



دانشگاه صنعتی مالک اشتر
مجمع دانشگاهی علوم و فناوری زیر دریا

تحلیل پایداری شناورها



تحلیل پایداری شناورها

مهندس محمد مونسان
مهندس فرهاد صفری

مؤلفان:

مهندس محمد مونسان (عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر)

مهندس فرهاد صفری (محقق دانشگاه صنعتی مالک اشتر)



کتاب «تحلیل پایداری شناورها» برای استفاده دانشجویان کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی دریایی و مهندسين و طراحان شناورها تهیه شده و در تألیف آن از منابع متعددی استفاده شده که شامل کامل ترین مجموعه مباحث پایداری می باشد. مباحث جامعی شامل پایداری طولی و عرضی شناورها، پایداری در حالت صدمه دیده، آباندازی، به داک بردن و به گل نشستن، پایداری زیردریایی و توزیع وزن و بویانسی ارائه شده است.

مثالهای این کتاب برای دو شناور الگو توسط نرم افزار Autoship بیان شده به گونه ای که با مطالعه این مثالها از ابتدا تا انتهای کتاب، می توان با مراحل تحلیل پایداری شناورها آشنا شد. برخی از نکات تستهای کارشناسی ارشد مهندسی دریایی نیز در داخل مثالها گنجانده شده است.

روش های عددی مختلف برای محاسبه خواص سطح و حجم نیز بیان شده است که مبنای برنامه نویسی کامپیوتری در موضوعات پایداری است.

طرح روی جلد کتاب یک کشتی RO-RO می باشد که در اثر ناپایداری، تعادل خود را از دست داده و واژگون شده است.



تحليل پایداری شناورها



مؤلفان:

مهندس محمد مونسان (عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر)

مهندس فرهاد صفری (محقق دانشگاه صنعتی مالک اشتر)

اطلاعات فيپا

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تحلیل پایداری شناورها

مؤلفان: مهندس محمد مونسان ، مهندس فرهاد صفری

ناشر کانون پژوهش

نوبت چاپ : اول ۱۳۸۷

تعداد : ۱۰۰۰ جلد

چاپ : اصفهان

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۲۸۷-۰۰-۴

کلیه حقوق برای مؤلفان محفوظ است.

قیمت: ۶۵۰۰ تومان

تلفن پخش: ۱۴۶۷ ۲۱۱ ۰۹۱۳

تقدیم به:

جانبازان هشت سال دفاع مقدس؛

آنانکه رنج دیروز و امروزشان، مایه

آرامش امروز ماست.

و با تشکر از:

□ همسر فداکارم که با صبر، فداکاری و

تشویق های خود، نقش موثری در مدت سه

ساله تکمیل این کتاب داشتند،

□ پدر و مادر عزیزم در زحمات

بی دریغشان،

□ و همکاران پژوهشکده زیرسطحی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر در حمایت از

چاپ کتابهای رشته مهندسی دریایی

بهخصوص مهندس حسینی الست

فهرست مطالب

سخن مولف

۱۱

فصل ۱: مفاهیم اولیه پایداری

۱۵

بخش ۱-۱: فرایند طراحی کشتی

۱۷

بخش ۲-۱: برخی لغات و اصطلاحات مهندسی دریایی

۲۳

بخش ۳-۱: خطوط بدنه و جدول آفست شناور

۲۹

بخش ۴-۱: مشخصات شناورهای مدل

۴۲

بخش ۵-۱: برخی اصطلاحات رایج برای انواع زوایای کجی عرضی شناور

۴۸

بخش ۶-۱: روشهای انتگرال گیری عددی

۵۱

بخش ۷-۱: ضرایب بدنه

۹۱

بخش ۸-۱: منحنی بونژان و مساحت مقاطع عرضی

۹۸

بخش ۹-۱: برخی تعاریف از تناژ و حجم بسته شناور

۱۰۵

بخش ۱۰-۱: عوامل مؤثر در تحلیل پایداری شناور

۱۱۰

بخش ۱۱-۱: تعیین مرکز ثقل و جابجایی آن

۱۱۵

بخش ۱۲-۱: قانون ارشمیدس و کاهش وزن در آب

۱۲۲

بخش ۱۳-۱: مرکز بویانسی و تغییرات آن

۱۲۹

فصل ۲: پایداری عرضی شناور

۱۳۵

بخش ۱-۲: موقعیت خط آبخور در زوایای غلتش بزرگ

۱۳۷

بخش ۲-۲: تغییرات مرکز شناوری در زوایای غلتش و آبخورهای مختلف

۱۳۹

بخش ۳-۲: مفهوم نقطه متاستر و نحوه بدست آوردن آن

۱۴۲

بخش ۴-۲: تغییرات شعاع متاستری (BM) بر حسب زوایای غلتش

۱۴۹

بخش ۵-۲: محاسبه KM و GM براساس شعاع متاستری

۱۴۶

بخش ۶-۲: منحنی KM و KB در اشکال هندسی خاص بدنه

۱۶۱

بخش ۷-۲: منحنی‌های هیدرواستاتیک

۱۷۵

بخش ۸-۲: میزان بارگذاری به ازای یک سانتی متر افزایش آبخور

۱۷۸

بخش ۹-۲: اختلاف آبخور در آب شور و شیرین

۱۸۳

بخش ۱۰-۲: ترسیم علامت خط بار شناور

۱۸۷

بخش ۱۱-۲: منحنی $GZ - \varphi$ و کاربردهای آن

۱۹۱

بخش ۱۲-۲: تحلیل حالات مختلف پایداری شناور

۲۱۵

بخش ۱۳-۲: محاسبه مقدار GZ با روابط آتوود، پروهسکا و بارنهارت

۲۲۰

بخش ۱۴-۲: تغییرات منحنی GZ

۲۳۳

بخش ۱۵-۲: اصلاح سینوسی و کسینوسی منحنی GZ

۲۳۸

بخش ۱۶-۲: منحنی مقاطع عرضی پایداری

۲۴۴

بخش ۱۷-۲: محاسبه GZ در شناورهای بدنه دیواره‌ای

۲۴۹

بخش ۱۸-۲: محاسبه زاویه ل در شناور بدنه دیواره‌ای

۲۵۴

۲۵۹	بخش ۲-۱۹: محاسبه زاویه لیست در شناور
۲۶۲	بخش ۲-۲۰: پایداری دینامیکی شناور
۲۷۸	بخش ۲-۲۱: اثرات سطح آزاد مخازن بر پایداری
۲۸۹	بخش ۲-۲۲: اثرات اجسام آویزان و ارتفاع جرثقیل بر پایداری شناور
۲۹۲	بخش ۲-۲۳: اثرات شکل بدنه بر پایداری
۲۹۷	بخش ۲-۲۴: رابطه نسبتهای ابعادی و پایداری شناور
۳۰۴	بخش ۲-۲۵: غلتش عرضی در هنگام گردش
۳۰۷	بخش ۲-۲۶: پیروود نوسانات حرکت رول و دریازدگی
۳۲۶	بخش ۲-۲۷: روش‌های کاهش غلتش شناور
۳۳۸	بخش ۲-۲۸: انجام تست کجی
۳۵۵	فصل ۳: پایداری طولی و مباحث مرتبط
۳۵۷	بخش ۳-۱: پایداری طولی شناور
۳۸۴	بخش ۳-۲: اثرات تغییر چگالی آب دریا بر پایداری شناور
۳۸۷	فصل ۴: هیدرواستاتیک زیردریایی
۳۸۹	بخش ۴-۱: هیدرواستاتیک زیردریایی
۴۲۵	فصل ۵: به گل نشستن و پایداری در حالت صدمه‌دیده
۴۲۷	بخش ۵-۱: به داک بردن و به گل نشستن شناور
۴۴۲	بخش ۵-۲: پایداری در حالت صدمه دیده
۴۶۳	فصل ۶: آب‌اندازی شناور

۴۶۵	بخش ۶-۱ : آب اندازی شناور
۴۷۳	فصل ۷: ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی
۴۷۵	بخش ۷-۱ : ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی
۴۸۱	فصل ۸: آسکوات و اثرات متقابل
۴۸۳	بخش ۸-۱: آسکوات
۴۹۱	بخش ۸-۲: اثرات متقابل دو شناور در حال حرکت
۴۹۷	ضمائم
۵۱۲	مراجع

بسمه تعالی

سخن مولف:

ایران در زمان دولت هخامنشی دارای یکی از بزرگترین ناوگان‌های دریایی دنیا بود و کشتی‌هایی که در ایران ساخته می‌شد در دنیا کم‌نظیر بود. این برتری دریایی که زمینه بسط سیطره حکومت ایران به سایر کشورهای دنیا بود پس از دولت هخامنشی رو به افول گذاشت و دیگر ایران هرگز این برتری را باز نیافت و حتی صنعت دریایی و ساخت کشتی را برای سال‌های طولانی به کلی کنار گذاشت.

پس از پیروزی انقلاب شکوهمند اسلامی و بخصوص در دوران جنگ تحمیلی، ایران این مهم را به درستی درک نمود که داشتن صنایع دریایی بومی و قدرتمند، لازمه حفاظت از مرزهای دریایی کشور است و در زمینه اقتصادی نیز اهمیت منحصر بفردی دارد از جمله؛ ایجاد اشتغال و پویایی صنعتی در شهرهای ساحلی، رشد صنایع جانبی و تشکیل زنجیره بزرگی از فعالیتهای صنعتی در کشور، جلوگیری از خروج ارز، کاهش وابستگی به کشورهای خارجی، گسترش ناوگان تجاری و انجام پروژه‌های عظیم دریایی صنعت نفت کشور.

در دوران دفاع مقدس تلاش‌های محدودی در زمینه ساخت شناورهای نظامی و تجاری انجام شد تا اینکه از سال ۱۳۷۷ صنایع دریایی کشور دچار تحولات اساسی شد و سرمایه‌گذاری‌های هنگفتی در آن صورت گرفت و این نقطه شروعی برای بازیافتن قدرت تاریخی ایران در صنایع دریایی بود. در این مدت، فعالیت کارخانه‌جات کشتی-سازی و فراساحل کشور با رشد چشمگیری مواجه شد.

بسیاری از این پیشرفت‌ها مرهون تلاش بی‌دریغ انجمن مهندسی دریایی ایران بوده است. برگزاری همایش‌های سالانه گام دیگری در جهت پویایی و تعامل بیشتر صنایع

دریایی کشور بوده است. مجموع این پیشرفت‌ها باعث شده است ایران که تا قبل از پیروزی انقلاب اسلامی جایگاهی در صنایع دریایی نداشت امروزه تبدیل به قوی‌ترین کشور غرب آسیا در صنایع دریایی شده و در دنیا نیز در زمره یکی از مطرح‌ترین کشورها قرار گرفته است. این پیشرفت‌ها به حدی بوده است که ایران توانسته است پروژه‌های بسیار زیادی را در کشورهای آمریکای جنوبی، اروپا و آسیا تصاحب کند.

برای آشنایی بیشتر مهندسين و دانشجویان با پروژه‌های بزرگی که در کشور انجام شده است، تصاویر برخی از این پروژه‌ها با عنوان «ایران، بزرگترین کشتی‌سازی غرب آسیا» در کتاب ذکر شده است.

در هر حال با تمام پیشرفتهای چشمگیری که در طی سالیان اخیر انجام شده است، هنوز فاصله زیادی تا رسیدن به جایگاه مطلوب وجود دارد. جایگاهی که در شأن کشوری با ۲۹۰۰ کیلومتر مرز آبی باشد. امروزه برخی از کشورهای اروپایی با داشتن مرزهای آبی کمتر از ۹۰۰ کیلومتر، مانند آلمان و لهستان از قدرتهای دریایی دنیا محسوب می‌شوند. ان شاء الله این مهم به همت و تلاش محققین و صنعتگران کشور جامه عمل خواهد پوشید.

در بخش فعالیت‌های آموزشی و تحقیقاتی نیز دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و صنعتی مالک‌اشتر پیشتاز بوده‌اند. دانشگاه امیرکبیر مؤسس اولین دانشکده کشتی‌سازی کشور و دانشگاه مالک‌اشتر مؤسس اولین پژوهشکده دریایی کشور بوده است.

دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر امروزه دارای دانشکده مهندسی دریایی و دو مجتمع بزرگ تحقیقات دریایی می‌باشد که پروژه‌های ملی متعددی را به انجام رسانیده‌اند. از دیگر فعالیت‌های دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، انتشار کتابهایی در زمینه مهندسی دریایی بوده است. اولین قدم در توسعه هر دانش و فناوری، توسعه و نشر کتابهای مرجع و کاربردی به زبان بومی می‌باشد که متأسفانه فعالیت جدی در این زمینه انجام نشده است. دانشگاه مالک‌اشتر در این زمینه پیشگام شده و از چاپ کتابهای دریایی که حاصل ترجمه یا تألیف متخصصین کشور باشد استقبال می‌کند.

کتاب حاضر، تلاشی است در جهت رفع برخی از نیازهای علمی رشته مهندسی کشتی سازی که به تحلیل تعادل و پایداری شناورها پرداخته است. در تألیف این کتاب از ۱۸ مرجع لاتین و فارسی استفاده شده است، بخصوص از کتاب ارزشمند «تعادل و پایداری شناورها» ترجمه اساتید ارجمند آقایان دکتر محمدسعید سیف و دکتر مهدی سیف. کتابهای مختلفی در زمینه پایداری شناورها وجود دارد که هر یک دارای نقاط ضعف و قوت خاصی هستند. در این کتاب سعی شده است که از نقاط قوت کتابهای فوق استفاده شود و نقاط ضعف نیز با استفاده از کتابهای متعدد رفع گردد.

در ابتدای هر بخش، مراجع استفاده شده در قسمت پاورقی ذکر شده است تا دانشجویان برای مطالعه بیشتر بتوانند به آنها رجوع کنند. فایل های pdf اغلب مراجع لاتین مورد استفاده، نزد مؤلف موجود است که افراد علاقه مند می توانند برای دریافت آنها با مؤلف تماس حاصل نمایند.

محتوای کتاب ۷۰ درصد به پایداری عرضی، ۲۵ درصد به پایداری طولی و مباحث مرتبط و ۵ درصد نیز به پایداری زیردریایی اختصاص یافته است.

از خصوصیات منحصر بفرد این کتاب این است که دو شناور مدل در ابتدای کتاب معرفی شده اند و در هر بخش، مثالهایی برای این دو شناور حل شده اند. بدین ترتیب دانشجویان و مهندسين می توانند با مراحل و سیر تحلیل پایداری یک شناور از ابتدا تا انتهای کتاب آشنا شوند. مثالهای ارائه شده به کمک نرم افزار Autoship حل شده اند. دانشجویان برای آشنایی با نحوه کار با این نرم افزار می توانند به خودآموز نرم افزار Autoship تألیف مهندس مجردی مراجعه نمایند.

همچنین در محتوای کتاب سعی شده است که نکات بکار رفته در تستهای کارشناسی ارشد مهندسی کشتی سازی نیز گنجانده شوند. دانشجویان برای دسترسی به سؤالات کارشناسی ارشد کشتی سازی می توانند به کتاب «مجموعه آزمون های کارشناسی ارشد معماری کشتی» تألیف آقایان مهندس قاسمی و کریمی راد مراجعه کنند.

این اثر با تلاش و مساعدت مجتمع علوم و فناوری دریایی دانشگاه صنعتی مالک اشتر امکان وجود یافته است که بخصوص از همکاران محترم آقایان مهندس حسینی الست، مهندس حیدری، مهندس حمیدیا، دکتر مرآتی، مهندس عسگری و مهندس مینوتن تشکر و امتنان خویش را ابراز می‌دارم.

همچنین وظیفه خود می‌دانم از اساتید ارجمند خود در دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و صنعتی شریف آقایان دکتر معتمدی، دکتر ایرانمنش، زنده یاد شهید ناخدا فاضل، دکتر سایبانی، دکتر فدوی، دکتر قاسمی، دکتر زراعتگر، دکتر رهبر، دکتر خدمتی، مهندس بابایی، دکتر صراف، دکتر کتابداری، حجة الاسلام مرادزاده، مهندس قدرت نما، دکتر سیف و دکتر صیادی نهایت تشکر و امتنان خویش را ابراز دارم.

علی‌رغم تلاش بسیاری که برای جامع و کامل بودن این کتاب صورت گرفته است، این اثر نمی‌تواند خالی از اشکال باشد. لذا از نظرات اصلاحی اساتید و دانشجویان به گرمی استقبال می‌شود.

به امید اینکه این کتاب قدمی در جهت ترویج و تعمیق دانش و فناوری دریایی باشد.

محمد مونسان

M_moonesun@yahoo.com

فصل ۱

مفاهيم اوليه پايداري

بخش ۱-۱ : فرایند طراحی کشتی

طراحی کشتی نه تنها در یک مرحله، بلکه در چندین مرحله انجام می‌شود و در هر مرحله، کشتی به حالت بهینه نزدیک‌تر می‌شود. فرایند بهینه‌سازی طراحی را می‌توان در شکل ۱ نمایش داد که به آن «حلزون طراحی» گویند. این شکل حلزونی دارای چندین حلقه می‌باشد که با طی شدن هر حلقه در واقع یک «سعی و خطا» برای کلیه اجزاء طراحی انجام شده است. این اجزاء به صورت خطوط شعاعی ترسیم شده‌اند و هر خط نشان‌دهنده یک جزء طراحی شامل موارد زیر است:

۱- تعیین ابعاد و انتخاب شکل بدنه: در این قسمت، حجم و ابعاد بدنه تعیین می‌شوند به گونه‌ای که بتوان کلیه فضاهای مورد نیاز برای حمل بار، مسافر، خدمه و تجهیزات را تأمین کرد. حجم بویانسی و مرکز بویانسی (مرکز حجم) در این قسمت تعیین می‌گردد.

۲- چیدمانی داخلی و جانمایی عمومی: در این قسمت چیدمانی تجهیزات داخلی و فضاهای اختصاص یافته برای شناور، در داخل بدنه توزیع می‌شوند.

۳- هیدرودینامیک و کنترل سرعت: بر اساس انجام محاسبات هیدرودینامیک و محاسبه درگ، قدرت مورد نیاز و سرعت حرکت تعیین می‌گردد. سرعت حرکت شناور معمولاً معیار اصلی چانه‌زنی بین کارفرما و پیمانکار است.

۴- انتخاب تجهیزات: انتخاب تجهیزات، شامل انتخاب نوع، ابعاد و وزن تجهیزات می‌باشد که در تعیین مرکز ثقل کل کشتی و حجم مورد نیاز بدنه برای نصب تجهیزات اهمیت دارد. معمولاً در مراحل اولیه طراحی فقط تخمینی از وزن و ابعاد تجهیزات ارائه می‌شود. انتخاب تجهیزات جهت خرید فقط در مرحله طراحی مهندسی و طراحی جزئیات انجام می‌شود.

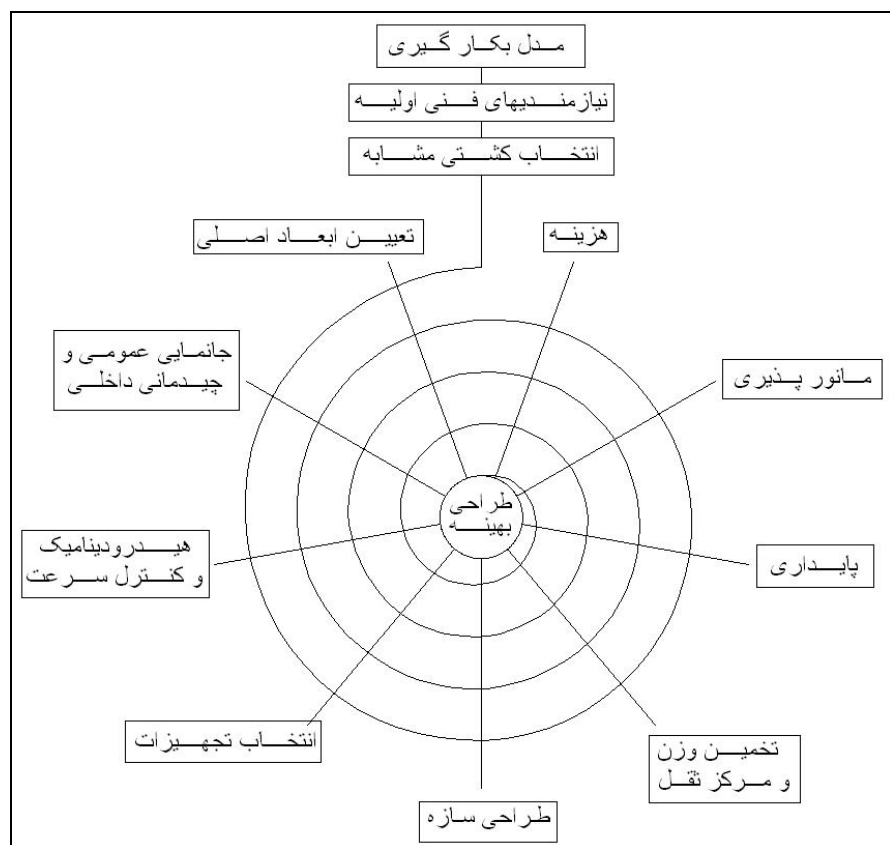
۵- طراحی سازه‌ای: در قسمت طراحی سازه‌ای، مشخصات هندسی و وزنی سازه قسمت‌های مختلف بدنه انجام می‌شود. در آخرین مرحله طراحی سازه، بدنه کشتی چنان بهینه شده است که دارای کمترین وزن سازه‌ای ممکن باشد.

۶- تخمین وزن و مرکز ثقل: پس از انتخاب تجهیزات و طراحی سازه‌ای بدنه می‌توان تخمین نسبتاً دقیقی از وزن شناور و مرکز ثقل آن بدست آورد.

۷- کنترل پایداری در حالت سالم و صدمه‌دیده: برای کنترل پایداری شناور دو مشخصه اصلی مورد نیاز است: یکی مشخصات هندسی بدنه و دیگری مرکز ثقل شناور که تا این مرحله هر دو مشخصه فوق تعیین شده‌اند. بررسی پایداری در دو حالت کلی سالم و صدمه‌دیده (آبگرفتگی بدنه) انجام می‌شود.

۸- کنترل و مانور پذیری: بررسی پایداری مسیر و کنترل‌پذیری شناور در این قسمت انجام می‌شود.

۹- کنترل هزینه: طراحی وابستگی زیادی به توانایی مالی کارفرما دارد. در بسیاری موارد برای کاهش هزینه‌ها، ساده‌سازی طراحی تنها راه چاره است.



شکل ۱: حلزون طراحی شناور

مطابق شکل ۱ جایگاه پایداری در فرایند طراحی نشان می‌دهد که بررسی پایداری تنها زمانی امکان‌پذیر است که تغییرات شکل و حجم بدنه و همچنین مرکز ثقل تعیین شده باشد.

تعداد حلقه‌های طراحی که در حلزون طراحی وجود دارد وابسته به تجربه و دانش طراحی پیمانکار دارد. معمولاً به دو حلقه اول «طراحی مفهومی»، دو حلقه دوم «طراحی

مقدماتی»، سه حلقه بعدی «طراحی مهندسی» و سه حلقه آخر نیز «طراحی جزئیات» گفته می‌شود.

لازم به ذکر است که قبل از ورود به «حلزون طراحی» سه مرحله باید انجام شود که عبارتند از:

۱- تعیین مدل بکارگیری^۱

در این مرحله نوع شناور و الگوی استفاده از شناور شامل مسیر حرکت، مدت زمان حضور پیوسته در دریا، مشخصات جوی ناحیه تردد، مشخصات مناطق لنگر اندازی و پهلوگیری و ... تعریف می‌شود که از اهمیت خاصی در طراحی برخوردار است مثلاً اگر شناوری قرار است در ناحیه قطبی پوشیده از یخ حرکت کند الزامات خاصی را نیاز دارد.

۲- تعیین نیازمندیهای فنی اولیه^۲

در این مرحله ابتدا نیازهای کارفرما دریافت شده و پس از مذاکرات فنی بسیار بین کارفرما و پیمانکار، نیازمندیهای معقول مورد توافق طرفین تعیین می‌گردد که سند «نیازمندیهای فنی اولیه» نامیده می‌شود و شامل موارد زیر می‌باشد: سرعت حرکت شناور، تناژ بار قابل حمل، برد حرکت بدون سوخت‌گیری مجدد و

۳- انتخاب کشتی مشابه^۳

قبل از شروع طراحی، باید بتوان مشابه‌ترین کشتی به کشتی مورد توافق در «نیازمندیهای فنی اولیه» را از بین کشتی‌های ساخته شده انتخاب کرد. هرچه

1 - Model of Employment

2 - Initial Technical Requirement

3 - Sister Ship

شباهت کشتی مشابه بیشتر باشد، فرایند طراحی در حلقه‌های کمتر و در مدت زمان کوتاه‌تری به پایان می‌رسد. چهار مشخصه اصلی در انتخاب کشتی مشابه عبارتند از: ۱) نوع کشتی ۲) جابجایی (تناژ) ۳) ابعاد (به‌خصوص طول کشتی) ۴) سرعت حرکت

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: نفتکش ایران نکهاء



شرکت سازنده: شرکت صدرا

جابجایی: ۴۸۰۰ تن

شرکت صدرا تا کنون چندین فروند از این شناورها را برای بکارگیری در دریای خزر طراحی کرده و ساخته است.

بخش ۱-۲: برخی لغات و اصطلاحات مهندسی دریایی

برخی لغات و اصطلاحات در این کتاب بکار می‌رود که لازم است در مورد آنها توضیحاتی ارائه گردد:

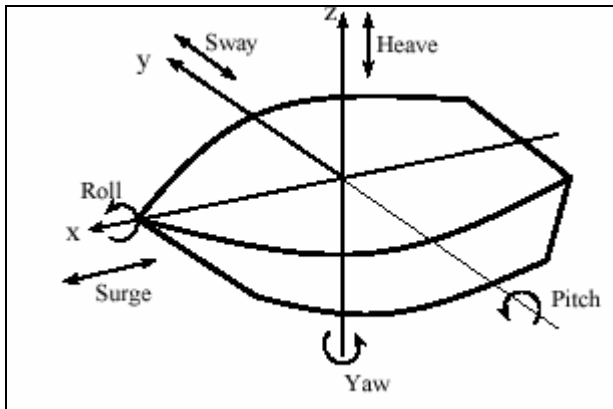
- هر جسم صلب دارای ۶ درجه آزادی است که این شش درجه آزادی در کشتی به صورت زیر تعریف می‌شود.

حرکات دورانی:

۱ حول محور طولی x یا غلتش عرضی: رول

۲ حول محور عرضی y یا غلتش طولی: پیچ

۳ حول محور z یا غلتش در صفحه افقی: یاو



شکل ۱: شش درجه آزادی شناور

حرکات خطی:

در راستای محور طولی x : سرج^۱

در راستای محور عرضی y : اسوی^۲

در راستای محور عمودی z : هیو^۳

معمولاً حرکات (یا درجات آزادی) زیر به هم وابسته هستند و در تحلیل دینامیک حرکت کشتی نیز به صورت وابسته به هم در نظر گرفته می‌شود:

- حرکت هیو و پیچ به صورت وابسته

- حرکت یاو و اسوی به صورت وابسته

- حرت رول به صورت مستقل

- حرت سرج به صورت مستقل

* **شیب^۴**: به شیب طولی شناور «تریم» یا «شیب» گفته می‌شود. در واقع اگر دوران طولی به صورت پیوسته و غلتشی باشد به آن پیچ و اگر به صورت استاتیکی باشد به آن «شیب» گویند.

* **هیل^۵**: به شیب عرضی شناور «هیل» گفته می‌شود و در واقع حالت استاتیکی حرکت «رول» می‌باشد.

* **سینه^۶ و پاشنه^۷**: در اصطلاح مهندسی دریایی به قسمت جلوی شناور «سینه» و به قسمت انتهایی شناور «پاشنه» گفته می‌شود.

1 - Surge

2 - Sway

3 - heave

4 - Trim

5 - heel

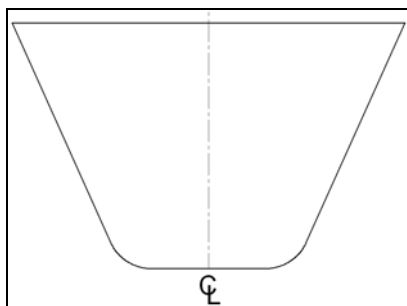
6 - bow

7 - stern

* کیل^۱ : به شاه تیر اصلی کف کشتی «کیل» گفته می‌شود که در واقع تحتانی‌ترین قسمت بدنه کشتی است .

* خط مرکزی^۲ و صفحه مرکزی^۳ :

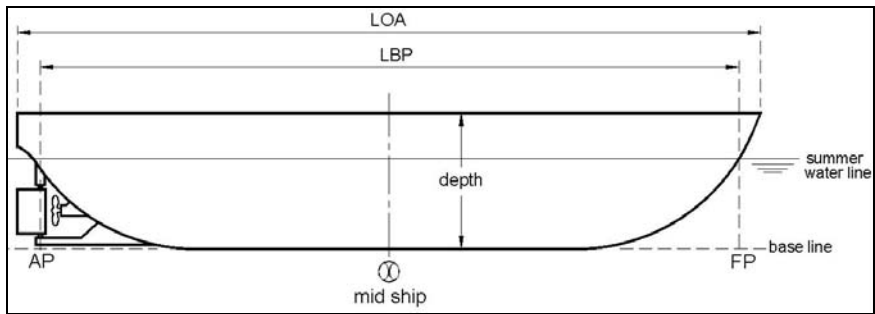
«خط مرکزی» خطی است که صفحه آب‌خور شناور را به دو نیم چپ و راست تقسیم می‌کند و به صفحه‌ای که کشتی را به دو نیم چپ و راست تقسیم می‌کند، «صفحه مرکزی» گویند.



شکل ۲: خط مرکزی - صفحه مرکزی

* خط مبنا^۴ :

این خط ، خطی است که به انتهای‌ترین قسمت کف کشتی به صورت طولی مماس می‌شود.



شکل ۳: خط مبنا و مقطع میانی شناور

* **مقطع میانی^۱**: مقطعی است که طول کشتی را دقیقاً به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند و با علامت $\otimes$ نشان داده می‌شود.

* **آبخور^۲**: عمقی از بدنه است که داخل آب قرار دارد.

* **فری برد^۳**: فاصله سطح آب تا عرشه اصلی کشتی است.

* **عمق^۴**: فاصله کف کشتی تا عرشه اصلی کشتی است.

* **ارتفاع^۵**: فاصله آبخور تا بالاترین قسمت روبناسازی^۶

1 - midship section

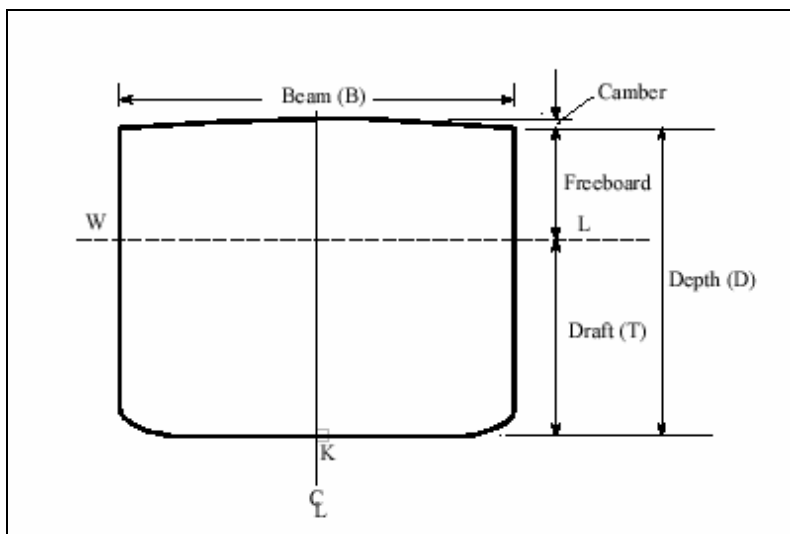
2 - draft

3 - freeboard

4 - depth

5 - height

6 - super structure



شکل ۴: آبخور، فری برد و عمق بدنه شناور

* **سطح خیس^۱**: سطحی از بدنه کشتی که در داخل آب قرار دارد. این سطح شامل سطح بدنه در تماس با آب کشتی در طرفین چپ و راست کشتی است که به مجموع این مساحت‌ها «سطح خیس» گفته می‌شود.

* پایداری شکلی^۲ و پایداری جرمی^۳

پایداری شکلی، اصطلاحی است که برای بیان پایداری شناورها در سطح آب از آن استفاده می‌شود. در سطح آب با غلتش شناور، مرکز بویانسی بدنه جابجا می‌شود که این جابجایی وابسته به شکل بدنه می‌باشد. از این رو به پایداری شناور در سطح آب، «پایداری شکلی» گفته می‌شود.

پایداری جرمی، اصطلاحی است که برای پایداری زیردریایی در زیر سطح آب استفاده می‌شود. در زیر آب با غلتش شناور، مرکز بویانسی جابجا نمی‌شود و نقطه ثابتی

1 - wetted surface

2 - form stability

3 - Mass stability

است چرا که کل بدنه در داخل آب غوطه‌ور است و شکل بدنه به هر نوعی که باشد، مرکز بویانسی جابجا نمی‌شود. در عوض، مرکز ثقل شناور با غلتش شناور جابجا می‌شود و مبنای بررسی پایداری، جابجا شدن مرکز ثقل است و به همین دلیل به این نوع پایداری، «پایداری جرمی» گفته می‌شود.

بخش ۱-۳: خطوط بدنه و جدول آفست شناور

سه نمای اصلی بدنه

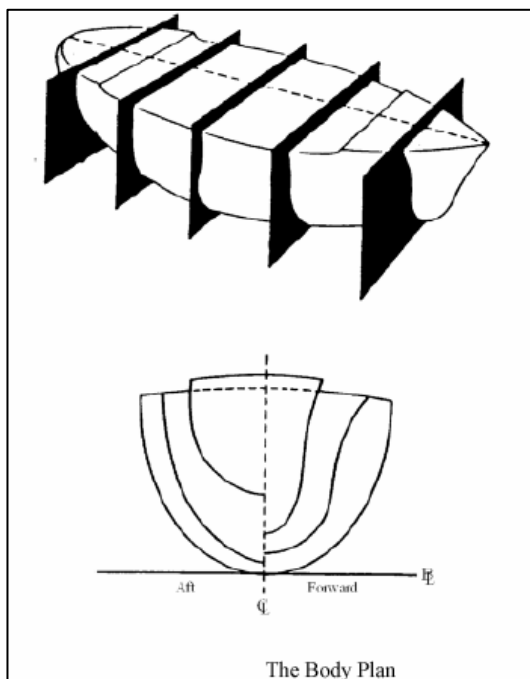
شکل بدنه کشتی معمولاً یک شکل هندسی نامعین است که به وسیله سه نمای اصلی تشریح می‌شود:

۱- نما از مقابل^۲

۲- نما از کنار^۳

۳- نما از بالا (نمای آب‌خور)^۴

نمای مقابل شناور به وسیله صفحات برش عرضی^۵ (مطابق شکل ۱) مشخص می‌شود. این مقاطع دارای فواصل مساوی در طول بدنه هستند به غیر از قسمت سینه و پاشنه که به دلیل انحنای شدید بدنه، ممکن از فواصل کوچکتر برش عرضی استفاده شود.



شکل ۱: نمای مقابل بدنه کشتی

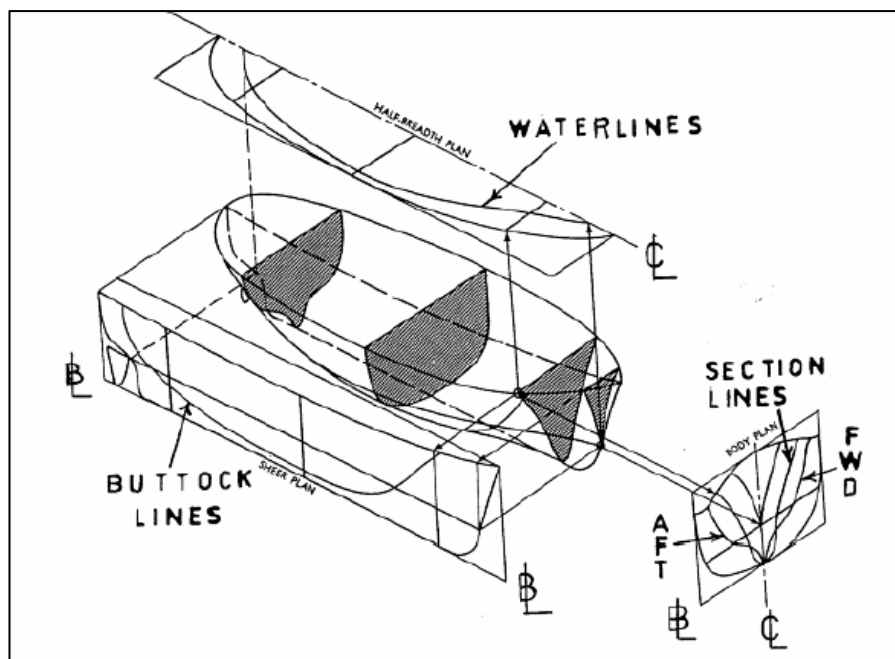
۱- منابع: [5], [7]

2 - Body Plan

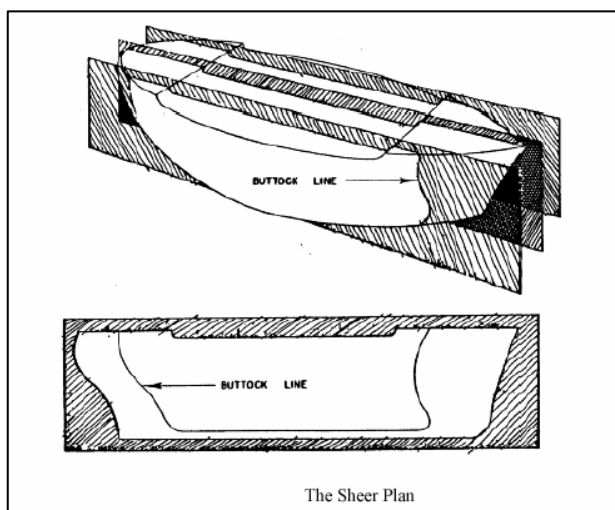
3 - Sheer Plan

4 - half Breadth plan – waterplan

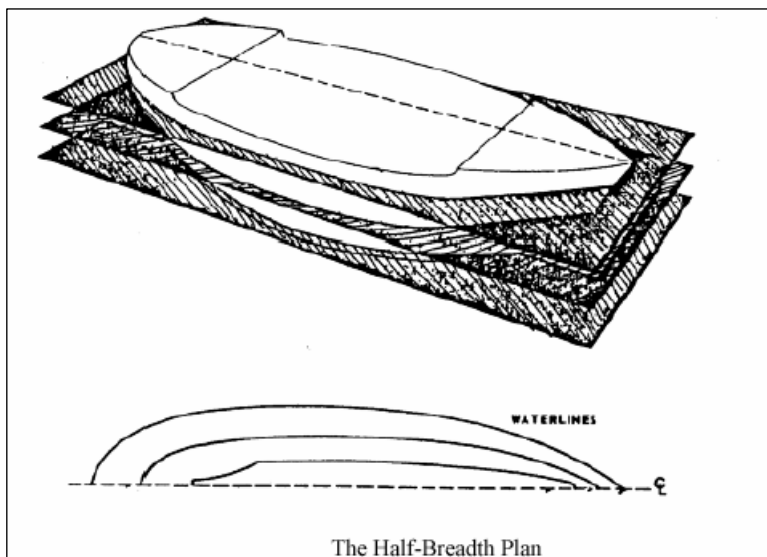
5 - Section



شکل ۲: خطوط بدنه در سه نمای اصلی شناور



شکل ۳: برش‌های طولی و خطوط باتوک



شکل ۴: نمای آبخور و خطوط آبخور

این برش‌ها تشکیل خطوط نمای مقابل^۱ را می‌دهند که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود. معمولاً در شناورها از حدود ۲۰ برش عرضی استفاده می‌شود که بتوان با دقت بیشتری خطوط بدنه را تعیین کرد. از آنجا که قسمت چپ و راست هندسه بدنه شناور با هم متقارن هستند، لذا در این نما فقط نیمی از بدنه نمایش داده می‌شود. مقدار نیم عرض برش‌های جلو تا وسط بدنه در قسمت راست و برش‌های وسط تا پاشنه بدنه در قسمت چپ این نما، نشان داده می‌شود که می‌توان در شکل ۱ آن را مشاهده کرد.

«نما از کنار» نیز توسط صفحات برش طولی ایجاد می‌گردد که به این خطوط ایجاد شده «باتوک»^۲ گویند که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. معمولاً حدود ۳-۵ برش طولی برای این نما در قسمت چپ یا راست بدنه (به دلیل تقارن بدنه) در نظر گرفته می‌شود.

1 – Section Line

2 – Buttock Line

«نما از بالا» توسط صفحات آبخور (مطابق شکل ۴) بیان می‌شود که خطوط آبخور را تشکیل می‌دهد. خطوط آبخور نیز به دلیل تقارن بدنه به صورت نیم عرض (نیمی از عرض آبخور) نمایش داده می‌شود. بنابراین می‌توان سه نمای بدنه را به صورت تصاویر خطوط بدنه بر سه صفحه روبرو، جانبی و بالا مطابق شکل ۲ بیان کرد که همگی به دلیل تقارن بدنه (چپ و راست) برای نیمی از بدنه ترسیم می‌شوند.

جدول آفست^۱

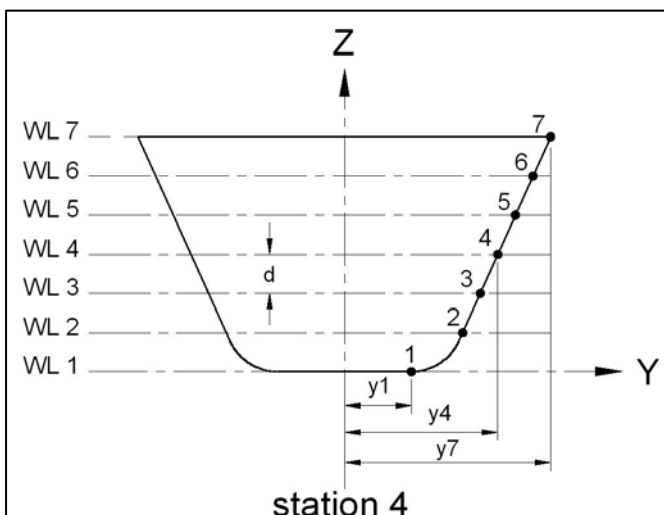
بیان داشتیم که شکل هندسی بدنه به وسیله خطوط بدنه در سه نما تبیین می‌گردد. هر یک از این سه نما توسط خطوطی نمایش داده می‌شوند که این خطوط نیز از نقاطی تشکیل شده‌اند. حال اگر مختصات این خطوط را در داخل جدولی داشته باشیم، می‌توانیم سه نمای بدنه را ترسیم کنیم. جدول آفست نیز جدولی است که به کمک آن می‌توانیم «نمای روبرو» و «نمای آبخور» را بطور مستقیم و «نمای جانبی» را نیز به طور غیر مستقیم ترسیم کنیم.

مطابق شکل ۵، سطر فوقانی نشان دهنده محل مقاطع عرضی و ستون اول نشان دهنده آبخورها می‌باشد. این شناور دارای ۷ آبخور و ۱۳ مقطع عرضی است.

Station Water Line	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
WL 1				y_1									
WL 2				y_2									
WL 3				y_3									
WL 4				y_4									
WL 5				y_5									
WL 6				y_6									
WL 7				y_7									

شکل ۵ : جدول آفست شناور

بطور مثال اگر طول بدنه شناور ۱۳۰ متر و عمق بدنه ۶ متر باشد، فواصل هر یک از مقاطع عرضی ۱۰ متر و فواصل هر یک از آبخورها ۱ متر می باشد.



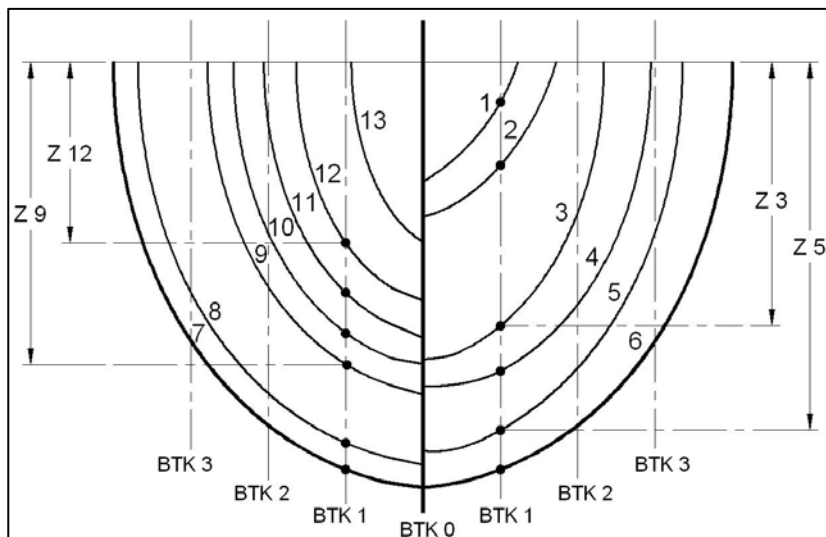
شکل ۶: مختصات دهی مقطع عرضی و تکمیل جدول آفست

مطابق شکل ۶ فرض کنید می‌خواهیم جدول آفست را برای مقطع ۴ تکمیل کنیم. فاصله نیم عرض آب‌خور WL1 با بدنه برابر y_1 ، و نیم عرض آب‌خور WL4 برابر y_4 است و همچنین برای کلیه آب‌خورها نیز به همین ترتیب فواصل نیم عرض استخراج و در جدول آفست وارد می‌شود. در واقع اگر محور طولی x ، محور عرضی y و محور عمودی برابر z باشد، جدول آفست بیانگر مختصات (y, z) در هر مقطع عرضی است. y در هر نقطه از روی شکل خوانده می‌شود و z نیز برای هر آب‌خور، مشخص می‌باشد. مثلاً برای مختصات نقطه ۴ داریم (y_4, z_4) که $z_4 = 3 \times d = 3 \times 1 = 3m$ (فواصل آب‌خورها در مثال فوق ۱ متر در نظر گرفته شد) و برای نقطه ۷ داریم: (y_7, z_7) که $z_7 = 6 \times d = 6 \times 1 = 6m$ اگر این مختصات را برای کلیه مقاطع عرض وارد کنیم، جدول آفست تکمیل می‌گردد.

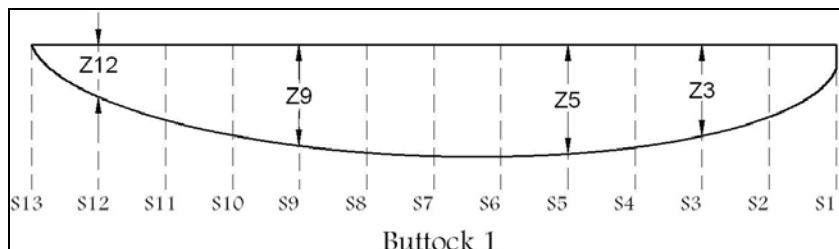
از جدول آفست می‌توان به راحتی نمای مقابل و نمای آب‌خور را مستقیماً ترسیم کرد ولی نمای جانبی را نمی‌توان به طور مستقیم از جدول آفست ترسیم نمود بلکه باید نمای مقابل را ترسیم کرده و با اندازه‌گیری فواصل عمودی هر نقطه از مقاطع، بتوان خطوط «باتوک» را ترسیم کرد.

اگر نمای جانبی دارای سه خط برش باشد، فاصله عمودی محل تقاطع آنها با مقاطع عرضی را اندازه‌گیری و ترسیم می‌کنیم.

مثلاً اگر بخواهیم Btk1 را ترسیم کنیم، فواصل عمودی را به صورت زیر استخراج و رسم می‌کنیم (شکل ۷ و ۸).



شکل ۷: استخراج مختصات باتوک ۱ از نمای مقابل



شکل ۸: ترسیم نمای جانبی (باتوک ۱) با توجه به شکل ۷

این مختصات‌ها در جدولی به نام جدول «خطوط نمای جانبی» به صورت زیر (شکل ۹) نمایش داده می‌شوند.

محل مقاطع عرضی	فواصل عمودی از عرشه
S1	Z_1
S2	Z_2
S3	Z_3
S4	Z_4
S5	Z_5
S6	Z_6
S7	Z_7
S8	
S9	Z_9
S10	Z_{10}
S11	Z_{11}
S12	Z_{12}
S13	Z_{13}

شکل ۹: مختصات Butock 1

برای سایر برش‌های جانبی نیز به همین ترتیب (مطابق شکل ۱۰)، جدول فوق تکمیل می‌گردد.

Station ultock	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Btk 1	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃
Btk 2													
Btk 3													

شکل ۱۰: جدول مختصات نمای جانبی

*** استخراج جدول آفست برای شناور ساخته شده**

در برخی موارد، در شناورهای قدیمی، دفترچه پایداری^۱ شناور که جزء مدارک ضروری شناور است، مفقود گردیده و این محاسبات باید مجدداً برای شناور انجام شود. نقطه شروع برای تهیه این مدارک، تهیه جدول آفست می باشد که باید از روی بدنه ساخته شده استخراج گردد. اقلام مورد نیاز برای این کار عبارت است از:

- شاقول

- ریسمان طویل

- خط کش

مراحل به ترتیب زیر انجام می شوند:

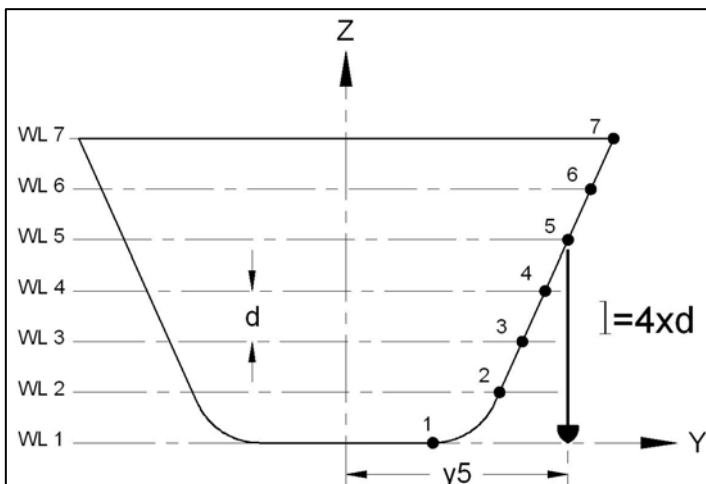
۱- اندازه گیری طول شناور به کمک ریسمان و ترسیم خط مستقیم کنار شناور (برابر با طول شناور و موازی با خط مرکزی)

۲- تعیین محل مقاطع عرضی در نظر گرفته شده بر روی خط ترسیم شده در کنار

شناور

۳- اندازه‌گیری عمق بدنه با استفاده از ریسمان و در نظر گرفتن تعدادی آبخور و تعیین فواصل آبخورها

۴- در هر مقطع مشخص، چسباندن شاقول با طولی برابر ارتفاع آبخور به بدنه و تعیین نیم عرض (مطابق شکل ۱۱)



شکل ۱۱: اندازه‌گیری فاصله نیم‌عرض با استفاده از شاقول

فرض کنید محل مقاطع عرضی مشخص شده باشد و بخواهیم نیم عرض‌ها را در مقطع ۴ از بدنه استخراج کنیم. به طور مثال برای WL5 که ارتفاع آبخور برابر $4d$ می‌باشد (فواصل آبخورها برابر d)، طول ریسمان شاقول را به اندازه $L=4d$ جدا می‌کنیم و این طول را به بدنه می‌چسبانیم. محل تماس ریسمان با بدنه همان محل آبخور WL5 است. فاصله پای شاقول را از خط مرکزی اندازه گرفته و آن نیم عرض را وارد جدول آفست می‌کنیم. این نیم عرض برای آبخور WL5 برابر y_5 می‌باشد. برای استخراج نیم عرض در آبخور بعد، طول ریسمان شاقول را به اندازه $5d$ جدا کرده و به بدنه می‌چسبانیم و در محل تماس، نیم عرض y_6 را استخراج می‌کنیم.

برای تکمیل جدول آفست، این فرآیند را برای کلیه آبخورها و در تمام مقاطع عرضی انجام می‌دهیم.

* جداول سری ۶۰^۱

جدول آفست همانطور که بیان شد، بیانگر شکل هندسی بدنه می‌باشد و بدنه نیز باید بطور کامل همخوان با جریان سیال^۲ باشد. از این رو استخراج جداول آفست مناسب از مدل بسیار مشکل است و لذا این جداول برای انواع شناورها به صورت جداولی به نام «جداول سری ۶۰» ارائه شده است. طول، عرض و ارتفاع بدنه به صورت واحد طول داده شده است، به صورتی که می‌توان آن را در طول، عرض و ارتفاع شناور مورد نظر ضرب کرد و به ابعاد واقعی شناور دست یافت. یعنی در واقع، نیم عرض‌های داده شده در جداول سری ۶۰ برای واحد ابعاد هستند و این مقادیر باید در مقیاس ضرب شوند.

انتخاب جدول مناسب از بین جداول موجود برای شناور موضوع طراحی، به کمک ضرایب بی‌بعد بدنه مانند ضریب بلوکی (C_B) انجام می‌شود. این ضرایب در بالای هر یک از جداول سری ۶۰ بطور جداگانه داده شده است و نامی از نوع شناور برای هر جدول به میان نمی‌آید. بدین ترتیب برای انتخاب جدول آفست باید به صورت تقریبی، محدوده ضرایب بی‌بعد شکل هندسی شناور را در اختیار داشت. در شکل ۱۲ یک نمونه از جدول آفست به همراه ضرایب آن داده شده است.

1 - Tables of 60 series

2 - fair

WL Section	1	2	3	4	5	6	7
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.0600	0.25985	0.42000
1	0.00937	0.06995	0.08571	0.11785	0.3075	0.52900	0.60623
2	0.04368	0.18956	0.23539	0.32301	0.5363	0.70777	0.83392
3	0.11346	0.32641	0.41355	0.54217	0.7259	0.84409	0.92008
4	0.20723	0.47752	0.59302	0.73063	0.8569	0.93262	0.98408
5	0.31356	0.63511	0.75655	0.86216	0.93739	0.97692	0.99254
6	0.42144	0.77447	0.88332	0.94493	0.97677	0.98985	1.00000
7	0.51928	0.88285	0.96493	0.98762	0.99339	0.99785	1.00000
8	0.59647	0.94691	0.99254	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
9	0.65449	0.98147	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
10	0.67688	0.99162	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
11	0.64009	0.97401	0.99377	0.99873	0.99878	1.00000	1.00000
12	0.56494	0.92994	0.97163	0.97629	0.97825	0.98156	0.98287
13	0.45202	0.84949	0.90690	0.91883	0.92612	0.93775	0.94897
14	0.31884	0.73326	0.80639	0.83430	0.84391	0.86391	0.89381
15	0.18894	0.59078	0.66612	0.69679	0.72341	0.75334	0.80958
16	0.09348	0.43761	0.50834	0.54003	0.56638	0.61269	0.68461
17	0.03803	0.29659	0.35082	0.37185	0.39622	0.43857	0.53351
18	0.01447	0.17940	0.20729	0.21664	0.23267	0.27235	0.36370
19	0.00835	0.08340	0.08978	0.09346	0.10346	0.13381	0.19851
20	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01900	0.04100

شکل ۱۲: نمونه‌ای از جدول سری ۶۰

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا...

نام شناور: بارج ۱۵۰۰۰ تنی



شرکت سازنده: کشتی سازی خلیج فارس

جابجایی: ۱۵۰۰۰ تن

طول: ۱۳۰/۴ متر

عرض: ۲۹/۸ متر

ارتفاع: ۸/۳ متر

بخش ۱-۴: مشخصات شناورهای الگو

برای ارائه مثال‌ها در این کتاب، دو شناور به عنوان شناورهای الگو انتخاب شده‌اند که دارای ابعاد یکسانی هستند. ابعاد یکسان بین این دو شناور برای امکان مقایسه بین مولفه‌های پایداری می‌باشد. این دو شناور عبارتند از:

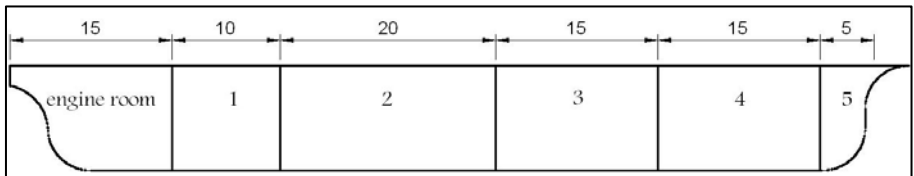
(الف) کشتی حمل کالای عمومی

(ب) بارج

مشخصات هر یک از این شناورها در زیر ارائه می‌گردد:

الف) کشتی حمل کالای عمومی^۱

جایجایی:	۳۵۰۰ تن	حداکثر آب‌خور: ۵ متر
طول کلی:	۸۶/۵ متر	عمق بدنه: ۶ متر
طول بین دو عمود:	۸۰ متر	تعداد انبارها: ۴ انبار (مطابق شکل ۱)
حداکثر عرض:	۱۳/۶ متر	مخزن بالاست پاشنه: ۲۱ متر مکعب با $X=5$ متر از عمود پاشنه
حداکثر عرض در آب‌خور تابستان:	۱۳/۴۸ متر	مخزن بالاست سینه: ۶۶ متر مکعب با $X=7.5$ متر جلوی عمود پاشنه



شکل ۱: طول بین دو عمود، طول کلی و طول انبارهای شناور مدل ۱

مقدار دقیق تناژ یا جابجایی این کشتی در آبخور تابستان ۳۵۶۰/۲ تن می باشد که برای ساده تر شدن حل مسائل، ۳۵۰۰ تن فرض می شود ولی در نمودارهای ارائه شده (که به کمک نرم افزار autoship برای این کشتی ارائه شده)، مقدار دقیق آن ذکر شده است.

فواصل بین آبخورها، مقاطع عرضی و برش های طولی (باتوک) و همچنین جدول آفست این کشتی به صورت زیر می باشد:

Station Locations

Offset Half-Breadths(mm)

Sta	Loc.(mm)	Sta	WL 5	WL 4	WL 3	WL 2	WL 1	WL 0
A41	A41000	A41	377	0	0	0	0	0
A40	A40000	A40	675	195	0	0	0	0
A39	A39000	A39	1089	520	111	0	0	0
A38	A38000	A38	1542	886	415	83	0	0
A37	A37000	A37	1989	1270	762	351	45	0
A36	A36000	A36	2433	1660	1098	629	278	0
A32	A32000	A32	4084	3230	2450	1814	1219	628
A28	A28000	A28	5290	4571	3814	3063	2314	1476
A24	A24000	A24	6004	5512	4937	4259	3481	2397
A20	A20000	A20	6434	6133	5761	5221	4573	3439
A16	A16000	A16	6628	6458	6223	5887	5433	4726
A12	A12000	A12	5705	6595	6444	6206	5851	5326
A8	A8000	A8	6724	6623	6482	6260	5925	5394
A4	A4000	A4	6744	6650	6521	6316	6001	5462
0	0	0	6763	6678	6560	6374	6078	5531
F4	F4000	F4	6782	6706	6600	6435	6157	5601
F8	F8000	F8	6801	6735	6641	6498	6234	5669
F12	F12000	F12	6821	6763	6683	6562	6313	5738
F16	F16000	F16	6807	6730	6624	6454	6069	5292
F20	F20000	F20	6765	6617	6430	6077	5326	4338
F24	F24000	F24	6656	6428	6093	5387	4272	3145
F28	F28000	F28	6478	6118	5470	4254	2932	1898
F32	F32000	F32	6115	5556	4379	2747	1276	699
F33	F33000	F33	6015	5358	4034	2302	884	414
F34	F34000	F34	5839	5110	3654	1778	439	118
F35	F35000	F35	5631	4811	3242	1139	0	0
F36	F36000	F36	5416	4490	2809	447	0	0
F37	F37000	F37	5180	4144	2337	0	0	0
F38	F38000	F38	4914	3769	1803	0	0	0
F39	F39000	F39	4609	3360	1181	0	0	0
F40	F40000	F40	4256	2917	414	0	0	0
F41	F41000	F41	3930	2470	0	0	0	0

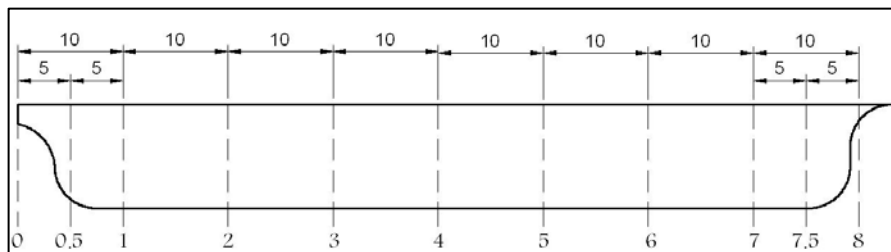
برای حل مسائل مرتبط با این کشتی و برای جلوگیری از طولانی شدن غیر ضروری حل مسائل، جدول آفست به صورت زیر خلاصه شده است که دارای مقاطع عرضی 0 تا ۸ با فواصل ۱۰ متر می باشد و بین مقاطع 0 و ۱ و همچنین مقاطع ۷ و ۸ یک مقطع اضافی دیگر هم در نظر گرفته شده است به گونه ای که بتوان شکل مناسبی از انحناى سینه و پاشنه در اختیار داشت.

فواصل بین مقاطع در شکل ۲ ملاحظه می شود. از این کشتی در طول کتاب با عنوان «کشتی مدل ۱» یاد می شود.

Station Locations		Buttock Locations		Waterline Locations	
Sta	Loc.(mm)	Butt	Loc.(mm)	WL	Loc.(mm)
A40	A40000	Butt 1	0	WL 0	0
A35	A35000	Butt 2	P1700	WL 1	U1000
A30	A30000	Butt 3	P3400	WL 2	U2000
A20	A20000	Butt 4	P5100	WL 3	U3000
A10	A10000	Butt 5	P6800	WL 4	U4000
0	0			WL 5	U5000
F10	F10000			WL 6	U6000
F20	F20000				
F30	F30000				
F35	F35000				
F40	F40000				

Offset Half-Breadths(m)								
Number	Location	WL0	WL1	WL2	WL3	WL4	WL5	WL6
0	A40	0	0	0	0	0	0.197	0.68
0.5	A35	0	0.113	0.481	0.911	1.428	2.075	2.878
1	A30	0	1.021	1.755	2.443	3.171	3.959	4.75
2	A20	0	3.438	4.569	5.219	5.76	6.131	6.634
3	A10	0	5.357	5.885	6.225	6.453	6.603	6.715
4	0	0	5.524	6.072	6.37	6.553	6.673	6.763
5	F10	0	5.696	6.268	6.528	6.658	6.746	6.811
6	F20	0	4.332	5.328	6.073	6.423	6.617	6.765
7	F30	0	1.333	2.179	3.559	4.982	5.879	6.324
7.5	F35	0	0	0	1.139	3.239	4.804	5.625
8	F40	0	0	0	0	0.416	2.919	4.251

Offset Heights(m)						
Number	Location	Butt 1	Butt 2	Butt 3	Butt 4	Butt 5
0	A40	4.708	7.471	0	0	0
0.5	A35	0.691	4.469	6.605	0	0
1	A30	0.026	1.922	4.292	6.445	0
2	A20	0.011	0.257	0.98	2.801	0
3	A10	0.009	0.079	0.316	0.764	0
4	0	0.007	0.042	0.209	0.628	0
5	F10	0.004	0.01	0.108	0.491	6.904
6	F20	0.003	0.03	0.466	1.764	0
7	F30	7.25	1.509	2.894	4.097	0
7.5	F35	2.115	3.237	4.09	5.261	0
8	F40	3.895	4.411	5.285	0	0



شکل ۲: فواصل بین مقاطع کشتی مدل ۱

(ب) بارج :

جایابی :	۵۵۷۰ تن
طول :	۸۰ متر
عرض :	۱۳/۶ متر
عمق :	۶ متر
آبخور	۵ متر

از این شناور در طول کتاب با عنوان «شناور مدل ۲» یاد می‌شود.

بخش ۱-۵:^۱

برخی اصطلاحات رایج برای انواع زوایای کجی عرضی شناور

سه تعریف مختلف از زوایای عرضی شناور وجود دارد: زاویه هیل^۲، لیست^۳ و زاویه لل^۴.

زاویه هیل:

هنگامیکه شناور بر اثر یک نیروی خارجی (مانند موج و باد)، دچار تغییر زاویه عرضی می‌شود، این زاویه را «زاویه هیل» گویند. این زاویه حالت ایستایی دارد و هنگامیکه حرکت نوسانی شناور بر اثر یک نیروی خارجی مد نظر باشد، به آن حرکت «رول» گویند.

زاویه لیست:

هنگامیکه شناور بر اثر یک نیروی داخلی (مثلاً جابجایی عرضی یک کانتینر یا بار داخل انبار) دچار تغییر زاویه عرضی می‌شود و به یک طرف متمایل می‌گردد، به آن «زاویه لیست» گویند.

زاویه لل:

اگر شناور دارای ارتفاع متاستر اولیه منفی باشد تا زاویه‌ای به نام «زاویه لل» کج خواهد شد تا جاییکه مرکز بویانسی جابجا شده و امتداد نیروهای وزن و بویانسی در یک راستا قرار گیرند و در این حالت نقطه پرومتاستر بر روی مرکز ثقل قرار گرفته است در حالیکه قبل از کج شدن، نقطه متاستر در زیر مرکز ثقل قرار گرفته بود و تعادل ناپایدار داشتیم. در واقع زاویه لل ناشی از ناپایداری شناور است که می‌تواند

۱- منابع: [4] , [14]

2 - Heel

3 - List

4 - Loll

ناشی از قرار گرفتن بارهای سنگین در نقاط مرتفع کشتی باشد به گونه‌ای که باعث بالا آمدن مرکز ثقل تا بالای متاستر شده و ارتفاع متاستری منفی ایجاد کرده است (توجه شود که قرار گرفتن این بارها منطبق بر خط مرکزی انجام و باعث ایجاد زاویه لول شده است). (بارگذاری نامتقارن روی کشتی در واقع باعث ایجاد زاویه‌ای می‌شود که بدان «لیست» گویند)).

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا...

نام شناور: سکوی حفاری نیمه شناور - البرز



شرکت سازنده: شرکت صدرا

طول: ۹۸/۶ متر

عرض: ۷۸/۸ متر

ارتفاع: ۳۶/۵

این سکو، اولین سکوی حفاری نیمه شناور می باشد که در شرکت صدرا نکاء ساخته شده است. در قسمت مرکزی این سکو، دکل حفاری وجود دارد که ارتفاع آن ۶۱/۵ متر می باشد. ابعاد عظیم این سکو در شکل های بالا مشخص است.

بخش ۱-۶: روشهای انتگرال گیری عددی

استفاده از روابط و فرمولهای انتگرال گیری بر یک منحنی، مستلزم موجود بودن معادله منحنی می باشد، یعنی داریم:

$$A = \int y dx, \quad y = f(x)$$

اگر رابطه $y = f(x)$ در دسترس نباشد باید به کمک روشهای عددی، رابطه $\int y dx$ محاسبه گردد. محاسبه سطح، حجم، ممان اول و ممان دوم سطح و حجم از کاربردهای انتگرال گیری عددی است. معمولاً در کاربردهای مهندسی دریایی نیاز به محاسبه مساحت، مرکز سطح، ممان دوم سطح، حجم و مرکز حجم می باشد. از طرفی به جای معادله منحنی، مختصات نقاط آنها در جدول آفست وجود دارد. لذا باید بتوان از اطلاعات عددی موجود و به کمک روشهای مختلف انتگرال گیری عددی، مشخصات مطلوب را محاسبه کرد. مهمترین روشهای انتگرال گیری عددی عبارتند از:

۱- روش سیمسون

۲- روش دوزنقه

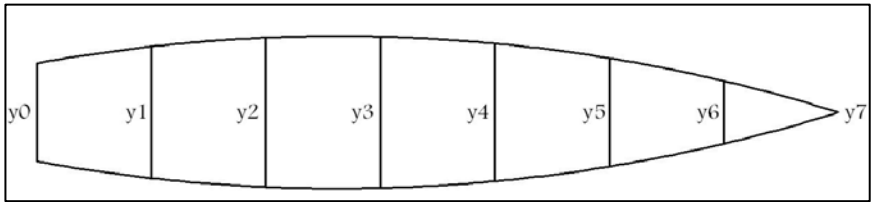
۳- روش چپچف

۴- روش نیوتن

۵- روش گاوس

* کلیات روش انتگرال گیری عددی

فرض کنید محاسبه مساحت سطح آبخور شناور مطلوب است. عرض های سطح آبخور از جدول آفست به صورت زیر به دست می آید (مطابق شکل ۱):

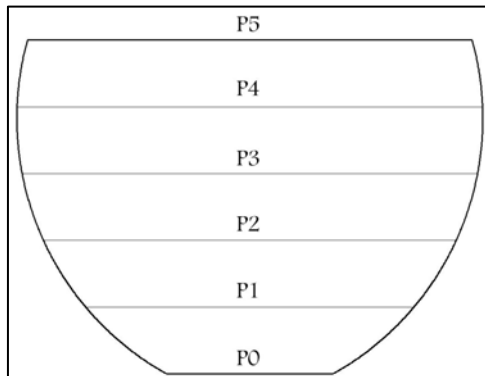


شکل ۱: عرض‌های صفحه آبخور در یک آبخور مشخص که از جدول آفست شناور بدست می‌آید.

