



فصل چهارم. هیدرودینامیک کشتی ۱

جریان غیرویسکوز اطراف کشتی و مقاومت موجسازی

احمد حاجیوند

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی دریا



۱- مقدمه

مقاومت کشتی را می توان به دو بخش ویسکوز و موج تقسیم کرد.

$$C_T(Fn, Rn) \approx C_W(Fn) + C_V(Rn)$$

واقعیت این است که شکل موج تابعی از عدد رینولدز نیز هست...

واقعیت این است که مساحت خیس کشتی تابعی از شکل موج است...

واقعیت این است که سطح آزاد خود باعث ایجاد لایه مرزی می شود...

اما این اثرات قابل صرف نظر است...

پس

مقاومت ویسکوز با مطالعه **جریان ویسکوز** اطراف بدنه به دست می آید.

و

مقاومت موجسازی با مطالعه **جریان غیر ویسکوز** اطراف بدنه به دست می آید.



۲- جریان غیر لزج اطراف بدنه کشتی

فرض اول. جریان غیر لزج باشد (یعنی از گرادیان سرعت در جریان صرفنظر می شود)
معادلات حاکم:

برای جریان غیرلزج ترم ویسکوز معادله ناویر-استوکس حذف می شود.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) \vec{v} = \nabla \left(-\frac{p}{\rho} - gz \right) \quad \text{معادله اول}$$

با ضرب طرفین در بردار سرعت، و فرض جریان دائمی:

$$\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constant along a streamline} \quad \text{معادله برنولی}$$

جمع هدمکانیکی در جریان غیر ویسکوز روی خط جریان ثابت است



فرض دوم. جریان غیر چرخشی باشد

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v} = 0$$

معادله برنولی در تمام محدوده معتبر است

اگر جریان دور دست یکنواخت باشد این فرض معتبر است

جریان غیر ویسکوز + جریان غیر چرخشی ← جریان پتانسیل

در جریان غیر چرخشی می توان تابع پتانسیل سرعت را تعریف کرد $\vec{v}(x, y, z) = \nabla \phi$

$$\nabla^2 \phi = 0$$

معادله لاپلاس

معادله پیوستگی

$$\frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constant}$$

معادله برنولی در تمام محدوده معتبر است



$P, V(u, v, w)$

پیوستگی



ناویر استوکس

جریان
واقعی

جریان غیر ویسکوز و غیر چرخشی



P, ϕ

لاپلاس



برنولی

جریان
ایدهال

مزایای استفاده از جریان ایدهال (پتانسیل):

۱- تبدیل معادله برداری به معادله اسکالر

۲- غیروابسته بودن معادله برنولی و لاپلاس

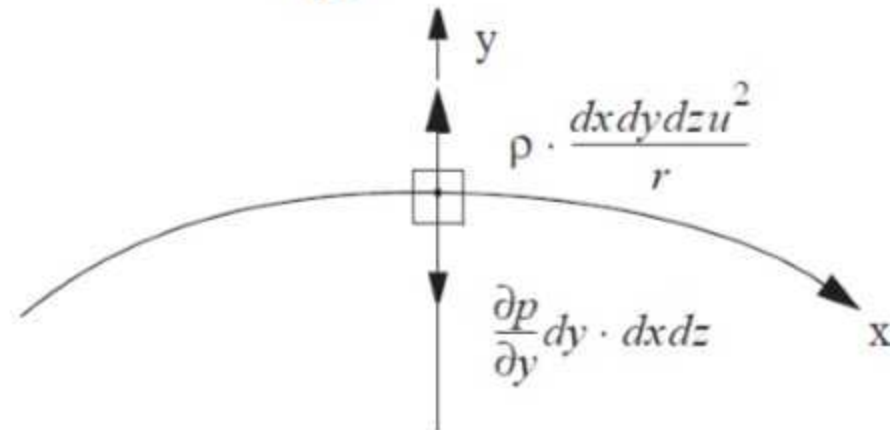
۳- خطی بودن معادله لاپلاس و امکان استفاده از اصل برهم نهی

تغییرات فشار روی جسم دو بعدی

تغییرات فشار روی بدنه با انحنای بدنه ارتباط دارد

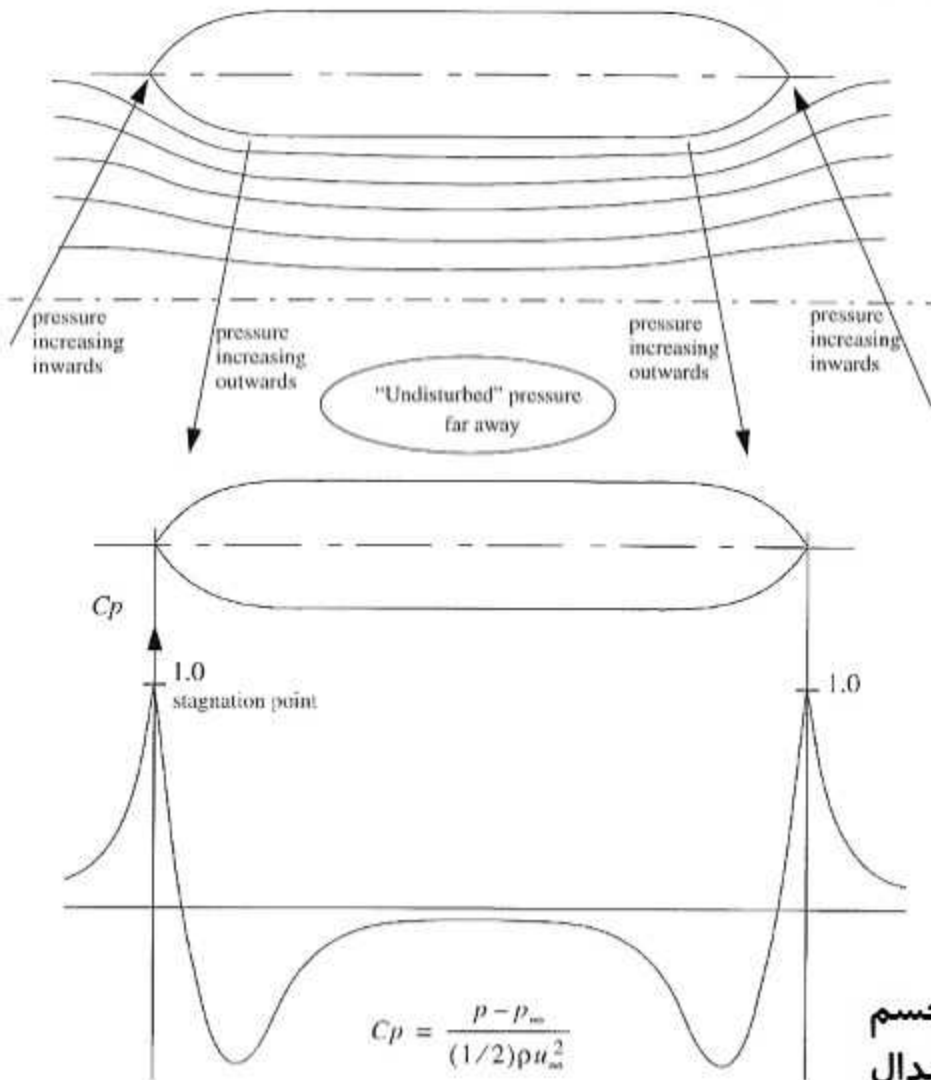
از تعادل نیروهای جانب مرکز و گرادیان فشار روی مسیر منحنی حرکت سیال

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho u^2 / r$$



• در سینه و پاشنه کشتی انحنای خطوط جریان روبه بیرون است برای تعادل باید فشار رو به سمت بدنه افزایش پیدا کند.

• در شانه جلو و عقب کشتی انحنای خطوط جریان روبه داخل است برای تعادل باید فشار رو به سمت بدنه کاهش پیدا کند.



تغییرات فشار روی جسم
دو بعدی در جریان ایدال

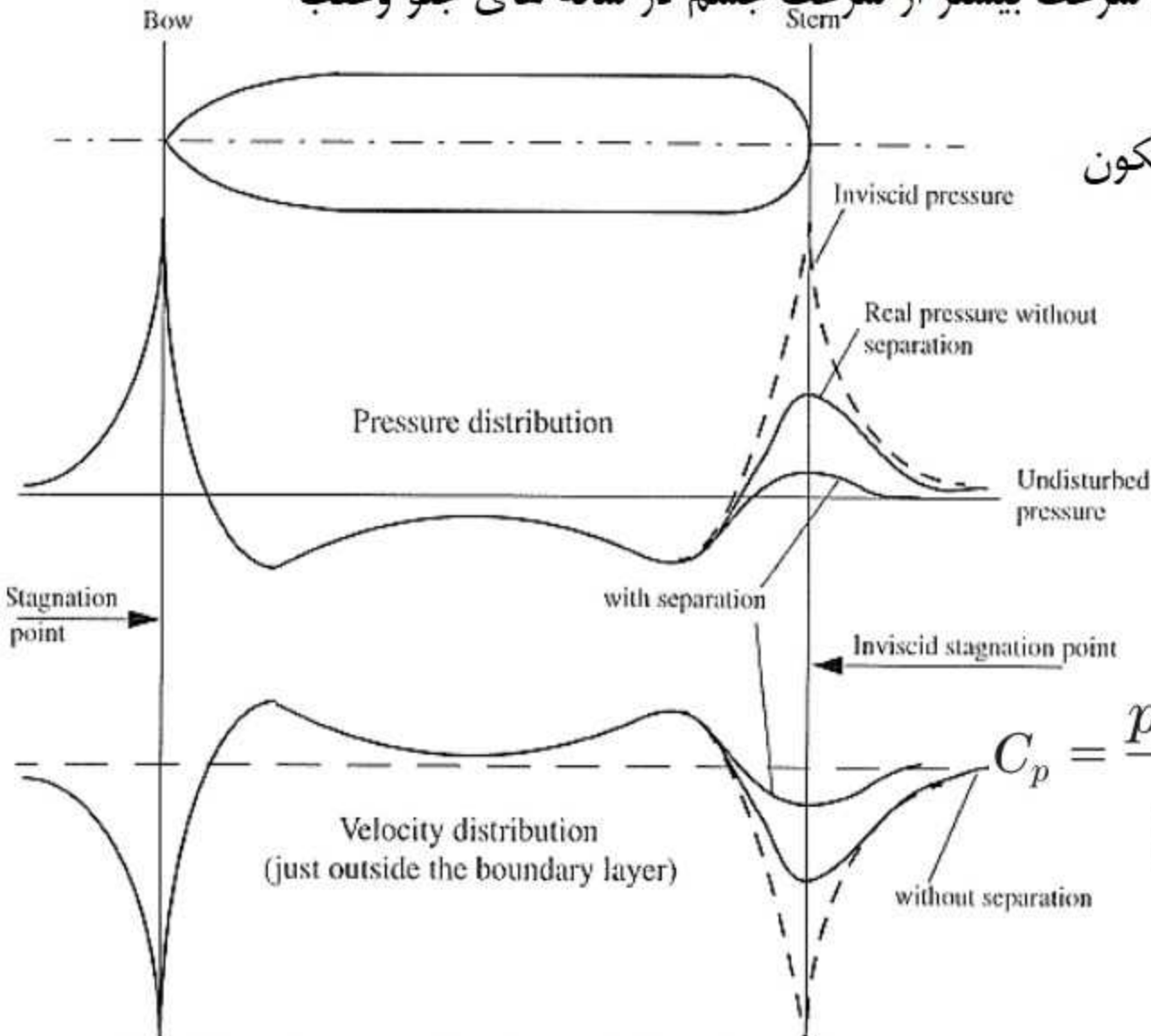
- در جریان غیرویسکوز طبق رابطه برنولی توزیع سرعت در راستای جسم عکس توزیع فشار است.
- سرعت پایین در سینه و پاشنه و سرعت بیشتر از سرعت جسم در شانه های جلو و عقب

- فشار هیدرودینامیکی در نقاط سکون

$$p_{\max} = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2$$

- ضریب فشار

$$C_p = \frac{p + \rho g z}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} = 1 - \frac{\nabla \phi \cdot \nabla \phi}{U_{\infty}^2}$$



