندازه گیری زاویه

n : دور موتور در یک ثانیه

(افت جعبه دنده - $SHP = BHP$)



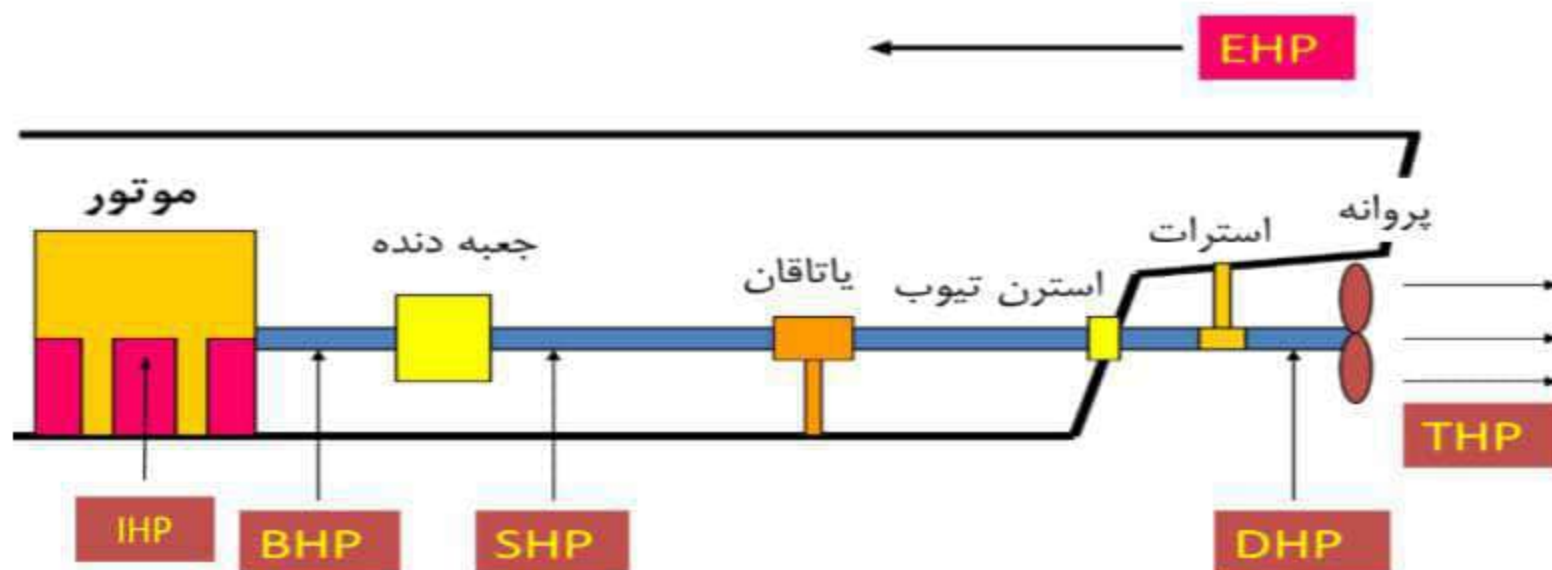
Shaft Horsepower(SHP)

توان رانش کشتی

توان تحویلی :

• توان تحویل داده شده به پروانه

(افت در محور، یاتاقان ها و استرن تیوب - $DHP = SHP$)



توان رانش کشتی

توان تراست :

• توان تولیدی پروانه

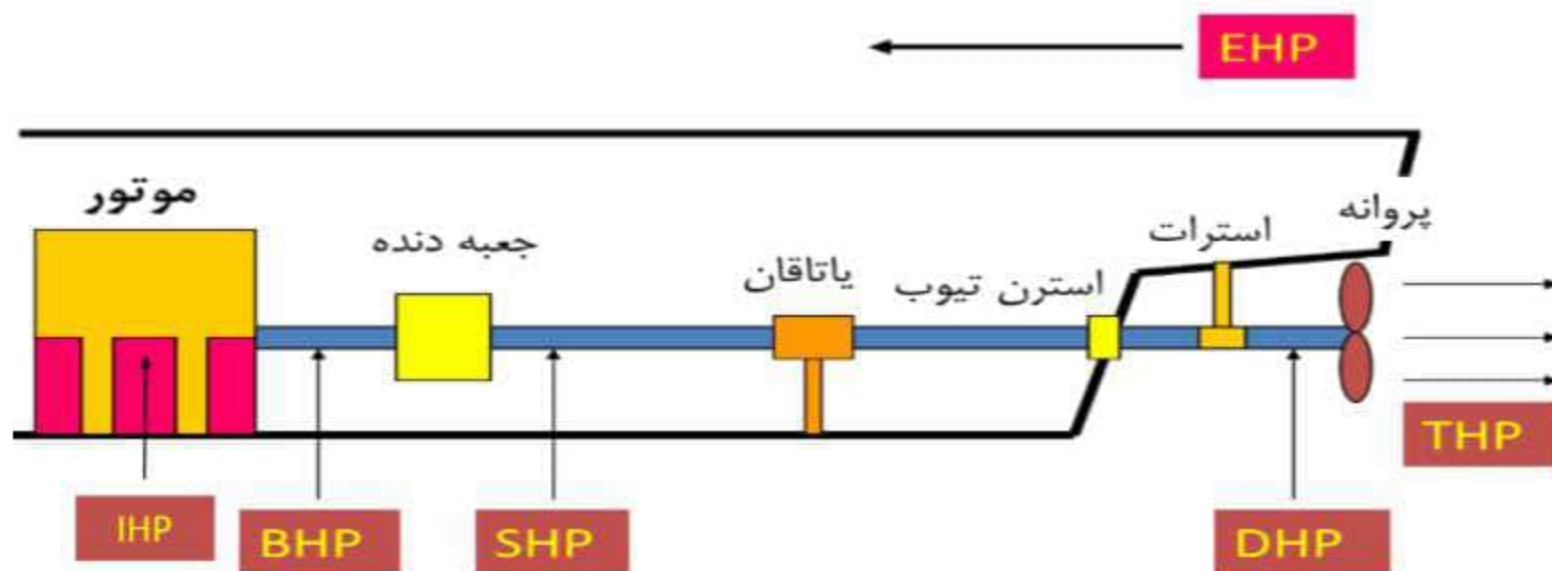
• توان تراست خروجی نهایی سیستم رانش پس از همه افتها است.

$$THP = P_T = T \cdot V_A$$

T: تراست تحویلی پروانه

V_A : سرعت پیشروی پروانه

$$(THP = DHP - \text{افت در پروانه})$$



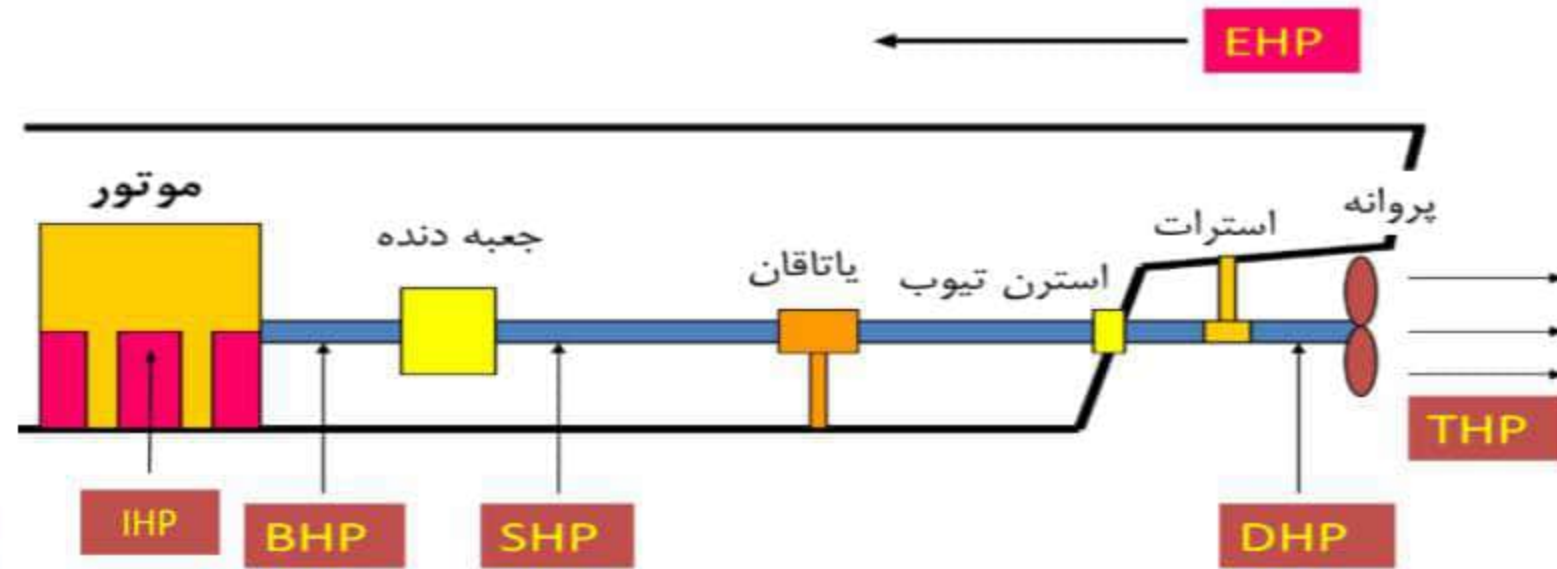
Thrust Horsepower(THP)

توان رانش کشتی

توان موثر :

- توان مورد نیاز برای حرکت کشتی (کشیدن) با سرعت ثابت بدون حضور پروانه
- توان موثر ارتباطی با سیستم رانش ندارد.

$$EHP = P_E = R_T \cdot V_S$$



R_T : مقاومت کل کشتی

V_S : سرعت کشتی

توان رانش کشتی



$$IHP > BHP > SHP > DHP > THP > EHP$$

توان موثر کشتی

برای تعیین توان اسمی موتور ابتدا باید توان موثر کشتی تعیین شود.

$$EHP = P_E = R_T \cdot V_S$$

اولین گام در تعیین توان مورد نیاز سیستم رانش کشتی:

تخمین مقاومت کل شناور

۱-۳ روشهای تخمین مقاومت کل گشتی

۱- آزمایش مدل

۲- روشهای تجربی

۳- تکنیکهای محاسباتی

۱- آزمایش مدل

با اندازه گیری مقاومت مدل و با کمک قوانین آنالیز ابعادی مقاومت شناور اصلی تخمین زده می شود.



برای تعمیم نتایج مدل به کشتی:

تشابه هندسی

تشابه سینماتیکی

تشابه دینامیکی

$$(\pi_i)_S = (\pi_i)_M$$

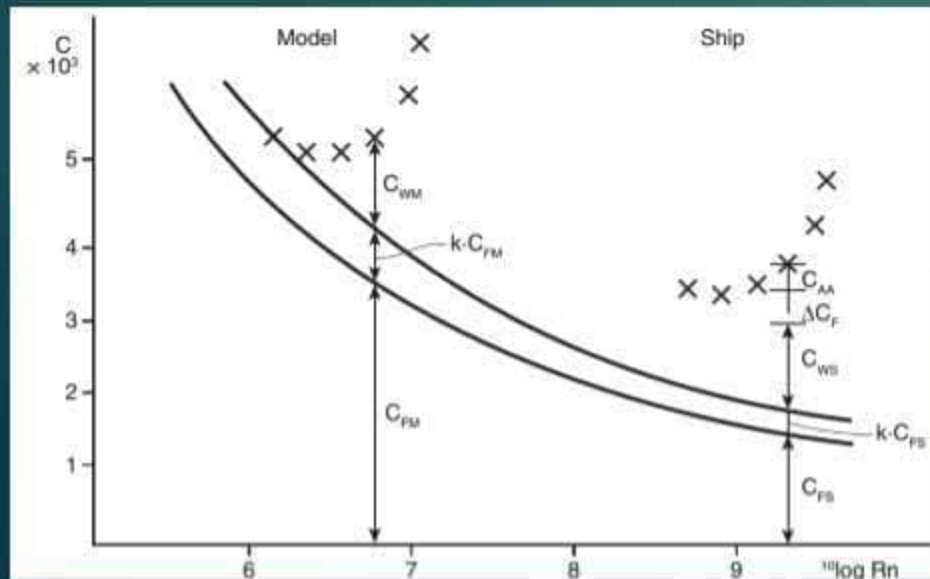


مدل به ارابه (CARRIAGE) متصل میشود.

مدل مجاز به حرکت در راستای عمودی و تریم است.

$$(C_T)_M \xrightarrow{ITTC-78} (C_T)_S$$

ارابه در سرعت مورد نظر در زمان مورد نظر کشیده می شود.



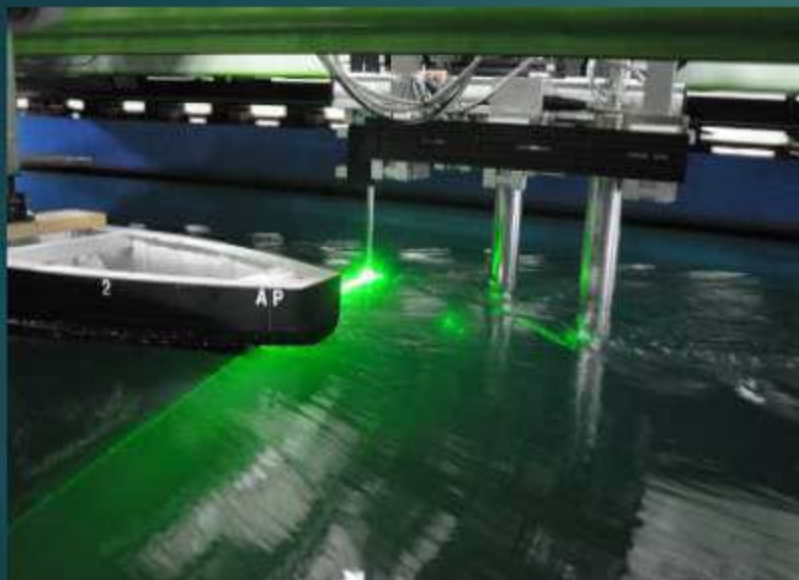
مقاومت مدل توسط نیروسنج (DYNAMOMETER) اندازه گیری می شود.

پس از فیلتر داده ها با روشهای تعمیم نتایج مقاومت کشتی تخمین زده می شود.

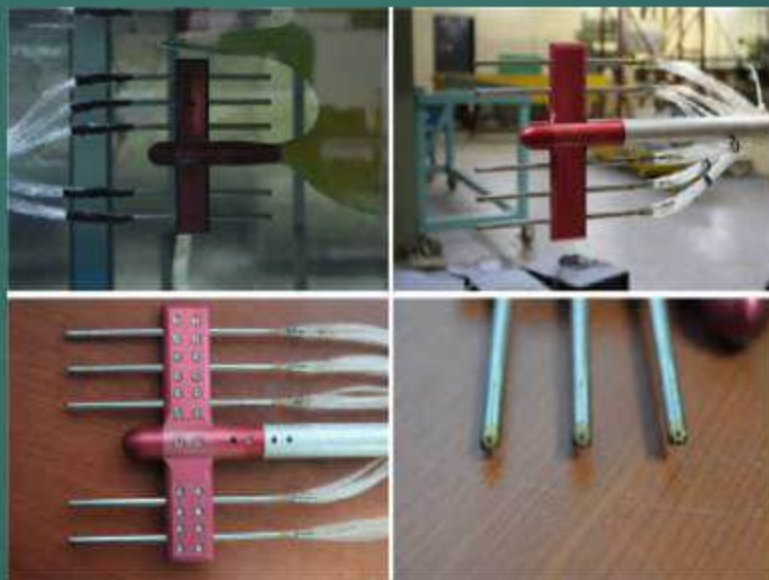
بین تست ها زمان کافی برای آرام شدن حوضچه باید در نظر گرفته شود

علاوه بر اندازه گیری مقاومت:

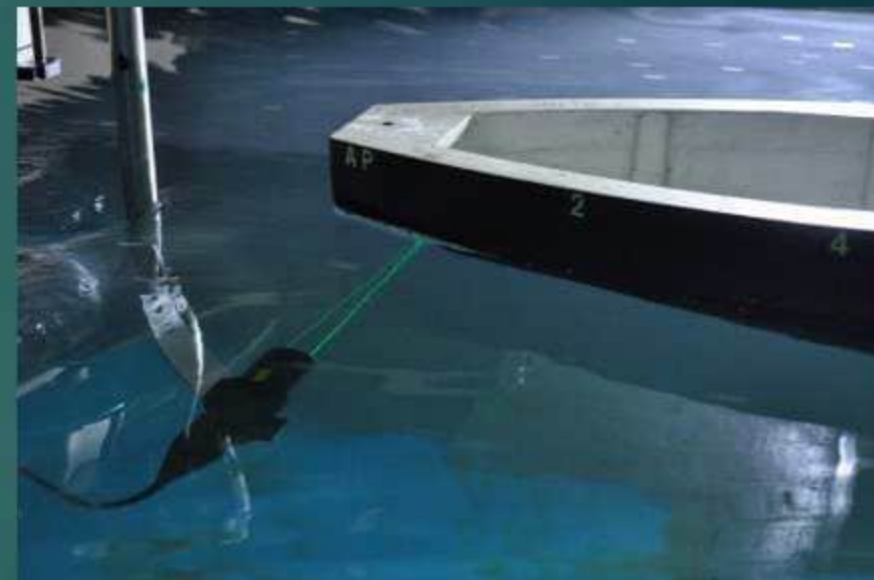
اندازه گیری جریان، میدان ویک، تعیین موقعیت بیلج کیل، براکت محور، بوسینگ، سکان



3D – PIV



PitotTube



1D – LDV

علاوه بر اندازه گیری مقاومت:

اندازه گیری جریان، میدان ویک، تعیین موقعیت بیلج کیل، براکت محور، بوسینگ، سکان



Paint Test



Tuft Test

تاریخچه آزمایش کشتی:

-لئوناردو داوینچی (تقریباً ۱۵۰۰ میلادی) بر روی سه مدل کشتی، با طول برابر، اما هندسه سینه و پاشنه متفاوت، آزمایشهایی انجام داد.