مساحت این سطح به روش عددی، از رابطه کلی زیر به دست می‌آید:

$$A_w = K_1(a_0y_0 + a_1y_1 + a_2y_2 + \dots + a_7y_7)$$

محاسبه مساحت مقطع عرضی بدنه نیز به کمک عرض‌های موجود در جدول آفست به صورت زیر می‌باشد (مطابق شکل ۲):

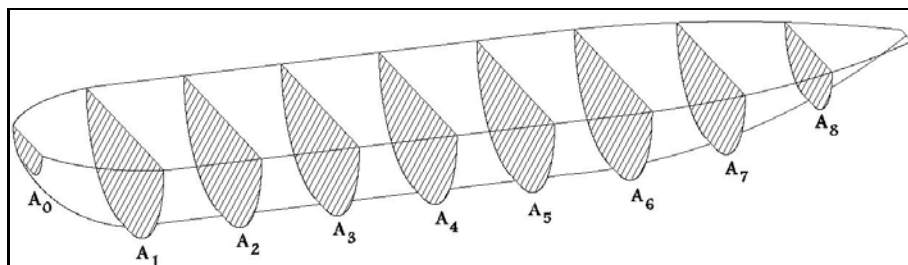


شکل ۲: محاسبه مساحت عرضی با استفاده از عرض‌های بدنه در آبخورهای مختلف

$$A_s = K_2(b_0p_0 + b_1p_1 + \dots + b_5p_5)$$

توجه شود که منظور از p نیز همان مقادیر عرض آبخور است.

محاسبه حجم بدنه نیز به کمک مساحت مقاطع عرضی بدنه به صورت زیر به دست می آید (مطابق شکل ۳)



شکل ۳: محاسبه حجم بدنه با اعمال قوانین انتگرال گیری عددی بر روی مساحت مقاطع عرضی

$$V = K_3(C_0A_0 + C_1A_1 + C_2A_2 + \dots + C_7A_7)$$

توجه شود که در محاسبه حجم، هر یک از مقادیر A_0 تا A_7 خود به کمک روش های عددی که توضیح داده شد، بدست می آیند. ضرایب موجود K_3, K_2, K_1 و ضرایب مختلف a, b, c در هر روش انتگرال گیری عددی مقادیر متفاوتی هستند که در قسمت بعد به آنها اشاره می گردد.

هر یک از روش های انتگرال گیری عددی در زیر بررسی می شوند:

۱- روش سیمسون^۱:

روش سیمسون به سه حالت کلی وجود دارد :

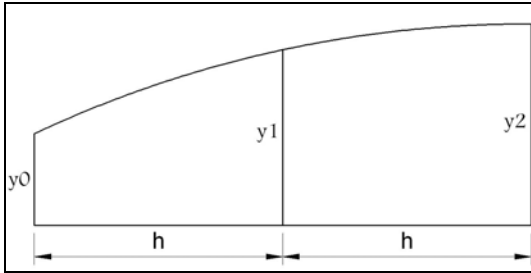
الف- قانون سیمسون اول (برای تعداد فواصل بین مقاطع مضربی از ۲)

ب- قانون سیمسون دوم (برای تعداد فواصل بین مقاطع مضربی از ۳)

ج- قانون (۱ - ۸ - ۵) که شکل دیگری از قانون سیمسون اول است .

با توجه به تعداد مقاطع یا نیم عرض‌های موجود (که از جدول آفست به دست می‌آیند) می‌توان یکی از روشهای فوق را انتخاب کرد:

الف) قانون اول سیمسون:

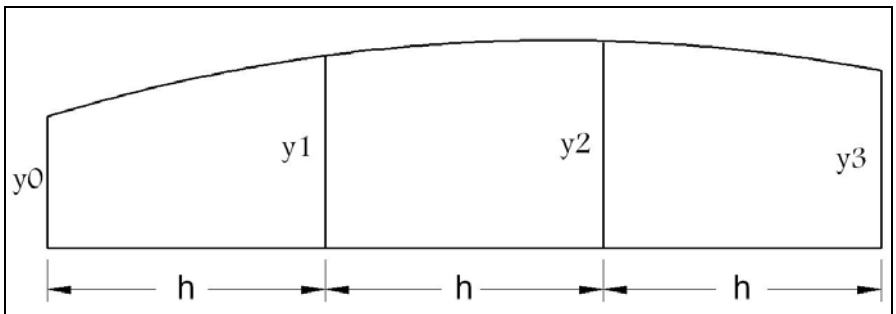


شکل ۴: حداقل تعداد مقاطع برای استفاده از سیمسون اول

اگر تعداد فواصل بین مقاطع مضربی از ۲ باشد (مطابق شکل ۴) می‌توان این قانون را بکار برد:

$$\text{مساحت} = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2)$$

فواصل بین مقاطع برابر h می‌باشد. به همین ترتیب برای تعداد بیشتری از مقاطع داریم (شکل ۵):



شکل ۵: تعداد بیشتری از مقاطع برای استفاده از سیمسون اول

مساحت ۲ + مساحت ۱ = مساحت کل

$$\text{مساحت کل} = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2) + \frac{h}{3}(y_2 + 4y_3 + y_4)$$

$$= \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + y_4)$$

بنابراین ضریب K برای این روش برابر $\frac{h}{3}$ و ضرایب داخل پرانتز برابر است با:

$$\begin{matrix} 1 & 4 & 1 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 1 & 4 & 2 & 4 & 1 \end{matrix} \quad \text{یا}$$

که اگر مقدار تعداد مقاطع به همین نسبت افزایش یابد، ضرایب نیز به همین ترتیب تغییر می‌یابند.

* اثبات قانون اول سیمسون:

در قانون اول فرض می‌شود که منحنی گذرنده از مقاطع از درجه ۲ باشد (مطابق شکل ۴):

$$y = ax^2 + bx + c$$

$$A = \int_0^{2h} (ax^2 + bx + c) dx$$

$$= \left[\frac{ax^3}{3} + \frac{bx^2}{2} + cx + d \right]_0^{2h}$$

$$= \frac{8h^3}{3}a + \frac{4h^2}{2}b + 2hc \quad (*)$$

$$x = 0 \rightarrow y_0 = c$$

$$x = h \rightarrow y_1 = h^2a + hb + c$$

$$x = 2h \rightarrow y_2 = 4h^2a + 2hb + c$$

$$y_1 - y_0 = h^2 a + hb$$

$$y_2 - y_0 = 4h^2 a + 2hb$$

$$(y_2 - y_0) - 2(y_1 - y_0) = 2h^2 a \rightarrow a = \frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{2h^2}$$

$$(y_2 - y_0) - 4(y_1 - y_0) = -2hb \rightarrow b = \frac{-3y_0 + 4y_1 - y_2}{2h}$$

$$y_0 = c \rightarrow c = y_0$$

با جاگذاری مقادیر a , b , c در رابطه مساحت * داریم:

$$\text{مساحت} = \frac{8h^3}{3} \frac{(y_0 - 2y_1 + y_2)}{2h^2} + \frac{4h^2}{2} \frac{(-3y_0 + 4y_1 - y_2)}{2h} + 2hy_0$$

$$= \frac{4h}{3} (y_0 - 2y_1 + y_2) + h(-3y_0 + 4y_1 - y_2) + 2hy_0$$

$$= h\left(\frac{1}{3}y_0 + \frac{4}{3}y_1 + \frac{1}{3}y_2\right)$$

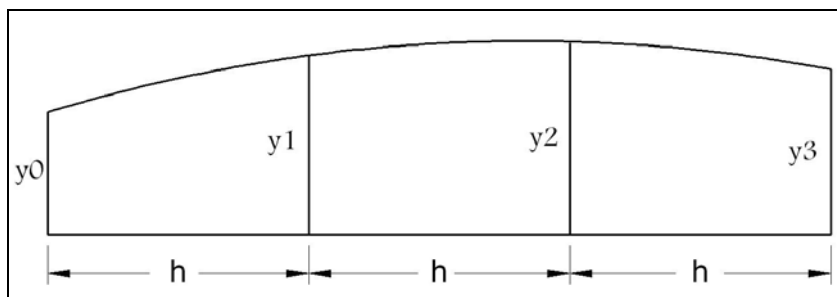
بنابراین:

$$\text{مساحت} = \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + y_2)$$

ب) قانون دوم سیمسون:

این قانون در مواقعی بکار می‌رود که فواصل بین مقاطع، مضربی از ۳ باشد. بدین

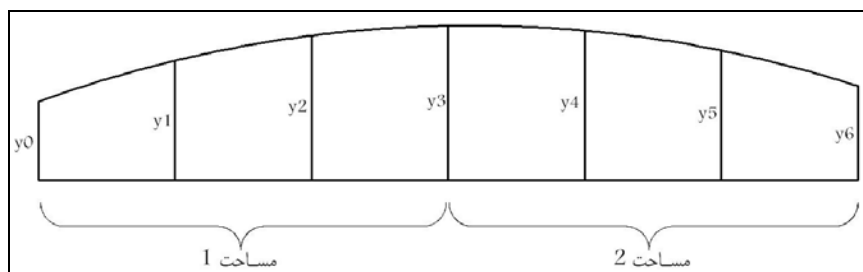
ترتیب داریم:



شکل ۶: حداقل تعداد عرض‌ها برای استفاده از سیمسون دوم

$$\text{مساحت} = \frac{3h}{8}(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + y_3)$$

و همچنین می‌توانیم داشته باشیم:



شکل ۷: نسبت افزایش مقاطع برای استفاده از سیمسون دوم

$$\begin{aligned} \text{مساحت} &= \frac{3}{8}h(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + y_3) + \frac{3}{8}h(y_3 + 3y_4 + 3y_5 + y_6) \\ &= \frac{3}{8}h(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + 2y_3 + 3y_4 + 3y_5 + y_6) \end{aligned}$$

بنابراین ضریب K (ضریب پشت پرانتز) برای این روش برابر $\frac{3h}{8}$ و ضرایب

داخل پرانتز برابرند با:

$$1 \quad 3 \quad 3 \quad 1$$

$$1 \quad 3 \quad 3 \quad 2 \quad 3 \quad 3 \quad 1 \quad \text{یا}$$

و اگر تعداد مقاطع به همین نسبت افزایش یابد، ضرایب به همین ترتیب تغییر می‌کنند.

* اثبات قانون دوم سیمسون:

در این قانون فرض بر این است که منحنی گذرنده از مقاطع از درجه ۳ باشد (مطابق شکل ۶):

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

$$\text{مساحت} = \int_0^{3h} (ax^3 + bx^2 + cx + d) dx$$

$$= \left[\frac{a}{4} x^4 + \frac{b}{3} x^3 + \frac{c}{2} x^2 + dx \right]_0^{3h}$$

$$= \frac{81}{4} ah^4 + 9bh^3 + \frac{9}{2} ch^2 + 3dh \quad (**)$$

$$\boxed{y_0 = d}$$

$$x = 0 \rightarrow$$

$$x = h \rightarrow y_1 = ah^3 + bh^2 + ch + d$$

$$x = 2h \rightarrow y_2 = 8ah^3 + 4bh^2 + 2ch + d$$

$$x = 3h \rightarrow y_3 = 27ah^3 + 9bh^2 + 3ch + d$$

$$\begin{cases} y_1 - y_0 = ah^3 + bh^2 + ch \\ y_2 - y_0 = 8ah^3 + 4bh^2 + 2ch \\ y_3 - y_0 = 27ah^3 + 9bh^2 + 3ch \end{cases}$$

$$\begin{cases} (y_2 - y_0) - 2(y_1 - y_0) = 6ah^3 + 2bh^2 \\ (y_3 - y_0) - 3(y_1 - y_0) = 24ah^3 + 6bh^2 \end{cases}$$

$$(y_3 - y_0) - 3(y_1 - y_0) - 3[(y_2 - y_0) - 2(y_1 - y_0)] = 6ah^3$$

$$a = \frac{y_3 - 3y_2 + 3y_1 - y_0}{6h^3} \rightarrow$$

$$(y_3 - y_0) - 3(y_1 - y_0) - 4[(y_2 - y_0) - 2(y_1 - y_0)] = -2bh^2$$

$$b = \frac{y_3 - 4y_2 + 5y_1 - 2y_0}{-2h^2} \rightarrow$$

با جاگذاری مقادیر d, b, a در رابطه $y_1 - y_0$ داریم:

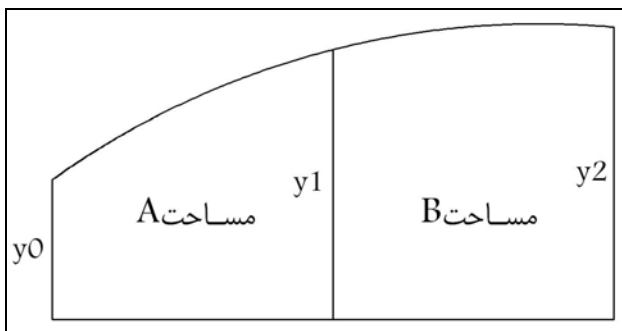
$$c = \frac{1}{h} \left(\frac{1}{3} y_3 + \frac{3}{2} y_2 + 3y_1 - \frac{11}{6} y_0 \right)$$

با قرار دادن مقادیر a, b, c, d در رابطه $***$ داریم:

$$\text{مساحت} = \frac{3}{8} h (y_3 + 3y_2 + 3y_1 + y_0)$$

ج) قانون ۱- ۸- ۵:

این قانون در مواقعی مطرح است که ۳ مقطع در اختیار داشته باشد ولی فقط مساحت بین دو مقطع مطلوب باشد. فرض کنید مساحت بین مقاطع y_1, y_0 (یعنی مساحت A) مطلوب باشد مطابق این قانون داریم (مطابق شکل ۸):



شکل ۸: محاسبه مساحت A با استفاده از نیم عرض های y_0 , y_1 , y_2

$$\text{مساحت A} = \frac{h}{12}(5y_0 + 8y_1 - y_2)$$

یعنی مقادیر ۱- ۸ ۵ همان ضرایب مقاطع هستند. به همین ترتیب اگر مساحت بین مقاطع y_1, y_2 (مساحت B) مد نظر باشد داریم :

$$\text{مساحت B} = \frac{h}{12}(5y_2 + 8y_1 - y_0)$$

این قانون شکل دیگری از قانون اول سیمسون است چرا که با جمع کردن مساحت های A و B قانون اول بدست می آید:

$$\text{مساحت کل} = \text{مساحت A} + \text{مساحت B} = \frac{h}{12}(4y_0 + 16y_1 + 4y_2)$$

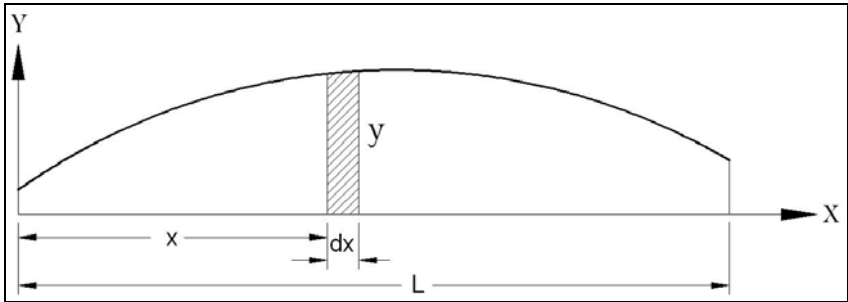
$$= \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2)$$

* کاربرد قوانین سیمسون در محاسبه ممان اول و دوم سطح :

محاسبه ممان اول سطح در به دست آوردن مرکز سطح کاربرد دارد. به طور مثال در سطح آبخور، بدست آوردن ممان اول سطح و در نتیجه مرکز سطح (به معنای به دست آوردن مرکز شناوری) می باشد. ممان اول حجم هم در به دست آوردن مرکز حجم (مرکز بویانسی) اهمیت دارد. ممان دوم سطح نیز در به دست آوردن شعاع متاستری شناور اهمیت دارد که در بخش های بعدی این کتاب بدان پرداخته می شود.

محاسبه ممان اول و ممان دوم سطح وابسته به اینکه حول محور طولی یا عرضی باشد، متفاوت است.

□ محاسبه ممان‌ها حول محور عرضی (محور Y) عبارتست از:



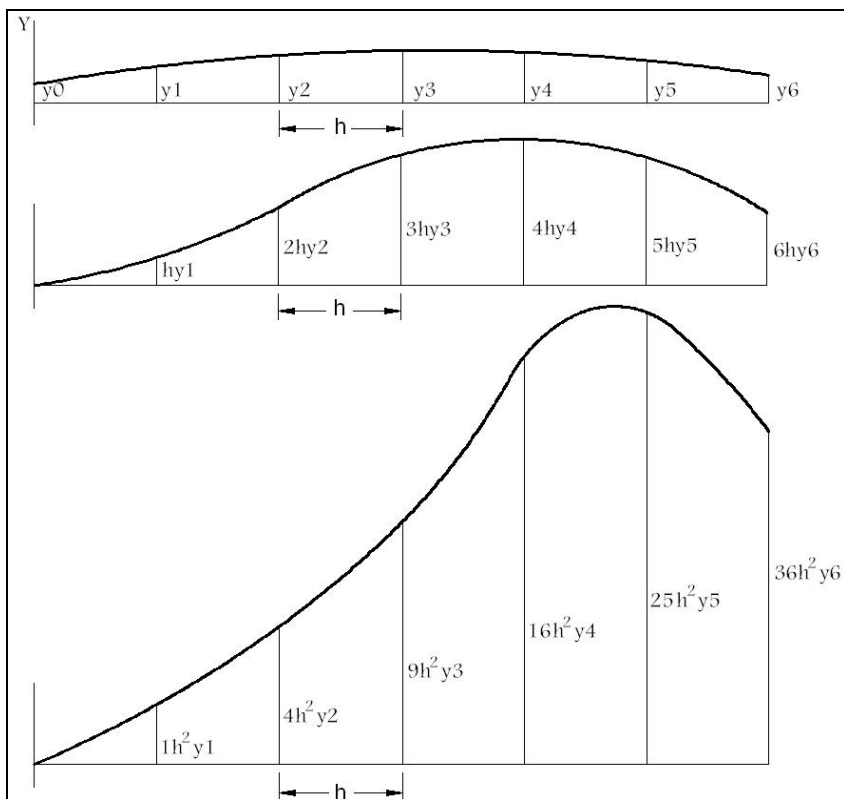
شکل ۹: المان سطح و ممان آن

$$\text{مساحت} = \int_0^L y dx$$

$$\text{ممان اول سطح حول محور YY} = \int_0^L y x dx$$

$$\text{ممان دوم سطح حول محور YY} = \int_0^L y x^2 dx$$

اگر بخواهیم انتگرال‌های فوق را به صورت عددی و مقاطع مشابه‌سازی کنیم داریم
(با استفاده از شکل ۱۰):



شکل ۱۰: معادل سازی مقادیر ممان اول و دوم به صورت مقاطع عرضی

محاسبه مساحت:

شماره مقطع	مقدار مقاطع (نیم عرض)	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F)
0	y_0	1	y_0
1	y_1	4	$4y_1$
2	y_2	2	$2y_2$
3	y_3	4	$4y_3$
4	y_4	2	$2y_4$
5	y_5	4	$4y_5$
6	y_6	1	y_6
مجموع			$\sum F$

$$\sum F = \text{تابع مساحت}$$

$$\text{مساحت} = \frac{h}{3} \sum F$$

محاسبه ممان اول سطح :

شماره مقطع	مقدار مقاطع	ضرایب سیمسون	حاصل ضرب (F1)
o	$0y_0$	1	0
1	hy_1	4	$4hy_1$
2	$2hy_2$	2	$4hy_2$
3	$3hy_3$	4	$12hy_3$
4	$4hy_4$	2	$8hy_4$
5	$5hy_5$	4	$20hy_5$
6	$6hy_6$	1	$6hy_6$
مجموع			$\sum F1$

$$\sum F1 = \text{تابع ممان اول سطح}$$

$$\text{ممان اول سطح} = \frac{h}{3} \sum F1$$

$$\bar{x} = \text{مرکز سطح} = \frac{\text{ممان اول سطح}}{\text{مساحت}} = \frac{\frac{h}{3} \cdot h \cdot \sum F1}{\frac{h}{3} \sum F} = \frac{h \times (\text{تابع اول})}{(\text{تابع سطح})}$$

محاسبه ممان دوم سطح :

شماره مقطع	مقدار مقاطع	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F2)
۰	$0y_0$	1	0
1	h^2y_1	4	$4h^2y_1$
2	$4h^2y_2$	2	$8h^2y_2$
3	$9h^2y_3$	4	$36h^2y_3$
4	$16h^2y_4$	2	$32h^2y_4$
5	$25h^2y_5$	4	$100h^2y_5$
6	$36h^2y_6$	1	$36h^2y_6$
مجموع			$\sum F2$

$$\sum F2 = \text{تابع ممان دوم سطح}$$

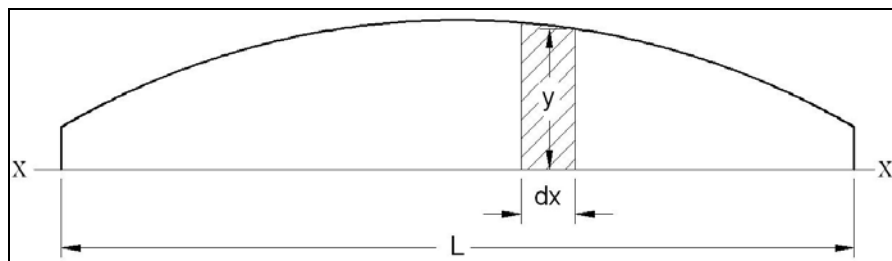
$$(I_{YY}) \text{ ممان دوم سطح} = \frac{h}{3} \cdot \sum F_2$$

برای محاسبات مربوط به پایداری طولی، بایستی ممان دوم سطح آبخور نسبت به محور عرضی گذرنده از مرکز سطح را داشته باشیم. بنابراین باید از قضیه محورهای موازی استفاده کنیم تا ممان دوم را از حول YY به حول محور گذرنده از مرکز سطح انتقال دهیم:

$$I_{NA} = I_{YY} - A.x^2$$

توجه شود که x (که همان فاصله طولی مرکز سطح می باشد) از قسمت قبل و از طریق محاسبه ممان اول به دست می آید.

محاسبه ممانها حول محور طولی:



شکل ۱۱: المان سطح و ممان آن

$$\text{ممان اول سطح حول } XX = \iint y dx dy = \int \frac{y^2}{2} dx$$

$$\text{ممان دوم سطح حول } XX = \iint y^2 dx dy = \int \frac{y^3}{3} dx$$

مشابه سازی انتگرال های فوق با انتگرال گیری عددی عبارتست از:

ممان اول حول محور XX

شماره مقطع	مقدار مقاطع	(مقدار مقطع) ^۲	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F1)
۰	y_0	y_0^2	1	y_0^2
1	y_1	y_1^2	4	$4y_1^2$
2	y_2	y_2^2	2	$2y_2^2$
3	y_3	y_3^2	4	$4y_3^2$
4	y_4	y_4^2	2	$2y_4^2$
5	y_5	y_5^2	4	$4y_5^2$
6	y_6	y_6^2	1	y_6^2
مجموع				$\sum F1$

$$XX = \sum F_1 \text{ ممان اول حول}$$

$$XX = \frac{h}{3} \left(\frac{1}{2} \right) \sum F_1 \text{ ممان اول حول}$$

$\frac{h}{3}$ به دلیل استفاده از سیمسون اول و $\frac{1}{2}$ نیز از فرمول ممان اول حول محور XX به دست آمده است.

ممان دوم حول محور XX :

شماره مقطع	مقدار مقاطع	مقدار مقطع ^۳	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F_1)
0	y_0	y_0^3	1	y_0^3
1	y_1	y_1^3	4	$4y_1^3$
2	y_2	y_2^3	2	$2y_2^3$
3	y_3	y_3^3	4	$4y_3^3$
4	y_4	y_4^3	2	$2y_4^3$
5	y_5	y_5^3	4	$4y_5^3$
6	y_6	y_6^3	1	y_6^3
مجموع				$\sum F_2$

$$XX = \sum F_2 \text{ ممان دوم حول}$$

$$XX = \frac{h}{3} \times \frac{1}{3} \times \sum F_2 \text{ ممان دوم حول}$$

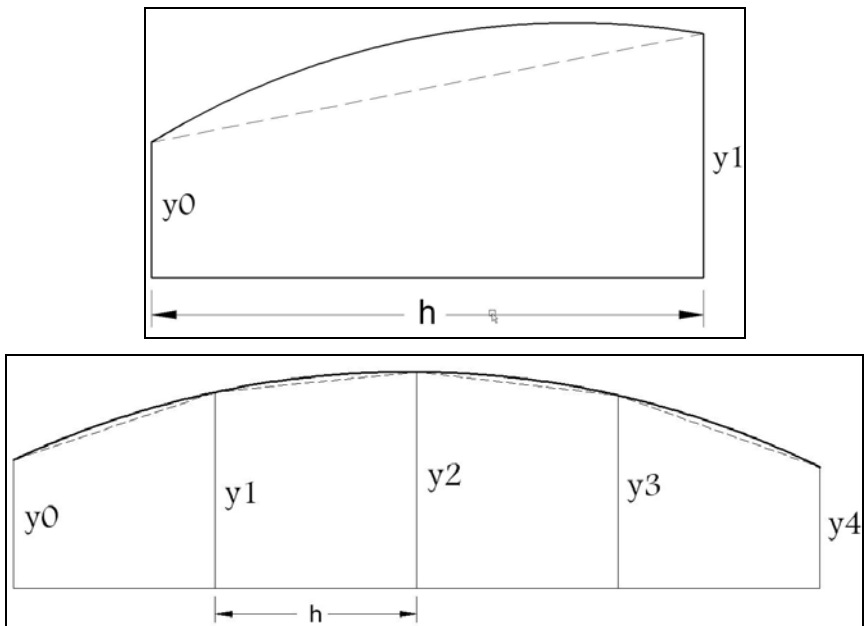
که $\frac{h}{3}$ به دلیل استفاده از سیمسون اول و مقدار $\frac{1}{3}$ نیز از فرمول ممان دوم سطح حول محور XX حاصل شده است.

توجه شود که اگر مقادیر y_0 تا y_6 برابر نیم عرض‌های صفحه آبخور باشند، برای کل سطح آبخور (دو طرف محور XX) داریم:

$$2 \times \frac{h}{3} \times \frac{1}{3} \sum F_2 = \text{ممان دوم کل سطح آبخور حول محور XX}$$

۲- روش دوزنقه:

در روش دوزنقه بین دو مقطع، یک خط درجه ۱ عبور داده می‌شود و با مشابه‌سازی مساحت بین دو مقطع به دوزنقه (شکل ۱۲)، مقدار مساحت و ممانهای سطح آن محاسبه می‌گردد:



شکل ۱۲: محاسبه مساحت با روش دوزنقه

$$y = ax + b$$

$$\text{مساحت برای دو نیم عرض} = \frac{h}{2}(y_0 + y_1)$$

$$\text{مساحت برای پنج نیم عرض} = \frac{h}{2}(y_0 + 2y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4)$$

مثال ۱: برای شناور مدل ۱، مساحت سطوح آبخور ۱، ۲ و ۳ متر را بدست آورید. حجم زیر آب بدنه را نیز در هریک از آبخورها محاسبه کنید.

حل: با استفاده از مشخصات خطوط بدنه و جدول آفست مدل ۱ داریم: فواصل

$$h = \frac{80}{8} = 10 \text{ m} \quad \text{بین این نیم عرض‌ها:}$$

فواصل بین مقاطع 1, 0.5, 0 و همچنین مقاطع 8, 7.5, 7 برابر است با:

$$h_1 = \frac{10}{2} = 5 \text{ m}$$

برای راحتی حل مسئله، اثر نصف شدن فواصل این نیم عرض‌ها در ضرایب سیمسون لحاظ شده است.

WATERLINE1 AREA			
تابع سطح	سیمسون	نیم عرض	شماره مقطع
0	0.5	0	0
0.226	2	0.113	0.5
1.5315	1.5	1.021	1
13.752	4	3.438	2
10.714	2	5.357	3
22.096	4	5.524	4
11.392	2	5.696	5
17.328	4	4.332	6
1.333	1	1.333	7

SUM=	78.3725
------	---------

$$a_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times h \times \text{sum} = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 78.37 = 522.48 \text{ m}^2 \quad \text{مساحت بین مقاطع 0 تا 7}$$

مساحت بین مقاطع 7.5، 7 با فاصله بین مقاطع ۵ متر از قانون دوزنقه استفاده می‌شود:

$$a_2 = \frac{h_1}{2} (y_7 + y_{7.5}) = \frac{5}{2} (1.333 + 0) = 3.33 \text{ m}^2 \quad \text{مساحت بین مقاطع 7 و 7.5}$$

$$A_1 = a_1 + a_2 = 522.48 + 3.33 = 525.81 \text{ m}^2$$

WL2 AREA				سیمسون	تابع سطح
شماره مقطع	نیم عرض				
0	0	$1 \times 0.5 = 0.5$		0.5	0
0.5	0.481	$4 \times 0.5 = 2$		2	0.962
1	1.755	$1 \times 0.5 = 0.5$	1	1.5	2.6325
2	4.569		3	3	13.707
3	5.885		3	3	17.655
4	6.072		2	2	12.144
5	6.268		3	3	18.804
6	5.328		3	3	15.984
7	2.179		1	1	2.179
7.5	0				

SUM=	84.0675
------	---------

$$a_1 = 2 \times \frac{3}{8} \times h \times \text{sum} = 2 \times \frac{3}{8} \times 10 \times 84.067 = 630.5 \text{ m}^2$$

$$a_2 = 3.33 \text{ m}^2$$

$$A_2 = a_1 + a_2 = 633.83 \text{ m}^2$$

WL3 AREA				سیمسون نهایی	تابع سطح
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	سیمسون		
0	0	$1 \times 0.5 = 0.5$		0.5	0
0.5	0.911	$4 \times 0.5 = 2$		2	1.822
1	2.443	$1 \times 0.5 = 0.5$	1	1.5	3.6645
2	5.219		3	4	20.876
3	6.225		3	2	12.45
4	6.37		2	4	25.48
5	6.528		3	2	13.056
6	6.073		3	4	24.292
7	3.559		1	$1 \times 0.5 = 0.5$	5.3385
7.5	1.139			$4 \times 0.5 = 2$	2.278
8	0			$1 \times 0.5 = 0.5$	0

SUM=	109.257
------	---------

$$A_3 = 2 \times \frac{1}{3} \times h \times \text{sum} = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 109.257 = 728.38 \text{ m}^2$$

مساحت این آبخور را به صورت زیر نیز می‌توان محاسبه کرد:

WL3 AREA							
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	سیمسون	سیمسون	تابع سطح	تابع سطح	تابع سطح
0	0	$1 \times 0.5 = 0.5$			0		
0.5	0.911	$4 \times 0.5 = 2$			1.822		
1	2.443	$1 \times 0.5 = 0.5$	1		1.2215	2.443	
2	5.219		3			15.657	
3	6.225		3			18.675	
4	6.37		2			12.74	
5	6.528		3			19.584	
6	6.073		3			18.219	
7	3.559		1	$1 \times 0.5 = 0.5$		3.559	1.7795
7.5	1.139			$4 \times 0.5 = 2$			2.278
8	0			$1 \times 0.5 = 0.5$			0

SUM=	3.0435	90.877	4.0575
------	--------	--------	--------

$$a_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times h_1 \times sum_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times 5 \times 3.04 = 10.03 \text{ m}^2$$

$$a_2 = 2 \times \frac{3}{8} \times h_1 \times sum_2 = 2 \times \frac{3}{8} \times 10 \times 90.877 = 681.57 \text{ m}^2$$

$$a_3 = 2 \times \frac{1}{3} \times h_1 \times sum_3 = 2 \times \frac{3}{8} \times 5 \times 4.057 = 15.21 \text{ m}^2$$

$$A_3 = a_1 + a_2 + a_3 = 706.81 \text{ m}^2$$

ملاحظه می‌شود که تفاوت مساحت A_3 در دو روش فوق، چندان زیاد نیست. پس از محاسبه مساحت هر آب‌خور می‌توانیم حجم زیر آب‌خور را بدست آوریم. همچنین با توجه به صفر بودن کلیه نیم عرض‌های آب‌خور 0، مساحت این آب‌خور نیز صفر است.

$$d = \frac{\text{draft}}{5} = \frac{5}{5} = 1 \text{ m}$$

فاصله بین آب‌خورها

صفحه آب‌خور	مساحت (m ²)
A_0	0
A_1	525.81
A_2	633.83
A_3	706.81

حجم زیر آب‌خور ۱ متر برابر حجم بین A_0 و A_1 می‌باشد:

VOLUME1			
	مساحت	سیمسون	تابع حجم
A_0	0	5	0
A_1	525.81	8	4206.48
A_2	633.83	-1	-633.83
SUM=			3572.65

$$V_1 = \frac{1}{12} \times d \times \text{sum} = \frac{1}{12} \times 1 \times 3572.65 = 297.72 \text{ m}^3$$

حجم زیر آبخورهای ۲ و ۳ متر نیز برابر است با:

VOLUME2			
	مساحت	سیمسون	تابع حجم
A ₀	0	1	0
A ₁	525.81	4	2103.24
A ₂	633.83	1	633.83
SUM=			2737.07

$$V_2 = \frac{1}{3} \times d \times sum = \frac{1}{3} \times 1 \times 2737.07 = 91236 \text{ m}^3$$

VOLUME3			
	مساحت	سیمسون	تابع حجم
A ₀	0	1	0
A ₁	525.81	3	1577.43
A ₂	633.83	3	1901.49
A ₃	706.81	1	706.81
SUM=			4185.73

$$V_3 = \frac{3}{8} \times d \times sum = \frac{3}{8} \times 1 \times 4185.73 = 1569.65 \text{ m}^3$$

مثال ۳: برای شناور مدل ۱، ممان اول و ممان دوم حول xx و yy و مرکز سطح آبخور ۶ را بدست آورید.

حل: با توجه به مقادیر نیم عرض در آبخور ۶ از جدول آفست داریم:

moments(Iyy) of waterline6							
تایع ممان دوم	بازو	تایع ممان اول	بازو	تایع سطح	سیمسون	نیم عرض	شماره مقطع
0	0	0	0	0.34	0.5	0.68	0
1.439	0.5	2.878	0.5	5.756	2	2.878	0.5
7.125	1	7.125	1	7.125	1.5	4.75	1
106.144	2	53.072	2	26.536	4	6.634	2
120.87	3	40.29	3	13.43	2	6.715	3
432.832	4	108.208	4	27.052	4	6.763	4
340.55	5	68.11	5	13.622	2	6.811	5
974.16	6	162.36	6	27.06	4	6.765	6
464.814	7	66.402	7	9.486	1.5	6.324	7
632.8125	7.5	84.375	7.5	11.25	2	5.625	7.5
136.032	8	17.004	8	2.1255	0.5	4.251	8

SUM=

143.7825

609.824

3216.779

$$h = \frac{80}{8} = 10 \text{ m}$$

$$\text{مساحت} = 2 \times \frac{1}{3} \times h \times \text{sum}_0 = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 143.78 = 958.53 \text{ m}^2$$

$$x = h \times \frac{\text{sum}_1}{\text{sum}_0} = 10 \times \frac{609.82}{143.78} = 42.41 \text{ m}$$

عمود پاشنه (AP)

برای محاسبه ممان دوم عرضی (Iyy) حول محور عرضی گذرنده از عمود پاشنه

$$I_{AP} = 2 \times \frac{1}{3} \times h^3 \times \text{sum}_2 = 2 \times \frac{1}{3} \times (10)^3 \times 3216.78 = 2142375.4 \text{ m}^4$$

داریم:

برای بدست آوردن ممان دوم عرضی حول محور عرضی گذرنده از مرکز سطح آبخور، با استفاده از قضیه محورهای موازی داریم:

$$I_{NA} = I_{AP} - A \cdot x^2 = 418355.6 \text{ m}^4$$

برای محاسبه ممان دوم حول محور طولی داریم:

Ixx OF WATERLINE 6				
شماره مقطع	نیم عرض	ت ^۳ (نیم عرض)	سیمسون	تابع ممان دوم
0	0.68	0.314	0.5	0.157
0.5	2.878	23.838	2	47.676
1	4.75	107.172	1.5	160.758
2	6.634	291.962	4	1167.848
3	6.715	302.788	2	605.575
4	6.763	309.327	4	1237.309
5	6.811	315.960	2	631.921
6	6.765	309.602	4	1238.407
7	6.324	252.916	1.5	379.373
7.5	5.625	177.979	2	355.957
8	4.251	76.820	0.5	38.410

SUM=	5863.392
------	----------

$$I_{xx} = 2 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times \text{sum} = 2 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times 5863.39 = 1302.97 \text{ m}^4$$

ضریب ۲ برای دو برابر کردن نیم عرض، ضریب‌های $\frac{1}{3}$ یکی برای سیمسون و

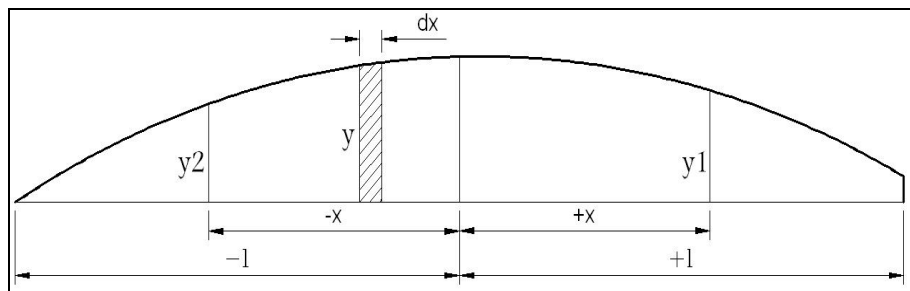
دیگری برای ضریب $\frac{1}{3}$ موجود در رابطه اصلی I_{xx} (مطابق فرمول صفحات قبل) می باشد.

در مثال فوق ملاحظه می شود که مقدار I_{yy} خیلی بزرگتر از I_{xx} است. در بخش های بعد از این موضوع برای توجیه بیشتر بودن پایداری طولی نسبت به پایداری عرضی استفاده می شود.

مقادیری که در این مثال‌ها بدست آمدند تا حدودی با مقادیری که در قسمت‌های بعدی کتاب با استفاده از نرم افزار autoship بدست آمده است، متفاوت است و علت آن نیز تعداد کم مقاطع در نظر گرفته شده برای حل مثال‌ها می باشد.

۳- روش چیبف^۱

در حل مسائل پایداری، اغلب از روش سیمسون و پس از آن از روش چیبف استفاده می‌شود. در این روش فرض کنید می‌خواهیم مساحت بین یک سطح محصور بین یک خط صاف و یک منحنی را محاسبه کنیم. برای محاسبه، این سطح را از نظر طولی به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم، به گونه‌ای که مطابق شکل ۱۳ فاصله خط مرکزی از ابتدا و انتهای منحنی برابر « $-l, +l$ » باشد. فواصل نیم عرض‌ها نیز به هر تعدادی که باشند باید نسبت به این خط متقارن باشند. توجه شود که فواصل نیم عرض‌ها باید نسبت به خط وسط متقارن باشند نه مقدار خود نیم عرض. در شکل ۱۳ فواصل نیم عرض‌ها از خط وسط برابر $+x, -x$ است.



شکل ۱۳: روش محاسبه مساحت از روش چیبف با تعداد دو نیم‌عرض

حال فرض کنید در شکل فوق، معادله منحنی به صورت زیر باشد:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

تعداد نیم عرض‌ها باید برابر با درجه منحنی باشد. مثلاً در شکل فوق، که معادله از درجه ۲ می‌باشد باید دو نیم عرض (y_2, y_1) داشته باشیم. به همین

ترتیب اگر معادله از درجه ۵ باشد باید ۵ نیم عرض داشته باشیم (یک نیم عرض منطبق بر خط وسط و چهار نیم عرض در طرفین خط وسط).

مساحت سطح بدین ترتیب عبارتست از:

$$A = \int_{-l}^{+l} y dx = \int_{-l}^{+l} (a_0 + a_1 x + a_2 x^2) dx$$

$$= \left[a_0 x + \frac{a_1 x^2}{2} + \frac{a_2 x^3}{3} \right]_{-l}^{+l} = 2a_0 L + \frac{2a_2 L^3}{3} + \dots \quad (\text{رابطه I})$$

حال فرض کنید می‌خواهیم مساحت را فقط به صورت ساده‌تر شده زیر به دست می‌آوریم:

مجموع نیم عرض‌ها $\times$ ضریب ثابت $A =$

$$A = c \times (y_1 + y_2) \quad \text{که در شکل فوق داریم:}$$

که c یک عدد ثابت است.

مقادیر y_2, y_1 را با جاگذاری $-l, l$ در معادله، به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$A = c \times (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_0 - a_1 x + a_2 x^2) = c \times (2a_0 + 2a_2 x^2) = 2a_0 c + 2a_2 c x^2$$

(رابطه II)

معادله (I) و (II) باید با هم برابر باشند:

$$2a_0 c + 2a_2 c x^2 = 2a_0 L + \frac{2a_2 L^3}{3}$$

که در نتیجه داریم:

$$C = l = \frac{2l}{2} = \frac{\text{طول کل سطح}}{\text{تعداد نیم عرض‌ها}}$$

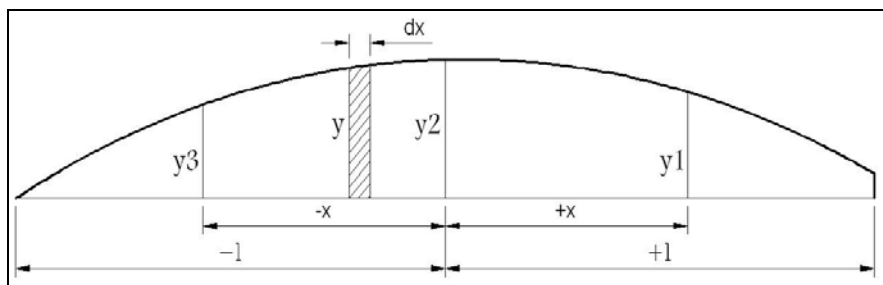
$$Cx^2 = \frac{l^3}{3}$$

$$x^2 = \frac{l^2}{3}$$

$$x = \frac{l}{\sqrt{3}}$$

$$x = 0.5773 l$$

حال اگر سه نیم عرض داشته باشیم (مطابق شکل ۱۴)، نیم عرض وسط (y_2) منطبق بر خط وسط و نیم عرض‌های طرفین (y_3, y_1) به فواصل x از خط وسط هستند.



شکل ۱۴: استفاده از روش چیبیچف با ۳ نیم‌عرض

برای معادله منحنی داریم:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

$$A = \int_{-L}^L y dx = \int_{-L}^L (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) dx$$

$$= \left[a_0x + \frac{a_1x^2}{2} + \frac{a_2x^3}{3} + \frac{a_3x^4}{4} \right]_{-L}^L$$

$$= (a_0L + \frac{a_1L^2}{2} + \frac{a_2L^3}{3} + \frac{a_3L^4}{4}) - (a_0L + \frac{a_1L^2}{2} - \frac{a_2L^3}{3} + \frac{a_3L^4}{4})$$

$$= 2a_0L + \frac{2a_2L^3}{3} + \dots \quad \text{رابطه (III)}$$

از طرفی می‌خواهیم داشته باشیم:

$$A = C(y_1 + y_2 + y_3)$$

مقدار y_1 از جاگذاری $x = l$ و مقدار y_2 از جاگذاری $x = 0$ و y_3 از جاگذاری $x = -l$ در معادله منحنی به دست می‌آید:

$$A = C(a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

$$+ a_0$$

$$+ a_0 - a_1x + a_2x^2 - a_2x^3) = C(3a_0 + 2a_2x^2)$$

رابطه (IV)

با برابر قرار دادن معادلات (III) و (IV) داریم:

$$3a_0C + 2a_2Cx^2 = 2a_0l + \frac{2a_2l^3}{3}$$

$$3C = 2l$$

در نتیجه داریم:

$$C = \frac{2l}{3} = \frac{\text{طول کل سطح}}{\text{تعداد نیم عرضها}}$$

$$Cx^2 = \frac{l^3}{3}$$

$$x^2 = \frac{l^2}{2}$$

$$x = 0.7071.l$$

یعنی برای به دست آوردن مساحت سطح، با سه نیم عرض، فاصله نیم عرضها از وسط خط، باید به صورت زیر باشد:

$$x_1 = 0.7071 l$$

$$\rightarrow y_1$$

$$x_2 =$$

$$(\text{منطبق بر خط وسط}) \rightarrow y_2$$

$$x_3 = -0.7071 l$$

$$\rightarrow y_3$$

توجه شود که در فرمولهای فوق l برابر نصف طول سطح می باشد.

و بدین ترتیب با به دست آوردن نیم عرض ها از محل قرارگیری نیم عرض ها و داشتن مقدار ثابت C ، مساحت از رابطه زیر به دست می آید:

$$A = C(y_1 + y_2 + y_3)$$

$$C = \frac{\text{طول کل سطح}}{\text{تعداد نیم عرض ها}}$$

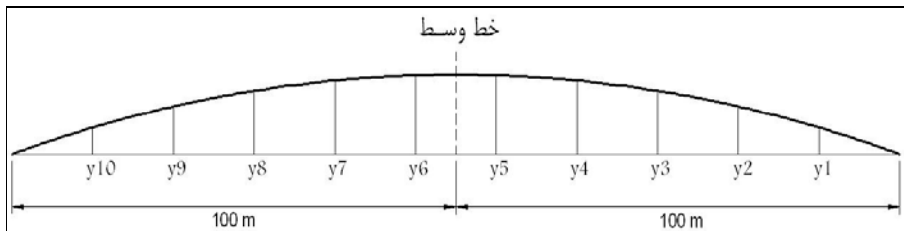
برای هر تعداد نیم عرض

برای تعداد بیشتری از نیم عرض ها، فواصل آنها از خط وسط در جدول زیر نمایش داده می شود.

تعداد نیم عرض ها	فواصل نیم عرض ها از خط وسط (که باید در l ضرب شود)				
2	0.5773				
3	0	0.7071			
4	0.1875	0.7947			
5	0	0.3745	0.8325		
6	0.2666	0.4225	0.8662		
7	0	0.3239	0.5297	0.8839	
8	0.1026	0.4062	0.5938	0.8974	
9	0	0.1679	0.5228	0.6010	0.9116
10	0.0838	0.3127	0.5	0.6873	0.9162

مثال ۴) مساحت سطح آبخوری با طول ۲۰۰ متر مطلوب است . شکل صفحه آبخور به صورت مقیاس شده در اختیار می باشد . با ۱۰ نیم عرض می خواهیم مساحت سطح آبخور را به روش چبیجف بدست آوریم.

طبق شکل ۱۵ و با استفاده از جدول قبل، فواصل نیم عرض‌ها به صورت زیر تعیین می‌شوند:



شکل ۱۵: محاسبه مساحت با ۱۰ نیم‌عرض در روش چبیچف

$$\text{فاصله } y_1 \text{ از خط وسط} = 0.9162 \times 100 = 91.62 \text{ m}$$

$$\text{فاصله } y_2 \text{ از خط وسط} = 0.6873 \times 100 = 68.73 \text{ m}$$

این فواصل برای سایر نیم عرض‌ها نیز مطابق جدول زیر، به همین ترتیب بدست می‌آیند.

مقدار نیم عرض (در محل تعیین شده به روش مقیاس)	فاصله نیم عرض‌ها از خط مرکزی	شماره نیم عرض
1.2	91.62	1
5	68.73	2
8.4	50	3
10.5	31.27	4
11.7	8.38	5
11.8	-8.38	6
11.1	-31.27	7
9.6	-50	8
7.4	-68.73	9
3.8	-91.62	10
76.7 = مجموع		

$$C = \frac{200}{10} = 20$$

$$A = C(y_1 + y_2 + \dots + y_9 + y_{10}) = 20 \times 76.7 = 1534 \text{ m}^2$$

لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده برای مقدار هر نیم عرض، با استفاده از نقشه مقیاس شده موجود به دست آمده است.

– مزایا و معایب روش چبیچف:

۱) این روش با تعداد کمتری از نیم عرض‌ها (در مقایسه با روش سیمسون)، جواب دقیق‌تری به دست می‌دهد. یعنی در مثال فوق مقدار مساحت به دست آمده با ۱۰ نیم عرض، در روش سیمسون با ۲۰ نیم عرض به دست می‌آید که حاکی از دقت بالای روش چبیچف می‌باشد.

۲) این روش دارای فواصل مساوی نیم عرض‌ها نیست بلکه این فواصل مطابق جدول ارائه شده، به دست می‌آیند. این مورد باعث مشکل‌تر شدن استفاده از این روش شده است در حالی که در روش سیمسون این فواصل برابر هستند.

۴- روش نیوتن :

روش نیوتن نیز از دیگر روش‌های انتگرال‌گیری عددی است که فواصل نیم عرض‌ها در آن برابر بوده و اولین و آخرین نیم عرض منطبق بر ابتدا و انتهای منحنی می‌باشند.

مقدار مساحت در این روش از رابطه زیر به دست می‌آید:

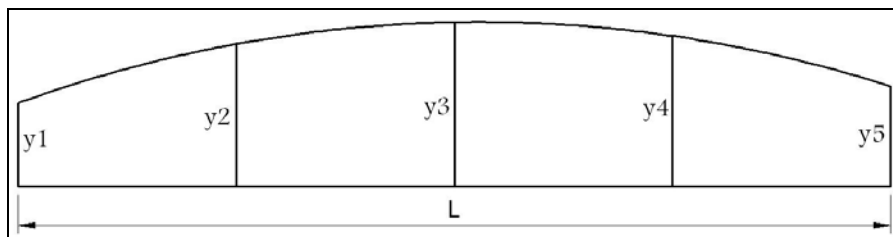
$$\text{مساحت} = L \times \sum (\text{مقدار نیم عرض} \times \text{ضریب هر نیم عرض})$$

توجه شود که در اینجا L برابر طول کل سطح است.

جدول زیر بیانگر ضرایب هر نیم عرض می باشد:

تعداد نیم عرض ها	ضریب نیم عرض ها				
2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			
3	$\frac{1}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{1}{6}$		
4	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$	
5	$\frac{7}{90}$	$\frac{32}{90}$	$\frac{12}{90}$	$\frac{32}{90}$	$\frac{7}{90}$

به عنوان مثال برای یک صفحه با ۵ نیم عرض داریم (طبق شکل ۱۶):



شکل ۱۶: محاسبه سطح با ۵ نیم عرض در روش نیوتن

حاصلضرب	ضریب	مقدار نیم عرض	شماره نیم عرض
$\frac{7}{90} y_1$	$\frac{7}{90}$	y_1	1
$\frac{32}{90} y_2$	$\frac{32}{90}$	y_2	2
$\frac{12}{90} y_3$	$\frac{12}{90}$	y_3	3
$\frac{32}{90} y_4$	$\frac{32}{90}$	y_4	4
$\frac{7}{90} y_5$	$\frac{7}{90}$	y_5	5
$\sum_1$			

$$\text{مساحت} = L \times \sum_1$$

مزیت این روش در مساوی بودن فاصله نیم عرض‌ها (همانند روش سیمسون) است.

۵- روش گاوس^۱

روش گاوس نیز مانند روش چبیچف، سطح را به دو قسمت در طرفین خط وسط تقسیم می‌کند. فواصل نیم‌عرض‌ها غیر مساوی و ضرایب هر نیم عرض نیز متفاوت است.

(ضریب $\times$ مقدار هر نیم عرض) مجموع $L \times$ مساحت

که L طول کل سطح و l طول سطح در طرفین خط وسط می باشد.

ضرایب و فواصل نیم عرض ها طبق جدول زیر می باشد.

تعداد نیم عرض ها	فاصله هر نیم عرض تا خط وسط (که باید در l ضرب شود)			
2	فواصل نیم عرض ها	0.57735		
	ضرایب	0.5		
3	فواصل نیم عرض ها	0	0.7746	
	ضرایب	0.44444	0.27778	
4	فواصل نیم عرض ها	0.33998	0.86114	
	ضرایب	0.32607	0.17393	
5	فواصل نیم عرض ها	0	0.53847	0.90618
	ضرایب	0.28445	0.23931	0.11846

مروری بر روش های انتگرال گیری عددی

- روش سیمسون : فواصل مساوی نیم عرض ها و ضرایب غیر مساوی نیم عرض ها

- روش چبیچف : فواصل غیر مساوی نیم عرض ها و ضرایب مساوی نیم عرض ها

- روش نیوتن : فواصل مساوی نیم عرض ها و ضرایب غیر مساوی نیم عرض ها

- روش گاوس : فواصل و ضرایب غیر مساوی نیم عرض ها

- روش دوزنقه : فواصل و ضرایب مساوی نیم‌عرض‌ها (به غیر از نیم‌عرض‌های اول و آخر)

مثال) برای شناور مدل ۱ مساحت سطح آب‌خور WL3 را از روش چیبیچف، گاوس و نیوتن نیز محاسبه کنید.

حل:

روش چیبیچف:

$$C = \frac{80}{8} = 10$$

$$l = \frac{80}{2} = 40 \text{ m}$$

با استفاده از فایل کامپیوتری و با در نظر گرفتن ۹ نیم عرض در محل معین مقاطع، داریم:

مقادیر نیم عرض	فاصله نیم عرض‌ها از خط وسط	شماره
0.685	0.9116×40	1
5.453	0.601×40	2
5.964	0.5228×40	3
6.494	0.1679×40	4
6.37	0	5
3.37	0.1679×40	6
5.64	0.5228×40	7
5.13	0.601×40	8
0.31	0.9116×40	9

sum=	39.416
------	--------

A= $2 \times C \times \text{SUM} =$	788.32
--	--------

ضریب ۲ برای دو برابر کردن نیم عرض و محاسبه مساحت کل سطح آبخور می- باشد.

روش گاوس: با در نظر گرفتن نیم عرض‌ها در طرفین خط مرکزی و تعداد ۵ نیم عرض داریم:

شماره	فاصله نیم عرض ها از خط وسط	مقادیر نیم عرض	ضریب	حاصلضرب
1	$0.9061 \times 40 = 21.5388$	0.743	0.11846	0.088016
2	$0.53847 \times 40 = 36.2472$	5.88	0.23931	1.407143
3	0	6.37	0.28445	1.811947
4	$0.53847 \times 40 = 36.2472$	5.01	0.23931	1.198943
5	$0.9061 \times 40 = 21.5388$	0.54	0.11846	0.063968

SUM=

4.570017

 $A = 2 \times 80 \times \text{SUM} =$

731.2027

روش نیوتن: با در نظر گرفتن ۵ نیم عرض از عمود پاشنه داریم:

شماره	فاصله از پاشنه	مقادیر نیم عرض	ضریب	حاصلضرب
1	0	0	7/90,	0
2	20	5.219	32/90,	1.855644
3	40	6.37	12/90,	0.849333
4	60	6.073	32/90,	2.159289
5	80	0	7/90,	0

SUM=

4.864267

 $A = 2 \times L \times \text{SUM} =$

778.282667

تفاوت موجود در پاسخ‌های فوق ناشی از دقت‌های متفاوت روش‌های انتگرال‌گیری عددی هستند.

علاوه بر روش‌های انتگرال‌گیری عددی از فرمول‌های انتگرال‌گیری ریاضی نیز می‌توان برای حل برخی مسائل استفاده کرد که به مثال زیر می‌توان اشاره نمود.

مثال- (تست کارشناسی ارشد کشتی‌سازی سال ۸۱)

اگر مساحت صفحه آب‌خور SWL با محور Z (محور Z از کف شناور به طرف عرشه

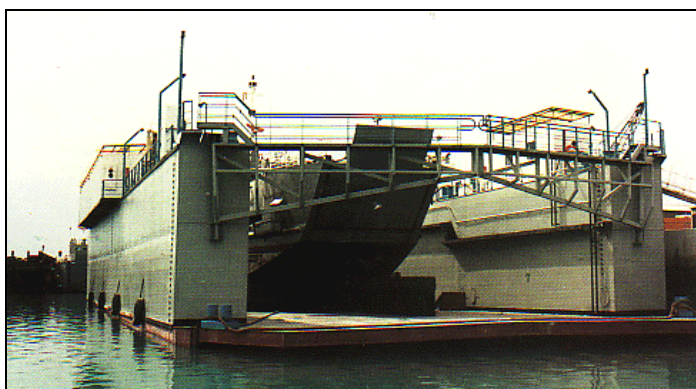
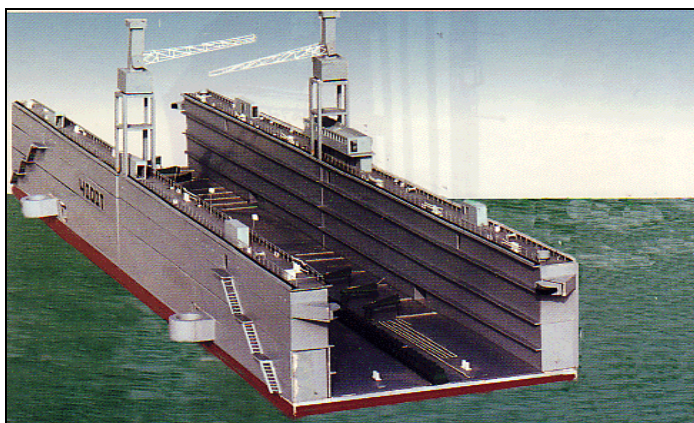
فرض می‌شود) رابطه غیر خطی $S_{WL} = \frac{1}{2} Z^2$ داشته باشد، مرکز بویانسی عمودی

(VCB) را در آب‌خور d بدست آورید؟

$$Z_B = \frac{\int_0^d Z.S(z)dZ}{\int_0^d S(z)dZ} = \frac{\int_0^d Z.\frac{1}{2}Z^2dZ}{\int_0^d \frac{1}{2}Z^2dZ} = \frac{\frac{1}{4}Z^4}{\frac{1}{3}Z^3} = \frac{3}{4}Z \Big|_{Z=d} = \frac{3}{4}d$$

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: حوضچه شناور تعمیر و ساخت کشتی^۱



شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

طول: ۱۳۰ متر ، عرض: ۲۸ متر، ارتفاع: ۱۵ متر

این گروه با کسب دانش فنی ساخت این حوضچه ها، تاکنون چندین فروند از آنها را ساخته است. ایران جزء معدود کشورهای سازنده این حوضچه ها می باشد.

بخش ۱-۷: ضرایب بدنه

ضرایب بدنه شناور تعیین کننده شکل بدنه می باشند به گونه ای که با در اختیار داشتن این ضرائب، می توان شکل کلی بدنه را تصور کرد. همچنین با در اختیار داشتن این ضرائب می توان جدول آفست مناسب برای موضوع طراحی شناور را از جداول سری ۶۰ انتخاب کرد. در جداول سری ۶۰ تعداد زیادی از جداول آفست آورده شده که برای انواع کشتی های تجاری قابل کاربرد می باشد و در بالای هر جدول آفست ضرایب بدنه داده شده است که نشانگر شکل کلی بدنه شناور است. در حالت کلی، ضرایب بدنه توصیفی از شکل بدنه و نوع شناور هستند. این ضرایب عبارت است از:

۱- ضریب بلوکی^۲

۲- ضریب منشوری عمودی^۳

۳- ضریب منشوری طولی^۴

۴- ضریب صفحه آبخور^۵

۵- ضریب مقطع میانی^۶

کلیه این ضرایب مربوط به بخشی از بدنه هستند که در زیر آب قرار دارد و در حداکثر آبخور شناور بیان می شود.

طول معیار در نظر گرفته شده نیز طول بین دو عمود (LBP)^۷ می باشد که فاصله بین عمود سینه و پاشنه را شامل می شود:

- عمود سینه^۱: عمود وارد بر محل تقاطع سینه با خط آبخور تابستان.

۱- منابع: [5] , [7]

2 - Block Coefficient

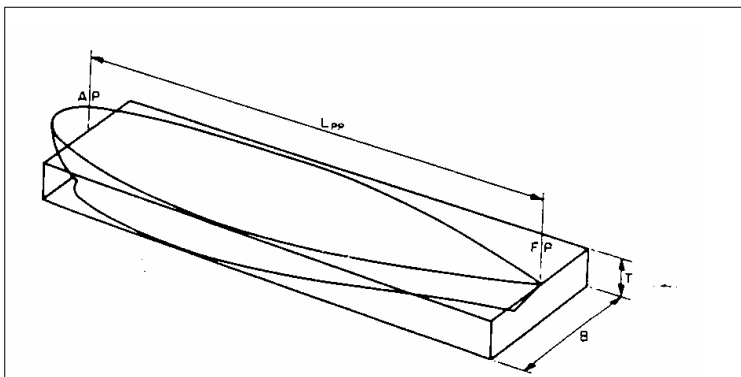
3 - Vertical Prismatic Coefficient

4 - Longitudinal Prismatic Coefficient

5 - Waterplan Coefficient

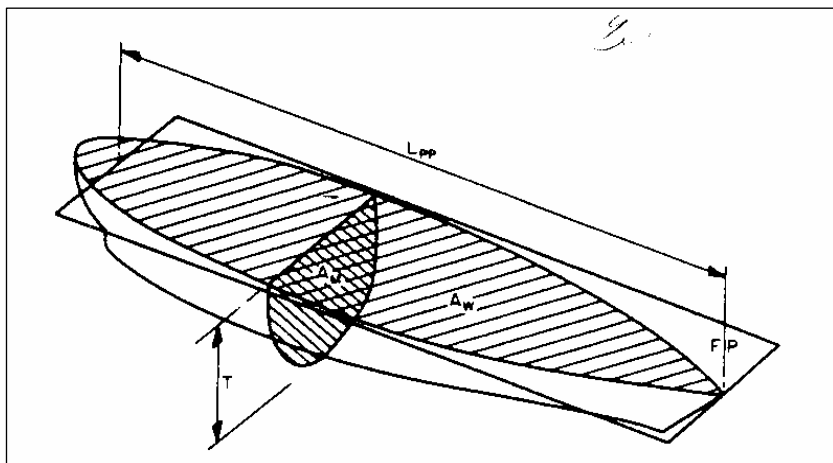
6 - Midship Section Coefficient

7 - Length Between Perpendiculars



شکل ۱: ضریب بلوکی (C_B) بدنه

$$(C_B) = \frac{\nabla}{B.T.L_{BP}} \quad \text{ضریب بلوکی}$$



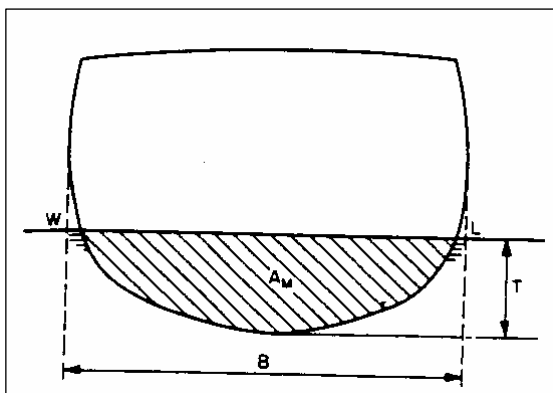
شکل ۲: نمایش مقطع عرضی میانی و مساحت سطح آب‌خور برای محاسبه ضرایب بدنه

$$(C_{vp}) = \frac{\nabla}{A_w.T} \quad \text{ضریب منشوری عمودی}$$

$$(C_{wp}) = \frac{A_w}{L_{wL} \cdot B} \text{ ضریب صفحه آبخور}$$

$$(C_p) = \frac{\nabla}{A_m \cdot L_{BP}} \text{ ضریب منشوری طولی}$$

$$(C_M) = \frac{A_M}{B \cdot T} \text{ ضریب مقطع میانی}$$



شکل ۳: نمایش مساحت مقطع در ضریب مقطع میانی

مثال: ضرایب بدنه شناور مدل ۱ را بدست آورید.

حل: ضرایب بدنه وابسته به عمق آبخور هستند که البته معمولاً ضرایب برای آبخور

تابستان بیان می‌گردند:

ضریب بلوکی:

با توجه از مشخصات هیدرواستاتیک می‌دانیم که تناژ در آبخور تابستان ۳۵۰۰ تن و

آبخور تابستان، ۵ متر است و حداکثر عرض در آبخور تابستان برابر ۱۳/۴۸ متر می‌باشد

لذا داریم:

$$V = \frac{\text{displacement}}{1.025} = 3414.6 \text{ m}^3$$

$$C_B = \frac{V}{(L \times B \times T)} = \frac{3414.6}{(80 \times 13.48 \times 6)} = 0.53$$

ضریب صفحه آبخور:

آبخور تابستان این شناور ۵ متر (WL5) می باشد که مساحت این آبخور به صورت

زیر محاسبه می گردد:

AREA OF WATERLINE 5						
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	سیمسون	سیمسون	سیمسون	تابع سطح
0	0.197	1×0.5=0.5			0.5	0.0985
0.5	2.075	4×0.5=2			2	4.15
1	3.959	1×0.5=0.5	1		1.5	5.9385
2	6.131		4		4	24.524
3	6.603		2		2	13.206
4	6.673		4		4	26.692
5	6.746		2		2	13.492
6	6.617		4		4	26.468
7	5.879		1	1×0.5=0.5	1.5	8.8185
7.5	4.804			4×0.5=2	2	9.608
8	2.919			1×0.5=0.5	0.5	1.4595

SUM=	134.455
------	---------

A5=	895.4703
-----	----------

$$C_{WP} = \frac{A_w}{(L \times B)} = \frac{895.47}{(80 \times 13.48)} = 0.83$$

ضریب مقطع میانی:

مقطع میانی این شناور مقطع ۴ می باشد که مساحت آن تا آبخور ۵ متر به صورت

زیر محاسبه می گردد:

	نیم عرض	سیمسون ۱	سیمسون ۲	تابع سطح ۱	تابع سطح ۲
WL0	0	1		0	
WL1	5.524	4		22.096	
WL2	6.072	1	1	6.072	6.072
WL3	6.37		3		19.11
WL4	6.553		3		19.659
WL5	6.673		1		6.673

SUM=	28.17	51.51
------	-------	-------

a1=	18.76
a2=	38.64
A=a ₁ +a ₂ =	57.40

$$C_M = \frac{A_M}{B \times T} = \frac{57.4}{13.48 \times 5} = 0.85$$

ضریب منشوری عمودی:

$$C_{VP} = \frac{V}{A_w \times T} = \frac{3414.6}{895.47 \times 5} = 0.76$$

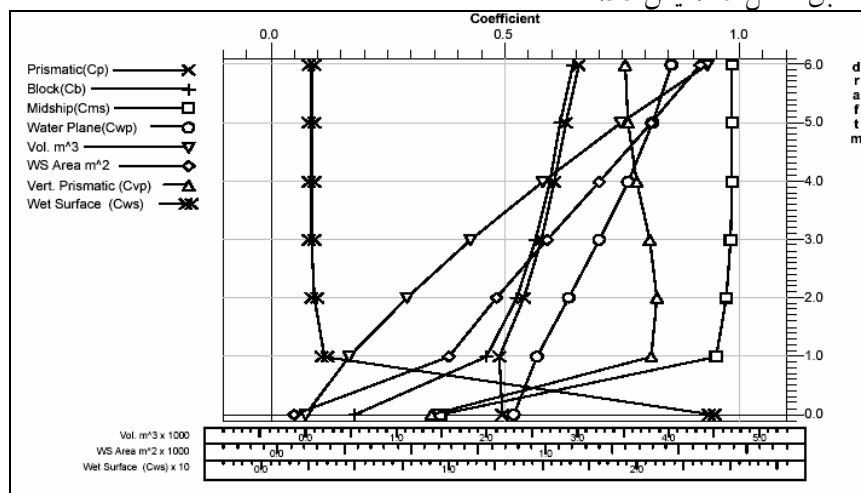
ضریب منشوری طولی:

$$C_P = \frac{V}{A_M \times L} = \frac{3414.6}{57.4 \times 80} = 0.74$$

می‌دانیم که این ضرایب وابسته به عمق آب‌خور هستند. برای شناور مدل ۱ جداول و نمودار ضرایب بدنه بر حسب آب‌خور به صورت زیر می‌باشد:

WS Area	Coefficients					Volume	Draft
m ²	Cvp	Cwp	Cms	Cb	Cp	m ³	m
59.80	0.341	0.518	0.360	0.177	0.492	0.42	0.000
638.26	0.810	0.567	0.947	0.460	0.485	481.29	1.000
817.71	0.824	0.635	0.971	0.523	0.538	1,107.70	2.000
1,002.54	0.806	0.698	0.979	0.563	0.575	1,812.71	3.000
1,197.35	0.779	0.761	0.981	0.593	0.604	2,600.36	4.000
1,393.64	0.759	0.812	0.983	0.617	0.627	3,473.36	5.000
1,576.16	0.756	0.853	0.984	0.644	0.655	4,416.27	6.000

مقادیر ضرایب بدنه موجود در این جداول به صورت کامپیوتری محاسبه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که بین مقادیر جدول و مقادیر محاسبه شده تفاوت‌هایی وجود دارد که ناشی از تعداد کم نیم‌عرض‌های در نظر گرفته شده برای حل مسئله می‌باشد. مقادیر جدول را می‌توان در نمودار ضرایب بدنه بر حسب آب‌خور برای شناور مدل ۱ مطابق شکل ۴ نمایش داد.