توزیع فشار اطراف جسم دوبعدی در جریان ایدال و واقعی

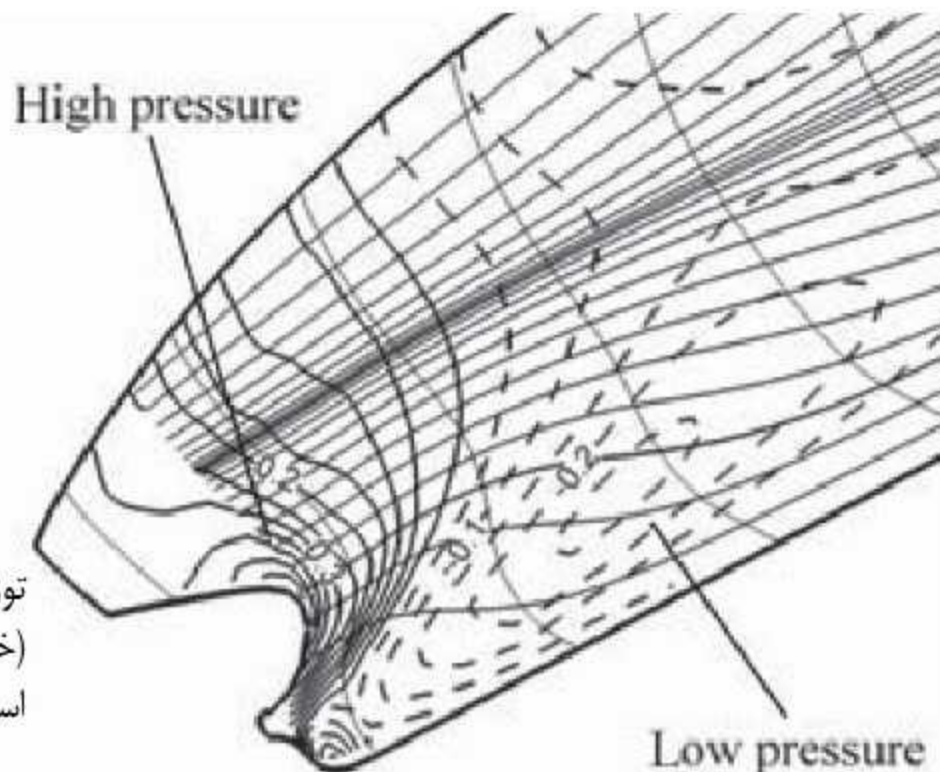
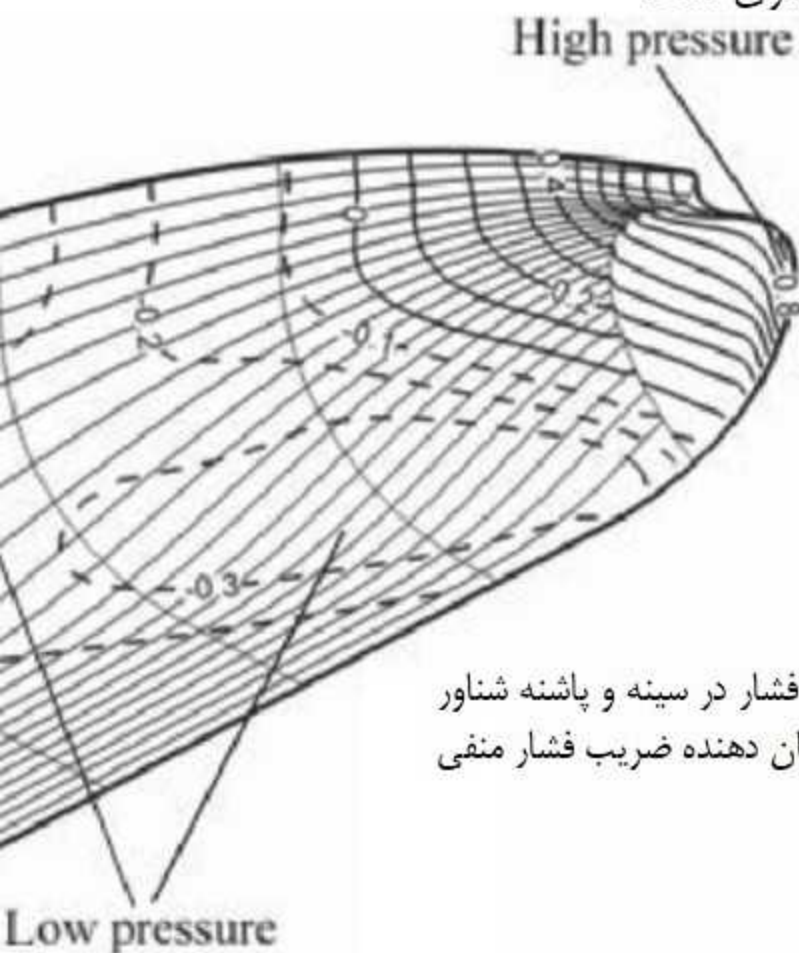


تغییرات فشار روی جسم سه بعدی

✓ انحنای سه بعدی بدنه باعث ایجاد گرادیان فشار در قسمت‌های مختلف بدنه می شود.

✓ انتگرال توزیع فشار روی بدنه در آب عمیق ایدال صفر است (تناقض دالامبر)

✓ انتگرال توزیع فشار روی بدنه در آب عمیق واقعی مقاومت ویسکوز فشاری است.



۳- امواج سطح آزاد

در شکل الگوی منظم موج کشتی مشاهده می شود. که می توان با مدل ریاضی آن را بیان کرد. درک پیش زمینه ریاضی تئوری موج به شناخت الگوی موج اطراف کشتی و ارتباط آن با شکل بدنه و در نتیجه طراحی بر مبنای حداقل مقاومت موجسازی کمک می کند.



• مشاهده خواهد شد که الگوی موج کشتی از دوبخش تشکیل شده است:

1. اغتشاشات میدان نزدیک (ناشی از تغییرات فشار اطراف بدنه)
2. سیستم موج منتشر شده تا فاصله معینی اطراف کشتی (موج کلوین)

سیستم موج منتشر شده (شامل امواج واگرا و عرضی) را می توان با فرض معتبر خطی بودن به صورت جمع چندین موج سینوسی در نظر گرفت. لذا آشنایی با تئوری موج خطی ضروری به نظر می رسد.

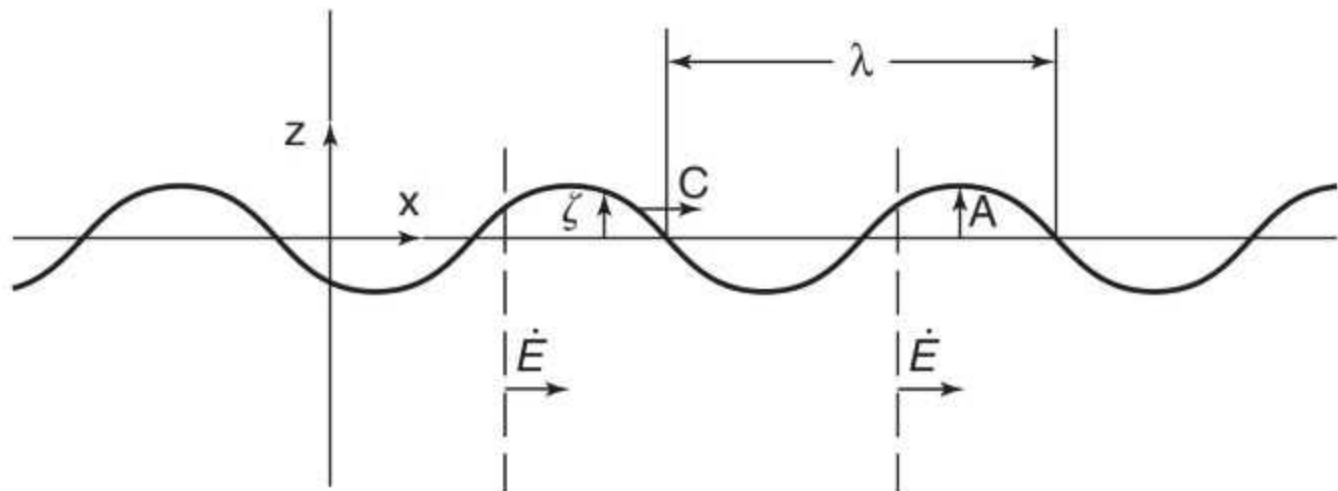
برای معتبر بودن اصل بر هم نهی باید هم معادله حاکم و هم شرایط مرزی خطی باشند.

✓ معادله حاکم لاپلاس است که خطی است.





- امواج اطراف کشتی را می توان به صورت ترکیبی از چند موج سینوسی در نظر گرفت.
- برای اینکه بتوان اثر چند موج را با هم جمع کرد باید شرایط مرزی خطی باشند.





موج سینوسی سطح آزاد

گام اول. تعیین شرط مرزی خطی سطح آزاد

- شرط مرزی دینامیک سطح آزاد (فشار روی سطح آزاد برابر فشار اتمسفر است) (برنولی)

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2g} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad \text{at } z = \zeta$$

- شرط مرزی سینماتیک سطح آزاد (جریان سیال از سطح آب جدا نمی شود)

$$w = d\zeta/dt \rightarrow \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \phi_x \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \phi_y \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \phi_z = 0 \quad \text{at } z = \zeta$$

- این شرایط مرزی غیرخطی اند



- با فرض اینکه نسبت دامنه موج به ارتفاع موج کوچک است شرایط مرزی خطی می شوند:
- شرط مرزی دینامیک سطح آزاد خطی

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{at } z = 0$$

- شرط مرزی سینماتیک سطح آزاد خطی

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \phi_z = 0 \quad \text{at } z = 0$$

- با ترکیب دو شرط

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \phi_z = 0 \quad (\text{شرط سطح آزاد کلوین})$$



گام دوم. تعیین پتانسیل سرعتی که معادله لاپلاس و شرط مرزی کلوین را ارضا کند.

$$\phi(x, z, t) = c \cdot A \cdot e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t)$$

انرژی جنبشی موج

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \frac{1}{2} \rho \int_0^\lambda dx \cdot \int_{-\infty}^\zeta \left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right) dz \\ &= \frac{1}{2} \rho \int_0^\lambda dx \cdot \int_{-\infty}^\zeta A^2 \frac{g^2}{c^2} \cdot \exp(2gz/c^2) dz = \frac{1}{4} \rho g A^2 \lambda \end{aligned}$$

• انرژی پتانسیل

$$E_{pot} = \int_0^\lambda dx \cdot \int_{-\infty}^\zeta \rho g z dz = \int_0^\lambda \frac{1}{2} \rho g \zeta^2 dx = \frac{1}{4} \rho g A^2 \lambda$$

• انرژی کل موج در حجم کنترل

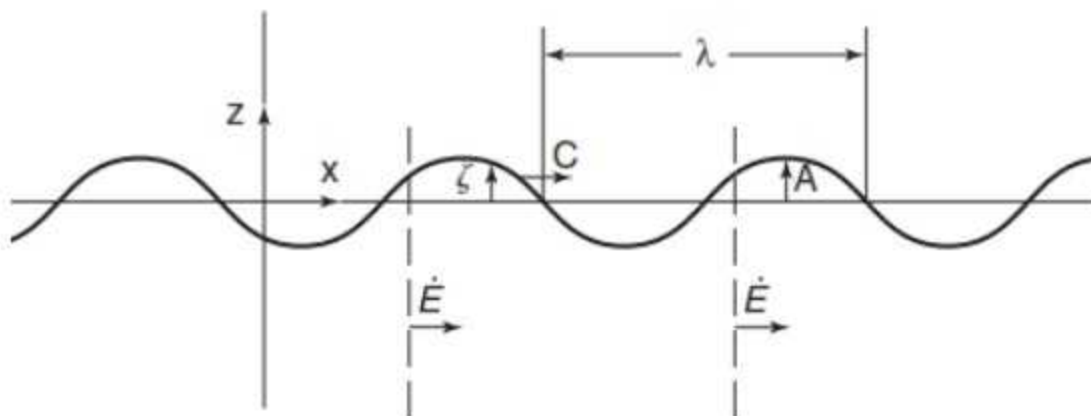
$$E_{wave} = \frac{1}{2} \rho g A^2 \lambda$$



- انرژی کل موج در حجم کنترل $E_{wave} = \frac{1}{2} \rho g A^2 \lambda$

- شار انرژی عبوری از مرز حجم کنترل = نرخ کار انجام شده توسط فشار هیدرودینامیکی

$$\dot{E} = \int_{-\infty}^{\xi} p_{hd} \cdot \phi_x dz \quad \Rightarrow \quad |\dot{E}| = \frac{1}{4} \rho g A^2 \cdot c$$



سرعت انتشار انرژی موج (سرعت گروهی) نصف سرعت انتشار موج (سرعت فازی) است.

$$c_g = |\dot{E}| / E = \frac{1}{2}c$$

• رابطه پراکندگی (Dispersion relation)

$$\omega^2 = gk \quad \longleftrightarrow \quad \lambda = \frac{2\pi c^2}{g}$$

$c = \lambda/T$





۴- امواج کشتی

امواج دوبعدی

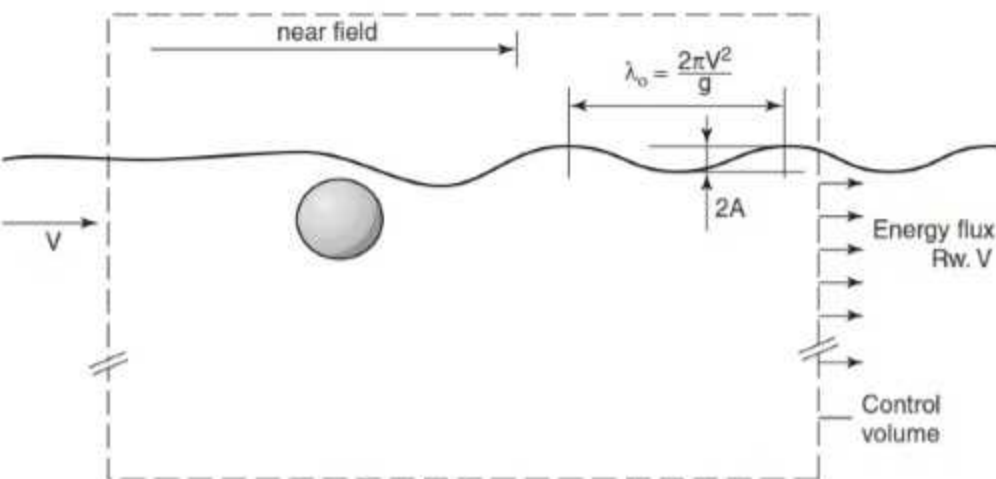
یک استوانه با سرعت V در نزدیکی سطح آزاد حرکت میکند. موجی در پشت استوانه تشکیل می شود که با جسم حرکت میکند. موقعیت هر نقطه از موج نسبت به جسم ثابت است یعنی سرعت فازی موج با سرعت جسم برابر است.

از رابطه پراکندگی طول موج به دست می آید

$$\lambda = 2\pi V^2/g = 2\pi F n^2 L$$

انرژی موج با سرعت گروهی یعنی نصف سرعت کشتی منتشر می شود. بنابر این از حجم کنترل متحرک (با سرعت V) از مرز پایین دست انرژی از رود با نرخ

$$E.V - \dot{E}$$



این اتلاف انرژی باید توسط جسم تامین شود در نتیجه

$$R_W = (E.V - \dot{E})/V = \frac{1}{4} \rho g A^2$$

• تنها مجهول دامنه موج A است.

امواج سه بعدی

در حالت سه بعدی جهت انتشار هم اهمیت پیدا می کند.

یک جسم متحرک در سطح آزاد می تواند در جهت های مختلف موج منتشر کند.

$$-\pi/2 < \theta < +\pi/2$$

امواج با زاویه انتشار کوچک که قله آنها عمود بر مسیر حرکت کشتی است را امواج عرضی می نامند.

امواج با زاویه انتشار بزرگ را امواج واگرا می نامند.

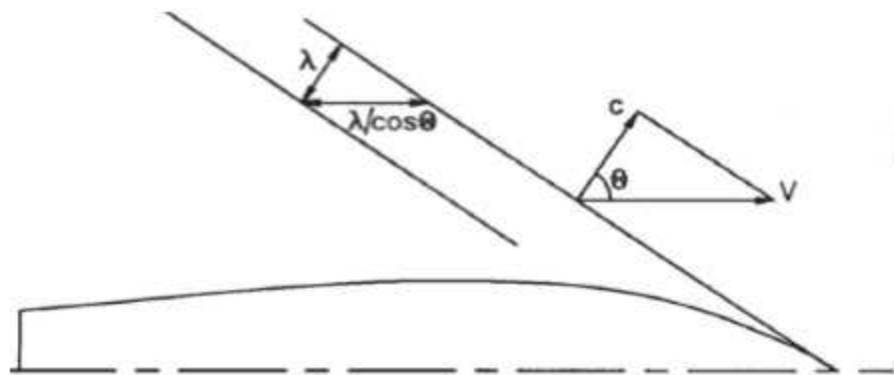
در الگوی موج کشتی واقعی مولفه های با زاویه $\theta = 60-70$ درجه نیز ممکن است مشاهده شود.