-ساموئل فورتنی (۱۶۲۲-۱۶۵۱) نیز آزمایشهایی بر روی مدل کشتی انجام داد.

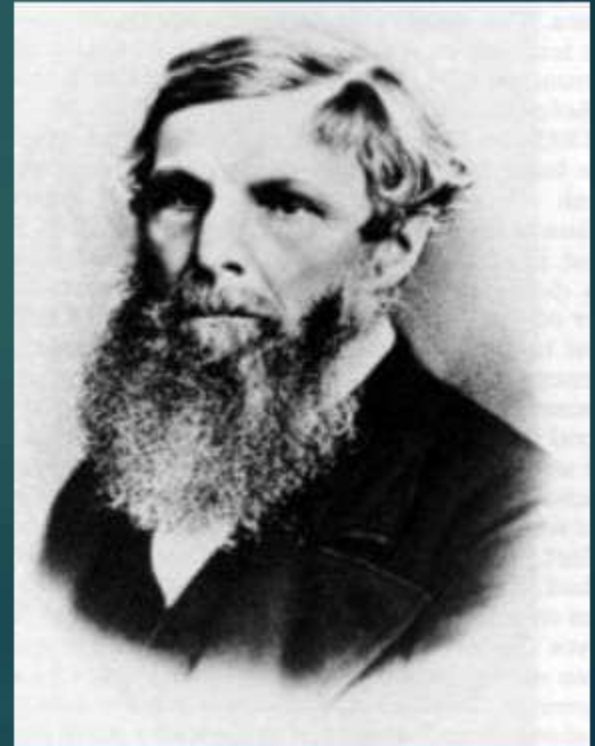
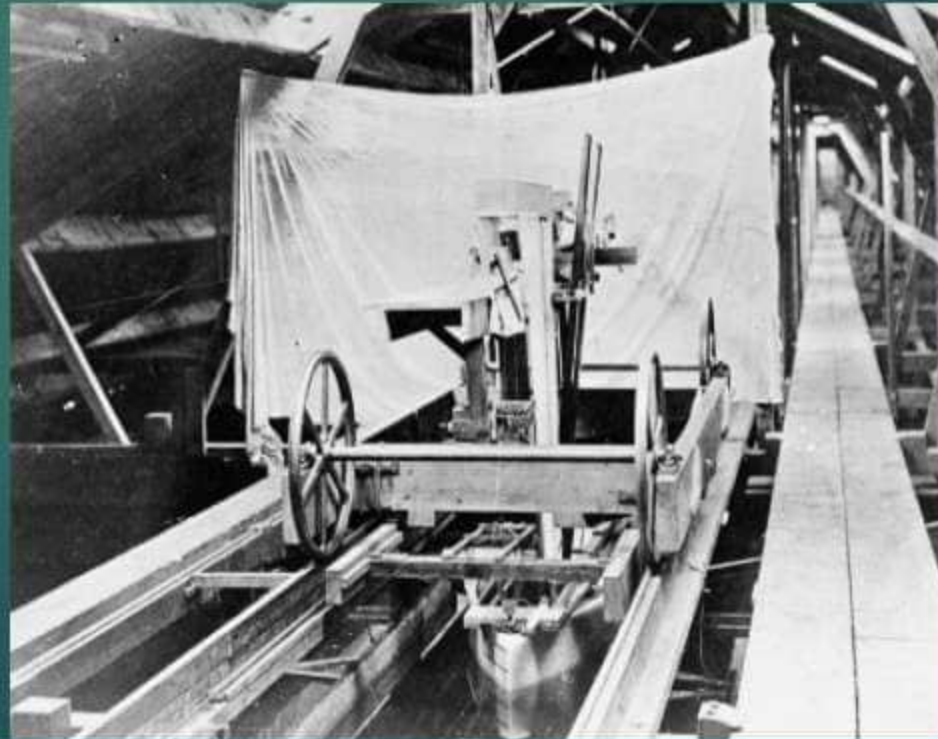
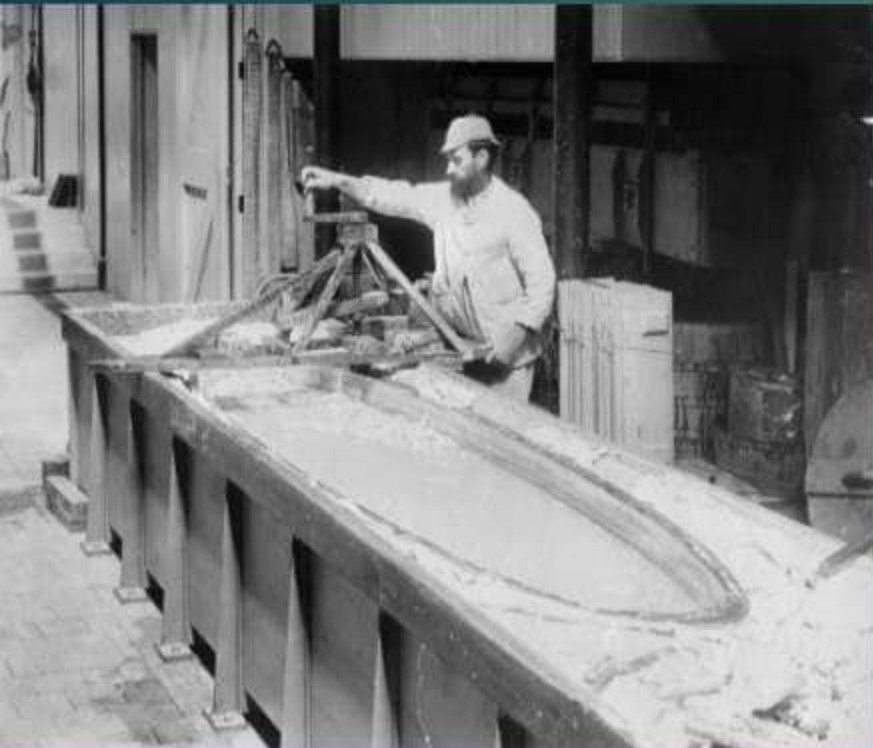
-امانوئل سودنبرگ (۱۷۲۱) پیشنهاد انجام آزمایش کشتی شامل ایده سقوط وزنه را ارائه کرد.



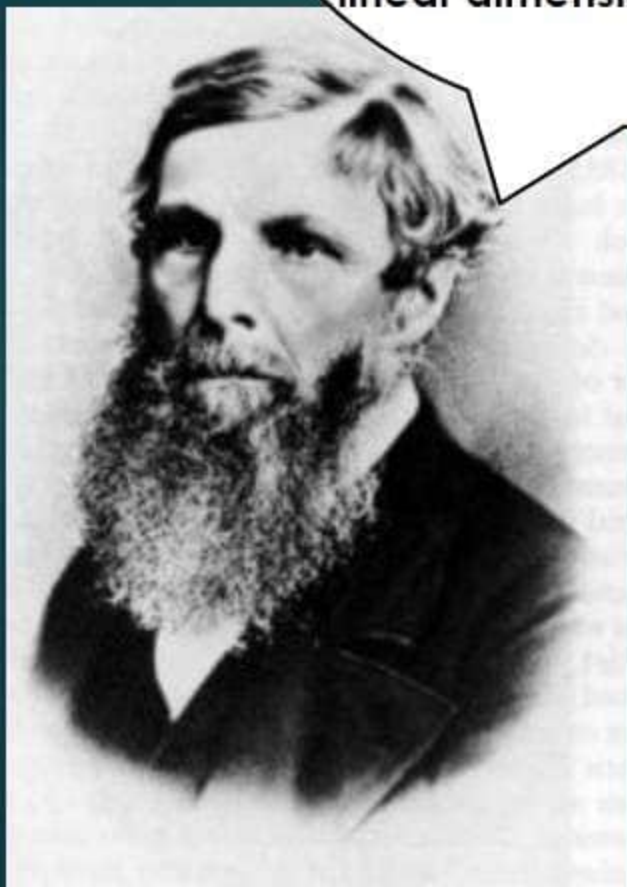


– تا اواخر قرن نوزده میلادی هیچ قانون مدلسازی برای پیش بینی رفتار شناور واقعی از روی نتایج مدل آن وجود نداشت.

– **ویلیام فرود** (۱۸۱۰–۱۸۷۹) قانون مدلسازی دقیق برای تعمیم نتایج تست مدل به کشتی اصلی ارائه کرد.



The (residuary) resistance of geometrically similar ships is in the ratio of the cube of The (residuary) resistance of geometrically similar ships is in the ratio of the cube of their linear dimensions



فرود مقاومت کل کشتی را به دو بخش تقسیم کرد:

$$R_T = R_F + R_R$$

R_F : مقاومت اصطکاکی صفحه تخت

R_R : مقاومت باقیمانده

$$\text{if } \frac{V_s}{V_m} = \sqrt{\lambda} \quad \longrightarrow \quad \frac{(R_R)_s}{(R_R)_m} = \lambda^3$$

ضعف ایده فرود در رابطه پیشنهادی برای مقاومت اصطکاکی بود

۲- روشهای تجربی

با کمک روابط، نمودارها و جداول به دست آمده از داده های آزمایشگاهی، مقاومت شناور تخمین زده می شود.

✓ در مراحل اولیه طراحی که بدنه نهایی نشده است چگونه مقاومت شناور تخمین زده شود؟

✓ اگر چندین طرح اولیه وجود داشته باشد چگونه مقاومت شناور تخمین زده شود؟

✓ در اوایل قرن بیستم آزمایشگاههای کشش محدودی در سرتاسر دنیا وجود داشت همچنین هزینه ساخت و آزمایش زیاد بود.

✓ در آزمایشگاههای معتبر مدلهای زیادی ساخته شد و تست کشش برای آنها در سرعتهای مختلف انجام شد.

✓ نتایج آزمایشها به صورت روابطی درآمد که مقاومت شناور را بر حسب مشخصات شناور بیان می کند.



روشهای تجربی به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

۱- سری های سیستماتیک: بر مبنای نتایج آزمایش روی مدلهای تولید شده از روی یک یا چند الگوی اولیه با تغییر آفست آنها

۲- فرمولهای آماری: بر مبنای نتایج آزمایش روی مدلهای با هندسه های مختلف

۱- سری های سیستماتیک:

-اولین سری سیستماتیک اوایل قرن بیستم در آزمایشگاه واشنگتن انجام شد و در سال ۱۹۳۳ توسط تیلور منتشر شد. (سری استاندارد تیلور).

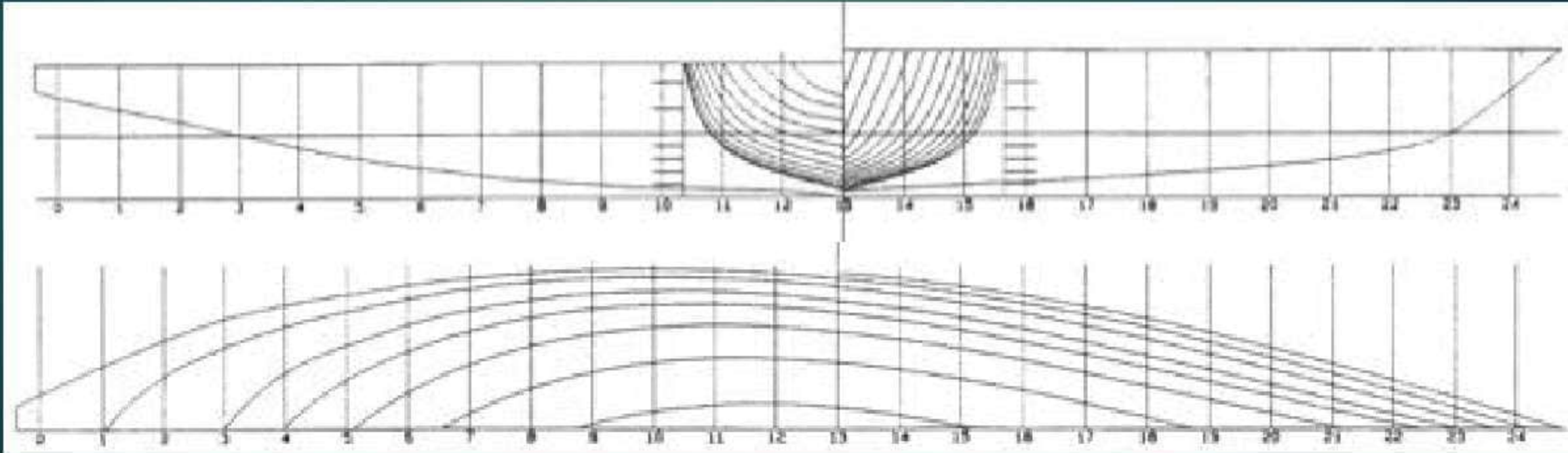
خطای تخمین مقاومت اصطکاکی، عدم در نظر گرفتن اثرات دیواره و عدم استفاده از آشفته کننده در مدل از خطاهای سری تیلور است.

آزمایش ها بر روی مدلهای ساخته شده از شناور لویاتان (ساخت ۱۹۰۰) و با تغییر سیستماتیک آفست آن انجام شد.



-در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ سری های سیستماتیک زیادی تولید شد.

امروزه به دلیل **هزینه زیاد تولید سری، وجود آزمایشگاه کشش** در نقاط مختلف دنیا و **توسعه روش های عددی** سری های سیستماتیک تولید نمی شود.



۲- فرمولهای آماری:

-اولین فرمول آماری برای مقاومت کشتی بر مبنای داده های غیر سیستماتیک ۱۵۰ کشتی ماهیگیری در سال ۱۹۵۹ توسط دوست و اوبراین ارائه شد.

در سال ۱۹۷۸ هولتروپ و منن با آزمایش ۳۳۴ مدل یکی از معتبرترین روشهای تخمین مقاومت کشتی را ارائه کردند.

آنها در روابطشان برای مقاومت موجسازی از روابط تئوری استفاده کردند.



۳- تکنیکهای محاسباتی

با حل معادلات حاکم بر جریان حاکم بر حرکت کشتی در آب مقاومت شناور تخمین زده می شود.

➤ در این روش قوانین فیزیکی مانند بقا جرم، بقا اندازه حرکت، بقا انرژی و... به صورت معادلات ریاضی استخراج میشوند.

➤ مدل‌های ریاضی به دست آمده توسط روشهای عددی حل می شوند.

➤ با حل معادلات توزیع سرعت، فشار در اطراف بدنه کشتی به دست می آیند.

➤ با کمک توزیع سرعت و فشار مقاومت شناور محاسبه می شود.

➤ تکنیکهای محاسباتی به دو بخش کلی روشهای غیر ویسکوز و ویسکوز تقسیم می شوند.

۱- روشهای غیر ویسکوز:

✓ در این روشها مقاومت موجسازی کشتی با حل جریان ایدال (پتانسیل) اطراف بدنه کشتی محاسبه می شود.

✓ اولین روش هیدرودینامیک محاسباتی در سال ۱۸۹۸ توسط ریاضی دان استرالیایی جان هنری میشل ارائه شد.

✓ میشل با صرفنظر از لزجت سیال، رابطه ای برای محاسبه مقاومت موجسازی شناورهای لاغر ارائه کرد.

✓ در سال ۱۹۵۱ توماس هاولوک مقاومت موجسازی را با تخمین انرژی سیستم موج محاسبه کرد و ایده توزیع چشمه و چاه را ارائه کرد.

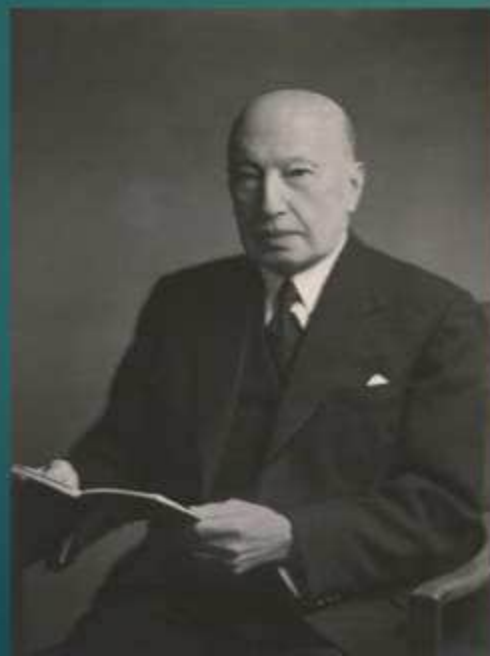
✓ جریان پتانسیل عموماً با روش پانل بندی حل می شود.

✓ نرم افزارهای مبتنی بر این روشها در کمتر از چند دقیقه مقاومت موجسازی

را محاسبه می کنند.



جان میشل



توماس هاولوک

❖ در این روشها مقاومت کل ویسکوز کشتی با حل جریان واقعی اطراف بدنه کشتی محاسبه می شود.

❖ دغدغه اصلی در روشهای ویسکوز مدلسازی لایه مرزی جریان آشفته است.