شکل ۴: ضرایب بدنه بر حسب آب‌خور برای شناور مدل ۱

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کاتاماران مسافربری



شرکت سازنده: شرکت امواج براق

دارای سیستم رانش واترجت

طول: ۲۲ متر

عرض: ۷/۳ متر

تعداد سرنشین: ۱۲۵ نفر

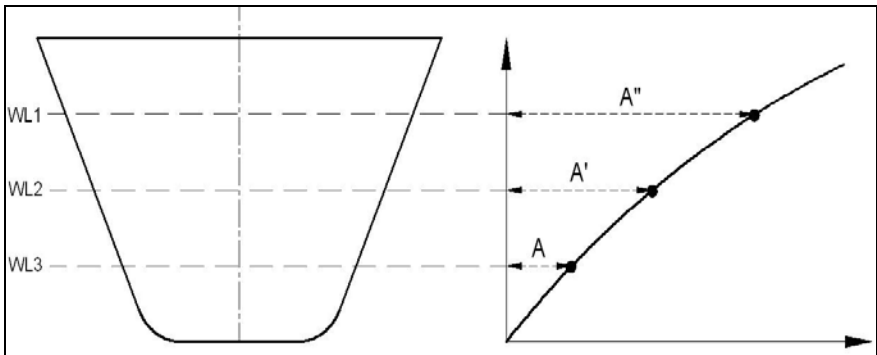
این شرکت برای اولین بار در ایران توانست سیستم رانش واترجت را بر روی

شناور نصب کند.

بخش ۱-۸: منحنی بونژان^۲ و مساحت مقاطع عرضی^۳

* منحنی بونژان

منحنی بونژان برای نشان دادن مساحت زیر آب هر مقطع^۴ شناور در آبخوره‌های مختلف بکار می‌رود. منحنی مساحت مقاطع عرضی نیز حالت خاصی از منحنی بونژان است که مساحت زیر خط آبخور هر مقطع را فقط برای یک آبخور مشخص بیان می‌کند. بطور مثال یک مقطع عرضی از بدنه را طبق شکل ۱ در نظر بگیرید. فرض کنید مساحت زیر خط آبخور WL1 این مقطع، برابر A و مساحت زیر خط آبخور WL2 تا کف بدنه برابر A' و مساحت زیر خط آبخور WL3 برابر A'' باشد.



شکل ۱: منحنی بونژان مربوط به یک مقطع عرضی

حال اگر مساحت‌های A تا A'' را به صورت فواصل افقی بر روی یک نمودار نشان دهیم، نقاطی بدست می‌آید که از به هم متصل کردن این نقاط، نمودار منحنی بونژان مربوط به این مقطع بدست می‌آید.

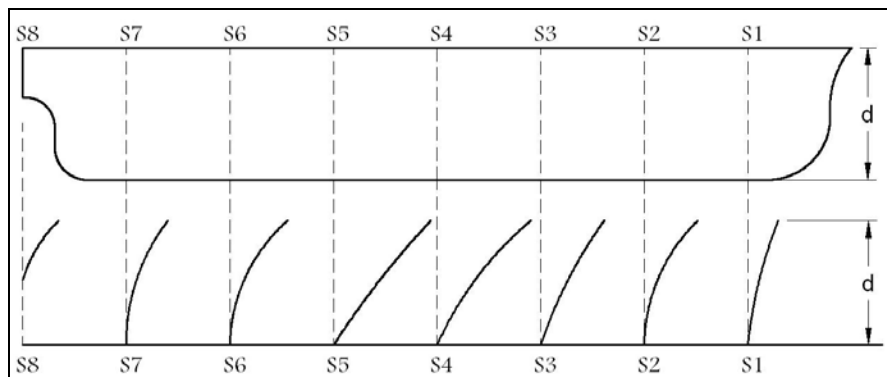
۱- منابع: [1], [4], [10]

2 - Bonjean Curve

3 - Cross Curve of area

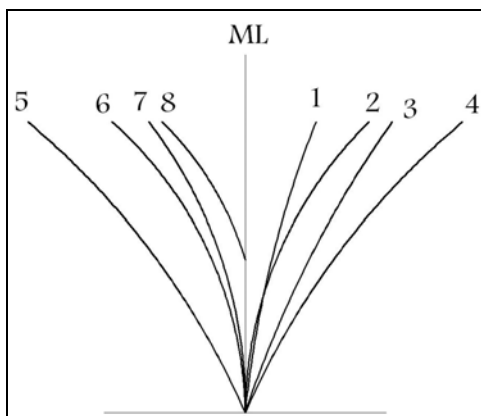
4 - Section

اگر مجموعه‌ای از این منحنی‌ها برای کلیه مقاطع عرضی ترسیم شود، منحنی بونژان کل شناور به دست می‌آید. فرض کنید یک شناور دارای ۷ مقطع عرضی^۱ و حداکثر آب‌خور d باشد که منحنی بونژان آن مطابق شکل ۲ می‌باشد و فواصل بین این منحنی‌ها برابر فواصل بین مقاطع عرضی است. طول کل منحنی نیز برابر طول کل شناور است.



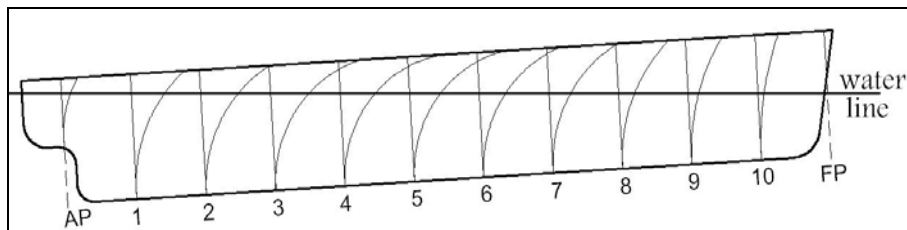
شکل ۲: ترسیم منحنی بونژان برای کلیه مقاطع عرضی بدنه

منحنی بونژان را می‌توان به صورت زیر نیز نشان داد. به گونه‌ای که منحنی بونژان برای مقاطع سینه تا وسط در سمت راست و برای مقاطع از وسط تا پاشنه در سمت چپ نشان داده می‌شود. بنابراین ترسیم یک خط افقی برابر ارتفاع سطح آب‌خور مورد نظر و اندازه‌گیری فاصله افقی هر منحنی تا خط میانی (ML) نشان دهنده مساحت زیر نمودار مقاطع عرضی در آب‌خور مورد نظر است. مشخص است که مقادیر نشان داده شده در منحنی و مقدار مساحت مقاطع با یک مقیاس مشخص، بیان می‌شوند.

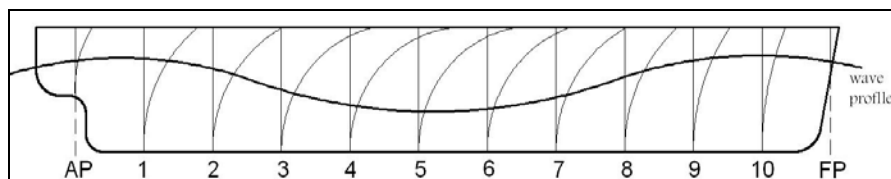


شکل ۳: نمایش دیگری از منحنی بونژان (نما از مقابل)

کاربرد منحنی بونژان در محاسبه حجم زیر آب و مرکز حجم (مرکز بویانسی) می باشد بدین ترتیب با داشتن مساحت مقاطع و اعمال روشهای انتگرال گیری عددی (مانند قوانین سیمسون) می توان حجم و مرکز حجم بدنه زیر آب را به دست آورد. همچنین کاربرد مهم دیگر آن محاسبه حجم زیر خط آب در حالت تریم شناور (شکل ۴) و همچنین در امواج هاگینگ و سگینگ (شکل ۵) می باشد. اگر شناور بدون تریم و در آب ساکن باشد، حجم و مرکز حجم زیر آب بدنه را می توان هم از منحنی های هیدرواستاتیک و هم از منحنی بونژان بدست آورد ولی هنگامی که کشتی دارای تریم باشد یا در آب مواج قرار گرفته باشد، حجم و مرکز حجم و توزیع حجم (توزیع نیروی بویانسی) از طریق استفاده از منحنی بونژان امکان پذیر است.



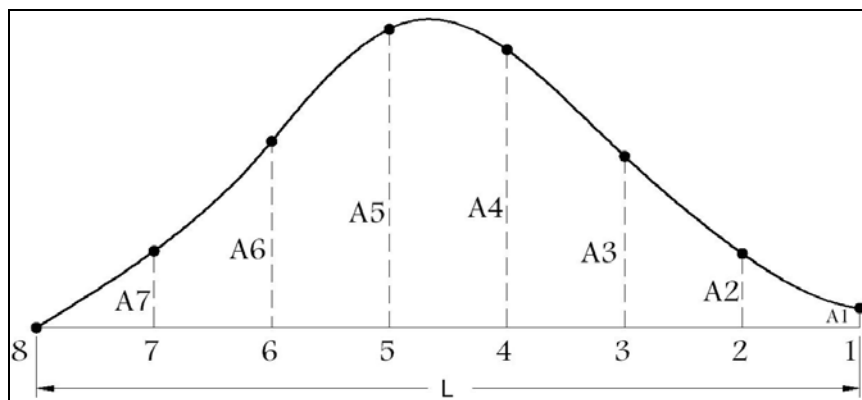
شکل ۴: محاسبه حجم و مرکز حجم در حالت تریم با استفاده از منحنی بونژان



شکل ۵: محاسبه حجم و مرکز حجم در آب مواج با استفاده از منحنی بونژان

* منحنی مقاطع عرضی^۱

منحنی مساحت مقاطع عرضی در واقع حالت خاصی از منحنی بونژان است که فقط برای یک آبخورد ترسیم می‌شود. فرض کنید مساحت‌های A_1 تا A_8 مساحت‌های زیر خط آبخورد WL2 باشند که در منحنی بونژان به صورت فواصل افقی نشان داده شده‌اند. حال اگر این مقادیر را به صورت عمودی ترسیم کنیم، منحنی مقاطع عرضی شناور در آبخورد WL2 به دست می‌آید که به کمک آن می‌توان حجم و مرکز حجم را در آن آبخورد تعیین کرد.



شکل ۶

محور افقی این نمودار، نشان‌دهنده طول شناور و فواصل مقاطع عرضی و محور عمودی مقیاس مساحت می‌باشد که بیان‌کننده مساحت مقاطع عرضی هستند.

مثال ۲: منحنی بونژان مقطع ۶ را برای شناور مدل ۱ محاسبه و ترسیم نمایید.

حل: با استفاده از جدول آفست و مقادیر نیم عرض در مقطع ۶ و با توجه به اینکه فواصل بین آبخورها (d) برابر ۱ متر است، داریم:

until WL1

	نیم عرض	سیسمون	تابع سطح
WL0	0	5	0
WL1	4.332	8	34.656
WL2	5.328	-1	-5.328
		SUM=	29.328

$$A_1 = 2 \times \frac{1}{12} \times d \times \text{sum} = 2 \times \frac{1}{12} \times 1 \times 29.32 = 4.89 \text{ m}^2$$

until WL2

	نیم عرض	سیسمون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	4	17.328
WL2	5.328	1	5.328
		SUM=	22.656

$$A_2 = 2 \times \frac{1}{2} \times d \times \text{sum} = 2 \times \frac{1}{3} \times 1 \times 22.66 = 4.89 \text{ m}^2$$

until WL3

	نیم عرض	سیسمون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	3	12.996
WL2	5.328	3	15.984
WL3	6.073	1	6.073
		SUM=	35.053

$$A_3 = 2 \times \frac{3}{8} \times d \times sum = 26.25 \text{ m}^2$$

until WL4

	نیم عرض	سیسمون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	4	17.328
WL2	5.328	2	10.656
WL3	6.073	4	24.292
WL4	6.423	1	6.423
		SUM=	58.699

$$A_4 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times sum = 39.13 \text{ m}^2$$

until WL5

	نیم عرض	سیسمون ۱	سیسمون ۲	تابع سطح ۱	تابع سطح ۲
WL0	0	1		0	
WL1	4.332	4		17.328	
WL2	5.328	1	1	5.328	5.328
WL3	6.073		3		18.219
WL4	6.423		3		19.269
WL5	6.617		1		6.617
			SUM=	22.656	49.433

$$a_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times sum1 = 15.1 \text{ m}^2$$

$$a_2 = 2 \times \frac{3}{8} \times d \times sum1 = 37.07 \text{ m}^2$$

$$A_5 = a_1 + a_2 = 52.17 \text{ m}^2$$

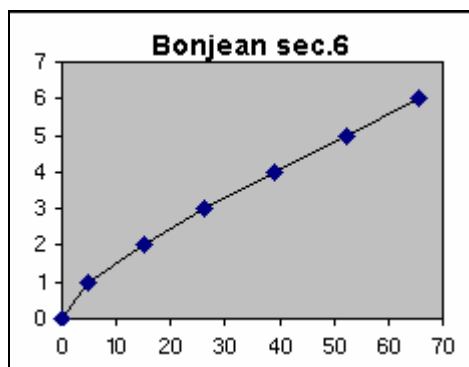
until WL6

	نیم عرض	سیسمون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	4	17.328
WL2	5.328	2	10.656
WL3	6.073	4	24.292
WL4	6.423	2	12.846
WL5	6.617	4	26.468
WL6	6.765	1	6.765
SUM=			98.355

$$A_6 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times \text{sum} = 65.57 \text{ m}^2$$

بنابراین برای ترسیم منحنی بونژان، مقادیر محور y برابر ارتفاع آبخور و مقادیر محور x برابر مساحت‌های A_0 تا A_6 می‌باشد که داریم:

$x(\text{m}^2)$	$y(\text{m})$
$A_0=0$	0
$A_1=4.89$	1
$A_2=15.1$	2
$A_3=26.25$	3
$A_4=39.13$	4
$A_5=52.17$	5
$A_6=65.57$	6



همین فرایند را می‌توان برای کلیه مقاطع عرضی شناور اعمال کرد و منحنی بونژان را بدست آورد.

بخش ۱-۹: برخی تعاریف از تناژ و حجم بسته شناور

دو حالت کلی برای بیان وزن و اندازه حجمی شناور وجود دارد:

الف) جابجایی^۲ یا وزن کل شناور

وزن کل شناور از دو جزء اصلی تشکیل می‌شود:

۱- وزن مرده شناور^۳: عبارتست از وزن بار، سوخت، آب، خدمه و مسافران و به طور کلی، کلیه اقلام غیر ثابت و مصرفی شناور.

۲- وزن سبک کشتی^۴: عبارتست از وزن بدنه، ماشین‌آلات موتورخانه و کلیه اقلام ثابت کشتی.

یعنی:

$$\text{وزن سبک} + \text{وزن مرده} = \text{جابجایی}$$

ارتباط جابجایی با حجم زیر خط آب V عبارتست از:

$$\Delta = \rho \cdot V$$

ب) حجم بسته داخل بدنه^۵:

برای بیان حجم بسته کل شناور، شامل حجم زیر عرشه اصلی و بالای عرشه از دو تعریف تناژ ناخالص^۶ و تناژ خالص^۷ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این اصطلاح «تناژ» به معنای جرم یا وزن نیست بلکه به مفهوم حجم می‌باشد. تا سال ۱۹۸۲ مقدار تناژ به وسیله واحد ۱۰۰ فوت مکعب (۲/۸۳ متر مکعب) بیان می‌شد یعنی هر تن

1- منابع: [11] , [15]

2 - displacement

3 - dead weight

4 - Light weight

5 - Enclosed Space

6 - Gross tonnage

7 - Net tonnage

حجمی معادل $2/83$ متر مکعب در نظر گرفته می‌شد. ولی از سال ۱۹۸۲، محاسبه مقدار تناژ (حجم بسته شناور) برای کلیه کشتی‌ها توسط قوانین کنوانسیون بین‌المللی اندازه‌گیری تناژ^۱ انجام می‌شود. دو تعریف کلی در این باره وجود دارد:

۱- تناژ ناخالص (GRT)^۲

عبارتست از میزان حجم بسته کل کشتی که مبنای پرداخت هزینه به داک بردن^۳، راهنمایی کشتی^۴ و بازرسی آن است.

فضاهای بسته زیر، جزء تناژ ناخالص شناور محسوب نمی‌شوند و فضاهای معاف شده^۵ نامیده می‌شوند و مهمترین آنها عبارتند از:

(۱) پل فرماندهی، اتاق نقشه، اتاق مخابرات و اتاق ابزارآلات دریانوردی

(۲) فضای آشپزخانه

(۳) فضای شستشو و فاضلاب

(۴) محل نگهداری وسایل ایمنی و نجات

(۵) کانالهای داخل بدنه

پس از محاسبه و تفریق حجم‌های فوق از حجم بسته کل شناور، از رابطه زیر برای محاسبه تناژ ناخالص استفاده می‌شود (V بر حسب متر مکعب می‌باشد):

$$GT = K_1 \cdot V$$

$$K_1 = 0.2 + 0.02 \log(V)$$

1 - International Convention on tonnage Measurement

2 - Gross Registered tonnage

3 - docking

4 - pilotage

5 - excepted spaces

۲- تناژ خالص (NRT)^۱

عبارتست از حجم بسته داخل شناور (بالا و پایین عرشه اصلی) برای حمل بار و مسافر. تناژ ناخالص مبنای محاسبه هزینه‌های عوارض بندری می‌باشد.

به عبارت دیگر تناژ خالص از کم کردن حجم‌های زیر از تناژ ناخالص به دست می‌آید:

(۱) محل زندگی فرمانده و خدمه کشتی

(۲) فضای ماشین‌آلات و موتورخانه

(۳) انبار زنجیر و لنگر و سیستم سکان

(۴) مخازن تعادل کشتی

پس از محاسبه حجم بسته مربوط به حمل بار و مسافر (V_c) بر حسب متر مکعب، تناژ خالص از رابطه زیر به دست می‌آید:

۱- برای کشتی‌های مسافربری (مسافر بیش از ۱۳ نفر):

$$NT = K_2 \cdot V_c \cdot \left(\frac{4d}{3D}\right)^2 + K_3 \left(N_1 + \frac{N_2}{10}\right)$$

۲- برای سایر کشتی‌ها:

$$NT = K_2 \cdot V_c \cdot \left(\frac{4d}{3D}\right)^2$$

برای هر یک از عبارات زیر داریم:

V_c : حجم بسته مربوط به حمل بار و مسافر بر حسب متر مکعب

d : آبخور داخلی (فاصله آبخور تابستان بدون در نظر گرفتن ضخامت ورق در وسط شناور)

D : عمق داخلی (عمق بدنه بدون در نظر گرفتن ضخامت ورق در وسط شناور)

$$K_2 = 0.2 + 0.02 \log V_c$$

$$K_3 = 1.25(GT + 10000)/10000$$

N_1 : تعداد مسافران در کابینهایی که بیش از هشت تخت در هر کابین نباشد.

N_2 : تعداد سایر مسافران

$N_1 + N_2$: تعداد کل مسافرانی که یک کشتی می تواند حمل کند.

ملاحظات زیر را در فرمول های فوق باید در نظر داشت:

۱- عبارت $(\frac{4d}{3D})^2$ نباید بیش از یک باشد.

۲- عبارت $K_2.V_c.(\frac{4d}{3D})^2$ برای کشتی های مسافربری نباید بزرگتر از 0.25 GT باشد.

۳- اگر $N_1 + N_2$ کمتر از 13 باشد، N_1 و N_2 برابر صفر در نظر گرفته می شوند.

۴- NT نباید کمتر از 0.3 GT باشد.

بدین ترتیب حجم های بسته داخل شناور با اصطلاح «تناژ خالص و تناژ ناخالص» بیان می شوند که این عبارات از جنس حجم (متر مکعب) هستند نه جرم یا وزن.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: زیردریایی نظامی میدجت



این زیردریایی یکی از پیشرفته ترین زیردریایی های میدجت دنیا می باشد که توسط محققین و صنعتگران وزارت دفاع ساخته شده است. این زیردریایی اثباتی است بر توانمندی های منحصر بفرد صنایع زیر سطحی کشور. تعداد کثیری از این زیردریایی ها تحویل نیروهای مسلح ایران شده است.

بخش ۱-۱: عوامل مؤثر در تحلیل پایداری شناور

چند پارامتر خاص در تحلیل پایداری هر شناوری وجود دارد که در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱) مرکز ثقل (G):

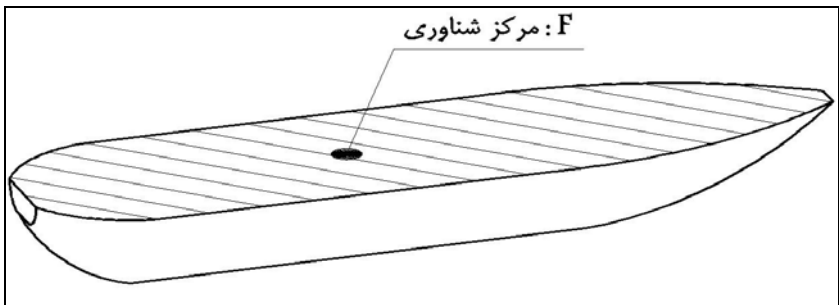
عبارتست از مرکز ثقل شناور به همراه بارگذاری‌های انجام شده بر روی آن. مرکز ثقل دارای سه مؤلفه طولی، عرضی و عمودی است.

۲) مرکز بویانسی (B):^۱

مرکز حجم داخل آب شناور است. مرکز بویانسی نیز دارای سه مؤلفه طولی، عرضی و عمودی است.

۳) مرکز شناوری (F):^۲

عبارتست از مرکز سطح صفحه آب‌خور شناور. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مرکز شناوری عبارتست از مرکز سطح صفحه‌ای که «صفحه آب‌خور»^۳ نامیده می‌شود.



شکل ۱: مرکز شناوری یا مرکز سطح صفحه آب‌خور

1 - Centre of buoyancy

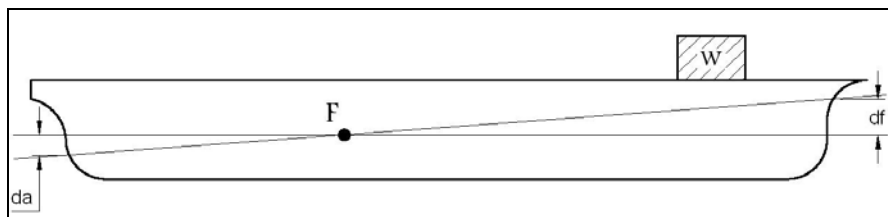
2 - Centre of floatation

3 - Water plane

این نقطه مرکزی است که «شیب»^۱ و «هیل» کشتی (غلتش‌های طولی و عرضی استاتیکی) حول آن انجام می‌گردد.

یعنی همانطور که در شکل مشخص است، اگر باری بر روی عرشه در قسمت سینه قرار گیرد، کشتی حول نقطه F دوران می‌کند. نقطه F در تعیین آبخور سینه و پاشنه بسیار مؤثر است. محل مرکز شناوری معمولاً متمایل به قسمت پاشنه شناور است چرا که سطح آبخور معمولاً شبیه به شکل ۱ است و این شکل اقتضا می‌کند که مرکز این سطح متمایل به قسمت عقب باشد چرا که قسمت جلویی این شکل، باریک و کشیده و قسمت انتهایی آن عریض‌تر و پرت‌تر است.

هیل کردن کشتی نیز حول این نقطه اتفاق می‌افتد. از آنجا که قسمت چپ و راست کشتی با هم قرینه هستند، مرکز شناوری معمولاً منطبق بر خط مرکزی شناور است و اگر باری در یک قسمت از شناور قرار گیرد، کشتی حول نقطه F دوران می‌کند. (نکته بسیار مهم این است که این تغییر زاویه ماهیت نوسانی ندارد و ماهیت استاتیکی دارد. اگر غلتش مداوم کشتی مد نظر باشد، دوران حول مرکز متاستر انجام می‌شود و نه مرکز شناوری).



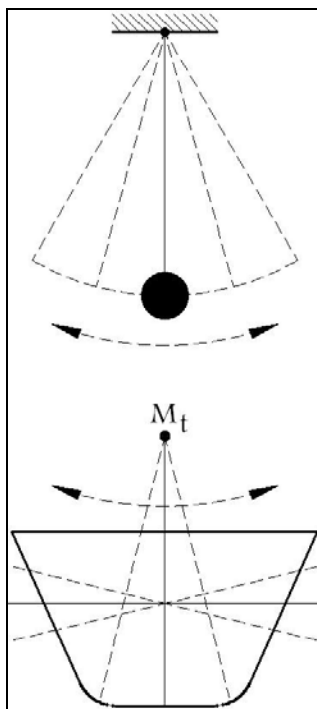
شکل ۲: تغییر شیب شناور حول مرکز شناوری (F) ناشی از قرارگیری یک بار در قسمت سینه

۴) مرکز متاستر (M)

در شناور دو نوع متاستر داریم: متاستر طولی (M_L) و متاستر عرضی (M_t) .

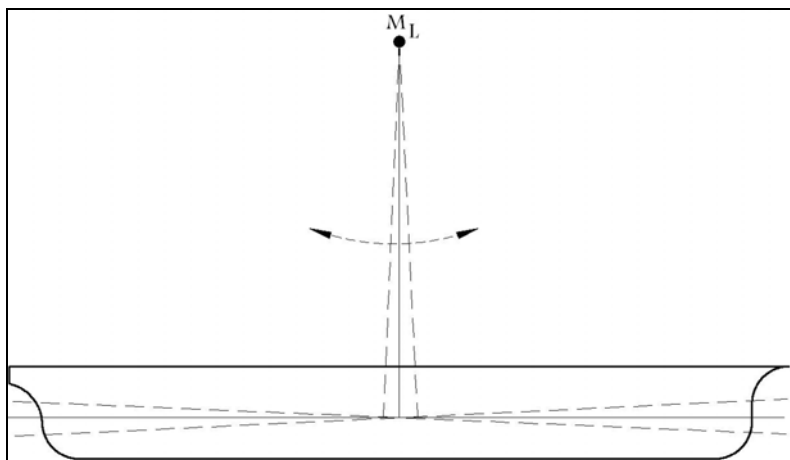
1- Trim: با تریم که معادل کجی یا زاویه طولی شناور است. در این کتاب بجای لفظ «تریم» از «شیب» استفاده می‌شود.

متاسنتر نقطه‌ای است که کشتی حول آن غلتش می‌کند. این نقطه را می‌توان مطابق شکل ۳ به مثابه نقطه ثابت پاندول تشبیه کرد. کشتی نیز در اثر نیروهای خارجی، حول نقطه متاسنتر همانند نقطه ثابت پاندول غلتش می‌کند. در شکل ۴ غلتش عرضی شناور حول نقطه متاسنتر عرضی (M_t) نشان داده شده است.



شکل ۳: نقطه متاسنتر به مثابه نقطه ثابت پاندول

غلتش طولی کشتی نیز همانند شکل ۴ حول نقطه متاسنتر طولی (M_L) انجام می‌گردد. بنابراین همواره باید در نظر داشت که کشتی به صورت تصادفی و حول نقاط نامشخص غلتش نمی‌کند بلکه حول نقطه متاسنتر (طولی و عرضی) غلتش می‌کند.



شکل ۴: متاسنتر طولی که غلتش طولی حول آن انجام می‌شود.

مرکز متاسنتر طولی (M_L) خیلی بلندتر از متاسنتر عرضی (M_T) است که دلایل و تبعات آن در بخش‌های بعدی بحث خواهد شد.

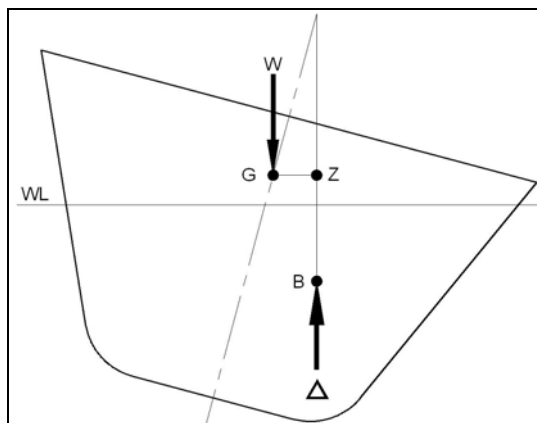
* آیا نقطه متاسنتر (طولی و عرضی) همواره نقطه ثابتی است ؟

نقطه متاسنتر در زوایای غلتش کوچک ، نقطه ثابتی است ولی در زوایای بزرگ این نقطه ثابت نیست و بر روی یک منحنی مشخص تغییر موقعیت می‌دهد . زاویه غلتش کوچک برای غلتش عرضی تا ۸ درجه و برای غلتش طولی تا ۱ درجه می‌باشد. در مورد مکان هندسی تغییرات متاسنتر در قسمت‌های بعد، توضیحات بیشتری ارائه می‌شود.

۵) بازوی بازگرداننده^۱

بازوی بازگرداننده، عامل بازگشتن شناور از حالت انحراف به حالت اولیه است. این بازو عبارتست از کمترین فاصله بین دو راستای موازی وزن (W) و (B) شناور

غلطیده. مقدار GZ عامل اصلی بررسی پایداری است که در یک بخش به تفصیل بررسی می‌شود.



شکل ۵: بازوی GZ که عامل بازگشتن شناور به حالت اولیه است.

بخش ۱-۱۱: تعیین مرکز ثقل و جابجایی آن

در این قسمت دو مفهوم اصلی و کاربردی در تعیین مرکز ثقل شناور بیان می‌گردد:

- نحوه تعیین مؤلفه‌های x, y, z مرکز ثقل شناور.

- نحوه تأثیر جابجایی بار بر جابجایی مرکز ثقل شناور.

هر یک از موارد فوق به صورت زیر تشریح می‌گردد:

الف- نحوه تعیین مؤلفه‌های x, y, z مرکز ثقل شناور

همانطور که می‌دانیم یک شناور از هزاران اقلام وزنی تشکیل شده است که هر یک نسبت به محور مختصات تعریف شده دارای مختصات x_i, y_i, z_i هستند. محور مختصات معمولاً از نظر طولی منطبق بر عمود پاشنه، از نظر عمودی منطبق بر خط مبنا و از نظر عرضی منطبق بر خط مرکزی در نظر گرفته می‌شود.

برآیند مؤلفه‌های هر یک از این وزن‌ها به صورت مؤلفه‌های مرکز ثقل شناور به صورت زیر تعیین می‌گردند:

$$X_G = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

$$Y_G = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + \dots + m_n y_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

$$Z_G = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + \dots + m_n z_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

نحوه تعیین مرکز ثقل شناور در مثال زیر تشریح می‌گردد.

مثال: مرکز ثقل شناور مدل ۱ را با توجه به توزیع وزنی در سناریوهای مختلف بارگیری شناور را بیان می‌کنیم.

یک شناور از هزاران اқلام وزنی تشکیل شده است که وزن و مرکز ثقل این اқلام باید به طور دقیق ثبت و در محاسبه مرکز ثقل کل شناور لحاظ گردد. در اینجا برای حل مسئله، اқلام وزنی اصلی به اختصار ارائه شده‌اند:

اқلام وزنی	(t)w	(m)x	(m)y	(m)z	MX	MY	MZ
کاسه بدنه	655	38.3	0	4.1	25086.5	0	2685.5
روبناسازی	140	7	0.2	11	980	28	1540
تجهیزات داخل روبناسازی	35	5	0.1	11.3	175	3.5	395.5
بار داخل انبارها و روی عرشه	2275	45.6	0	4.7	103740	0	10693
موتور، ژنراتور، شافت پروانه	95	4	0	2.5	380	0	237.5
سایر تاسیسات موتورخانه	60	3	-0.37	2.9	180	-22.2	174
خدمه، سوخت و آب	185	4.5	-0.1	10	832.5	-18.5	1850
سربهای جلو	20	75	0	0.5	1500	0	10
سربهای عقب	5	4	-0.01	0.3	20	-0.05	1.5
سایر موارد	30	38	0.31	9	1140	9.3	270
مجموع	3500				134034	0.05	17857

$$X_G = \frac{\text{Sum}X}{W} = \frac{134034}{3500} = 38.30 \text{ m}$$

$$Y_G = \frac{\text{Sum}Y}{W} = \frac{0.05}{3500} = 0.00$$

$$Z_G = \frac{\text{Sum}Z}{W} = \frac{17857}{3500} = 5.10 \text{ m}$$

از آنجا که معمولاً مرکز ثقل شناور در محل مطلوب بدست نمی‌آید و قسمت پاشنه بدلیل نصب موتورخانه، سنگین‌تر از سینه شناور است لذا وزنه‌های سربی برای تنظیم مرکز ثقل بکار می‌روند و به گونه‌ای توزیع می‌شوند که شناور در حالت بدون بارگیری دارای شیب صفر باشد.

در این جدول ارقام وزنی بر حسب تن و فواصل بر حسب متر هستند. x فاصله از عمود پاشنه، y فاصله از خط مرکزی و z فاصله از خط مبنا می‌باشد. همچنین وزن سبک، وزن مرده و جابجایی شناور مدل ۱ به صورت زیر می‌باشد:

وزن سبک	۱۰۵۰ تن
وزن مرده	۲۴۵۰ تن
جابجایی:	$۳۵۰۰ = ۲۴۵۰ + ۱۰۵۰$ تن

کشتی‌های تجاری، بارگیری را در حالات مختلفی انجام می‌دهند که بر مرکز ثقل شناور موثر است. برای شناور مدل ۱ سناریوهای بارگیری زیر تعریف شده است:

سناریو	وضعیت بارگیری	مرکز ثقل عمودی	جابجایی
1	حمل کالا در داخل انبارها	4.6	3500
2	حمل کالا در داخل انبارها و روی عرشه (سناریوی اصلی)	5.1	3500
3	بدون حمل کالا و با مخازن بالاست پر	4.2	1140

ظرفیت و موقعیت مخازن بالاست که در سناریوی ۳ بکار می‌روند به صورت زیر می‌باشد:

مخزن بالاست پاشنه	۲۱ متر مکعب با $x=5$ متر از عمود پاشنه
مخزن بالاست سینه	۶۶ متر مکعب با $x=75$ متر جلوی عمود پاشنه
مجموع حجم بالاست	۸۷ تن

کاربرد مخزن بالاست را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

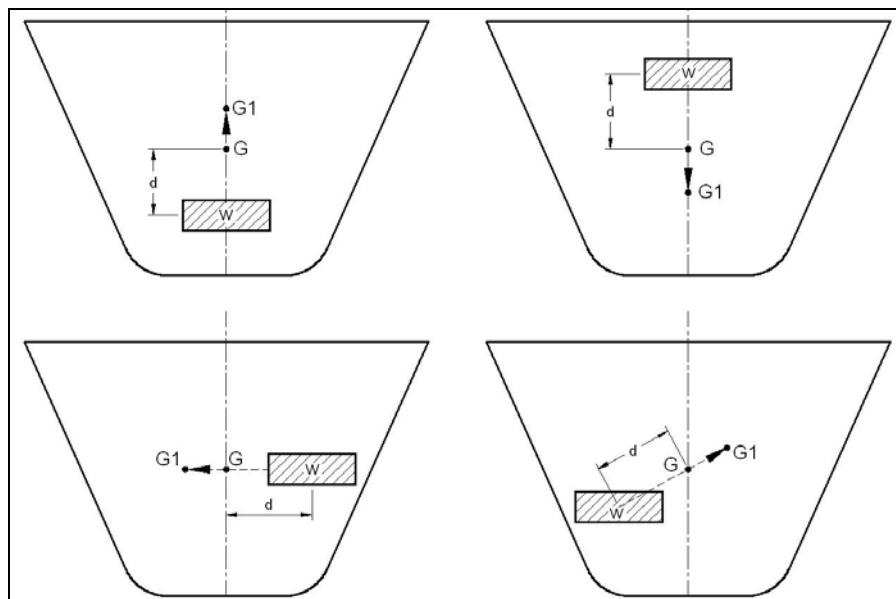
۱- پر کردن آنها در حالت بدون بار کشتی که باعث افزایش آب‌خور و افزایش پایداری می‌شود.

۲- تنظیم شیب (تریم) کشتی با آبیگری یا تخلیه مخازن

ب- تأثیر تغییرات بار بر جابجایی مرکز ثقل شناور

مطابق شکل ۱ باری به وزن w به فاصله d در داخل شناور جابجا می‌شود. این جابجایی باعث جابجا شدن مرکز ثقل به اندازه GG_1 می‌شود که داریم:

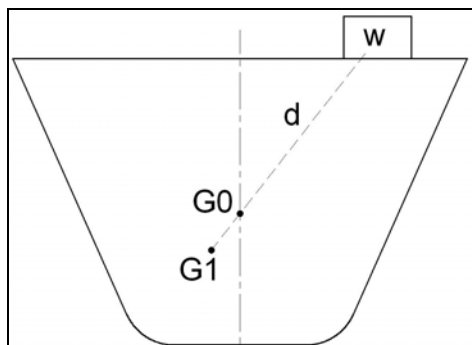
$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$



شکل ۱: تأثیر جابجایی بار بر جابجایی مرکز ثقل

برداشتن بار از روی شناور نیز مطابق شکل ۲ قابل توضیح است:

$$GG_1 = \frac{w.d}{W - w}$$



شکل ۲: تأثیر برداشتن بار بر جابجایی مرکز ثقل

بطور مثال برداشتن جسم از سمت راست شناور باعث جابجایی مرکز ثقل کل شناور به سمت چپ می‌شود. در این حالت برای یافتن امتداد جابجایی GG_1 ، خطی از بار به مرکز ثقل کشتی وصل می‌کنیم. نقطه G_1 نیز در امتداد این خط می‌باشد و بدین ترتیب علاوه بر محاسبه مقدار GG_1 ، راستای آن نیز مشخص می‌گردد.

در هنگام بارگیری نیز مقدار جابجایی مرکز ثقل شناور و راستای آن بطور مشابه

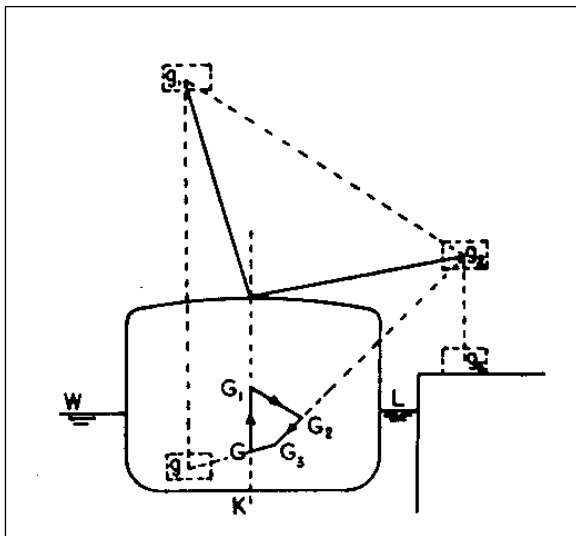
$$GG_1 = \frac{w.d}{W + w} \quad \text{تعیین می‌گردد با این تفاوت که:}$$

که در صورت بارگذاری، وزن نهایی برابر $W+w$ و در صورت باربرداری برابر $W-w$ و در صورت جابجایی بار نیز وزن نهایی برابر W می‌باشد (W وزن اولیه کل شناور است).

فاصله جابجایی بار (d) می‌تواند طولی، عرضی، عمودی و یا به صورت مایل باشد که در هر صورت رابطه فوق برای GG_1 برقرار است.

حال مطابق شکل ۳، باری به وزن w در محل g را در نظر بگیرید که در قسمت کف انبار کشتی قرار دارد. مرکز ثقل کشتی نیز در G می‌باشد. اگر این بار به صورت عمودی از g به g_1 منتقل شود، مرکز ثقل شناور از G به G_1 جابجا می‌شود. همچنین جابجایی بار از g_1 به g_2 نیز انتقال مرکز ثقل از G_1 به G_2 را در پی دارد. اگر بار

در محل G_2 بر روی زمین گذاشته شود به مثابه این است که بار از محل مذکور برداشته شده است لذا مرکز ثقل شناور از G_2 به G_3 منتقل می‌شود. راستای جابجایی از G_2 به G_3 بدین ترتیب بدست می‌آید: از محل G_2 خطی به محل G_3 رسم کرده و امتداد می‌دهیم. محل G_3 در امتداد این خط می‌باشد.



شکل ۳: جابجایی مرکز ثقل شناور در اثر جابجایی بار

مثال: در شناور مدل ۱ باری ۱۰۰ تنی در روی خط مرکزی و در کف شناور قرار دارد. این بار به روی عرشه و به فاصله ۵ متری از سمت چپ خط مرکزی منتقل می‌شود. جابجایی مرکز ثقل را محاسبه کنید.

حل: در شناور مدل ۱ در سناریوی وزنی اصلی داریم:

$$W = 3500 \text{ t}$$

$$Z_G = 5.1 \text{ m}$$

$$Y_G = 0 \text{ m}$$

از طرفی بار در دو راستای Z و Y جابجا شده است. لذا باعث جابجایی مرکز ثقل شناور در دو راستای Z و Y می شود. ارتفاع عرشه از کف انبار هم ۶ متر است. یعنی:

$$w = 100 \text{ t}$$

$$d_z = 6 \text{ m}$$

$$d_y = 5 \text{ m}$$

$$(GG_1)_z = \frac{w \cdot d_z}{W} = \frac{100 \times 6}{3500} = 0.171 \text{ m} = 17.1 \text{ cm}$$

$$(GG_1)_y = \frac{w \times d_y}{W} = \frac{100 \times 5}{3500} = 0.143 \text{ m} = 14.3 \text{ cm}$$

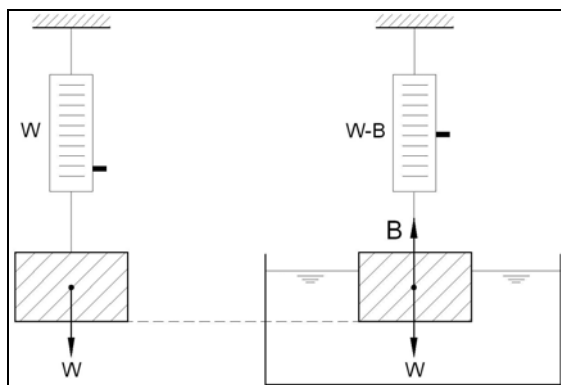
یعنی مرکز ثقل شناور در راستای عمودی ۱۷/۱ سانتی متر رو به بالا و ۱۴/۳ سانتی - متر به سمت چپ جابجا می شود.

بخش ۱-۱۲: ^۱ قانون ارشمیدس و کاهش وزن در آب

* قانون ارشمیدس

این قانون بیان می‌دارد که: «هرگاه جسمی بطور کامل یا قسمتی از آن در داخل آب قرار گیرد، به اندازه وزن آب جابجا شده، نیروی رو به بالا بر جسم وارد می‌شود».

این نیروی رو به بالا که نیروی ارشمیدس (یا در اصطلاح مهندسی دریایی، نیروی بویانسی) نامیده می‌شود به منزله کاهش وزن تعبیر می‌گردد. با استفاده از این قانون، مفهوم «وزن خشک» و «وزن تر» به صورت زیر بیان می‌شود (شکل ۱):



شکل ۱: مشاهده کاهش وزن جسم در داخل آب به کمک نیروسنج

- فرض کنیم جسمی در هوا و خارج از محیط آب، دارای وزن W باشد. این وزن «وزن خشک» جسم نامیده می‌شود.

- حال اگر قسمتی از جسم داخل آب قرار گیرد، نیروی رو به بالای ارشمیدس (که با B نشان داده می‌شود) به آن وارد می‌گردد. در این حالت نیروسنج، وزن جسم را به میزان W' نشان می‌دهد که:

$$W' = W - B$$

که W' همان «وزن تر» است و به صورت زیر تعبیر می‌شود:

نیروی بویانسی - وزن خشک = وزن «تر»

* نحوه محاسبه نیروی ارشمیدس (بویانسی)

همانطور که بیان شد ، نیروی بویانسی برابر است با وزن آب جابجا شده توسط جسم . لذا این وزن برابر است با :

$$W = M.g = \rho_0.V_1.g$$

M: جرم آب جابجا شده

ρ : چگالی آب

V_1 : حجم آب جابجا شده که برابر است با حجم قسمتی از جسم که وارد آب شده است.

* مفهوم جابجایی و شناوری آزاد

اگر جسمی به وزن W داشته باشیم و این جسم را بدون اینکه تکیه‌گاهی داشته باشد، در داخل آب قرار دهیم، این جسم تا حدی در آب فرو می‌رود که وزن آب جابجا شده ، دقیقاً با وزن جسم برابر شود.

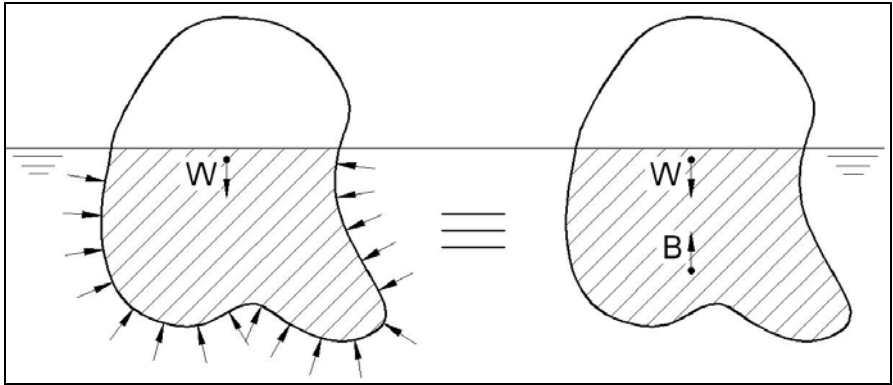
$$W = B \rightarrow \text{در حالت شناوری آزاد}$$

وزن آب جابجا شده توسط جسم = وزن جسم

این مقدار که برای وزن جسم و وزن آب جابجا شده یکسان می‌باشد، در اصطلاح مهندسی دریایی «جابجایی» نامیده می‌شود.

یعنی اگر گفته شود که «جابجایی» یک شناور ۳۵۰۰ تن است یعنی وزن شناور مجموعاً ۳۵۰۰ تن است یا به عبارت دیگر وزن مقدار آبی که کشتی جابجا می‌کند، ۳۵۰۰ تن است.

در نتیجه مفهوم جابجایی را به صورت زیر بیان می‌داریم:



شکل ۲: فشار هیدرواستاتیک سیال وارد بر جسم

$$W = B = \text{displacement} = \rho_0 \cdot g \cdot V_1$$

وزن جسم از چگالی و حجم جسم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$W = M \cdot g = \rho \cdot g \cdot V$$

V : حجم کل جسم

ρ : چگالی جسم

لذا داریم:

$$\rho_0 \cdot g \cdot V_1 = \rho \cdot g \cdot V$$

$$\rho_0 V_1 = \rho V$$

از آنجا که $V_1 < V$ لذا باید:

$$\rho_0 > \rho$$

یعنی برای اینکه جسم بتواند بر روی آب شناور بماند باید:

چگالی جسم > چگالی آب دریا

مثال) استوانه‌ای از جنس فولاد به شعاع ۰/۳ متر و طول ۲ متر داریم که جرم آن ۱ تن است. با مقایسه چگالی بررسی نمائید که آیا این استوانه می‌تواند بر روی آب شناور بماند؟ (چگالی آب $\frac{t}{m^3}$ ۱/۰۲۳).

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$V = \pi.r^2.L = 3.14 * 0.3^2 * 2 = 0.56 \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{1}{0.56} = 1.78 \text{ t/m}^3$$

از آنجا که چگالی این استوانه، بیشتر از آب است، لذا نمی‌تواند بر روی آب شناور بماند و به داخل آب فرو می‌رود.

اگر شعاع استوانه به ۰/۴ متر افزایش یابد، می‌تواند بر روی آب شناور بماند، چراکه:

$$V = \pi.r^2.L = 1 \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{1} = 1 \text{ t/m}^3$$

از آنجا که چگالی آن کوچکتر از چگالی آب دریا شده است، لذا جسم می‌تواند در آب شناور بماند.

* وزن «تر» یک شناور که به صورت آزاد روی آب شناور است، چه مقدار است؟

یادآوری می‌شود که:

نیروی بویانسی - وزن خشک = وزن «تر»

از طرفی بیان شد که اگر جسمی بخواهد به صورت آزاد (بدون تکیه‌گاه) بر روی آب شناور بماند، باید وزن جسم با وزن آب جابجا شده یا همان نیروی بویانسی برابر باشد یعنی:

برای شناوری آزاد: نیروی بویانسی = وزن خشک

لذا داریم: $\circ = \text{نیروی بویانسی} - \text{وزن خشک} = \text{وزن «تر»}$

لذا اگر نیروسنج به جسمی که در داخل آب شناور است، متصل گردد، نیروی صفر را نشان خواهد داد. بنابراین کشتی که بر روی آب شناور است، با هر مقدار بارگذاری و باربرداری، باز هم وزن «تر» کشتی صفر است چراکه اگر بارگذاری بیشتری روی کشتی انجام شو، کشتی بیشتر در آب فرو می‌رود و بویانسی آن متناسب با وزن، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که باز هم وزن و بویانسی با هم برابر می‌شوند لذا وزن «تر» باز هم صفر می‌شود.

مثال: شناور مدل ۲ با جابجایی ۵۵۷۰ تن دارای چه عمق آبخوری می‌باشد. اگر ۱۵۷۰ تن از داخل شناور تخلیه شود، آبخور جدید را محاسبه کنید.

حل: شناور مدل ۲ یک بارج می‌باشد که با استفاده از مشخصات آن داریم:

وزن آب جابجا شده = وزن جسم

$$5570 = L \times B \times T \times 1.025 = 80 \times 13.6 \times T \times 1.025$$

$$T = 3.59 \text{ m}$$

پس از برداشته شدن بار ۱۵۷۰ تنی، وزن شناور برابر ۴۰۰۰ تن می‌شود که داریم:

$$4000 = 80 \times 13.6 \times T \times 1.025$$

$$T = 3.59 \text{ m}$$

مثال: در مثال قبل، وزن تر و وزن خشک را در دو حالت تعیین کنید.

قبل از برداشته شدن بار، وزن خشک برابر ۵۵۷۰ تن و وزن تر برابر صفر می‌باشد.

پس از برداشته شدن بار نیز وزن خشک برابر ۴۰۰۰ تن و وزن تر باز هم برابر صفر

است چراکه جسم همچنان شناور است.

مثال: یک مین دریایی کروی شکل به شعاع 0.5 متر و به چگالی 0.85 با لنگر به کف دریا مهار شده و به طور کامل در داخل آب قرار گرفته است. وزن تر و وزن خشک این مین را بدست آورید.

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \times (0.5)^3 = 0.523 \text{ m}^3$$

$$M = \rho_w \cdot V = 1.025 \times 0.523 = 0.536 \text{ t}$$

$$M_1 = \rho \cdot V = 0.85 \times 0.523 = 0.44 \text{ t}$$

$$\text{وزن خشک} = 0.44 \text{ t}$$

نیروی بویانسی - وزن خشک = وزن تر

$$\text{وزن تر} = 0.44 - 0.536 = -0.096$$

علامت منفی به معنای این است که برآیند نیروی وارد بر این جسم رو به بالا می باشد.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: هتل بارج توریستی

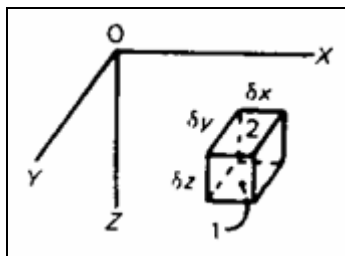


شرکت سازنده: کشتی سازی خلیج فارس

بخش ۱-۱۳: مرکز بویانسی و تغییرات آن

*ماهیت نیروی بویانسی:

همانطور که بیان شد نیروی ارشمیدس همان نیروی بویانسی است که بر جسمی که داخل سیال شناور باشد، به صورت نیروی رو به بالا بر آن وارد می‌شود. این نیرو «نیروی شناوری» نیز نامیده می‌شود. ماهیت نیروی بویانسی از اختلاف فشار بین سطوح فوقانی و تحتانی جسم می‌باشد. جسمی مکعبی شکل را طبق شکل ۱ در نظر بگیرید. اختلاف ارتفاع سطح فوقانی و تحتانی این مکعب برابر است با: $Z_1 - Z_2 = \delta Z$



شکل ۱: المان حجم و فشار وارد بر سطوح فوقانی و تحتانی

اگر فشار در سطح فوقانی این مکعب برابر P_1 باشد، نیروی وارد بر این سطح برابر است با $P_1 \delta x \cdot \delta y$.

همچنین اگر فشار وارد بر سطح تحتانی برابر P_2 باشد، نیروی وارد بر این سطح با توجه به فشار ارتفاع آب δz برابر است با: $P_2 \delta x \cdot \delta y + \rho g \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$. برای داشتن حالت تعادل، این دو نیرو که در راستای عمودی هستند باید با هم برابر باشند:

$$P_1 \delta x \cdot \delta y = P_2 \delta x \cdot \delta y + \rho g \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\delta z} = \rho \cdot g$$

اگر داشته باشیم $Z \rightarrow 0$ و $P_1 \rightarrow P_2$ می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{dp}{dz} = \rho \cdot g$$

که با انتگرال‌گیری از این رابطه داریم:

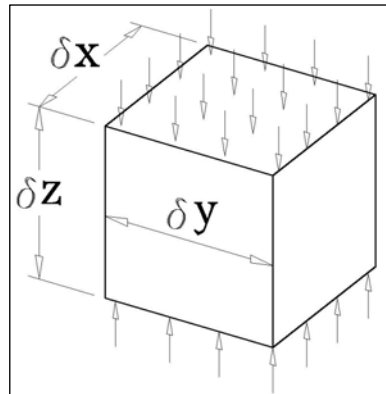
$$P = \rho \cdot g \cdot z$$

باید توجه داشته باشیم که نیروهای هیدرواستاتیکی افقی وارد بر جسم (نیروهای وارد بر سطوح عمودی) برای هر جسمی، برابر و قرینه هم هستند و برآیند آنها برابر صفر است. لذا برای این مکعب (که المانی از هر جسم می‌تواند باشد) نیز نیروهای افقی وارد بر سطوح عمودی، با هم برابر هستند. لذا نیروی خالص وارد بر یک جسم شناور، تنها یک نیروی عمودی می‌باشد که این نیرو، (ناشی از جابجایی سیال)، یک نیروی رو به بالا می‌باشد. لذا، نیروی بویانسی وارد به جسم برابر است با:

$$\delta F_B = \left(\frac{dp}{dz} \delta z \right) \delta x \delta y$$

$$\delta F_B = \rho \cdot g \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$$

$$\delta F_B = \rho \cdot g \cdot \delta V$$



شکل ۲: اختلاف فشار سطوح فوقانی

و تحتانی، عامل نیروی بویانسی هستند.

لذا ملاحظه می گردد که «ماهیت نیروی بویانسی برآیند اختلاف فشار وارد بر سطوح افقی فوقانی و تحتانی جسم می باشد یا برآیند اختلاف فشاری که در راستای عمودی بر جسم وارد می شود».

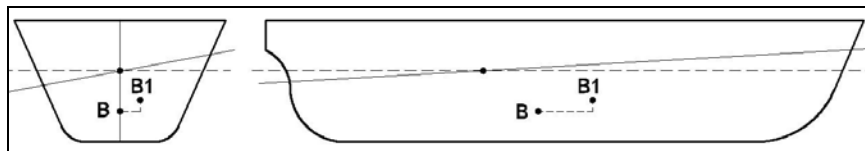
در نهایت نیروی بویانسی برابر است با:

$$F_B = \rho \cdot g \cdot \nabla = \Delta$$

که همان وزن آب جابجا شده توسط حجم داخل آب جسم می باشد که آن را با علامت Δ نشان می دهند و در اصطلاح مهندسی دریایی «جابجایی»^۱ نامیده می شود.

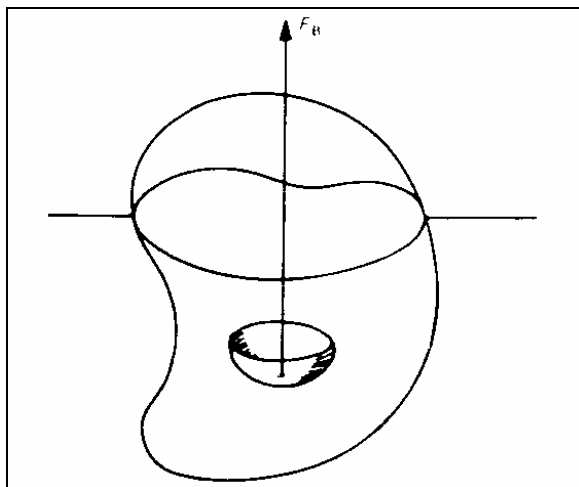
* تغییرات مرکز بویانسی

مرکز بویانسی عبارتست از مرکز حجم داخل آب شناور. اگر یک جسم به طور کامل در داخل آب باشد (مانند زیردریایی)، با غلتش طولی یا عرضی یا حرکات دیگر شناور، مرکز بویانسی تغییر نمی کند چرا که در هر صورت، کل جسم در داخل آب است ولی اگر جسم در سطح آب بوده و قسمتی از آن داخل آب و قسمت دیگر خارج از آب باشد، غلتش طولی یا عرضی شناور باعث تغییر محل مرکز بویانسی می شود که مکان هندسی این تغییرات بسیار اهمیت دارد. گوشه ای از شناور که به داخل آب فرو می رود، مرکز بویانسی نیز به همان سمت جابجا می شود که این تغییر، در غلتش عرضی و غلتش طولی در شکل ۳ نشان داده شده است.



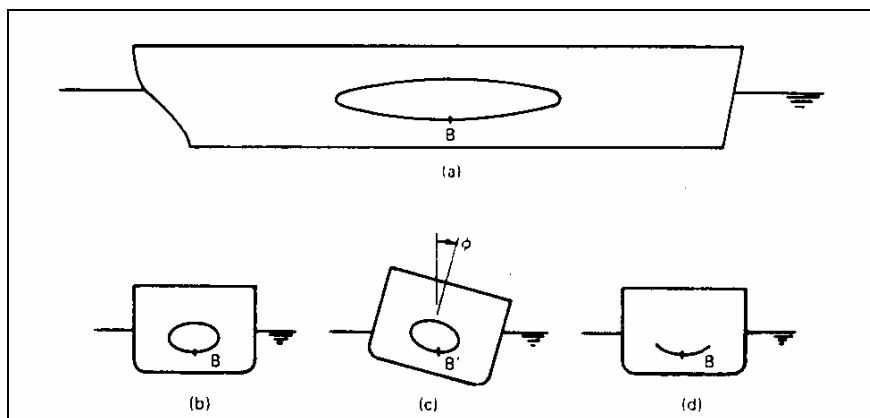
شکل ۳: جابجایی مرکز بویانسی در غلتش طولی و عرضی

در یک تناژ ثابت، جابجایی مرکز بویانسی در غلتش توأم طولی و عرضی، روی یک مکان هندسی جابجا خواهد شد که این سطح را «مکان هندسی بویانسی» گویند (شکل ۴).



شکل ۴: مکان هندسی تغییرات مرکز بویانسی

لذا تغییرات مرکز بویانسی برای یک شناور با شکل مشخص و تناژ ثابت، محدود به این سطح می‌شود و نمی‌تواند خارج یا داخل این سطح باشد و مرکز بویانسی دقیقاً به روی این سطح جابجا می‌شود. «مکان هندسی بویانسی» وابسته به شکل بدنه شناور، می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد که در شکل ۵ نمونه‌ای از آن آمده است.



شکل ۵: تغییرات مرکز بویانسی در غلتش‌های طولی و عرضی

وقتی کشتی بدون غلتش است، مرکز بویانسی در پایین‌ترین نقطه سطح بویانسی قرار دارد (قسمت a) و هر چه شناور غلتش می‌کند، باز هم مرکز بویانسی به گونه‌ای جابجا می‌شود که در پایین‌ترین نقطه سطح بویانسی غلتیده (با فرض غلتیدن سطح بویانسی به همراه کشتی)، قرار گیرد (قسمت c).

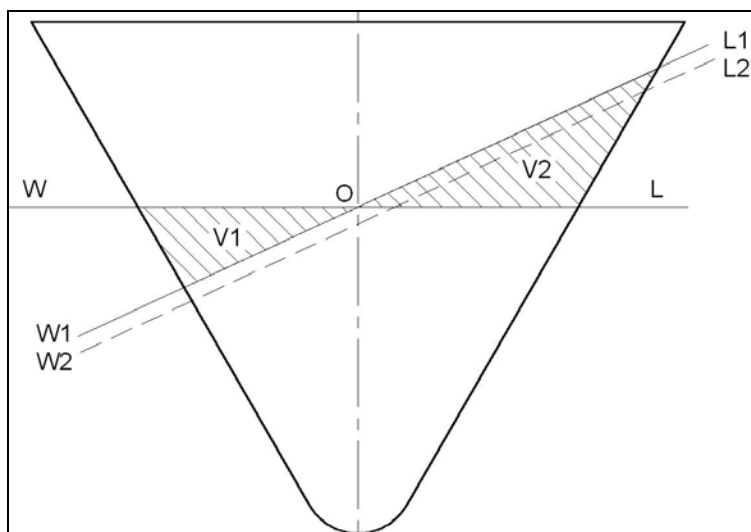
همانطور که در شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، مکان هندسی بویانسی در صورت غلتش 360° درجه، به صورت یک منحنی بسته در می‌آید که البته در واقعیت چنین نیست و حالت (d) برای سطح بویانسی در شناور وجود دارد. اهمیت جابجایی مرکز بویانسی در محاسبات پایداری، در محاسبه «شعاع متاستری» (BM) می‌باشد که به کمک آن نیز «ارتفاع متاستری» (GM) به دست می‌آید که در قسمت‌های بعدی در این باره مطالبی خواهد آمد.

فصل ۲

پايداري عرضي شناور

بخش ۲-۱: موقعیت خط آبخور در زوایای غلتش بزرگ

موقعیت آبخور شناور و تقاطع آن با خط مرکزی در زوایای غلتش کوچک و بزرگ متفاوت است. در زوایای غلتش کوچک، خطوط آبخور از یک نقطه که محل تقاطع با خط مرکزی است، عبور می‌کنند ولی در زوایای غلتش بزرگ، خطوط آبخور در یک نقطه همگرا نمی‌باشند که طبق شکل ۱ می‌توان آنرا توضیح داد.

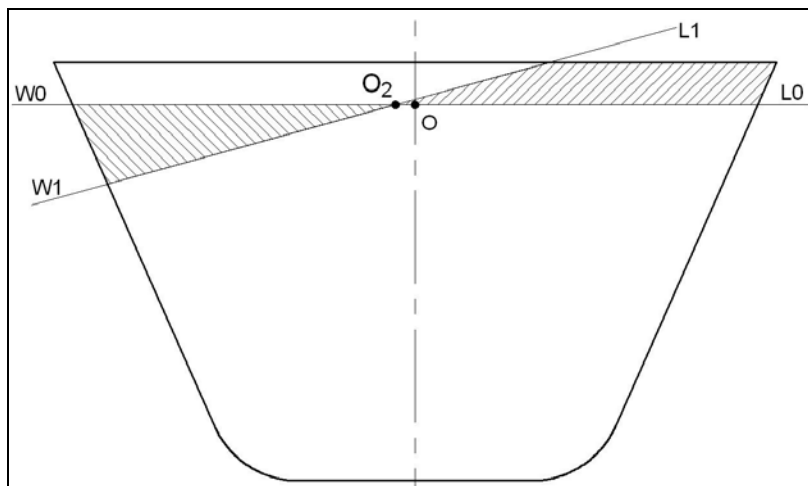


شکل ۱: انتقال خط آبخور از O به O_1 در اثر غلتش شناور

فرض کنید شناوری با مقطع شکل ۱ به اندازه زاویه بزرگ α غلتش نموده است. در این زاویه، اگر فرض کنیم خط آبخور از نقطه O عبور کند، حجم بیرون آمده از آب برابر با V_1 و حجم وارد شده به داخل آب برابر V_2 می‌باشد. مطابق شکل واضح است که $V_2 > V_1$. از طرفی در زوایای غلتش مختلف، مقدار جابجایی کل شناور نباید تغییر کند یعنی حجم بیرون آمده و فرو رفته در آب باید با هم برابر باشند یعنی باید $V_1 = V_2$ باشد که برای این منظور باید خط آبخور W_1L_1 به خط آبخور

W_2L_2 منتقل شود و از نقطه O_1 عبور کند. حال اگر عرشه به زیر آب برود (مطابق شکل ۲) برای برابر شدن حجم زیر آب رفته و بیرون آمده از آب، خط آبخور از O به O_2 منتقل می‌گردد.

بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که خط آبخور در زوایای غلتش بزرگ، از نقطه O نمی‌گذرد. این جابجایی خط آبخور تبعات پایداری زیادی بر شناور دارد از جمله جابجایی مرکز شناوری، مرکز بویانسی و مرکز متاستری که نتیجه آن تغییر رفتار غلتش، زاویه شیب و هیل می‌باشد. همچنین محاسبه مقدار GZ به همین دلیل طبق فرمولهای ریاضی براحتی امکان‌پذیر نیست و باید به کمک نقشه‌های سه بعدی کامپیوتری و روش سعی و خطا محل خط آبخور را در هر زاویه غلتش تعیین کرد و به کمک آن مرکز بویانسی جدید و مقدار GZ را محاسبه نمود.



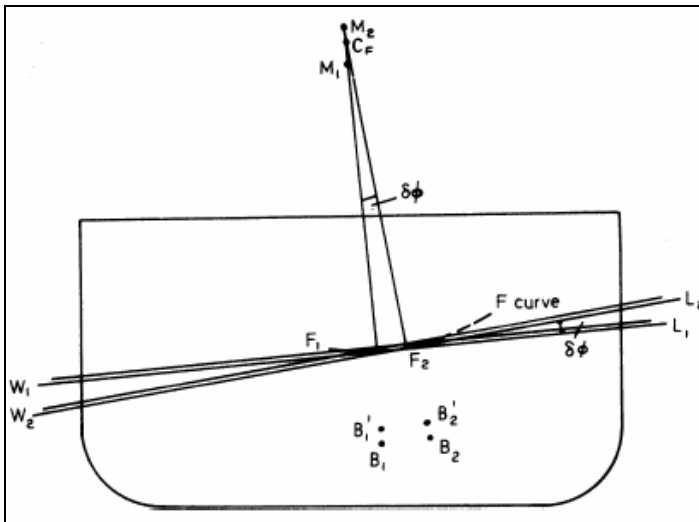
شکل ۲: تأثیر خیسی عرشه در انتقال خط آبخور از O به O_2

بخش ۲-۲: ۱ تغییرات مرکز شناوری در زوایای غلتش و آبخورهای مختلف

همانطور که بیان شد، تریم و هیل کردن شناور حول مرکز شناوری^۲ انجام می‌شود و مرکز شناوری نیز همان مرکز سطح صفحه آبخور می‌باشد.