رابطه طول موج و جهت انتشار بر مبنای رابطه پراکندگی

$$\lambda(\theta) = 2\pi c^2/g = 2\pi F n^2 L \cos^2 \theta$$

بیشترین طول برای امواج عرض است (طول موج پایه)

$$\lambda_0 = 2\pi F n^2 L$$

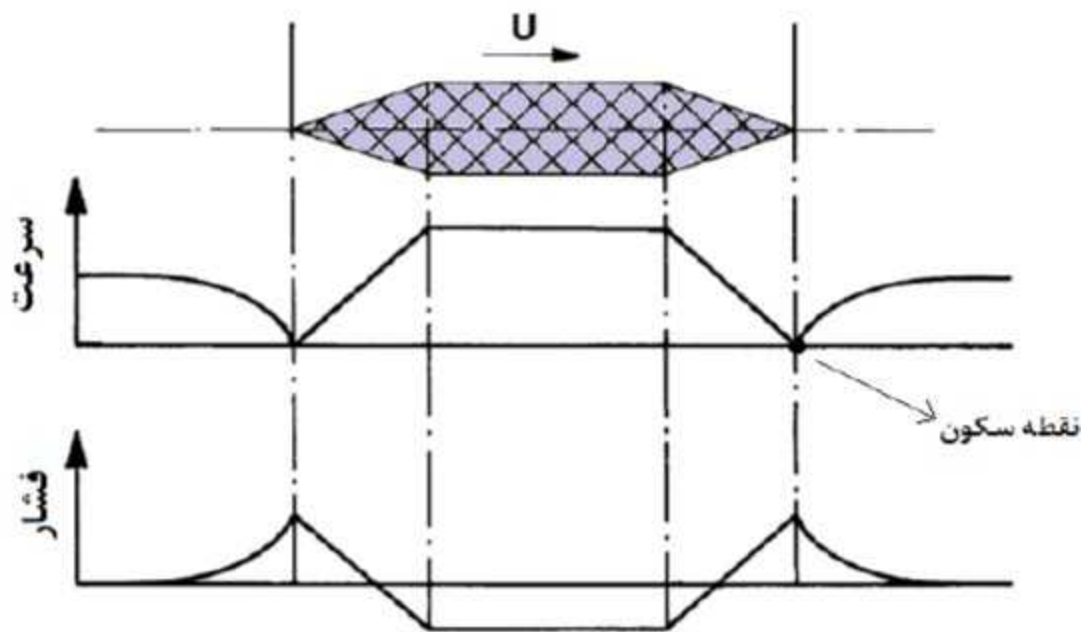






علت ایجاد امواج در اطراف کشتی

- علت اصلی ایجاد موج تغییرات فشار می باشد. در اثر حرکت کشتی (بدلیل انحنای بدنه کشتی) فشار در نقاط مختلف بدنه تغییر می کند.





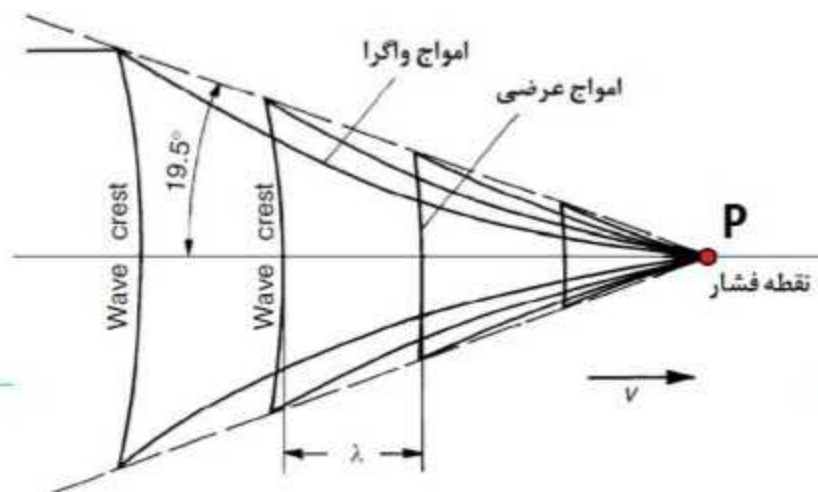
- هنگامی که بر روی بدنه کشتی در زیر آب فشار افزایش یابد. ارتفاع آب در آن نقطه افزایش می یابد (سطح آب دچار برآمدگی می شود) و بالعکس
- بدلیل پیوستگی ذرات آب با افزایش ارتفاع آب در یک نقطه؛ در اطراف آن قسمت ارتفاع آب کاهش می یابد. (سطح دچار فرورفتگی می شود) و بدین ترتیب قله و قعر موج ایجاد می شود و موج شکل می گیرد.





الگوی موج کلونین

- لرزد کلونین الگویی برای تولید موج به صورت زیر ارائه کرد :
- اگر یک نقطه فشار (مانند یک میله) در داخل آب حرکت داده شود در داخل آب دو نوع موج تولید می شود:
- ۱- موج عرض (Transverse wave): که قله و قعر آن بر راستای حرکت عمود است.
- ۲- موج واگرا (Divergent Wave): که به صورت واگرا از مسیر حرکت جسم دو می شود.

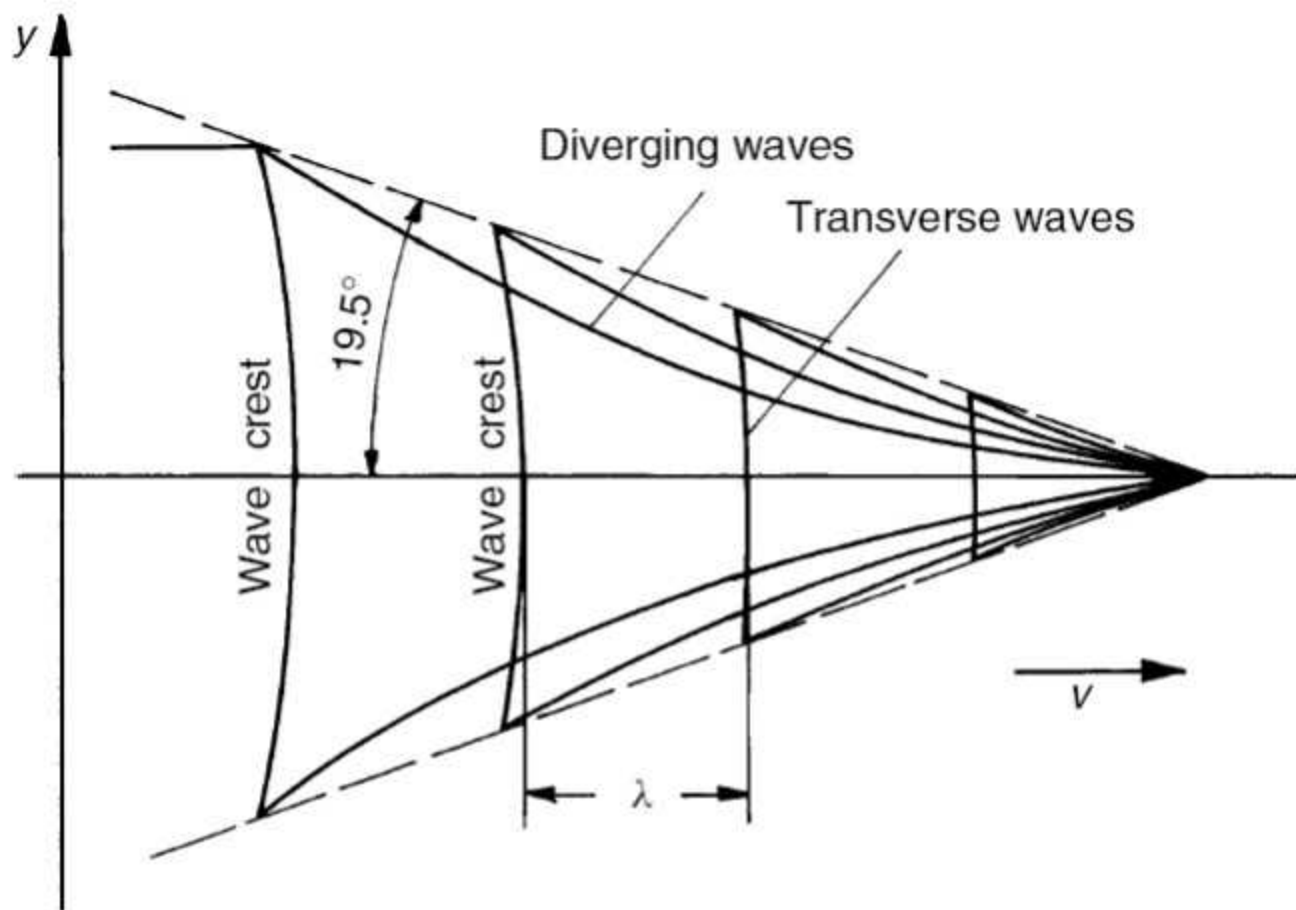


طول موج امواج تولید شده
بستگی به سرعت نقطه p دارد

$$\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}$$



موج ثانویه

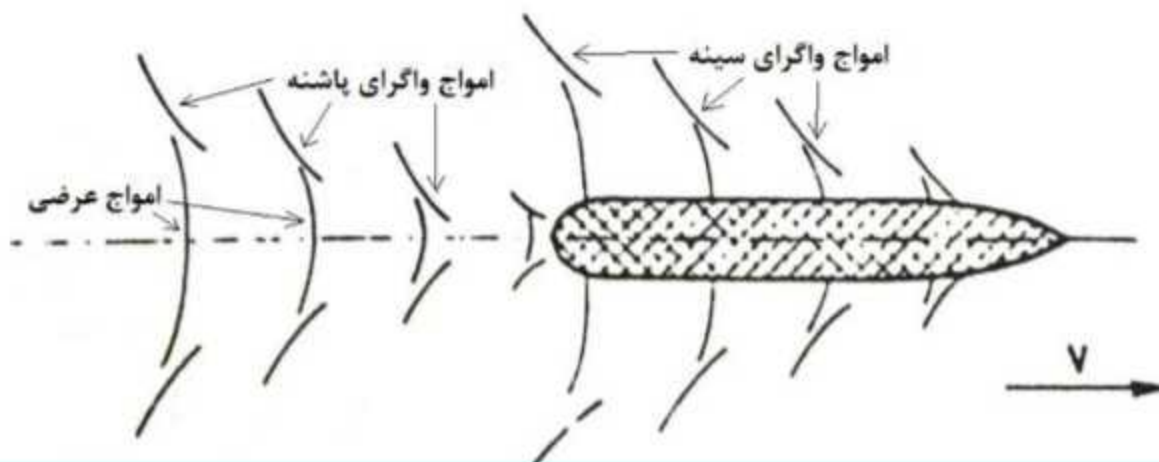






سیستم امواج کشتی

- سیستم امواج یک کشتی مشابه الگوی موج کلوین است. در قسمت سینه کشتی یک منطقه پر فشار وجود دارد. لذا یک سیستم امواج سینه بوجود می آید که شامل امواج عرضی و امواج واگرای می باشد. امواج واگرای سینه دارای زاویه $19/5$ درجه نسبت به راستای حرکت شناور می باشند. در قسمت پاشنه کشتی نیز یک منطقه پر فشار وجود دارد که منجر به تولید امواج عرضی و واگرای در پاشنه می شود. امواج واگرای پاشنه دارای زاویه $37/5$ درجه می باشند.





- موج پاشنه معمولاً ضعیف تر از موج سینه است به همین دلیل موج پاشنه را براحتی نمی توان مشاهده کرد زیرا با موج سینه ترکیب می شود. بنابراین سهم موج سینه در مقاومت موج سازی بیشتر از موج پاشنه است.
- اگر جسم در آب عمیق حرکت کند زاویه موج واگرا نسبت به مسیر حرکت برابر $19/5$ درجه می باشد. این زاویه بستگی به شکل جسم و سرعت آن ندارد و فقط به عمق وابسته است

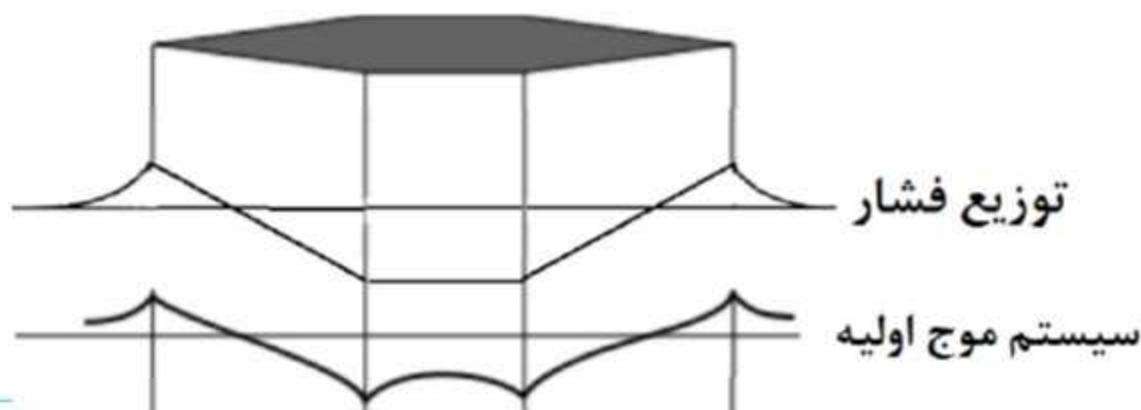
$$\frac{H}{\lambda} > \frac{1}{2} \Rightarrow \text{آب عمیق}$$

$$\frac{H}{\lambda} < \frac{1}{20} \Rightarrow \text{آب کم عمق}$$

- هرچه عمق آب کمتر شود. زاویه موج واگرا بیشتر می شود بطوریکه در آب کاملاً کم عمق این زاویه به 90 درجه نزدیک می شود.