❖ معادلات ناویر-استوکس و شرایط مرزی مناسب در سطح آزاد، روی بدنه، کف دریا و دور دست با کمک روشهای عددی قابل حل است.



پروفسور فردریک استرن
از پیشگامان هیدرودینامیک
عددی کشتی



لارس لارسون نویسنده
کتاب جریان و مقاومت
کشتی

DNS(Direct Numerical Simulation) :

با ایجاد یک شبکه بندی بسیار ریز می توان تمامی اثرات ناشی از یک جریان مغشوش را حل کرد. برای حل جریان اطراف یک شناور دریایی با عدد رینولدزی در محدوده 10^9 استفاده از روش شبیه سازی عددی مستقیم به بیش از 10^{20} شبکه محاسباتی نیاز دارد. با فرض اینکه امکانات سخت افزاری با رشد ثابتی توسعه پیدا کند تا سال ۲۰۸۰ امکان استفاده از این روش برای مسائل دریایی وجود ندارد.

Large Eddy Simulation(LES):

گردابه های بزرگ با حل دقیق معادلات محاسبه می شوند و گردابه های کوچک با استفاده از مدل های ریاضی موجود حل می شوند. استفاده از این روش نیز به شبکه محاسباتی بسیار ریزی نیاز دارد و تا سال ۲۰۴۵ استفاده از این روش برای حل جریان اطراف یک شناور دریایی نتایج دقیقی ارائه نخواهد کرد.



Reynolds Averaged Navier Stokes(RANS):

روش کاربردی و متداول برای حل جریان اطراف بدنه شناور روش متوسط زمانی ناویر استوکس است. در این روش کمیت‌های سیال به دو بخش آرام و مغشوش تقسیم‌بندی می‌شوند و بخش آرام از حل دقیق معادلات به دست می‌آید و برای بخش مغشوش از مدل‌های ریاضی جریان استفاده می‌شود.

معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس RANS توسط روشهای عددی مانند FEM، FDM، FVM حل می‌شود. نرم افزارهای مبتنی بر این روشها در کمتر از یک روز مقاومت کل را محاسبه می‌کنند.

اولویت روشهای تخمین مقاومت کشتی

- ✓ در مراحل اولیه طراحی که ابعاد اصلی بدنه اغلب تغییر می کنند روشهای تجربی کاربرد دارند.
- ✓ پس از تعیین ابعاد اصلی برای بهینه سازی شکل قسمت جلو کشتی از تکنیکهای محاسباتی غیرویسکوز استفاده می شود (شکل بالبوس و شعاع شانه جلو) تا مقاومت موجسازی حداقل شود.
- ✓ برای بهینه سازی فرم پاشنه با توجه به اهمیت لایه مرزی در این ناحیه از تکنیکهای محاسباتی ویسکوز استفاده می شود (روش RANS)
- ✓ در انتها برای پیش بینی دقیق مقاومت و توان کشتی هنوز هم آزمایش مدل مهم ترین روش است.



آزمایشگاه مجازی هیدرودینامیک کشتی

VIRTUAL **M**ARINE **H**YDRODYNAMIC **L**ABORATORY

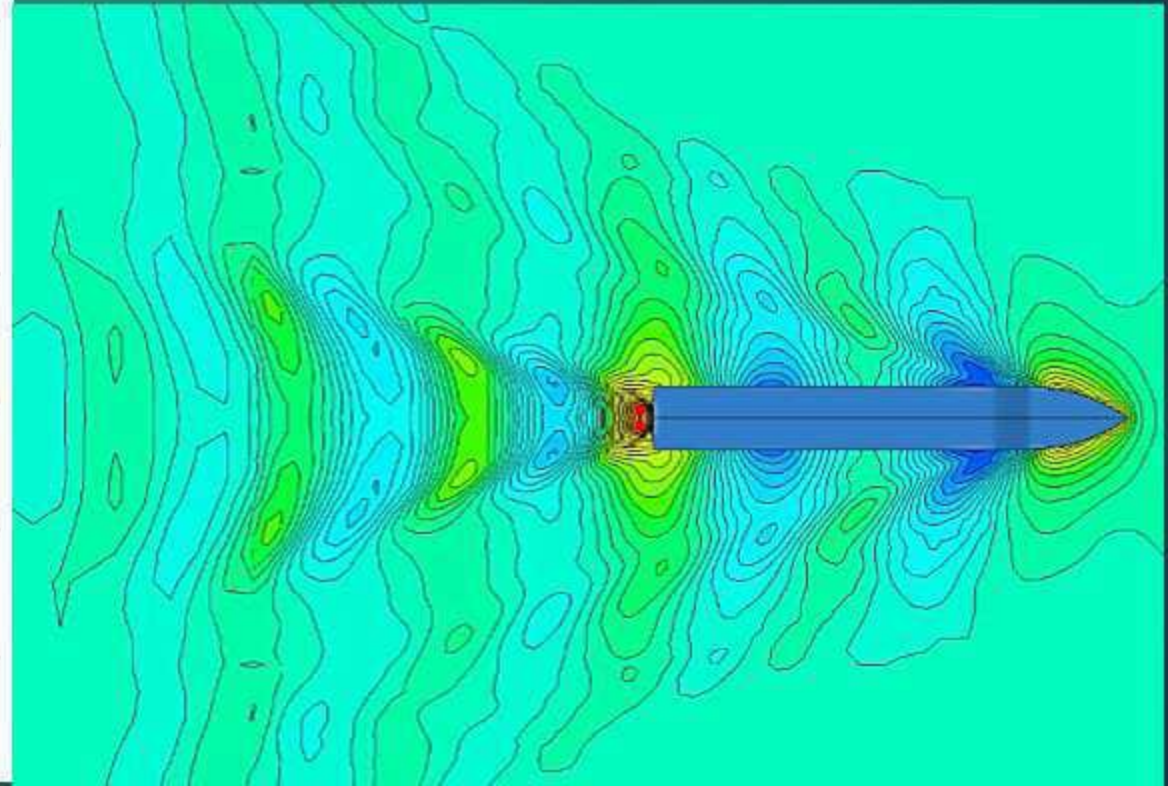
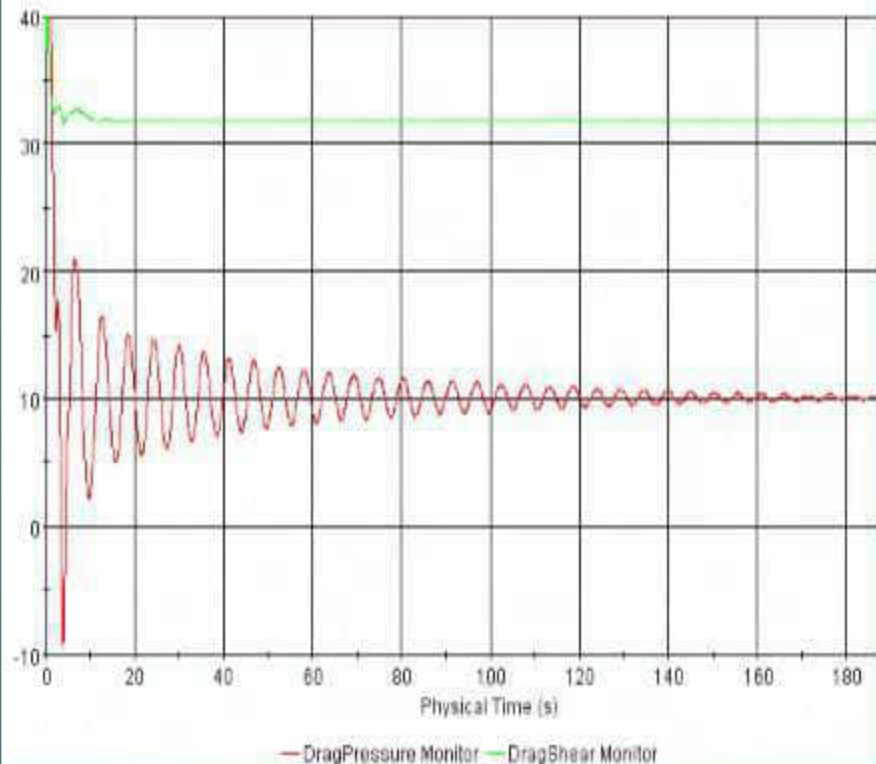
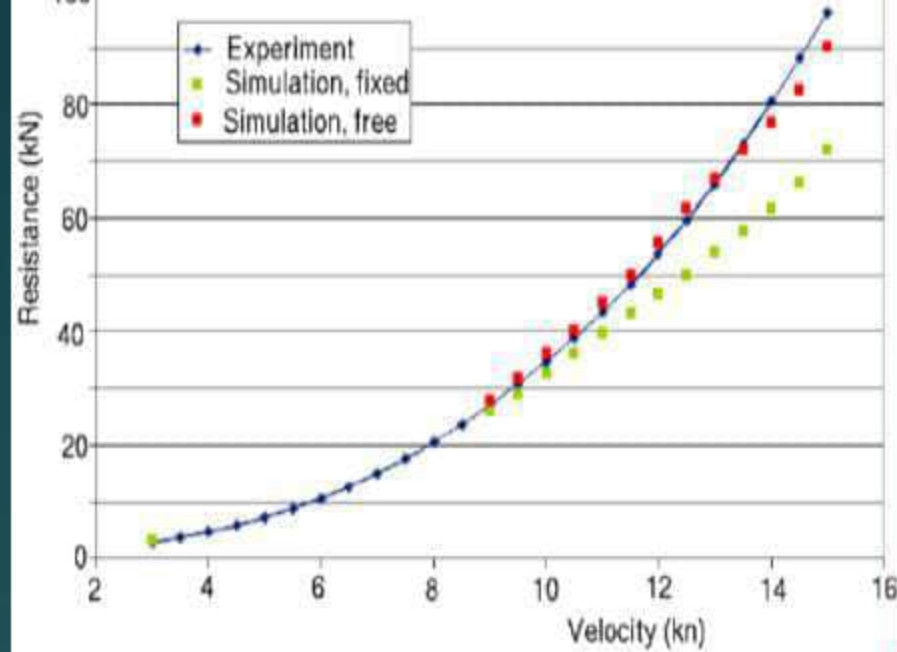
*Models now in tanks we tow.
All of that to Froude we owe.
Will computers, fast and new,
Make us alter Euler's view?
Marshall Tulin*

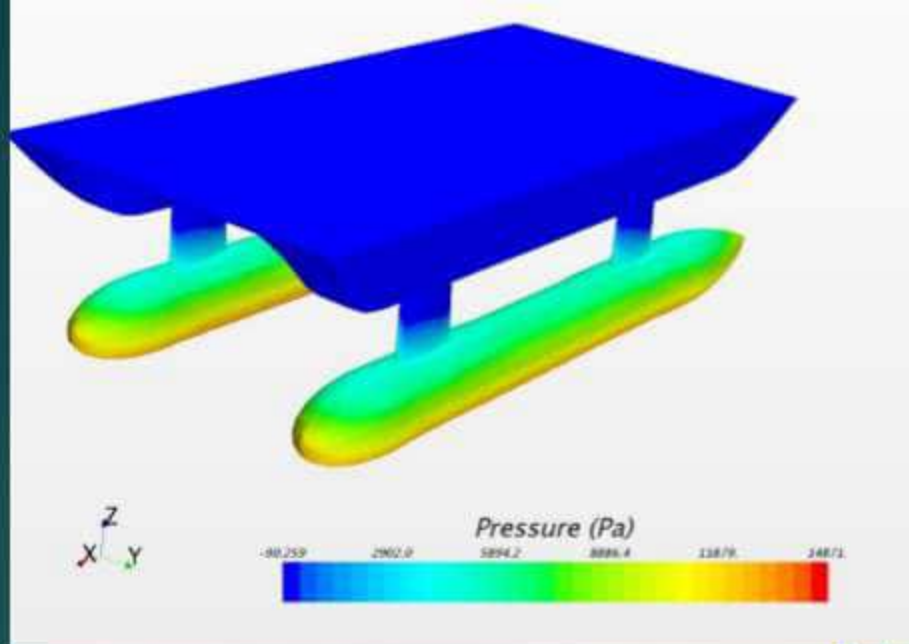
گروه کشتی سازی دانشکده مهندسی دریا
دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

محاسبه مقاومت شناور

شناور تک بدنه در حالت آزاد

- محاسبه مقاومت شناور در حالت آزاد
- پیش بینی موج اطراف بدنه در حالت آزاد
- پیش بینی تریم دینامیکی و فرورفتگی شناور
- خطوط جریان اطراف بدنه