* تغییرات مرکز شناوری در زوایای غلتش مختلف:

در زوایای غلتش مختلف، شکل صفحه آبخور تغییر می‌کند و در نتیجه مرکز سطح آبخور و مرکز شناوری نیز تغییر می‌یابد. این تغییرات بر روی یک منحنی به مرکز انحناء C_F انجام می‌شود که مطابق شکل داریم:



شکل ۱: مرکز انحنای مکان هندسی تغییرات مرکز شناوری (F).

$$\frac{\overline{B_1 B'_1}}{\overline{B_1 F_1}} = \frac{\delta \nabla}{\nabla + \delta \nabla} = \frac{\overline{B_2 B'_2}}{\overline{B_2 F_2}}$$

همچنین $\overline{B_1 B_2}$ و $\overline{B'_1 B'_2}$ و $\overline{F_1 F_2}$ با هم موازی هستند و

$$\overline{B_1 B_2} = \overline{B_1 M_1} \cdot \delta \varphi$$

اگر $\delta \varphi$ کوچک باشد بنابراین داریم:

$$\frac{\overline{B_1 F_1}}{\overline{B_1 B'_1}} = \frac{\overline{B_1 B_2} - \overline{F_1 F_2}}{\overline{B_1 B_2} - \overline{B'_1 B'_2}}$$

با جاگذاری در رابطه فوق داریم:

$$\frac{\nabla + \delta \nabla}{\delta \nabla} = \frac{\frac{I_1}{\nabla} \delta \varphi - \overline{C_F F_1} \cdot \delta \varphi}{\frac{I_1}{\nabla} \cdot \delta \varphi - \frac{I_1 + \delta I}{\nabla + \delta \nabla} \cdot \delta \varphi}$$

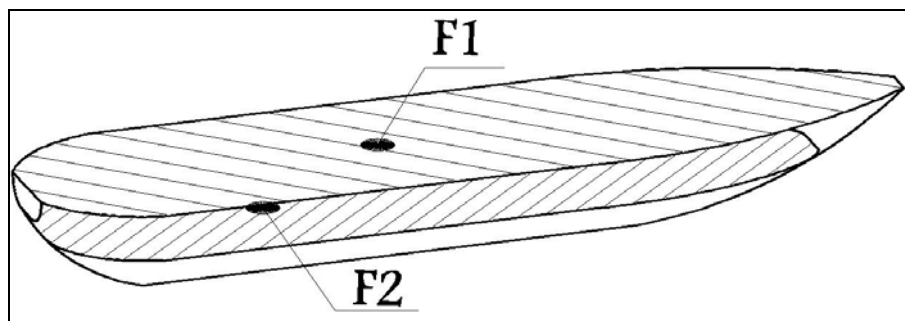
در حالت حدی داریم:

$$C_F F_1 = \frac{dI}{d\nabla}$$

این رابطه را رابطه «لکلرت»^۱ گویند.

* تغییرات مرکز شناوری در آبخورهای مختلف

در آبخورهای مختلف نیز شکل صفحه آبخور تغییر می‌کند و بدین ترتیب مرکز شناوری نیز تغییر می‌نماید.



شکل ۲: تغییرات محل مرکز شناوری در آبخوره‌های مختلف

بخش ۲-۳: ۱

مفهوم نقطه متاستتر و نحوه بدست آوردن آن

*مفهوم نقطه متاستتری^۲ و پرومتاستتر^۳

همانطور که در بخش پارامترهای مؤثر در تحلیل پایداری، توضیح داده شد، کشتی در غلتش عرضی حول نقطه‌ای غلتش یا دوران می‌کند که «متاستتری عرضی» نامیده می‌شود و غلتش طولی نیز حول نقطه «متاستتر طولی» انجام می‌شود. بنابراین غلتش شناور حول یک نقطه تصادفی نیست بلکه حول یک نقطه مشخص به نام «نقطه متاستتر» انجام می‌شود. این نقطه یا مرکز، در زوایای غلتش کوچک (تا حداکثر ۸ درجه) نقطه ثابتی در نظر گرفته می‌شود و در زوایای غلتش بزرگ، نقطه ثابتی نیست و به روی یک منحنی مشخص حرکت می‌کند که در این حالت به آن «پرومتاستتر» گویند. تشابه نقطه متاستتری با نقطه آویز پاندول در بخش‌های قبل توضیح داده شد.

تعیین محل این نقطه به کمک پارامتری به نام «شعاع متاستتری» تعریف می‌شود و این شعاع همان شعاع دایره‌ای است که شناور حول نقطه متاستتر (مرکز دایره) نوسان می‌کند.

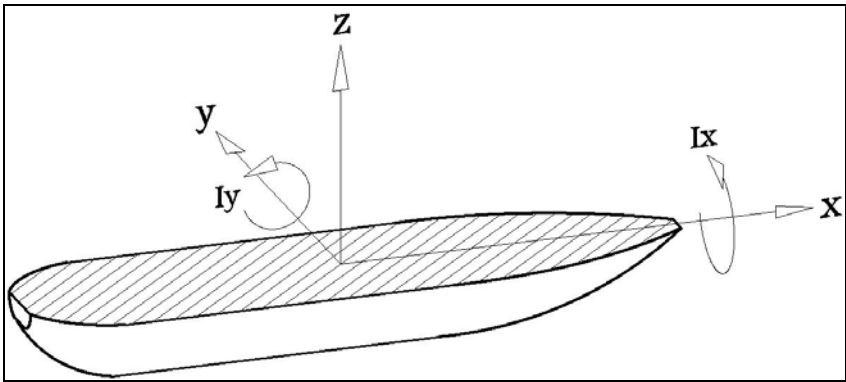
شعاع متاستتری (BM) که فاصله مرکز بویانسی تا نقطه متاستتر است از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$BM = \frac{I}{\nabla}$$

I: ممان دوم سطح آبخور (برای غلتش عرض حول محور x، I_{xx} و برای غلتش طولی حول محور y، I_{yy} می‌باشد- شکل ۱).

∇ : حجم جابجایی (حجم زیر آب شناور).

دیمانسیون I از (m^4) و دیمانسیون ∇ از (m^3) است و در نتیجه دیمانسیون شعاع متاستری نیز بر حسب متر (m) است.



شکل ۱: ممان‌های طولی و عرضی برای محاسبه شعاع متاستری

در غلتش عرضی (حول محور x)، شعاع متاستری عرضی برابر است با:

$$BM_t = \frac{I_{xx}}{\nabla} \quad \text{و در غلتش طولی (حول محور } y\text{)، شعاع متاستر طولی برابر است با:}$$

$BM_L = \frac{I_{yy}}{\nabla}$ که چون I_{yy} خیلی بزرگتر از I_{xx} می‌باشد، لذا شعاع متاستر طولی خیلی بزرگتر از شعاع متاستر عرضی است مثلاً در یک شناور ۸۰ هزار تنی، شعاع متاستر عرضی برابر ۱/۲ متر و شعاع متاستر طولی برابر ۹/۸ متر می‌باشد که البته علاوه بر تناژ شناور، شکل و سطح آب‌خور نیز بسیار اهمیت دارد.

* نحوه محاسبه فرمول BM

اگر یک مثلث شناوری را در نظر بگیریم که به علت غلتش کشتی، در عرض کشتی جابجا می‌شود (شکل ۲)، خواهیم داشت:

$$B_0 B_1 = \frac{v \times b_0 b_1}{\nabla}$$

اگر یک گوه کوچک به طول dl را در نظر بگیریم (شکل ۲) که حجم آن s بوده و مرکز آن از b_0 به b_1 انتقال یافته باشد، می‌توانیم بنویسیم:

$$b_0 b_1 = 2 \times \frac{2}{3} \times \frac{y}{2} = \frac{2}{3} y$$

$$S = \frac{1}{2} \times \frac{y}{2} \times \frac{y}{2} \theta_c dl = \frac{y^2}{8} \theta_c dl$$

$$S \times b_0 b_1 = \frac{2}{3} y \times \frac{y^2}{8} \theta_c dl = \frac{y^3 dl}{12} \theta_c$$

$$V \times g_0 g_1 = \theta_c \int_0^L \frac{y^3}{12} dl$$

$$\int_0^L \frac{y^3}{12} dl = I$$

اما:

و همچنین برای کل شناور:

$$B_0 M \cdot \theta_c = B_0 B_1$$

$$B_0 M \cdot \theta_c = \frac{I}{\nabla} \theta_c$$

$$B_0 M = \frac{I}{\nabla}$$

KM و BM با استفاده از روشهای عددی که در فصل اول تشریح شدند نیز، قابل محاسبه هستند.

بنابراین رابطه زیر را می‌توان برای کلیه کشتی‌ها و در همه زوایای غلتش استفاده کرد.

$$KM = KB + BM = KB + \frac{I}{\nabla}$$

مثال) برای شناور مدل ۲ در آب‌خور ۳ متر، مقدار KM را محاسبه کنید.

$$L = 80 \text{ m}$$

$$B = 13.6 \text{ m}$$

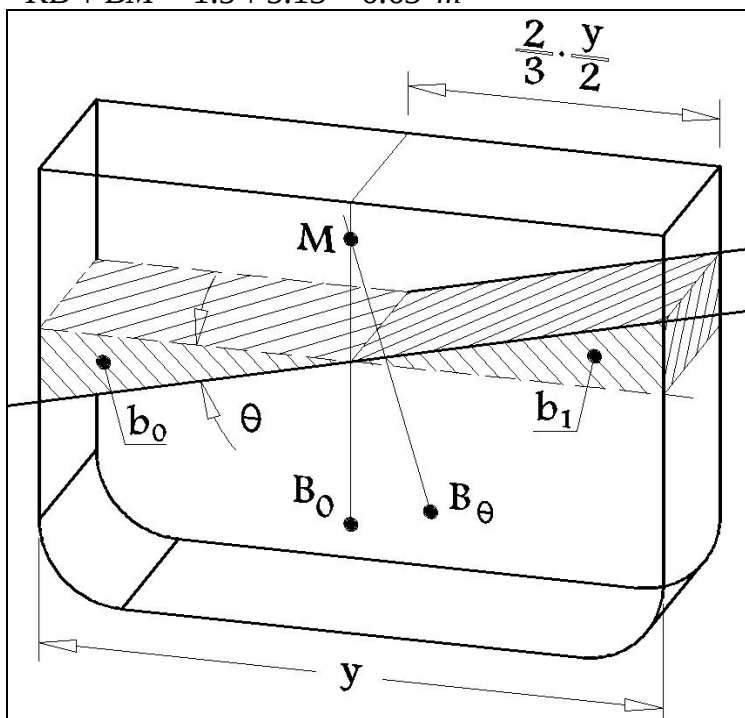
$$T = 3 \text{ m}$$

$$\nabla = LBT = 80 \times 13.6 \times 3 = 3264 \text{ m}^3$$

$$KB = \frac{T}{2} = \frac{3}{2} = 1.5 \text{ m}$$

$$BM = \frac{I}{\nabla} = \frac{\frac{1}{12}LB^3}{LBT} = \frac{B^2}{12T} = \frac{(13.6)^2}{12 \times 3} = 5.13 \text{ m}$$

$$KM = KB + BM = 1.5 + 5.13 = 6.63 \text{ m}$$

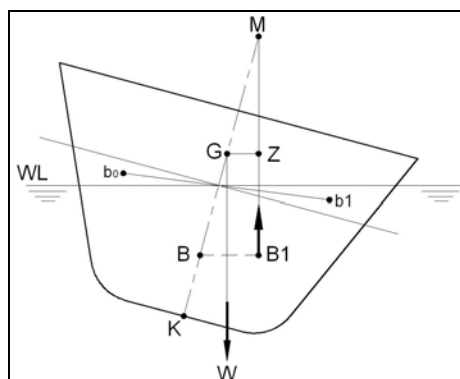


شکل ۲: جابجایی مثلث‌ها (گوه‌های) شناوری در اثر غلتش شناور

* تعیین نقطه متاستر به روش ترسیمی

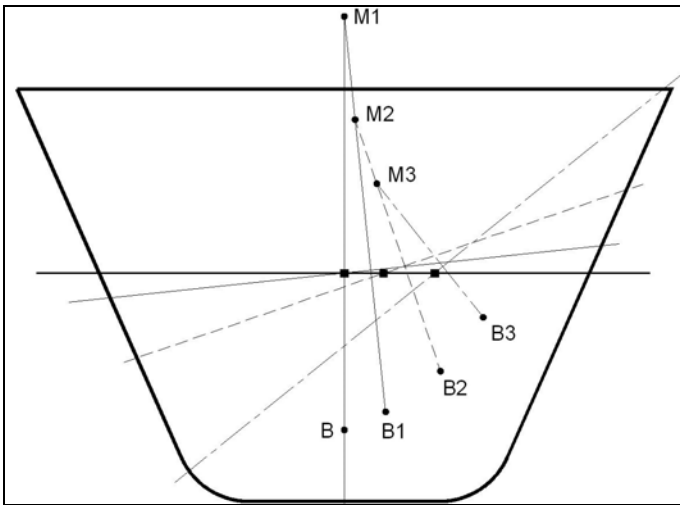
در زوایای غلتش کوچک، نقطه M را به روش ترسیمی و به صورت زیر می‌توان بدست آورد.

هنگامیکه شناور غلتش می‌کند، مرکز بویانسی از B به B_1 منتقل می‌شود. راستای نیروی بویانسی همواره به صورت عمودی است که امتداد دادن راستای نیروی بویانسی، خط مرکزی شناور را قطع می‌کند (طبق شکل ۳). محل تقاطع این دو خط همان نقطه متاستر (M) است.



شکل ۳: موقعیت مرکز بویانسی و متاستری در زوایای غلتش کوچک

باید توجه داشت که با بزرگتر شدن زاویه غلتش، نقطه M دیگر بر خط مرکزی شناور منطبق نیست و همانطور که توضیح داده شد، بر روی یک منحنی حرکت می‌کند. در زوایای غلتش بزرگ، متاستر از محل تقاطع امتداد مرکز بویانسی جدید و قدیم بدست می‌آید یعنی محل پرومتاستر در واقع وابسته به موقعیت مرکز بویانسی (B) است و مسیر تغییرات B نیز در بخش‌های قبل توضیح داده شد. بنابراین مرکز بویانسی و متاستری به طور پیوسته با غلتش شناور تغییر می‌کنند.



شکل ۴: نحوه بدست آوردن نقطه متاسنتری در زوایای غلتش بزرگ

ايران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: یدک کش - ذوالجناح



شرکت سازنده: شرکت صدرا

طول: ۱۶/۲۵ متر

عرض: ۵/۱۸ متر

ارتفاع: ۳/۵ متر

بخش ۲-۴: ۱

تغییرات شعاع متاسنتری بر حسب زوایای غلتش

همانطور که بیان شد، نقطه متاسنتری در زوایای غلتش کوچک نقطه‌ای ثابت است. از طرفی از آنجا که زوایای غلتش طولی شناور، بسیار کوچک است (برخلاف غلتش عرضی که زوایای بزرگی است)، لذا تغییرات محل متاسنتری طولی (M_L) معمولاً بررسی نمی‌شود و تغییرات محل متاسنتری عرضی (M_T) یا شعاع متاسنتری عرضی (BM_T) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تغییرات BM تابعی از تغییرات مرکز بویانسی (B) و نقطه متاسنتری (M) به صورت همزمان است که از رابطه $\frac{I}{\nabla}$ در هر زاویه غلتشی قابل محاسبه است.

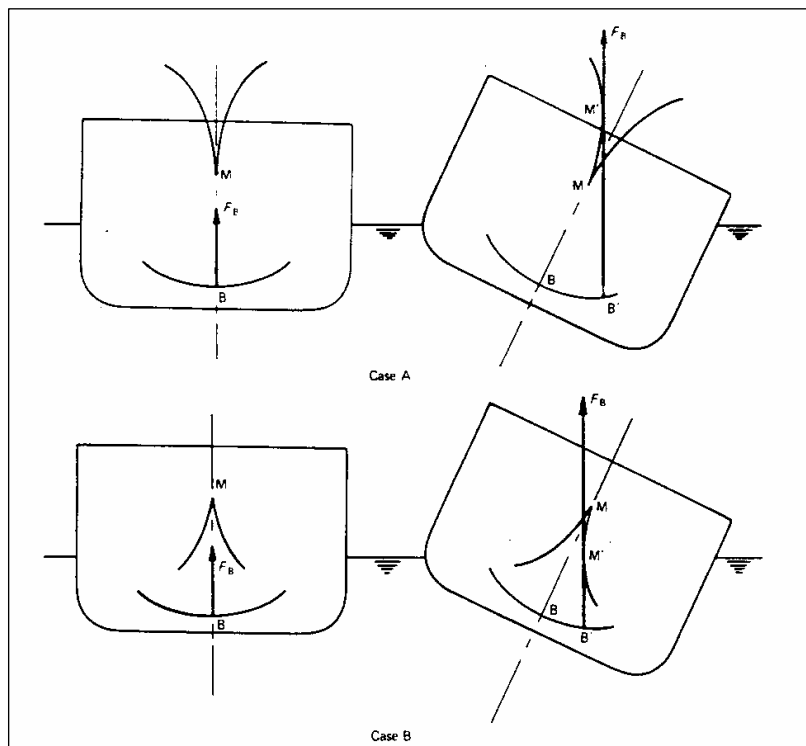
برای تعیین منحنی مکان هندسی تغییرات B ، M باید در زوایای مختلف، کشتی را دوران داد و در هر زاویه غلتش، مقدار I را برای آن سطح آب‌خور محاسبه کرد. برای اینکار باید نقشه‌های سه‌بعدی کامپیوتری از کشتی در اختیار باشد که بتوان کشتی را به راحتی دوران داد و مشخصات سطح آب‌خور را محاسبه کرد وقتی متاسنتر دیگر ثابت نباشد و بر روی یک منحنی حرکت کند، آن را «پرومتاسنتر» گویند. در شکل ۱ منحنی تغییرات B ، M نشان داده شده است.

مطابق شکل مشخص است که تغییر محل M وابسته به تغییر مکان B می‌باشد یعنی محل نقطه پرومتاسنتر وابسته به محل مرکز بویانسی است که در صورت غلتش شناور، این نقطه به صورت لحظه به لحظه تغییر مکان می‌دهد و این تغییر مکان روی یک مکان هندسی همانند شکل ۱ است.

در حالت A با غلتش کشتی، شعاع متاسنتری افزایش می‌یابد یعنی I در حالتی که کشتی بدون زاویه غلتش است، در حداقل مقدار خود است و با غلتش کشتی، همچنان

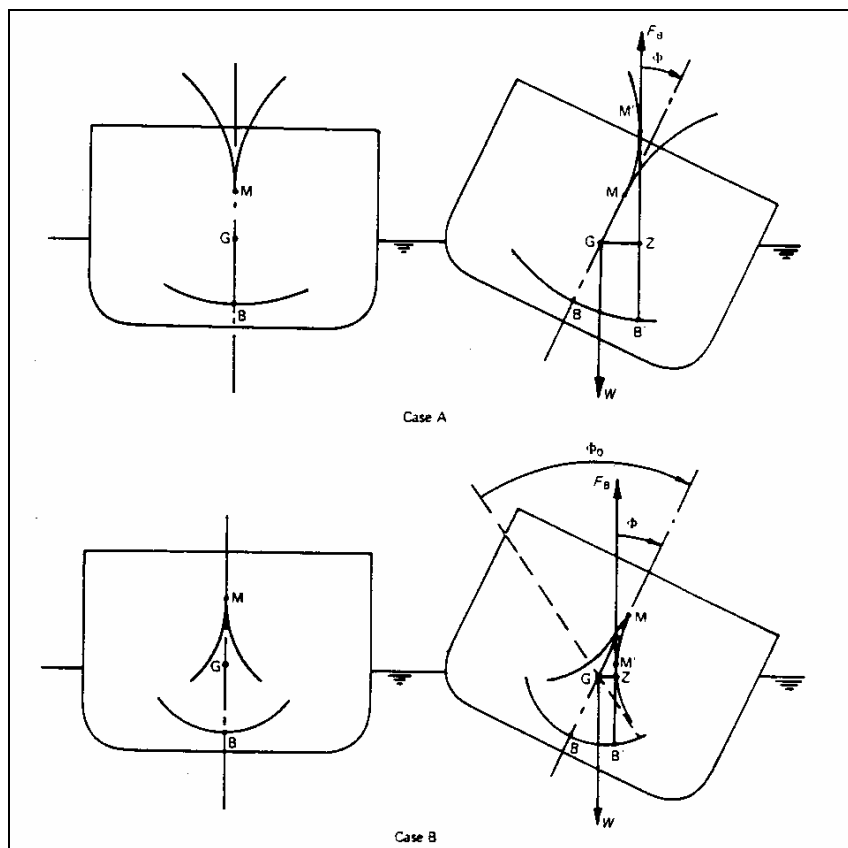
افزایش می‌یابد. در حالت B، با غلتش شناور، شعاع متاستیری کاهش می‌یابد یعنی در حالت بدون زاویه غلتش، I در بیشترین مقدار خود است. یعنی تغییرات I تابعی از تغییرات زاویه غلتش است. اگر r را شعاع انحناء مکان هندسی B در زاویه کوچک φ بدانیم داریم:

$$r = \frac{\delta(BM)}{\delta\varphi} \quad \text{یا} \quad r = \frac{d(BM)}{d\varphi} = \frac{1}{\nabla} \frac{dI}{d\varphi} \quad \varphi \rightarrow 0$$

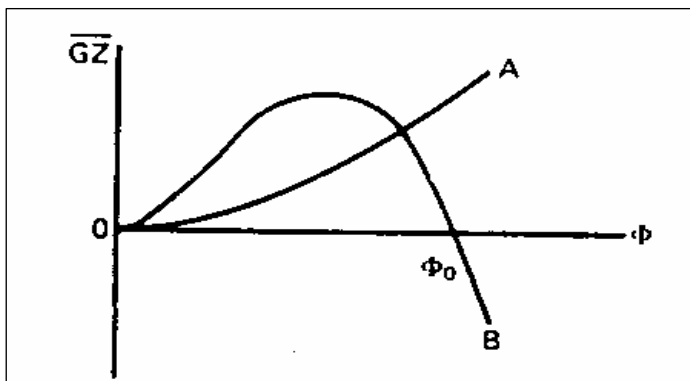


شکل ۱: منحنی تغییرات پرومتاستیر در زوایای غلتش بزرگ

نیروهای اصلی وارد بر شناور (وزن و بویانسی) و وضعیت بازگرداننده (GZ) در زوایای غلتش مختلف که ناشی از تغییرات پرومتاستر است، در شکل ۲ نشان داده شده است.

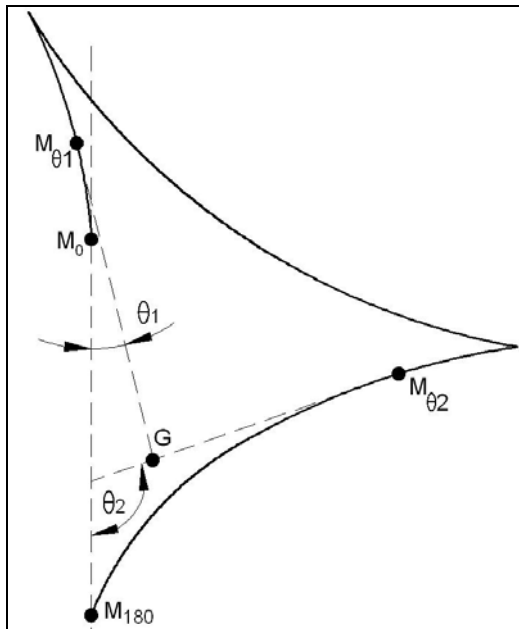


شکل ۲: تغییرات GZ همراه با تغییرات پرومتاستر



شکل ۳: مقایسه منحنی GZ در حالات A و B.

بازوی بازگرداننده GZ عامل اصلی در تحلیل پایداری است و همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود تغییرات GZ در این دو حالت متفاوت می‌باشد. محدوده این تغییرات روی منحنی $GZ - \phi$ نشان داده شده است. در حالت B زاویه ϕ_0 زاویه‌ای است که در آن امتداد نیروی وزن و بویانسی بر هم منطبق می‌شوند یعنی $GZ = 0$ می‌شود و این به معنای پایان محدوده پایداری و شروع حالت ناپایدار برای شناور می‌باشد. در حالت A، این زاویه خیلی دیرتر بروز می‌کند یعنی در زوایای غلتش زیاد اتفاق می‌افتد. تغییرات منحنی مکان هندسی M از صفر تا 180° درجه را می‌توان به طور دقیق‌تر در شکل ۴ ملاحظه کرد.



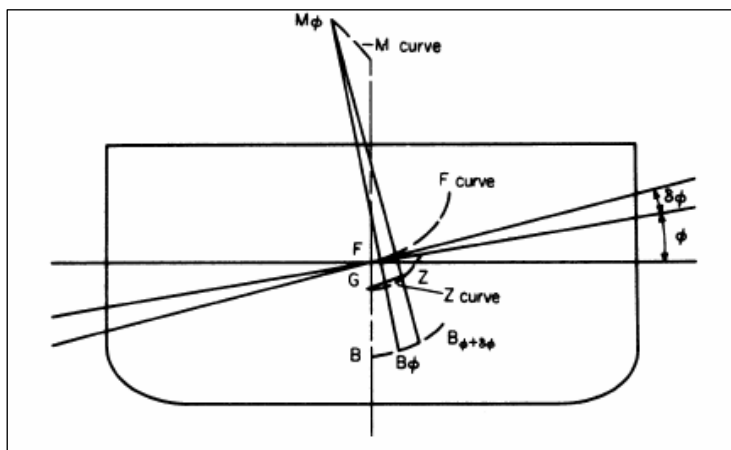
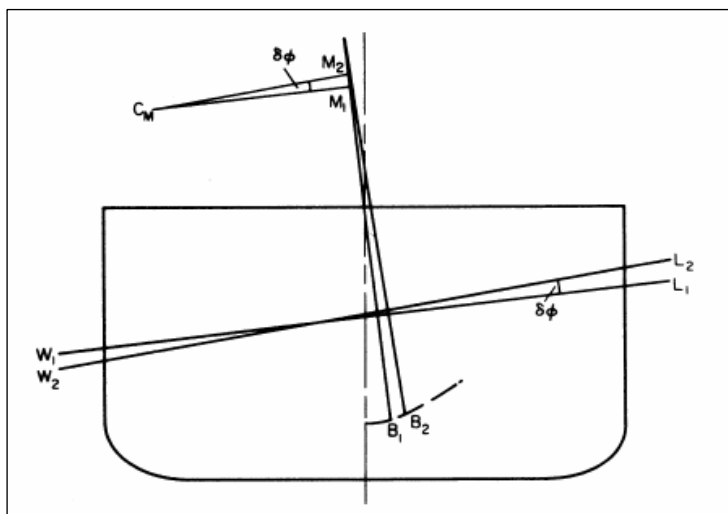
شکل ۵: مسیر تغییرات واقعی متاسنتر

* تعریف مرکز انحناء منحنی متاسنتری

مطابق مطالب فوق، نقطه پرومتاسنتر در زوایای غلتش مختلف بر روی یک مکان هندسی منحنی حرکت می‌کند. برای این منحنی می‌توان یک مرکز انحناء $(C_M M)$ و شعاع انحناء تعریف کرد که مطابق شکل ۵ داریم:

$$M_1 M_2 = \delta(\overline{B_\varphi M_\varphi}) = (\overline{C_M M}) \delta\varphi$$

$$\overline{C_M M} = \frac{d\overline{B_\varphi M_\varphi}}{d\varphi} = \frac{1}{\nabla} \frac{dI_\varphi}{d\varphi}$$



شکل ۵: مرکز انحنای منحنی متاسنتری

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کشتی مسافربری - والفجر



شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

جابجایی: ۹/۵ تن

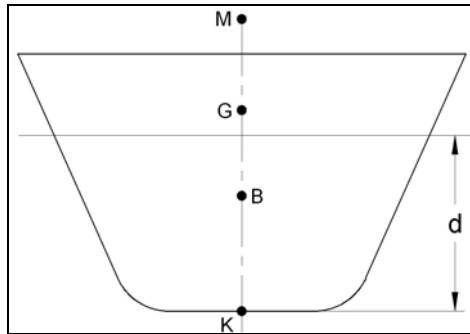
طول: ۱۲/۵ متر

عرض: ۳ متر

تعداد سرنشین: ۴۱ نفر

بخش ۲-۵: محاسبه KM و GM براساس شعاع متاستری

همانطور که در شکل ۱ مشخص است، ترتیب نقاط K، B، G و M را می‌توان به این صورت در نظر گرفت (محل نقطه B و G می‌تواند برعکس باشد).



شکل ۱: موقعیت تقریبی M, G, B, K

K منطبق بر کیل شناور است که می‌توان «ارتفاع متاستری» (GM) را به صورت زیر به دست آورد:

$$KM = KB + BM = KB + \frac{I}{\nabla}$$

که KB همان فاصله عمودی مرکز بویانسی است.

$$GM = KM - KG = \left(KB + \frac{I}{\nabla}\right) - KG$$

که KG نیز همان فاصله عمودی مرکز ثقل است. بدین ترتیب با استفاده از شعاع متاستری (BM)، می‌توان KM و GM را به راحتی تعیین کرد.

این مقادیر برای یک بارج به صورت زیر محاسبه می‌گردد (طول L ، عرض B ، و آب‌خور d):

$$V = L.B.d$$

$$I_x = \frac{1}{12} L \cdot B^3$$

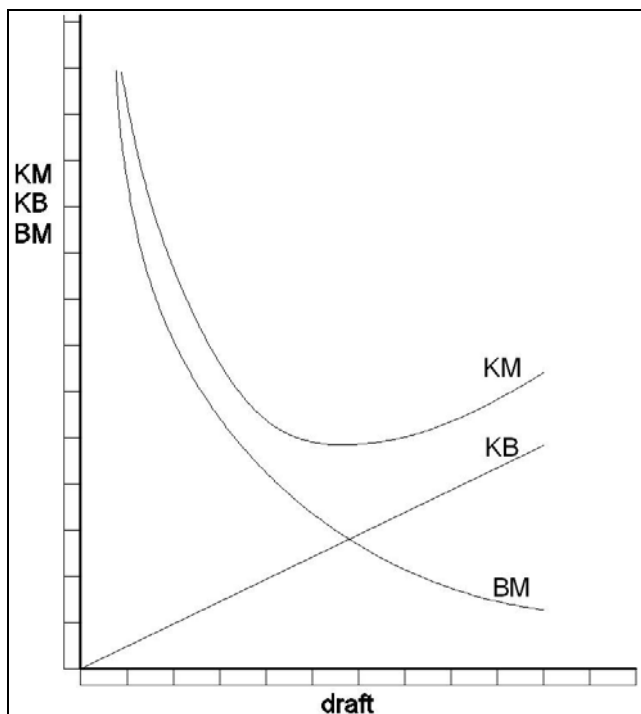
$$BM = \frac{I_x}{V} = \frac{L.B^3}{12L.B.d} = \frac{B^2}{12d}$$

به دلیل شکل مکعبی بارج داریم: $KB = \frac{d}{2}$

$$KM = KB + BM$$

$$KM = \frac{d}{2} + \frac{B^2}{12d}$$

ملاحظه می‌شود که با افزایش آب‌خور (d)، مقدار KB افزایش و مقدار BM کاهش می‌یابد. منحنی این تغییرات برای یک بارج در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: مقادیر KM و BM ، KB در آبخوره‌های مختلف برای یک بار

ملاحظه می‌گردد که منحنی KM دارای یک نقطه مینیموم است. حداقل مقدار KM از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d(KM)}{d(d)} = \frac{1}{2} - \frac{B^2}{12d^2}$$

برای یافتن حداقل مقدار:

$$\frac{d(KM)}{d(d)} = 0$$

$$d^2 = \frac{B^2}{6}$$

$$d = \frac{B}{\sqrt{6}}$$

$$\frac{1}{2} - \frac{B^2}{12d^2} = 0$$

$$KM = \frac{d}{2} + \frac{(d\sqrt{6})^2}{12d} = \frac{d}{2} + \frac{6d^2}{12d} = \frac{d}{2} + \frac{d}{2} = d$$

پس برای یک شناور بارج شکل، حداقل مقدار KM برابر مقدار d می‌باشد و در آب‌خور $d = \frac{B}{\sqrt{6}}$ اتفاق می‌افتد.

مثال) مقدار KM را برای یک شناور با مقطع V شکل محاسبه کنید.

$$I = \frac{LB^3}{12}$$

$$\nabla = \frac{1}{2}LBd$$

$$BM = \frac{I}{\nabla} = \frac{LB^3}{12\nabla} = \frac{LB^3}{12(\frac{1}{2}LBd)} = \frac{B^2}{6d}$$

$$KM = KB + BM$$

$$KB = \frac{2}{3}d$$

$$KM = \frac{2}{3}d + \frac{B^2}{6d}$$

نمودار تغییرات KB، BM و KM همانند بارج است و حداقل مقدار KM را نیز می‌توان به روش قبل محاسبه کرد. روشهای دیگری از محاسبه KM در بخش بعد برای اشکال خاص بدنه ارائه شده است.

مثال: در شناور مدل ۲، مقادیر KB, BM و KM را در آب‌خور ۵ متر محاسبه کنید. همچنین مشخص کنید که حداقل مقدار KM در چه آب‌خوری و به چه مقدار است.
حل:

$$KB = \frac{d}{2} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ m}$$

$$BM = \frac{B^2}{12d} = \frac{13.6^2}{12 \times 5} = 3.1 \text{ m}$$

$$KM = KB + BM = 5.6 \text{ m}$$

آبخور مربوط به حداقل KM برابر است با:

$$d = \frac{B}{\sqrt{6}} = \frac{13.6}{\sqrt{6}} = 5.55 \text{ m}$$

از آنجا که حداکثر آبخور تعریف شده برای این شناور ۵ متر است لذا هیچگاه به

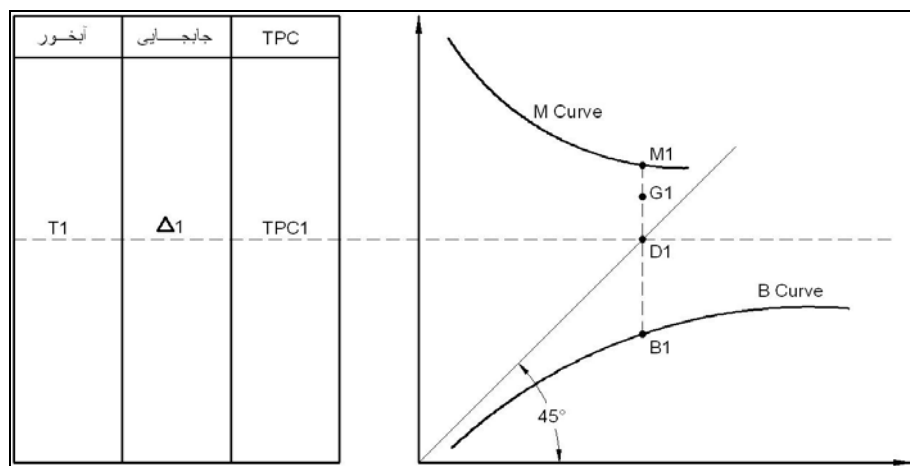
مقدار حداقل منحنی KM نمی‌رسد. بنابراین حداقل مقدار KM برابر است با:

$$(KM)_{\min} = d = 5 \text{ m}$$

بخش ۲-۶: ۱

منحنی KM و KB در اشکال هندسی خاص بدنه

مقادیر KM و KB یا به عبارتی مکان هندسی متاستر و مرکز بویانسی در آبخوره‌های مختلف تغییر می‌کند. در این قسمت به طرز استفاده از این منحنی‌ها برای اشکال هندسی خاص بدنه اشاره می‌شود.



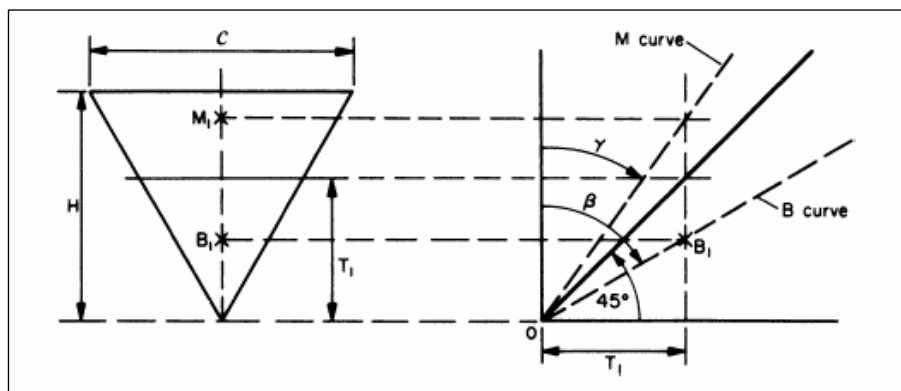
شکل ۱: نحوه استخراج مقادیر KB و KM در آبخور معین

فرض کنید نمودار شکل ۱ برای بدنه یک شناور ترسیم شده است. حال مقادیر KM و KB در آبخور T1 مطلوب است.

برای استخراج این مقادیر یک خط مستقیم با زاویه ۴۵ درجه ترسیم می‌کنیم که از محور مختصات عبور کند. سپس از آبخور T1 یک خط افقی با خط ۴۵ درجه قطع می‌دهیم (خط ۴۵ درجه خط آبخور T1 را به محور افقی تبدیل می‌کند). از محل تقاطع

این دو خط خطی عمود بر دو منحنی ترسیم می‌کنیم. مقادیر KM و KB را از نمودار خوانده و در جدول یادداشت می‌کنیم.

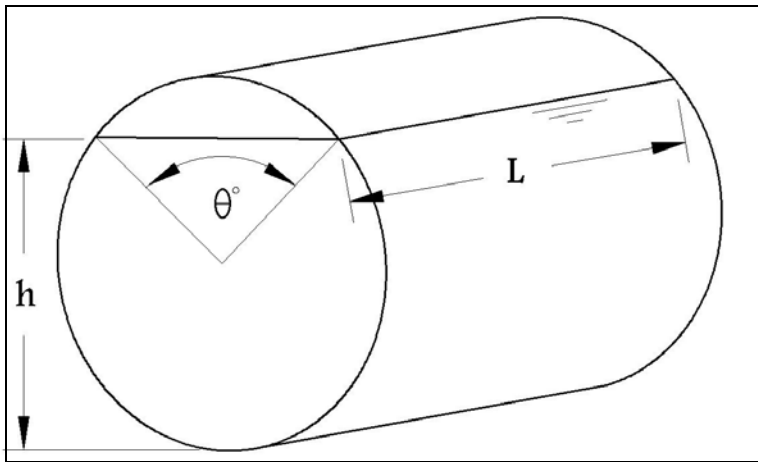
محور عمودی بدنه می‌تواند مقدار آب‌خور یا نسبت ارتفاع آب‌خور به ارتفاع بدنه باشد. محور افقی نیز همان آب‌خور می‌باشد که به واسطه خط 45° درجه از حالت عمودی به محور افقی انتقال یافته است و سپس مقادیر KB و KM از محور عمودی خوانده می‌شود. مفهوم این مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. هم‌اکنون نحوه استخراج این مقادیر برای شکل‌های بدنه استوانه‌ای، مکعبی، V شکل و سهمی شکل بیان می‌گردد.



شکل ۲: منحنی KB و KM برای یک شناور با مقطع V شکل

✳ بدنه استوانه‌ای

الف - استوانه افقی



شکل ۳: استوانه شناور در داخل آب به شعاع R و آب‌خور h

استوانه‌ای به شعاع R و طول L را در نظر می‌گیریم که مطابق شکل ۱ تا آب‌خور h در داخل آب قرار گرفته است. با استفاده از روابط هندسی در استوانه‌ها محاسبه شعاع متاستری (BM) در این حالت به صورت زیر می‌باشد:

$$V = \left[\frac{1}{2} R^2 \theta - \left[\frac{1}{2} R \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot 2R \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \right] \cdot L \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \sin \theta) \cdot L \quad (6)$$

ممان دوم سطح آب‌خور برابر است با:

$$I = \frac{1}{12} \cdot L \cdot \left[2R \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^3 \quad (7)$$

شعاع متاستری BM برابر است با $BM = \frac{I}{V}$ که در نتیجه خواهیم داشت:

$$BM = \frac{L \cdot \left[2R \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^3}{6R^2 [\theta - \sin\theta] \cdot L} \quad (۸)$$

$$BM = \frac{8R^3 \left(\sin\frac{\theta}{2} \right)^3}{6R^2 [\theta - \sin\theta]} \quad (۹)$$

$$KB = R - \frac{4}{3} R \frac{\left(\sin\frac{\theta}{2} \right)^3}{\theta - \sin\theta} \quad (۱۰)$$

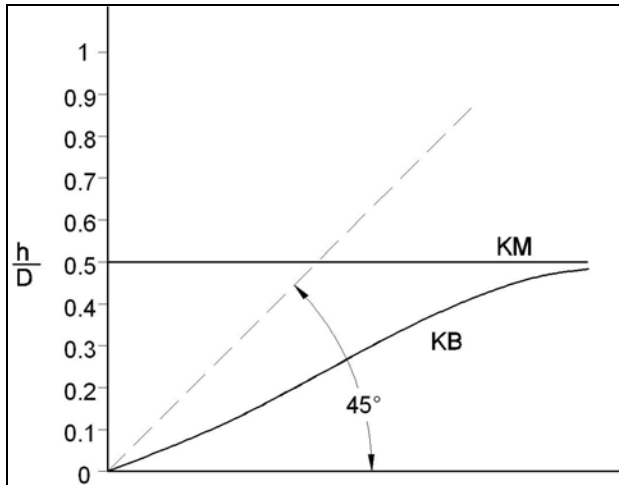
$$KM = KB + BM \quad (۱۱)$$

$$KM = \frac{8R^3 \left(\sin\frac{\theta}{2} \right)^3}{6R^2 (\theta - \sin\theta)} + R - \frac{4}{3} R \cdot \frac{\left(\sin\frac{\theta}{2} \right)^3}{\theta - \sin\theta} \quad (۱۲)$$

$$\boxed{KM = R} \quad (۱۳)$$

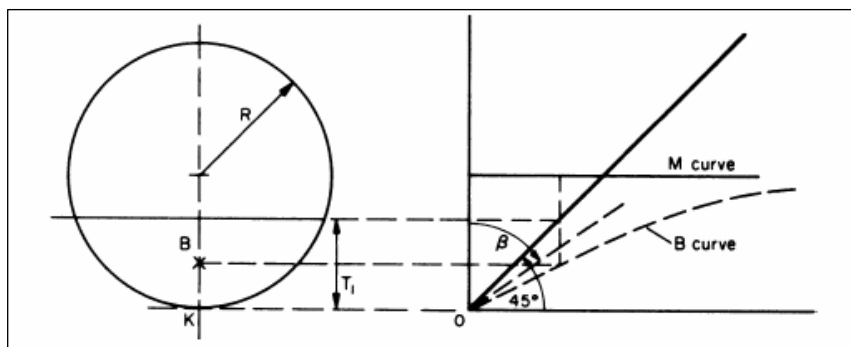
ملاحظه می‌شود که طبق محاسبات فوق، مقدار KM مستقل از مقدار آب‌خور و همواره برابر مقدار ثابت شعاع استوانه (R) می‌باشد. این در حالی است که در شناورها مکان هندسی تغییرات متاستر بر حسب آب‌خور، تقریباً "به شکل یک سهمی می‌باشد.

در نتیجه ملاحظه می‌شود که مقدار KM در شکل‌های استوانه افقی مقدار ثابتی برابر شعاع استوانه R می‌باشد و مکان هندسی آن منطبق بر مرکز استوانه است. نمودار آن مطابق شکل ۴ است که محور عمودی آن نسبت آب‌خور به قطر $\left(\frac{h}{D}\right)$ می‌باشد و $\frac{h}{D} = 0.5$ برابر شعاع استوانه است.



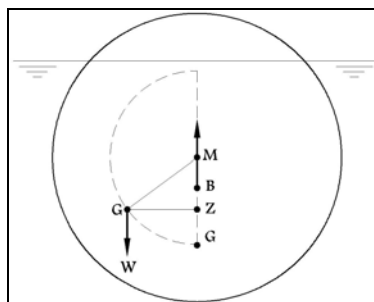
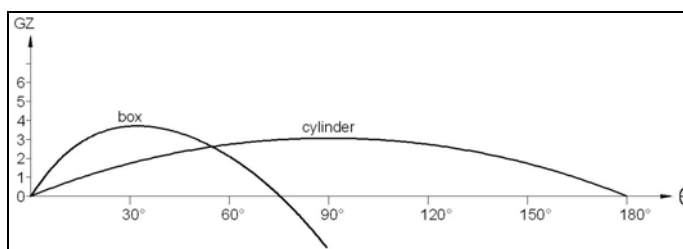
شکل ۴: نمودار KB و KM برای شکل استوانه افقی

و نحوه استخراج مقادیر از شکل ۵ بدست می‌آید.



شکل ۵: نحوه استخراج مقادیر KB و KM با استفاده از خط ۴۵ درجه

به دلیل همین خاصیت استوانه می‌باشد که در استوانه، مقدار GZ در ۹۰ درجه به حداکثر مقدار و در ۱۸۰ درجه برابر صفر می‌شود یعنی محدوده پایداری آن از صفر تا ۱۸۰ درجه می‌باشد که در شکل زیر قابل ملاحظه است و یک منحنی سینوسی کامل می‌باشد. علت این امر ثابت بودن محل B در زوایای غلتش مختلف است.



شکل ۶: تغییرات GZ در زوایای غلتش مختلف یک استوانه افقی

که در زاویه ۹۰ درجه به حداکثر مقدار می‌رسد.

زیردریایی‌های تک بدنه را می‌توان شبیه به استوانه در نظر گرفت و روابط فوق را برای آن بکار برد. در این زیردریایی‌ها در زیر آب نیز متاستر بر مرکز بویانسی منطبق می‌شود و در واقع مقدار KM برابر KB و باز هم برابر شعاع استوانه است. در زیردریایی‌های دو بدنه با توجه به شکل مخازن بین دو بدنه، این روابط ممکن است مصداق کامل نداشته باشد.

ب- استوانه عمودی

اگر استوانه‌ای به شعاع R و طول L به صورت عمودی تا آب‌خور T در داخل آب شناور باشد داریم:

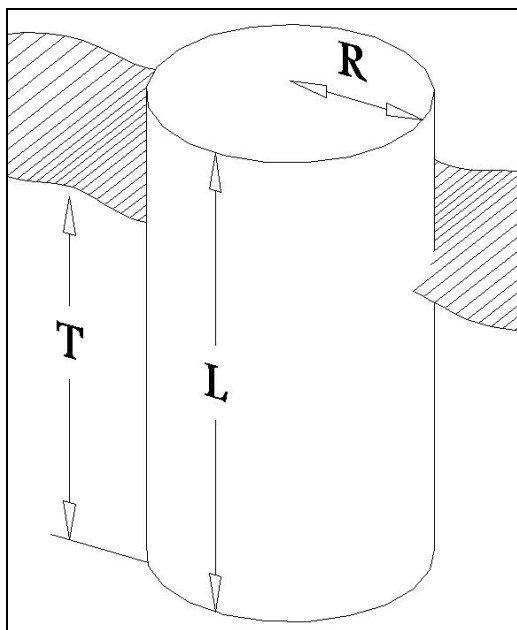
$$KB = \frac{T}{2}$$

$$BM = \frac{I}{V} = \frac{\pi \frac{R^4}{4}}{\pi R^2 T} = \frac{R^2}{4T}$$

$$KM = \frac{T}{2} + \frac{R^2}{4T}$$

برای استوانه عمودی داریم $KM_l = KM_t$ چرا که

$$I_l = I_t = \frac{\pi R^4}{4}$$


 شکل ۷: استوانه عمودی با آبخور t

مثال) استوانه‌ای به شعاع ۲ متر و آبخور ۴ متر در داخل آب به صورت قائم شناور است (محور استوانه، عمود بر سطح آب). مقدار KM آن را محاسبه کنید.

حل:

$$r = 2 \text{ m}$$

$$T = 4 \text{ m}$$

$$\nabla = \pi r^2 T = \pi \times (2)^2 \times 4 = 50.24 \text{ m}^3$$

$$KB = \frac{T}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ m}$$

$$BM = \frac{I}{\nabla}$$

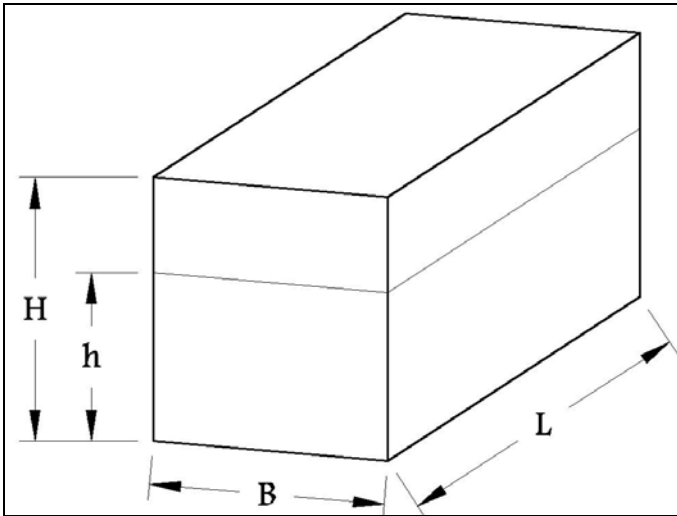
$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi (2)^4}{4} = 12.56 \text{ m}^4$$

$$BM = \frac{12.56}{50.24} = 0.25 \text{ m}$$

$$KM = KB + BM = 2 + 0.25 = 2.25 \text{ m}$$

* بدنه مکعبی شکل

مطابق شکل ۸ مکعبی به ارتفاع H و آبخور h در نظر می گیریم .



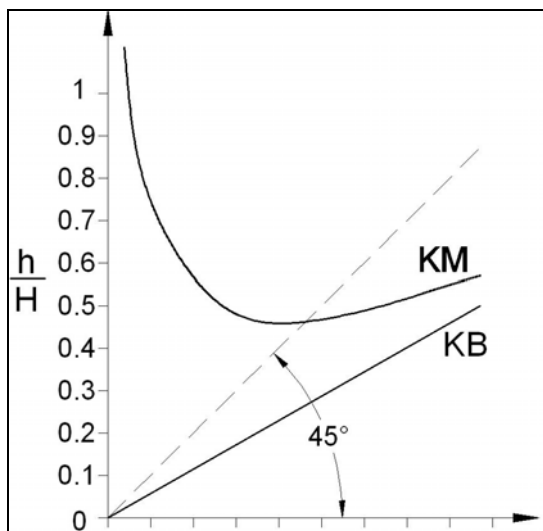
شکل ۸: شناور مکعبی با آبخور h

$$BM = \frac{I}{V} = \frac{\frac{1}{12}LB^3}{LBh}$$

$$BM = \frac{B^2}{12h}$$

$$KM = KB + BM = \frac{h}{2} + \frac{B^2}{12h} = h \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{12} \left(\frac{B}{h} \right)^2 \right]$$

که نمودار آن مطابق شکل زیر می باشد :

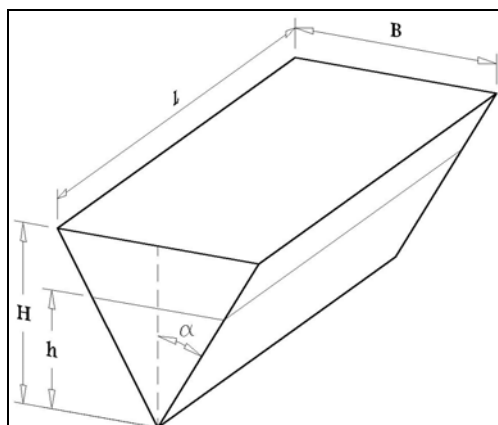


شکل ۹: نمودار KB و KM برای یک شناور مکعبی

این شکل بدنه در بارچها و دوبهها رایج است .

* بدنه V شکل

در بدنه‌ای با مقطع مثلثی مطابق شکل ۱۰ داریم:



شکل ۱۰: شناور با مقطع V با آبخور h.

$$BM = \frac{I}{V}$$

$$I = \frac{L}{12} (2 \times h \times \tan(\alpha))^3 = \frac{2L}{3} (h \times \tan \alpha)^3$$

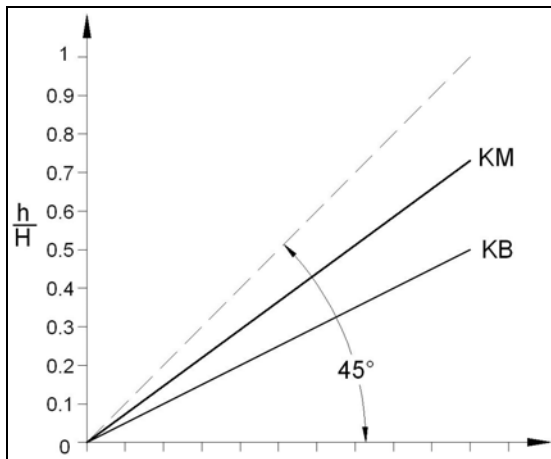
$$V = \frac{1}{2} h \times 2 \times h \times (\tan \alpha) \times L = h^2 \tan \alpha \cdot L$$

$$BM = \frac{2}{3} h \cdot \tan^2 \alpha$$

$$KB = \frac{2}{3} h$$

$$KM = KB + BM = \frac{2}{3} h + \frac{2}{3} h \times \tan^2 \alpha = \frac{2}{3} h (1 + \tan^2 \alpha)$$

که نمودار آن مطابق شکل ۱۱ می باشد که برای استخراج مقادیر KB و KM باز هم از خط ۴۵ درجه استفاده می شود.

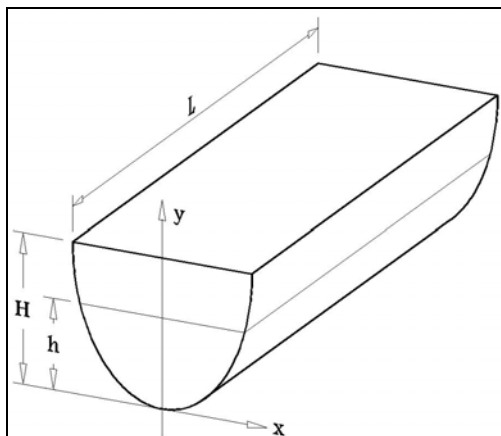


شکل ۱۱: نمودار KB و KM برای شناور با مقطع V.

این نوع از شکل بدنه در شناورهای تندرو نظامی رایج است.

* بدنه سهمی شکل :

مطابق شکل ۱۲ یک بدنه سهمی با معادله زیر را در نظر بگیرید.



شکل ۱۲: شناور با مقطع سهمی شکل

$$x^2 = 4ay$$

$$x = \sqrt{4ay}$$

$$\text{عرض آبخور} = 2x = 2\sqrt{4ah}$$

$$BM = \frac{I}{V}$$

$$I = \frac{L}{12} [2\sqrt{4ah}]^3 = \frac{16}{3} L(\sqrt{ah})^3$$

$$V = \frac{2}{3} [2\sqrt{4ah} \cdot h] L = \frac{8}{3} Lh(\sqrt{ah})$$

$$BM = \frac{\frac{16}{3} L(ah) \cdot \sqrt{ah}}{\frac{8}{3} Lh(\sqrt{ah})} = 2a$$

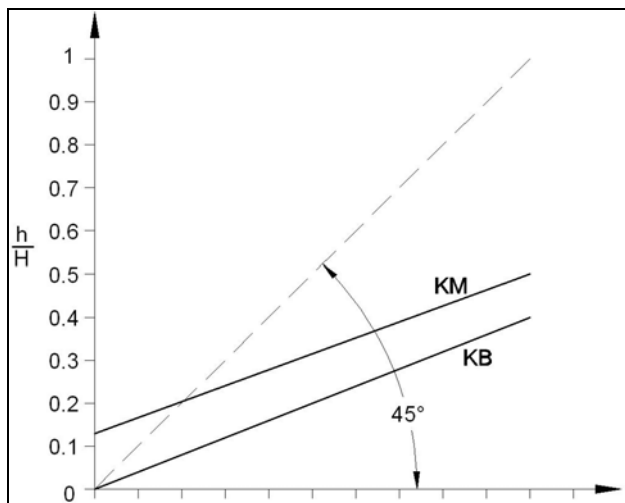
از روابط هندسی برای سهمی داریم:

$$KB = \frac{2}{5}h$$

$$KM = KB + BM$$

$$KM = \frac{2}{5}h + 2a$$

که در شکل زیر نمودار آن ملاحظه می شود.



شکل ۱۳: نمودار KB و KM برای یک شناور با مقطع سهمی

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کشتی آب نگار



شرکت سازنده: شرکت صدرا

تعداد خدمه: ۱۶ نفر

طول: ۳۴ متر

این کشتی برای اهداف آبنگاری و اقیانوس شناسی بکار می رود. امروزه اطلاعات درستی از مشخصات دریاهاى ایران وجود ندارد. این شناور به فعالیتهای تحقیقاتی در این زمینه کمک می کند. بدست آوردن این اطلاعات از اهمیت خاص تجاری و نظامی برخوردار است.

بخش ۲-۷: ^۱ منحنی‌های هیدرواستاتیک

منحنی‌های هیدرواستاتیک^۲ شامل منحنی‌هایی می‌باشد که بیانگر مشخصه‌های هندسی و هیدرواستاتیک شناور می‌باشد. محور عمودی این منحنی‌ها، ارتفاع آب‌خور و مؤلفه افقی آن می‌تواند یکی از مقادیر مؤلفه‌های زیر باشد:

* مشخصه‌های هندسی :

- مرکز بویانسی طولی (LCB)^۳
- مرکز بویانسی عمودی (VCB)^۴
- مساحت صفحه آب‌خور (WPA)^۵
- مرکز طولی سطح صفحه آب‌خور (LCF) که همان مرکز شناوری است^۶
- جابجایی^۷

* مشخصه‌های هیدرواستاتیک

- متاستر طولی (KM_L)
- متاستر عرضی (KM_T)
- وزن لازم برای ۱ سانتی‌متر فرو رفتن شناور در آب (TPC)^۸
- ممان لازم برای تریم دادن شناور به اندازه ۱ سانتی‌متر (MCTC)^۹

۱- منابع: [2] , [4] , [7]

2 - hydrostatic curves

3 - Longitudinal Center of Buoyancy

4 - Vertical Center of Buoyancy

5 - Water Plane Area

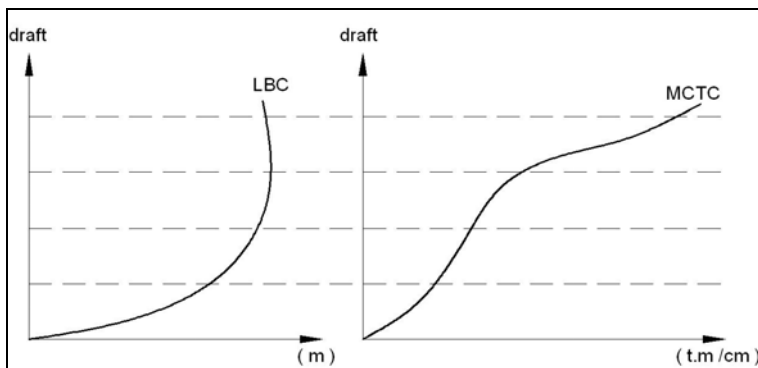
6 - Longitudinal Center of Flotation

7 -displacement

8 - Tonne Per Centimeter

9 - Moment to Change Trim one Centimeter

به طور مثال برای یک شناور مقادیر LCB و MCTC مطابق شکل ۱ ترسیم می شود که محور عمودی آن ارتفاع آبخور و محور افقی مقادیر LCB و MCTC می باشد.



شکل ۱: مقادیر LCB و MCTC در آبخورهای مختلف

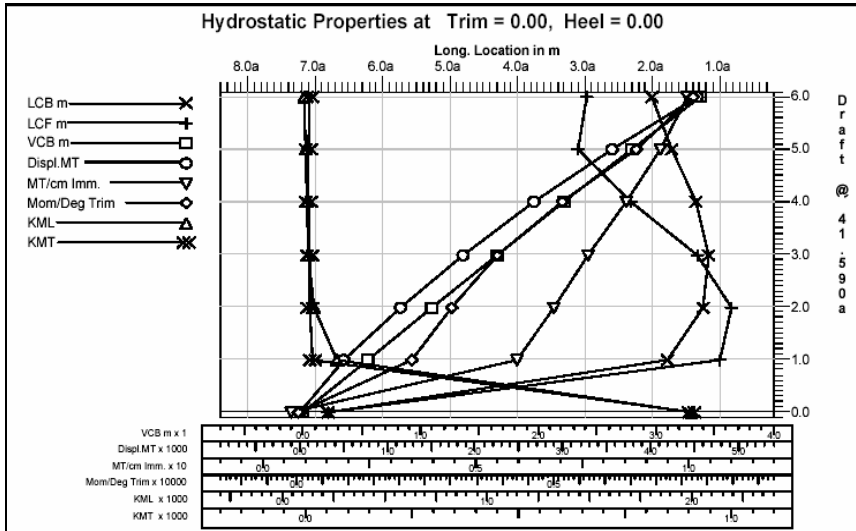
این نمودارها را معمولاً در شکل های جداگانه ای نمایش نمی دهند بلکه کلیه منحنی ها را در یک شکل نشان می دهند که محور عمودی آن آبخور و محور افقی آن برای هر یک از مشخصه های فوق متفاوت است یعنی محور افقی برای هر مشخصه یک مقیاس خاص دارد.

منحنی هیدرواستاتیک برای شناور مدل ۱ در مثال زیر ترسیم شده است. منحنی های هیدرواستاتیک جزء مدارک پایداری هر کشتی می باشد که باید همراه شناور وجود داشته باشد.

مثال: منحنی ها و جداول هیدرواستاتیک شناور مدل ۱ به صورت زیر می باشد. برخی از پارامترهای هیدرواستاتیک (TPC, MCTC) در بخش های بعدی توضیح داده می شود:

Draft (m)	Displ (MT)	LCB (m)	VCB (m)	LCF (m)	TPcm (MT/cm)	MCTC (MT-m/deg)	KML (m)	KMT (m)
0	0.44	6.813a	0.00	6.825a	0.64	15.12	0.00	0.00
1	493.33	1.786a	0.55	0.995a	5.97	2222.99	263.26	13.06
2	1135.40	1.256a	1.10	0.837a	6.83	2988.45	155.89	7.79
3	1858.04	1.173a	1.65	1.342a	7.63	3899.17	125.33	6.48
4	2665.39	1.366a	2.21	2.322a	8.51	5178.00	116.40	6.13
5	3560.21	1.728a	2.79	3.106a	9.34	6607.23	111.42	6.14
6	4526.70	2.019a	3.37	2.985a	9.95	7718.43	102.79	6.32

مقادیر LCB و LCF از وسط شناور بیان می‌شوند، علامت a به معنای عقب‌تر از وسط شناور و draft و VCB از خط مبنا و چگالی آب دریا برابر $\left(\frac{t}{m_3}\right)$ ۱/۰۲۵ در نظر گرفته شده است. این مقادیر در نمودار زیر نمایش داده شده است:



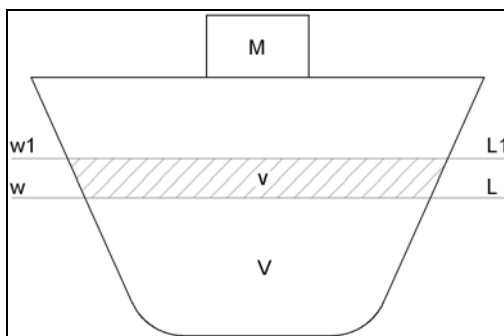
شکل ۲: نمودارهای هیدرواستاتیک شناور مدل ۱

شکل ۲ نشان‌دهنده نمودارهای هیدرواستاتیک شناور مدل ۱ می‌باشد که مقادیر آن در جدول قبل نشان داده شد. ملاحظه می‌شود که محور افقی این نمودار، برای هر پارامتر دارای مقیاس خاصی است.

بخش ۲-۸: میزان بارگذاری به ازای یک سانتی متر

افزایش آبخور (TPC)

اگر باری بر روی یک کشتی گذاشته یا برداشته شود، کشتی مقداری در آب فرو رفته یا بالاتر می آید. اگر بارگذاری مشخصی روی کشتی انجام شود، میزان فرو رفتن کشتی (یا افزایش آبخور) وابسته به مساحت سطح آبخور می باشد. اگر طبق شکل ۱ باری روی کشتی قرار گیرد که باعث ۱ سانتی متر افزایش آبخور کشتی شود این حجم به صورت زیر قابل محاسبه است.



شکل ۱: محاسبه مقدار فرو رفتگی شناور در داخل آب در ازای جرم M .

جرم آب جابجا شده توسط کشتی = جرم قرار گرفته روی کشتی

$$M = V \cdot \rho_w$$

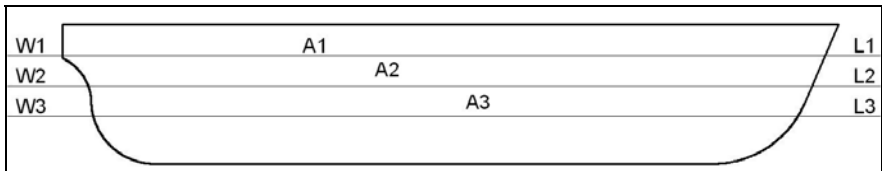
فرض کنید شناور به ازای جرم M به اندازه یک سانتی متر در داخل آب فرو رفته

باشد:

$$M = A \times \overbrace{\frac{1}{100}}^v \times \rho = \frac{\rho}{100} A \quad (\text{بر حسب تن بر سانتی متر})$$

$$TPC = \frac{\rho_w \cdot A}{100} \quad \text{یا به عبارت دیگر:}$$

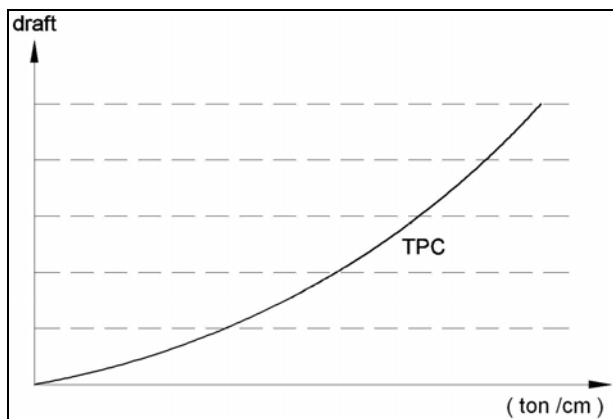
TPC^1 بیانگر باری بر حسب تن است که به ازای آن شناور ۱ سانتی‌متر در آب فرو می‌رود. فرض اساسی در اینجا این است که سطح آب‌خور (A) ثابت باشد در حالیکه با افزایش آب‌خور، سطح آب‌خور همواره تغییر می‌کند (شکل ۲) که اگر افزایش آب‌خور زیاد باشد، خطای این فرض زیاد است. فرض کنید برای یک کشتی، در یک آب‌خور مشخص، $TPC = 5 \text{ t/cm}$ باشد یعنی اگر ۵ تن بار روی شناور قرار گیرد، شناور یک سانتی‌متر در آب فرو می‌رود و اگر ۱۵ تن بار روی عرشه بار قرار گیرد ۳ سانتی‌متر در آب فرو می‌رود (با فرض تغییرات اندک سطح صفحه آب‌خور).



شکل ۲: تغییرات سطح صفحه آب‌خور در آب‌خورهای مختلف

$$A_1 > A_2 > A_3$$

جهت دقیق‌تر و ساده‌تر شدن استفاده از TPC در مسائل عملی، منحنی TPC بر حسب میزان آب‌خور جزء منحنی‌های هیدرواستاتیک آورده می‌شود. این منحنی باید جزء مدارک هیدرواستاتیک هر کشتی استخراج شود. مسئول بارگیری کشتی با استفاده از منحنی TPC می‌تواند تعیین کند که به ازای قرار گرفتن بار روی عرشه، شناور چه مقدار داخل آب فرو می‌رود. نمودار TPC در آب‌خورهای مختلف برای یک شناور در شکل ۴ به طور مثال ارائه شده است.