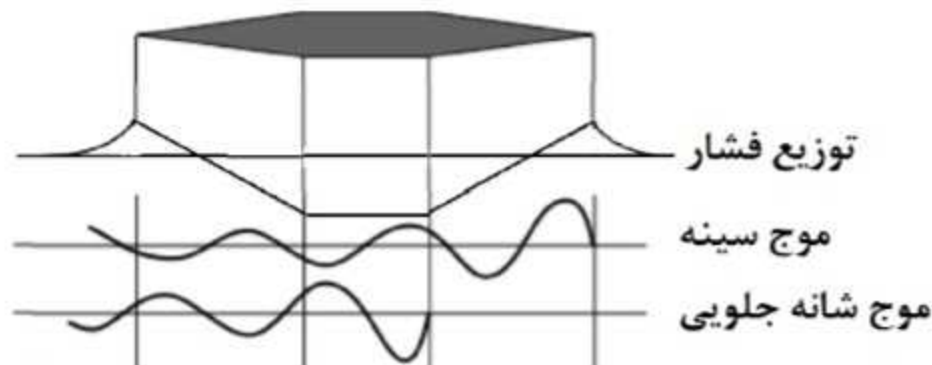


- سیستم امواج کشتی شامل دو سیستم امواج می باشد.
- ۱- سیستم امواج اولیه (Primary wave system)
- ۲- سیستم امواج ثانویه (Secondary wave system)
- سیستم امواج اولیه: اغتشاش اولیه سطح آب ناشی از توزیع فشار اطراف بدنه کشتی که از رابطه برنولی بدست می آید را سیستم امواج اولیه می نامند.
- این سیستم موج کاملا متقارن است.



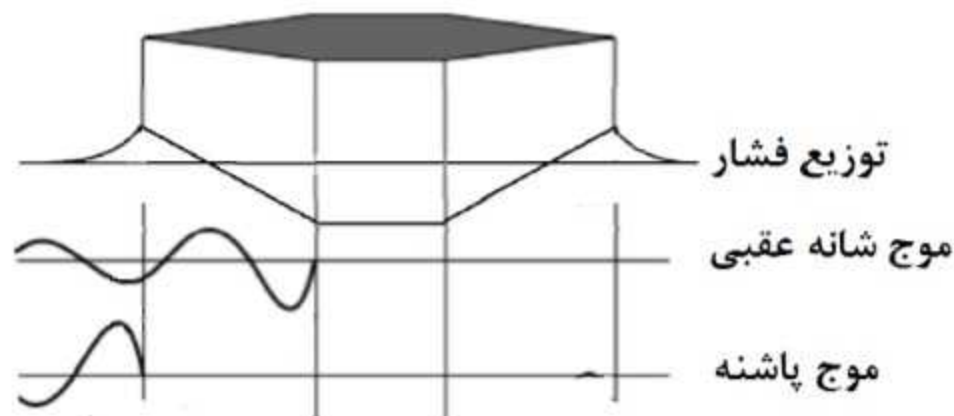


- **سیستم امواج ثانویه:** سیستم امواج تولید شده در قسمت سینه؛ پاشنه و شانه ها را سیستم امواج ثانویه می نامند و دارای چهار مولفه می باشد.
- ۱- امواج سینه (**Bow waves**): موج ایجاد شده در ناحیه سینه شناور که بدلیل **فشار مثبت** با **قله موج** شروع می شود.
- ۲- امواج شانه جلوئی (**Forward shoulder waves**): موج ایجاد شده در ناحیه شانه جلویی شناور که بدلیل **فشار منفی** با **قعر موج** شروع می شود.





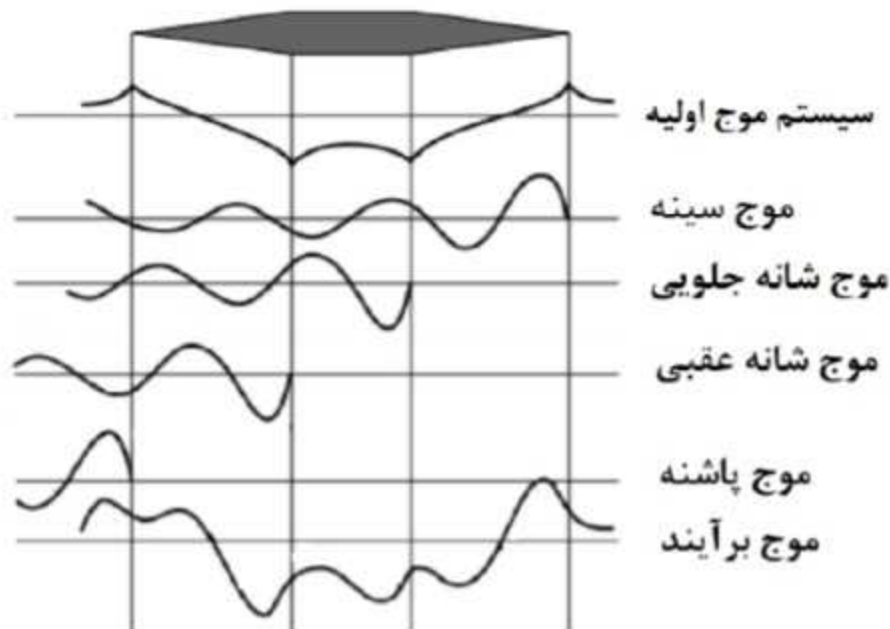
- ۳- امواج شانه عقبی (**Aft shoulder waves**) : موج ایجاد شده در ناحیه شانه عقبی شناور که بدلیل **فشار منفی** با **قعر موج** شروع می شود
- ۴- امواج پاشنه (**Stern waves**) : موج ایجاد شده در ناحیه پاشنه شناور که بدلیل **فشار مثبت** با **قله موج** شروع می شود.





برآیند سیستم امواج کشتی

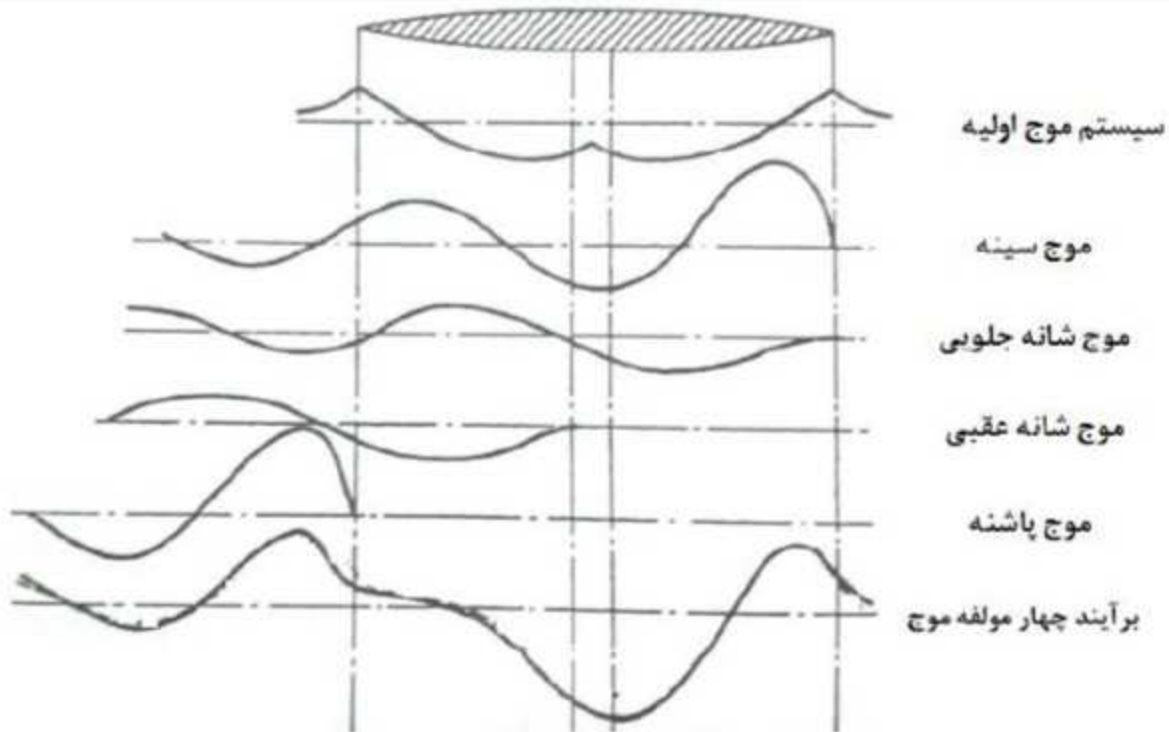
- با ترکیب سیستم امواج اولیه و چهار مولفه امواج ثانویه کشتی؛ برآیند موج ها بدست می آید که نشان دهنده موج نهایی تولید شده در اطراف بدنه کشتی می باشد.
- سیستم امواج شکل ساده:



مشاهده می شود که ارتفاع امواج در نقاط مختلف فرق می کند اما طول امواج تقریباً یکسان است. زیرا طول موج بستگی به سرعت دارد و سرعت در همه نقاط بدنه یکسان است.

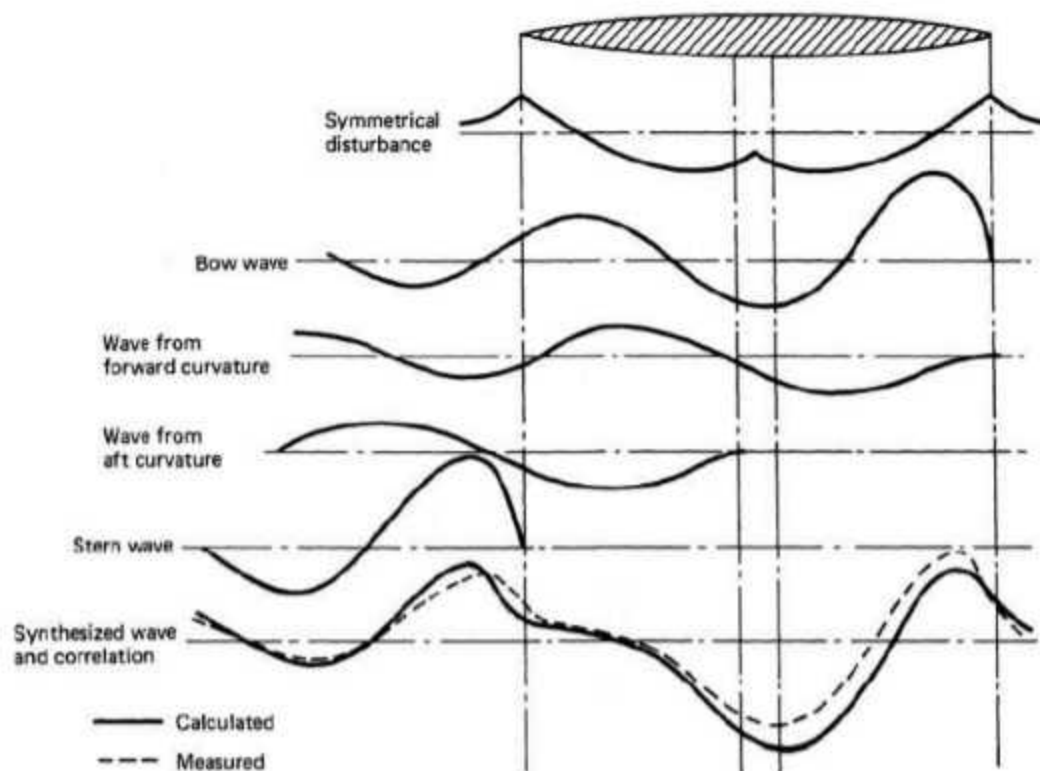


- سیستم امواج برای شکل های که کاملاً شبیه بدنه کشتی اند:



- به ترکیب موج سینه و موج شانه جلویی **موج ناحیه سینه** می گوئیم. موج سینه با قله شروع می شود ولی موج شانه جلویی با قعر شروع می شود اما از آنجا که موج سینه قوی تر است. در نتیجه **موج ناحیه سینه با قله شروع می شود.**

- به ترکیب موج پاشنه و موج شانه عقبی **موج ناحیه پاشنه** می گوئیم. موج پاشنه با قله شروع می شود ولی موج شانه عقبی با قعر شروع می شود اما از آنجا که موج شانه عقبی قوی تر است. در نتیجه **موج ناحیه پاشنه با قعر شروع می شود.**





تداخل امواج سینه و پاشنه

- اگر ارتفاع موج سینه H_f و ارتفاع موج پاشنه H_a باشد و اختلاف فاز بین این دو موج ϕ باشد؛ ارتفاع موج برآیند از رابطه زیر بدست می آید:

- $$H^2 = \underbrace{H_f^2 + H_a^2}_M + \underbrace{2H_f H_a \cos(\phi)}_N$$

- $$H^2 = M + N \cos(\phi)$$

- اگر موج سینه و پاشنه هم فاز باشند:

- $$\phi = 0$$

- $$H^2 = M + N \cos(0) = M + N$$

هم فاز بودن تداخل امواج سینه و پاشنه (یعنی موج سینه با قعر به موج پاشنه که با قعر شروع می شود می رسد) باعث می شود که ارتفاع موج برآیند بیشتر شود و باعث افزایش مقاومت می شود به این حالت یک **تداخل نامطلوب** گفته می شود.



- اگر موج سینه و پاشنه غیر هم فاز باشند:

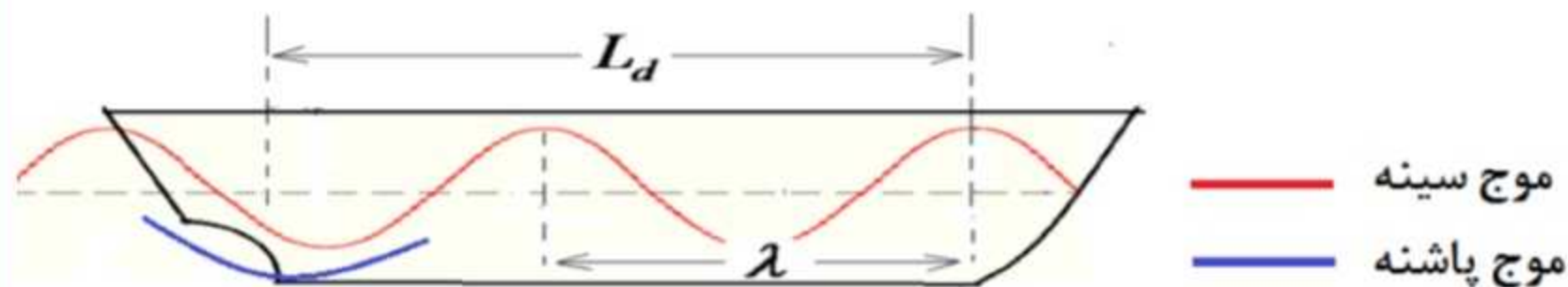
- $\phi = 180$

- $H^2 = M + N \cos(180) = M - N$

غیر هم فاز بودن تداخل امواج سینه و پاشنه (یعنی موج سینه با قله به موج پاشنه که با قعر شروع می شود می رسد) باعث می شود که ارتفاع موج برآیند کاهش یابد و باعث کاهش مقاومت می شود به این حالت یک **تداخل مطلوب** گفته می شود

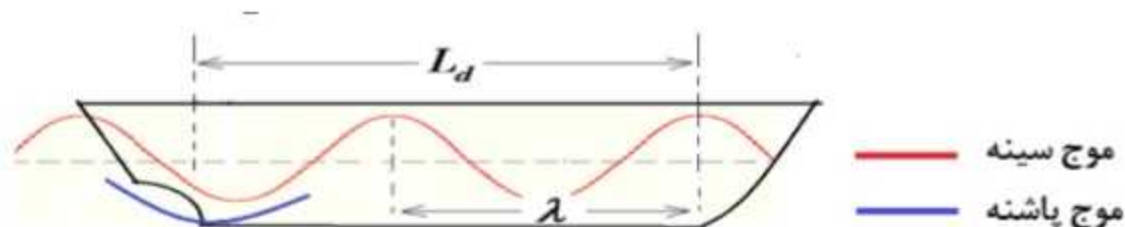


- فرض کنید فاصله بین اولین قله موج سینه و قعر پاشنه برابر L_d باشد و این فاصله ضربی از نصف طول موج $(\frac{\lambda}{2})$ باشد.