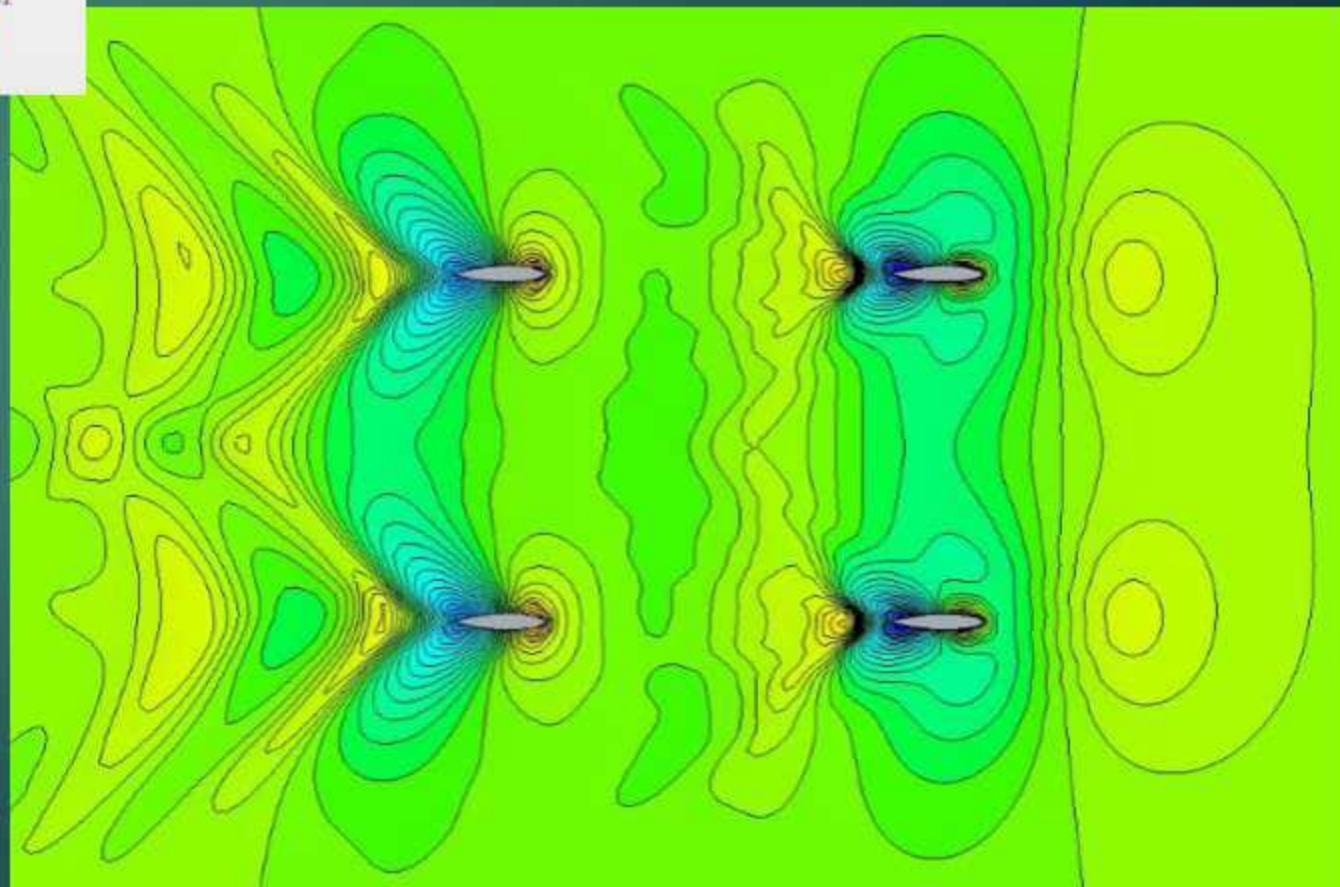


محاسبه مقاومت شناور

شناور چند بدنه

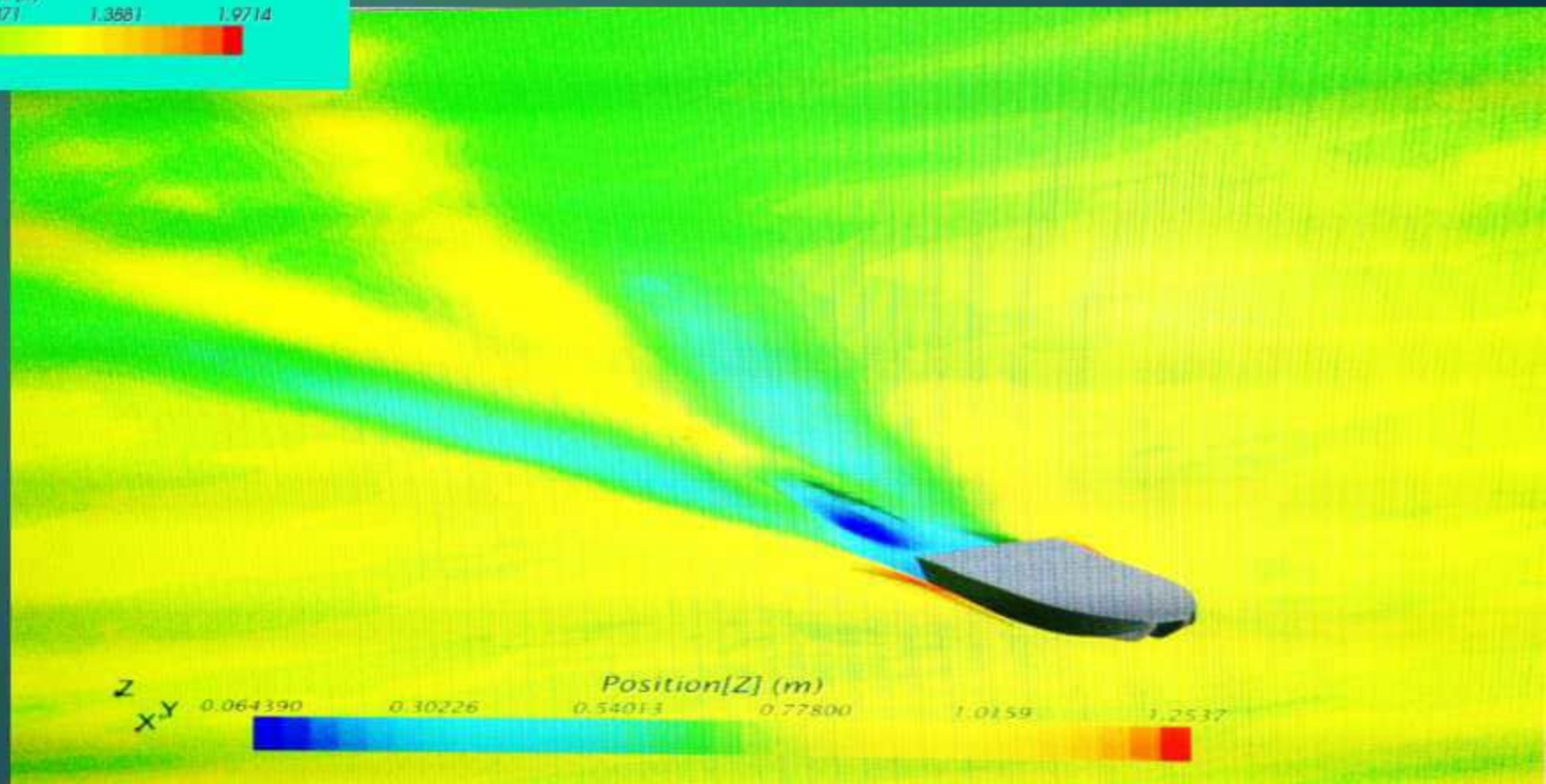
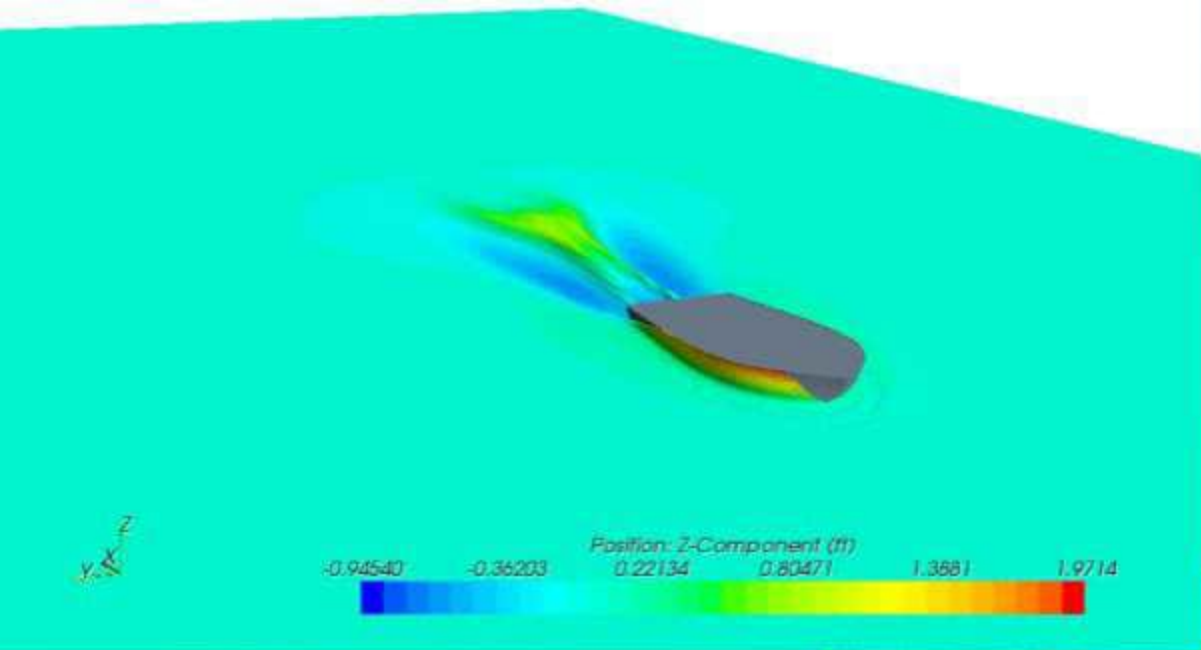
بررسی اثر تداخلی بدنه ها

بهینه سازی فرم بدنه ها



محاسبه مقاومت شناور

شناورهای تندرو



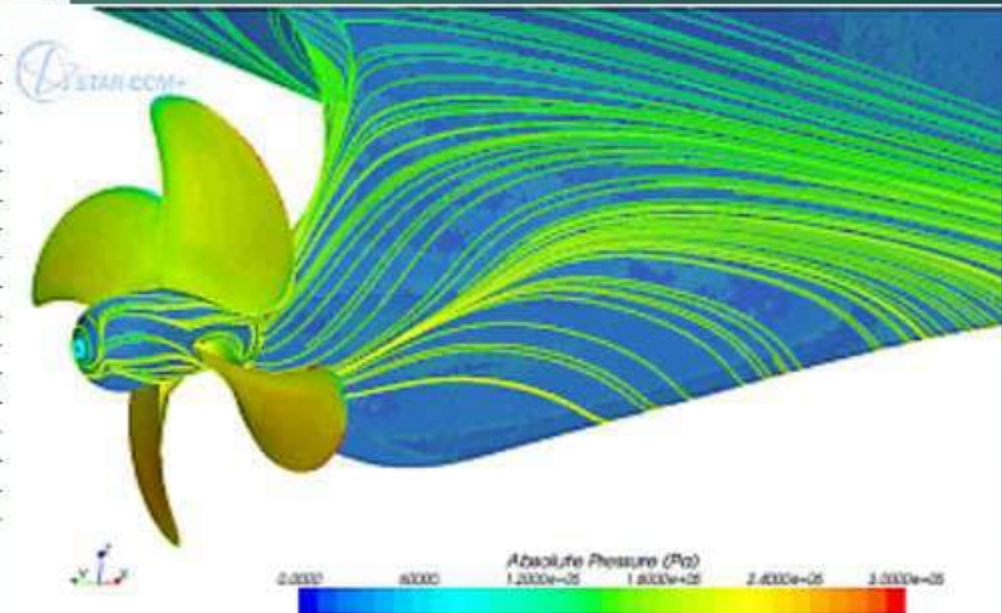
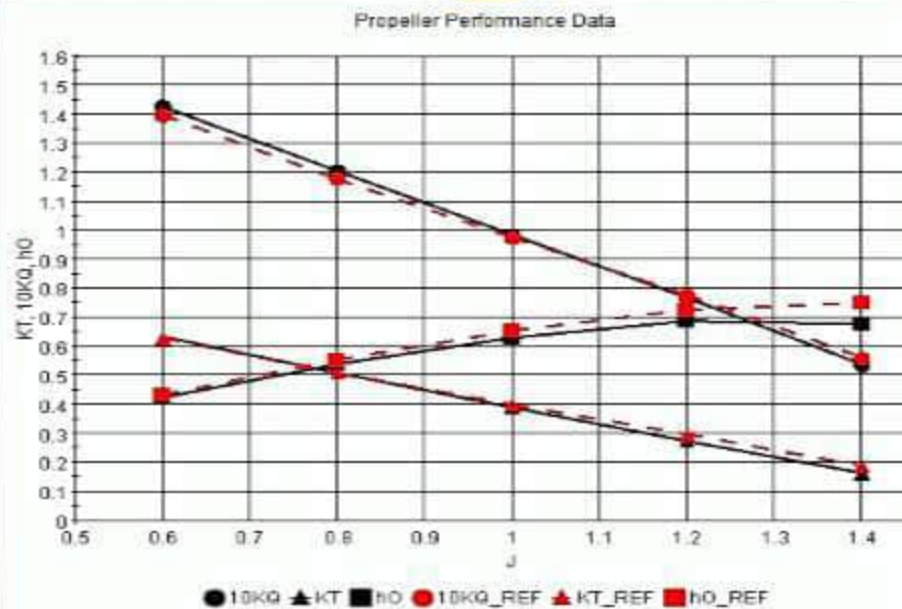
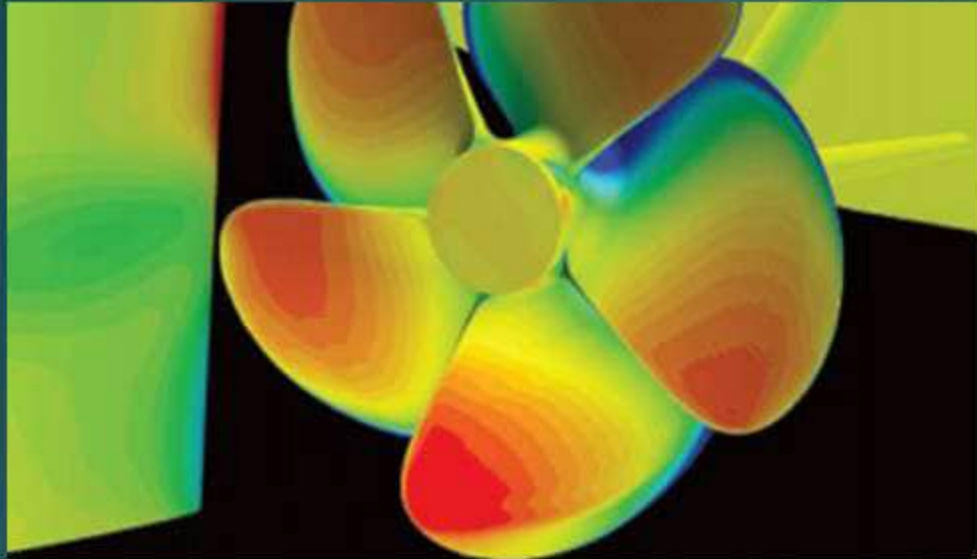
محاسبات مربوط به سیستم رانش

- شبیه سازی تست آب آزاد اطراف پروانه

جهت محاسبه راندمان پروانه

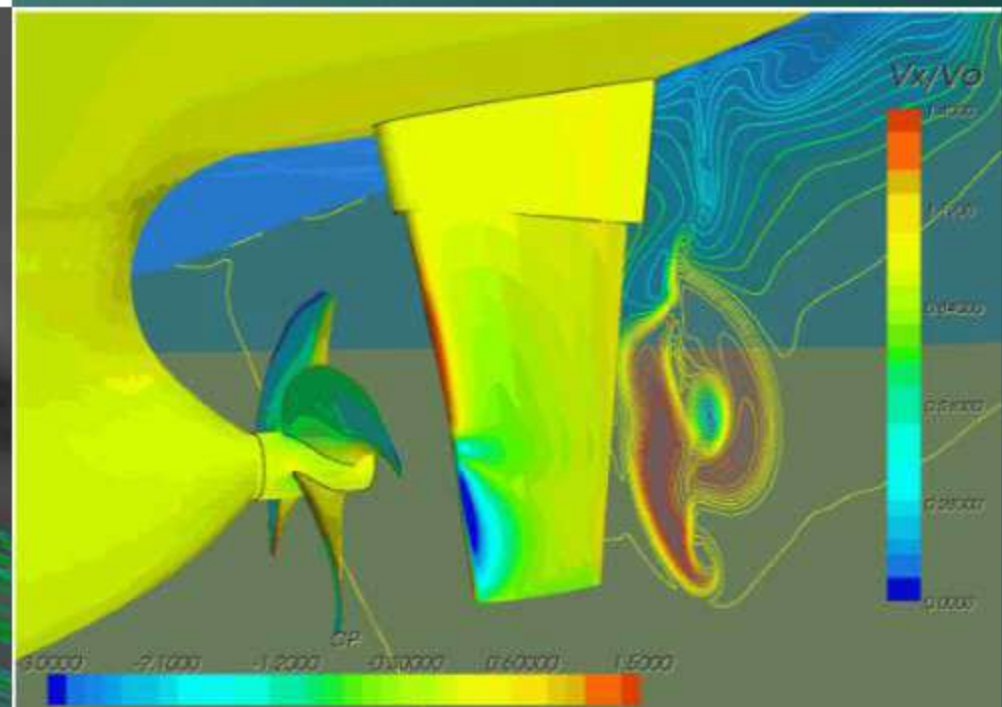
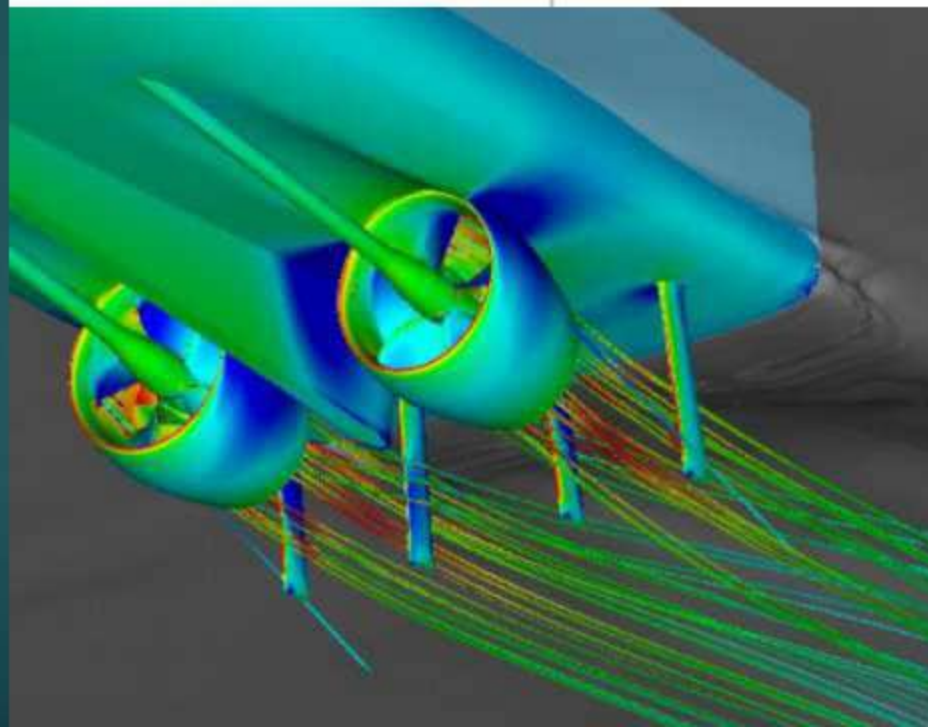
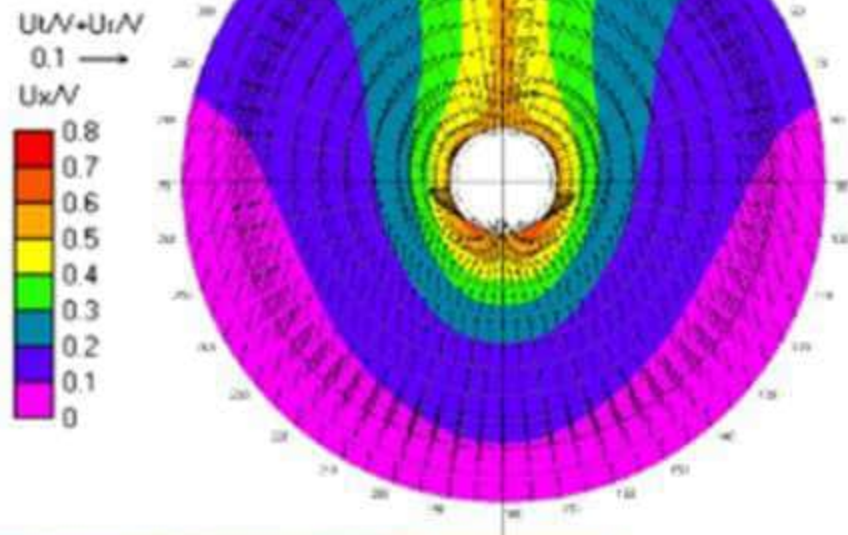
- شبیه سازی تست خود رانش جهت

بررسی جریان اطراف پاشنه شناور



محاسبات مربوط به سیستم رانش

- پیش بینی ویک نامی شناور
- پیش بینی ویک موثر
- محاسبه ضریب کاهش تراست
- اثر تداخلی پروانه و سکان





و اینکه برای انسان جز حاصل تلاش او نیست

معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال **بیان ریاضی قوانین فیزیکی بقا**
جرم، مومنتوم و انرژی

- ✓ این معادلات عموماً فرم دیفرانسیلی دارند.
 - ✓ متغیرها در این معادلات خواص میدان سیال مانند سرعت، فشار و دما هستند.
 - ✓ با تعیین شرایط مرزی مناسب و حل معادلات، توزیع خواص سیال در تمام نقاط به دست می آید.
- در بیشتر مسائل هیدرودینامیک دریایی تغییرات دمای سیال اصلی (آب) عموماً در نظر گرفته نمی شود.