شکل ۴: تغییرات منحنی TPC بر حسب آب‌خور

□ همچنین از مقادیر TPC می‌توان مقدار جابجایی را محاسبه کرد که در مثال ۳ زیر بدان اشاره می‌شود.

مثال (۱) شناور مدل ۱ در آب‌خور ۲ متر در آب شور شناور است. اگر یک بار ۳۰ تنی بر روی شناور قرار گیرد، چقدر داخل آب فرو می‌رود؟

حل: با استفاده از جداول مربوط به ضرایب بدنه در آب‌خور دو متر داریم:

$$A = 817.71 \text{ m}^2 \text{ مساحت سطح آب‌خور در ۲ متر}$$

$$\rho = 1.025 \frac{t}{m^3}$$

$$TPC = \frac{A \cdot \rho}{100} = \frac{817.71 \times 1.025}{100} = 8.38 \frac{t}{cm}$$

یعنی این شناور به ازای هر ۸/۳۸ تن، یک سانتیمتر در داخل آب فرو می‌رود پس به ازای ۳۰ تن داریم:

$$\text{تغییر آب‌خور} = \frac{30}{8.38} = 3.6 \text{ cm}$$

مثال ۲) شناور مدل ۱ در آبخور ۲ متر در آب شور شناور است. اگر یک مجموعه بار ۹۰۰ تنی بر روی شناور قرار گیرد، شناور چقدر در داخل آب فرو می‌رود؟

حل: جابجایی شناور در آبخور ۲ متر: $1135/4$ تن

بار قرار گرفته روی شناور: ۹۰۰ تن

جابجایی نهایی: $2035/4$ تن

از مشخصات شناور مدل ۱، آبخور مربوط به نزدیکترین حجم جابجایی به $2035/4$

تن را استخراج می‌کنیم:

تناژ در آبخور ۳ متر: ۱۸۵۸ تن

که تا رسیدن به تناژ $2035/4$ تن، مقدار $177/4$ تن دیگر باقی مانده است. برای

محاسبه میزان فرورفتگی شناور در ازای $177/4$ تن از روش TPC (در آبخور ۳ متر)

استفاده می‌کنیم.

TPC در آبخور ۳ متر عبارتست از:

$$A = 1002.54 \text{ m}^2 \text{ مساحت آبخور در } 3 \text{ متر}$$

$$TPC = \frac{A \cdot \rho}{100} = \frac{1002.54 \times 1.025}{100} = 10.27 \frac{t}{cm}$$

$$: \frac{177.4}{10.27} = 17.27 \text{ cm} \text{ میزان فرورفتگی داخل آب}$$

لذا در مجموع افزایش آبخور ناشی از یک بار ۹۰۰ تن برابر است با:

$$1 + 0.173 \text{ m} = 1.173 \text{ m}$$

باید توجه داشت که اگر در همان آبخور ۲ متر مقدار TPC را محاسبه می‌کردیم،

باعث خطای محاسباتی می‌شد چرا که افزایش زیاد آبخور باعث تغییر صفحه آبخور

می‌گردد.

اگر از منحنی‌های هیدرواستاتیک استفاده شود، به صورت مستقیم می‌توان آبخور

مربوط به تناژ $2035/4$ تن را بدست آورد.

مثال ۳) جابجایی شناور مدل ۱ در آبخور ۴ متر برابر است با ۲۶۶۵ تن است. با استفاده از روش TPC، جابجایی را در آبخور ۴/۶ متر بدست آورید.
 حل: با استفاده از منحنی های هیدرواستاتیک داریم:

آبخور	4	4.2	4.4	4.6
TPC	8.51	8.58	8.7	8.9

آبخور	TPC	سیمسون	حاصلضرب
4	8.51	1	8.51
4.2	8.58	3	25.74
4.4	8.7	3	26.1
4.6	8.9	1	8.9
مجموع			69.25

مقدار جابجایی بین آبخور ۴-۴/۶ متر: $\frac{3}{8} \times 0.2 \times 100 \times 69.25 = 519 \text{ ton}$

مقدار جابجایی تا آبخور ۴/۶ متر: $2665 + 519 = 3184 \text{ ton}$

بخش ۲-۹: ۱ اختلاف آبخور در آب شور و شیرین (FWA) ۲

هنگامیکه شناور از منطقه‌ای با آب شور به آب شیرین منتقل می‌شود، به دلیل کاهش چگالی آب، آبخور شناور افزوده می‌گردد. چگالی آب شور $(\frac{t}{m^3})$ ۱/۰۲۵ و چگالی آب شیرین $(\frac{t}{m^3})$ ۱ در نظر گرفته می‌شود. اگر چگال آب شور ρ_s و چگالی آب شیرین با ρ_f نمایش داده شود، شناوری که با آبخور d_s در آب شور قرار داشته و وارد آب شیرین شود، آبخور جدید به $d_s + FWA$ افزایش خواهد یافت. بنابراین:

$$\frac{d_s + FWA}{d_s} = \frac{\rho_s}{\rho_f}$$

$$d_s + FWA = d_s \frac{\rho_s}{\rho_f}$$

$$FWA = d_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f} - d_s$$

$$FWA = d_s \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) = d_s \cdot \left(\frac{1.025}{1} - 1 \right)$$

$$FWA = 0.025d_s \text{ (بر حسب متر)} = 25d_s \text{ (بر حسب میلیمتر)}$$

مقدار FWA برای خط بار تابستان یا خطوط بار نزدیک آن اهمیت دارد. چرا که همانطور که در بخش بعد توضیح داده می‌شود، فاصله بین S و F و همچنین فاصله بین T و TF برابر FWA است.

بنابراین FWA تنها هنگامی قابل استفاده است که شناور دارای آبخوری نزدیک به خط بار تابستان باشد. FWA را می‌توان بر حسب TPC نیز محاسبه کرد.
اگر d_s آبخور مربوط به خط بار تابستان در آب شور باشد داریم:

$$FWA = 25d_s \frac{A \times 1.025 \times 10^{-2}}{A \times 1.025 \times 10^{-2}}$$

که A مساحت سطح آبخور مربوط به خط بار تابستان است. از طرفی چون $TPC = A \times 1.025 \times 10^{-2}$ و $d_s \times A \times 1.025$ نیز تقریباً برابر جابجایی تابستانی شناور است، داریم:

$$FWA = \frac{25 \times \text{جابجایی}}{100 \times TPC} \quad (\text{بر حسب میلیمتر})$$

$$FWA = \frac{\text{جابجایی}}{4 \times TPC}$$

یادآوری می‌شود که رابطه TPC عبارتست از:

$$TPC = \frac{A \times \rho}{100}$$

نکته دیگر این است که TPC بکار رفته در این مسائل برای آب شور با چگالی 1.025 می‌باشد در حالی که اگر کشتی در آبی با چگالی غیر از این، شناور باشد، این TPC کاربرد ندارد و باید اصلاح شود و TPC در چگالی 1.025 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{(TPC)_D}{(TPC)_S} = \frac{\rho_D}{\rho_S}$$

بنابراین مراحل به دست آوردن FWA را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$FWA \rightarrow TPC \rightarrow$ مساحت سطح آبخور در آبخور تابستان (A) $\rightarrow$ آبخور تابستان (d_s)

اختلاف آبخور داک (DWA):^۱

در اینجا منظور از آبخور داک، آبخور شناور در آبی با چگالی بین آب شور و آب شیرین است و منظور صرفاً حضور شناور در داخل داک (حوضچه تعمیرات شناور) نمی‌باشد.

اگر چگالی این آب (آب داک) را با ρ_D نمایش دهیم، مقدار اختلاف آبخور داک عبارتست از:

$$\frac{DWA}{FWA} = \frac{1.025 - \rho_D}{1.025 - 1}$$

که در واقع نوعی میان‌یابی بین اختلاف آبخور شناور در آب داک و آب شور و همچنین اختلاف بین آبخور آب شور و شیرین است.

$$DWA = FWA \times \frac{1.025 - \rho_D}{1.025 - 1}$$

$$DWA = FWA \times \frac{1.025 - \rho_D}{0.025} \quad (\text{چگالی بر حسب } t/m^3 \text{ است})$$

$$DWA = FWA \times \frac{1025 - \rho_D}{25} \quad (\text{چگالی بر حسب } kg/m^3)$$

اختلاف آبخور داک مانند اختلاف آبخور بین آب شور و شیرین، تنها برای حالتی که کشتی دارای آبخوری نزدیک به خط بار تابستان باشد، اهمیت دارد. در حالتی که شناور دارای آبخوری کمتر از آبخورهای فوق باشد، می‌توان اختلاف آبخور داک را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

مثال) شناور مدل ۱ در آبخور تابستان در منطقه‌ای با چگالی 13 t/m^3 شناور است. اگر این شناور وارد آب شور شود، تغییر آبخور آن را محاسبه کنید.

حل: از مشخصات مدل ۱ داریم:

$$d_s = 5 \text{ m}$$

$$A = 1393.6 \text{ m}^2$$

$$\Delta = 3560 \text{ t}$$

$$TPC = \frac{A \cdot \rho}{100} = \frac{1393.6 \times 1.025}{100} = 14.28 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$$

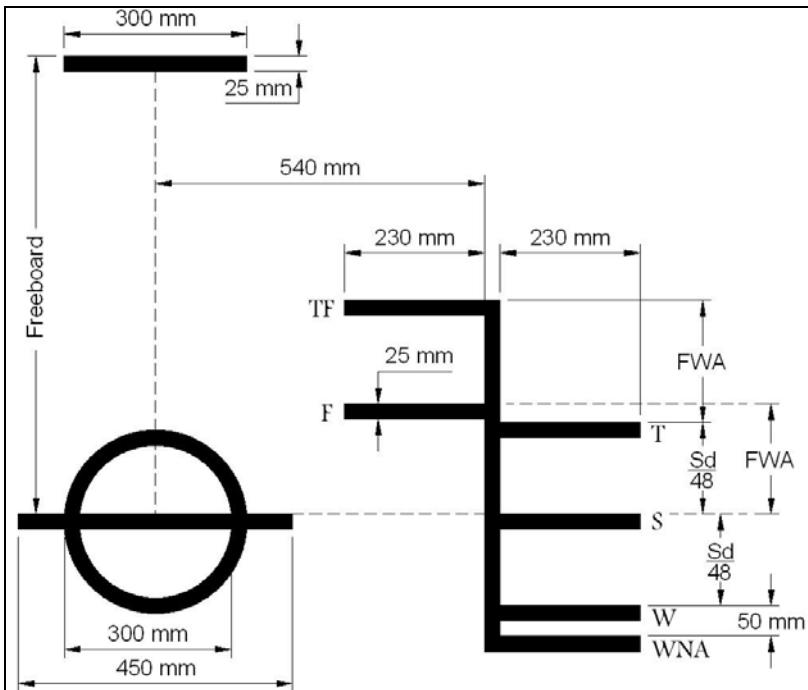
$$FWA = \frac{\Delta}{4 \times TPC} = \frac{3560}{4 \times 14.28} = 62 \text{ mm}$$

عدد بدست آمده بدین معناست که اگر شناور از آب شیرین وارد آب شور شود آبخور شناور ۶۲ میلیمتر کاهش می‌یابد. حال اگر این شناور از منطقه‌ای با چگالی 13 t/m^3 به آب شور وارد شود میزان کاهش آبخور عبارتست از:

$$DWA = FWA \times \frac{1.025 - \rho_D}{0.025} = 62 \times \frac{1.025 - 1.013}{0.025} = 29.76 \text{ mm}$$

بخش ۲-۱: ترسیم علامت خط بار شناور

علامت خط بار شناور بر روی بدنه هر شناوری باید ترسیم گردد به گونه‌ای که نشان دهنده حداکثر مقدار آب‌خور شناور در شرایط مختلف چگالی آب دریا باشد. علامت خط بار مطابق شکل ۱ می‌باشد که به آن علامت خط شاهین نیز گفته می‌شود.



شکل ۱: علامت خط بار شناور و ابعاد و اندازه‌های استاندارد آن

دایره موجود در شکل باید منطبق بر آب‌خور تابستان (Summer Load Line) باشد.

این آب‌خور در چگالی $(\frac{t}{m^3})$ ۱/۰۲۵ آب دریا محاسبه می‌شود.

بقیه خطوط موجود در شکل، نشان دهنده آبخورهای زیر هستند که با خط بار بیان می گردند.

* خط بار گرمسیری (T)^۱:

این خط بار به اندازه $\frac{1}{48}$ آبخور تابستان، در بالای خط بار تابستان رسم می شود.

* خط بار زمستان (W)^۲:

این خط به اندازه $\frac{1}{48}$ آبخور تابستان، پایین تر از خط بار تابستان رسم می شود.

* خط بار زمستان در آتلانتیک شمالی (WNA)^۳:

خط باری است که به اندازه ۵۰ میلیمتر پایین تر از خط بار زمستان قرار می گیرد (خط فوق تنها برای کشتی های کوچکتر از ۱۰۰ متر نمایش داده می شود).

* خط بار آب شیرین (F)^۴:

این خط بار نشان دهنده آبخور در آب شیرین با چگالی $(\frac{t}{m^3})$ ۱ می باشد که به اندازه FWA، بالاتر از خط بار تابستان ترسیم می گردد.

* خط بار گرمسیری در آب شیرین (TF)^۵:

این خط بار به اندازه FWA بالاتر از خط بار گرمسیری (T) ترسیم می گردد.

1 - Load Line Tropical

2 - Load Line Winter

3 - Load Line Winter North Atlantic

4 - Load Line Fresh Water

5 - Load Line Fresh Water Tropical

کاربرد علامت خط بار:

باید توجه داشت که کاربرد علامت خط بار در حداکثر بارگیری شناور (جابجایی سنگین) می‌باشد. یعنی اگر شناور به اندازه حداکثر تناژ مجاز خود بارگیری شده باشد و در آبی با چگالی $(\frac{t}{m^3}) 1/0.25$ شناور باشد، آبخور شناور در محل مرکز دایره یا خط S قرار می‌گیرد و اگر با همین بار به منطقه دیگری با چگالی $(\frac{t}{m^3}) 1$ برود، آبخور شناور در محل خط F قرار می‌گیرد و اگر در آب شیرین در منطقه گرمسیری وارد شود، آبخور به TF می‌رسد.

همچنین اگر شناور در جابجایی سنگین به آبهای آتلانتیک شمالی در فصل زمستان وارد شود که چگالی از $1/0.25$ بیشتر است، آبخور به WNA می‌رسد.

دانستن مقدار آبخور در جابجایی سنگین (حداکثر تناژ شناور) در جلوگیری از تصادم شناور با کف دریا یا موانع زیرآبی بسیار اهمیت دارد و در تعیین عوارض‌بندری نیز بکار می‌رود.

(مثال) علامت خط آبخور را برای شناور مدل ۱ ترسیم کنید.

مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- آبخور تابستان شناور مدل ۱ برابر ۵ متر است. ($d_s = 5 \text{ m}$)

۲- مساحت سطح آبخور در آبخور ۵ متر برابر $1393/6$ متر مربع است (با استفاده از نمودار مشخصات بدنه)

۳- محاسبه TPC:

$$TPC = \frac{A \cdot \rho}{100} = \frac{1393.6 \times 1.025}{100} = 14.28 \frac{t}{cm}$$

۴- جابجایی در آبخور ۵ متر برابر 3560 تن می‌باشد.

۵- محاسبه FWA:

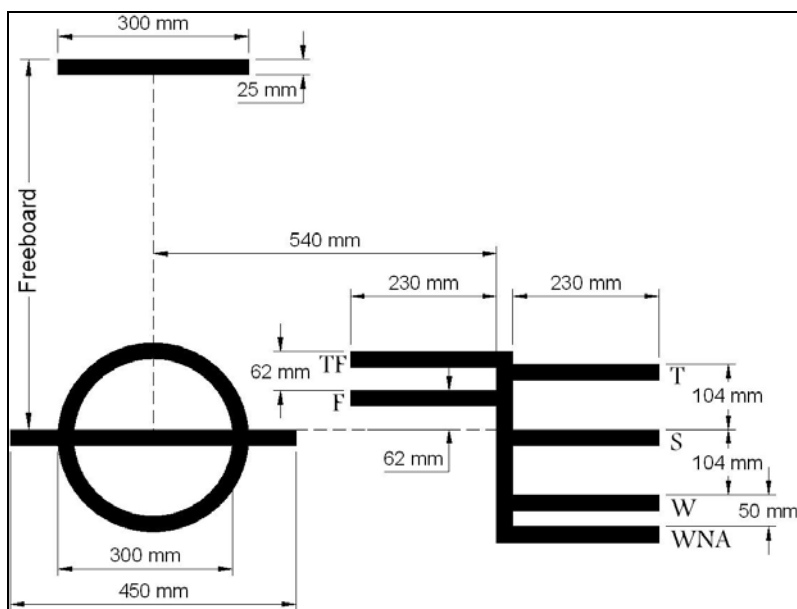
$$FWA = \frac{disp.}{4 \times TPC} = \frac{3560}{4 \times 14.28} = 62 \text{ mm}$$

۶- مقدار $\frac{d_s}{48}$ برای این شناور:

$$\frac{d_s}{48} = \frac{5}{48} = 0.104 \text{ m} = 104 \text{ mm}$$

بدین ترتیب می‌توان علامت خط آب‌خور را برای این شناور به صورت زیر

ترسیم کرد:

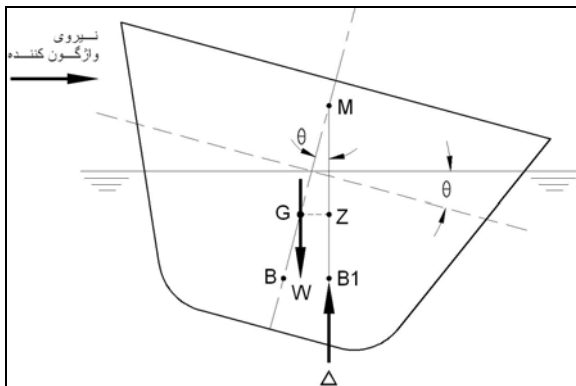


شکل ۲: علامت خط بار شناور مدل ۱

بخش ۲-۱۱: $\phi - GZ$ و کاربردهای آن

در مهندسی دریایی باید وضعیت پایداری شناور در زوایایی غلتش مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. پایداری شناور با عاملی به نام GZ بیان می‌شود که برای پایدار بودن شناور، مقدار GZ باید مثبت باشد و در صورت صفر یا منفی بودن GZ ، شناور دارای پایداری خنثی یا ناپایدار خواهد بود. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، GZ فاصله افقی بین مرکز ثقل (G) و مرکز بویانسی و در واقع بازوی ممان بین B و G می‌باشد که به این بازو، «بازوی بازگرداننده»^۲ گویند. «ممان بازگرداننده» باعث می‌شود که طبق شکل، اگر شناور به یک سمت به اندازه زاویه ϕ ، غلتش کند، این ممان، شناور را به حالت اولیه خود باز می‌گرداند.

$$RM = \overline{GZ} \cdot \Delta$$



شکل ۱: بازوی بازگرداننده (GZ) شناور

بنابراین داریم:

RM : ممان بازگرداننده شناور به حالت اولیه

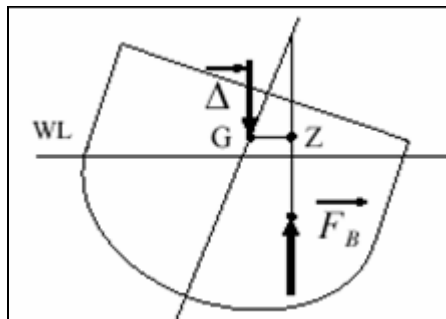
۱- منابع: [2], [6], [7]

GZ: بازوی بازگرداننده شناور به حالت اولیه

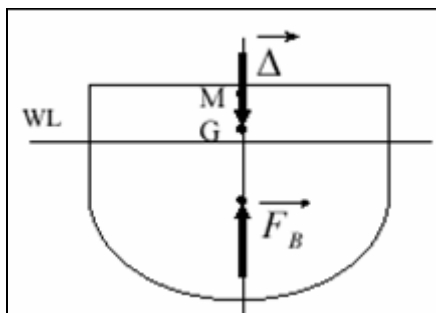
Δ : جابجایی یا همان وزن کل شناور که برابر با بویانسی (F_B) می‌باشد.

در واقع این ممان بازگرداننده، می‌تواند ممان حاصل از نیروهای خارجی (نشان داده شده در شکل) را که باعث غلتش شناور شده است، خنثی می‌کند. ممان بازگرداننده هنگامی مثبت است که GZ مثبت باشد و GZ هنگامی مثبت است که GM مثبت باشد چرا که $GZ = GM \cdot \sin \phi$ (در زوایای غلتش کوچک). مثبت بودن GM نیز به این معناست که M (نقطه متاستر) بالای مرکز ثقل (G) باشد. اگر $GM = 0$ باشد در نتیجه $GZ = 0$ و به معنای پایداری خنثی و اگر $GM < 0$ باشد، $GZ < 0$ است که به معنای ناپایداری شناور است. آنچه اهمیت دارد تغییرات مقدار GZ در زوایای مختلف غلتش (ϕ) است که اگر این تغییرات روی یک نمودار ترسیم شوند، آن نمودار $GZ - \phi$ می‌باشد که معیار تحلیل پایداری شناور است.

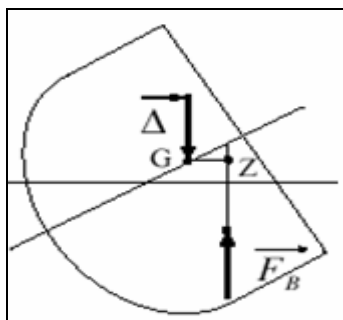
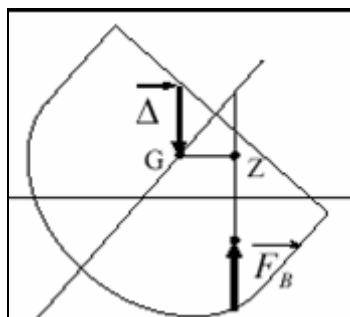
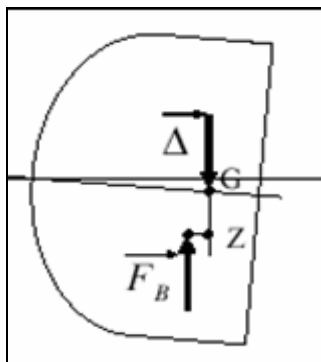
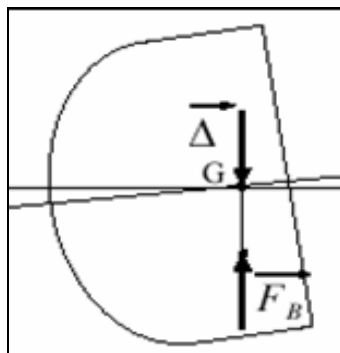
برای بررسی این تغییرات شکل ۲ را به عنوان نمونه مثال در نظر می‌گیریم. این شناور دارای حالت اولیه پایدار است.



حالت ۲: غلتش ۲۵ درجه با $GZ = 17 \text{ cm}$



حالت ۱: حالت بدون غلتش با $GZ = 0$

حالت ۸: غلتش ۷۵ درجه با $GZ=8 \text{ cm}$ حالت ۳: غلتش ۵۰ درجه با $GZ=30 \text{ cm}$ حالت ۶: غلتش بیش از ۸۵ درجه با GZ منفیحالت ۵: غلتش ۸۵ درجه با $GZ=0$

شکل ۲: نمایش مقادیر GZ در زوایای غلتش مختلف شناور

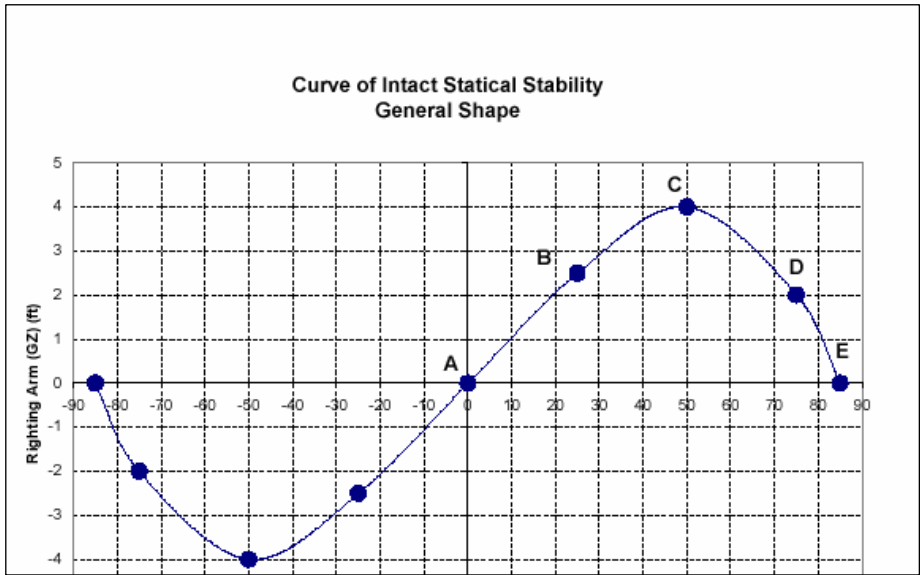
در حالت A ملاحظه می‌شود که زاویه غلتش برابر صفر ($\varphi = 0$) و شناور دارای حالت اولیه پایدار است چرا که M بالای G قرار دارد یعنی $GM > 0$ است ولی مقدار GZ برابر صفر می‌باشد چرا که داریم $GZ = GM \cdot \sin \varphi$ و چون $\varphi = 0$ است لذا $GZ = 0$.

در حالت B شناور به اندازه ۲۵ درجه غلتیده است و در این حالت GZ دارای مقدار مثبتی است. در حالت C شناور تا ۵۰ درجه غلتیده است و در این حالت GZ دارای بیشترین مقدار شده است و از آن پس مقدار GZ کاهش می‌یابد چرا که قسمتی از عرشه وارد آب می‌شود. در حالت D شناور تا زاویه ۷۵ درجه غلتیده که مقدار GZ همچنان کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در حالت E راستای نیروی ثقل و

بویانسی بر هم منطبق می‌شوند و $GZ = 0$ می‌شود. در این حالت در واقع G و M بر هم منطبق شده‌اند که $GM = 0$ و در نتیجه $GZ = 0$ شده است. در این حالت شناور دارای تعادل خنثی می‌باشد در حالیکه تا قبل از این دارای تعادل پایدار بوده است. هرچه شناور از این حد، بیشتر غلتش کند، وارد محدوده تعادل ناپایدار شده است یعنی بازوی بازگرداننده $GZ < 0$ شده و همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، ممان حاصل از B و G متمایل به واژگون کردن شناور است و این ممان به غلتیدن بیشتر شناور کمک می‌کند، در صورتی که در حالت‌های B تا D ، ممان بازگرداننده، متمایل به بازگرداندن شناور به حالت اولیه خود و متوقف کردن زاویه غلتش است.

در این حالت در واقع $GM < 0$ و در نتیجه $GZ < 0$ و لذا ممان بازگرداننده $RM < 0$ شده است. در این وضعیت، GZ را «بازوی واژگون کننده»^۱ گویند.

اگر مقادیر به دست آمده GZ در زوایای مختلف ϕ ترسیم شوند، منحنی $GZ - \phi$ را به صورت زیر خواهیم داشت (شکل ۳).



شکل ۳: نمایش حالات A تا E در منحنی GZ

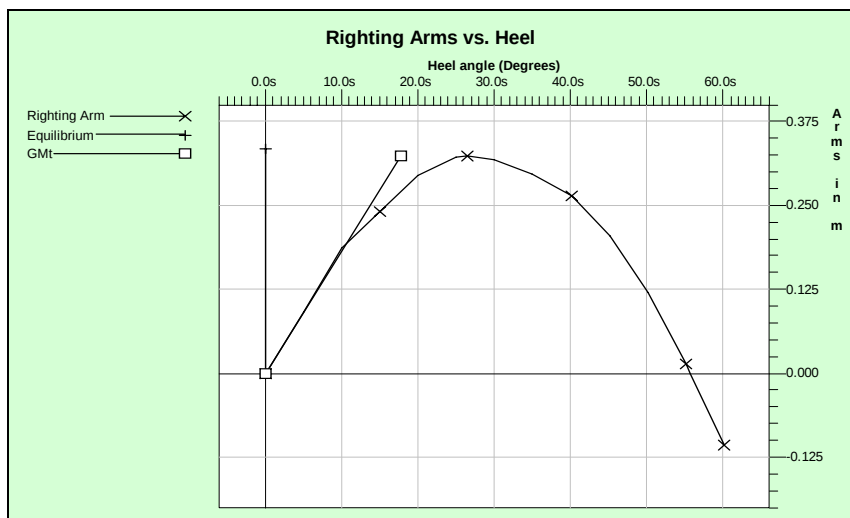
اگر شناور به سمت راست غلتش کند، سمت راست نمودار $GZ - \phi$ را داریم و اگر شناور به سمت چپ غلتش کند، سمت چپ نمودار $GZ - \phi$ خواهیم داشت که البته چون سمت راست و سمت چپ شناور با هم قرینه هستند، لذا منحنی $GZ - \phi$ فقط برای سمت راست نمودار ترسیم خواهد شد.

مثال: منحنی GZ شناور مدل ۱ را در سناریوی بارگیری ۱ ارائه می‌کنیم.

حل: در این مثال ابتدا جدول و سپس منحنی GZ شناور را در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG = 5.1$ متر ترسیم می‌کنیم. روش محاسبه GZ را در قسمتهای بعد بیان می‌کنیم.

Heel Angle (deg)	Trim Angle (deg)	Righting Arm (m)
0	0.00	0.000
5	0.01f	0.092
10	0.02f	0.188
15	0.06f	0.241
20	0.13f	0.295
25	0.18f	0.323
26.42	0.18f	<u>0.324</u>
30	0.17f	0.318
35	0.11f	0.298
40	0.01a	0.265
45	0.16a	0.206
50	0.32a	0.120
55	0.49a	0.014
55.58	0.51a	0.000
60	0.67a	<u>- 0.107</u>

ستون دوم بیان کننده شیب (تریم) ایجاد شده در اثر هیل کردن شناور است. در قسمتهای بعد بیان خواهیم کرد که همواره هیل کردن شناور همراه با تریم کردن شناور است (f علامت تریم به سینه و a علامت تریم به پاشنه است). ملاحظه می گردد که مقدار GZ در ۵۵/۵۸ درجه صفر شده و از آن پس منفی می شود و در زاویه ۲۶/۴۲ درجه به حداکثر مقدار خود می رسد. منحنی مربوطه به صورت شکل ۴ ترسیم می گردد. خط مماس شده بر نمودار در محل مرکز مختصات، برای بیان GM ترسیم شده که در قسمت بعد توضیح داده می شود.



شکل ۴: منحنی GZ شناور مدل ۱

* تحلیل‌هایی که براساس منحنی GZ انجام می‌شوند

همانطور که بیان شد منحنی $GZ - \phi$ اساس بسیاری از تحلیل‌های پایداری شناور است و عوامل مختلفی از آن برداشت می‌شود که از جمله مهمترین موارد آن عبارتست از:

۱- محدوده پایداری^۱

حداکثر زاویه‌ای که شناور می‌تواند غلتش کند بدون اینکه GZ آن منفی شود، را «محدوده پایداری» گویند. در این محدوده اگر شناور بدون زاویه لیست اولیه باشد، شناور از حالت قائم با $GZ = 0$ شروع به غلتش کرده و تا رسیدن مجدد به $GZ = 0$ می‌تواند در حالت پایدار غلتش کند.

در مثال قبل، محدوده پایداری تا ۸۵ درجه به راست و ۸۵ درجه به چپ می‌باشد.
در شناور مدل ۱ نیز محدوده پایداری شناور تا زاویه ۵۵/۵۸ درجه می‌باشد.

۲- حداکثر بازوی بازگرداننده (GZ)

حداکثر بازوی بازگرداننده نیز از عوامل مهم در تحلیل پایداری و نشان دهنده حداکثر ممان واژگون‌کننده‌ای است که شناور می‌تواند بدون واژگون شدن تحمل کند.

$$(RM)_{\max} = (GZ)_{\max} \cdot \Delta$$

در مثال قبل، حداکثر بازوی بازگرداننده در نقطه C اتفاق افتاده است. در شناور مدل ۱، حداکثر GZ برابر ۳۲/۴ سانتی‌متر است. از جمله بارگذاری‌های بحرانی دیگر نیروی مداوم باد، بارگذاری‌های نامتقارن، ضربه و آبگرفتگی جانبی می‌باشد که $GZ_{\max}$ نقش اساسی در جبران آنها دارد.

۳- زاویه متناظر با $GZ_{\max}$

زاویه‌ای که در آن حداکثر بازوی بازگرداننده را داریم نیز بسیار حائز اهمیت است چرا که از این زاویه به بعد، خیسی عرشه و کاهش بازوی بازگرداننده را داریم که برای پایداری شناور، غلتش بیشتر از این زاویه بسیار خطرناک است. زاویه خیسی عرشه^۱ از زوایای مهم در پایداری است که نشان‌دهنده شروع تضعیف پایداری شناور است. زاویه متناظر با حداکثر بازوی بازگرداننده در شناور مدل ۱ برابر ۲۶/۴۲ درجه است.

۴- پایداری دینامیکی^۲

پایداری دینامیکی عبارت است از کار انجام شده برای غلتیدن شناور تا یک زاویه مشخص. این کار از سطح زیر نمودار $GZ - \phi$ بدست می‌آید که از نظر ریاضی برابر است با:

1 - deck wetness angle

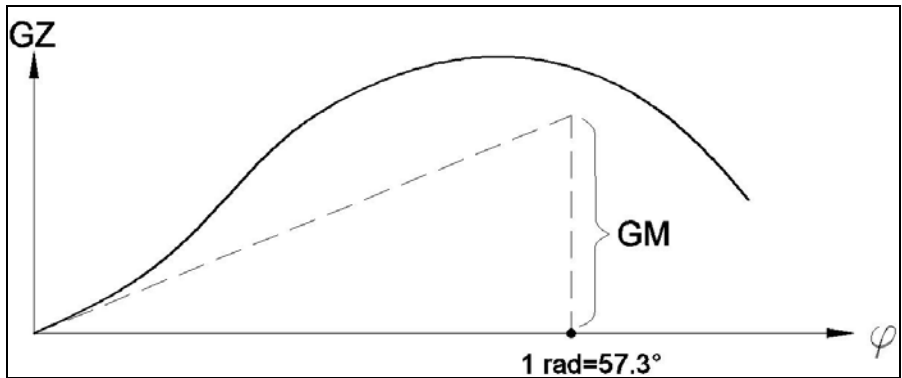
2 - Dynamic Stability

$$D.S = \Delta \cdot \int GZ.d\varphi \quad (\text{مساحت زیر نمودار } GZ - \varphi \times \Delta)$$

اگر سطح کل زیر نمودار $GZ - \varphi$ را به دست آوریم، حاصلضرب این سطح در جابجایی (Δ) شناور برابر است با انرژی مقاوم در برابر انرژی واژگون‌کننده شناور.

۵- محاسبه مقدار GM

اگر خطی مماس بر نمودار $GZ - \varphi$ در محل $\varphi = 0$ رسم کنیم (شیب نمودار در $\varphi = 0$)، و از زاویه یک رادیان ($\varphi = 1 \text{ rad}$) یک خط عمود رسم کنیم، ارتفاع محل تقاطع این خط مماس با خط عمود، برابر با ارتفاع متاستری (GM) می‌باشد که در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: نحوه محاسبه GM از منحنی GZ

بنابراین به روش ترسیمی و با استفاده از نمودار $GZ - \varphi$ نیز می‌توان ارتفاع متاستری GM را بدست آورد. توجه محاسباتی آن عبارت است از:

$$GZ = GM \cdot \sin \varphi$$

با مشتق‌گیری از این رابطه در $\varphi = 0$ داریم:

$$\frac{d(GZ)}{d\varphi} = \frac{d(GM)}{d\varphi} \cdot \sin \varphi + GM \cdot \cos \varphi$$

در $\varphi = 0$ داریم $\sin \varphi = 0$ و $\cos \varphi = 1$ و در نتیجه داریم:

$$\left. \frac{d(GZ)}{d\varphi} \right|_{\varphi=0} = GM$$

بنابراین شیب نمودار $GZ - \varphi$ در $\varphi = 0$ برابر GM است.

محدوده تقریبی مقادیر GM برای شناورهای مختلف عبارتست از:

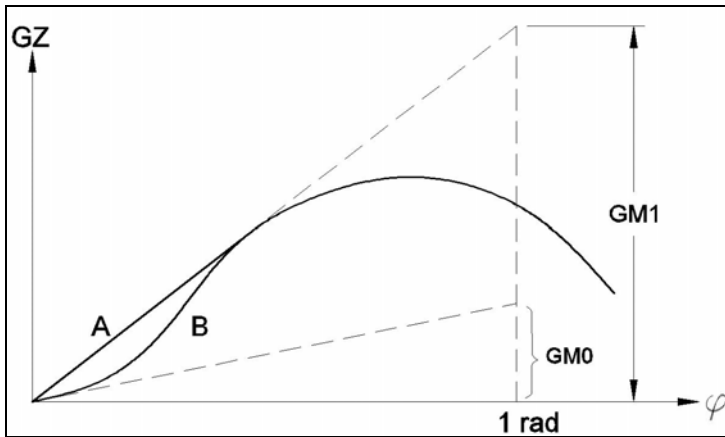
نوع کشتی	مقدار GM (متر)
مسافربری اقیانوس پیما	۲/۲-۱/۵
مسافربری آبهای ساحلی	۱/۵-۰/۵
یدک کش	۱
کشتی باری	۱-۰/۸
کشتی کانتینر بر	۰/۶-۰/۳

۶- رام یا سرکش بدون شناور

اگر شیب نمودار GZ در نقطه $\varphi = 0$ (یا همان GM) بزرگ باشد، کشتی عکس العمل شدیدی به نیروهای خارجی خواهد داشت و پریود نوسانات غلتش عرضی کشتی کوچک خواهد بود. از این رو حرکات کشتی بسیار شدید و قوی می باشد که در این حالت به این کشتی «سرکش»^۱ گویند.

اگر این شیب کوچک باشد، در واقع کشتی عکس العمل ملایمی به نیروهای خارجی وارد بر شناور خواهد داشت و پریود نوسانات غلتش عرضی کشتی بزرگ خواهد بود. روابط مربوط به محاسبه پریود نوسانات طبیعی و رابطه آن با GM در

بخش‌های بعدی ذکر شده است. کشتی با این حرکات آرام و نرم، را کشتی «رام»^۱ گویند. بنابراین از روی نمودار GZ می‌توان رام یا سرکش بودن شناور را تشخیص داد. مطابق شکل ۶ با توجه به شیب منحنی GZ در محل مبدأ مختصات، شناور A دارای GM بیشتر است و در نتیجه سرکش می‌باشد ولی شناور B دارای GM کمتر و در نتیجه «رام» می‌باشد.

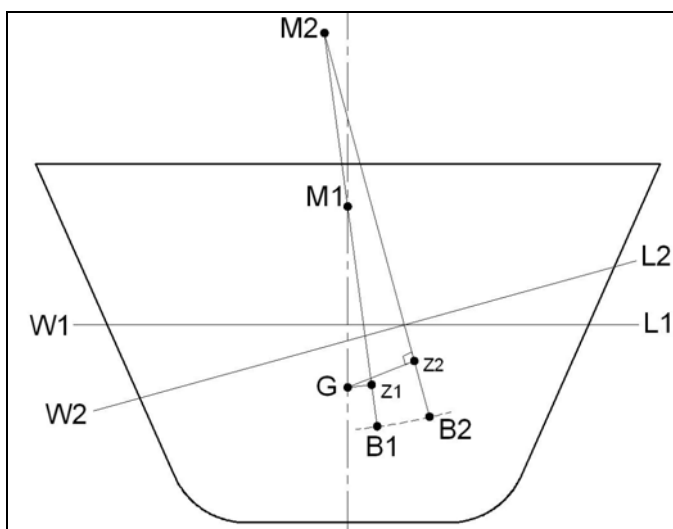


شکل ۶: شیب نمودار GZ معرف مقدار GM و رام یا سرکش بودن شناور

* مسیر تغییرات Z

Z تصویر مرکز ثقل G بر روی راستای مرکز بویانسی است که از آن بازوی بازگرداننده GZ محاسبه می‌شود.

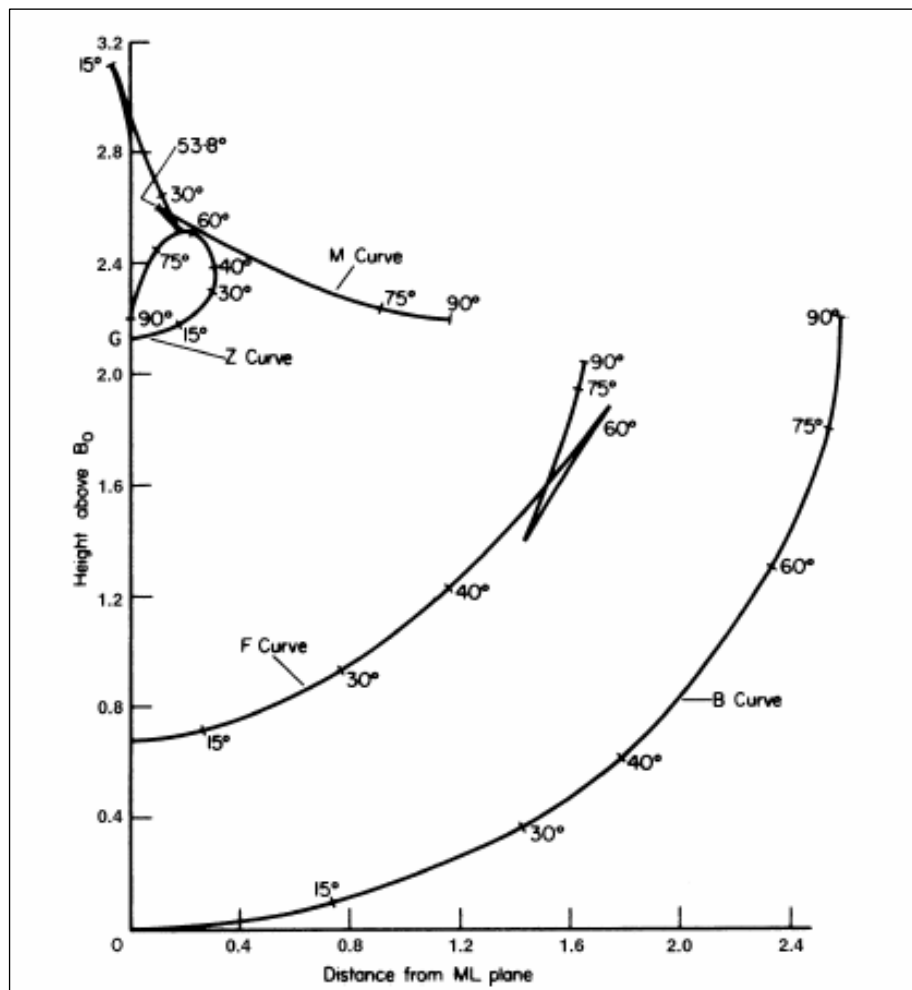
Z در زوایایی غلتش مختلف مطابق شکل تغییر می‌کند.



شکل ۷: موقعیت Z در زوایای غلتش مختلف

□ مثال: منحنی مسیر تغییرات B ، M ، F و Z برای یک شناور با مشخصات زیر داده شده است.

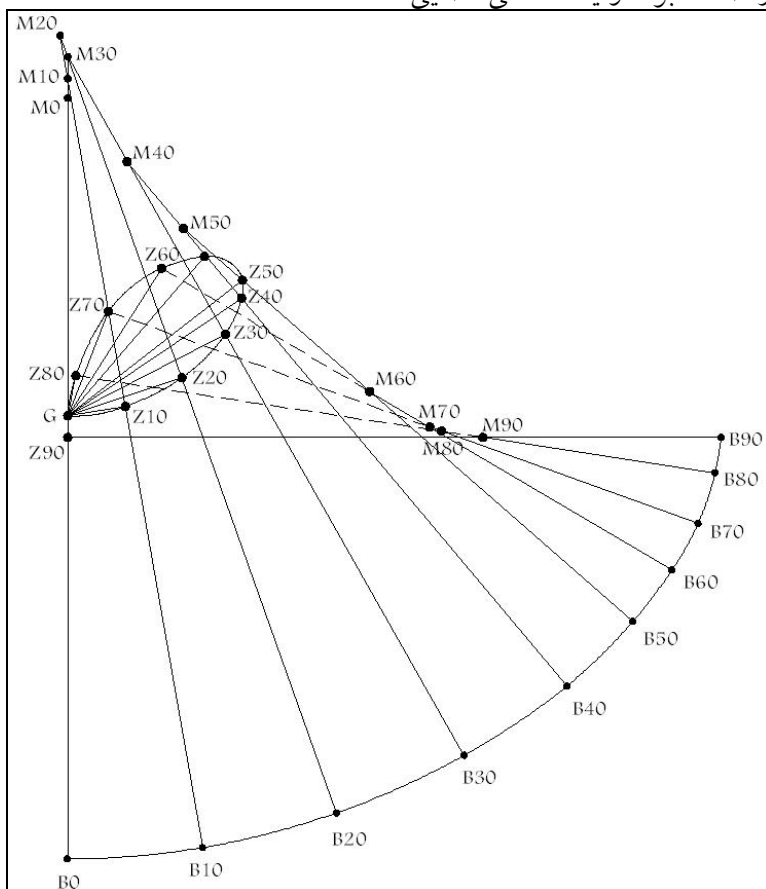
Displacement(t)	678
L.B.P(m)	67.5
Beam(m)	7.58
Mean draft (m)	2.23
Block Coefficient	0.595
Prismat Coefficient	0.617
Water Plane Coefficient	0.755



شکل ۸: مسیر تغییرات Z, M, F و B از زوایای غلتش صفر تا ۹۰ درجه

* منحنی قطبی پایداری و نمایش سه بعدی مکان هندسی Z,M,B

غلش عرضی شناور باعث تغییر محل مرکز متاستر و مرکز بویانسی می شود. مکان هندسی این نقاط در یک صفحه قرار ندارد بلکه یک منحنی فضایی (سه بعدی) می باشد. این وضعیت را می توان در شکل ۹ ملاحظه نمود. مکان هندسی B یک منحنی به شعاع BM می باشد که مرکز انحنا آن M بوده و بطور لحظه ای تغییر می کند. از آنجا که شعاع BM و مکان هندسی نقطه B در یک صفحه قرار ندارند، مکان هندسی M نیز خارج از صفحه بوده و یک منحنی فضایی است.



شکل ۹: منحنی قطبی پایداری

از آنجا که در رابطه $BM = \frac{I}{\nabla}$ هیچ یک از عوامل ممان دوم سطح و حجم بویانسی نمی‌توانند منفی باشند لذا شعاع انحنای BM هیچگاه منفی نمی‌باشد و مکان هندسی B همواره یک منحنی مقعر است. شعاع انحنای BM را شعاع متاستری نیز گویند یعنی شعاعی که یک طرف آن همواره منطبق بر مرکز متاستری است. بنابراین شعاع متاستری از یک سمت عمود بر منحنی مکان هندسی B و از طرف دیگر مماس بر منحنی مکان هندسی M می‌باشد.

حال با در نظر داشتن مرکز ثقل G می‌توانیم بازوی بازگرداننده GZ را بصورت سه بعدی نمایش دهیم. اگر در هر زاویه غلتشی، از نقطه G خطی عمود بر راستای امتداد یافته B (در واقع امتداد BM) ترسیم کنیم و پای عمود را Z بنامیم، مقدار بازوی بازگرداننده GZ بدست می‌آید، بدین ترتیب منحنی مکان هندسی Z یک منحنی سه بعدی خواهد بود که بدان « منحنی قطبی پایداری »^۱ گفته می‌شود. سرانجام به دلیل اینکه نمایش منحنی‌های سه بعدی B , M , Z بر روی یک صفحه دشوار است، لذا معمولاً در کتب دریایی، این منحنی‌ها به صورت دو بعدی نمایش داده می‌شوند.

* مؤلفه‌های استاندارد منحنی GZ

منحنی GZ ، معیار اصلی برای بررسی میزان پایداری شناور مطابق قوانین استاندارد می‌باشد. این قوانین مطابق قانون خط بار سال ۱۹۶۸ می‌باشد که از سوی IMO اعمال شده و توسط کلیه مؤسسات استاندارد کشتی‌سازی باید به صورت اجباری اعمال شود. هر شناوری باید در تمام حالات بارگیری بتواند قوانین استاندارد زیر را ارضا کند. در غیر اینصورت با تغییر چیدمانی و سناریوی بارگیری شناور باید با کاهش KG ، مؤلفه - های استاندارد زیر را ارضا کرد:

الف - مساحت زیر منحنی GZ

مساحت زیر منحنی GZ نباید کمتر از مقادیر زیر باشد. توجه شود که واحد GZ بر حسب متر و زاویه بر حسب رادیان می‌باشد ($1 \text{ rad} = 57.3 \text{ deg}$).

$$(1) \quad 0.055 \text{ متر} - \text{رادیان تا زاویه } 30^\circ \text{ درجه}$$

$$(2) \quad 0.09 \text{ متر} - \text{رادیان تا زاویه } 40^\circ \text{ درجه یا تا زاویه‌ای که یکی از}$$

سوراخ‌های غیر آب‌بند بدنه داخل آب می‌شود (در صورتی که این زاویه کمتر از 40° درجه باشد).

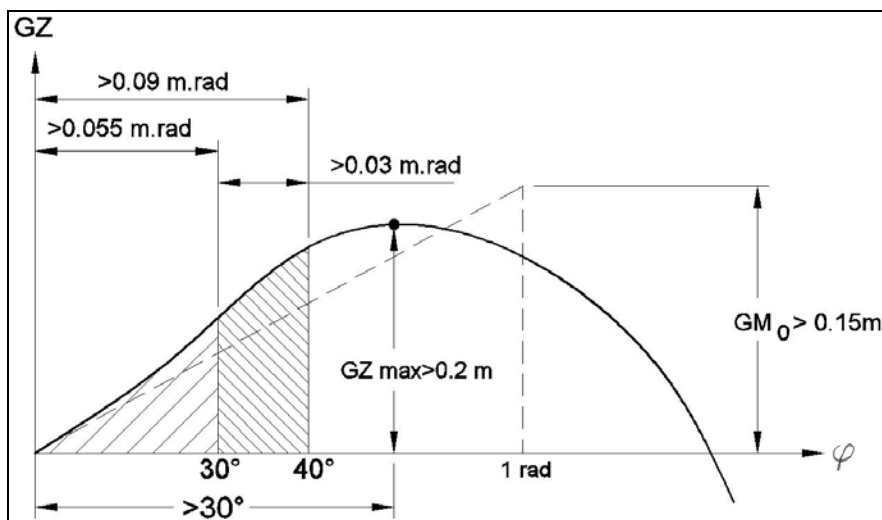
$$(3) \quad 0.03 \text{ متر} - \text{رادیان بین زاویه } 30^\circ \text{ تا } 40^\circ \text{ درجه (یا زاویه خرسی عرشه)}$$

ب) مقدار GZ نباید در زاویه 30° درجه یا بزرگتر از آن، کمتر از 0.2 متر باشد.

ج) حداکثر مقدار GZ نباید در زاویه‌ای کمتر از 30° درجه اتفاق بیافتد.

د) ارتفاع متاستری عرضی اولیه (GM_0) نباید کمتر از 0.15 متر باشد.

این مؤلفه‌های استاندارد را می‌توان در شکل زیر ملاحظه کرد.



شکل ۱۰: مؤلفه‌های استاندارد منحنی GZ

برای کشتی‌هایی که الوار بر روی عرشه حمل می‌کنند، ارتفاع متاستری عرضی

اولیه نباید کمتر از 0.05 متر باشد.

* استانداردهای مختلف پایداری شناورها

برای بررسی پایدار بودن شناور، استانداردهای مختلفی وجود دارد که بر حسب نوع شناور می‌توان یک یا چندین استاندارد را انتخاب کرد. برای آشنایی بیشتر و جلوگیری از برداشتهای متفاوت، اصل متن استانداردها ارائه شده‌اند.

1) IMO A167 Intact Stability criteria

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
 Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
 Maximum GZ to be at an angle > 25 degrees
 Initial GM to be at least 0.15 metres

2) IMO 749 Intact Stability Criteria for non - passenger

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
 Initial GM to be at least 0.15 metres
 GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees
 Max GZ to be at an angle > 30 degrees
 IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)
 IMO Weather Criterion (Areas)

3) IMO A749 Intact stability Criteria Passenger

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
 Initial GM to be at least 0.15 metres
 GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees
 Max GZ to be at an angle > 30 degrees

Angle of heel for passenger crowding < 10 degrees
 Angle of heel for turning < 10 degrees
 IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)
 IMO Weather Criterion (Areas)

4) MARPOL 73/78 (Oil tankers)

Final waterline below down-flood point & within 20 deg. range
 Final waterline below prot. openings & within 20 deg. range
 Final equilibrium angle for DECK EDGE IMMERSED < 25 degrees
 Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 30 degrees
 Range of positive GZ to be > 20 degrees
 Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
 Area under GZ curve within 20 degree range > 0.0175

5) Load Line (Oil Tankers > 150m, bulk carriers > 100m)

Final waterline below down-flooding point
 Final equilibrium angle for DECK EDGE IMMERSED < 15 degrees
 Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 17 degrees
 GM at least 0.05m in upright position after flooding

6) Passenger Ship Rules (S. I. No. 1216)

Margin line not to be immersed
 GM at least 0.05m in upright position after flooding
 Final equilibrium angle for unsymmetrical flooding < 7 degrees
 Range of positive GZ to be > 7 degrees
 Maximum GZ to be at least 0.05 metre within positive range
 Final equilibrium angle for unsymmetrical flooding < 20 degrees
 Range of positive GZ to be > 5 degrees
 Maximum GZ to be at least 0.03 metre within positive range

7) RO-RO Ship Rules

Margin line not to be immersed

GM at least 0.05m in upright position after flooding

Final equilibrium angle for unsymmetrical flooding < 7 degrees

Range of positive GZ to be > 7 degrees

Maximum GZ to be at least 0.05 metre within positive range

Range of positive GZ to be > 5 degrees

Maximum GZ to be at least 0.03 metre within positive range

8) 1990 Passenger Ship Rules (One compartment flooding)

Range of positive GZ to be > 15 degrees

Area under GZ curve up to 22 degrees or down-flood > 0.015

Maximum GZ to be at least 0.10 metres within positive range

GM at least 0.05m in equilibrium position after flooding

Range of positive GZ to be > 7 degrees

Maximum GZ to be at least 0.05 metres within positive range

9) 1990 Passenger Ship Rules (Two or more comp. flooding)

Range of positive GZ to be > 15 degrees

Area under GZ curve up to 27 degrees or down-flood > 0.015

Maximum GZ to be at least 0.10 metres within positive range

GM at least 0.05m in equilibrium position after flooding

Range of positive GZ to be > 7 degrees

Maximum GZ to be at least 0.05 metres within positive range

10) Chemical Tankers IMO A212 for L > 150

Range of positive GZ to be > 20 degrees (Final stage)

Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range

Range of positive GZ to be > 20 degrees (Final stage)

Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 17 degrees

Unprotected openings not immersed within 20 deg. range

11) NES 109 Intact stability criteria

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.080
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.048
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.133
 Maximum GZ to be at least 0.30 metre
 Maximum GZ to occur above 30 deg. heel
 Initial GM to be at least 0.30 metres
 Wind heeling: $A1 \geq 1.4 \times A2$
 Wind heeling: $GZ_c < 60\% GZ_{max}$
 Angle of heel due to beam winds less than 30 degrees
 High speed turning : Max. heel angle 20
 High speed turning : $GZ_c/GZ_{max} < 0.6$
 High speed turning : Area A > 0.4 of total area
 Lifting of heavy weights : Max. heel angle 15
 Lifting of heavy weights : $GZ_c/GZ_{max} < 0.5$
 Lifting of heavy weights : Area A > 0.5 of total area
 Crowding of personnel : Max. heel angle 15
 Crowding of personnel : $GZ_c/GZ_{max} < 0.6$
 Crowding of personnel : Area A > 0.4 of total area
 Towing : Max. heel angle 15
 Towing : $GZ_c/GZ_{max} < 0.6$
 Towing : Area A > 0.4 of total area
 Ship must not loll - GM at 0 must be positive
 Angle of vanishing stability less than 70 degrees

12) IMO A469 Intact Stability criteria for Offshore Supply Vessels

Area under GZ curve up to position of max GZ
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
 Maximum GZ to be at an angle > 15 degrees
 Initial GM to be at least 0.15 metres

13) SPECIAL PURPOSE SHIPS IMO A534

Final waterline below down-flooding point
 Final equilibrium angle < 7 degrees

GM at least 0.05m in upright position after flooding
 Range of positive GZ to be > 20 degrees
 Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range

14) USSR 1987 PASSENGER SHIPS

Final equilibrium angle for DECK EDGE IMMERSED < 15 degrees
 Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 17 degrees
 Range of positive GZ to be > 20 degrees
 Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
 GM at least 0.0m in upright position after flooding
 Deck edge not immersed at equilibrium angle

15) GAS CARRIERS

Final equilibrium angle < 30 degrees
 Range of positive GZ to be > 20 degrees
 Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
 Area under GZ curve within 20 degree range > 0.0175
 Final waterline below down-flooding point

16) Grain criteria

Initial GM to be at least 0.30 metres
 Angle of heel grain heeling moments ≤ 12 degrees
 Residual dynamic stability
 Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
 Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
 Maximum GZ to be at an angle > 25 degrees

17) Norwegian Fishing Vessel

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
 Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
 Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Initial GM to be at least 0.15 metres
 GZ between 40 and 65 degrees > 0.1
 Range of positive GZ at least 80 degrees

18) CHEMICAL TANKERS IMO A212 L < 150

Range of positive GZ to be > 20 degrees (Final stage)
 Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
 Unprotected openings not immersed within 20 deg. range
 Maximum Value of equilibrium angle < 25 degrees

19) NES 109 Intact with ice

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.051
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
 Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.085
 Maximum GZ to be at least 0.24 metre
 Maximum GZ to occur above 30 deg. heel
 Initial GM to be at least 0.15 metres
 Wind heeling: $A1 \geq 1.4 \times A2$
 Wind heeling: $GZ_c < 60\% GZ_{max}$
 Angle of heel due to beam winds ≤ 30 degrees
 Ship must not loll - GM at 0 must be positive
 Angle of vanishing stability ≤ 70 degrees

20) German Ministry of Transport for L ≤ 100

Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
 Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03

Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09

Initial GM to be at least 0.15 metres

Positive range of stability > 50 degrees

For stability range between 50 & 60 dgrs GZ increased by 10mm < 60 dgrs

Par 3.2.8 Ships with large wind lateral plan

21) Mobile Offshore Drilling Units

MODU Intact Stability Weather Criterion

23) ABS criterion for Submarine & Submersible at underwater

$$BG_{\min} = \frac{n.w.N.d}{W.\tan q}$$

Where:

$n = 0.1$ (This represents 10 percent of the people aboard moving simultaneously)

$w = 79.5$ kg per person (for passenger submersibles, w may be taken as 72.5 kg per person)

d = the interior length of the main cabin accessible to personnel, in mm. This should not include machinery compartments if they are separated from the main cabin with a bulkhead.

N = total number of people onboard the submersible.

W = the total weight (in units consistent with w) of the fully loaded submersible, not including soft ballast.

$q = 25$ degrees (representing the maximum safe trim angle. A smaller angle may be required if battery spillage or malfunction of essential equipment would occur at 25 degrees. This assumes that each person has an individual seat that is contoured or upholstered so that a person can remain in it at this angle).

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کاتاماران تندرو



شرکت سازنده: شرکت امواج براق

دارای سیستم رانش واترجت

طول: ۱۲/۳ متر

عرض: ۳/۸ متر

سرعت: ۱۸ گره

بخش ۲-۱۲: ^۱ تحلیل حالات مختلف پایداری شناور

هر جسم سه حالت مختلف تعادل و پایداری دارد:

۱- پایداری مثبت (تعادل پایدار): جسم با انحراف از حالت اولیه باز هم به حالت اول خود باز می‌گردد.

۲- پایداری خنثی (تعادل خنثی): جسم با هر مقدار انحراف، در همان میزان انحراف باقی می‌ماند (نه به حالت اولیه بازمی‌گردد و نه میزان انحراف بیشتر می‌شود).

۳- پایداری منفی (تعادل ناپایدار): جسم با اندکی انحراف از حالت اولیه، پایداری خود را از دست می‌دهد و واژگون می‌گردد (میزان انحراف آن از حالت اولیه به سرعت افزایش می‌یابد).

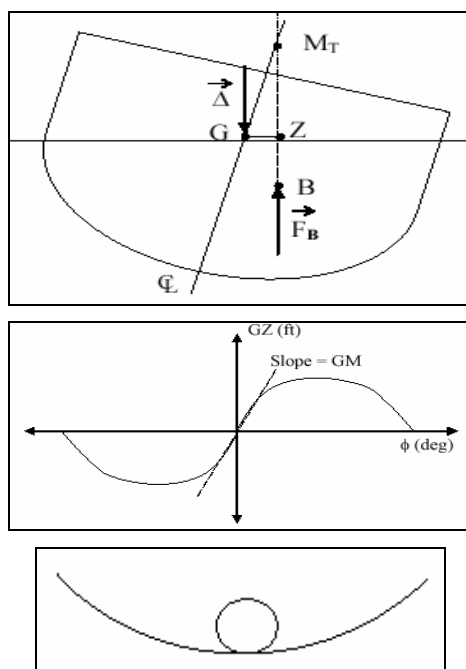
شناور نیز در داخل آب دارای این سه حالت پایداری می‌تواند باشد. مشخصه پایداری در شناور به وسیله دو پارامتر M (نقطه متاستر) و G (مرکز ثقل) و موقعیت آنها نسبت به یکدیگر تعریف می‌شود.

هر یک از این حالات عبارتند از:

الف) پایداری مثبت شناور:

در هر شناوری که M بالای G باشد، این شناور دارای پایداری مثبت است یا به عبارت دیگر شناور تحت بارهای خارجی تنها در صورتی به حالت اولیه خود بازمی‌گردد که $GM > 0$ باشد.

پایداری را می‌توان از روی نمودار $GZ - \phi$ نیز بررسی کرد. اگر شیب نمودار در مبدأ مختصات مثبت باشد شناور دارای حالت پایدار است یعنی در واقع $GM > 0$ است. در شکل ۱ حالت پایداری مثبت شناور و منحنی $GZ - \phi$ آن نشان داده شده است.



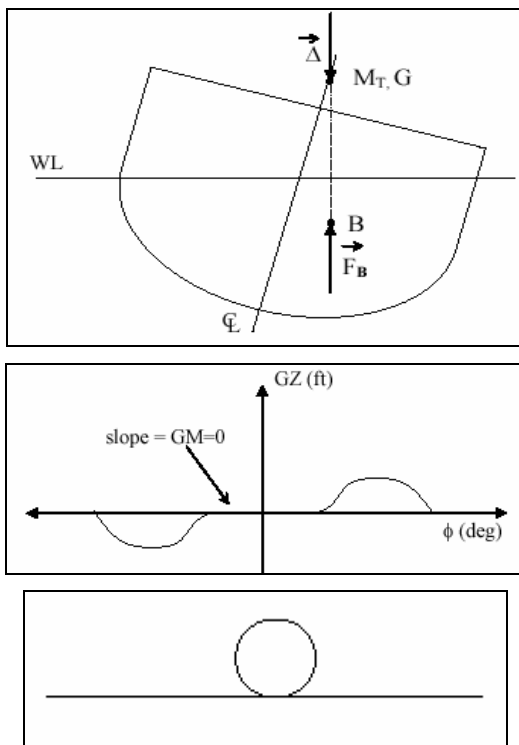
شکل ۱: نمایش حالت تعادل پایدار شناور

از قسمت سوم این شکل می‌توان درک نمود که پایداری مثبت یک شناور به مثابه یک گوی داخل گودال است که با انحراف گوی از موقعیت اولیه، باز هم به موقعیت اول خود باز می‌گردد. کشتی دارای تعادل پایدار نیز بر اثر برخورد امواج یا سایر نیروهای خارجی از موقعیت اولیه خود به اندازه زاویه ϕ منحرف می‌شود ولی باز هم به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد.

(ب) پایداری خشی شناور :

در این حالت شناور نسبت به تغییر وضعیت اولیه خود بی‌تفاوت است یعنی اگر شناور بر اثر نیروهای خارجی به اندازه زاویه کوچک ϕ از موقعیت اولیه خود منحرف شود، در همان زاویه ϕ باقی می‌ماند مگر اینکه نیروی مخالف دیگری آن را به موقعیت اولیه خود بازگرداند. این حالت موقعی پیش می‌آید که G , M بر هم منطبق باشند یعنی $GM = 0$ باشد.

این حالت از پایداری را می‌توان در شکل ۲ ملاحظه کرد. در قسمت سوم این شکل می‌توان پایداری خنثی را با مفهوم گوی بر روی یک صفحه تخت درک نمود.



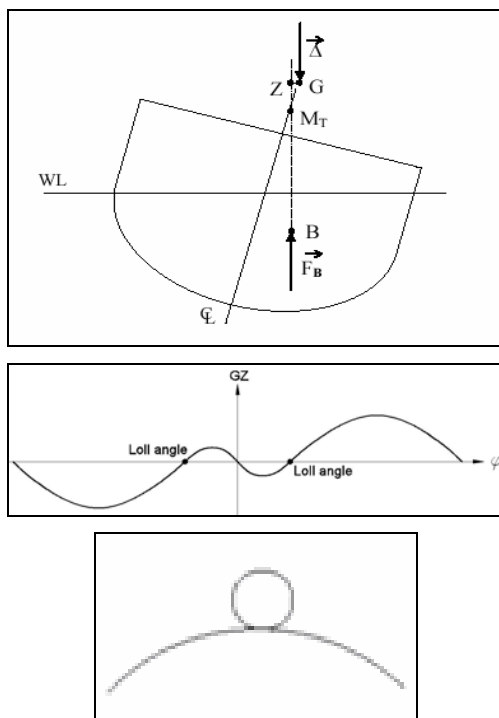
شکل ۲: نمایش تعادل خنثی شناور

در نمودار $GZ - \phi$ نیز می‌توان پایداری خنثی را به این صورت ملاحظه کرد که شیب این نمودار در نقطه $\phi = 0$ برابر صفر یا به عبارت دیگر $GM = 0$ می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد که در حالت پایداری خنثی، بازوی بازگرداننده (GZ) برای بازگرداندن شناور به حالت اولیه وجود ندارد لذا شناور در زاویه انحراف کوچک ϕ باقی می‌ماند.

ج) پایداری منفی شناور:

در این حالت شناور در اثر کوچکترین انحراف از موقعیت اولیه خود که ممکن است

بر اثر باد، موج یا هر نیروی خارجی دیگر باشد، دچار زوایای غلتش زیاد می‌گردد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که مرکز ثقل (G) بالای مرکز متاسنتر (M) واقع گردد یا به عبارت دیگر $GM < 0$ باشد. این حالت در نمودار $GZ - \phi$ با شیب منفی منحنی در نقطه $\phi = 0$ بیان می‌گردد که این شیب منفی در واقع نشان دهنده مقدار منفی GM می‌باشد. نکته مهم در اینجاست که منفی بودن GM صرفاً به معنای واژگون شدن شناور نیست بلکه شناور در زاویه‌ای که زاویه «لُل»^۱ نامیده می‌شود به صورت کج می‌ایستد. البته اگر زاویه لُل به حدی زیاد باشد که باعث وارد شدن آب به داخل شناور شود، شناور واژگون می‌گردد. در شکل ۳ می‌توان این حالت از پایداری را مشاهده کرد.



شکل ۳: نمایش حالت تعادل ناپایدار شناور

قسمت سوم این شکل نشان دهنده گوی بر روی یک صفحه محدب است و نشان می‌دهد که جسم با کوچکترین انحراف از حالت اولیه خود، پایداری را به کلی از دست می‌دهد و دچار انحراف زیاد از موقعیت اولیه خود می‌شود. بنابراین شرط پایداری شناور این است که :

M بالای G باشد (GM مثبت باشد)

و

ربطی به موقعیت B و G نسبت به هم ندارد.