- $$L_d = K \frac{\lambda}{2}$$

- $L_d = K \frac{\lambda}{2}$



- اگر K عددی فرد باشد قعر موج سینه به پاشنه خواهد رسید و با قعر موج پاشنه تداخل نامطلوب را ایجاد خواهد کرد و در نتیجه مقاومت افزایش می یابد. به این حالت در منحنی مقاومت **Hump** گفته می شود.
- اگر K عددی زوج باشد قله موج سینه به پاشنه خواهد رسید و با قعر موج پاشنه تداخل مطلوب را ایجاد خواهد کرد و در نتیجه مقاومت کاهش می یابد. به این حالت در منحنی مقاومت **Hollow** گفته می شود.



- با انجام آزمایش بر روی شناورهای مختلف اعداد زیر بدست آمده است:

- برای شناورهای تجاری $L_d = 0.72L$

- برای شناورهای نظامی $L_d = 0.9L$

- پس:

- $L_d = \beta L = k \frac{\lambda}{2}$

- $\frac{\lambda}{L} = \frac{2\beta}{k} \quad (۱)$





- از رابطه طول موج داریم:

- $\lambda = \frac{2\pi v^2}{g}$

- با تقسیم طرفین بر L :

- $\frac{\lambda}{L} = \frac{2\pi v^2}{gL}$

(۲)

تعریف: عدد فرود به صورت نسبت نیروی اینرسی به نیروی جاذبه تعریف می شود:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{Lg}} \quad (۳)$$

- پس با توجه به (۲): (۳)

- $\frac{\lambda}{L} = \frac{2\pi v^2}{gL} = 2\pi F_n^2$



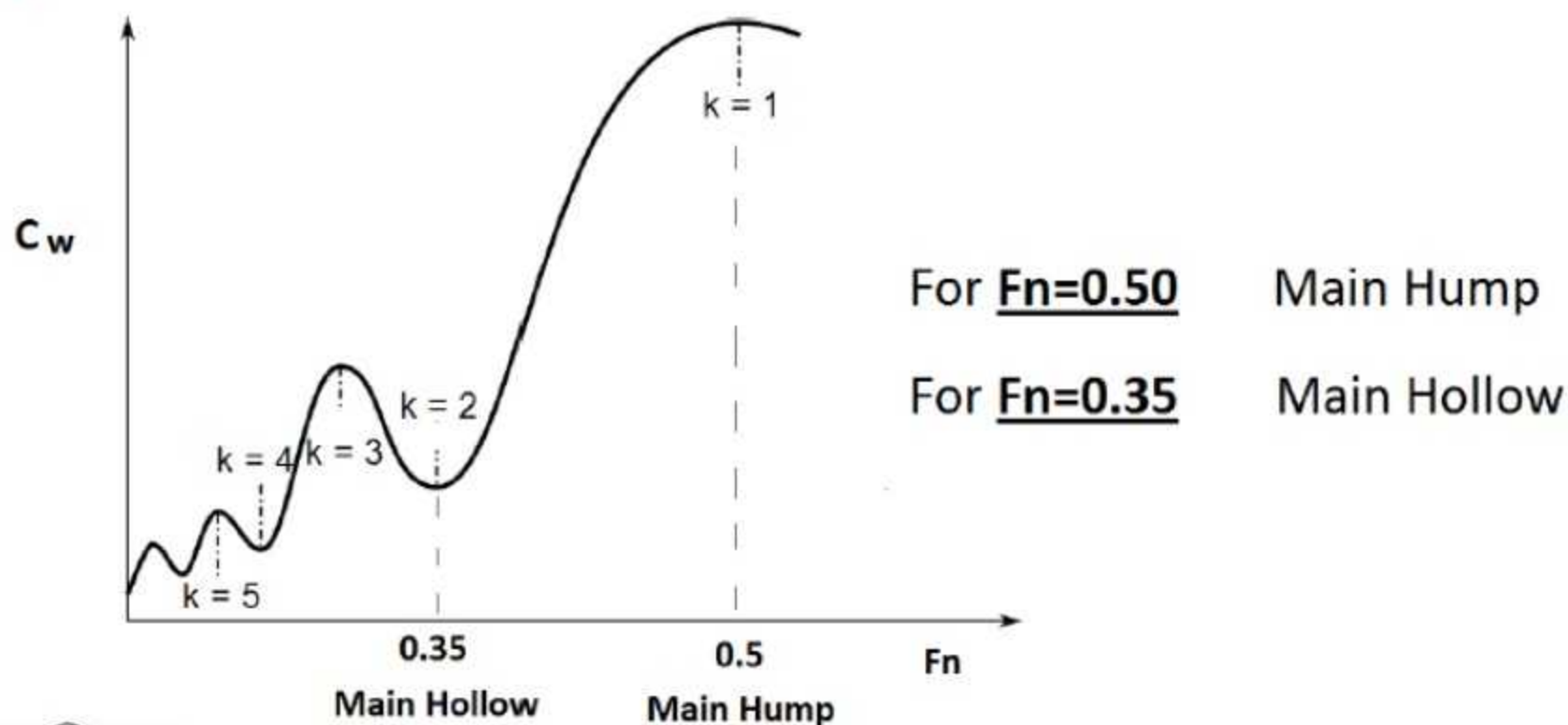
- با توجه به رابطه (۲) و (۳):

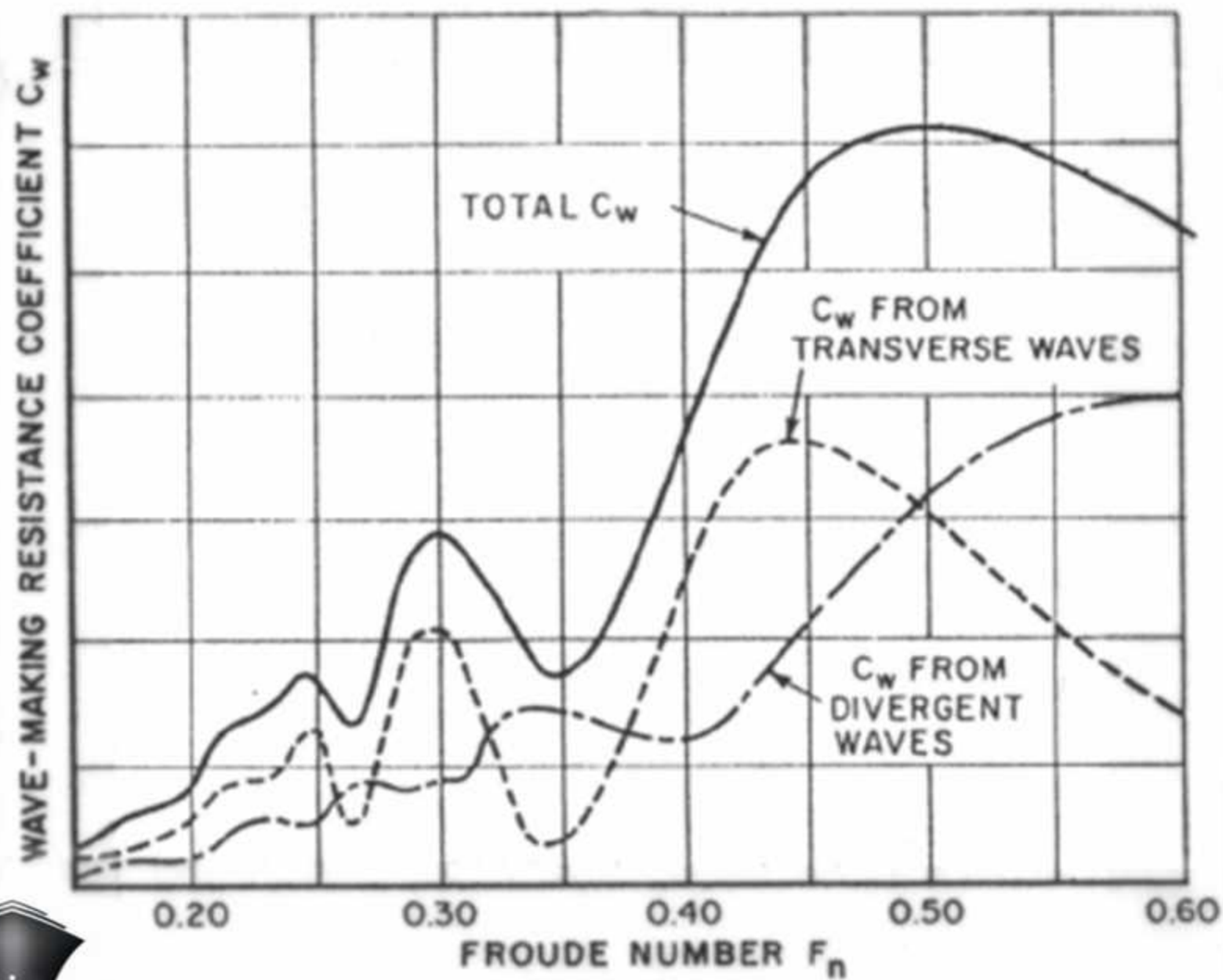
$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda}{L} &= \frac{2\beta}{k} \\ \frac{\lambda}{L} &= 2\pi F_n^2 \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{2\beta}{k} = 2\pi F_n^2 \rightarrow F_n = \sqrt{\frac{\beta}{\pi k}}$$

- با توجه این رابطه می توان مشخص کرد در شناورهای مختلف به ازاء اعداد فرود مختلف، مقاومت چگونه تغییر می کند.

نوع شناور	$\frac{k}{\beta}$	1	2	3	4	5	6
تجاری	0.72	0.48	0.34	0.28	0.24	0.21	0.20
نظامی	0.90	0.54	0.38	0.31	0.27	0.24	0.22
		Hump	Hollow	Hump	Hollow	Hump	Hollow

- اگر منحنی ضریب مقاومت موج سازی را بر حسب عدد فرود رسم کنیم؛ مشاهده می شود که این منحنی کاملاً نوسانی می باشد.





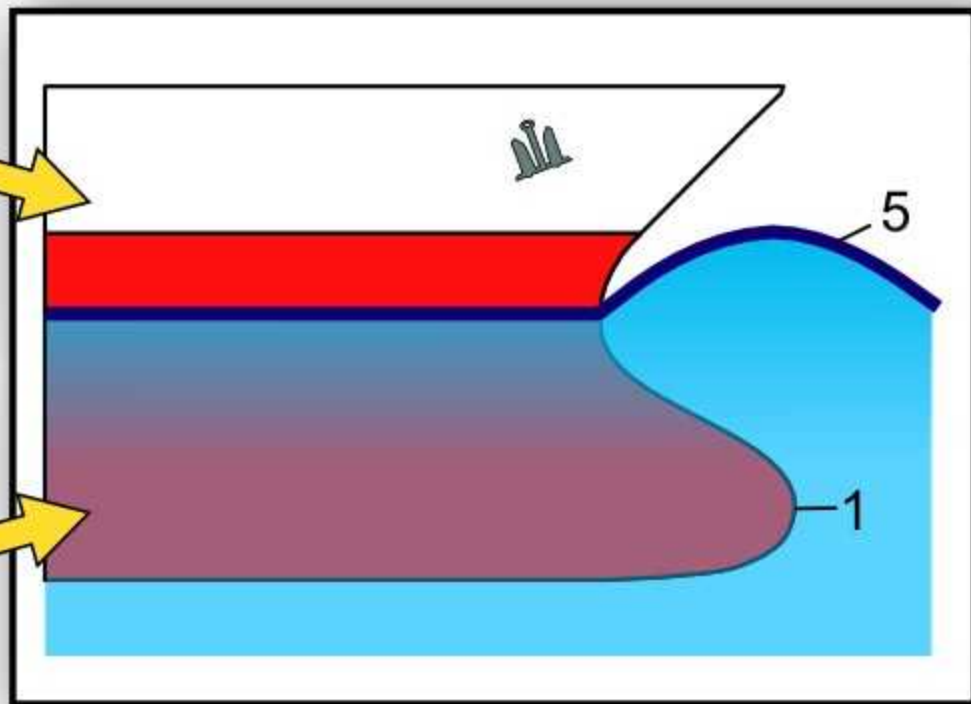
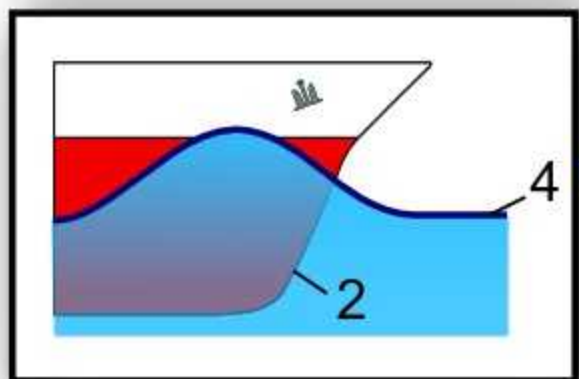
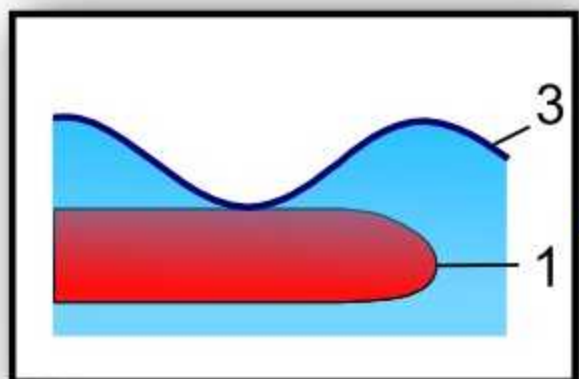
- در عدد فرود 0.5 بیشترین مقاومت موج و در عدد فرود 0.35 کمترین مقاومت موج را داریم بنابراین سعی می شود کشتی های تجاری و نظامی در عدد فرود 0.35 طراحی شوند.
- از آنجا که عدد فرود در مقاومت موج تاثیر دارد و عدد فرود تابعی از سرعت و طول شناور است. بنابراین می توان با انتخاب مناسب طول و سرعت، کشتی را به گونه ای طراحی کرد که مقاومت کمتری داشته باشد.
- **اثر شکل بدنه بر مقاومت موج سازی:** شکل بدنه بر ارتفاع موج تولید شده تاثیر مستقیم دارد و از آنجا که مقاومت موج با مجذور ارتفاع موج متناسب است؛ شکل بدنه می تواند بر مقاومت موج سازی بسیار موثر باشد. همچنین شکل بدنه می تواند بر شکست امواج و در نتیجه مقاومت موج اثر بگذارد.