معادلات حاکم بر جریان اطراف کشتی  **معادلات بقا جرم و بقا مومنتوم**

سیستم مختصات عمومی

فرض: مسئله مقاومت کشتی
دائمی است

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

➤ x به سمت پاشنه کشتی

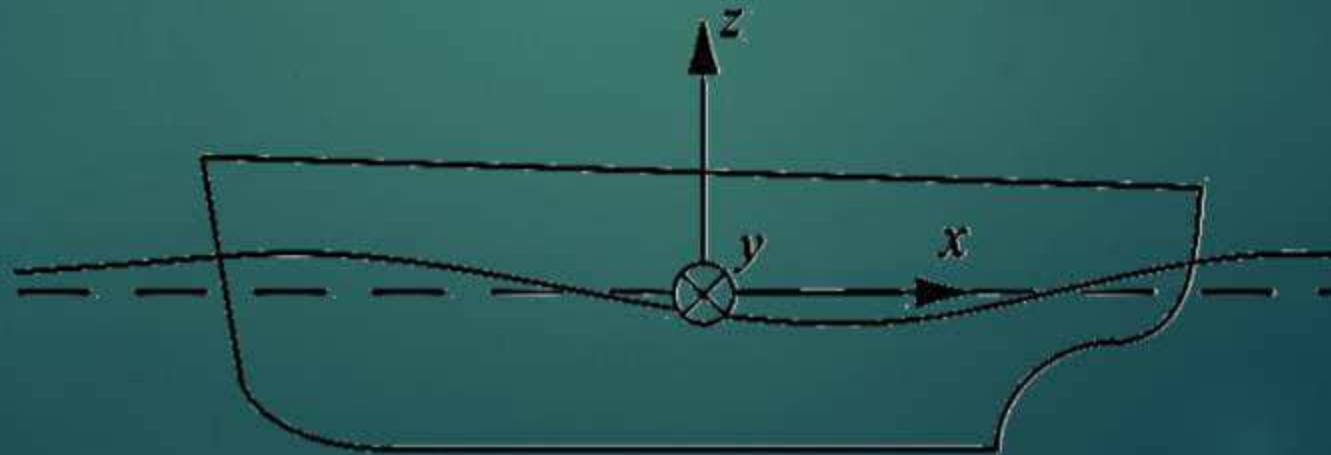
➤ y به سمت راست کشتی

➤ z به سمت بالا

➤ مرکز سیستم مختصات در midship و سطح آب آرام

➤ سیستم مختصات با سرعت ثابت کشتی حرکت می کند.

← میدان سرعت متوسط، میدان فشار و الگوی موج اطراف کشتی نسبت به دستگاه
مختصات عمومی دائمی هستند (تابع مکان هستند نه تابع زمان)



معادله بقا جرم (پیوستگی)

► برای المان سیال $dx dy dz$ در جریان دائمی نرخ خالص خروجی در جهت X برابر است با : جمع جرم سیال ورودی و خروجی

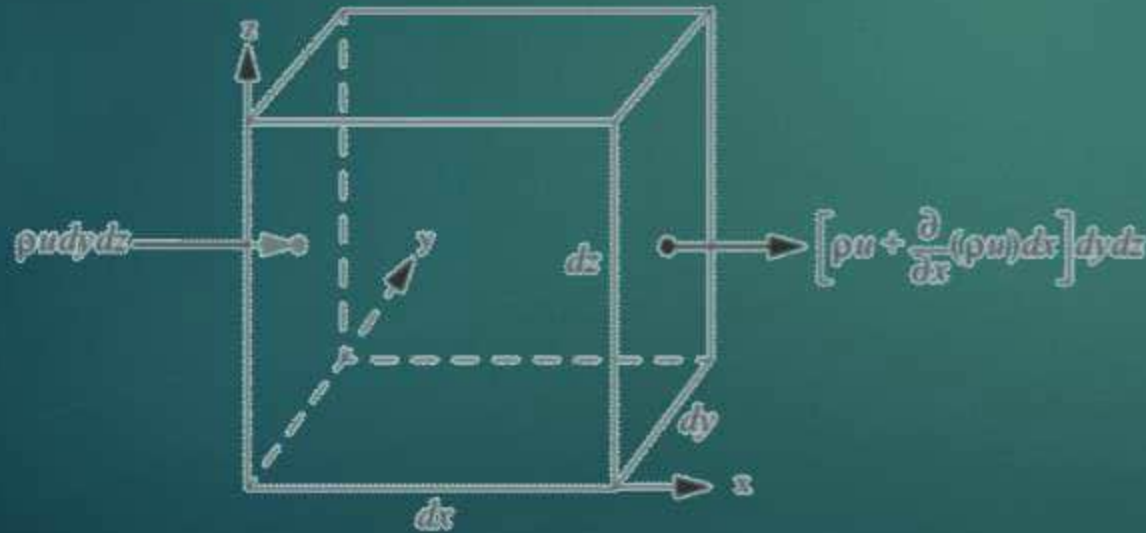
$$(\dot{m} + d\dot{m}) - \dot{m} = \left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx \right] dy dz - \rho u dy dz = \frac{\partial}{\partial x} \rho u dx dy dz$$

► نرخ خالص خروجی در جهت Y:

$$\frac{\partial}{\partial y} \rho v dx dy dz$$

► نرخ خالص خروجی در جهت Z:

$$\frac{\partial}{\partial z} \rho w dx dy dz$$



► نرخ خالص خروجی از کل المان

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho u dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y} \rho v dx dy dz + \frac{\partial}{\partial z} \rho w dx dy dz = 0$$

با چگالی ثابت

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

معتبر برای **جریان تراکم ناپذیر** یا **جریان دائمی**

معادله بقا مومنتوم (ناویر-استوکس)

➤ قانون دوم نیوتن برای المان $dx dy dz$

$$d\vec{F} = dm \cdot \vec{a}$$

➤ در مکانیک سیالات سه نوع نیرو وجود دارد: **نیروی فشاری**، **نیروی حجمی** و **نیروی ویسکوز**

$$\vec{a} = \frac{d\vec{F}_p}{dm} + \frac{d\vec{F}_b}{dm} + \frac{d\vec{F}_v}{dm}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt}$$

➤ میدان سرعت

$$\vec{u} = \begin{cases} u = u(x, y, z, t) \\ v = v(x, y, z, t) \\ w = w(x, y, z, t) \end{cases}$$

➤ میدان سرعت جریان سیال تابعی از زمان و مکان است.

$$\vec{u} = (u(x,y,z,t), v(x,y,z,t), w(x,y,z,t))$$

شتاب میدان سرعت شامل شتاب محلی و شتاب موضعی است.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt}$$

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}$$



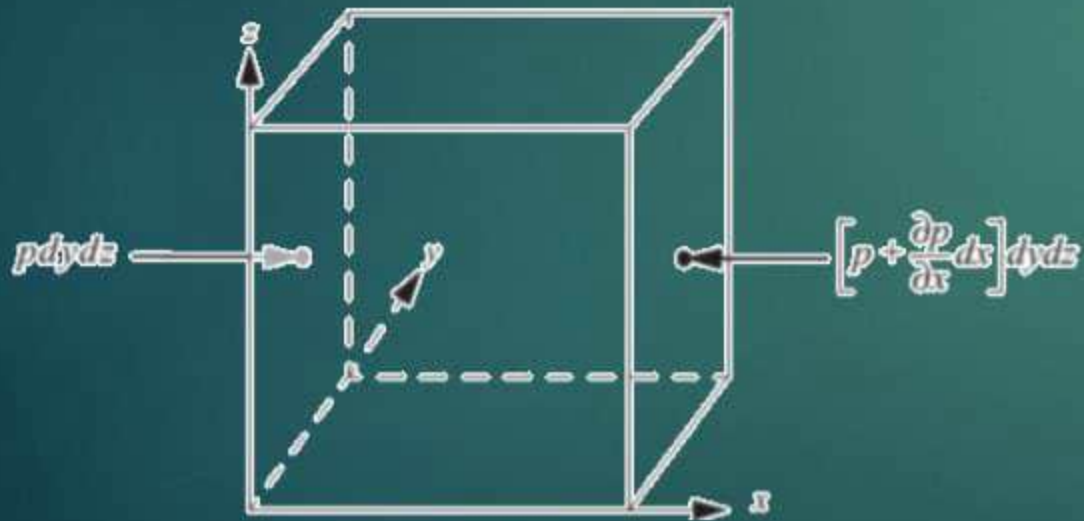
$$a_x = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$a_y = \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$a_z = \frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$$

نیروی فشاری

برآیند نیروهای فشاری بر واحد جرم در جهت X, Y, Z



نیروی فشاری وارد به المان در جهت X

$$\frac{d\vec{F}_p}{dm}$$



$$\frac{dF_{px}}{dm} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{dF_{py}}{dm} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{dF_{pz}}{dm} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

نیروی حجمی

تنها نیروی حجمی وارد به المان نیروی گرانش است.

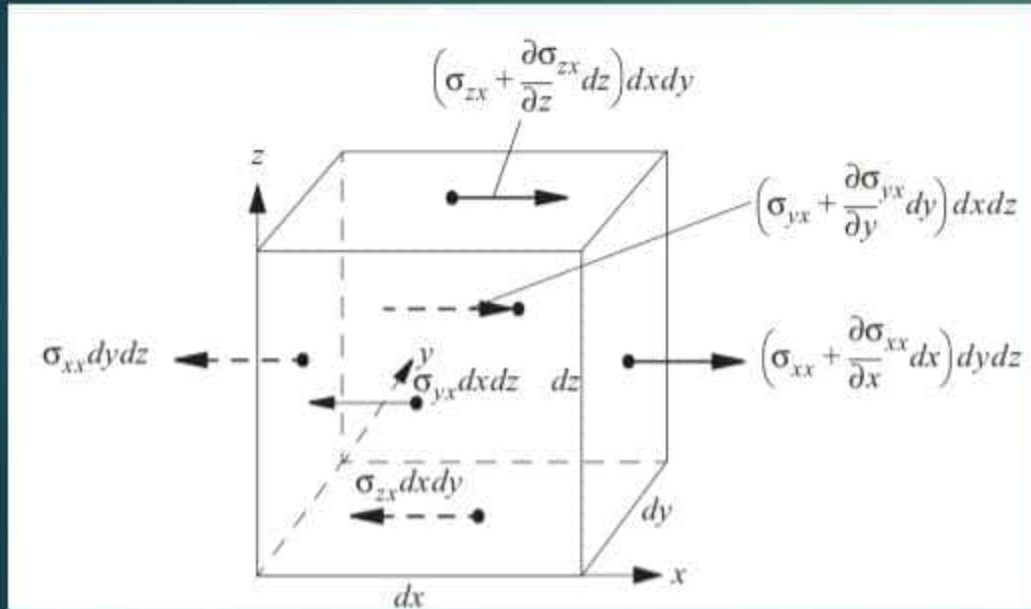
نیروی حجمی بر واحد جرم

$$\frac{d\vec{F}_b}{dm} \longrightarrow \begin{aligned} \frac{dF_{bx}}{dm} &= 0 \\ \frac{dF_{by}}{dm} &= 0 \\ \frac{dF_{bz}}{dm} &= -g \end{aligned}$$

نیروی ویسکوز

این نیرو در اثر تنش های وارد بر سطوح المان سیال ایجاد می شود هم به صورت عمودی و هم مماسی
لزوج بودن سیال و وجود گرادیان سرعت در جریان دو عامل ایجاد تنش در سیال

برآیند نیروی ویسکوز بر واحد جرم در جهت X



تنش ها در جهت X وارد بر تمام سطوح المان

$$\frac{dF_{vx}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right]$$

به طور مشابه در جهت Y و Z

$$\frac{dF_{vy}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right]$$

$$\frac{dF_{vz}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right]$$

➤ نیروها باید مشابه نیروهای فشاری و حجمی بر حسب سرعت و فشار بیان شوند.

➤ نیوتن در سال ۱۶۸۷ (Principia) رابطه خطی بین تنش برشی و گرادیان عمودی سرعت را ارائه کرد.

➤ در سال ۱۸۴۵ استوکس قانون لزجت خطی را به جریان سه بعدی تعمیم داد.

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{zx} = \sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

روابط تنش-سرعت در نیروی ویسکوز جایگزین می شود.

با جایگزینی **ثتاب** و مولفه های نیروهای **فشاری**، **حجمی** و **ویسکوز** معادله بقای مومنتوم به دست می آید.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g$$

معادله ناویر استوکس

معادلات دیفرانسیل مشتق پاره ای مرتبه دوم غیرخطی بیضوی

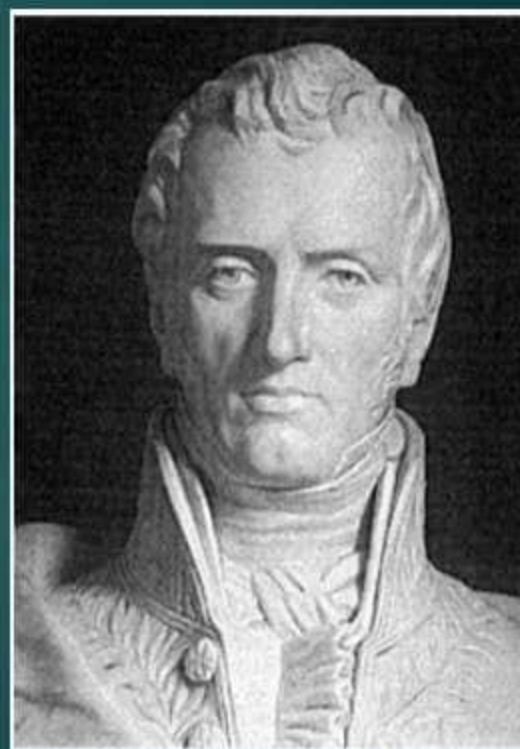


Sir George Stokes

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g}$$

1822



Claude-Louis Navier

شرایط مرزی

معادلات بیضوی برای حل نیاز به شرایط مرزی روی تمام سطوح محدوده محاسباتی دارند.

سه نوع مرز وجود دارد: **صلب، سطح آزاد و دور دست**

۱-مرز صلب: اختلاف سرعت بین مولکولهای سیال و جسم صلب صفر است (ذرات سیال به سطح جسم صلب می چسبند) **شرط عدم لغزش**

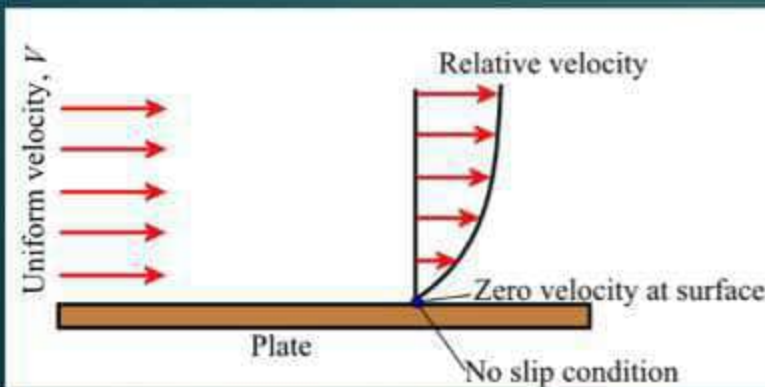
با توجه به سیستم مختصات متحرک روی بدنه شرط عدم لغزش روی بدنه کشتی:

$$u = v = w = 0$$

در دیگر مرزهای صلب ثابت مانند کف دریا، دیواره کانال ها شرط عدم لغزش می شود

$$u = V$$

$$v = w = 0$$



۲- سطح آزاد:

➤ **شرط مرزی دینامیک سطح آزاد:** بدلیل تداخل مولکولی بین آب و هوا، ذرات دو سیال در مرز مشترک سرعت برابر دارند. بنابراین در این مرز تعادل نیروها برقرار است مولفه مماس بر سطح آزاد:

$$\sigma_{(ns)w} = \sigma_{(ns)a}$$

$$\sigma_{(nt)w} = \sigma_{(nt)a}$$

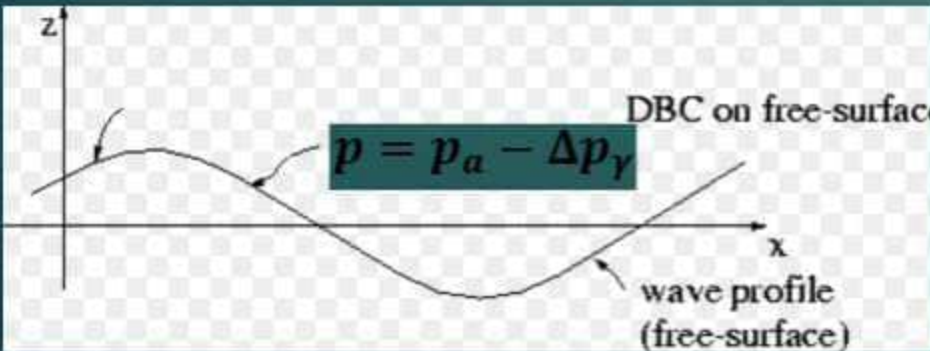
که s, t, n سیستم مختصات کارتزین محلی هستند و n عمود به سطح است. مولفه عمودی تعادل نیرو در سطح آزاد

$$(\sigma_{nn} - p)_w = (\sigma_{nn} - p)_a + \Delta p_\gamma$$

که Δp_γ اثر کشش سطحی است. تنش ویسکوز عمودی بسیار کوچک است.