پایداری بر روی امواج:

پایداری شناور در حالت hogging و sagging با حالت آب آرام متفاوت است. شناور در حالت sagging دارای یک تکیه‌گاه است و پایداری آن کمتر از حالت hogging (که دارای دو تکیه‌گاه است) می‌باشد.

بخش ۲-۱۳: محاسبه مقدار GZ با روابط آتوود، پروهسکا و بارنهارت^۱

مقدار GZ در زوایای غلتش کوچک (کمتر از ۸ درجه) با تقریب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$GZ = GM \cdot \sin\phi$$

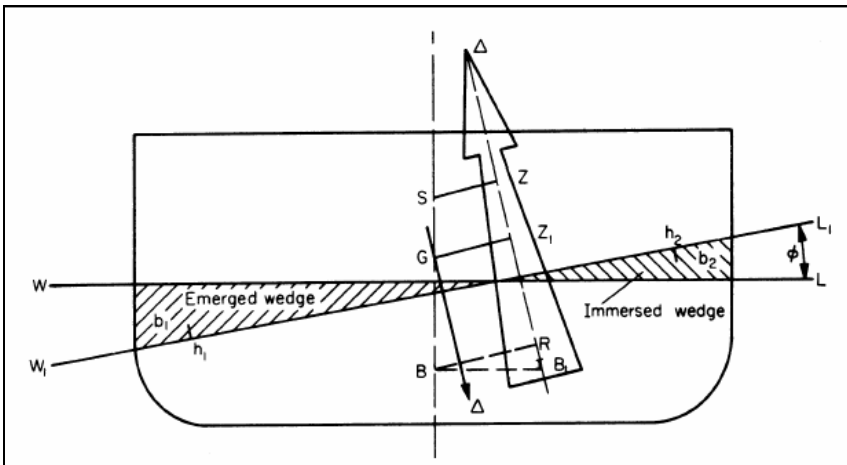
در زوایای غلتش بزرگ، محاسبه مقدار GZ کار دشواری است که به کمک برنامه‌های کامپیوتری باید انجام شود چرا که اولاً در زوایای بزرگ غلتش، شناور علاوه بر رول، دچار تریم هم می‌شود که البته این پدیده در محاسبات GZ معمولاً لحاظ نمی‌شود چرا که تأثیر کمی بر مقدار آن دارد.

ثانیاً در زوایای بزرگ غلتش، حجم‌های بیرون آمده و داخل رفته در آب با یکدیگر قرینه نیستند و در واقع نقطه متاستیری نیز بر خط مرکزی قرار ندارد و در زوایای غلتش مختلف نیز نقطه ثابتی نیست که بتوان با تشکیل مثلث قائم‌الزاویه، رابطه قبل را بکار برد.

برای محاسبه مقدار GZ در زوایای غلتش بزرگ، روشهای مختلفی ارائه شده است که مهمترین آنها روابط «آتوود»، پروهسکا و بارنهارت می‌باشند:

روش «آتوود»^۲

نتیجه روابط زیر که «رابطه آتوود» نامیده می‌شود را می‌توان برای محاسبه GZ بکار برد. با توجه به شکل ۱، با فرض ثابت ماندن جابجایی در آب‌خور WL و W_1L_1 ، حجم مثلث‌های شناوری فرو رفته و بیرون آمده از آب، باید برابر باشند. فرض کنید:



شکل ۱: محاسبه GZ در روش آتوود

نیروی بویانسی مربوط به مثلث‌های شناوری فرو رفته یا بیرون آمده : δ

مراکز حجم مثلث‌های شناوری فرو رفته یا بیرون آمده : b_1, b_2

پای عمودهای گذرانده شده از b_1, b_2 بر روی خط آبخور $W_1 L_1$: h_1, h_2

پای عمود گذرانده از B روی خط اثر نیروی بویانسی گذرانده از $R = B_1$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\Delta \cdot \overline{BR} = \delta \cdot \overline{h_1 h_2}$$

ممان بازگرداننده‌ای که روی کشتی اثر می‌کند طبق رابطه زیر داده می‌شود:

$$\Delta \cdot \overline{GZ_1} = \Delta \cdot \overline{BR} - \Delta \cdot \overline{BG} \cdot \sin \phi$$

$$= \Delta \left[\frac{\delta}{\Delta} \overline{h_1 h_2} - \overline{BG} \sin \phi \right]$$

این رابطه به «رابطه آتوود» مشهور است.

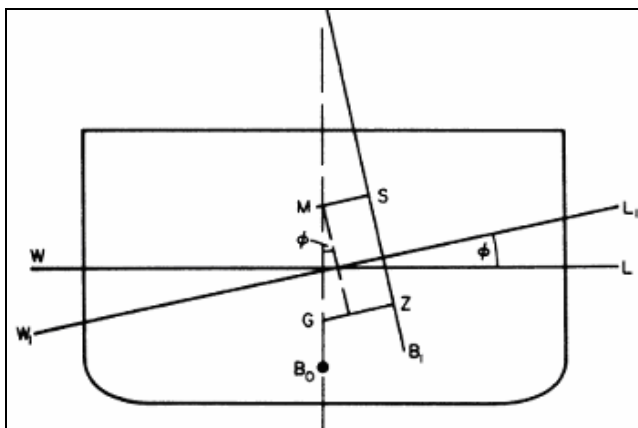
برای محاسبه $\overline{h_1 h_2}$ در مرجع [2] روش‌های مختلفی از جمله روش «بارنس»^۱ و

روش ریچ^۱ پیشنهاد شده است.

* روش «پروهسکا»

روش دیگری که براساس تجربه به دست آمده است و روش تقریبی مناسبی می باشد، روش «پروهسکا»^۲ می باشد که مطابق شکل ۲ داریم:

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \cdot \sin \phi + \overline{MS}$$



شکل ۲: محاسبه GZ با روش پروهسکا

مقدار $\overline{MS}$ «بازوی پایداری باقیمانده»^۳ نامیده می شود^۴ که از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_{RS} = \frac{\overline{MS}}{\overline{BM}_0}$$

مقدار $\overline{BM}_0$ همان شعاع متاستری اولیه (حالت قائم) می باشد و مقدار C_{RS}

1 - Reech

2 - Prohaska

3 - residuary stability lever

4- مفهوم دیگری از «بازوی پایداری باقیمانده» که در مهندسی دریایی بکار می رود در قسمت پایداری دینامیکی بیان خواهد شد.

براساس تجربه از تعداد زیادی از کشتی‌ها تا زاویه ۳۰ درجه از یکی از روابط زیر به دست می‌آید:

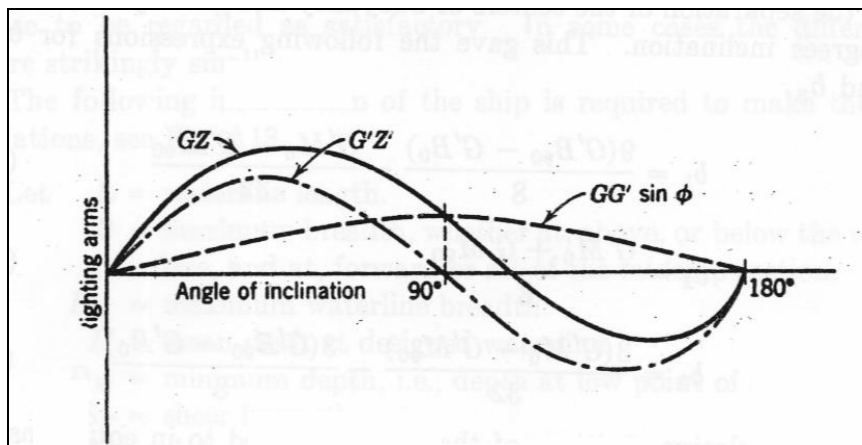
$$C_{RS} = 0.8566 - 1.2262 \cdot \frac{\overline{KB}}{T} - 0.035 \cdot \frac{B}{T}$$

$$C_{RS} = -0.1859 - 0.0315 \frac{B}{T} + 0.3526 C_M$$

که B عرض، T آب‌خور و C_M ضریب مقطع میانی است.

روش «بارنهارت»

روش جدید «بارنهارت» با ارائه روابط ریاضی، تخمین نسبتاً "دقیقی از مقادیر بازگرداننده جهت ترسیم منحنی $GZ - \phi$ ارائه می‌کند. این روش نتیجه تز دکترای R.E.Barnhart و A.M.Thewlis از دانشگاه «ماساچوست» می‌باشد. این روابط برای بیش از دهها شناور از انواع مختلف و ابعاد مختلف اعمال شده‌اند و نتایج با منحنی اصلی مقایسه شده‌اند که نتایج بسیار خوب و دقیقی را به دنبال داشته است. منحنی GZ یک شناور مطابق شکل ۳ را در نظر بگیرید که به شکل یک منحنی غیر سینوسی است. منحنی $G'Z'$ را که یک منحنی سینوسی است و از نقطه ۹۰ درجه عبور می‌کند را نیز روی نمودار در نظر می‌گیریم. اگر فاصله عمودی منحنی GZ از نقطه زاویه ۹۰ درجه برابر GG' باشد، منحنی $GG' \cdot \sin \phi$ را در نظر می‌گیریم که معادل جابجایی عمودی مرکز ثقل یا همان اصلاح سینوسی منحنی بازوی بازگرداننده است.



شکل ۳: اصلاح سینوسی منحنی GZ

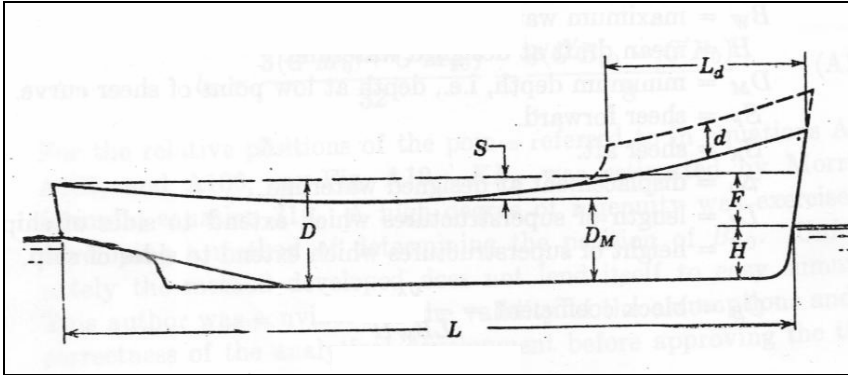
اگر مقدار این اصلاح سینوسی از منحنی GZ کم شود، منحنی $G'Z'$ بدست می‌آید یعنی:

$$GZ = G'Z' + GG'.\sin\phi \quad (1)$$

در روش بارنهارت، مقدار $G'Z'$ محاسبه می‌شود و در پایان مسئله با $GG'.\sin\phi$ جمع شده و مقدار نهایی بازوی بازگرداننده یعنی GZ بدست می‌آید. مقادیر ارائه شده در این روابط بر اساس واحد انگلیسی می‌باشد.

- معرفی پارامترها

پارامترهای بکارگرفته شده در این روش در این قسمت بیان می‌گردد که بخشی از این پارامترها را می‌توان در شکل ۸ ملاحظه نمود:



شکل ۸: پارامترهای بکار رفته در فرمولها

L : طول آبخور

B : حداکثر عرض بدنه در بالا یا پائین خط آبخور

B_W : حداکثر عرض بدنه صفحه آبخور

H : آبخور متوسط در آبخور طراحی

D_M : حداقل عمق بدنه یعنی عمق از نقطه پائین خط شیب عرشه

S_F : ارتفاع انحناى شیب در سینه

S_A : ارتفاع انحناى شیب در پاشنه

Δ_0 : جابجایی در آبخور طراحی

L_d : طول سوپر استراکچر که تا کناره‌های بدنه کشیده شده باشد

d : ارتفاع سوپر استراکچر که تا کناره‌های بدنه کشیده شده باشد

$C_B = \frac{\nabla_0}{L.B_W.H}$: ضریب بلوکی

C_W : ضریب صفحه آبخور در آبخور

C_X : ضریب مقطع میانی در آبخور

C_{PV} : ضریب منشوری عمودی در آبخور H

$A_0 = C_W \cdot L \cdot B_W$: مساحت سطح آبخور در آبخور طراحی

$A_M = C_X \cdot B_W \cdot H$: مساحت ناحیه زیر آب مقطع میانی

A_1 : مساحت صفحه آبخور در آبخور D

A_2 : مساحت صفحه عمودی طولی (منطبق بر خط مرکزی) تا ارتفاع D بدنه

S : مقدار میانی فاصله شیب میانی تا حداکثر شیب پاشنه (مطابق شکل)

$D = D_M + S$: عمق متوسط بدنه

$F = D - H$: فری برد متوسط بدنه

سایر پارامترها نیز به صورت زیر بدست می آیند:

$$\Delta_T = \Delta_0 + \frac{A_0 + A_1}{2} \frac{F}{35} \quad (۲)$$

$$\delta = \frac{\Delta_T}{2} - \Delta_0 \quad (۳)$$

$$C_W' = \frac{A_2}{LD} \quad (۴)$$

$$C_W'' = C_W' - \frac{140 \cdot \delta}{BDL} \left(1 - C_{PV}'' \right) \quad (۵)$$

که مقدار δ برای محاسبه C_W'' همیشه مثبت است.

$$C_X' = \frac{A_M + B \cdot F}{B \cdot D} \quad (۶)$$

$$C_{PV}' = \frac{35 \Delta_T}{A_1 D} \quad (۷)$$

$$C_{PV}'' = \frac{35 \Delta_T}{A_2 \cdot B} \quad (۸)$$

- نحوه محاسبه بازوی بازگرداننده

همانطور که در معادله ۱ بیان شد داریم:

$$GZ = G'Z' + GG'.\sin\varphi$$

که بیان این معادله به صورت سری فوریه از قرار زیر می باشد:

$$G'Z' = b_1.\sin 2\varphi + b_2.\sin 4\varphi + \dots + b_n.\sin 2n\varphi \quad (9)$$

بررسی های به عمل آمده برای ۱۵ شناور از انواع مختلف نشان می دهد که

ضرایب مقادیر $\sin 8\varphi$

و بالاتر، مقدار بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است بنابراین:

$$G'Z' = b_1.\sin 2\varphi + b_2.\sin 4\varphi + b_3.\sin 6\varphi \quad (10)$$

ضرایب b_1 و b_2 و b_3 سری فوریه را می توان با کمک شکل ۵ و خواص

منحنی بازوی بازگرداننده در صفر و ۹۰ درجه به صورت زیر محاسبه کرد:

در $\varphi = 0$ داریم:

$$\frac{d(G'Z')}{d\varphi} = G'M_0 \quad (11)$$

که $G'M_0$ برابر ارتفاع متاستری اولیه است.

در $\varphi = 90$ نیز داریم:

$$\frac{d(G'Z')}{d\varphi} = G'M_{90} \quad (12)$$

برای محاسبه b_3 نیز می توان از سطح زیر نمودار GZ استفاده کرد. سطح زیر

نمودار GZ برابر پایداری دینامیکی شناور است که از حاصل ضرب جابجایی در

مقدار افزایش فاصله جدایی مرکز ثقل و بویانسی در زوایای صفر و ۹۰ درجه

بدست می آید. در نتیجه مقادیر b_1 و b_2 و b_3 به صورت زیر بدست می آیند:

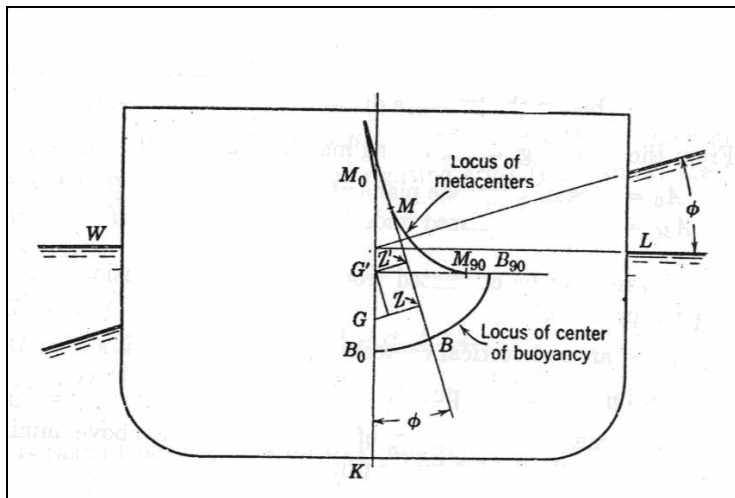
$$b_1 = \frac{9(G'B_{90} - G'B_0)}{8} - \frac{G'M_0 - G'M_{90}}{32} \quad (13)$$

$$b_2 = \frac{G'M_0 + G'M_{90}}{8} \quad (۱۴)$$

$$b_3 = \frac{3(G'M_0 - G'M_{90})}{32} - \frac{3(G'B_{90} - G'B_0)}{8} \quad (۱۵)$$

که پارامترهای موجود در این معادلات را می‌توان در شکل ۵ ملاحظه نمود.

این پارامترها طبق معادلات زیر محاسبه می‌شوند:



شکل ۵: موقعیت مرکز بویانسی و متاسنتر در زاویه غلتش صفر و ۹۰ درجه

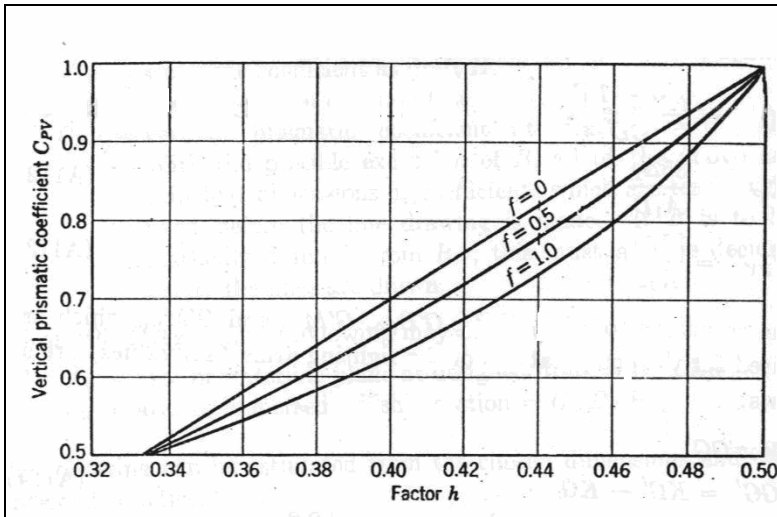
- برای محاسبه GG' :

$$GG' = KG' - KG \quad (۱۶)$$

$$KG' = \frac{D(1-h_1)\Delta_T - \delta}{2\Delta_0} \quad (۱۷)$$

$$f_1 = \frac{D\left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)}{2F \cdot (1 - C_{PV})'} \quad (۱۸)$$

که مقدار h_1 از شکل ۶ به کمک مقادیر C_{PV} و f_1 بدست می‌آید.



شکل ۶: نمودار استخراج ضریب h

- برای محاسبه $G'B_0$ داریم:

$$G'B_0 = KG' - KB_0 \quad (19)$$

$$KB_0 = (1 - h_0)H \quad (20)$$

$$f_0 = \frac{H \left(\frac{A_1}{A_0} - 1 \right)}{2F(1 - C_{PV})} \quad (21)$$

که h_0 باز هم از شکل ۶ به کمک مقادیر C_{PV} و f_0 بدست می‌آید.

- برای محاسبه $G'B_{90}$ داریم:

$$G'B_{90} = \frac{\Delta_T h_2 B}{4\Delta_0} - \frac{\delta^2}{\Delta_0} \frac{17.5}{A_2 - 70 \left(\frac{\delta}{B} \right) (1 - C_{PV})} \quad (22)$$

$$f_2 = 9.1 \left(C_X' - 0.89 \right) \quad (23)$$

δ برای محاسبه $G'B_{90}$ همیشه مثبت است. h_2 نیز از شکل ۱۰ و به کمک مقادیر C_{PV} و f_2 بدست می‌آید. اگر C_X کوچکتر از ۰/۸۹ باشد در نتیجه $f_2 = 0$ می‌باشد.

- برای محاسبه $G'M_0$:

$$G'M_0 = KB_0 + BM_0 - KG' \quad (24)$$

$$BM_0 = \frac{C_I \cdot L \cdot B_w^3}{35 \cdot \Delta_0} \quad (25)$$

CI از شکل ۷ و از نمودار Line1 به کمک CW بدست می‌آید.

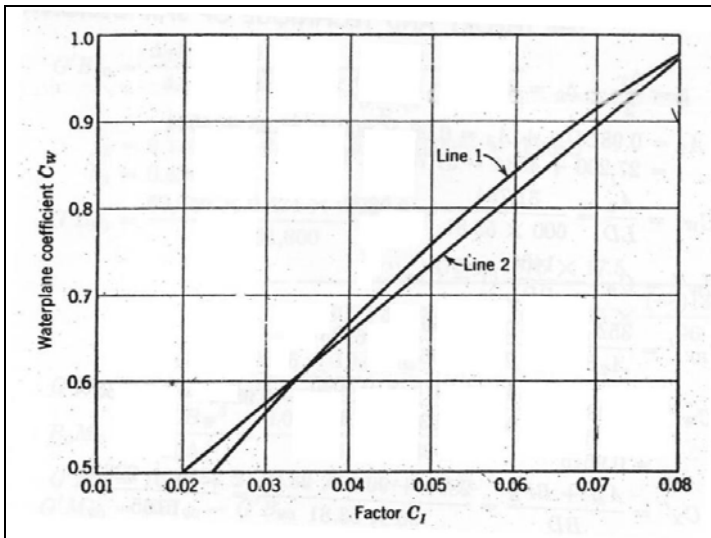
- برای محاسبه $G'M_{90}$:

$$G'M_{90} = BM_{90} - G'B_{90} \quad (26)$$

که $G'B_{90}$ از معادله ۲۲ بدست می‌آید.

$$BM_{90} = \frac{C_I' \cdot L \cdot D^3}{35 \cdot \Delta_0} + \frac{L_d \cdot d \cdot D^2}{140 \cdot \Delta_0} \quad (27)$$

که C_I' از شکل ۷ از نمودار Line2 به کمک C_W'' بدست می‌آید.



شکل ۷: نمودار استخراج ضریب CI

مطابق فرمولهای ارائه شده با جاگذاری روابط ۱۹ تا ۲۷ در روابط ۱۳ تا ۱۵ ضرائب سری فوریه بدست می‌آید. با جاگذاری این ضرائب در رابطه سری فوریه مقدار $G'Z'$ بدست می‌آید. مقدار GG' نیز از روابط ۱۶ تا ۱۸ بدست می‌آید. هم‌اکنون با جاگذاری مقادیر $G'Z'$ و GG' در رابطه ۱ مقدار بازوی بازگرداننده GZ در هر زاویه غلتش بدست می‌آید. همانطور که در رابطه ۱ ملاحظه می‌شود مبنای ارائه این روش، استفاده از اصلاح سینوسی منحنی GZ و امکان تعمیم بسط سری فوریه برای آن بوده است.

بدین ترتیب با لحاظ کردن روابط فوق می‌توان تنها با داشتن ابعاد و ضرائب هندسی بدنه، منحنی GZ را بدست آورد و نیازی به استفاده از نقشه‌های سه بعدی کامپیوتری و صرف زمان زیاد نمی‌باشد. مقادیر بدست آمده از این روش برای تعداد زیادی از انواع کشتی‌ها بررسی شده است که نتایج بسیار دقیقی به دنبال داشته است.

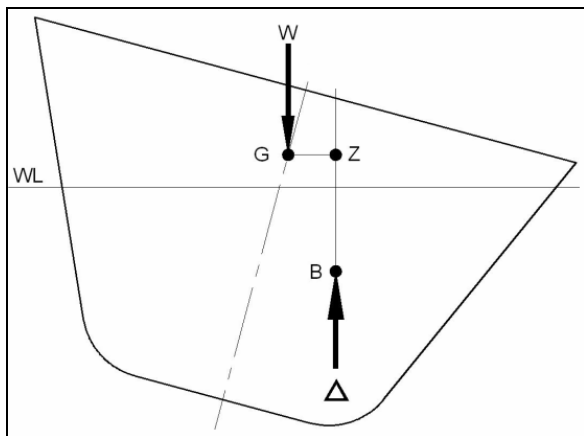
* محاسبه GZ به روش ترسیمی

اگر بخواهیم منحنی GZ را با استفاده از فایل سه بعدی کامپیوتری استخراج کنیم مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- مطابق مطالب بخش‌های قبل ابتدا موقعیت خط آبخور را در زاویه غلتش مورد نظر ترسیم می‌کنیم. گفتیم که در زوایای غلتش بزرگ دیگر خطوط آبخور در خط مرکزی (نقطه 0) همگرا نیستند. خط آبخور به گونه‌ای جابجا می‌شود که باز هم جابجایی شناور ثابت باشد و بخش زیر آب رفته عرشه جبران گردد. بدست‌آوردن مقدار جابجا شدن خط آبخور باید به صورت سعی و خطا بدست آید و مبنای سعی و خطا در یک زاویه هیل معین، رسیدن به تناژ اولیه است.

۲- در موقعیت بدست آمده خط آبخور، محل مرکز بویانسی (B) را معین می‌کنیم.

۳- از مرکز ثقل (G) و مرکز بویانسی (B) دو خط موازی عمود بر خط آبخور جدید رسم می‌کنیم. فاصله این دو خط برابر GZ می‌باشد.



شکل ۸: محاسبه GZ به روش ترسیمی

بخش ۲-۱۴: ۱ تغییرات منحنی GZ

منحنی GZ با دو پارامتر زیر تغییر می‌کند:

۱- تغییر مرکز ثقل شناور (KG)

۲- تغییر تناژ یا آبخور شناور

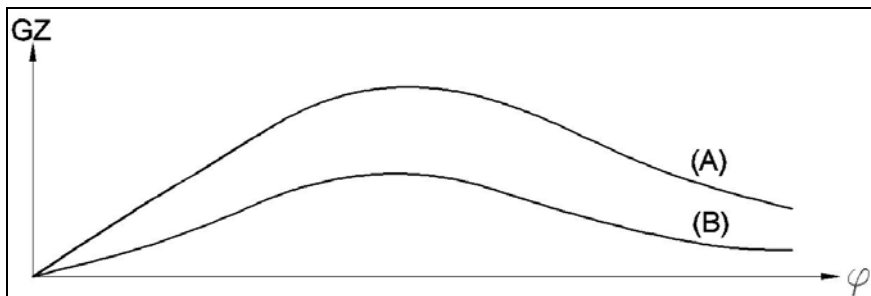
یادآوری می‌شود که GZ از مقدار GM بدست می‌آید و GM نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$KM = KB + BM$$

$$GM = KM - KG$$

لذا مقدار GM وابسته به مقادیر KM و KG می‌باشد. KM وابسته به آبخور یا تناژ و KG وابسته به مرکز ثقل شناور است.

مرکز ثقل عمودی (KG) شناور در هر سناریوی بارگیری تغییر می‌کند که کاهش ارتفاع KG باعث افزایش مقادیر GZ و افزایش ارتفاع KG باعث کاهش مقادیر GZ می‌شود که در شکل زیر به طور مثال ارائه شده است.

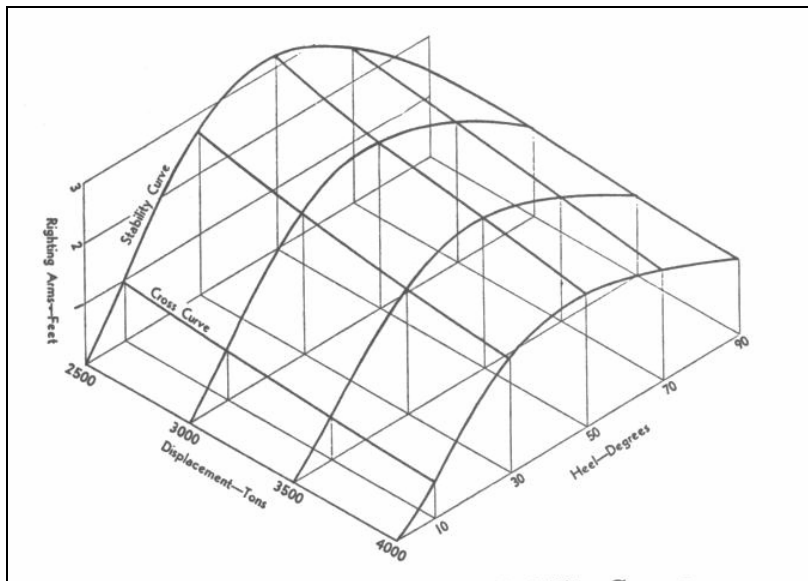


شکل ۱: منحنی GZ برای یک شناور با دو حالت بارگیری

$KG = 5m$: در حالت بارگیری A

$KG = 7m$: در حالت بارگیری B

همچنین در منحنی‌های هیدرواستاتیک، تغییرات KM با آب‌خور بیان شده است که این تغییرات بر مقدار GZ نیز مؤثر است. تغییرات آب‌خور نیز ناشی از تغییرات جابجایی می‌باشد. تغییرات GZ بر حسب تغییرات تناژ یا جابجایی برای یک شناور خاص (با KG ثابت) در شکل ۲ ترسیم شده است.



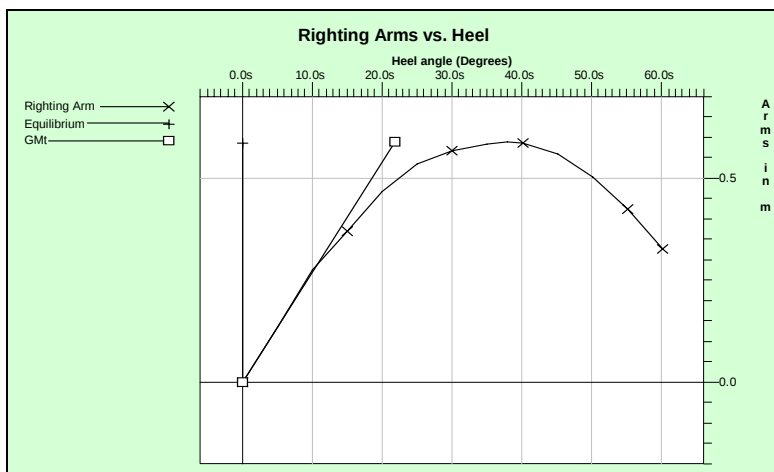
شکل ۲: تغییرات GZ برای یک شناور با جابجایی‌های مختلف

بدین ترتیب منحنی GZ هم با تغییر مرکز ثقل شناور و هم با تغییر جابجایی (آب‌خور) تغییر می‌کند.

مثال: منحنی GZ را در جابجایی ۳۵۰۰ تن و در دو حالت مختلف مرکز ثقل برای شناور مدل ۱ ترسیم می‌کنیم.

حل: در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG=5.1$ m منحنی GZ قبلاً ترسیم شد. در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG=4.6$ m مقادیر GZ به صورت زیر است و نمودار آن در شکل ۳ ملاحظه می‌شود:

Heel Angle (deg)	Trim Angle (deg)	Righting Arm (m)
0	0.00	0.000
5	0.01f	0.136
10	0.02f	0.275
15	0.06f	0.371
20	0.13f	0.466
25	0.18f	0.534
30	0.17f	0.568
35	0.11f	0.584
37.95	0.04f	0.588
40	0.01a	0.586
45	0.16a	0.559
50	0.32a	0.503
55	0.49a	0.424
60	0.66a	0.326

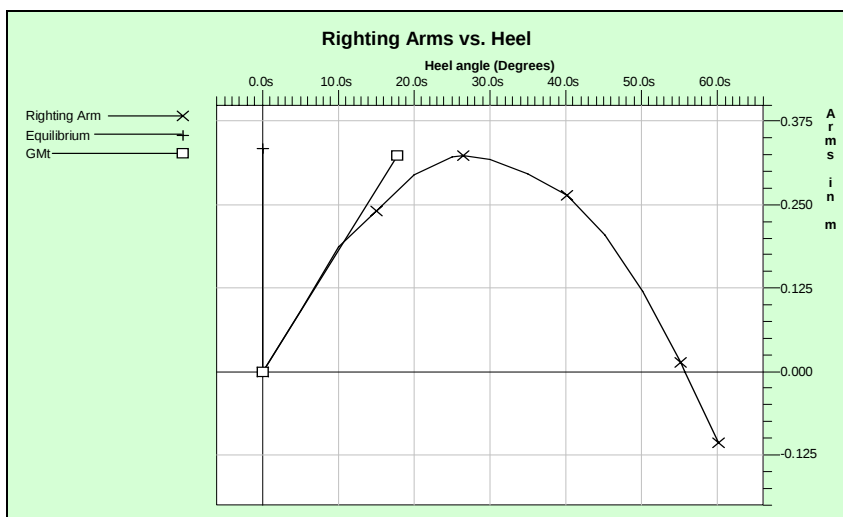


شکل ۳: منحنی GZ کشتی مدل ۱ در شرایط: $KG=4.6$ m , $Displacement= 3500$ t

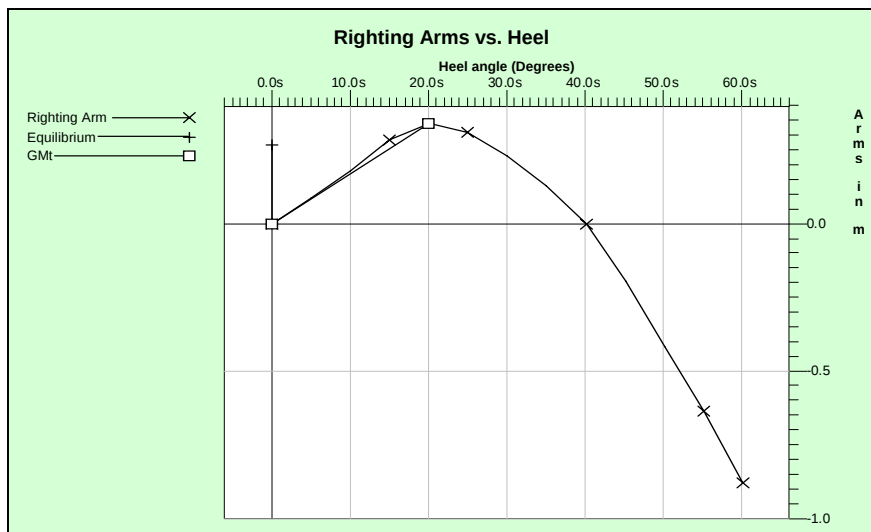
(خط مماس نشان داده شده در شکل‌ها، نشان‌دهنده مقدار GM می‌باشد که باید در زاویه ۵۷/۳ درجه نشان داده می‌شد ولی بدلیل محدودیت ابعاد تصویر تا این زاویه نمایش داده نشده است.)

با یادآوری از قبل داریم که منحنی GZ در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG = 5.1 \text{ m}$ مطابق شکل زیر می‌باشد.

برای نمایش تأثیرات تغییر جابجایی نیز منحنی GZ شناور مدل ۱ را در جابجایی ۱۱۴۰ تن و $KG = 6.8 \text{ m}$ به صورت شکل ۵ ملاحظه می‌کنیم.



شکل ۴: منحنی GZ کشتی مدل ۱ در شرایط: $KG = 5.1 \text{ m}$, Displacement = 3500 t



شکل ۵: منحنی GZ کشتی مدل ۱ در شرایط:

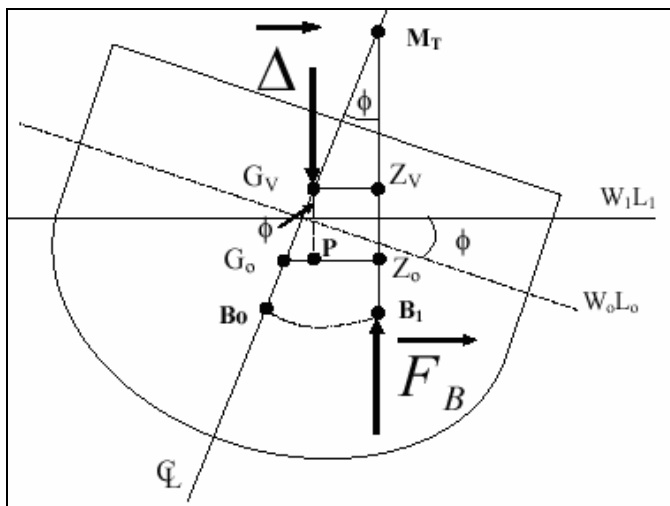
Displacement= 1140 t , KG=4.8 m

بخش ۲-۱۵: ۱ اصلاح سینوسی و کسینوسی منحنی GZ

می‌دانیم که یکی از مؤلفه‌های اصلی بازوی بازگرداننده (GZ)، موقعیت مرکز ثقل (G) می‌باشد. هرگونه جابجایی عمودی یا عرضی مرکز ثقل بر مقدار GZ مؤثر است و مقدار GZ باید مطابق این تغییرات اصلاح گردد. به این تغییرات اصلاح سینوسی و کسینوسی منحنی GZ گویند.

* اصلاح سینوسی منحنی GZ

جابجایی عمودی بارهای داخلی کشتی باعث افزایش ارتفاع مرکز ثقل می‌گردد. مطابق شکل ۱ مقدار اولیه بازوی بازگرداننده G_0Z_0 می‌باشد. پس از جابجایی عمودی مرکز ثقل از G_0 به G_v ، مقدار بازوی بازگرداننده برابر G_vZ_v می‌باشد که از مقدار G_0Z_0 کوچکتر است چرا که داریم.



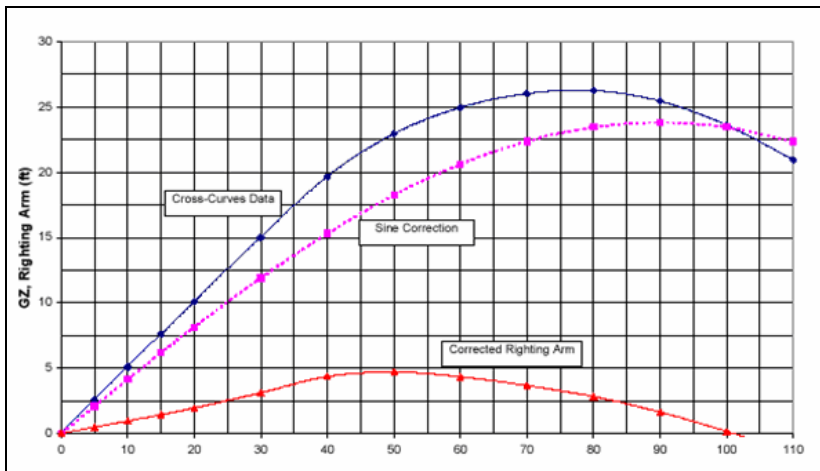
شکل ۱: نمایش اصلاح سینوسی GZ بر اثر جابجایی عمودی مرکز ثقل

$$G_v Z_v = G_0 Z_0 - G_0 P$$

$$G_0 P = G_0 G_v \cdot \sin \phi$$

$$G_v Z_v = G_0 Z_0 - G_0 G_v \cdot \sin \phi$$

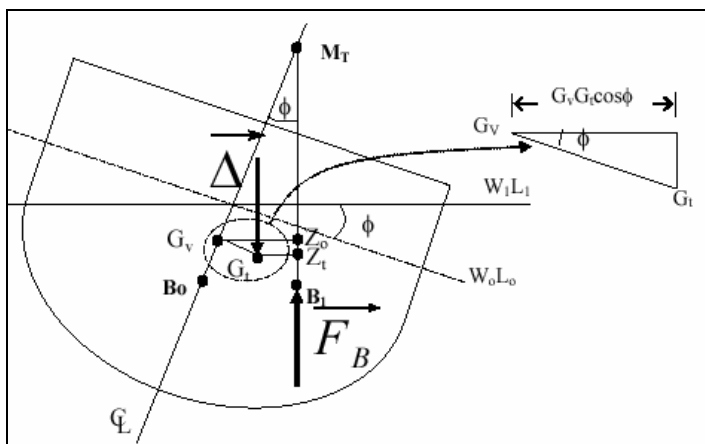
بنابراین مقدار بازوی بازگرداننده $G_v Z_v$ به اندازه $G_0 G_v \cdot \sin \phi$ از بازوی بازگرداننده اولیه کوچکتر می‌باشد لذا به این اصلاح بازوی بازگرداننده، «اصلاح سینوسی» گویند که در نمودار شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲: نمایش اثر اصلاح سینوسی بر منحنی GZ

اصلاح کسینوسی منحنی GZ

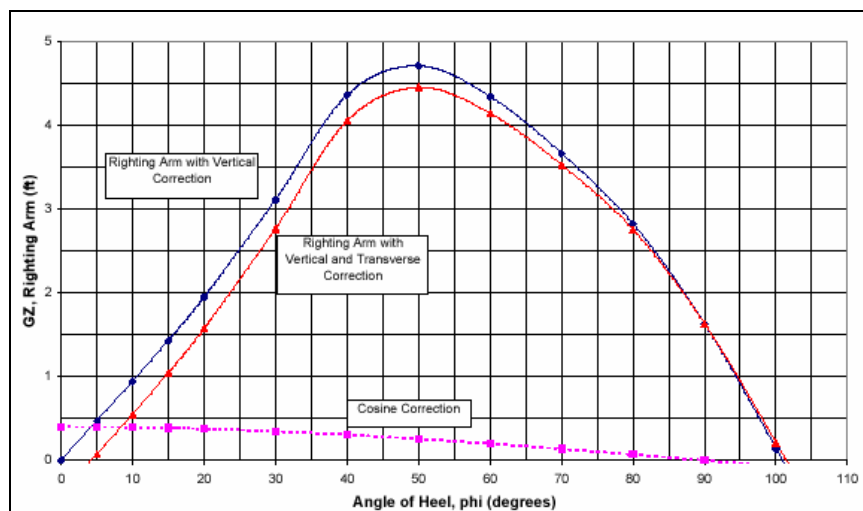
جابجایی عرضی بارهای داخلی کشتی باعث جابجایی عرضی مرکز ثقل می‌شود. مطابق شکل ۳ مقدار بازوی بازگرداننده اولیه برابر $G_0 Z_0$ می‌باشد. جابجایی عرضی بارهای داخلی، مرکز ثقل را به G_v منتقل می‌کند لذا مطابق شکل مقدار بازوی بازگرداننده ثانویه عبارتست از:



شکل ۳: نمایش اصلاح کسینوسی GZ بر اثر جابجایی افقی مرکز ثقل

$$G_t Z_t = G_v Z_0 - G_v G_t \cdot \cos \varphi$$

ملاحظه می‌گردد که بازوی بازگرداننده ثانویه به اندازه $G_v G_t \cdot \cos \varphi$ از بازوی بازگرداننده اولیه کوچکتر می‌باشد. به این تغییر منحنی «اصلاح کسینوسی» بازوی بازگرداننده گویند که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۴: نمایش اصلاح کسینوسی بر منحنی GZ

مثال: در شناور مدل ۱ در سناریوی اصلی باری به وزن ۳۰ تن جابجا می‌شود. در دو حالت زیر مقادیر اصلاح شده منحنی GZ را بدست آورید:

الف- جابجایی وزنه به صورت عرضی از خط وسط به اندازه ۵ متر

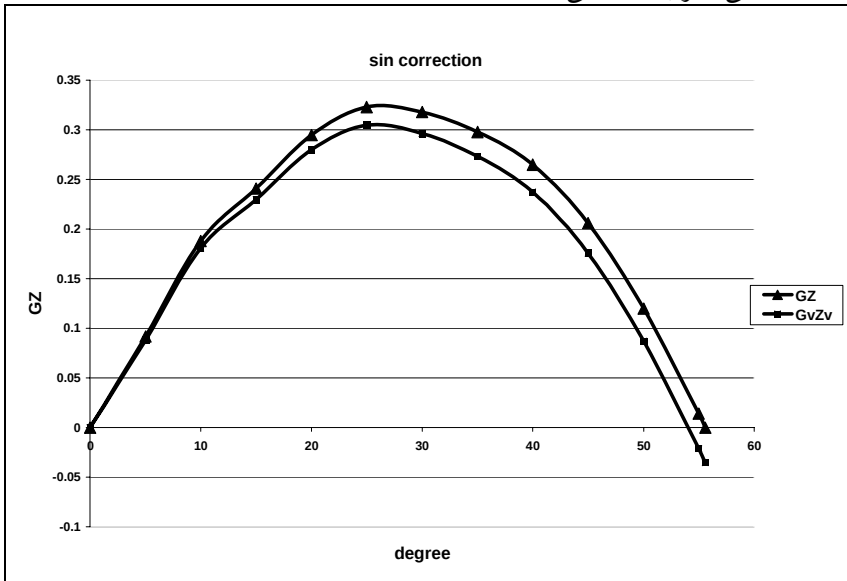
ب- جابجایی وزنه به صورت عمودی از کف انبار به روی عرشه به اندازه ۶ متر

حل: یکی از روشهای محاسبه GZ در صورت تغییر مرکز ثقل، استفاده از روش اصلاح سینوسی و اصلاح کسینوسی می‌باشد و با تغییر دادن مقادیر GZ از حالت مبنا محاسبه می‌شود. در دو حالت فوق داریم:

الف- جابجایی افقی مرکز ثقل (اصلاح کسینوسی)

$$G_0 G_t = \frac{w.d}{W} = \frac{30 \times 5}{3500} = 0.043 \quad m = 4.3 \text{ cm}$$

حال با کم کردن مقدار $G_0 G_t \cdot \cos \varphi$ در هر زاویه از مقادیر GZ در زوایای مختلف، منحنی زیر بدست می‌آید:

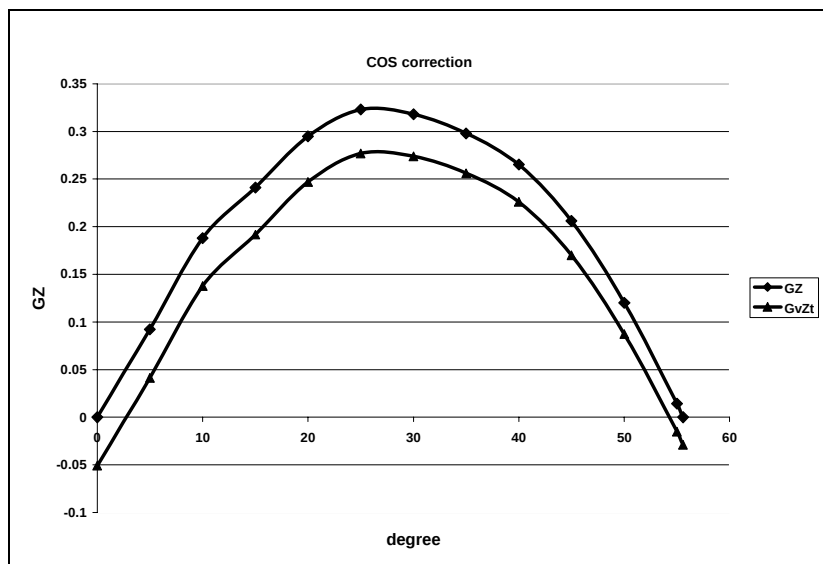


شکل ۵: اثر اصلاح کسینوسی GZ در شناور مدل ۱

ب- جابجایی عمودی مرکز ثقل (اصلاح سینوسی)

$$G_0 G_v = \frac{w.d}{W} = \frac{30 \times 6}{3500} = 0.051 \text{ m} = 5.1 \text{ cm}$$

هم‌اکنون با کم کردن مقدار $G_0 G_v \cdot \cos \varphi$ در هر زاویه از منحنی GZ در زوایای مختلف، منحنی زیر بدست می‌آید:



شکل ۶: اثر اصلاح سینوسی GZ در شناور مدل ۲

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: لندینگ کرافت



شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

جابجایی: ۱۳۰۰ تن

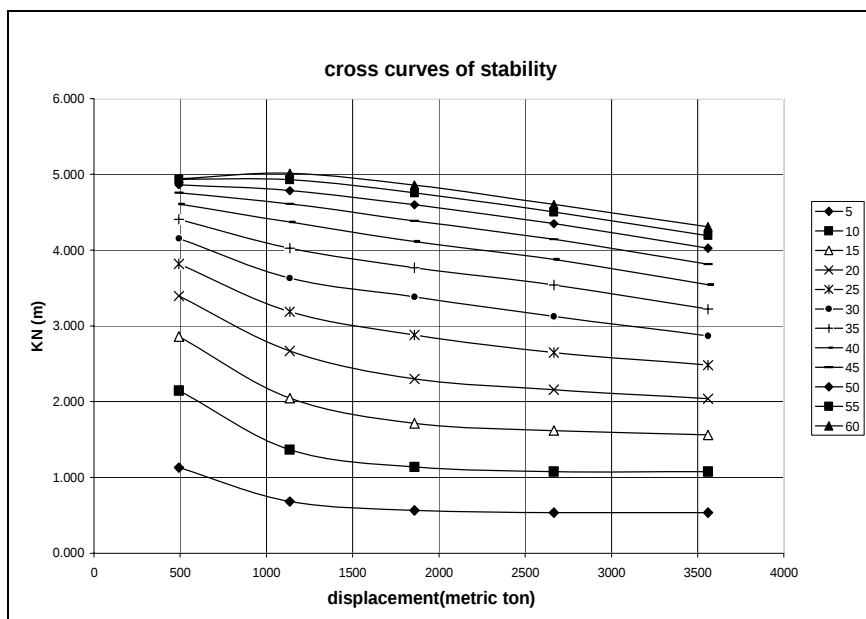
طول: ۶۰ متر

عرض: ۱۱ متر

ارتفاع: ۳/۴ متر

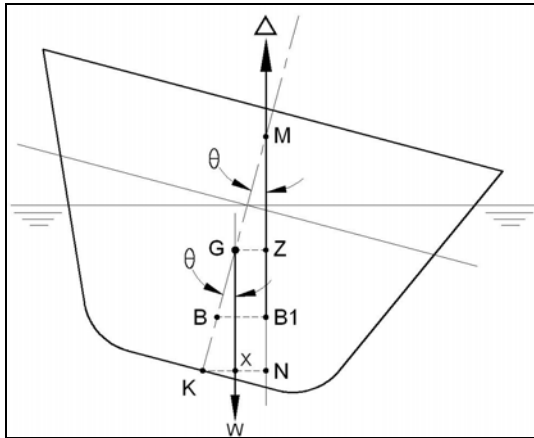
بخش ۲-۱۶: منحنی مقاطع عرضی پایداری

کاربرد اصلی منحنی مقاطع عرضی^۲، بدست آوردن منحنی GZ در حالات مختلف مرکز ثقل و تناژهای مختلف است. می‌دانیم که منحنی GZ برای یک تناژ و مرکز ثقل خاص بدست می‌آید و در حالات مختلف بارگیری شناور، هم مرکز ثقل و هم مرکز جابجایی تغییر می‌کند. از طرفی برای کلیه این حالات نمی‌توان منحنی GZ را ترسیم کرد لذا منحنی مقاطع عرضی کمک می‌کند که در هر حالت دلخواه بتوان مقادیر GZ را استخراج کرد. منحنی مقاطع عرضی برای شناور مدل ۱ به شکل زیر می‌باشد. جابجایی این شناور از ۵۰۰ تا ۳۵۰۰ تغییر می‌کند.



شکل ۱: منحنی مقاطع عرضی شناور مدل ۱

محور عمودی مقدار KN و محور افقی تناژهای مختلف یک شناور می باشد. مقدار KN و نحوه به دست آوردن GZ از آن به کمک شکل ۲ بیان می شود.



شکل ۲: محاسبه GZ از KN

$$GZ = KN - KX$$

$$KX = KG \cdot \sin \theta$$

$$GZ = KN - KG \cdot \sin\theta$$

بنابراین مزایای زیر را می‌توان از منحنی مقاطع عرضی برای به دست آوردن GZ برشمرد:

۱- استقلال از مرکز ثقل

۲- قابل کاربرد در تناژهای مختلف بارگیری شناور

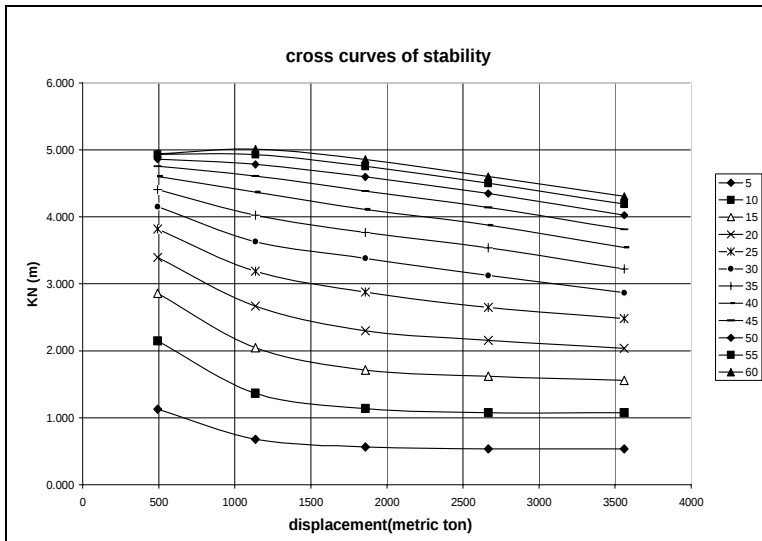
۳- قابل کاربرد در زوایای بزرگ غلتش

مثال- منحنی مقاطع عرضی شناور مدل ۱ ارائه می گردد.

حل: جداول و منحنی های مقاطع عرضی پایداری برای شناور مدل ۱ به صورت زیر می باشد.

Displ (MT)	5	10	15	20	25	30
493	1.131	2.144	2.860	3.395	3.819	4.152
1135	0.679	1.365	2.047	2.666	3.185	3.629
1858	0.566	1.137	1.712	2.297	2.881	3.383
2665	0.535	1.075	1.617	2.156	2.646	3.124
3560	0.536	1.075	1.562	2.039	2.480	2.868
Displ (MT)	35	40	45	50	55	60
493	4.408	4.604	4.755	4.863	4.935	4.941
1135	4.025	4.367	4.609	4.785	4.929	5.012
1858	3.768	4.110	4.386	4.598	4.755	4.861
2665	3.538	3.875	4.143	4.351	4.502	4.602
3560	3.220	3.544	3.812	4.027	4.191	4.309

جدول ۱: مقادیر KN مربوط به شناور مدل ۱



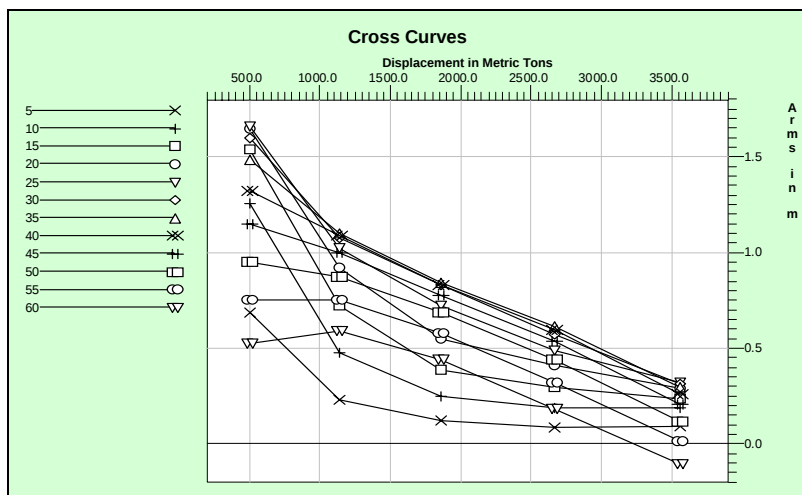
تکرار شکل ۱: منحنی مقاطع عرضی شناور مدل ۱

اگر بخواهیم مثلاً برای یک KG ثابت و برای تناژهای مختلف مقادیر GZ را محاسبه کنیم از رابطه $GZ = KN - KG \times \sin \theta$ استفاده می‌کنیم. مثلاً برای شناور مدل ۱ مقادیر GZ در KG=5.1 m و در تناژهای مختلف برابر است با:

Righting Arms(GZ) for VCG = 5.10

Displ (MT)	5.000s	10.000s	15.000s	20.000s	25.000s	30.000s
493	0.687s	1.257s	1.539s	1.651s	1.662s	1.602s
1135	0.235s	0.478s	0.726s	0.922s	1.028s	1.079s
1858	0.122s	0.250s	0.391s	0.553s	0.724s	0.833s
2665	0.091s	0.188s	0.296s	0.412s	0.489s	0.574s
3560	0.092s	0.188s	0.241s	0.295s	0.323s	0.318s
Displ (MT)	35.000s	40.000s	45.000s	50.000s	55.000s	60.000s
493	1.486s	1.325s	1.149s	0.956s	0.758s	0.524s
1135	1.103s	1.088s	1.003s	0.878s	0.752s	0.595s
1858	0.846s	0.831s	0.780s	0.691s	0.578s	0.444s
2665	0.616s	0.596s	0.537s	0.444s	0.325s	0.185s
3560	0.298s	0.265s	0.206s	0.120s	0.014s	-0.107s

جدول ۲: مقادیر GZ بدست آمده از مقادیر KN جدول ۱ در KG = 5.1 m



شکل ۳: مقادیر GZ در تناژهای مختلف شناور مدل ۱ با KG = 5.1 m

مثال) مقادیر GZ را در آب‌خور ۵ متر و $KG=5.1m$ با استفاده از منحنی مقاطع عرضی شناور مدل ۱ محاسبه کنید.

حل: سطر آخر از جدول فوق مربوط به جابجایی در آب‌خور ۵ متر (جابجایی تقریبی ۳۵۰۰ تن) است که مقادیر GZ را برای $KG = 5.1 m$ بطور مستقیم ارائه کرده و جدول ماقبل آن نیز مقادیر KN را ارائه کرده بود. نحوه محاسبه GZ از KN در جدول زیر برای آب‌خور ۵ متر و $KG=5.1m$ ارائه شده است:

degree	KN	sin	KG.sin	$GZ=KN-KG.\sin$
5	0.536	0.087	0.4437	0.0923
10	1.075	0.174	0.8874	0.1876
15	1.562	0.259	1.3209	0.2411
20	2.039	0.342	1.7442	0.2948
25	2.48	0.423	2.1573	0.3227
30	2.868	0.5	2.55	0.318
35	3.22	0.573	2.9223	0.2977
40	3.544	0.643	3.2793	0.2647
45	3.812	0.707	3.6057	0.2063
50	4.027	0.766	3.9066	0.1204
55	4.191	0.819	4.1769	0.0141
60	4.309	0.866	4.4166	-0.1076

جدول ۳: مقادیر KN و GZ شناور مدل ۱ در آب‌خور ۵ متر و $KG = 5.1 m$

بخش ۲-۱۷: محاسبه GZ در شناورهای بدنه دیواره‌ای

مقدار GZ را در شناورهای بدنه دیواره‌ای^۲، در زوایای غلتش کوچک می‌توان با روابط ریاضی محاسبه کرد. شناورهای بدنه دیواره‌ای نظیر بارجاها هستند که دیواره‌های آن دارای شیب نمی‌باشد. همچنین می‌توان شناورهای تجاری بزرگ مانند نفتکش‌ها و کانتینربرها که قسمت اعظم بدنه آنها به شکل مکعبی است و فقط در سینه و پاشنه دارای انحناء هستند را جزء شناورهای بدنه دیواره‌ای به حساب آورد.

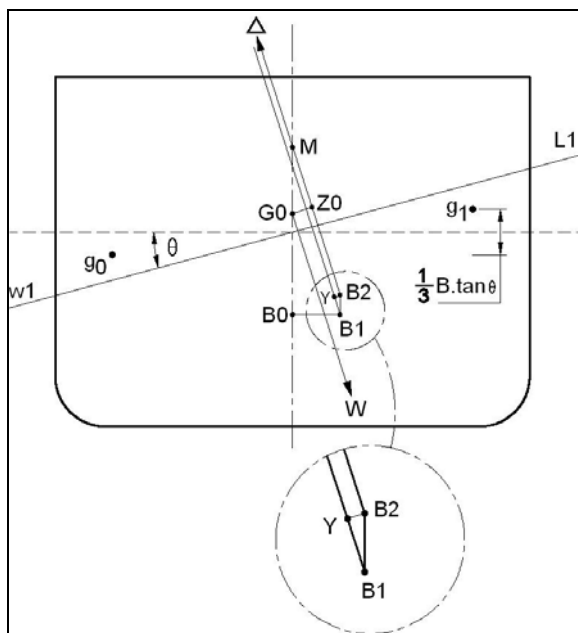
روابط ارائه شده برای قسمت ابتدایی منحنی GZ یعنی زوایای غلتش کوچک مصداق دارد که در آن زوایا، آبخورها در محل خط مرکزی^۳ یکدیگر را قطع می‌کنند.

می‌دانیم که در زوایای غلتش بزرگ مقاطع آبخورها از خط مرکزی جابجا می‌شوند و دیگر نمی‌توان از روابط ساده مثلث‌های انتقالی قائم‌الزاویه برای اثبات روابط پایداری، استفاده کرد. مطابق شکل ۱ شناوری به عرض B و طول L را در نظر بگیرید که تا زاویه کوچک θ غلتش نموده است. مرکز بویانسی از B_0 به B_1 در جهت افقی و از B_1 به B_2 در جهت عمودی تغییر مکان یافته است. علت این تغییر مکان افقی و عمودی، جابجایی مثلث‌های (گوه‌های) شناوری w_0w_1o و L_0L_1o به حجم v هستند که مراکز آنها هم به صورت افقی (عرضی) و هم به صورت عمودی جابجا شده‌اند و باعث جابجایی مراکز بویانسی شده‌اند.

در شکل دیده می‌شود که:

$$GZ = GX + XZ \quad (1)$$

۱- منابع: [12] , [14]



شکل ۱: جابجایی مثلث‌های شناوری در حالت غلتش عرضی

که عبارت ناشی از انتقال افقی مرکز شناوری از B_0 به B_1 و عبارت XZ ناشی از انتقال عمودی آن از B_1 به B_2 می‌باشد که داریم:

$$B_0 B_1 = \frac{v \times (g_0 g_1)_H}{\nabla} \quad (2)$$

که $(g_0 g_1)_H$ مؤلفه افقی جابجایی $g_0 g_1$ می‌باشد.

از شکل ۱ داریم:

$$v \times g_0 g_1 = \int_0^L \underbrace{\frac{1}{2} \times \frac{B}{2} \times \tan \theta \times B \times dl}_{\text{حجم گوه‌های بویانسی}} \times \underbrace{\frac{2}{3} \times B \times 2}_{\text{جابجایی مراکز حجم گوه‌ها}} =$$

$$= \tan \theta \int_0^L \frac{B^3 \times dl}{12} = I \times \tan \theta \quad (3)$$

با جاگذاری رابطه ۳ در رابطه ۲ داریم:

$$B_0 B_1 = \frac{I}{V} \cdot \tan \theta$$

از آنجا که $B_0 M = \frac{I}{V}$ داریم:

$$B_0 B_1 = B_0 M \cdot \tan \theta$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که خط عمودی گذرنده از B_1 خط مرکزی را در M قطع می‌کند و با نوشتن رابطه مثلث قائم الزاویه داریم:

$$GX = GM_0 \cdot \sin \theta$$

از انتقال عمودی مرکز شناوری داریم:

$$B_1 B_2 = \frac{v \times (g_0 g_1)_v}{V} \quad (۴)$$

$$v \times (g_0 g_1)_v = \int_b \frac{B^2}{g} \cdot \tan \theta \times dl \times \underbrace{\frac{1}{3} \times \frac{B}{2} \tan \theta \times 2}_{\text{جابجایی عمودی مراکز گوه‌ها}}$$

جابجایی عمودی مراکز گوه‌ها

$$= \frac{\tan^2 \theta}{2} \int_b \frac{B^3 \times dl}{12} = \frac{\tan^2 \theta}{2} \times I \quad (۵)$$

با جاگذاری رابطه (۵) در رابطه (۴) داریم:

$$B_1 B_2 = \frac{1}{2} \times \frac{I}{V} \times \tan^2 \theta$$

$$B_1 B_2 = \frac{1}{2} \cdot B_0 M \times \tan^2 \theta$$

از شکل ۱ می‌توان ملاحظه کرد که:

$$B_2 Y = XZ = B_1 B_2 \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} B_0 M \cdot \tan^2 \theta \cdot \sin \theta$$

- با جاگذاری روابط GX و XZ در رابطه ۱ داریم:

$$GZ = GX + XZ = GM_0 \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} B_0 M \cdot \tan^2 \theta \cdot \sin \theta$$

$$GZ = \sin \theta \left(GM_0 + \frac{1}{2} B_0 M \cdot \tan^2 \theta \right)$$

این رابطه را می‌توان برای شناورهای بدنه دیواره‌ای تا زاویه خرسی عرشه بکار برد. اگر زاویه غلتش بسیار کوچک باشد $\tan^2 \theta = 0$ فرض می‌شود و می‌توان نوشت:

$$GZ = GM_0 \cdot \sin \theta$$

مثال: مقادیر GZ را در آب‌خور ۵ متر برای شناور مدل ۲ تا زاویه خرسی عرشه محاسبه کنید.

حل: مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- زاویه خرسی عرشه برای شناور مدل ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h = 1 \text{ m} \text{ ارتفاع فری برد}$$

$$b = 6.8 \text{ m} \text{ نیم عرض}$$

$$\tan \theta = \frac{h}{b} = \frac{1}{6.8} = 0.147$$

$$\theta = 8.4^\circ$$

۲- محاسبه BM و GM :

$$d = 5 \text{ m} \text{ آب‌خور}$$

$$KB = \frac{d}{2} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ m}$$

$$BM = \frac{I}{V} = \frac{\frac{1}{12} LB^3}{LBd} = \frac{B^2}{12d} = \frac{(13.6)^2}{12 \times 5} = 3.1 \text{ m}$$

$$KM = KB + BM = 2.5 + 3.1 = 5.6 \text{ m}$$

از قبل دانستیم $KG = 4.5 \text{ m}$

$$GM = KM - KG = 5.6 - 4.5 = 1.1 \text{ m}$$

۳- تشکیل جدول

degree	tan	$GM + \frac{1}{2}BM \times \tan^2\theta$	$\sin\theta$	GZ
0	0	1.100	0	0.000
2	0.035	1.102	0.035	0.039
4	0.67	1.796	0.069	0.124
6	0.105	1.117	0.104	0.116
8	0.14	1.130	0.139	0.157
8.4	0.147	1.133	0.146	0.165

بخش ۲-۱۸: محاسبه زاویه ل در شناور بدنه دیواره‌ای

* تعریف زاویه ل

اگر شناور دارای ارتفاع متاستری اولیه منفی باشد تا زاویه‌ای به نام «زاویه ل» کج خواهد شد تا جاییکه مرکز بویانسی جابجا شده و امتداد نیروهای وزن و بویانسی در یک راستا قرار گیرند و در این حالت نقطه پرومتاستر بر روی مرکز ثقل قرار گرفته است. در حالیکه قبل از کج شدن، نقطه متاستر در زیر مرکز ثقل قرار گرفته بود و تعادل ناپایدار داشتیم. در واقع زاویه ل ناشی از ناپایداری شناور است که می‌تواند ناشی از قرار گرفتن بارهای سنگین در نقاط مرتفع کشتی باشد به گونه‌ای که باعث بالا آمدن مرکز ثقل تا بالای متاستر شده و ارتفاع متاستری اولیه منفی ایجاد کرده است (توجه شود که قرار گرفتن این بارها منطبق بر خط مرکزی انجام و باعث ایجاد زاویه ل شده است. بارگذاری نامتقارن روی کشتی در واقع باعث ایجاد زاویه‌ای می‌شود که بدان زاویه «لیست» گویند). بنابراین منفی بودن GM_0 لزوماً به معنای واژگون شدن شناور نیست بلکه شناور تنها در صورتی واژگون می‌شود که قدرمطلق مقدار GM اولیه منفی، مقدار بزرگی باشد. اگر قدرمطلق GM_0 عدد کوچکی باشد، شناور از حالت ناپایدار اولیه در زاویه ل به حالت تعادل می‌رسد و واژگون نمی‌شود.

* محاسبه زاویه ل برای یک شناور بدنه دیواره‌ای^۱

با توجه به شکل ۱ در حالت اولیه M_0 در زیر G_0 قرار دارد و تعادل ناپایدار داریم.