۵- اثرات حبابی سینه بر مقاومت موج

- مقاومت موج: ۱- موج سازی ۲- شکست موج
- کاهش ارتفاع موج سینه
- جلوگیری از حد بحرانی و جلوگیری از شکست موج
- - آب عمیق :
$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{2}$$
- - آب کم عمیق :
$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{10}$$
- شکست موج و مومنوم حاصل از آن در کنار بدنه = افزایش مقاومت
- اغتشاش و چرخش جریان در کنار بدنه = افزایش مقاومت
- اهمیت زیاد در کشتی های نظامی: ملاحظات سوناری





- در کشتی های تندرو مانند ناوشکن ها و کشتی های مسافربری بالبوس باعث بهبود تولید موج در نقاط مختلف طول بدنه می شود و بالبوس در این نوع شناورها باعث کاهش مقاومت موج سازی می شود.

- از طرفی بالبوس با همین شکل در سوپر تانکر ها نیز نصب می شود و موارد تجربی نشان می دهد که باعث افزایش ارتفاع موج شده ولی در مجموع باعث کاهش مقاومت موج سازی می شود. علت آن است با افزایش ارتفاع موج طول موج نیز افزایش یافته و باعث کاهش شکست موج می گردد.







۶- روش های محاسبه مقاومت موج سازی شناور

- روش های محاسبه مقاومت موج سازی شناور به دو دسته تقسیم می شوند:
- ۱- روش اول: جریان اطراف بدنه و همچنین توزیع فشار ناشی از آن بدست آورده می شود سپس با روش های خاص مقاومت موج سازی محاسبه می گردد. **مثلا روش انتگرال میشل**
- ۲- روش دوم: با توجه به شکل امواج تولید شده در اطراف بدنه کشتی؛ انرژی لازم برای تولید و پابرجا ماندن این امواج محاسبه شده و در نهایت مقاومت موج سازی محاسبه می شود.

روش های فوق دارای محدودیت کاربرد است. به عنوان مثال انتگرال میشل برای بدنه های لاغر و کشتی های Wall sided مناسب اند و برای سایر حالات دارای خطای بسیار است.





$$R_w = \frac{1}{2} \pi \rho V^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta$$

که البته موج در آن میرا نمی‌گردد، $A(\theta)$ دامنه موج می‌باشد و با توان ۲ در انتگرال مؤثر است.

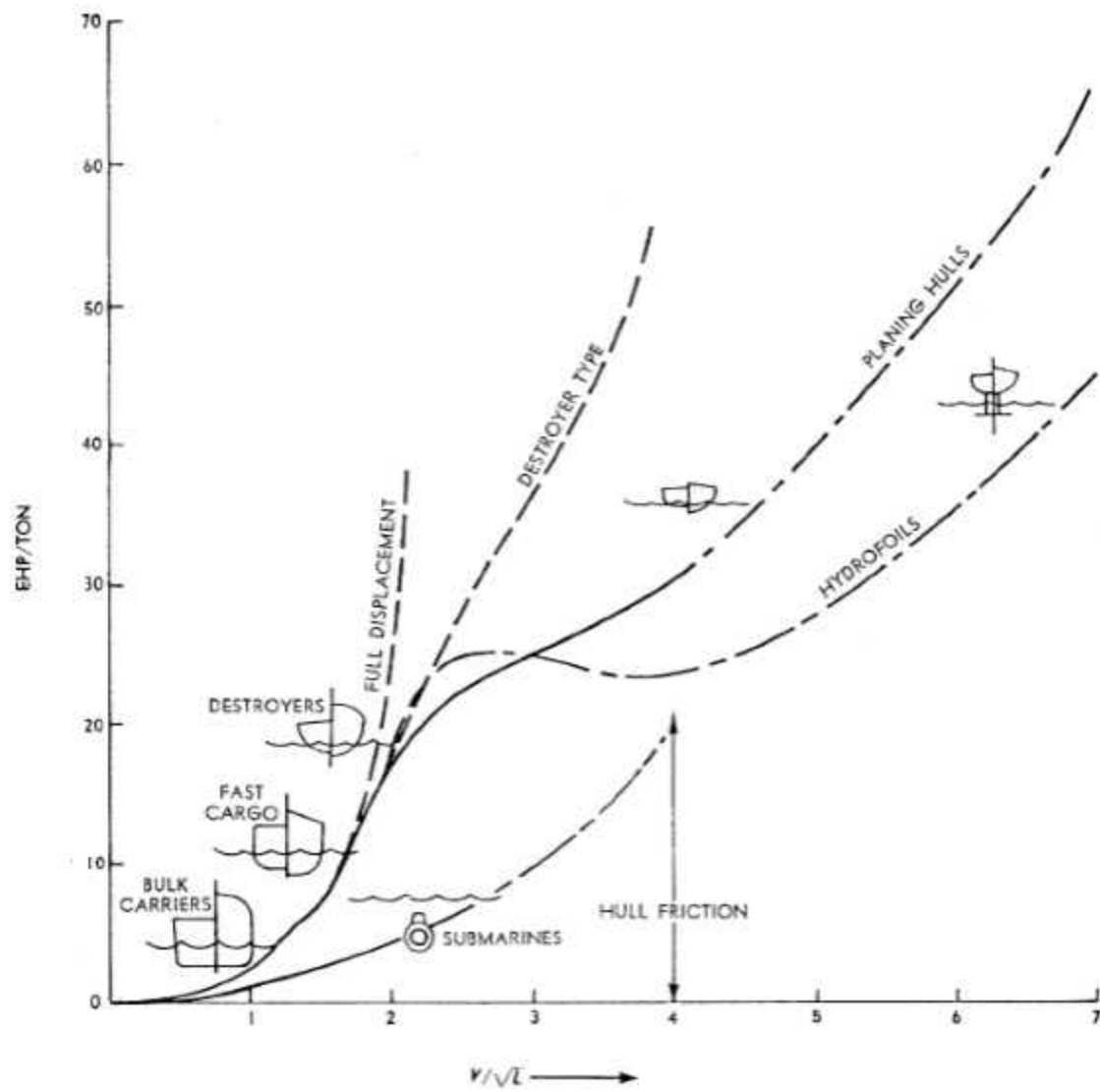
عامل $\cos^3 \theta$ نشان می‌دهد که عامل مهم در مقاومت موج‌سازی، موج‌های عرضی (Transverse waves) هستند.

$R_w \sim V^2 A^2$ و از طرفی $A \sim V$ (حداقل)، بنابراین می‌توانیم نتیجه بگیریم: $R_w \sim V^4$ (یا توان‌های بالاتر).

یعنی مقاومت موج‌سازی می‌تواند با توان ۴ سرعت حرکت شناور متناسب باشد. از طرفی می‌دانیم که مقاومت

اصطکاکی با توان ۲ سرعت تغییر می‌کند، لذا به راحتی می‌توان درک نمود که در سرعت‌های بالا (یا اعداد فرود بالا)،

مقاومت موج‌سازی بر مقاومت اصطکاکی غالب است.





روش انتگرال میشل

Michel در سال ۱۹۸۹ روش تحلیلی زیر را برای محاسبه $A(\theta)$ و مقاومت شناور ارائه کرد

که فرض اساسی آن «بدنه باریک بودن شناور» (thin ship theory) بود و عرض نسبت به طول خیلی کوچکتر بود. این انتگرال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_w = \frac{4g^2}{\pi V^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sec^3 \theta \left[\iint \frac{\partial \zeta}{\partial x} \exp \left[\left(\frac{g}{V^2} \right) \sec^2 \theta (y - ix \cos \theta) \right] dx dy \right]^2 d\theta$$

که در آن $\zeta(x, y)$ نیم عرض صفحه آبخور در هر مقطع از طول شناور است. حل کردن این انتگرال چندگانه کار ساده‌ای نیست هر چند که روش‌های عددی بسیاری اقدام به حل آن نموده‌اند و از آن هم برای بدنه شناور واقعی و هم برای بدنه شبیه‌سازی شده ریاضی استفاده شده است.

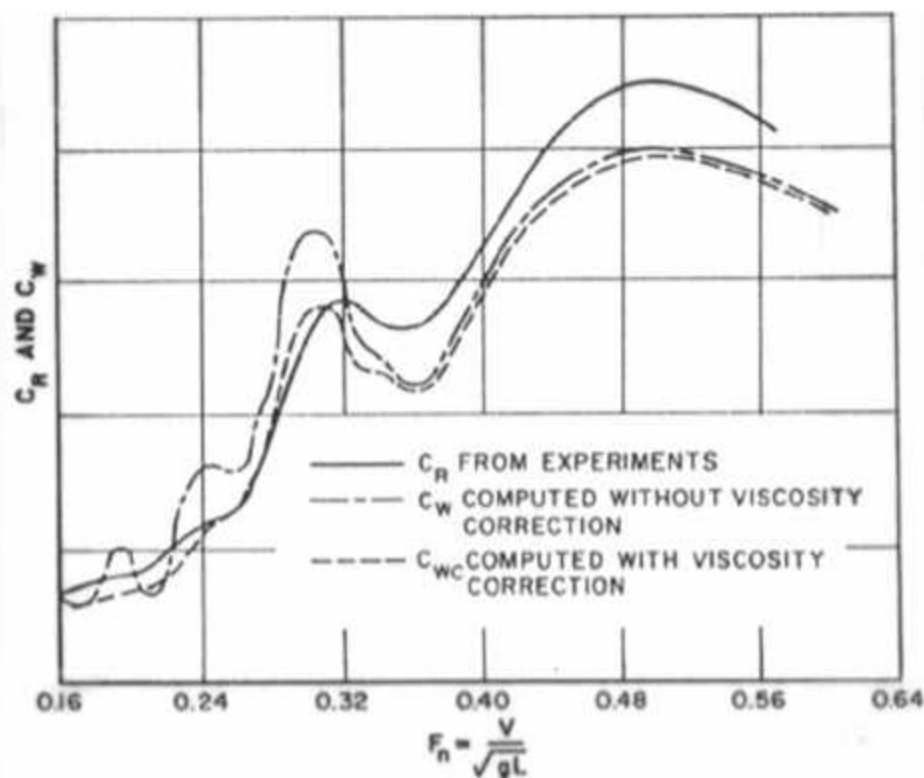


نمودار C_w محاسباتی تغییرات و نوسانات بیشتری از C_w تجربی دارد. این تفاوت ناشی از ۳ پارامتر زیر است:

۱- خطاهای ناشی از ساده‌سازی بیان شده در تحلیل محاسباتی

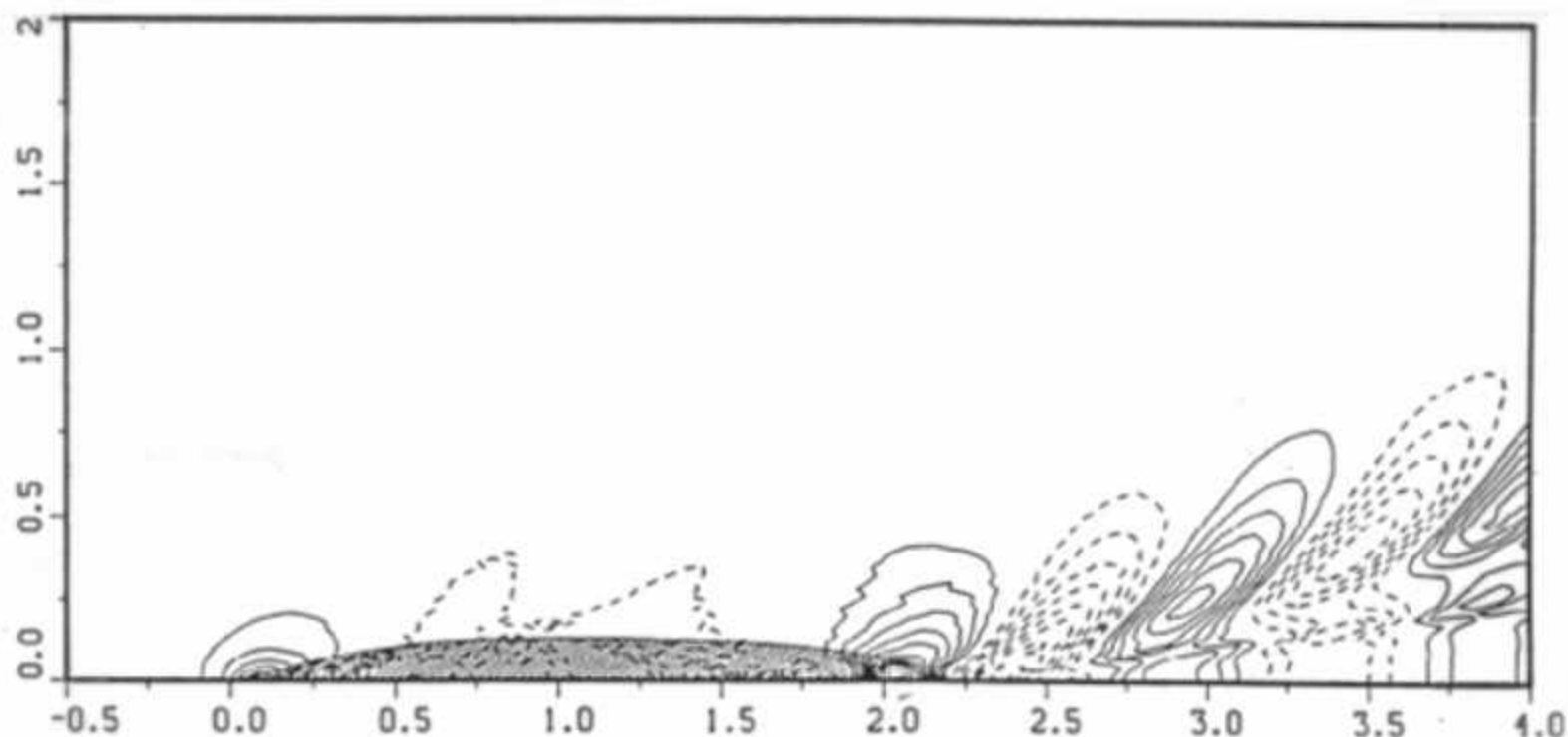
۲- خطاهای ناشی از صرف‌نظر کردن از اثرات ویسکوزیته بر مقاومت موج‌سازی

۳- خطاهای ناشی از اثرات حرکت موج بر مقاومت اصطکاکی





مطالعات عددی اخیر در مورد مقاومت موج‌سازی، از فرضیات کشتی باریک دور است و از روش چشمه و چاه استفاده می‌کند با این تفاوت که بدنه ایجاد شده با چشمه و چاه، با بدنه کشتی واقعی متفاوت است که البته با اصلاحاتی قابل رفع است. نتایج این روش برای یک کشتی با $F_n = 0.28$ در شکل ارائه شده است.