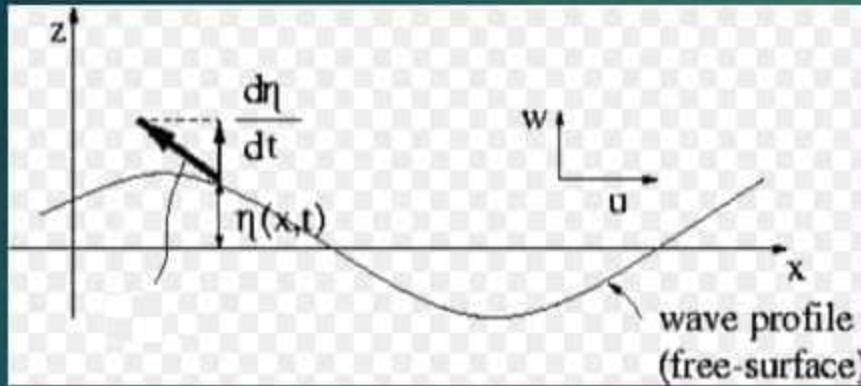
$$\Delta p_\gamma = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$p = p_a - \Delta p_\gamma$$



➤ **شرط مرزی سینماتیک سطح آزاد:** در سطح آزاد هیچ ذره ای از سطح جدا نمی شود.

← سرعت عمودی ذره سیال روی سطح آزاد باید با مشتق کل ارتفاع سطح آزاد نسبت به زمان برابر باشد.



$$w = \frac{d\eta}{dt}$$

که $\eta = \eta(x, y)$ معادله سطح آزاد است.

۳- دور دست: حتی اگر دریا محدودیت ابعادی داشته باشد بهتر است در بعضی جهات آن را بینهایت در نظر گرفت.
در نتیجه شرط مرزی بیان میکند که اغتشاشات در این مرز به سمت صفر میل کرده اند.

$$u = V$$

$$v = w = 0$$

$$p = p_{\infty}$$



۱-۵ تشابه

اهمیت تشابه

- برای تعمیم نتایج مدل به کشتی باید بین مدل و کشتی تشابه وجود داشته باشد.
- برای بررسی نیروهای موثر در هیدرودینامیک کشتی (اعداد بی بعد مهم)
- استخراج معادلات حاکم بدون بعد



هندسی

سینماتیکی

دینامیکی

تشابه هندسی

➤ یعنی کشتی و مدل شکل یکسانی داشته باشند.

➤ تشابه هندسی در جزییات کوچک ضروری نیست. زبری سطح بدنه قابل مدلسازی نیست.

➤ اثراتی که مدل نمی شوند توسط روابط تجربی اعمال می شوند.

$$\lambda = L_F / L_M$$

➤ تمام ابعاد خطی بدنه باید با یک مقیاس مدل شوند.

DDG-51 Destroyer



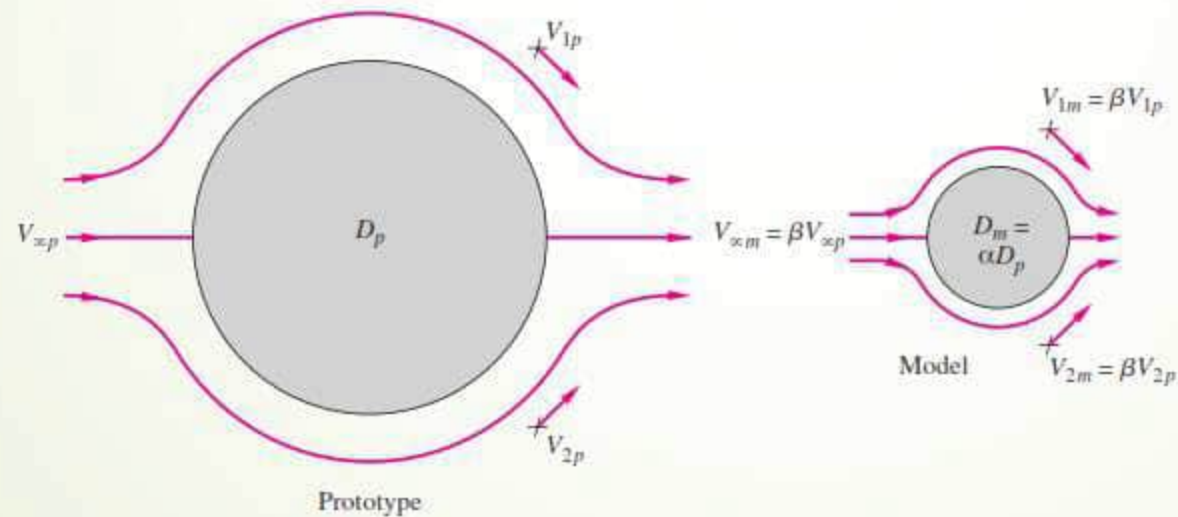
1/20th scale model



تشابه سینماتیکی

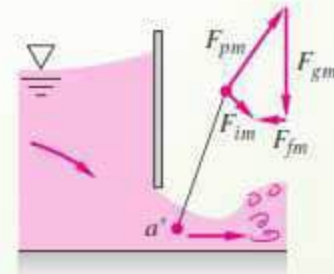
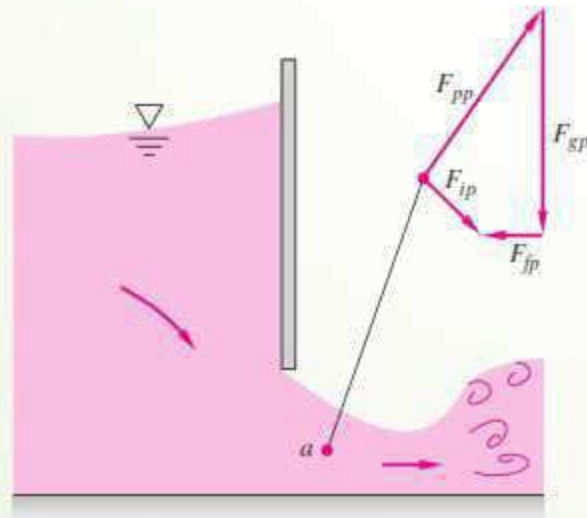
یعنی همه سرعت‌های جریان (شامل مولفه ها) با یک مقیاس مدل شوند.

در واقع خطوط جریان اطراف بدنه در مدل و کشتی تشابه هندسی دارند



تشابه دینامیکی

- یعنی همه نیروهای جریان (شامل مولفه ها) با یک مقیاس مدل شوند.
- در واقع بردار نیرو در نقطه متناظر در مدل و کشتی جهت یکسان دارند.
- نیروهای موثر در حرکت کشتی عبارتند از: اینرسی، ویسکوز، گرانش، فشاری، کشش سطحی و تراکم پذیری.
- اگر تشابه هندسی و دینامیک وجود داشته باشد حتما تشابه سینماتیک وجود خواهد داشت.



اعداد بی بعد

"Without dimensionless numbers, experimental progress in fluid mechanics would have been almost nil; It would have been swamped by masses of accumulated data" (R. Olson)

➤ تشابه دینامیکی زمانی برقرار است که اعداد بی بعد موجود در یک پدیده فیزیکی برای مدل و نمونه اصلی به صورت متناظر برابر باشند

➤ برای تعیین اعداد بی بعد موثر در مسئله حرکت کشتی باید فرم بدون بعد معادلات حاکم و شرایط مرزی استخراج شود.

➤ تعریف کمیت های بدون بعد برای جایگزینی در معادلات ناویراستوکس و شرایط مرزی

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L}, \quad \bar{\eta} = \frac{\eta}{L}, \quad \bar{r}_1 = \frac{r_1}{L}, \quad \bar{r}_2 = \frac{r_2}{L}$$

$$\bar{u} = \frac{u}{V}, \quad \bar{v} = \frac{v}{V}, \quad \bar{w} = \frac{w}{V}, \quad \bar{p} = \frac{p_{hd}}{\rho V^2}, \quad \bar{t} = \frac{t \cdot V}{L}$$

• فرم بدون بعد معادلات ناویر استوکس

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \frac{\nu}{VL} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{z}^2} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \frac{\nu}{VL} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{z}^2} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{y}} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} + \frac{\nu}{VL} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{z}^2} \right)$$

• تنها عدد بی بعد موثر در معادلات ناویر استوکس **عدد رینولدز** است.

➤ فرم بدون بعد معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = 0$$

➤ فرم بدون بعد شرط مرزی بدنه

$$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$$

➤ شرط مرزی بینهایت

$$\bar{u} = 1$$

$$\bar{v} = \bar{w} = 0$$

➤ فرم بدون بعد شرط مرزی سینماتیک سطح آزاد

$$\bar{w}V = \frac{d(L\bar{\xi})}{d\left(\frac{\bar{t}L}{V}\right)} \rightarrow \bar{w} = \frac{d\bar{\xi}}{d\bar{t}}$$

➤ فرم بدون بعد شرط مرزی دینامیک سطح آزاد

$$\begin{aligned}\bar{p} &= p_{hd} + p_{hs} = p_a - \Delta p_\gamma \\ \bar{p}\rho V^2 - \rho g L \bar{\xi} &= p_a + \frac{\gamma}{L} \left(\frac{1}{\bar{r}_1} + \frac{1}{\bar{r}_2} \right)\end{aligned}$$



$$\bar{p} = \left(\frac{p_a}{\rho V^2} \right) + \left(\frac{gL}{V^2} \right) \bar{\xi} - \left(\frac{\gamma}{\rho V^2 L} \right) \left(\frac{1}{\bar{r}_1} + \frac{1}{\bar{r}_2} \right)$$

➤ اعداد بی بعد **اولر**، **فرود** و **وبر** در شرط مرزی سطح آزاد موثرند.

جمع بندی بی بعد سازی معادلات و شرایط مرزی

- تنها عدد بی بعد مهم در معادله بدون بعد ناویر استوکس عدد رینولدز است
- اعداد بی بعد فرود، وبر و اولر در فرم بدون بعد شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد ظاهر می شوند.
- اگر اعداد بدون بعد برای مدل و کشتی برابر باشند حل معادلات بدون فرم برای مدل و کشتی معتبر است.
- شرط لازم و کافی برای تشابه دینامیکی بین جریان اطراف مدل و کشتی (که مشابه هندسی اند) برابری:

فرود رینولدز اولر وبر


$$Rn = \frac{VL}{\nu}$$

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

$$Wn = \frac{\rho V^2 L}{\gamma}$$

$$En = \frac{p_a}{\rho V^2}$$

با بی بعد سازی معادلات حاکم بر جریان سیال و شرایط مرزی اعداد بی بعد موثر در مساله حرکت کشتی به دست آمد. با چه روش دیگری می توان این اعداد را استخراج کرد؟

شرایط تئوریک مورد نیاز در تشابه مدل و کشتی

- به استثنا زبری سطح، مدل و کشتی باید تشابه هندسی داشته باشند.
- حوضچه باید به اندازه کافی عریض و عمیق باشد تا از اثرات دیواره جلوگیری شود
- **عدد رینولدز** مدل و کشتی باید برابر باشند (اگر قرار است اثرات لزجت به دقت در نظر گرفته شود)
- **عدد فرود** مدل و کشتی باید برابر باشند (اگر قرار است اثرات گرانش بر سطح آزاد به دقت در نظر گرفته شود)
- **عدد وبر** مدل و کشتی باید برابر باشند (اگر قرار است اثرات کشش سطحی به دقت مدل شود)
- **عدد کاویتاسیون** مدلو کشتی باید برابر باشند (اگر قرار است یک الگوی کاویتاسیون بین مدل و کشتی مشاهده شود)

دو راهی در تست مدل

- متاسفانه برقراری همزمان شرایط تئوریک تشابه مدل و کشتی غیر ممکن است.
- عموماً طول مدل کوچکتر از کشتی است. برای برابر اعداد فرود باید سرعت مدل کمتر از سرعت کشتی باشد و برای برابر اعداد رینولدز و وبر باید سرعت مدل بیشتر از سرعت کشتی باشد.
- شاید بتوان با تغییر مشخصات سیال (ρ, ν, γ, g) حوضچه شرایط برابری اعداد بی بعد را ایجاد کرد اما سیال مناسب وجود ندارد.
- در عمل باید یکی از اعداد بی بعد بین مدل و کشتی را برابر در نظر گرفت و شرط برابری دو عدد دیگر فدا شود.

۱-۶ تقسیم بندی مقاومت گشتی

توان موثر (P_E)

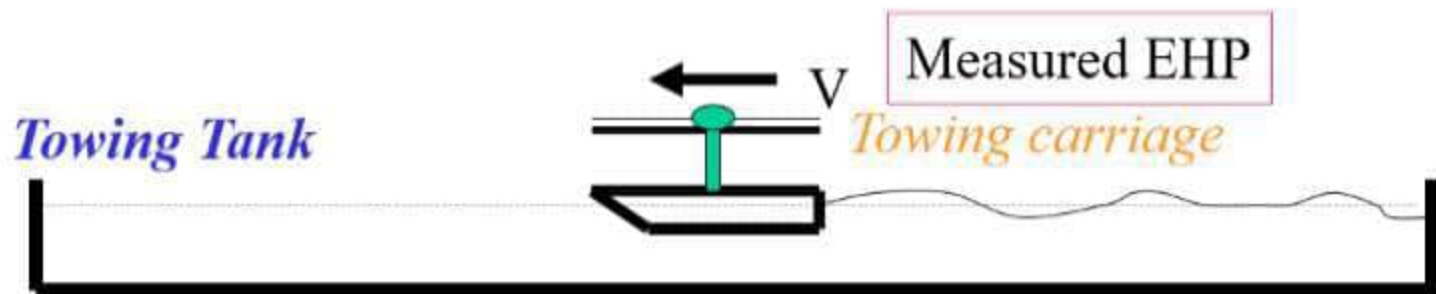
توان مورد نیاز برای کشیدن کشتی در سرعت ثابت بدون حضور پروانه.

برای تعیین توان محرک اصلی در اولین گام باید توان موثر تعیین شود.

$$\mathbf{BHP} > \mathbf{SHP} > \mathbf{DHP} > \mathbf{THP} > \mathbf{EHP}$$

اولین گام در محاسبه تعیین توان موثر تعیین **مقاومت کل کشتی** است.

$$\mathbf{EHP} = \mathbf{R_T} \cdot \mathbf{V_S}$$



مقاومت کل (R_T)

مقاومت یک کشتی نیروی مورد نیاز برای کشیدن کشتی در مسیر مستقیم با سرعت ثابت بدون حضور پروانه.



مقاومت کل کشتی را می توان به دو بخش تقسیم کرد:

➤ مقاومت بدنه برهنه

➤ مقاومت ملحقات

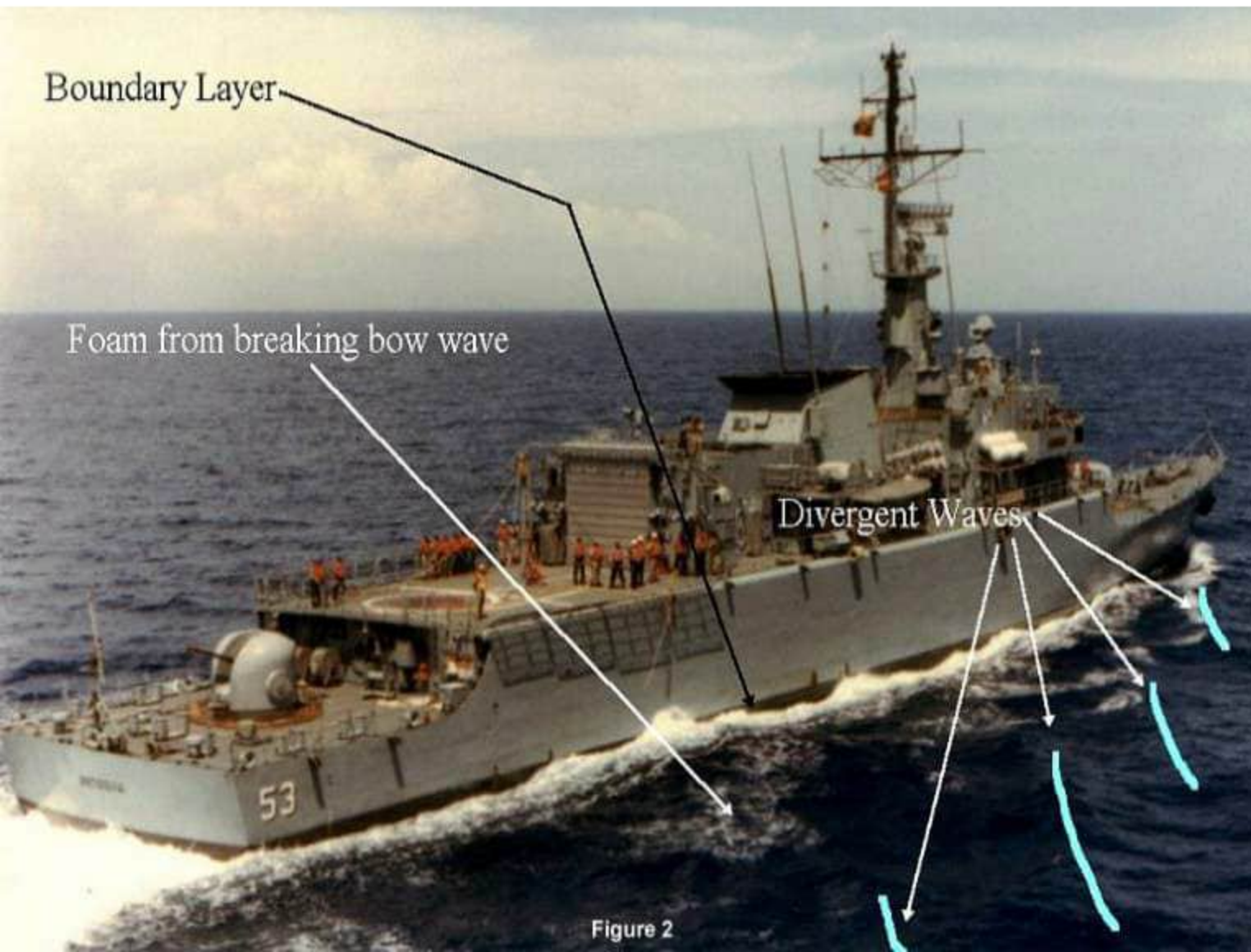


Figure 2

مقاومت بدنه برهنه ناشی
از اصطکاک آب و موج
منتشر شده است

✓ ملحقات شامل سکان، بیلج کیل، فین رول، شفت، شفت براکت، بوسینگ و... است.