$\sin \theta = 0$ یعنی شناور بدون غلتش باشد. حالت دیگر صفر بودن GZ عبارتست از:

$$GM_0 + \frac{1}{2} B_0 M \times \tan^2 \theta = 0$$

$$\tan^2 \theta = \frac{-2 \times GM_0}{B_0 M}$$

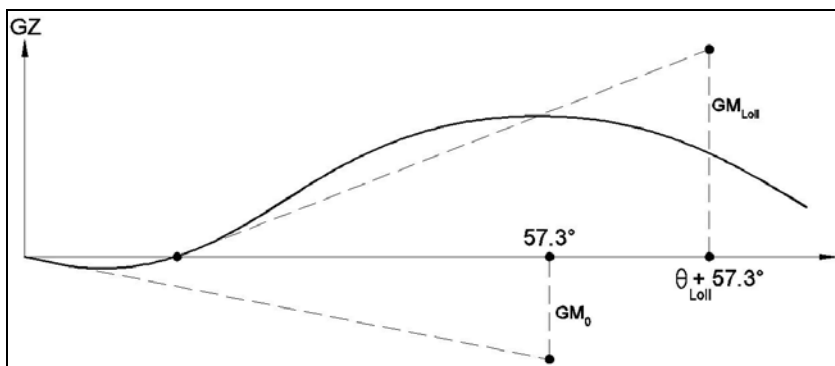
$$\tan \theta = \sqrt{\frac{-2 \times GM_0}{B_0 M}}$$

توجه شود که این رابطه فقط برای شناورهای بدنه دیواره‌ای بدست آمده و اگر زاویه θ بزرگتر از زاویه ورود لبه دک به آب باشد، فرمول فوق اعتبار ندارد.

ملاحظه می‌شود که شناور در حالت اولیه دارای ارتفاع متاستر منفی (M زیر G) است و در زاویه θ دارای ارتفاع متاستر مثبت (M بالای G) است.

این مطلب را می‌توان با استفاده از نمودار $GZ - \phi$ این شناور به صورت شکل ۲ نمایش داد.

همانطور که می‌دانیم مقدار GM از تقاطع شیب نمودار GZ با خط عمود از زاویه $57/3^\circ$ بدست می‌آید. ارتفاع متاستری اولیه از زاویه $57/3^\circ$ درجه و همچنین مقدار GM_{Loll} در زاویه $\theta_{Loll} + 57/3^\circ$ بدست می‌آید.



شکل ۲: نمایش ارتفاع متاستری اولیه و ارتفاع متاستری در حالت θ با استفاده از منحنی GZ .

در مبدأ مختصات که $GZ = 0$ است ارتفاع متاستر منفی و برابر GM_0 می باشد. در زاویه θ_{Loll} نیز $GZ = 0$ می باشد ولی ارتفاع متاستری مثبت است. مقدار ارتفاع متاستر در زاویه θ_{Loll} به صورت زیر به دست می آید (برای یک شناور بدنه دیواره ای):

$$GZ = (GM_0 + \frac{1}{2}BM_0 \times \tan^2 \theta) \cdot \sin \theta$$

$$; \theta \left(GM_0 + \frac{1}{2}BM_0 \cdot \tan^2 \theta_L \right) + BM_0 \cdot \sin \theta_L \cdot \tan \theta_L \cdot \sec^2 \theta_L$$

$$M_{Loll} = \cos \theta \left(GM_0 + \frac{1}{2}BM_0 \left(\frac{-2 \cdot GM_0}{BM_0} \right) \right) + BM_0 \left(\frac{-2GM_0}{BM_0} \right) \sec \theta_L$$

$$GM_{Loll} = 0 - 2GM_0 \sec \theta_L$$

$$GM_{Loll} = -2GM_0 \cdot \sec \theta_L$$

توجه شود که مقدار GM_{Loll} باید مثبت باشد چون GM_0 منفی و $\sec \theta_L$ مثبت است و با وجود عدد منفی ۲- در نهایت، مقدار GM_{Loll} مثبت خواهد شد.

مثال) در شناور مدل ۲ در آب خور ۵ متر، بر اثر یک بارگیری $KG=5.7 \text{ m}$ می شود. وضعیت پایداری و احتمال غرق شدن شناور را بررسی کنید.

حل: از مشخصات شناور مدل ۲ در آب خور ۵ متر می دانیم که:

$$KB = 2.5 \text{ m}$$

$$BM_0 = 3.1 \text{ m}$$

$$KM_0 = 5.6 \text{ m}$$

از آنجا که $KG=5.7 \text{ m}$ داریم:

$$GM_0 = KM - KG = 5.6 - 5.7 = -0.1 \text{ m}$$

از آنجا که ارتفاع متاستری اولیه شناور منفی است لذا شناور در یک زاویه θ_{Loll} قرار می گیرد. اگر این زاویه بزرگتر از زاویه خرسی عرشه باشد، احتمال غرق شدن شناور

بسیار زیاد است. لذا مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- محاسبه زاویه θ ۲- محاسبه زاویه خیزی عرشه ۳- محاسبه ارتفاع متاستری در حالت θ

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{-2 \times GM_0}{B_0 M}} = \sqrt{\frac{-2 \times (-0.1)}{3.1}} = 0.254$$

۱- محاسبه زاویه θ :

۲- محاسبه زاویه خیزی عرشه:

$$\theta_{\text{loil}} = 14.25^\circ$$

$$\frac{B}{2} = \frac{13.6}{2} = 6.8 \text{ m}$$

$D = 6 \text{ m}$ عمق بدنه

$d = 5 \text{ m}$ آب‌خور

$f = 6 - 5 = 1 \text{ m}$ فری برد

$$\tan \theta = \frac{f}{\frac{B}{2}} = \frac{1}{6.8} = 0.147$$

$\theta_s = 8.36^\circ$ زاویه خیزی عرشه

ملاحظه می‌شود که زاویه θ خیلی بیشتر از زاویه خیزی عرشه می‌باشد و لذا اگر آب وارد یکی از منافذ روی عرشه شود، شناور به احتمال زیاد غرق خواهد شد. قطعی بودن آن منوط به تقسیم‌بندی فضای داخلی بارج می‌باشد.

۳- ارتفاع متاستری در حالت θ

$$GM_{\text{Loll}} = -2GM_0 \cdot \sec \theta = -2 \times (-0.1) \times \sec(14.25) = 0.2 \text{ m}$$

یعنی شناور پس از رسیدن به زاویه θ دارای ارتفاع متاستری ۰/۲ متر است.

اگر آب بدلیل خیزی عرشه وارد بدنه گردد، این ارتفاع متاستری نمی‌تواند مانع از غرق شدن شناور شود.

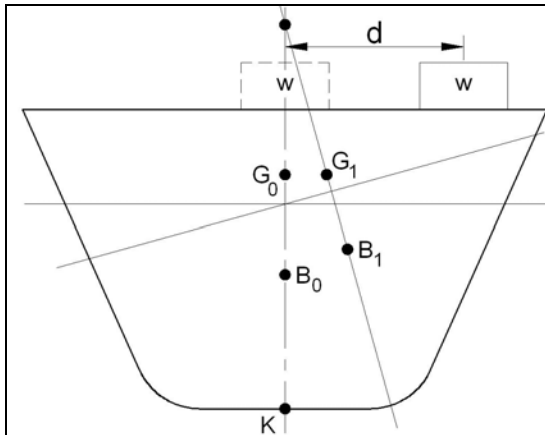
بخش ۲-۱۹: محاسبه زاویه لیست در شناور

* نحوه محاسبه زاویه لیست

همانطور که بیان شد، زاویه لیست ناشی از جابجایی عرضی بارهای داخل شناور یا بارگذاری عرضی نامتقارن می‌باشد.

فرض کنید جسمی به وزن w از خط مرکزی به سمت راست شناور منتقل شود. در این صورت مرکز ثقل از G به G_1 منتقل می‌شود.

در این حالت دیگر مرکز ثقل و بویانسی در یک امتداد، در راستای قائم نیستند لذا شناور به اندازه زاویه θ کج می‌شود تا امتداد نیروی وزن و بویانسی، در یک راستا قرار گیرند. (توجه شود که در صورت غلتیدن کشتی به زاویه θ ، راستای G_1 و B_1 همچنان عمود بر سطح و در راستای قائم هستند).



شکل ۳

$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$

جابجایی مرکز ثقل برابر است با:

w : وزن بار

W: وزن کل شناور

d: فاصله جابجایی بار w

$$\tan \theta = \frac{GG_1}{GM} \quad \theta: \text{زاویه لیست}$$

$$\tan \theta = \frac{GG_1}{GM} = \frac{w.d}{W.GM}$$

مثال) در شناور مدل ۱ باری به وزن ۵۰ تن به فاصله ۵ متر از خط مرکزی شناور قرار گرفته است. زاویه لیست ناشی از این بار را محاسبه کنید.

حل: در سناریوی وزنی اصلی مدل ۱ داریم:

$$GM=1 \text{ m} \quad W=3500 \text{ t}$$

و همچنین داریم:

$$w=50 \text{ t} \quad d=5 \text{ m}$$

$$\tan \theta = \frac{w.d}{W.GM} = \frac{50 * 5}{3500 * 1} = 0.071$$

$$\theta = 4^\circ$$

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: صیادی



شرکت سازنده: شرکت صدرا

طول: ۴۶ متر

عرض: ۱۰ متر

ارتفاع: ۵ متر

بخش ۲-۲: پایداری دینامیکی شناور

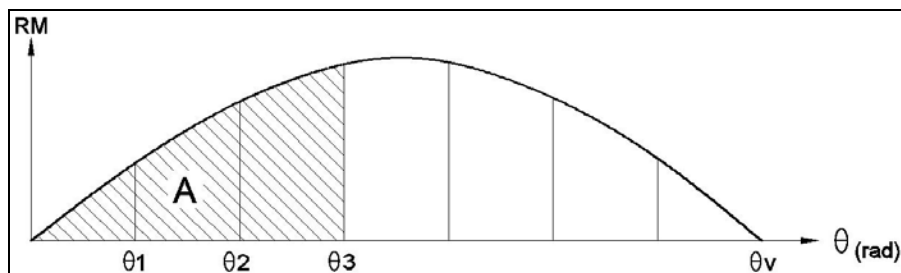
* مفهوم پایداری دینامیکی^۲

پایداری دینامیکی عبارتست از انرژی بازگرداننده^۳ شناور که معادل با سطح زیر نمودار ممان بازگرداننده (RM) می‌باشد.

$$RM = GZ \cdot \Delta$$

ممان بازگرداننده برابر است با:

مطابق شکل ۱، محور عمودی نمودار RM بوده و واحد آن تن در متر (t.m) است. محور افقی نمودار برحسب زاویه (واحد رادیان) می‌باشد که هر ۱ رادیان معادل ۵۷/۳۲ درجه می‌باشد. مطابق شکل ۱، به عنوان مثال پایداری دینامیکی شناور تا زاویه ۳۰ درجه برابر مساحت A می‌باشد.



شکل ۱: پایداری دینامیکی برابر سطح زیر نمودار RM

اگر از روشهای عددی بخواهیم استفاده کنیم، با اعمال یکی از روشهای عددی بر روی مقادیر RM در هر زاویه می‌توان سطح زیر نمودار را به دست آورد. از آنجا که واحد RM نیرو × جابجایی (t.m) می‌باشد و زاویه نیز بر حسب رادیان بوده و

۱- منابع: [9], [12], [14]

2 - Dynamic stability

3 - Righting Energy

4 - Righting Moment

دیمانسیون ندارد، لذا سطح زیر این نمودار از جنس انرژی (نیرو $\times$ جابجایی) می‌باشد. این انرژی عبارتست از انرژی مقاوم در برابر انرژی هیل دهنده (HM)^۱. به عبارت دیگر شناور می‌تواند تنها مقدار انرژی هیل دهنده‌ای را تحمل کند که بیشتر از انرژی بازگرداننده نباشد در غیر اینصورت شناور از زاویه θ_v نیز عبور کرده و واژگون می‌گردد. انرژی هیل دهنده می‌تواند انرژی باد، موج یا جریانات دریایی باشد.

* قوانین استاندارد در مورد پایداری دینامیکی

بیان داشتیم که پایداری دینامیکی، معادل سطح زیر نمودار RM است و بیانگر قدرت و توانایی شناور در برابر انرژی هیل دهنده وارد بر شناور می‌باشد. لذا پایداری دینامیکی در مبحث پایداری و جلوگیری از واژگون شدن شناور نقش محوری و اساسی دارد که توسط سازمان IMO و مؤسسات استاندارد بر آن تأکید شده است. این قوانین همانطور که قبلاً نیز بیان شده، عبارتست از:

- ۱- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۰۵۵ متر - رادیان نباشد.
 - ۲- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۴۰ درجه (یا زاویه‌ای که یکی از منافذ غیر آب-بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۹ متر - رادیان نباشد.
 - ۳- سطح زیر نمودار GZ در زوایای بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا زاویه‌ای که یکی از منافذ غیر آب‌بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۳ متر - رادیان نباشد.
- می‌دانیم که $RM = GZ \cdot \Delta$ لذا از حاصلضرب سطح زیر نمودار GZ در تناژ شناور، مقدار پایداری دینامیکی در هر زاویه به دست می‌آید. اگر برای یک شناور، این مؤلفه‌های استاندارد برآورده نشود می‌توان با تغییر چیدمانی و محدود کردن سناریوی بارگیری ارتفاع KG را کاهش داد و به مؤلفه‌های استاندارد رسید.

* تشریح پایداری دینامیکی و زوایای تعادل به کمک سیستم وزنه و فنر

مطابق شکل ۲ پایداری دینامیکی را می‌توان با سیستم جرم و فنر شبیه سازی کرد. دو حالت کلی را می‌توان در این قسمت در نظر گرفت:

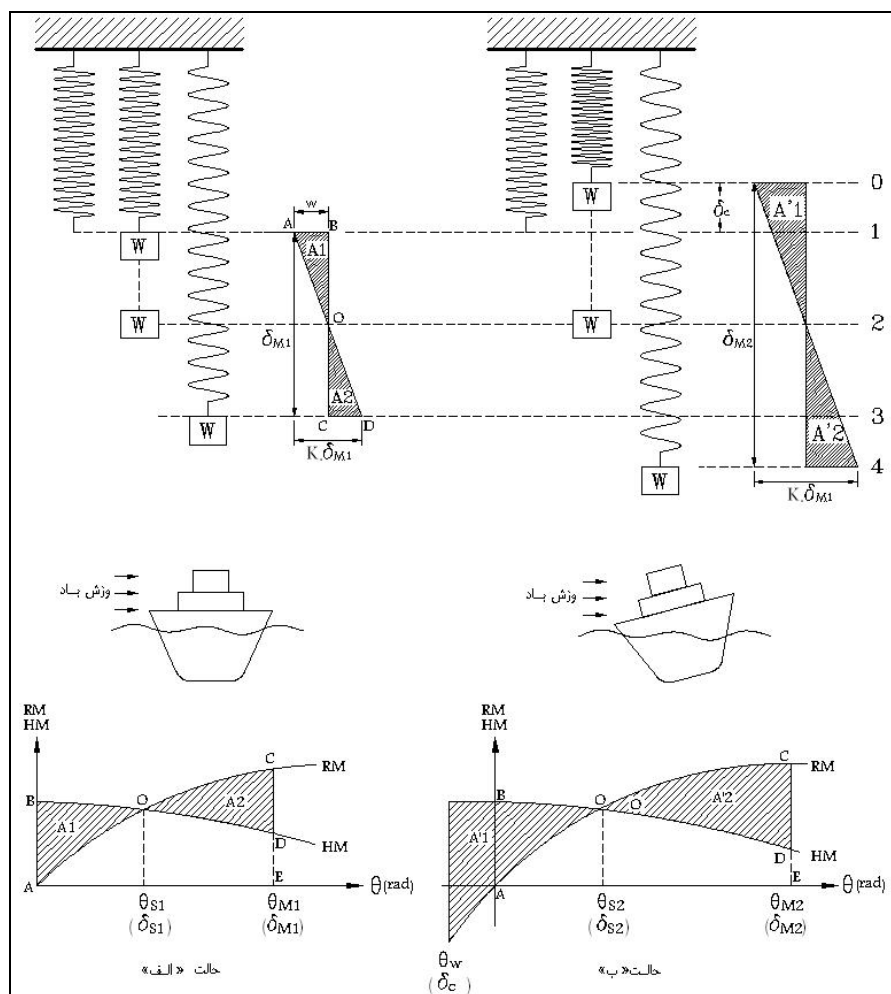
حالت اول: فنر در حالت اولیه در حالت آزاد (بدون فشردگی یا کشیدگی) می‌باشد. جرم M به آن آویخته می‌شود و طول فنر به اندازه δ_{M1} باز می‌شود و پس از چند بار رفت و برگشت در طول δ_{S1} به حالت استاتیکی ثابت می‌ماند. در این حالت اگر ارتفاع ۳، مبنا فرض شود، انرژی پتانسیل $mg\delta_{M1}$ در ارتفاع ۱، تبدیل به انرژی پتانسیل فنر $\frac{1}{2}K\delta_{M1}^2$ در ارتفاع ۳ می‌شود. فنر در حالت نهایی در ارتفاع ۲ به حالت ایستایی و سکون می‌رسد که در این حالت طول فنر به اندازه δ_{S1} باز شده است. در این سیستم دو دسته انرژی وجود دارد: ۱- انرژی بازگرداننده که همان انرژی پتانسیل است که می‌خواهد فنر را به وضعیت تعادل ساکن برساند ۲- انرژی منحرف کننده که همان انرژی پتانسیل جرم افزوده شده می‌باشد که فنر را از حالت تعادل منحرف می‌کند. مطابق شکل، سطح $A1$ برابر انرژی منحرف کننده و سطح $A2$ برابر انرژی بازگرداننده فنر است.

حال شناوری را در نظر بگیرید که در حالت اولیه بدون هیل است. سطح جانبی این شناور در معرض انرژی هیل دهنده باد قرار می‌گیرد. برای این شناور، نمودارهای RM و HM ترسیم شده‌اند. سطح زیر نمودار HM برابر انرژی هیل دهنده باد و سطح زیر نمودار RM برابر انرژی بازگرداننده هیدرواستاتیکی می‌باشد. هنگامی که باد شروع به وزیدن می‌کند شناور تا زاویه θ_{M1} غلتش می‌کند و پس از چند نوسان تا زمانی که وزش باد ادامه دارد، در زاویه θ_{S1} به حالت استاتیکی باقی می‌ماند. زاویه θ_{M1} معادل تغییر طول δ_{M1} فنر و زاویه θ_{S1} معادل تغییر طول δ_{S1} فنر است.

سطح $AODE$ بین سطح زیر هر دو نمودار RM و HM مشترک است بنابراین در سمت چپ نقطه O ، انرژی هیل دهنده بیش از انرژی بازگرداننده است که با مساحت هاشور خورده $A1$ نشان داده می‌شود و در سمت راست نقطه O نیز انرژی بازگرداننده

بیش از انرژی هیل دهنده است که با سطح هاشور خورده A2 نمایش داده می شود. سطح A1 و A2 با هم برابر هستند یعنی در واقع شناور تا زاویه ای غلتش می کند که سطح A2 با سطح A1 برابر شود که این زاویه همان θ_{M1} می باشد. زاویه θ_{S1} نیز محلی است که در آن زاویه، RM و HM با هم برابر هستند یعنی در محل تلاقی دو نمودار (نقطه O). زاویه θ_{M1} از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که در واقع بیشترین زاویه غلتش شناور به هنگام اعمال انرژی هیل دهنده را نشان می دهد که در آن زاویه نباید هیچ یک از منافذ غیر آب بند به زیر آب بروند.

حالت دوم: فنر در حالت اولیه به اندازه طول δ_C فشرده شده است. در این حالت جرم M بدان آویخته و رها می شود. فنر به طول δ_{M2} تغییر طول می دهد و پس از چند بار رفت و برگشت، در ارتفاع ۲ و با تغییر طول δ_{S2} به حالت سکون می رسد. در مقایسه با حالت اول: $\delta_{S1} = \delta_{S2}$ ولی $\delta_{M2} > \delta_{M1}$ چرا که فنر دارای فشردگی اولیه بوده و انرژی اولیه آن برابر $mg(\delta_{m1} + \delta_c) + \frac{1}{2}k\delta_c^2$ می باشد. این انرژی اولیه از حالت قبل بیشتر است لذا فنر به طول بیشتری باز می شود.



شکل ۲: شبیه سازی پایداری دینامیکی با سیستم وزنه و فنر

حال شناوری را با زاویه هیل اولیه (θ_w) در نظر بگیرید که سطح جانبی آن در معرض انرژی هیل دهنده باد قرار می گیرد. با عنایت به توضیحات حالت اول، افزونی انرژی هیل دهنده به انرژی بازگرداننده (در طرف چپ نقطه 0) برابر سطح هاشور خورده A'_1 است و افزونی انرژی بازگرداننده نسبت به انرژی هیل دهنده (در طرف راست نقطه 0) برابر سطح هاشور خورده A'_2 می باشد. همانند حالت اول، برای به

دست آوردن θ_{M2} ، دو سطح A'_1 و A'_2 باید با هم برابر شوند. δ_{S2} نیز همانند θ_{S1} بدست می‌آید که زاویه مربوط به محل تقاطع دو نمودار (محل برابری RM , HM) می‌باشد.

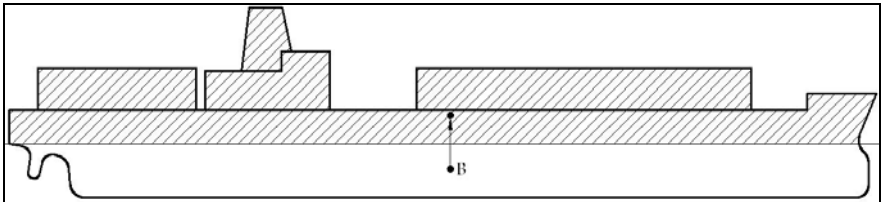
مسلماً در حالت دوم، غلتش شناور شدیدتر است. θ_{M2} معادل δ_{M2} و همچنین θ_{S2} معادل δ_{S1}, δ_{S2} در سیستم جرم و فنر می‌باشد. سطوح هاشور خورده نیز در سیستم جرم و فنر و نمودارهای RM , HM با هم معادل هستند.

* روش حل مسائل پایداری دینامیکی

حل مسائل پایداری دینامیکی شامل مراحل زیر است:

۱- استخراج مقادیر RM که از حاصلضرب مقادیر GZ در هر زاویه در مقدار تناژ به دست می‌آید.

۲- استخراج مقادیر HM که مثلاً اگر انرژی واژگون‌کننده باد مد نظر باشد از حاصلضرب نیروی باد در فاصله مرکز سطح وزش باد تا مرکز بویانسی بدست می‌آید (شکل ۳). متناظر با غلتش شناور، سطح در معرض وزش باد کاهش می‌یابد ولی در مسائل معمولاً این ممان ثابت فرض شده و در نمودار با یک خط افقی نشان داده می‌شود. پس از محاسبه این ممان، مقدار آن در ۱/۵ ضرب می‌شود تا ضریب اطمینان بیشتری حاصل شود.

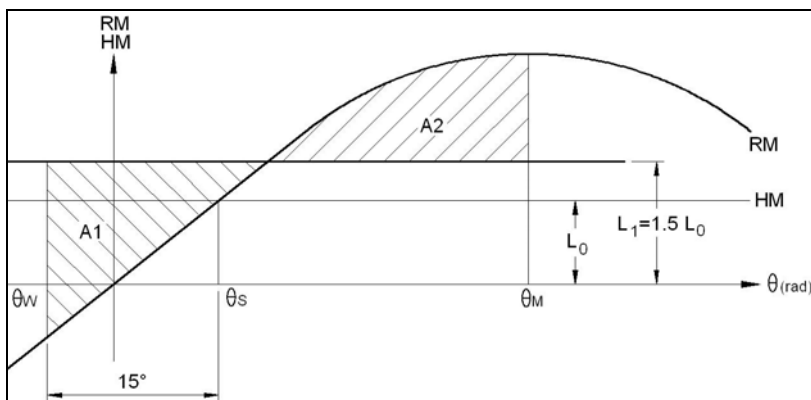


شکل ۳: محاسبه ممان واژگون‌کننده (HM)

۳- تعیین زاویه هیل اولیه

طبق مطالبی که بیان شد، اگر شناور دارای زاویه هیل اولیه باشد، غلتش شدیدتری را دارد لذا در حل مسائل، یک زاویه هیل اولیه (θ_w) در نظر گرفته می‌شود که برابر ۱۵ درجه قبل از حالت تعادل استاتیکی (θ_s) می‌باشد (شکل ۴). البته این زاویه در هر استاندارد طبق روابط خاصی به دست می‌آید. همچنین در حل مسائل، واحد پایداری دینامیکی بر حسب تن - متر (t.m) می‌باشد. اگر واحد بر حسب KN.m داده شده بود می‌توان با فرض $g = 10 \frac{m}{s^2}$ از رابطه زیر برای تبدیل استفاده کرد:

$$1 \text{ ton} - m = 10 \text{ KN} - m$$



شکل ۴: مراحل حل مسائل پایداری دینامیکی جهت محاسبه زوایای θ_M ، θ_s

۴- تعیین زاویه θ_s یعنی محل تقاطع دو نمودار RM , HM

۵- تعیین زاویه θ_w که از زاویه θ_s به اندازه ۱۵ درجه به سمت چپ به دست می‌آید.

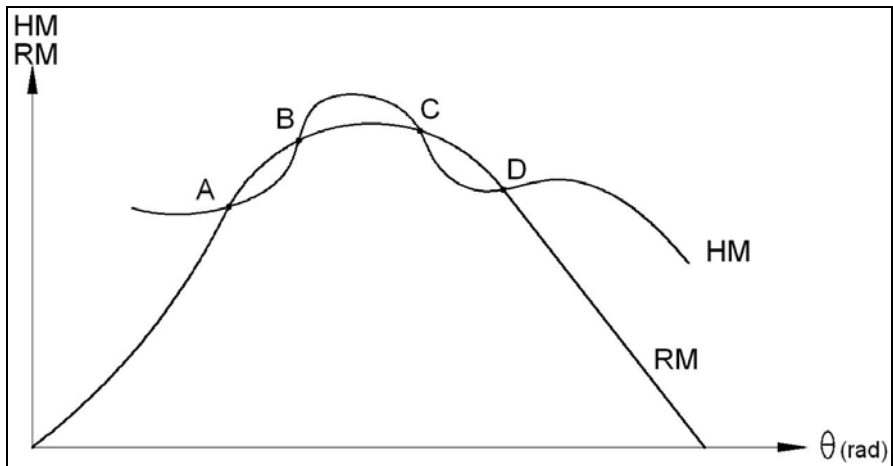
۶- تعیین مساحت A1 (به روش ترسیمی یا حل عددی)

۷- تخمین زاویه θ_M به گونه ای که در آن زاویه سطح A2 برابر سطح A1 شود. باید توجه داشت که تعیین زاویه θ_M مستلزم چند مرحله سعی و خطا می باشد.

اگر حل مسئله طبق استاندارد BV مد نظر باشد، در ضمیمه ۱، روابط خاصی در این رابطه ارائه شده است.

* بررسی حالت پایداری بر اساس منحنی HM و RM

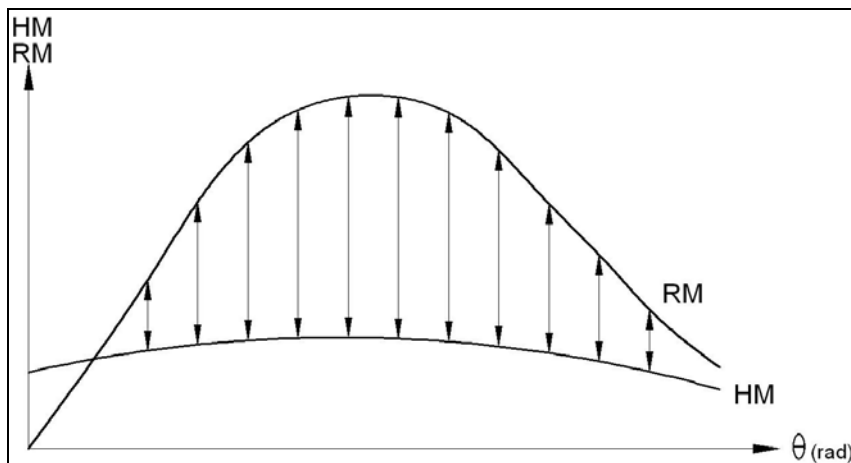
بررسی حالت پایداری یا ناپایداری شناور بر اساس منحنی HM و RM امکان پذیر است. اگر شناور در وضعیتی باشد که با انحراف آن، ممان واژگون کننده از ممان بازگرداننده بزرگتر باشد، شناور ناپایدار و اگر ممان بازگرداننده از ممان هواژگون کننده بیشتر باشد، شناور پایدار است. بنابراین در شکل ۵ اگر ممان هیل دهنده به صورت غیرخطی باشد، در نقاط A و C دارای تعادل پایدار و در نقاط B و D دارای تعادل ناپایدار هستیم.



شکل ۵: بررسی حالت پایداری با استفاده از منحنی های HM و RM

* پایداری باقیمانده^۱

به فاصله بین منحنی ممان بازگرداننده و ممان هیل دهنده، پایداری باقی مانده گفته می‌شود. در شکل ۶ در هر زاویه می‌توان مقادیر پایداری باقیمانده را به صورت خطوط عمودی بین دو منحنی مشاهده کرد.



شکل ۶: پایداری باقیمانده شناور

مثال) کشتی مدل ۱ در آب‌خور ۵ متر شناور است. شناور به صورت عرضی در معرض باد با سرعت ۵۰ گره قرار می‌گیرد. اگر ضریب درگ بدنه در معرض باد برابر ۱/۲ باشد، موارد زیر را محاسبه کنید:

الف- محاسبه ممان بازگرداننده و هیل دهنده

ب- کنترل مولفه‌های استاندارد پایداری دینامیکی

ج- زاویه تعادل استاتیکی

د- زاویه تعادل دینامیکی

سطح بادخور جانبی بدنه برابر ۱۷۰ مترمربع و فاصله مرکز این سطح از خط آبخور برابر ۱/۱۲ متر است.

حل:

الف- محاسبه ممان بازگرداننده و هیل دهنده

$$\text{سرعت باد } V = 50 \text{ knot} = 25 \frac{m}{s}$$

$$C = 1.2 \text{ ضریب درگ}$$

$$A = 170 \text{ m}^2 \text{ مساحت بادخور}$$

با استفاده از منحنی هیدرواستاتیک و داشتن فاصله KB در این آبخور، فاصله مرکز بویانسی (B) از خط آبخور را بدست می‌آوریم:

$$KB = 2.78 \text{ m}$$

$$\text{draft} = 5 \text{ m}$$

$$\text{فاصله } B \text{ از خط آبخور } 5 - 2.78 = 2.22 \text{ m}$$

$$(HA) = 2.22 + 1.12 = 3.34 \text{ m} \text{ فاصله مرکز سطح بادخور از } B$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 1 \times 170 \times (25)^2 = 63750 \text{ N} = 63.75 \text{ t f} \text{ نیروی جانبی باد}$$

برای بدست آوردن ممان هیل دهنده داریم:

$$\cos \theta \times \text{بازو} \times \text{نیروی باد} : \text{ممان هیل دهنده در هر زاویه } (HM)$$

عبارت $\cos \theta$ بدین دلیل است که با غلتیدن شناور، سطح بادخور در $\cos \theta$ ضرب می‌شود لذا خواهیم داشت:

degree	cos	max HA	Force	HM	1.5*HM
-20	0.939	3.34	63.75	199.94	299.90
-15	0.966	3.34	63.75	205.69	308.53
-10	0.985	3.34	63.75	209.73	314.60
-5	0.996	3.34	63.75	212.07	318.11
0	1	3.34	63.75	212.93	319.39
5	0.996	3.34	63.75	212.07	318.11
10	0.985	3.34	63.75	209.73	314.60
15	0.966	3.34	63.75	205.69	308.53
20	0.939	3.34	63.75	199.94	299.90
25	0.906	3.34	63.75	192.91	289.37
30	0.866	3.34	63.75	184.39	276.59
35	0.819	3.34	63.75	174.39	261.58
40	0.766	3.34	63.75	163.10	244.65
45	0.707	3.34	63.75	150.54	225.81
50	0.643	3.34	63.75	136.91	205.37
55	0.573	3.34	63.75	122.01	183.01
60	0.5	3.34	63.75	106.46	159.69

ممان بازگرداننده در هر زاویه نیز از حاصلضرب مقدار GZ در جابجایی بدست می‌آید:

$$RM = GZ \times \text{displacement}$$

لذا خواهیم داشت:

degree	GZ	disp.	RM
-20	-0.295	3500	-1032.5
-15	-0.241	3500	-843.5
-10	-0.188	3500	-658
-5	-0.092	3500	-322
0	0	3500	0
5	0.092	3500	322
10	0.188	3500	658
15	0.241	3500	843.5
20	0.295	3500	1032.5
25	0.323	3500	1130.5
30	0.318	3500	1113
35	0.298	3500	1043
40	0.265	3500	927.5
45	0.206	3500	721
50	0.12	3500	420
55	0.014	3500	49
60	-0.107	3500	-374.5

ب- کنترل مولفه‌های استاندارد پایداری دینامیکی

همانطور که بیان شد، برای بررسی مولفه‌های پایداری باید سطح زیر نمودار تا زوایای ۳۰، ۴۰ و بین ۳۰ و ۴۰ درجه محاسبه گردد و با حداقل مقادیر استاندارد مقایسه گردد.

- پایداری دینامیکی تا زاویه ۳۰ درجه

تابع سطح	سیمسون	RM	degree
0	1	0	0
966	3	322	5
1974	3	658	10
1687	2	843.5	15
3097.5	3	1032.5	20
3391.5	3	1130.5	25
1113	1	1113	30

SUM=

12229

$$\text{dynamic stability} = \frac{3}{8} \times \frac{5}{57.3} \times \text{sum} = 400.164 \quad \text{t} \cdot \text{m}$$

- پایداری دینامیکی تا زاویه ۴۰ درجه

تابع سطح	سیمسون	RM	degree
0	1	0	0
1288	4	322	5
1316	2	658	10
3374	4	843.5	15
2065	2	1032.5	20
4522	4	1130.5	25
2226	2	1113	30
4172	4	1043	35
927.5	1	927.5	40

SUM=

19890.5

$$\text{dynamic stability} = \frac{1}{3} \times \frac{5}{57.3} \times \text{sum} = 578.55 \quad \text{t} \cdot \text{m}$$

قوانین استاندارد پایداری دینامیکی همانطور که قبلاً نیز بیان شده، برای شناور مدل ۱ عبارتست از:

۱- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۰۵۵ متر - رادیان نباشد (مورد تایید است).

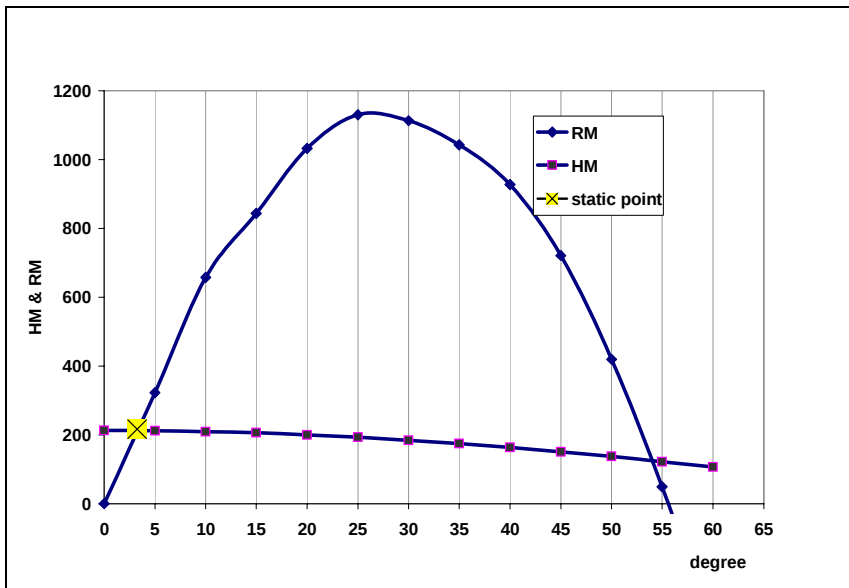
۲- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۴۰ درجه (یا زاویه ای که یکی از منافذ غیر آب بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۹ متر - رادیان نباشد (مورد تایید است).

۳- سطح زیر نمودار GZ در زوایای بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا زاویه ای که یکی از منافذ غیر آب بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۳ متر - رادیان نباشد (مورد تایید است).

* توجه شود که در حل این مسئله فرض شده است که زاویه ورود یکی از منافذ غیر آب‌بند به داخل آب، بیشتر از ۴۰ درجه باشد. همچنین زاویه خیزی عرشه به معنای زاویه ورود آب به داخل بدنه نیست چراکه از لوله‌های زانویی روی عرشه برای افزایش زاویه ورود آب به داخل بدنه استفاده می‌شود.

ج- زاویه تعادل استاتیکی

زاویه تعادل استاتیکی مطابق شکل ۷ عبارتست از زاویه مربوط به محل تقاطع دو نمودار HM و RM که برای شناور مدل ۱ برابر ۳/۲۵ درجه است.



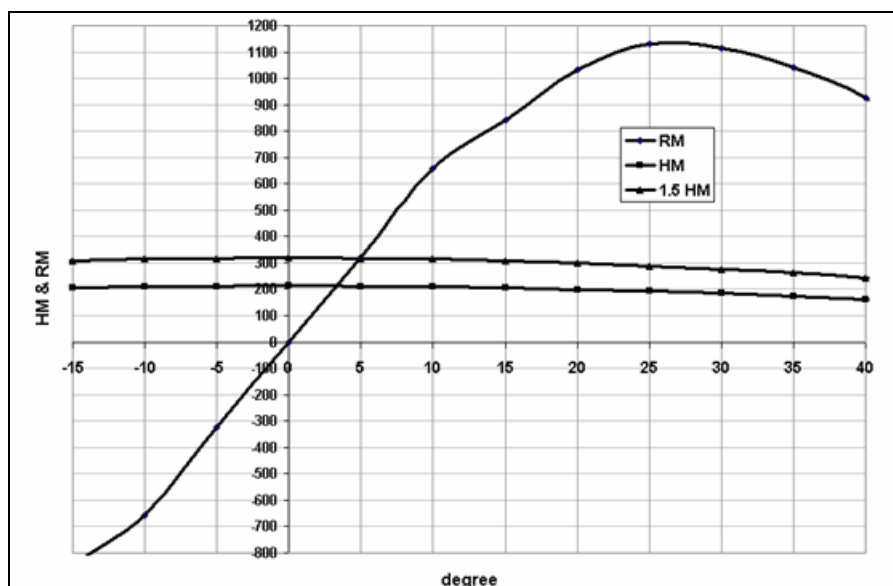
شکل ۷: زاویه تعادل استاتیکی (محل تقاطع دو نمودار).

د- زاویه تعادل دینامیکی

ابتدا مقادیر و نمودار $1.5 \times HM$ را بدست می‌آوریم. محل تقاطع این نمودار با نمودار RM در زاویه ۵ درجه می‌باشد. از این زاویه ۱۵ درجه به سمت چپ حرکت می‌کنیم که زاویه ۱۰- بدست می‌آید. مساحت بین دو نمودار RM و $1.5 HM$ را از محل تقاطع دو نمودار (زاویه ۵ درجه) تا زاویه ۱۰- درجه محاسبه می‌کنیم:

degree	$1.5 \times HM$	RM	فاصله بین دو نمودار	سیمسون	تابع سطح
-10	314.60	-658	972.60	1	972.6
-5	318.11	-322	640.11	3	1920.33
0	319.39	0	319.4	3	958.2
5	318.11	322	0	1	0

SUM=	3851.13
AREA=3/8×5/57.3×SUM=	126.0187



شکل ۸: نمودار مماتهای واژگون‌کننده و بازگرداننده

حال باید همین مساحت را در طرف راست محاسبه کرد. اگر فرض اولیه ۲۰ درجه باشد داریم:

degree	1.5*HM	RM	فاصله بین دو نمودار	سیمسون	تابع سطح
5	318.11	322	0	1	0
10	314.5967	658	343.4	3	1030.21
15	308.5283	843.5	534.97	3	1604.915
20	299.9049	1032.5	732.6	1	732.5951
				SUM=	3367.72
			AREA=3/8*5/57.3*SUM=		110.2003

ملاحظه می‌شود که مساحت از ۵ درجه تا زاویه ۲۰ درجه هنوز به ۱۲۶ نرسیده است. از طرفی مساحت تا ۲۵ درجه نیز به ۱۸۰/۷۷ می‌رسد (محاسبه آن ذکر نشده است) لذا با تخمین یک مساحت مستطیلی داریم:

$$126 - 110.2 = 15.8 = \text{مساحت باقی مانده}$$

$$15.8 = 732.6 \times \text{teta}$$

$$\text{teta} = 0.021 \text{ rad} = 1.23 \text{ degree}$$

بنابراین زاویه‌ای که در آن مساحت سمت چپ و راست با هم برابر شوند عبارتست از:

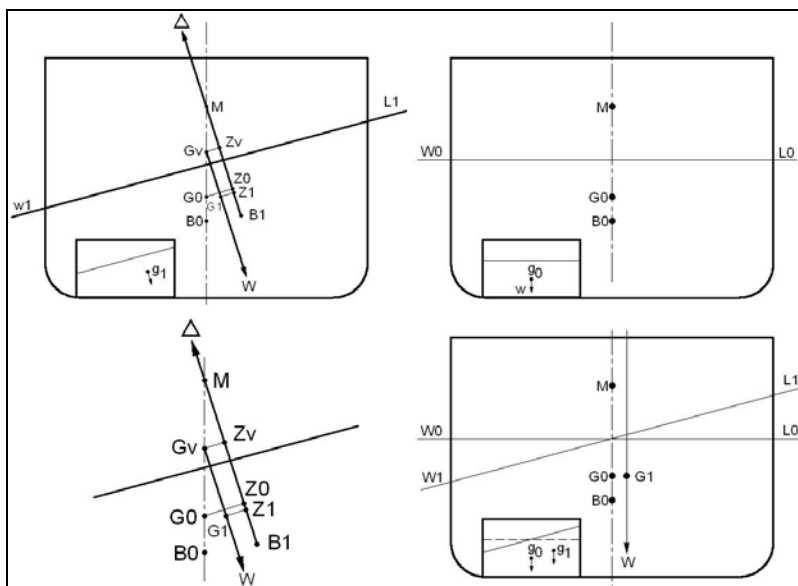
$$20 + 1.23 = 21.23 \text{ degree}$$

این زاویه همان زاویه تعادل دینامیکی است یعنی بیشترین زاویه غلتشی که شناور در اثر وزش باد بدان می‌رسد.

بخش ۲-۲۱: اثرات سطح آزاد مخازن بر پایداری

سطح آزاد مخازن نیز همچون اثر اجسام آویزان باعث تضعیف پایداری می‌گردد لذا اثر سطح آزاد^۲ مخازن را باید به حداقل رسانید و تقسیم‌بندی داخلی مخازن بدین منظور انجام می‌شود.

سطح آزاد مخازن باعث می‌شود که در اثر تلاطم شناور، سیال داخل مخزن از طرفی به طرف دیگر حرکت کند و باعث جابجایی عرضی و عمودی مرکز ثقل شود که آن نیز باعث اصلاح کسینوسی و سینوسی منحنی GZ می‌شود. جابجایی مرکز ثقل سیال درون مخزن و به تبع آن جابجایی مرکز ثقل شناور و اثر آن بر منحنی GZ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: اثر سطح آزاد مخازن بر کاهش پایداری شناور

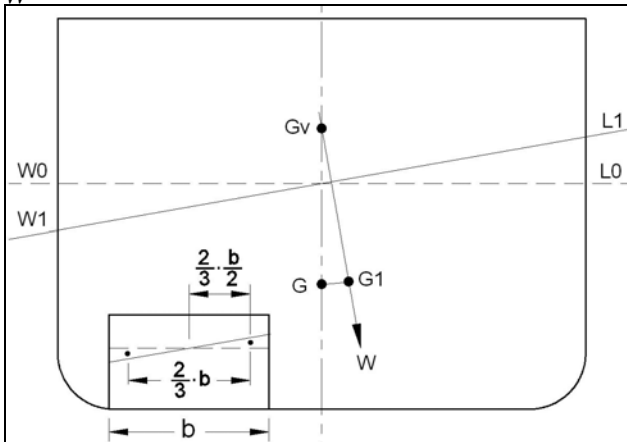
جابجایی سیال داخل مخزن اثری بر مرکز بویانسی ندارد و مطابق شکل باعث جابجایی مرکز ثقل (G_1) می‌شود. اگر از مرکز ثقل جدید خطی عمود بر سطح آب (موازی با امتداد BM) ترسیم کنیم، خط مرکزی شناور را در G_v قطع می‌کند. در این حالت بازوی بازگرداننده $G_v Z_v$ به $G_v Z_v$ تبدیل شده است و در واقع می‌توان فرض کرد که مرکز ثقل شناور از دیدگاه پایداری، از G_v به G_v منتقل شده است. «مرکز ثقل مجازی» گویند و $G_v G_v$ مقدار کاهش پایداری ناشی از اثر سطح آزاد است. یادآوری می‌شود که ضربه سیالات داخل مخازن بر دیواره‌ها مبحث متفاوتی است که بدان اسلوشینگ^۱ گویند.

* محاسبه میزان کاهش پایداری ناشی از اثر سطح آزاد

بیان شد که میزان کاهش پایداری برابر $G_v G_v$ می‌باشد. برای دست یافتن به ارتباط بین $G_v G_v$ و سطح آزاد مخازن، برای یک مخزن مکعبی شکل داریم:

$$G_v G_v = \frac{w \cdot g \cdot g_1}{W}$$

$$w = v \cdot \rho_i$$



شکل ۲: جابجایی مثلث‌های شناوری در مخازن و اثر آن بر جابجایی مرکز ثقل شناور

که w وزن سیال جابجا شده داخل مخزن و v حجم این سیال جابجا شده می باشد که همان گوه انتقال یافته از چپ به راست در شکل فوق می باشد. اگر شناور به اندازه زاویه θ غلتش کرده باشد، مایع درون مخزن نیز به همین اندازه غلتش کرده است که داریم:

$$v = \underbrace{\frac{1}{2} \times \frac{b}{2} \times \frac{b}{2}}_{\text{مساحت مقطع مثلث انتقال یافته}} \times \theta_c \times l = \frac{l \times b^2}{8} \times \theta_c$$

که l طول مخزن است .

$$g_o g_1 = 2 \times \frac{2}{3} \times \frac{b}{2} = \frac{2}{3} b$$

$$w \cdot \underbrace{\frac{l \times b^2}{8}}_w \times \underbrace{\theta_c \times \rho_i \times \frac{2}{3} b}_{g_o g_1} = \frac{l \times b^3}{12} \rho_i \theta_c$$

عبارت $\frac{lb^3}{12}$ ممان دوم سطح یک مستطیل (i) حول محور تقارن طولی می باشد که در اینجا سطح مورد نظر همان سطح آزاد سیال درون مخزن است:

$$w \cdot g_o g_1 = i \cdot \rho_i \cdot \theta_c$$

$$G_o G_1 = \frac{w \times g_o g_1}{W} = \frac{i \cdot \rho_i \cdot \theta_c}{W}$$

از طرفی مطابق شکل داریم: $G_o G_1 = G_o G_v \cdot \theta_c$ که با جاگذاری مقدار $G_o G_1$ داریم:

$$\frac{i \cdot \rho_i \cdot \theta_c}{W} = G_o G_v \cdot \theta_c$$

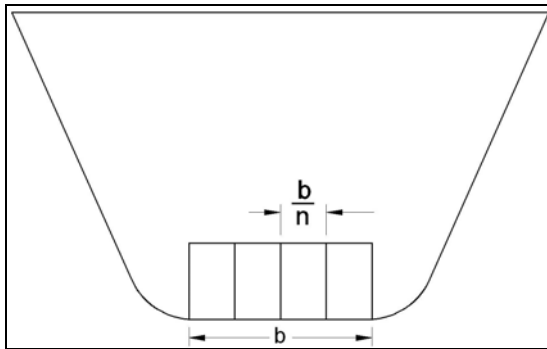
$$G_o G_v = \frac{i \cdot \rho_i}{W}$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که میزان کاهش پایداری وابسته به مفهوم انتقال مرکز ثقل و آن نیز وابسته به چگالی سیال درون مخزن و ممان دوم سطح آزاد مخزن است.

عبارت i, p را ممان سطح آزاد (FSM)^۱ نیز می‌گویند که بنابراین عبارات بالا تبدیل

$$G_0 G_1 = \frac{FSM}{W} \quad \text{می‌شود به:}$$

رابطه به دست آمده نه فقط برای مخازن مکعبی بلکه برای کلیه مخازن با هر شکلی قابل کاربرد است و البته در این شرایط، رابطه ممان دوم سطح آزاد (i) برای سطوح با شکل هندسی نامعین، به روشهای عددی باید محاسبه گردد که در بخش‌های قبلی نحوه محاسبه ممان دوم سطح به روش عددی بیان شد.



شکل ۳: تقسیم‌بندی عرضی مخازن بوسیله دیواره‌های طولی

* تقسیم‌بندی عرضی مخازن با دیواره‌های طولی

روش کاهش سطح آزاد مخزن تقسیم‌بندی عرضی مخازن (به وسیله دیواره‌های طولی) می‌باشد و باید توجه داشت که تقسیم‌بندی طولی مخازن با دیواره‌های عرضی هیچ تأثیری بر کاهش سطح آزاد مخازن ندارد که در قسمت بعد اثبات خواهد شد.

در اینجا به تأثیر تقسیم‌بندی عرضی مخازن بر کاهش اثر سطح آزاد می‌پردازیم:

$$G_v G_v = \frac{i \cdot \rho_i}{W}$$

اگر فرض کنیم مخزن به عرض b و طول l و بدون تقسیم‌بندی باشد داریم:

$$i = \frac{1}{12} l b^3$$

$$G_0 G_v = \frac{l b^3 \rho_i}{12 W}$$

اگر مخزن مطابق شکل به n مخزن تقسیم شود داریم:

$$i = \frac{1}{12} l \left(\frac{b}{n}\right)^3$$

$$G_v G_v = \left[\frac{l \left(\frac{b}{n}\right)^3 \rho_i}{12 W} \right] \times n$$

که ضریب n به دلیل این است که مخزن تبدیل به n مخزن با عرض $\frac{b}{n}$ شده است.

پس از ساده‌سازی داریم:

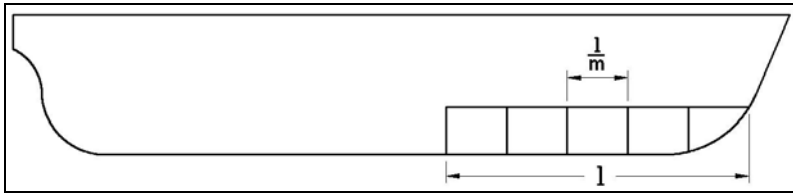
$$G_0 G_v = \frac{l b^3 \cdot \rho_i}{12 W} \times \frac{1}{n^2}$$

بنابراین اثر سطح آزاد با نسبت $\frac{1}{n^2}$ کاهش می‌یابد که حکایت از اثر زیاد

تقسیم‌بندی عرضی مخازن بر کاهش پایداری دارد. توجه شود که تقسیم مخزن به تعداد

n مخزن کوچکتر بوسیله $(n - 1)$ دیواره ایجاد می‌شود.

* تقسیم‌بندی طولی مخازن با دیواره‌های عرضی



شکل ۴: تقسیم‌بندی طولی مخازن بوسیله دیواره‌های عرضی

مطابق شکل فرض کنید مخزنی مکعبی به طول l و عرض b در شناور وجود دارد

که به تعداد m مخزن تقسیم شده است و بنابراین طول هر مخزن $\frac{l}{m}$ و عرض آن b می‌باشد. ممان دوم سطح آزاد مخزن برابر است با:

$$i_m = \frac{1}{12} \left(\frac{l}{m} \right) b^3$$

برای تعداد m مخزن داریم:

$$G_0 G_v = \frac{i_m \rho}{W} \times m = \frac{\frac{l}{m} b^3 \rho}{12 \cdot W} \times m = \frac{lb^3 \times \rho}{12 \times W}$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که مقدار $G_0 G_v$ بدست آمده همان مقدار برای مخزن بدون تقسیم‌بندی می‌باشد. بنابراین تقسیم‌بندی طولی مخازن اثری بر کاهش سطح آزاد مخازن ندارد و صرفاً برای تقسیم‌بندی و جداسازی فضای داخلی مخازن بکار می‌رود.

البته باید توجه داشت که منظور از عدم تأثیر، بر پایداری عرضی شناور است که ممان‌گیری حول محور طولی انجام می‌شود. پایداری عرضی معمولاً حساس‌تر از پایداری طولی است لذا مبنای بحث در اثر سطح آزاد مخازن، پایداری عرضی است. اگر پایداری طولی شناور مد نظر باشد موضوع مؤثر بودن تقسیم‌بندی عرضی کاملاً برعکس می‌شود یعنی از دیدگاه پایداری طولی، دیواره‌های طولی اثری بر کاهش اثر

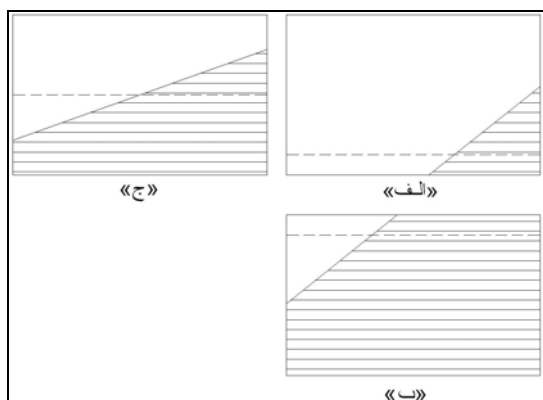
سطح آزاد مخازن ندارند و در عوض دیواره‌های عرضی مخازن، با نسبت $\frac{1}{m^2}$ باعث کاهش اثر سطح آزاد مخازن می‌شود.

در زیردریایی‌ها در زیر آب که متاستر طولی و عرضی بر هم منطبق است و پایداری طولی به اندازه پایداری عرضی (و بلکه بیشتر از آن) اهمیت می‌یابد، لذا هم تقسیم‌بندی طولی و هم تقسیم‌بندی عرضی مخازن اهمیت می‌یابد.

* عمق سیال درون مخازن

فرض کنید عرض مخزن b باشد. اگر عمق سیال داخل مخزن خیلی کم باشد، غلتش باعث می‌شود سیال در یک گوشه مخزن جمع شود و عرض سطح آزاد مخزن خیلی کمتر از مقدار b شود (حالت a).

اگر عمق سیال به گونه‌ای باشد که خیزی سقف مخزن اتفاق بیافتد (حالت b)، عرض سطح آزاد مخزن باز هم خیلی کمتر از b می‌باشد. بدترین حالت در سطح آزاد مخازن، حالت (c) می‌باشد که عرض سطح آزاد مخزن نه تنها کمتر از b نمی‌باشد بلکه بیشتر از b نیز می‌باشد که در حل مسائل مربوطه در این حالت، عرض سطح آزاد همان مقدار b فرض می‌شود.



شکل ۵: اثر عمق سیال درون مخازن بر اثر سطح آزاد مخازن

* مخازن موجود در شناورها

مهمترین مخازن دارای سطح آزاد در شناور عبارتند از:

۱- مخزن سوخت: این مخزن شامل سوخت مصرفی موتورهای شناور می باشد که متناسب با کارکرد موتور، سوخت مصرف شده و سطح آزاد ایجاد می شود. در برخی موارد برای حذف این سطح آزاد، به جای سوخت مصرف شده، آب دریا وارد مخزن می شود که به دلیل اختلاف چگالی، سوخت روی آب قرار می گیرد.

۲- مخزن بالاست: این مخازن که در منتهی الیه سینه و پاشنه و برای تریم دادن شناور بکار می روند معمولاً نیمه پر هستند و سطح آزاد دارند. کاربردهای دیگر این مخازن عبارتست از: کنترل موقعیت KG، کنترل پریود حرکت رول، افزایش آبخور در حالتی که کشتی بدون بار است و باعث افزایش پایداری شناور می شود و آبخور مناسب برای پروانه را ایجاد می کند.

۳- مخزن آب شیرین: این مخزن شامل آب شیرین برای مصارف خدمه شناور می باشد که به تدریج با مصرف شدن آب شیرین، سطح آزاد در مخزن ایجاد می شود. از آنجا که چگالی آب شور دریا و آب شیرین تفاوت چندانی ندارند، لذا نمی توان با وارد کردن آب شور دریا به مخزن آب شیرین، اثر سطح آزاد آن را حذف کرد.

۴- مخزن خن: این مخزن شامل آب خن موتورخانه و پساب های داخل شناور می باشد.

۵- مخزن روغن: این مخزن شامل روغن مورد نیاز موتور و سیستم هیدرولیک می باشد.

انبارهای موجود در کشتی های نفتکش ها و حمل فرآورده های شیمیایی، به دلیل عرض زیاد، نباید به هیچ عنوان دارای سطح آزاد باشند یعنی باید یا کاملاً پر یا کاملاً خالی باشند. سایر مخازن فوق باید در بررسی اثر سطح آزاد مخزن لحاظ شوند.

مثال) در یک شناور، مخزن سوخت با ۶ دیواره در طول و ۳ دیواره در عرض تقسیم‌بندی شده است. اثر این تقسیم‌بندی بر پایداری عرضی شناور چگونه است؟

حل: دانستیم که تقسیم‌بندی عرضی مخزن بوسیله دیواره‌های طولی، اثر سطح آزاد مخازن را با نسبت $\frac{1}{n^2}$ کاهش می‌دهد. سه دیواره، مخزن را به چهار قسمت عرضی تقسیم‌بندی می‌کند ($n=4$) که داریم:

$$(FSM)_2 = (FSM)_1 \times \frac{1}{n^2} = (FSM)_1 \times \left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16} FSM$$

همچنین دانستیم که تقسیم‌بندی طولی مخازن بوسیله دیواره‌های عرضی، اثری در کاهش سطح آزاد مخازن ندارد بنابراین ۶ دیواره بکار رفته در طول مخزن صرفاً برای تقسیم‌بندی حجم سوخت مؤثر است و اثری بر پایداری عرضی شناور ندارد.

مثال) در شناور مدل ۱ پس از جمع‌شدن آبهای زائد موتورخانه در مخزن خن، این مخزن دارای سطح آزاد می‌باشد. طول مخزن ۳ متر و نیم‌عرض‌های سطح آزاد مخزن به صورت زیر می‌باشد:

مقطع	0	1	2	3	4
نیم عرض	0	0.1	0.4	0.9	1.6

جابجایی شناور در این حالت ۲۹۰۰ تن و ارتفاع مرکز ثقل بدون اثر سطح آزاد برابر $\frac{4}{8}$ متر است. معادل افزایش ارتفاع مرکز ثقل ناشی از اثر سطح آزاد مخزن را محاسبه کنید.

حل:

$$h = \frac{3}{4} = 0.75 \quad m$$

برای محاسبه اثر سطح آزاد باید ممان دوم سطح آزاد مخزن به روش عددی محاسبه گردد:

تابع ممان دوم	سیمسون	نیم عرض $۳^۸$	نیم عرض	مقطع
1	1	1	1	0
10.976	4	3	1.4	1
24.334	2	12	2.3	2
237.276	4	59	3.9	3
262.1	1	262	6.4	4

SUM=

535.73

$$i = 2 \times \frac{h}{3} \times \frac{1}{3} \times sum = 89.29 \quad m^4$$

چگالی متوسط مایع درون مخزن خن $۰/۹ \left(\frac{t}{m^3} \right)$ می باشد لذا داریم:

$$G_0 G_v = \frac{i \times \rho_i}{W} = \frac{89.29 \times 0.9}{2900} = 0.0277 \quad m = 27.7 \quad mm$$

(مثال) در شناور مدل ۱، در سناریوی بارگیری ۱، مخازن سوخت، آب شیرین و بالاست نیمه پر هستند. این مخازن مکعبی و به ابعاد زیر هستند (فرض بر این است که دارای دیواره داخلی نیستند):

مخزن	حجم	L	B	H	چگالی
سوخت	180	10	8	2.25	0.85
آب شیرین چپ	27.5	5	3.2	1.7	1.01
آب شیرین راست	27.5	5	3.2	1.7	1.01
بالات سینه	20	4	5	1	1.023
بالات پاشنه	20	3	7	0.95	1.023

کاهش ارتفاع متاستیری ناشی از اثر سطح آزاد مخازن را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه $i = \frac{1}{12} LB^3$ و همچنین $FSM = i \times \rho$ داریم:

مخزن	L	B^3	i	چگالی	FSM	W	G0Gv
سوخت	10	512.0	426.67	0.85	362.67	3500	0.104
آب شیرین چپ	5	32.8	13.65	1.01	13.79	3500	0.004
آب شیرین راست	5	32.8	13.65	1.01	13.79	3500	0.004
بالاست سینه	4	125.0	41.67	1.023	42.63	3500	0.012
بالاست پاشنه	3	343.0	85.75	1.023	87.72	3500	0.025

$$0.149 \text{ m} = 14.9 \text{ cm}$$

مجموع:

می دانیم که در سناریوی ۱، $GM_0 = 1 \text{ m}$ می باشد. کاهش ارتفاع متاستری ناشی از اثر سطح آزاد مخازن عبارتست از:

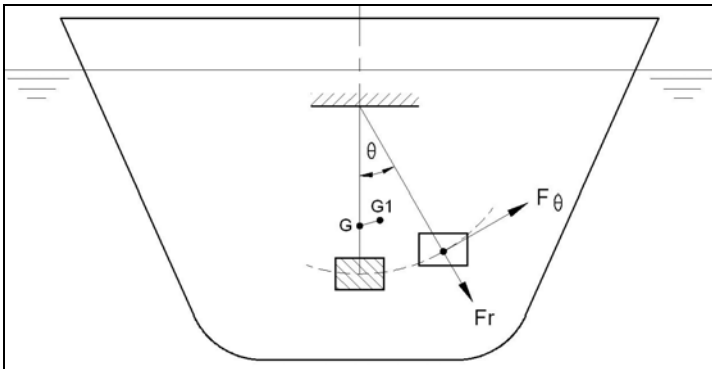
$$GM = GM_0 - \sum G_0 G_v = 1 - 0.149 = 0.851 \text{ m}$$

در واقع اثر سطح آزاد مخازن به صورت کاهش GM یا افزایش KG بروز می کند.

بخش ۲-۲۲: ۱ اثرات اجسام آویزان و ارتفاع جرثقیل بر پایداری شناور

اجسام آویزان به طور کلی اثر مخربی بر پایداری شناور دارند و در شناور تا جایی که امکان دارد باید اجسام آویزان نظیر جرثقیل و لوستره‌های سنگین (در کشتی‌های مسافری) را مهار کرد، به گونه‌ای که امکان تاب خوردن آنها وجود نداشته باشد. تاب خوردن جسم آویزان، وابسته به ارتفاع نقطه آویزان باعث جابجا شدن عرضی و عمودی مرکز ثقل و اصلاح کسینوسی و سینوسی منحنی GZ می‌شود که هر دو عامل، باعث تضعیف پایداری می‌گردد. از طرفی نیروی مماسی و شعاعی ناشی از تاب خوردن شناور نیز باعث اعمال ممان رول دهنده به شناور می‌شود (شکل ۱) و از آنجا که این ممان در هر سیکل برعکس می‌شود، شناور با تلاطم دائمی مواجه خواهد شد.

شکل مطابق مطالب بیان شده در جابجایی مرکز ثقل داریم:



شکل ۱: اثر اجسام آویزان بر شناور

$$G.G_1 = \frac{w.d}{W}$$

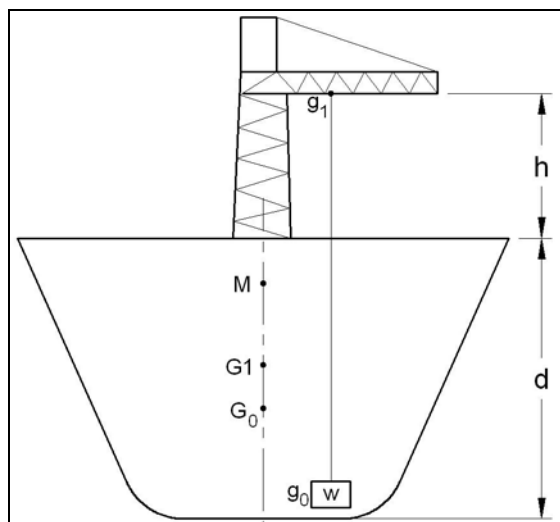
$$F_r = m.r.\omega^2: \text{نیروی شعاعی}$$

$$F_{\theta} = m.r.\dot{\omega} \quad \text{نیروی مماسی}$$

بحث اجسام آویزان در مورد جرثقیل‌های موجود در شناور^۱ از اهمیت بیشتری برخوردار است چرا که این جرثقیل‌ها، بارهای چند تنی را بلند می‌کنند که می‌توانند باعث جابجایی قابل ملاحظه مرکز ثقل شوند. از این رو حداکثر ارتفاع جرثقیلی که می‌تواند بر روی شناور نصب شود، از اهمیت حیاتی برخوردار است.

اگر ارتفاع جرثقیل و حداکثر بار قابل جابجایی آن، بر اساس ملاحظات پایداری انتخاب نشده باشد، می‌تواند باعث واژگون شدن شناور شود چرا که وقتی جرثقیل باری را از روی عرشه یا انبار بلند می‌کند، وزن این بار فوراً به بالای دکل جرثقیل منتقل و به یکباره باعث افزایش ارتفاع مرکز ثقل و کاهش GM می‌گردد (شکل ۲).

اگر GM شناور منفی شود، شناور ناپایدار خواهد شد.



شکل ۲: اثر ارتفاع جرثقیل بر پایداری شناور

جابجایی عمودی مرکز ثقل از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$G_0 G_1 = \frac{w \cdot (h + d)}{W}$$

که h ارتفاع دکل جرتقیل و d فاصله بار تا سطح عرشه می باشد.

مثال: جرتقیلی به ارتفاع ۷/۵ متر بر روی عرشه شناور مدل ۱ وجود دارد. این جرتقیل می خواهد باری به وزن ۳۰ تن را از کف انبار بلند می کند. آیا بلند کردن بار، پایداری شناور را تهدید می کند؟

حل: به محض بلند کردن بار از کف انبار، وزن بار به سر بوم دکل منتقل می شود. در سناریوی اصلی، $KG=5.1 \text{ m}$ و عمق بدنه نیز ۶ متر است.

$$w=10 \text{ t} \quad W=3500 \text{ t}$$

$$d = (6+7.5) - 5.1 = 8.4$$

= فاصله مرکز ثقل از کف - فاصله سر دکل از کف بدنه

$$G_0 G_1 = \frac{w \cdot d}{W} = \frac{10 \cdot 7.4}{3500} = 0.021 \quad m = 21 \text{ mm}$$

با توجه به اینکه در سناریوی ۱، مقدار $GM=0.5 \text{ m}$ است، با بلند کردن این وزنه، GM جدید برابر است با:

$$GM = 0.5 - 0.072 = 0.428 \text{ m}$$

لذا پایداری شناور همچنان محفوظ است.

بخش ۲-۲۳: اثرات شکل بدنه بر پایداری

بیان داشتیم که دو عامل اصلی بر پایداری شناور اثر دارند:

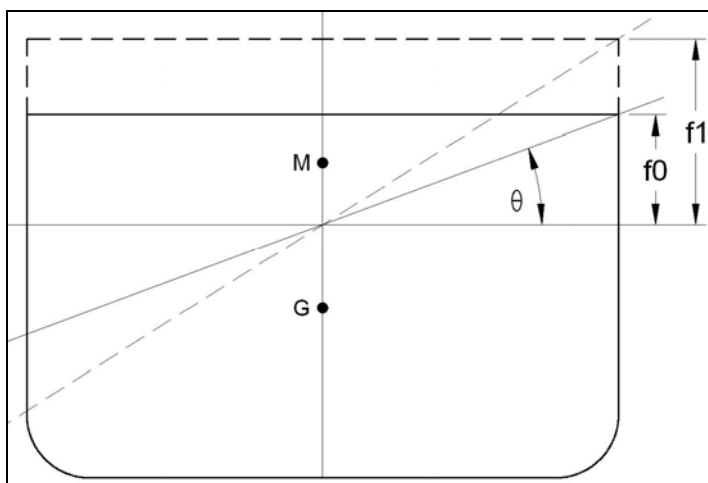
۱- وضعیت وزنی و مرکز ثقل

۲- مشخصات هندسی شناور شامل طول، عرض، ارتفاع آبخور و فری برد و همچنین طول روبناسازی (سوپر استراکچر) بدنه.