۷- ارتباط مقاومت موج سازی و ارتفاع موج

$$h^2 = h_f^2 + h_a^2 + 2h_f h_a \cdot \cos(\varepsilon)$$

$$h^2 = M + N \cos(\varepsilon)$$

$$\varepsilon = 0 \rightarrow h^2 = M + N \rightarrow \text{Hump}$$

$$\varepsilon = \pi \rightarrow h^2 = M - N \rightarrow \text{Hollow}$$

$$R_w \propto h^2$$





تخمین ارتفاع موج سینه (فرمول KENT)

$$h = k \cdot \frac{B \cdot V^2}{L_E}$$

که B عرض، L_E طول مؤثر (بر حسب فوت) و V سرعت حرکت شناور (بر حسب گره) می باشد. مقدار $k=0.083$ در نظر گرفته شود. این مقدار k برای کشتی های تجاری معمولی و بدون حبابی سینه صادق است.

عوامل دیگری که می توانند در ارتفاع موج مؤثر باشند و در این رابطه در نظر گرفته نشده اند عبارتند از:

- زاویه ورودی صفحه آبخور

- توپر یا توخالی بودن شکل صفحه آبخور در محل ورودی سینه

- انحنای به سمت بیرون سینه (flare)

- شیب قسمت سینه شناور (rake)



مطالعات بعدی نشان داد که مقدار k می‌تواند محدوده زیر را داشته باشد:

$$k=0.015-0.13$$

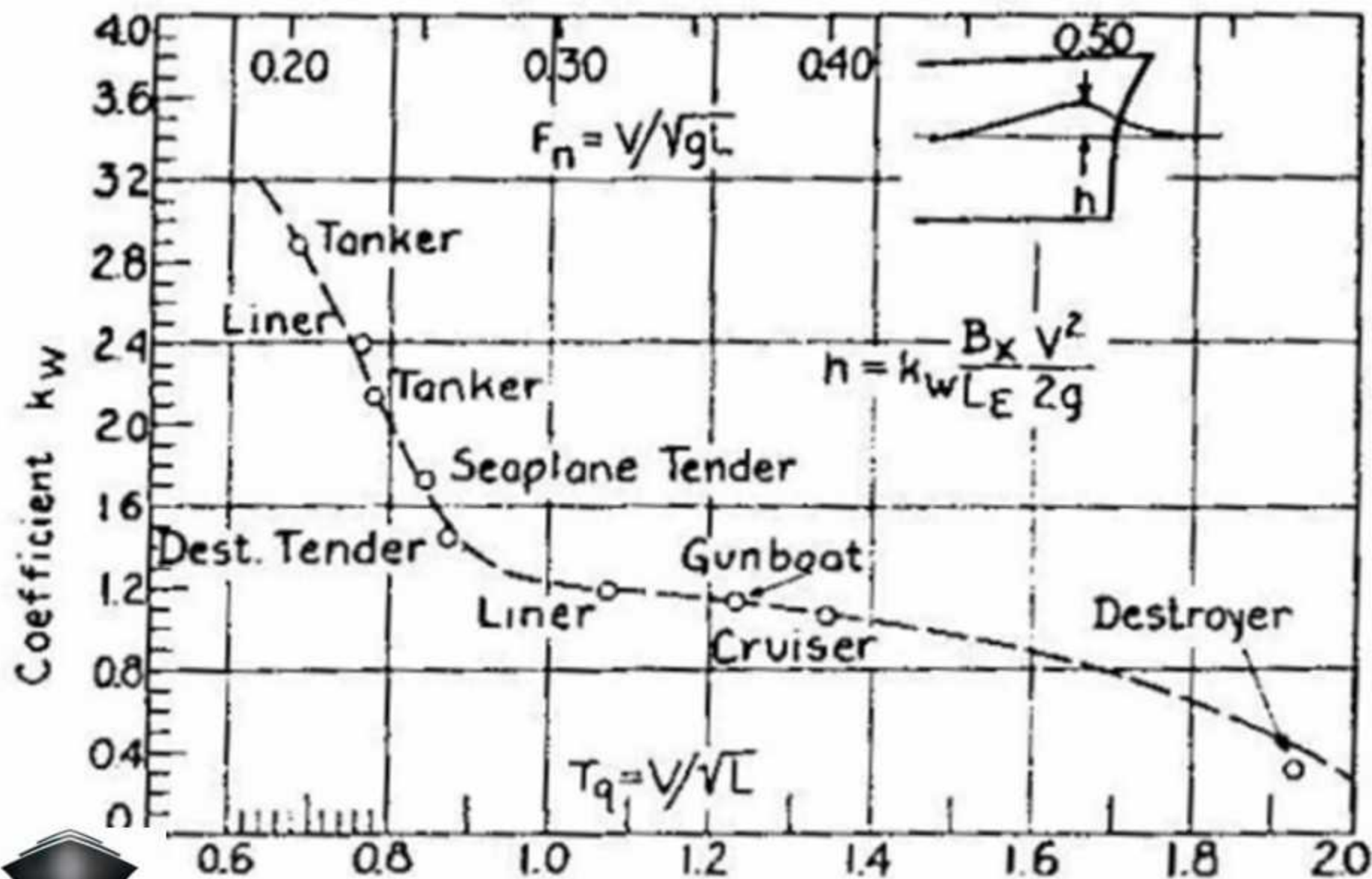
kent برای اینکه فرمول (۱) را بتوان برای هر واحد (انگلیسی یا SI) استفاده کرد، رابطه زیر را ارائه نمود:

$$h = k_w \left(\frac{B_x}{L_E} \right) \cdot \frac{1}{w} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \right) V^2 = k_w \left(\frac{B_x}{L_E} \right) \frac{V^2}{2g}$$

محدوده $k_w = 0.3 - 3$ است که مقادیر k_w در نمودار زیر ارائه شده است. این فرمول برای شناورهای کندرو

(جابجایی) صادق است. این نمودار بر حسب مقادیر F_n, T_q ، $(F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}})$ و $(T_q = \frac{V}{\sqrt{L}})$ برای محاسبه k_w

ارائه شده است.





به طور مثال برای یک کشتی باربری به عرض ۷۳ فوت و طول ۲۶۲/۶۵ فوت و سرعت ۲۰/۵ گره، ارتفاع موج

سینه برابر است با:

$$h = k_w \left(\frac{B_x}{L_E} \right) \cdot \frac{V^2}{2g} = 1.385 \times \frac{73 \times (1198.5)}{(262.65)(64.35)} = 7.17 \text{ ft}$$





۸- تعیین محل موج سینه

• رابطه Eggert:

$$x = 0.372 \frac{V^2}{g}$$

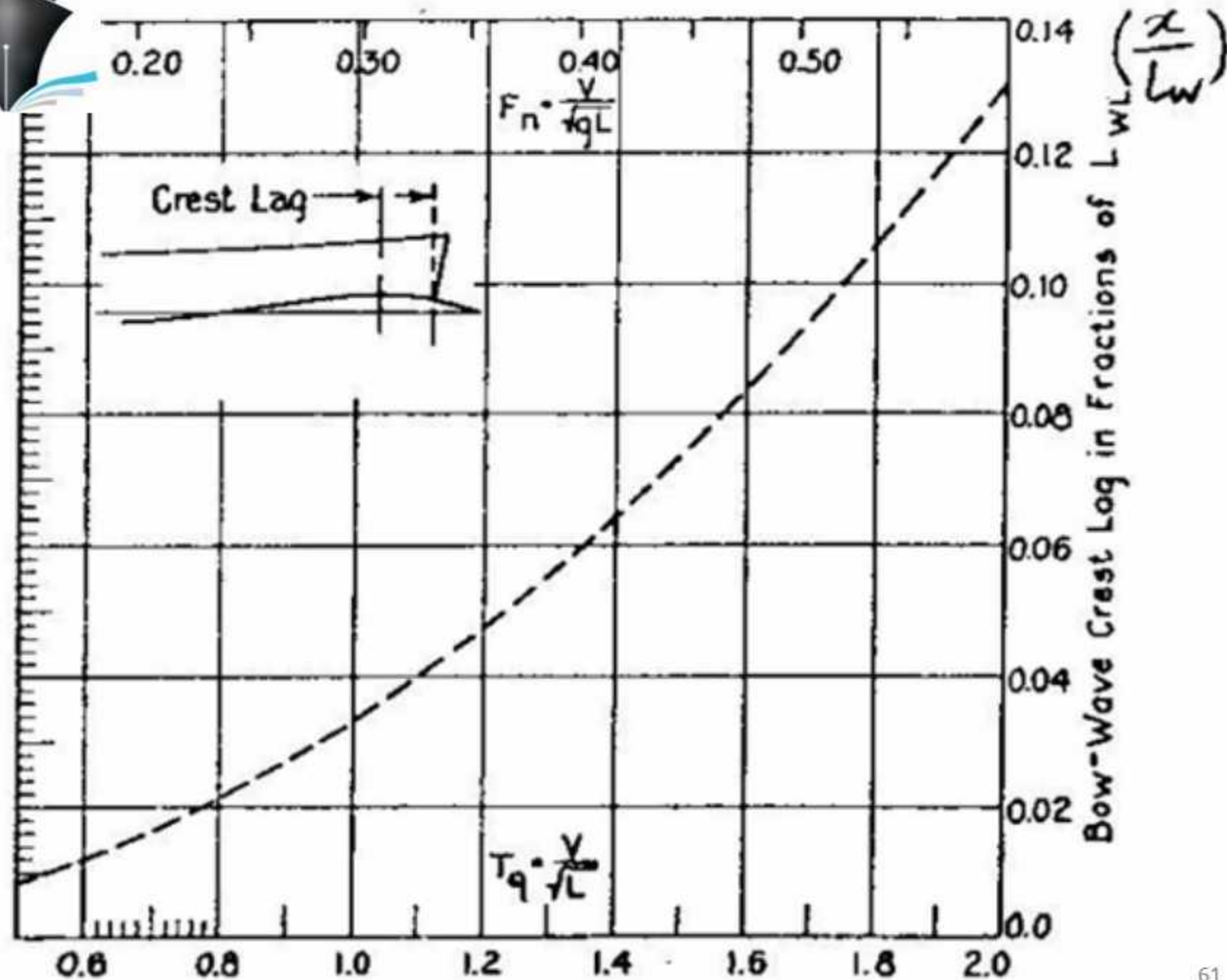
واحدهای x, V, g می تواند دلخواه باشد.

اگر V بر حسب گره و x بر حسب فوت باشد می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$x = 0.033V^2$$

همچنین برای محاسبه x می توان از نمودار زیر استفاده کرد که در آن $(\frac{x}{L_{wl}})$ بر حسب T_q یا F_n داده شده

است. L_{wl} طول صفحه آبخور می باشد.





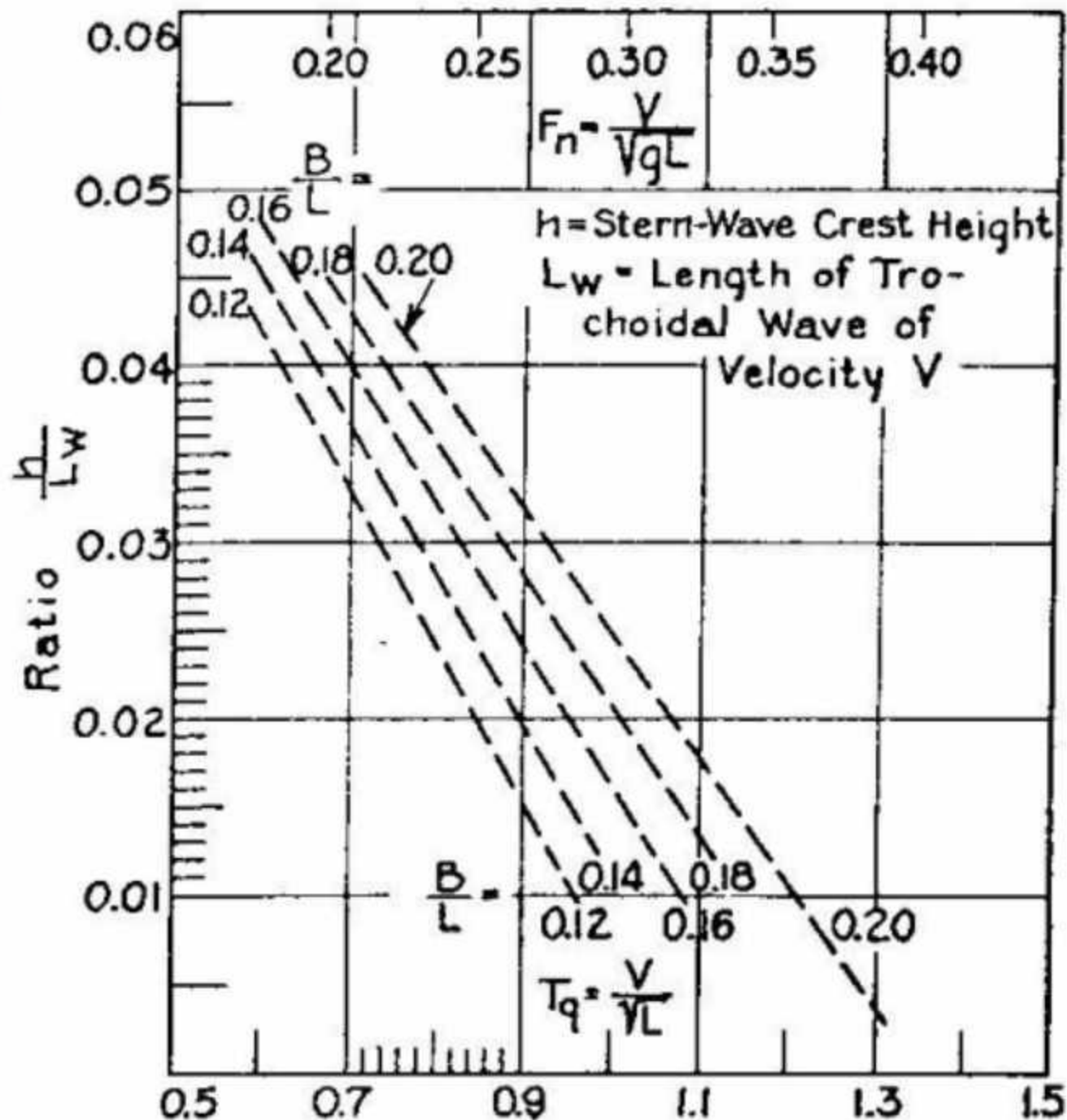
تخمین ارتفاع موج پاشنه

برای تخمین ارتفاع موج پاشنه (h) نیز نمودار زیر توسط Harvald ارائه شد. ارتفاع موج پاشنه به صورت نسبت

$(\frac{h}{L_w})$ ارائه شده است که بر حسب F_n و V_q از نمودار زیر قابل استخراج است:

در این نمودار L_w طول موج ترکوئیدی در سرعت‌های مختلف است.