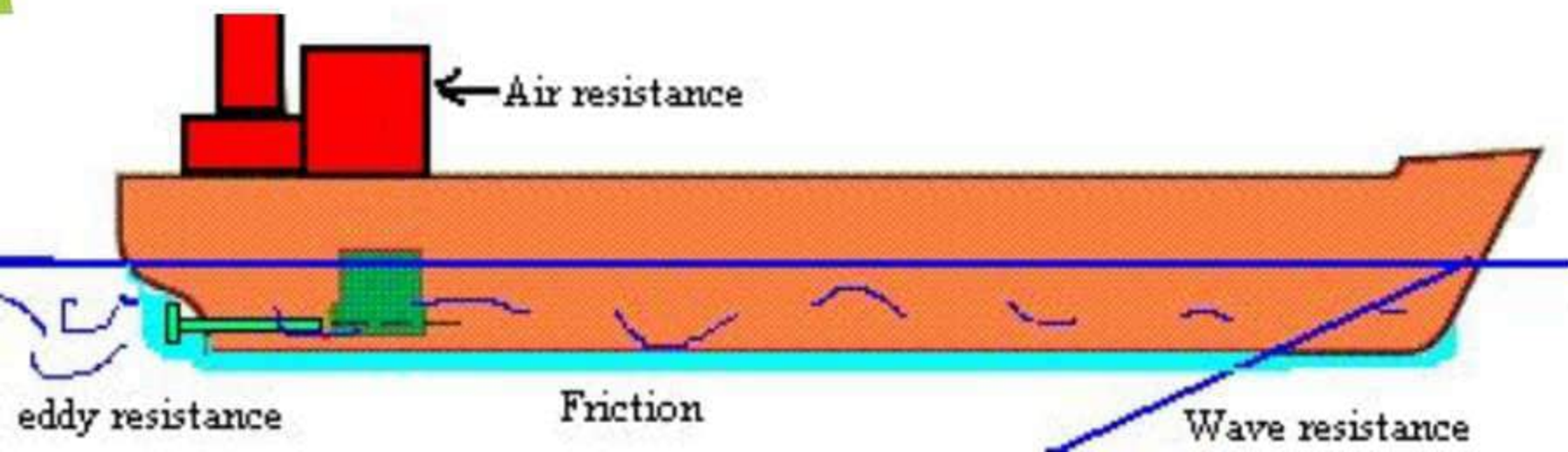
مقاومت ملحقات عمدتاً
ماهیت اصطکاکی دارد.

مقاومت بدنه برهنه

مقاومت بدنه برهنه یک کشتی را می توان به دو بخش تقسیم کرد:

➤ مقاومت بخش زیر آب

➤ مقاومت هوا



✓ مقاومت هوا ناشی از مقاومت اصطکاکی بخش فریبورد و مقاومت فشاری سوپراستراکچر و بار روی عرشه است.

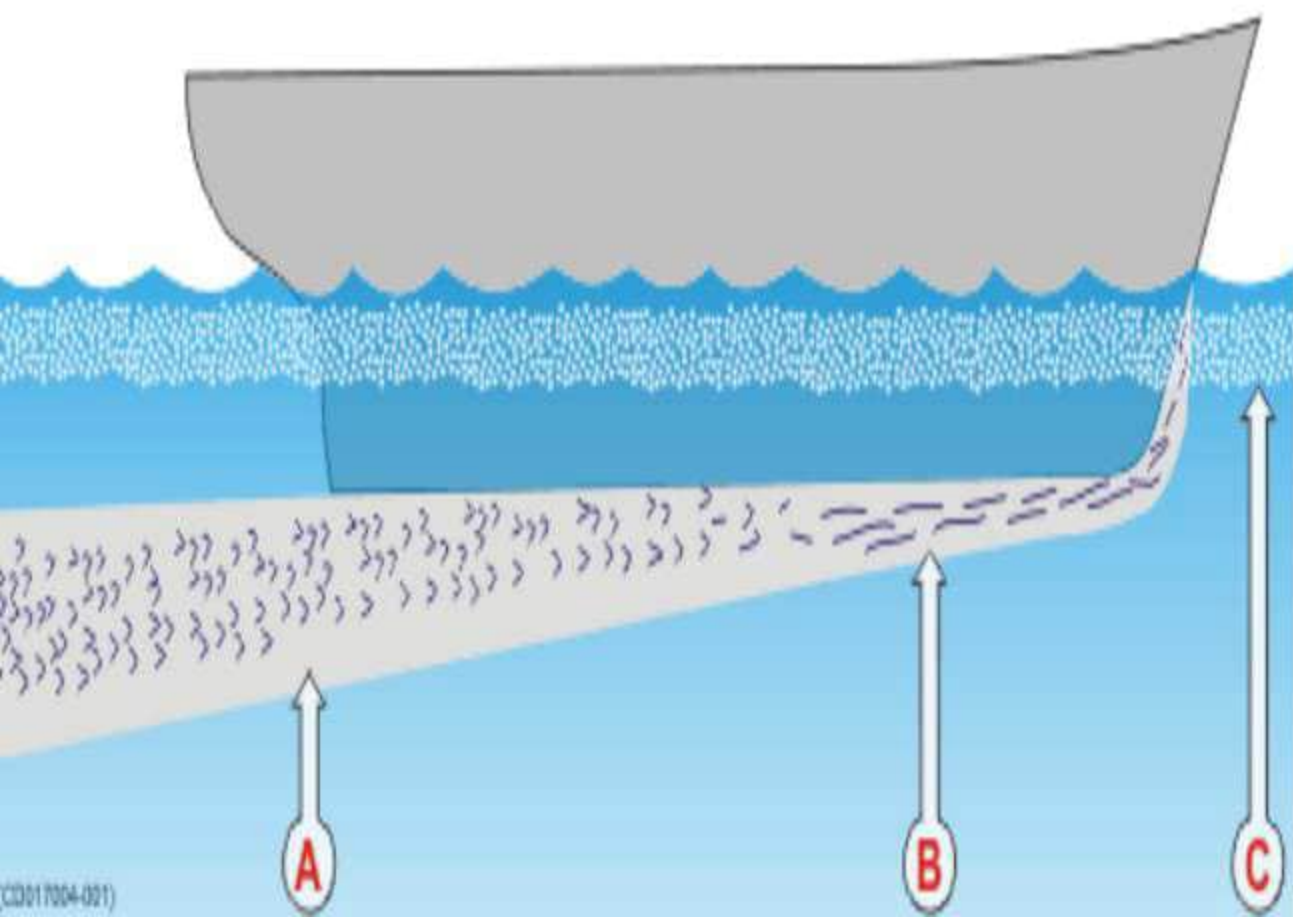


مقاومت بخش زیر آب

مقاومت بدنه زیر آب کشتی را می توان به دو بخش کلی تقسیم کرد:

➤ مقاومت ویسکوز

➤ مقاومت موج



مقاومت ویسکوز عمدتاً ناشی از لایه مرزی اطراف کشتی است.

✓ هر جسم متحرک در سطح آب مانند یک نقطه پرفشار عمل می کند و موجب انتشار امواج واگرا و عرضی می شود.



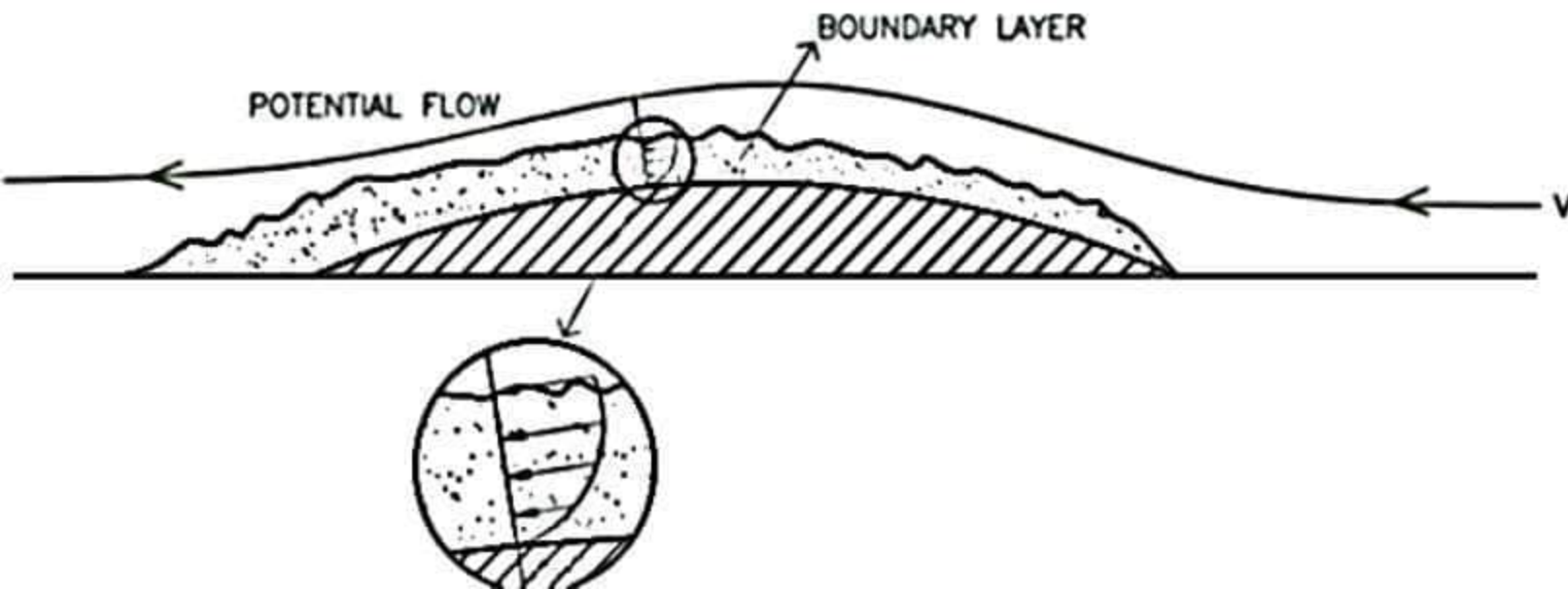
مقاومت موج ناشی از موج
تشکیل شده اطراف بدنه
است و ماهیت فشاری دارد.

مقاومت ویسکوز

در اثر عبور یک صفحه تخت در آب بین سطح بدنه و ذرات سیال اطراف آن گرادیان سرعت ایجاد می شود (لایه مرزی).

این گرادیان سرعت که به دلیل ویسکوز بودن سیال ایجاد شده است طبق قانون ویسکوزیته نیوتن باعث ایجاد تنش برشی روی سطح بدنه کشتی می شود.

انتگرال این تنش برشی روی سطح جسم مقاومت ویسکوز را نتیجه می دهد.



مقاومت ویسکوز

- ▶ زبر شدن سطح جسم باعث افزایش مقاومت ویسکوز می شود.
- ▶ سه بعدی شدن سطح جسم موجب ایجاد مولفه های دیگری از مقاومت (با ماهیت ویسکوز) می شود.

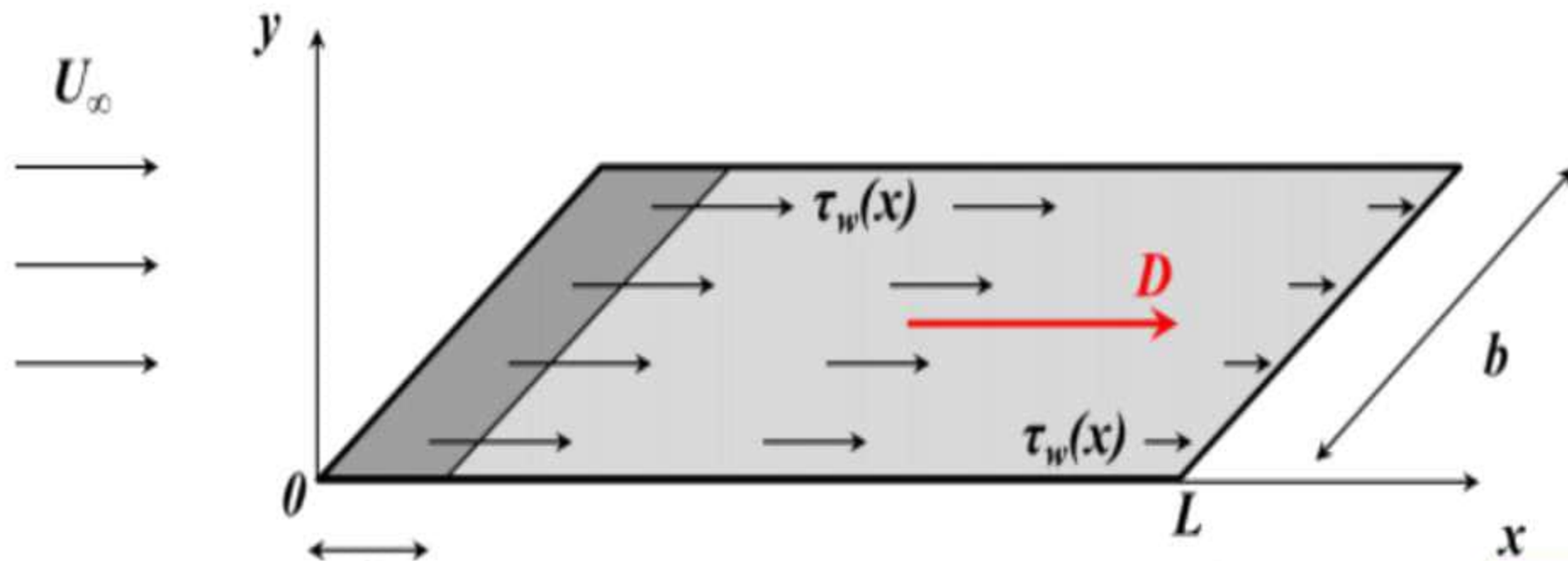
پس مقاومت ویسکوز سطح زیر آب کشتی از بخش های زیر تشکیل شده است:

1. مقاومت اصطکاکی صفحه تخت معادل
2. مقاومت زبری سطح
3. مقاومت فرم سه بعدی کشتی-اصطکاکی
4. مقاومت فرم سع بعدی کشتی-فشاری

۱- مقاومت اصطکاکی صفحه تخت معادل

▶ صفحه تخت معادل صفحه ای با سطح خیس برابر با سطح خیس کشتی است که با عدد رینولدز برابر با عدد رینولدز کشتی حرکت می کند.

▶ مقاومت صفحه تخت معادل ناشی از نیروهای برشی بین سطح صلب و آب است.