همچنین برای شناورهای تجاری با بدنه معمولی می‌توان رابطه بین موج عرضی (Transverse Wave Leng) و

مقدار T_q را به صورت زیر در نظر گرفت:

نسبت طول بدنه به طول موج ترکوئیدی	مقدار T_q
$L = 4L_w$	0.63
$L = 3L_w$	0.72
$L = 2L_w$	0.88
$L = L_w$	1.15
$L = 3.5L_w$	0.67
$L = 2.5L_w$	0.8
$L = 1.5L_w$	0.99
$L = 0.5L_w$	1.5 – 1.7



نقطه حداکثر مقاومت (hump) در نمودار مقاومت تقریباً زمانی اتفاق می‌افتد که طول کشتی برابر نصف طول موج عرضی بدنه باشد.



نمونه‌ای از این تغییرات بر روی یک شناور از سری 57 با $C_B = 0.6$ نشان داده شده است.

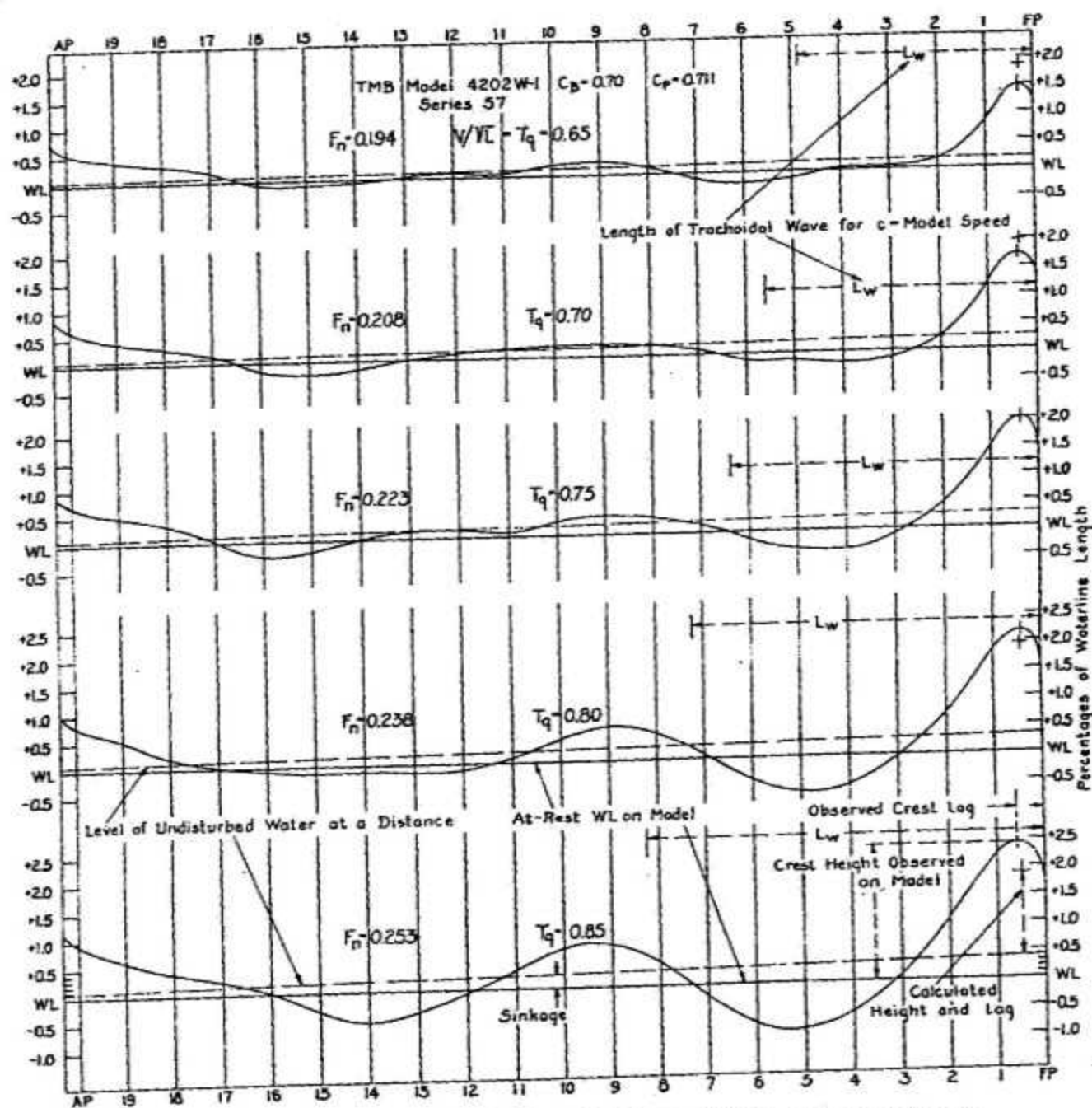
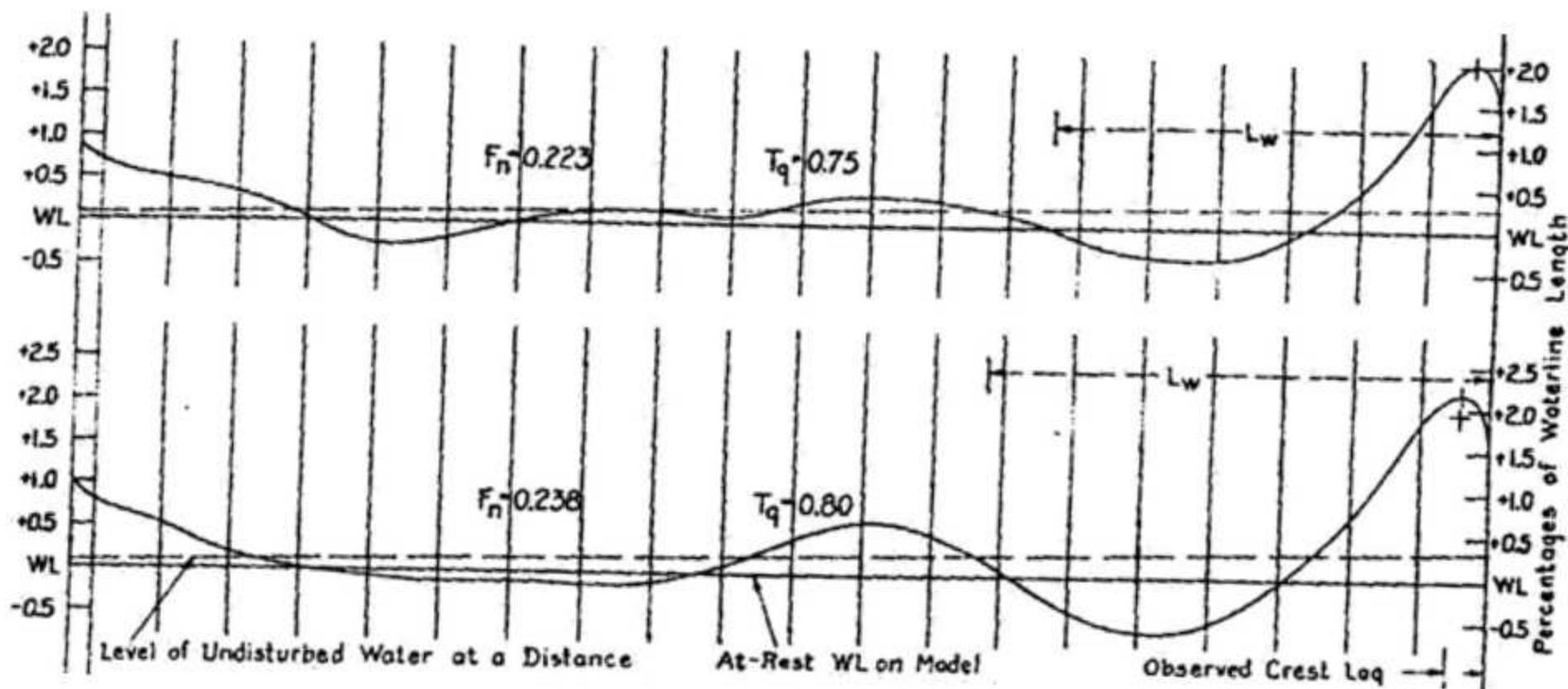


FIG. 52.J WAVE PROFILES FOR TMB SERIES 57, MODEL 4202W-1, AT VARIOUS SPEEDS

نمودار
 تغییرات
 شکل موج
 بدنه بر
 حسب تغییر
 عدد فرود
 برای یک
 شناور با
 ضریب
 بلوکی ۰.۶



خطوط امواج ایجاد شده روی انواع بدنه شناورها نشان داده شده است که توسط D.W.Taylor در سالهای ۱۹۰۰-۱۹۱۰ با آزمایش به دست آمده است.

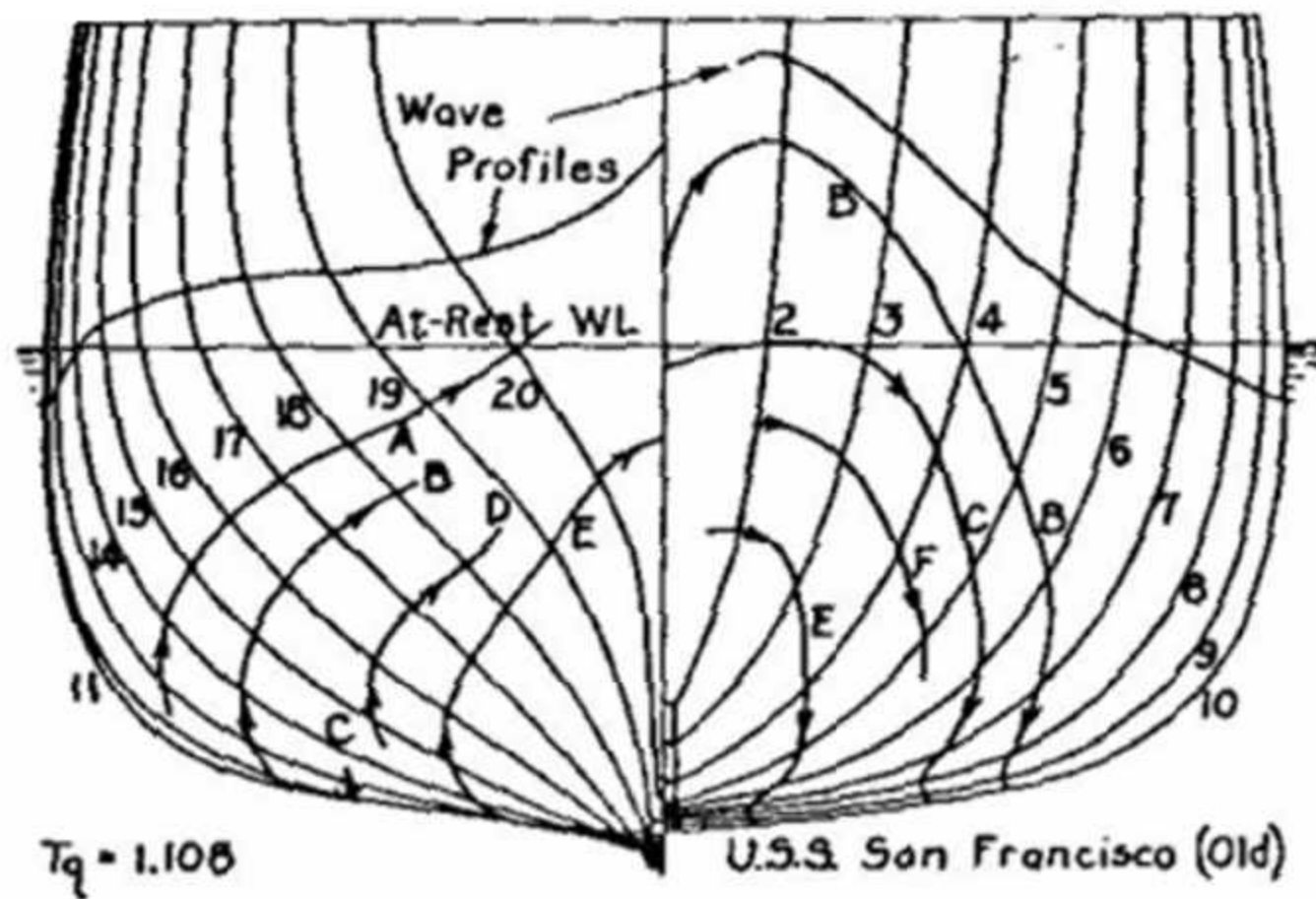


FIG. 52.Ka LINES OF FLOW FOR OLD CRUISER MODEL