۲- مقاومت زبری سطح

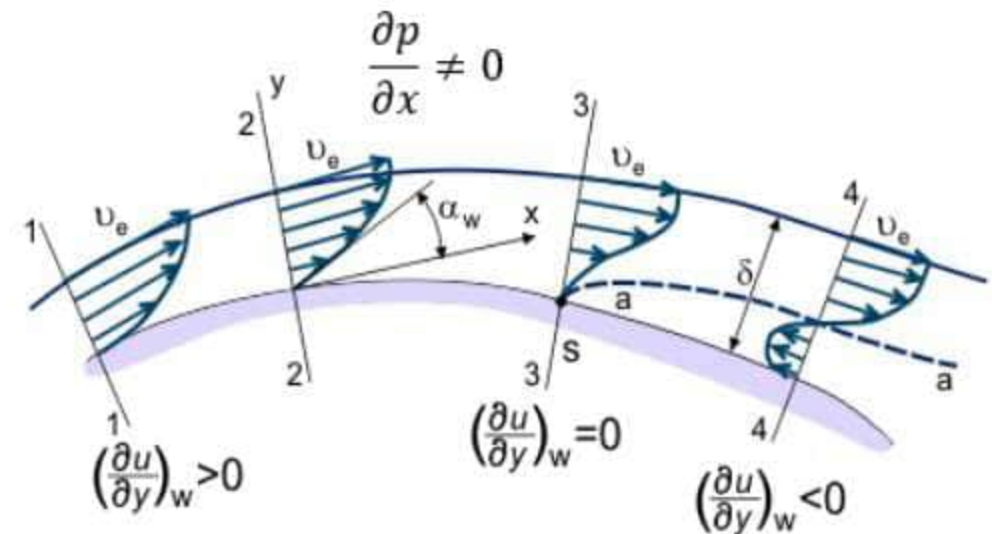
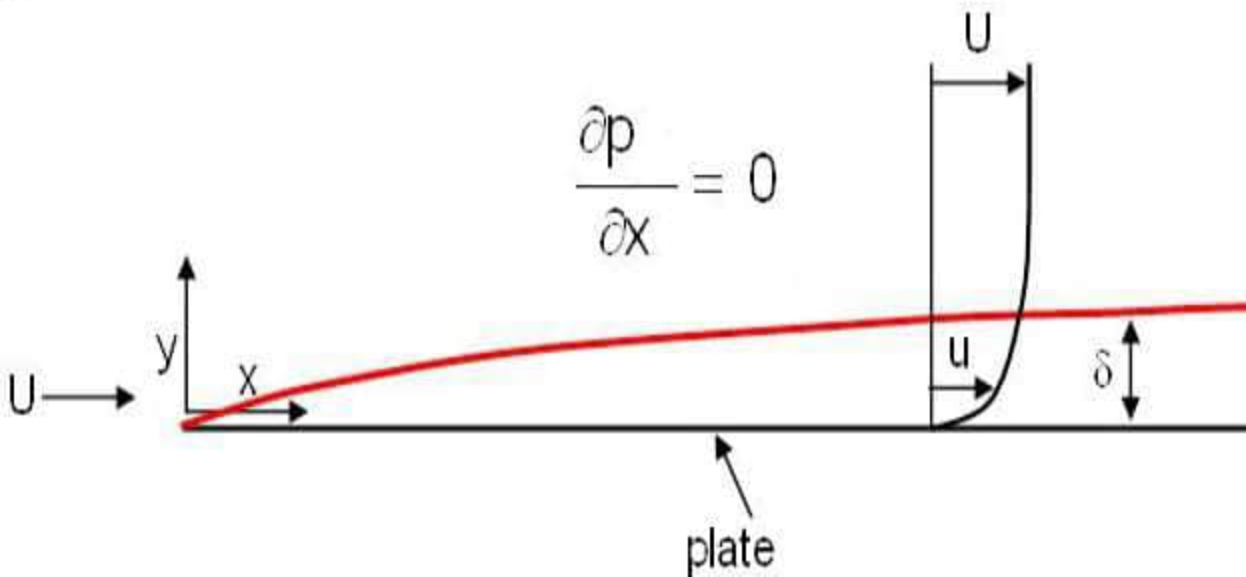
▶ اگر زبری سطح از حد معینی بیشتر باشد آنگاه زبری روی مقاومت اصطکاکی اثر دارد.

▶ مدل کشتی عموماً سطح صافی دارد و مقاومت زبری در آن در نظر گرفته نمی شود اما برای کشتی باید اعمال شود.



۳- مقاومت فرم بدنه

- ▶ در صفحه تخت گرادیان فشار در جهت مسیر حرکت جریان تقریباً صفر است.
- ▶ در اجسام سه بعدی دارای انحنا در جهت حرکت جریان **گرادیان فشار مخالف صفر** است.
- ▶ گرادیان فشار روی سطح بدنه سه بعدی کشتی باعث افزایش مقاومت ویسکوز نسبت به حالت صفحه تخت معادل می شود.
- ▶ این افزایش مقاومت شامل دو بخش با ماهیت ویسکوز است.



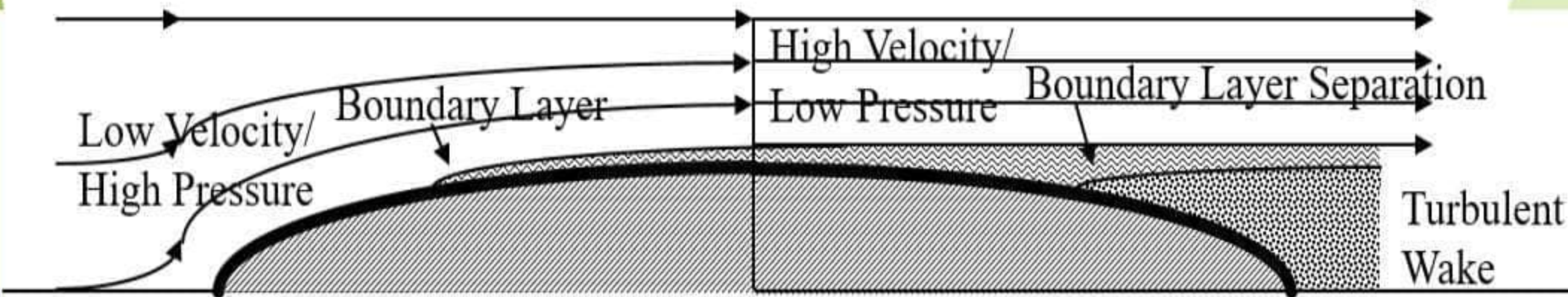
۳-۱ مقاومت فرم بدنه کشتی - اصطکاکی

در صفحه تخت سرعت جریان در خارج لایه مرزی با سرعت جریان اولیه برابر است.

به دلیل گرادیان فشار در اطراف بدنه سه بعدی کشتی، سرعت جریان در اطراف بدنه کشتی (خارج لایه مرزی) با حرکت کشتی متفاوت است.

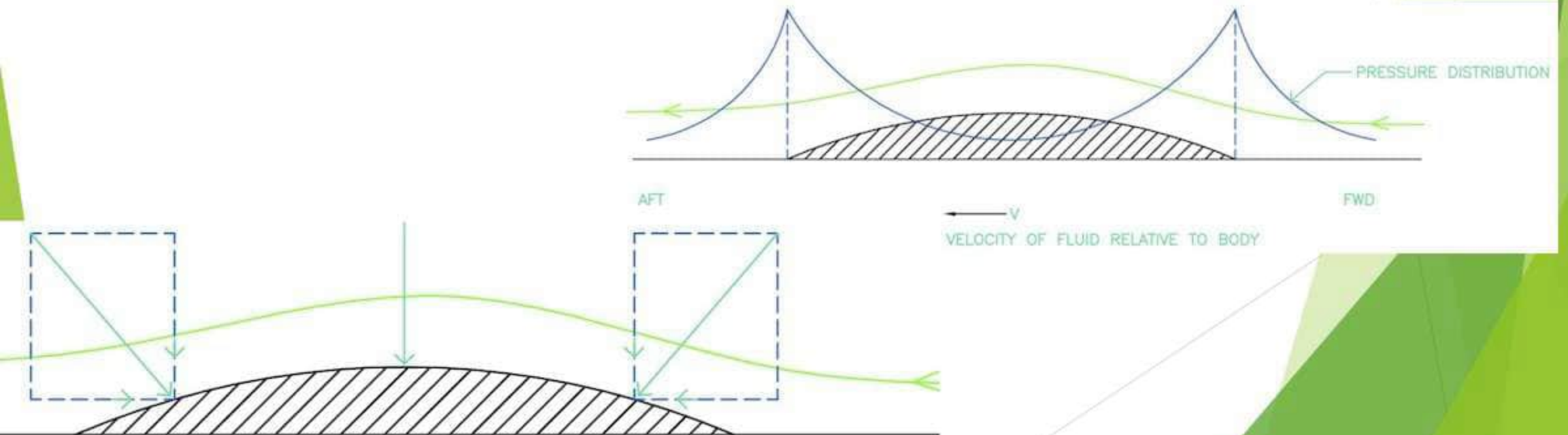
در سینه و پاشنه کشتی سرعت جریان کاهش می یابد اما در بخش میانی کشتی (بخش اصلی) سرعت جریان افزایش می یابد.

این افزایش سرعت در بخش میانی باعث افزایش مقاومت اصطکاکی می شود.



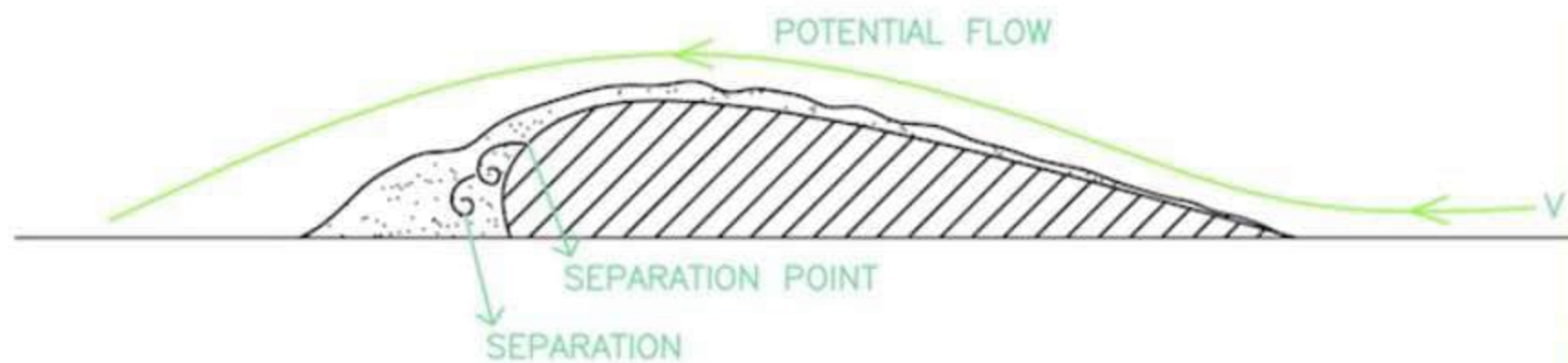
2- مقاومت فرم بدنه کشتی- فشاری(مقاومت ویسکوز فشاری)

- ▶ بر اساس تناقض دالامبر مقاومت وارد بر یک جسم متحرک (بدون لیفت) در سیال ایده ال بدون سطح آزاد صفر است.
- ▶ به عبارت دیگر در این حالت نیروهای فشاری وارد بر تمام بدنه جسم یکدیگر را خنثی می کنند.



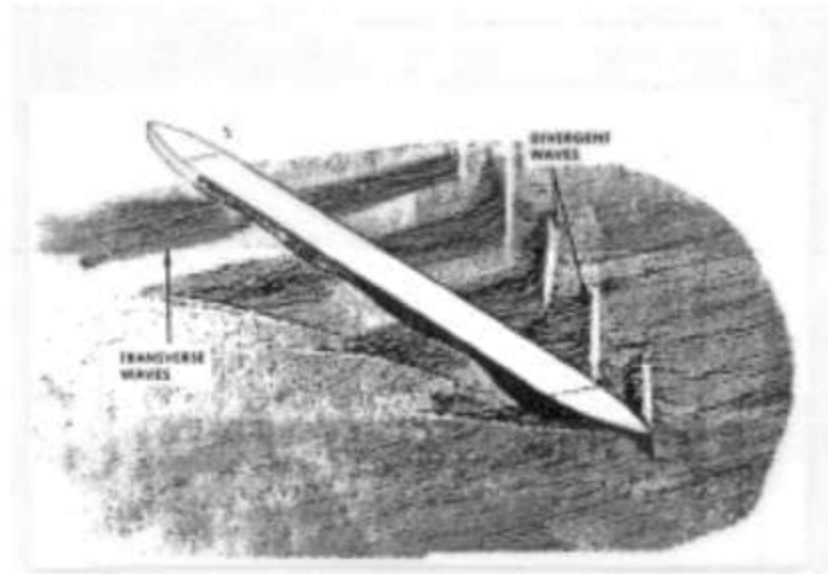
2- مقاومت فرم بدنه کشتی- فشاری(مقاومت ویسکوز فشاری)

- ▶ در سیال ویسکوز به دلیل تشکیل لایه مرزی خطوط جریان از سمت پاشنه جدا می شوند و فشار در پاشنه در مقایسه با حالت ایده ال کاهش می یابد.
- ▶ در نتیجه انتگرال نیروهای فشاری روی سطح جسم برابر صفر نیست. این مولفه مقاومت ویسکوز فشاری است.



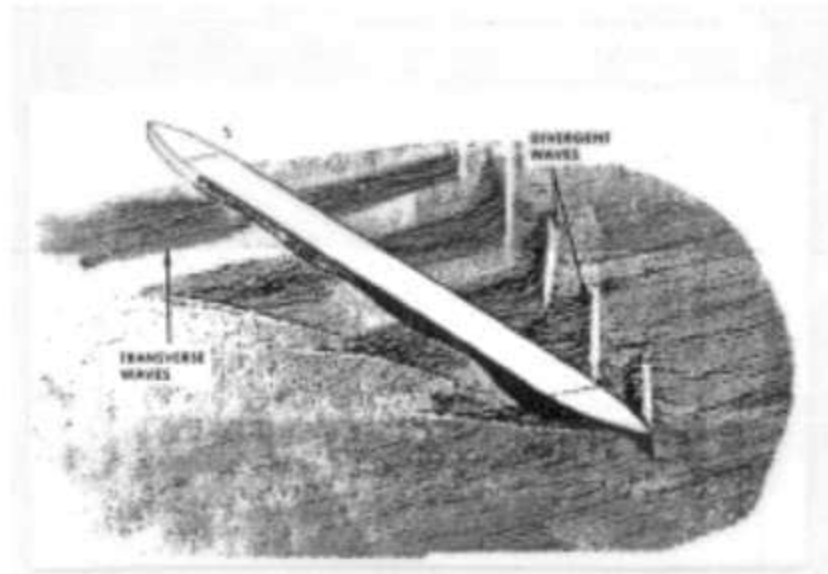
مقاومت موج

- ▶ توزیع فشار ایجاد شده در اطراف یک جسم متحرک در سطح آزاد موجب بالا و پایین رفتن سطح آب می شود.
- ▶ آب در نواحی پرفشار اطراف جسم بالا رفته و در نواحی کم فشار پایین می آید.
- ▶ خروج ذرات آب از تعادل موجب تشکیل موج در اطراف کشتی می گردد.



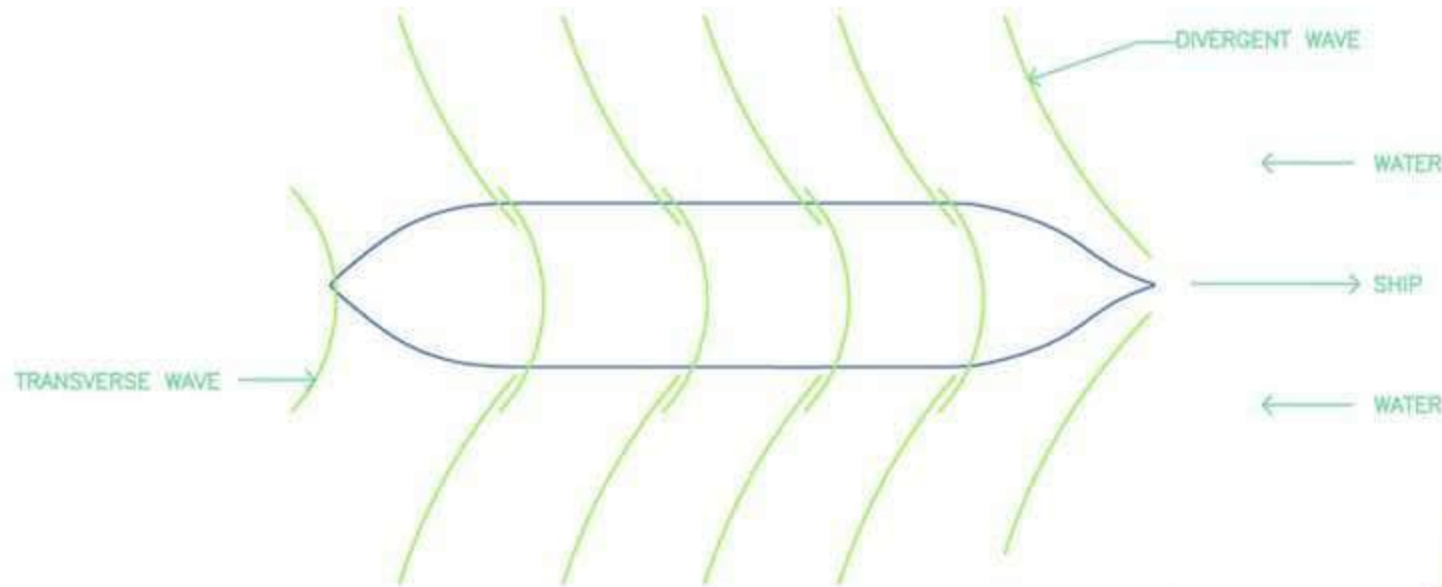
مقاومت موج

- ▶ به دو دلیل حرکت کشتی در سطح آزاد باعث ایجاد مقاومت می شود:
- ▶ کشتی برای تشکیل پیوسته این امواج به دریا انرژی منتقل می کند(مقاومت موجسازی)
- ▶ برخی از این امواج ارتفاع گرفته و شکسته می شوند(مقاومت شکست موج)



1-مقاومت موجسازی

بخش از انرژی ای که کشتی صرف تشکیل سیستم موج در اطراف خود می کند، مقاومت موجسازی نامیده می شود.
مقاومت موجسازی با افزایش سرعت شناور سهم بیشتری از مقاومت کل شناور را تشکیل می دهد.



1-مقاومت شکست موج

- ▶ اگر اغتشاشات بزرگ باشند، موج ممکن است به قدری تیز شود که دچار شکست موج شود و انرژی منتقل شده به امواج دریا به صورت دنباله مشاهده می شود. این مولفه از مقاومت کشتی، مقاومت شکست موج نامیده می شود.



مقاومت بر حسب نوع شناور

میزان هر یکی از مولفه های مقاومت برای شناورهای مختلف متفاوت است.
در شناورهای کند مقاومت غالب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت است.
مقاومت زیر با افزایش سرعت افزایش می یابد.
مقاومت فرم بدنه در شناورهای چاق نسبت به شناورهای لاغر بیشتر است.
مقاومت شکست موج مولفه اصلی مقاومت موج در شناورهای کند.
در شناورهای پروازی مولفه مقاومت شکست موج با مقاومت اسپری جایگزین می شود.