در این قسمت، اثر تغییرات هندسی بر پایداری شناور بررسی می‌گردد:

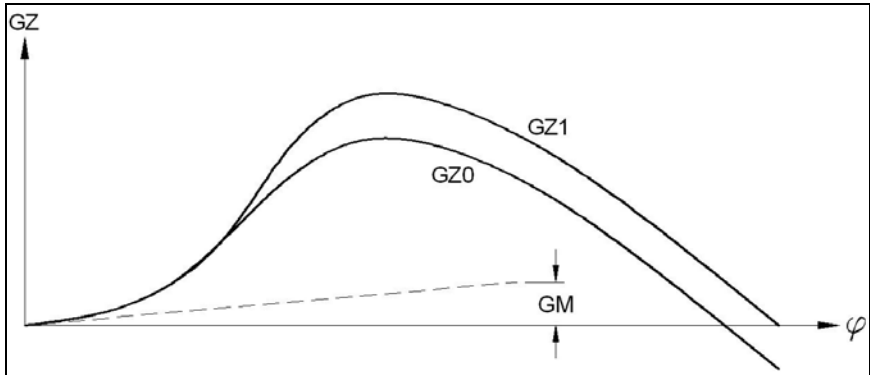
الف- تغییرات فری برد:

مطابق شکل ۱ افزایش فری برد باعث افزایش زاویه خیزی عرشه می‌گردد یعنی زاویه‌ای که عرشه شناور به زیر آب می‌رود، افزایش می‌یابد.



شکل ۱: افزایش ارتفاع فری برد شناور

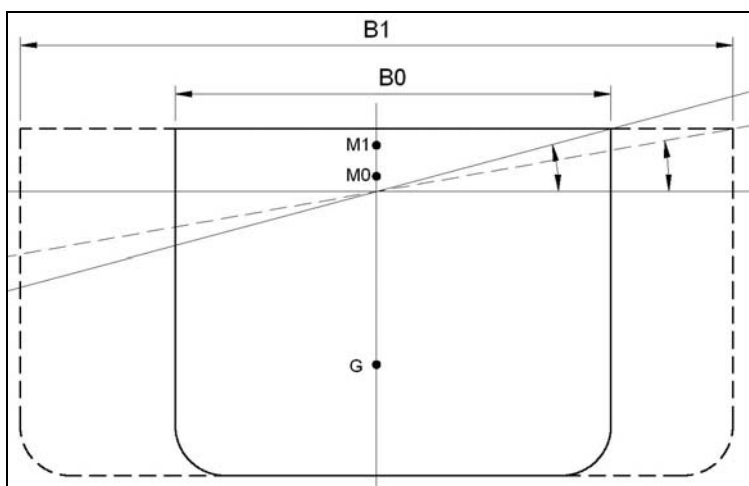
این پدیده در منحنی GZ بر شیب اولیه نمودار (که بیانگر GM می باشد) اثری ندارد ولی محدوده پایداری در این منحنی افزایش می یابد و زاویه ای که در آن حداکثر GZ به دست می آید نیز افزایش می یابد که این اثرات در شکل ۲ ملاحظه می شود. حداکثر مقدار GZ نیز افزایش می یابد.



شکل ۲: اثر افزایش فری برد بر منحنی GZ .

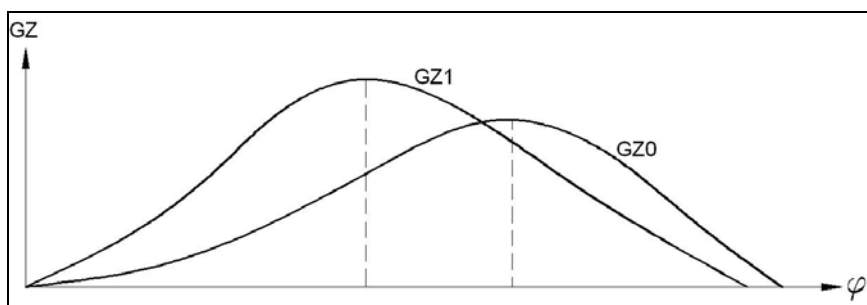
ب- تغییر عرض:

مطابق شکل ۳ افزایش عرض باعث کاهش زاویه خیسی عرشه می گردد، یعنی عرشه اصلی شناور در زاویه کمتری به زیر آب می رود که این پدیده باعث می شود زاویه مربوط به حداکثر مقدار GZ کاهش یابد.



شکل ۳: افزایش عرض بدنه

همچنین افزایش عرض به معنای افزایش GM_0 می‌باشد که در منحنی GZ به معنای افزایش شیب اولیه نمودار می‌باشد و همچنین حداکثر مقدار GZ نیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب با افزایش عرض، تغییرات فوق را در منحنی GZ مطابق شکل ۴ خواهیم داشت:



شکل ۴: اثر افزایش عرض بر منحنی GZ

ج- تغییر طول:

اثر افزایش طول بر پایداری طولی شناور شبیه اثر افزایش عرض بر پایداری عرضی شناور می‌باشد که چگونگی آن بیان شد.

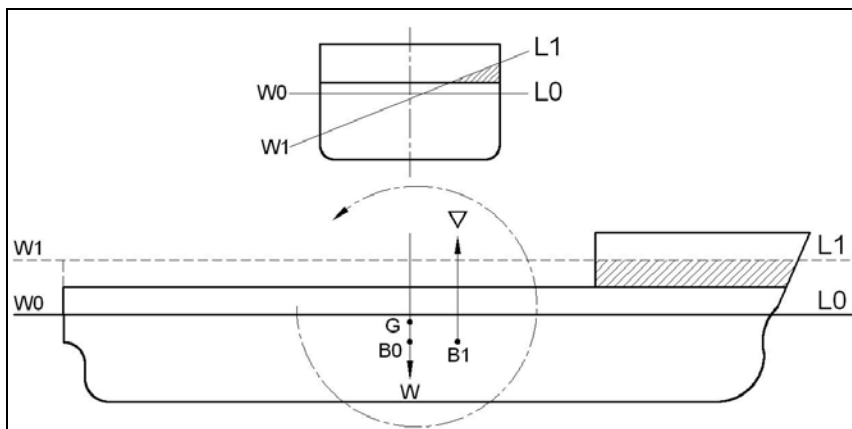
د- تغییر طول روبناسازی عرشه و مفهوم تریم آزاد:

روبناسازی عرشه^۱ اگر به صورت آب‌بند باشد، تأثیری شبیه افزایش فری برد دارد که چگونگی آن بیان شد. همچنین اگر روبناسازی به صورت غیر پیوسته روی عرشه باشد (همانند کشتی‌های خدماتی)، با فرو رفتن بخشی از عرشه اصلی در آب، به دلیل غلتش عرضی زیاد، تغییر قابل ملاحظه‌ای در شکل صفحه آب‌خور و مرکز شناوری (مرکز صفحه آب‌خور) ایجاد می‌شود. تغییر مرکز شناوری نیز باعث تریم کردن شناور می‌شود که به آن «تریم آزاد»^۲ گویند.

معمولاً در همه شناورها، غلتش عرضی زیاد باعث شیب ناخواسته شناور می‌شود که معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود ولی این مقدار شیب در شناورهایی که روبناسازی غیر ممتد روی عرشه دارند، بسیار بیشتر و قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. طبیعتاً شیب به سمتی است که ارتفاع فری برد و روبناسازی کمتر باشد که در شکل ۵ نشان داده شده است. با غلتش عرضی زیاد شناور و تغییر آب‌خور از $W_0 L_0$ به $W_1 L_1$ ، مطابق شکل، مرکز شناوری به مقدار زیادی به جلو منتقل می‌شود و شیب شدید پاشنه اتفاق می‌افتد. البته در بارج‌ها بدلیل تقارن کامل بدنه در زوایای هیل کوچک، تریم آزاد اتفاق نمی‌افتد. همچنین لازم به تذکر است که علی‌رغم این‌که هیل کردن شناور باعث شیب می‌شود ولی تریم کردن شناور باعث ایجاد زاویه هیل نمی‌گردد چراکه با تریم کردن شناور باز هم تقارن سمت چپ و راست به طور کامل حفظ می‌شود و شناور هیل نمی‌کند.

1 - Superstructure

2 - Free Trim



شکل ۵: اثر روبناسازی بر ترمیم آزاد شناور

این اثرات را می‌توان در جدول زیر خلاصه کرد:

افزایش طول	افزایش عرض	روبناسازی عرشه	افزایش فری برد	
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	حداکثر GZ
بدون تغییر	افزایش	افزایش	افزایش	زاویه مربوط به حداکثر GZ
بدون تغییر	کاهش	افزایش زیاد	افزایش	زاویه خیس عرشه
بدون تغییر	افزایش	بدون تغییر	بدون تغییر	ارتفاع متاستری اولیه GM_0
بدون تغییر	کاهش	افزایش	افزایش	محدوده پایداری
افزایش	بستگی دارد	افزایش	افزایش	پایداری دینامیکی (سطح زیر نمودار GZ)

بخش ۲-۲۴: رابطه نسبت‌های ابعادی و پایداری شناور

در این قسمت به بررسی رابطه نسبت‌های ابعادی و پایداری شناور پرداخته می‌شود. در برخی مواقع تنها یکی از ابعاد شناور تغییر می‌کند و می‌خواهیم اثر این تغییر را بر پایداری بررسی کنیم. برای اینکه این تغییر باعث انجام مجدد کل فرآیند تحلیل پایداری نگردد، با به دست آوردن این روابط می‌توان اثر تغییرات ابعادی بر پایداری را به راحتی محاسبه کرد. همچنین در این مبحث دو حالت برای تغییرات مرکز ثقل و اثرات آن بر پایداری در نظر گرفته می‌شود.

۱- اثر تغییرات کوچک ابعاد شناور بر پایداری

حجم زیر آب بدنه برابر است با: $\Delta = C_B \cdot L \cdot B \cdot T$ (۱)

که C_B ضریب بلوکی و مقدار ثابتی است.

با مشتق گرفتن از رابطه ۱ و تقسیم طرفین بر مقدار Δ داریم:

$$\frac{d\Delta}{\Delta} = \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T} \quad (۲)$$

از طرفی داشتیم:

$$\overline{BM} = \frac{I_t}{\nabla} = (Cons) \times \frac{B^2}{T} \quad (۳)$$

با مشتق‌گیری از این رابطه داریم:

$$\frac{d\overline{BM}}{\overline{BM}} = 2 \frac{dB}{B} - \frac{dT}{T} \quad (۴)$$

همچنین از آنجا که در اغلب شناورها G بالاتر از B است داریم:

$$\frac{d \overline{BM}}{\overline{BM}} = \frac{d \overline{BG} + d \overline{GM}}{\overline{BM}} = \frac{d \overline{BG} + d \overline{GM}}{\overline{BG} + \overline{GM}} \quad (5)$$

هم اکنون با سه حالت ممکن می‌توان تغییرات ابعادی را بر پایداری در نظر گرفت.

الف) فرض کنیم فقط عرض شناور تغییر کند و بقیه ابعاد تغییری نکنند از رابطه ۲ داریم:

$$d\Delta = \Delta \frac{dB}{B} \quad (6)$$

رابطه ۴ با توجه به ثابت بودن آب‌خور تبدیل می‌شود به:

$$\frac{d \overline{BG} + d \overline{GM}}{\overline{BM}} = 2 \frac{dB}{B} \quad (7)$$

فرض کنیم $\overline{KG}$ تغییری نمی‌کند بنابراین $d \overline{BG} = 0$ و داریم:

$$d \overline{GM} = 2 \overline{BM} \cdot \frac{dB}{B} \quad (8)$$

رابطه (۸) بیان‌کننده اثر تغییرات عرض بر ارتفاع متاستر است.

ب) فرض کنیم که جابجایی و آب‌خور ثابت باشد بنابراین با افزایش عرض، باید طول با همین نسبت کاهش یابد بنابراین از رابطه ۲ داریم:

$$\frac{dB}{B} = - \frac{dL}{L} \quad (9)$$

که می‌توان رابطه فوق را در رابطه ۸ جاگذاری کرد.

ج) فرض کنیم که جابجایی و طول ثابت باشد و عرض تغییر کند. برای ثابت ماندن جابجایی، متناسب با افزایش عرض، آب‌خور باید کاهش یابد که از رابطه ۲ داریم:

$$\frac{dB}{B} = - \frac{dT}{T} \quad (10)$$

که می‌توان رابطه فوق را در رابطه ۸ جاگذاری کرد.

۲- اثر تغییرات مرکز ثقل و بویانسی بر پایداری

تغییر آبخور ممکن است باعث تغییر KG شود. دو حالت کلی می‌توان در نظر گرفت.

الف) KB و KG هر دو به صورت ضریب ثابتی از آبخور تغییر کنند.

$$KG = (Cons) \times T$$

$$KB = (Cons) \times T$$

$$\overline{KG} - \overline{KB} = BG = (Cons) \times T \quad (۱۱)$$

با در نظر گرفتن یکی از حالات قسمت قبل و مشتق گرفتن از رابطه ۱۱ داریم:

$$\frac{d\overline{BG}}{\overline{BG}} = \frac{dT}{T} = \frac{-dB}{B} \quad (۱۲)$$

از رابطه ۴ و ۵ داریم:

$$\frac{d\overline{BG} + d\overline{GM}}{\overline{BG} + \overline{GM}} = 2 \frac{dB}{B} - \frac{dT}{T} = \frac{3dB}{B} \quad (۱۳)$$

بنابراین:

$$d\overline{BG} + d\overline{GM} = 3(\overline{BG} + \overline{GM}) \frac{dB}{B} \quad (۱۴)$$

با بدست آوردن مقدار $d\overline{BG}$ از رابطه ۱۲ و جاگذاری آن در رابطه ۱۴ داریم:

$$- \overline{BG} \cdot \frac{dB}{B} + d\overline{GM} = 3(\overline{BG} + \overline{GM}) \frac{dB}{B} \quad (۱۵)$$

$$\boxed{d\overline{GM} = (4\overline{BG} + 3\overline{GM}) \frac{dB}{B}} \quad (۱۶)$$

ب) فرض کنید $\overline{KG}$ مقدار ثابتی است و KB به صورت ضریب ثابتی از آبخور

باشد:

$$\overline{BG} = \overline{KG} - \overline{KB} \quad (۱۷)$$

$$\overline{BG} = -(\text{Const}).T \quad (۱۸)$$

$$\frac{d\overline{BG}}{\overline{BG}} = \frac{dT}{T} \quad (۱۹)$$

از آنجا که $BG = -KG$ داریم: (۲۰)

$$d\overline{BG} = -\overline{KG} \cdot \frac{dT}{T} = \overline{KB} \cdot \frac{dB}{B}$$

همچنین از رابطه ۱۶ داشتیم:

$$d\overline{BG} + d\overline{GM} = 3(\overline{BG} + \overline{GM}) \frac{dB}{B}$$

با جاگذاری رابطه ۲۰ داریم:

$$d\overline{GM} = (3\overline{BG} + 3\overline{GM} - \overline{KB}) \frac{dB}{B}$$

از جاگذاری رابطه ۱۷ داریم:

$$d\overline{GM} = (4\overline{BG} + 3\overline{GM} - \overline{KG}) \frac{dB}{B}$$

مثال) قبل از ساخت و در حین طراحی کشتی مدل ۱ اگر بخواهیم آبخور شناور را از ۵ به ۴ متر کاهش دهیم و جابجایی، طول و KG ثابت بماند، مقدار GM و عرض جدید را محاسبه کنید.

حل: از مشخصات مدل ۱ در سناریوی اصلی می‌دانیم که:

$$\Delta = 3500 \text{ t} \quad L = 80 \text{ m} \quad B = 13.6 \text{ m} \quad KG = 5.1 \text{ m}$$

$$T = 5 \text{ m} \quad KB = 2.8 \text{ m}$$

$$BM = 3.3 \text{ m} \quad GM = 1 \text{ m}$$

$$\frac{d\Delta}{\Delta} = 0 = \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}$$

$$\frac{dL}{L} = 0$$

$$\frac{dB}{B} = \frac{-dT}{T}$$

تغییر آبخور مطلوب:

$$\frac{dT}{T} = \frac{4-5}{5} = \frac{-1}{5}$$

$$\frac{dB}{B} = \frac{-dT}{T} = \frac{1}{5}$$

$$dB = \frac{B}{5} = \frac{13.6}{5} = 2.72 \text{ m}$$

$$B = 13.6 + 2.72 = 16.33 \text{ m} \text{ عرض جدید}$$

$$\frac{d\overline{BM}}{\overline{BM}} = 2\frac{dB}{B} - \frac{dT}{T} = 2 \times \frac{1}{5} + \frac{1}{5} = \frac{3}{5}$$

$$d\overline{BM} = 3.3 \times \frac{3}{5} = 1.98 \text{ m}$$

از آنجا که KB متناسب با T است:

$$\frac{d\overline{KB}}{\overline{KB}} = \frac{dT}{T} = \frac{-1}{5}$$

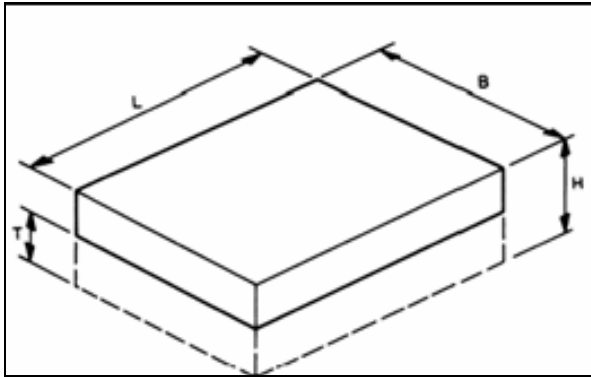
$$d\overline{KB} = \frac{-2.8}{5} = -0.56$$

$$GM_0 = 1 \text{ m} \text{ قدیم}$$

$$\overline{GM} = GM_0 + d(\overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}) = 1 + (-0.56) + 1.98 = 2.42 \text{ m} \text{ جدید}$$

۳ - رابطه نسبت چگالی جسم و آب با پایداری

برای به دست آوردن این رابطه، مکعبی مانند شکل ۱ در نظر بگیرید.



شکل ۱

$$\frac{\text{چگالی جسم}}{\text{چگالی آب}} = C$$

$$C \times LBH = LBT$$

از برابری وزن و بویانسی داریم:

$$C = \frac{T}{H}$$

$$\overline{KB} = \frac{T}{2}$$

برای یک مکعب داریم:

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} = \frac{1}{12} \cdot \frac{B^3 L}{BLT} = \frac{B^2}{12T}$$

با توجه به همگن بودن چگالی جسم داریم:

$$\overline{KG} = \frac{H}{2}$$

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{12T} - \frac{H}{2} = \frac{CH}{2} + \frac{B^2}{12CH} - \frac{H}{2} = \frac{H}{2}(C-1) + \frac{B^2}{12CH}$$

برای تأمین پایداری مثبت داریم $GM > 0$ یعنی باید داشته باشیم:

$$\frac{H}{2}(C-1) + \frac{B^2}{12CH} > 0$$

این رابطه را می توان برای شکل های منشوری با شکل مقاطع مختلف به دست آورد.

مثال) مکعبی با چگالی همگن به طول ۲۰ متر، عرض ۵ متر و عمق ۵ متر داریم. این مکعب در آب شیرین شناور است. محدوده ای از چگالی جسم را طوری تعیین کنید که در آن محدوده جسم ناپایدار باشد.

حل: جسم در صورتی ناپایدار است که:

$$\frac{H}{2}(C-1) + \frac{B^2}{12CH} < 0$$

$$\frac{5}{2}(C-1) + \frac{25}{12C \times 5} < 0$$

$$C-1 + \frac{1}{6C} < 0$$

$$6C^2 - 6C + 1 < 0$$

$$6C^2 - 6C + 1 = 0$$

از حل معادله درجه ۲ داریم:

$$C = \frac{6 \pm \sqrt{36 - 24}}{12} = \frac{6 \pm \sqrt{12}}{12} = 0.211 \quad \text{و} \quad 0.789$$

بنابراین اگر C بین 0.211 و 0.789 باشد مقدار GM منفی و جسم ناپایدار است لذا چگالی جسم نباید در این محدوده باشد.

بخش ۲-۲۵: غلتش عرضی در هنگام گردش

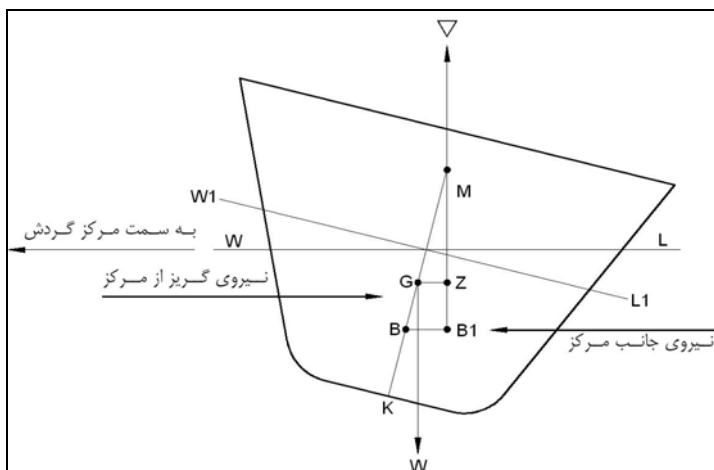
هنگامی که یک شناور بر روی یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند، یک شتاب رو به مرکز گردش برابر $\frac{V^2}{r}$ بر شناور وارد می‌شود. V برابر سرعت خطی شناور و r شعاع مسیر دایره‌ای می‌باشد. نیروی جانب مرکز ناشی از این شتاب برابر $\frac{MV^2}{r}$ می‌باشد که M جرم شناور است. این نیرو بر مرکز ثقل شناور وارد می‌شود. نیروی مقاوم در برابر این نیرو، نیروی گریز از مرکز ناشی از اثرات بین آب و بدنه می‌باشد که بر مرکز سطح جانبی بدنه در زیر آب وارد می‌شود. فرض می‌شود که مرکز این سطح هم ارتفاع مرکز بویانسی باشد لذا نیروی گریز از مرکز، بر مرکز بویانسی وارد می‌شود.

هنگامیکه نیروی جانب مرکز و نیروی گریز از مرکز با یکدیگر برابر می‌شوند، شناور بر یک مسیر دایره‌ای به شعاع r گردش می‌کند.

$$\text{نیروی جانب از مرکز} = \text{نیروی گریز از مرکز} = \frac{M.V^2}{r}$$

این نیروها با توجه به شکل ۱ باعث ایجاد یک ممان هیل دهنده می‌شود که برابر است با:

$$\text{ممان هیل دهنده} = \frac{M.V^2}{r} \cdot B_1 Z$$



شکل ۱: نیروی گرینز از مرکز و جانب مرکز وارد بر یک شناور در حال گردش

این ممان باید توسط ممان بازگرداننده هیدرواستاتیکی شناور جبران شود:

$$W.GZ = M.g.GZ = \text{ممان بازگرداننده}$$

با قرار دادن این دو ممان داریم:

$$M.g.GZ = \frac{M.V^2}{r}.B_1Z$$

در زوایای کوچک داریم:

$$GZ = GM.\sin\theta$$

$$B_1Z = BG.\cos\theta$$

که از جاگذاری آنها داریم:

$$M.g.GM.\sin\theta = \frac{M.V^2}{r}.BG.\cos\theta$$

$$GM.\sin\theta = \frac{V^2}{g.r}.BG.\cos\theta$$

$$\tan \theta = \frac{V^2.BG}{g.r.GM}$$

بنابراین زاویه هیل به هنگام دور زدن تابعی از سرعت حرکت، شعاع حرکت، BG و GM می‌باشد.

مثال) شناور مدل ۱ در سناریوی وزنی ۱ می‌خواهد در منطقه‌ای به شعاع ۳۰۰ متر دور بزند. اگر حداکثر سرعت حرکت شناور در این حالت ۱۰ گره باشد، زاویه غلتش ناشی از دور زدن شناور چند درجه است؟

$$GM = 1 \text{ m}$$

$$BG = KG - KB = 5.1 - 2.79 = 2.31 \text{ m}$$

حل: با استفاده از نمودارهای پایداری در سناریوی ۱ (آبخور ۵ متر)، داریم:

$$V = 10 \text{ knot} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$r = 300 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\tan \theta = \frac{V^2.BG}{g.r.GM} = \frac{(5)^2 \times 2.31}{9.81 \times 300 \times 1} = 0.019$$

$$\theta = 1.12^\circ$$

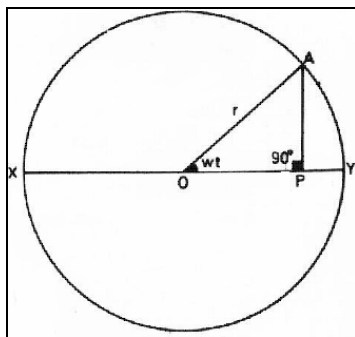
بخش ۲-۲۶: پریود نوسانات غلتش عرضی و دریازدگی

۱- محاسبه رابطه پریود طبیعی نوسانات حرکت رول

در محاسبه پریود نوسانات غلتش عرضی (رول) کشتی، فرض بر این است که دامنه غلتش کوچک باشد و شناور دارای ارتفاع متاستری اولیه مثبت باشد. در این شرایط، اگر یک نیروی خارجی موقتی بر شناور وارد شود که باعث غلتش شناور گردد می‌توان این نوع نوسان حرکت را «هارمونیک ساده»^۲ در نظر گرفت و از روابط ریاضی این نوع حرکت برای تحلیل حرکات رول شناور استفاده کرد. از طرفی حرکت رول در تحلیل غلتش شناور از اهمیت فوق العاده‌ای بخصوص در بحث دریازدگی برخوردار است. لذا در این قسمت ابتدا رابطه پریود نوسان یک حرکت هارمونیک ساده استخراج می‌گردد و این رابطه برای شناور تعمیم داده می‌شود.

* روابط حرکت هارمونیک ساده

فرض کنید نقطه A روی محیط دایره‌ای به شعاع r با سرعت زاویه ثابت (ω) حرکت کند. تصویر نقطه A روی قطر XOY نیز نقطه p باشد. ملاحظه می‌شود که با حرکت کردن نقطه A، حرکت نقطه p به سمت عقب و جلو می‌باشد.



شکل ۱: حرکت هارمونیک ساده

در این شرایط نوع حرکت نقطه p را «هارمونیک ساده» گویند. (ω بر حسب رادیان بر ثانیه).

بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$2\pi = \omega.T$$

$$T = 2\pi / \omega \quad \text{پریود حرکت}$$

$$OP = x \quad \text{فرض می کنیم:}$$

$$x = r.\cos(\omega.t)$$

$$\frac{dx}{dt} = -r.\omega.\sin(\omega t)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -r.\omega^2.\cos(\omega t)$$

$$x = r\cos(\omega t) \quad \text{داشتیم}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad \text{معادله حرکت هارمونیک ساده}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{و از طرفی ضریب } x \text{ برابر } \omega^2 \text{ می باشد لذا داریم:}$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{x}}$$

هنگامی که یک کشتی غلتش می کند، نمی توان محور غلتش را به راحتی تعیین کرد ولی می توان این محور را نزدیک به محور طولی گذرنده از مرکز ثقل در نظر گرفت. ممان اینرسی نیز حول این محور گرفته می شود:

$$I = M.K^2$$

$$M : \text{جرم شناور} \left(M = \frac{W}{g} \right).$$

K : شعاع ژیراسیون حول محور طولی گذرنده از مرکز ثقل

$$g : \text{شتاب گرانش} \left(I = \frac{W}{g}.k^2 \right).$$

* تعمیم رابطه هارمونیک ساده برای شناور

این رابطه هارمونیک ساده را برای شناور به صورت زیر تعمیم می‌دهیم:

اگر شناور تا زاویه θ غلتش کند، ممان بازگرداننده برابر است با:

$$W * GZ = \text{ممان بازگرداننده}$$

$$GZ = GM.\sin\theta \quad (\text{با فرض } \theta \text{ کوچک})$$

$$W \times GM \times \sin\theta = \text{ممان بازگرداننده}$$

یا می‌توان نوشت:

$$W.GM.\theta = \text{ممان بازگرداننده} (M)$$

همچنین از روابط دینامیک داریم:

$$M = I.\alpha$$

که I همان ممان دوم جرمی و α شتاب زاویه‌ای (بر حسب رادیان بر مجذور ثانیه) است.

شتاب زاویه‌ای حرکت برابر $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ می‌باشد که خواهیم داشت:

$$I. \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -W.GZ$$

$$\frac{W}{g}.k^2. \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -W.GM.\theta$$

$$\frac{W}{g}.k^2. \frac{d^2 \theta}{dt^2} + W.GM.\theta = 0$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{g.GM.\theta}{k^2} = 0$$

ملاحظه می‌گردد که معادله حرکت به دست آمده شبیه به رابطه حرکت هارمونیک ساده می‌باشد. پریود نوسانات این حرکت نیز برابر است با:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\theta}}$$

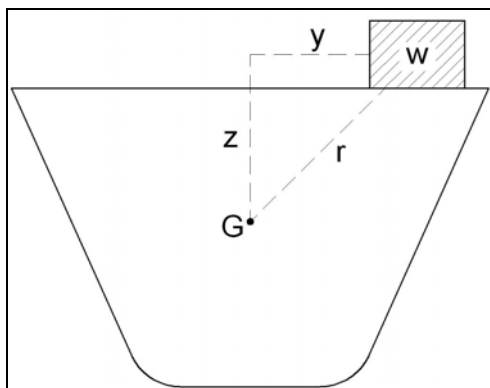
$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{g.GM}} \quad \text{پریود نوسانات حرکت رول شناور:}$$

* محاسبه شعاع ژیراسیون شناور

برای محاسبه شعاع ژیراسیون (در حرکت رول) باید ممان هریک از جرم‌های موجود در شناور را مطابق شکل ۲ حول محور طولی گذرنده از مرکز ثقل، به صورت زیر محاسبه کرد که از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$r^2 = z_1^2 + y^2$$

$$K^2 = \frac{m_1.r_1^2 + m_2.r_2^2 + \dots + m_n.r_n^2}{M}$$



شکل ۲: محاسبه T برای هر یک از اقسام جرمی شناور

اگر توزیع جرمی شناور در دسترس نباشد، به عنوان یک تخمین کلی و غیر دقیق می‌توان از رابطه زیر برای کشتی‌های تجاری استفاده کرد:

$$K \approx 0.3B$$

۲- تضاد پایداری با پریود نوسانات غلتش

از فرمول استخراج شده پریود نوسانات، ملاحظه می‌گردد که T با عکس GM متناسب است و این بدین معنی است که هرچه شناور پایدارتر باشد (GM بزرگتر باشد)، پریود نوسانات کوچکتر می‌شود (حرکات شناور تندتر می‌شود) و در نتیجه راحتی و آرامش شناور کمتر می‌شود. بدین جهت اگر GM شناور بزرگتر باشد، آن شناور را «سخت»^۱ گویند چراکه در اثر اعمال نیروی خارجی و تغییر حالت، به سرعت به حالت اولیه باز می‌گردد و دارای حرکت شدیدی می‌باشد. همچنین اگر GM شناور کوچک باشد آن شناور را «آرام»^۲ گویند. یعنی در صورت اعمال نیروی خارجی و تغییر حالت، به آرامی حرکت کرده و با سرعت کمتری به حالت اولیه باز می‌گردد که راحتی بیشتری برای خدمه به دنبال دارد. بنابراین داریم:

1 - stiff
2 - tender

◀ شناور «سخت یا سرکش»: GM بزرگ ← T کوچک ← حرکات شدید و تند ← راحتی کمتر خدمه

◀ شناور «آرام»: GM کوچک ← T بزرگتر ← حرکات آرامتر ← راحتی بیشتر خدمه

مطالب فوق با فرض ثابت بودن شعاع ژیراسیون و تغییرات GM می‌باشد. اگر تمامی پارامترها را متغیر فرض کنیم نکات زیر را باید در نظر داشت:

۱- پریود مستقل از دامنه نوسانات است چون دامنه نوسانات بسیار کوچک فرض شده‌اند.

۲- پریود رابطه مستقیم با شعاع ژیراسیون دارد.

۳- تغییرات جرم داخل شناور با دو عامل بر پریود اثر می‌گذارد: ۱- تغییر شعاع ژیراسیون، ۲- تغییر ارتفاع متاستری

♦ مثال ۱) شعاع ژیراسیون یک شناور ۶ متر و ارتفاع متاستری آن ۵/۰ متر است. پریود نوسانات آن برابر است با:

$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{g \cdot GM}}$$

$$T = \frac{2\pi \times 6}{\sqrt{9.81 \times 0.5}} = 17.02(\text{second})$$

♦ مثال ۲) یک شناور دارای جابجایی ۱۰۰۰۰ تن و $GM = ۰.۵$ متر می‌باشد. پریود حرکت رول این شناور ۲۰ ثانیه است. اگر جرمی ۵۰ تنی از ارتفاع ۱۴ متری بالای مرکز گرانش برداشته و از شناور خارج شود، پریود نوسانات جدید را به دست آورید (فرض می‌کنیم $\pi^2 = 10$).

$$T = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \cdot GM}} \quad 20 = \frac{2\pi k}{\sqrt{9.81 \times 0.5}} \quad 400 = \frac{4\pi^2 k^2}{9.81 \times 0.5} \quad k^2 = 49.05 \quad k = 7m$$

یعنی قبل از برداشته شدن جرم ۵۰ تنی، شعاع ژیراسیون برابر ۷ متر و ارتفاع متاستری

برابر ۰/۵ متر است. پس از برداشته شدن این جرم، هم شعاع ژیراسیون و هم ارتفاع متاستری به صورت زیر تغییر می کند:

تغییر محل مرکز ثقل ناشی از برداشتن جرم:

$$GG_1 = \frac{w.d}{W} = \frac{50 \times 14}{9950} \quad GG_1 = 0.07m$$

$$GM = 0.5m \text{ قبلی}$$

$$GM = 0.57m \text{ جدید}$$

$$I_0 = M.k^2 = 10000 \times 49.05 = 490500 \quad t.m^2 \text{ ممان اینرسی جرمی}$$

$$I_1 = 50 \times 14^2 = 9800 \quad t.m^2 \text{ جرم برداشته شده حول مرکز ثقل}$$

$$I_2 = I_0 - I_1 = 490500 - 9800 = 480700 \quad t.m^2 \text{ ثانویه حول مرکز ثقل}$$

اولیه

ممان ثانویه حول مرکز ثقل جدید (قضیه محورهاى موازى):

$$-W \times GG_1^2 = 480700 - 9950 \times 0.07^2 = 480700 - 49 = 480651 \quad t.m^2$$

$$M = 10000 - 50 = 9950 t \text{ پس از برداشته شدن جرم}$$

$$I = Mk^2 \quad k^2 = \frac{I}{M} = \frac{480651}{9950} \quad k = 6.95m \text{ (شعاع ژیراسیون نهایی)}$$

$$T = \frac{2\pi k}{\sqrt{g.GM}} = \frac{2\pi \times 6.95}{\sqrt{9.81 \times 0.57}} \quad T = 18.46(\text{Second})$$

درمورد این مثال بحث زیر حائز اهمیت است:

- در مثال فوق یک جرم از بالای مرکز ثقل برداشته شده که باعث افزایش GM و

کاهش k می شود.

- اگر همین جرم از پائین مرکز ثقل برداشته شود باعث کاهش GM و کاهش k می شود.

- اگر همین جرم به پائین مرکز ثقل اضافه شود، باعث افزایش GM و افزایش k می شود.

- اگر همین جرم به بالای مرکز ثقل اضافه شود باعث کاهش GM و افزایش k می شود.

یا به طور کلی می توان گفت برداشتن هر جرمی باعث کاهش k و افزودن جرم باعث افزایش k می شود و قرار دادن جرم بالای G باعث کاهش GM و برداشتن جرم از بالای G باعث افزایش GM می شود.

- اگر در یک فاصله عمودی ثابت از مرکز ثقل (مثلا بر روی یک عرشه)، جرم m به دو قسمت $m/2$ تقسیم شده و از وسط (خط مرکزی شناور) به کناره ها منتقل شود (جابجایی عرضی داشته باشد)، در این حالت GM ثابت می ماند و K افزایش می یابد که در مجموع پریود نوسانات افزایش می یابد. این نتایج در جدول زیر خلاصه شده است:

T	K	GM	حذف یا اضافه کردن جرم نسبت به مرکز ثقل (G)
کاهش	کاهش	افزایش	از بالای G
باید بررسی شود	کاهش	کاهش	از پائین G
افزایش	افزایش	کاهش	به بالای G
باید بررسی شود	افزایش	افزایش	به پائین G
افزایش	افزایش	ثابت	جابجایی عرضی جرم موجود از خط مرکزی با فاصله عمودی ثابت از G

این جدول در واقع بیانگر گزینه‌های مختلف طراح جهت اعمال تغییر بر پریود نوسانات و همچنین پایداری شناور است. جرم مذکور می‌تواند هر یک از اقلام وزنی در نظر گرفته شده در شناور باشد. بدین ترتیب طراح با تغییر چیدمانی و جانمایی اجزاء داخل بدنه به خواسته‌های مطلوب طراحی برسد.

۳- پریود طبیعی و پریود اجباری غلتش عرضی

وقتی یک نیروی خارجی به کشتی وارد می‌شود و سپس این نیرو قطع می‌گردد، انرژی پتانسیل ذخیره شده در حالت غلتیده کشتی (باصرفنظر از اصطکاک آب) به طور کامل به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. چنانکه در حالت قائم، کل انرژی آن، انرژی جنبشی است، سپس این حرکت ادامه می‌یابد تا انرژی جنبشی به پتانسیل در غلتش درجهت عکس، تبدیل شود و اگر اصطکاک وجود نداشته باشد، این نوسان تا زمان بی‌نهایت ادامه می‌یابد. هرچند که در واقعیت، اصطکاک بین بدنه و آب و انتشار موج آب، باعث میرایی نوسان می‌گردد تا انرژی اعمال شده، جذب گردد. این نوسان که تقریباً حول محور طولی گذرنده از مرکز ثقل در نظر گرفته می‌شود را «پریود طبیعی» گویند که رابطه آن در صفحات قبل ارائه شد.

از طرفی کشتی در دریا و اقیانوس، همواره در معرض امواج دریا می‌باشد که این امواج، نامنظم بوده و به طور پیوسته بر شناور وارد می‌شوند که باعث «غلتش اجباری»^۱ می‌گردد. وقتی یک پاندول با نوسان آزاد در معرض سری‌هایی از نیروی خارجی با فرکانس منظم قرار می‌گیرد، با پریود نیروهای وارد شده نوسان می‌کند و کشتی هم اگر در معرض امواج با فرکانس منظم (فرکانس تعریف شده برای طیف امواج نامنظم) قرار گیرد با همان فرکانس‌ها نوسان می‌کند. هجوم موج به دو صورت باعث غلتش اجباری شناور می‌گردد:

1 - forced oscillation یا forced rolling

۱- اختلاف ارتفاع آب اطرف بدنه ناشی از ارتفاع امواج که باعث جابجایی مرکز بویانسی می شود و کوپل بین B و G ایجاد می گردد.

۲- ذرت امواج دارای حرکت چرخشی^۱ هستند که یک نیروی گریز از مرکز دارند. این نیروهای گریز از مرکز (که بر مرکز ثقل وارد می شوند) در برخورد با شناور، نیروی بزرگی را پدید می آورند که با نیروی هیدرواستاتیکی آب (که بر مرکز بویانسی وارد می شود) یک گشتاور نیرو را تشکیل می دهند. مجموع این دو عامل باعث پریود اجباری غلتش عرضی می شود.

۴- پدیده تشدید غلتش عرضی^۲

وقتی پریود ناشی از امواج با پریود طبیعی کشتی برابر باشد، برهم نهی^۳ انرژی های غلتاننده موجود، باعث یک رول سنگین ناخواسته می گردد. در این حالت، تشخیص اینکه این رول شدید ناشی ضعف پایداری است یا پدیده تشدید غلتش عرضی (رزنانس)، بسیار مشکل است لذا اغلب به اشتباه حالت تشدید رول با ضعف پایداری معادل فرض می شود که شاید عکس آن باشد.

نکته مهم در اینجاست که کشتی های با GM کوچک، خیلی کمتر در معرض پدیده تشدید رول هستند! طبق رابطه پریود نوسانات طبیعی، هرچه GM بزرگتر باشد، پریود نوسان طبیعی کوچکتر است. مثلاً برای کشتی های با GM بزرگ که پریود کوچک باشد (۱۲ ثانیه یا کمتر)، احتمال تشدید رزنانس در امواج بزرگ اقیانوس بیشتر است. برای مثال امواج طوفان اقیانوس اطلس دارای طول موج حدود ۲۰۰ متر و پریود ۱۰-۱۱ ثانیه می باشد و احتمال تشدید حرکت بسیار زیاد است. در این شرایط یک کشتی با GM

1 - orbital

2 - Synchronous Roll

3 - supper position

کوچک، دارای پریود طبیعی بزرگتر از پریود این امواج است و کمتر با وقوع تشدید غلتش عرضی، می‌تواند اقیانوس اطلس را طی کند.

لذا اهمیت منطقه عملیاتی شناور و پریود موج‌های غالب آن دریا، برای طراحی شناور، بسیار حائز اهمیت است و باید در طراحی مؤلفه‌های پایداری لحاظ گردد.

البته در شناورهای نظامی در تعیین GM، عوامل اصلی عبارتند از: پایداری در حالت صدمه دیدگی، بادهای جانبی، دور زدن در سرعت بالا و غیره که در این صورت، مقدار GM نسبتاً بزرگ به دست می‌آید. کشتی‌های مسافربری اقیانوس پیما دارای محدوده GM کوچکتری هستند چراکه معیار اصلی، راحتی مسافری و حرکات ملایم و اندک شناور است.

بدین ترتیب می‌توان گفت کوچک بودن GM علی‌رغم داشتن عیب کاهش پایداری، از دو طریق بر راحتی خدمه و مسافری تأثیر گذار است:

۱- بزرگ بودن پریود طبیعی نوسان غلتش عرضی خود شناور

۲- کاهش احتمال بروز پدیده تشدید غلتش عرضی (رزونانس) در برابر امواج دریا

مثال (۳) رام یا سرکش بودن شناور مدل ۱ را در سناریوی وزنی ۱ بررسی نمایید.

حل: برای بررسی رام یا سرکش بودن شناور، پریود نوسانات شناور (T) را محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه T نیز باید شعاع ژیراسیون (K) شناور را با توجه به توزیع وزنی محاسبه می‌کنیم. از آنجا که شعاع هر یک از جرم‌های موجود در شناور از محور طولی گذرنده از G محاسبه می‌گردد، لذا ابتدا باید مرکز ثقل شناور را در نظر گرفت و با استفاده از رابطه زیر جدول را کامل کرد:

$$r^2 = z_1^2 + y^2$$

اقدام وزنى	وزن(t)	(m)y	z(m)	ZG	z1=abs(z-zG)	r^2	m*r^2
کاسه بدنه	655	0	4.1	5.1	1	1.00	655.0
روبناسازی	140	0.2	11	5.1	5.9	34.85	4879.0
تجهیزات داخل روبناسازی	35	0.1	11.3	5.1	6.2	38.45	1345.8
بار داخل انبارها	2275	0	4.7	5.1	0.4	0.16	364.0
موتور، ژنراتور، شافت پروانه	95	0	2.5	5.1	2.6	6.76	642.2
سایر تاسیسات موتورخانه	60	-0.37	2.9	5.1	2.2	4.98	298.6
خدمه، سوخت و آب	185	-0.1	10	5.1	4.9	24.02	4443.7
سریهای جلو	20	0	0.5	5.1	4.6	21.16	423.2
سریهای عقب	5	-0.01	0.3	5.1	4.8	23.04	115.2
سایر موارد	30	0.31	9	5.1	3.9	15.31	459.2
مجموع	3500						13625.8

$$K^2 = \frac{m_1.r_1^2 + m_2.r_2^2 + \dots + m_n.r_n^2}{M} = \frac{13625.8}{3500} = 3.9 \text{ m}^2$$

$$K = \sqrt{3.9} = 1.97$$

در سناریوی وزنی ۱، داریم $GM = 1 \text{ m}$ لذا:

$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{g.GM}} = \frac{2\pi \times 1.97}{\sqrt{9.81 \times 1}} = 3.74 \text{ s}$$

ملاحظه می‌شود که پریود نوسانات طبیعی شناور مدل ۱ در سناریوی وزنی ۱ کمتر از ۵ ثانیه بوده و شناور در این حالت وزنی دارای حرکات سخت و سرکش می‌باشد. روش رفع این حالت، تغییر جانمایی داخلی شناور یا استفاده از یکی از روش‌های کاهش غلتش است که در بخش بعد بدانها اشاره می‌شود.

۵- پریود غلتش طولی و عوامل مؤثر در آن

محدوده غلتش طولی (پیچ) از حرکت رول (که حدود ۹۰ درجه می‌باشد)، بسیار کمتر است. فرمول محاسبه پریود غلتش طولی شبیه فرمول غلتش عرضی است با این

تفاوت که شعاع ژیراسیون k_{yy} (حول محور عرضی گذرنده از مرکز ثقل) می باشد و ارتفاع متاستر طولی (GM_L) مدنظر است.

$$T = \frac{2\pi k_{yy}}{\sqrt{g.GM_L}}$$

معمولاً پریود طبیعی غلتش طولی برابر $\frac{1}{3}$ تا $\frac{2}{3}$ پریود طبیعی حرکت رول است. از آنجا که حرکات heave, pitch و yaw با هم مرتبط هستند، لذا مانند Roll نمی توان آن را به طور مستقل بررسی کرد. در این بین، وابستگی حرکات پیچ و هیو بسیار بیشتر است و تحلیل کامل حرکات در بحث seakeeping بیان می گردد.

با تغییر شکل بدنه می توان تا حد زیادی بر حرکت پیچ تأثیر گذاشت. شکل بدنه نوک تیز به راحتی باعث تشدید پیچ می شود و در عوض شکل سینه دارای «حبابی شکل» عامل مهمی در میرایی حرکت پیچ است که تا حد زیادی وابسته به حجم، شکل و موقعیت «حبابی سینه» است. در گذشته بسیار سعی شده است که با نصب بالک هایی در قسمت سینه، حرکت پیچ را کاهش دهند ولی نیروهای سنگین اسلمینگ و امواج، در اغلب موارد باعث شکسته شدن این بالک ها شده است لذا بهترین راه حل، همان شکل سینه حبابی می باشد.

در شناورهایی که خدمه در قسمت سینه قرار گرفته اند مانند زیردریایی، حرکت پیچ بسیار مضر است که البته خود شکل سینه زیردریایی، به عنوان یک «حباب سینه» بزرگ است که حرکت پیچ را میرا می کند. همچنین اگر شکل سینه زیردریایی به صورت شکل سینه کشتی باشد، حرکات پیچ شدیدی را باید انتظار داشت که پدیده رزنانس حرکت پیچ نیز در آن دخیل است.

۶- پریود حرکت هیو^۱

وقتی به طور مجزا از هیو صحبت می‌شود، به این دلیل است که چندین جنبه قابل توجه دارد بخصوص حرکات سریع عمودی که برای کارکرد دستگاه‌ها و راحتی انسان حائز اهمیت است.

اگر یک جسم به زور در داخل آب فرو برده شود و نیروی خارجی به یکباره رها شود، این شناور با پریود نوسان طبیعی بالا و پایین می‌رود که به این نوع نوسان «dipping» گویند و پریود طبیعی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{12 \cdot g \cdot TPI}{\Delta}}}$$

کلیه واحدها در واحد انگلیسی است.

TPI: ton per inch (که معادل TPC در واحد SI است). این پارامتر بیان کننده مقدار بار لازم (برحسب تن) برای فرو رفتن شناور در داخل آب (به اندازه ۱ اینچ یا ۱ سانتی‌متر) است.

اگر حرکت dipping به صورت پریودی توسط نیروی خارجی مانند موج تکرار شود، این حرکت را «heaving» گویند که پریود آن، برآیند پریود طبیعی و پریود موج القایی است. پریود غالب، همان پریود موج است ولی اثر میرایی آن، ناشی از شکل بدنه است. مهمترین اثر این حرکت بر شتاب عمودی است.

۷- حرکت یاو^۲

حرکت «یاو» عبارتست از چرخش شناور در صفحه افقی، حول مرکز ثقل. این حرکت، برآیند سه عامل است:

- عدم تعادل فشار استاتیکی روی بدنه

1 - heave

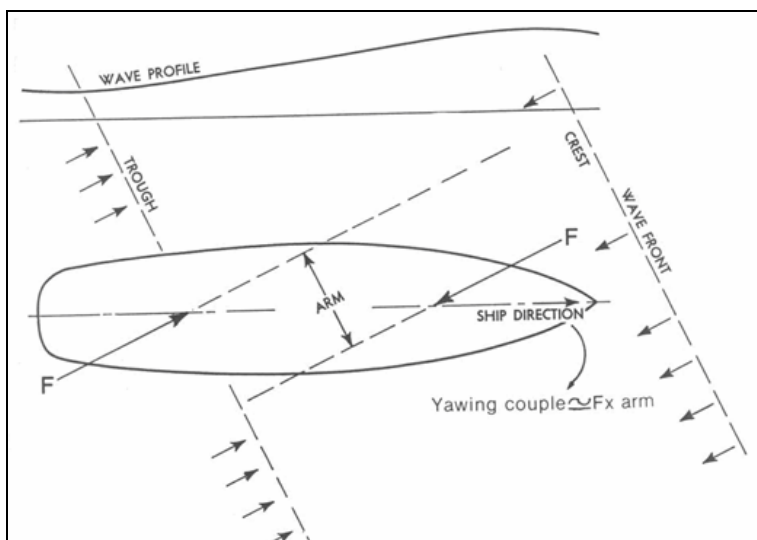
2 - yawing

۲- حرکت چرخشی ذرات موج

۳- عمل ژيروسکوپي^۱

پروفیل موج در دو طرف بدنه یکسان نیست و توزیع فشار متفاوت است لذا مرکز فشار (مرکز بویانسی) از نظر طولی و عمودی در دو طرف بدنه متفاوت است و تغییر می‌کند و باعث ایجاد ممان حرکت «یاو» می‌گردد. از آنجا که این نیروها همواره دریا تغییر می‌کنند، مقدار و جهت نیروهای اعمالی که حرکت یاو را ایجاد می‌کنند همواره متغیر است و باعث نوسان حرکت یاو می‌شود. علاوه بر توزیع موج که یک عامل شبه استاتیکی است، حرکت چرخشی ذرات آب در موج نیز بر حرکت یاو مؤثر است. در قله و قعر موج، جهت حرکت چرخشی ذرات موج عکس یکدیگر است. طبق شکل ۳، ممان یاو بر اثر امواج بر شناور وارد می‌شود که برابر است با:

$$M = F \times ARM$$



شکل ۳: اثر حرکت امواج بر حرکت یابو

در این حرکت، اعمال کنترل توسط سکان بسیار دشوار است چراکه در نیمی از طول موج، جهت نیروها برعکس نیمی دیگر است و نمی‌توان فقط با یکسو قرار دادن سکان، کنترل لازم را اعمال کرد. برای مقابله با این اثرات، اقدامات زیر را می‌توان انجام داد:

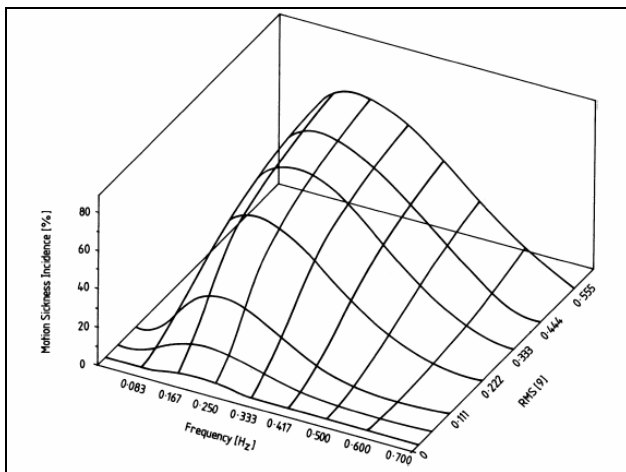
- ۱- سکان پشت پروانه باشد که بتواند از سرعت سیال خروجی از پروانه استفاده کند.
 - ۲- شیب پاشنه شناور برای اینکه اثرات موج را کمتر تجربه کند.
 - ۳- استفاده از چندین پروانه (در صورت نیاز)
- وقتی شناور به طور همزمان در حال پیچ و رول کردن است، دوران در این دو صفحه، باعث تعمیم حرکت در صفحه سوم می‌شود که حرکت یاو را باعث می‌شود. ممانی که این حرکت را ایجاد می‌کند را ممان ژيروسکوپی و عمل انتقال حرکت به صفحه سوم را «عمل ژيروسکوپی» گویند.
- ممان ژيروسکوپی و حرکت ناشی از آن، چندان قابل ملاحظه نیست.

۸- نسبت دریازدگی با پرورد نوسانات

اغلب افراد دریانورد، در اثر حرکات شدید شناور دچار امراض و ناراحتی‌های زیر می‌گردند:

- ۱- کاهش قوای ذهنی و تمرکز حواس
- ۲- سرگیجه و تهوع (دریازدگی)
- ۳- عدم تسلط بر فعالیت‌های فیزیکی

این موارد برای مسافری عادی بسیار شدیدتر است و بخصوص در شناورهای اقیانوس‌پیمای تفریحی و توریستی باید به شدت از آنها اجتناب کرد. علاوه بر ناراحتی‌های انسانی، جابجایی اجسام داخل شناور، مشکل شدن تردد، صدمه دیدن دستگاه‌ها و غیره نیز از عوامل نامناسب حرکات شدید شناور است. تاکنون بررسی‌ها نشان داده است که حرکات رول^۱ و پیچ^۲ بیشترین تأثیر را بر دریازدگی خدمه دارند ولی هنوز مشخص نیست که مشخصات این حرکات (فرکانس، دامنه حرکت، سرعت و شتاب)، چه سهمی در دریازدگی دارند ولی به طور قطع می‌توان گفت «فرکانس» حرکات، بیشترین تأثیر بر دریازدگی خدمه را دارد. شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای شناور نیز اثرات متفاوتی را دارند. در این بین، حرکات رول و پیچ دارای شتاب زاویه‌ای و بیشترین اثرات را دارند و البته شتاب خطی حرکت هیو نیز حائز اهمیت است. در شکل ۴ فرکانس حرکات رول و اثر آن بر دریازدگی به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار تغییرات فرکانس حرکت رول بر دریازدگی

همانطور که ملاحظه می‌گردد نسبت فرکانس حرکت با دریازدگی به صورت غیرخطی تغییر می‌کند و دارای یک نقطه ماکزیمم می‌باشد. در این نقطه ماکزیمم بیشترین احتمال دریازدگی اتفاق می‌افتد که در حدود فرکانس 0.2 هرتز می‌باشد که معادل پریود حرکات 5 ثانیه می‌باشد. در این پریود، بیشترین احتمال دریازدگی خدمه (حتی دریانوردان خبره) وجود دارد چراکه در اثر تلاطم پیوسته شناور، سیستم دفاعی و گوارشی بدن مختل می‌گردد و انسان کارایی خود را از دست می‌دهد.

طراحی شناور باید به گونه‌ای باشد که پریود نوسانات یا از 5 ثانیه خیلی کمتر یا خیلی بیشتر باشد تا بتوان از نقطه اکسترمم دریازدگی دور شود. البته امکان کاهش پریود از 5 ثانیه معمولاً وجود ندارد چراکه همانطور که گفته شد هم پریود طبیعی و هم پریود اجباری ناشی از امواج در این زمینه مؤثر هستند و لذا خیلی بعید است که بتوان اغلب شرایط کاری شناور را به کمتر از 5 ثانیه رسانید و از طرفی در این محدوده، کارکرد دستگاه‌ها نیز دچار اشکال می‌گردد.

در نتیجه بهترین راه، افزایش پریود نوسانات به بیش از 5 ثانیه است که هرچه از این مقدار بیشتر باشد، هم احتمال دریازدگی و هم خرابی دستگاه‌ها به حداقل می‌رسد.

محدوده پریود قابل تحمل برای انسان بدون دریازدگی و اثرات جانبی:

غیر قابل تحمل برای انسان $\rightarrow T < 5 \text{ Sec.}$

فقط برای دریا نوردان قابل تحمل است (شناور سرکش) $\rightarrow 5 < T < 10 \text{ Sec.}$

به راحتی قابل تحمل است (شناور رام) $\rightarrow T > 10 \text{ Sec.}$

۹- کارکرد دستگاه‌ها در محدوده حرکات شناور

کلیه دستگاه‌ها و تجهیزات شناور باید بتوانند در حرکات yaw، pitch، Roll و Heave کارایی موفقی داشته باشند. برای پرهیز از طراحی غیرمهندسی^۱، حرکات شناور

که مؤثر بر کارکرد تجهیزات است به دو دسته تقسیم می‌گردد:

۱- حرکاتی که در آنها دستگاه‌ها باید کارایی کامل و بدون وقفه‌ای داشته باشند و هیچ گونه افت راندمان نداشته باشند (مانند تجهیزات کنترل مسیر و حرکت شناور).

۲- حرکاتی که در آنها دستگاه‌ها مجاز هستند با افت راندمان، به کارکرد خود ادامه دهند. (مانند ماشین‌آلات فرعی نظیر سیستم تهویه)

درجدول زیر مشخصات نوسانی یک شناور نظامی تناژ متوسط که کلیه دستگاه‌ها و تجهیزات باید بتوانند بدون وقفه کار کنند ارائه شده است. مقادیر زیر برای حالت دریایی^۱ استخراج شده و مقادیر شتاب (از حالت محاسباتی) در ۱/۵ ضرب شده است تا ضریب اطمینان کافی حاصل شود.

	Roll	Pitch	Yaw	Heave
Period (s)	10	5-6.5		7
Amplitude ($\pm$)	18°	8°		3.5 m
Acceleration ($\circ/s^2$)			1.75	

بخش ۲-۲۷: روش‌های کاهش غلتش شناور

هر شناور متناسب با جابجایی و مقدار پایداری در محدوده خاصی از تلاطم دریا^۲ می‌تواند به طور ایمن حرکت کند. اثراتی مانند نیروی امواج، جریانهای دریایی و باد باعث غلتش شناور می‌شوند که مشخصات مختلف غلتش از قبیل پریود و دامنه غلتش نباید از حد مجاز تعریف شده برای شناور تجاوز کند که دو عامل اصلی در آن در نظر گرفته می‌شود:

۱) راحتی انسان و کارکرد ایمن خدمه که در کشتی‌های مسافربری، از اهمیت خاصی برخوردار است. عامل اصلی در این مورد، پریود نوسانات است.

۲) حداکثر زاویه غلتش قابل تحمل دستگاهها و تجهیزات که در این مورد، دامنه نوسانات از اهمیت خاصی برخوردار است.

لذا اگر شناور در محدوده کاری خود (مطابق با سناریوی کاری تعریف شده)، مجبور به عبور از مناطق دریایی بسیار متلاطم در فصل‌های خاصی باشد که میزان پایداری شناور برای غلبه بر آنها مناسب نیست باید یکی از روشهای کاهش غلتش زیر را استفاده کرد:

۱- بالچه‌های کنار بدنه^۳

۲- بال‌های ضد غلتش^۴

۳- مخازن ضد غلتش^۵

۴- ژيروسکوپ ضد غلتش^۶

1- منبع: [4], [5], [15]

2 - Sea force

3 - Bilge Keel

4 - Controllable fin – stabilizer fin

5 - Anti-Rolling tanks

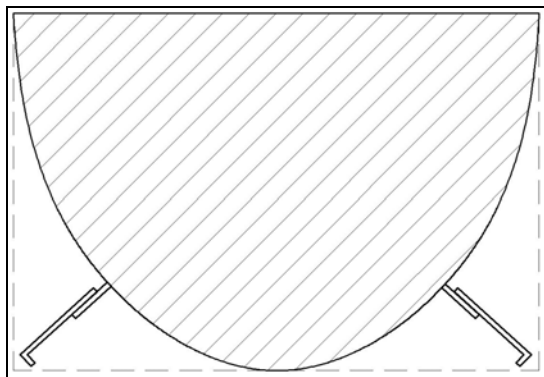
6 - Gyrostabilizer

هر یک از موارد فوق مورد بررسی قرار می گیرند.

۱- بالچه‌های کنار بدنه

کشتی‌های قدیمی در زیر بدنه دارای یک کیل به صورت تیر بلندی بودند که این کیل اثر کاهش غلتش عرضی شناور را نیز انجام می داد.

پس از ساخته شدن کشتی‌های فلزی، برای کاهش غلتش، تیغه‌هایی به کنارها در قسمت پایین بدنه جوش داده شدند که به این تیغه‌ها «بالچه‌های کنار بدنه» می گویند. این بالچه‌ها به صورت عمود بر پوسته در طرفین بدنه نصب می شوند و به گونه‌ای قرار می گیرند که از حداکثر عرض بدنه تجاوز نمایند (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت نصب بالچه بر طرفین زیر بدنه

این بالچه‌ها به دو صورت کلی هستند:

۱) بالچه به صورت تیر نازک (شکل ۱) که از دو قسمت مجزا تشکیل شده است. یک قسمت که به بدنه جوش شده و استحکام زیادی دارد و قسمت دوم که به قسمت اول جوش شده و در صورت برخورد با مانع، قسمت دوم صدمه دیده و به راحتی قابل جدا شدن است و به بدنه شناور صدمه‌ای وارد نمی شود. این نوع بالچه‌ها هزینه ساخت و نصب اندکی دارند و در شناورهای کوچک بر راحتی نصب می شوند.

۲) بالچه‌ها با مقطع V شکل که داخل آن چوب قرار می‌گیرد تا در برابر ضربه دوام بیشتری داشته باشند. این ضربه ممکن است در حال به داک بردن یا به گل نشستن اتفاق افتد.

این بالچه‌ها معمولاً از وسط تا $\frac{2}{3}$ طول بدنه (به سمت عقب) امتداد می‌یابند و حدود ۲۰-۳۰ درصد از غلتش بدنه را کاهش می‌دهند.

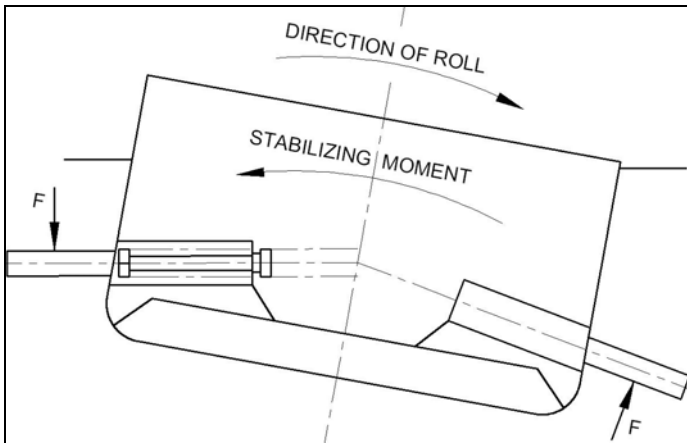
وقتی شناور در حال حرکت می‌باشد، نیروی لیفت وارد شده بر روی این بالچه‌ها اثر مضاعفی بر پایدار ماندن شناور در برابر امواج و حرکات شناور دارد.

ارتفاع این بالچه‌ها در کشتی‌های اقیانوس‌پیما معمولاً بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلیمتر است. از عوامل بسیار مؤثر و مهم در تعیین ارتفاع این بالچه، خارج شدن از لایه مرزی سیال می‌باشد که بتواند اثر ضد غلتش مؤثری داشته باشد. در مجموع، این روش، رایج‌ترین و ارزاترین روش کاهش غلتش عرضی شناور است.

۲- بالک‌های ضد غلتش

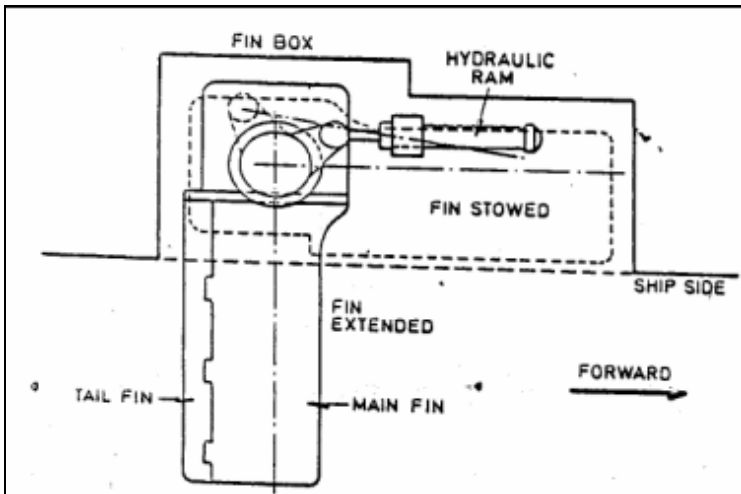
این بالکها همانند زواید بلندی از کناره‌های زیر بدنه بیرون زده‌اند و برای کاهش بسیار مؤثر غلتش عرضی بکار می‌روند و اگر به خوبی طراحی شوند، کاهش غلتش به اندازه ۹۰ درصد را به دنبال دارند. این بالکها بسیار پرهزینه هستند و معمولاً در کشتی‌های مسافربری و کانتینربر استفاده می‌شوند. این بالکها از حداکثر عرض بدنه تجاوز می‌کنند لذا برای جلوگیری از تصادم این بالکها با شناورهای دیگر و پایه‌های اسکله، در مواقعی که مورد نیاز نباشند به دو نوع به داخل بدنه جمع می‌شوند:

۱) بالک کشویی: به صورت کشویی به داخل بدنه کشیده می‌شود (شکل ۲).



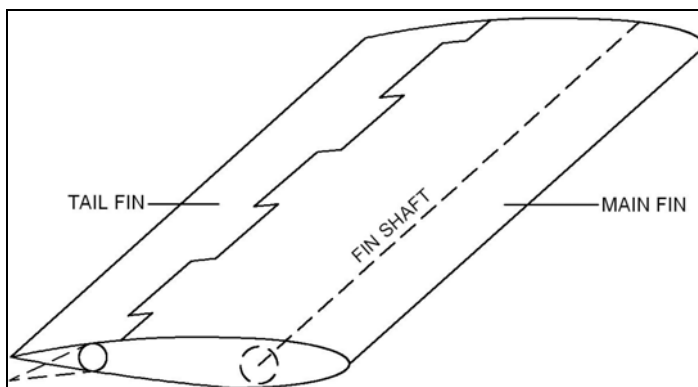
شکل ۲: بالک کشویی ضد غلتش

۲- بالک لولایی : به صورت لولایی به داخل بدنه جمع می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳: بالک جمع‌شونده ضد غلتش

- بالکها دارای مقطع هیدروفویل بوده و سیستم تحریک این بالکها به صورت هیدرولیک می‌باشد. هر بالک از دو قسمت تشکیل شده است (شکل ۴):



شکل ۴: بالک‌های ضد غلتش دارای مقطع فویل بوده و از دو قسمت اصلی و بالچه تشکیل شده‌اند.

(۱) قسمت اصلی بالک که تا زاویه حدود ۲۰ درجه می‌تواند دوران کند.

(۲) قسمت انتهایی بالک یا بالچه^۱ که به اندازه زاویه حدود ۱۰ درجه نسبت به قسمت اصلی بالک می‌تواند دوران کند.

این بالک‌ها در هنگام حرکت شناور، اثر بسیار بیشتری در کاهش غلتش دارند. مزیت عمده این روش کارایی بسیار مؤثر در کاهش حرکت رول است و عیب عمده آن نیز اشغال فضای زیادی از داخل بدنه برای به داخل کشیدن بالک و مکانیزمهای تحریک آن می‌باشد. از طرف دیگر وزن بسیار زیادی را بر شناور تحمیل می‌کند.

۳- مخازن ضد غلتش^۲

مخازن ضد غلتش از مواردی هستند که بین ۳۵ تا ۵۰ درصد غلتش‌های شناور را کاهش می‌دهند. خاصیت ضد غلتش بودن این مخازن ارتباطی با سرعت حرکت شناور ندارد. لذا در کشتی‌هایی که برای مدت طولانی در یک محل توقف دارند می‌تواند مؤثر باشد. مانند کشتی‌های مسکونی کنار سکوها دریاپی و کشتی‌های حفاری.

1 - flap

2 - Anti-Rolling tanks

این مخازن از سطح آزاد سیال برای کاهش غلتش استفاده می‌کنند. سطح آزاد مخازن دو اثر مهم بر شناور دارد:

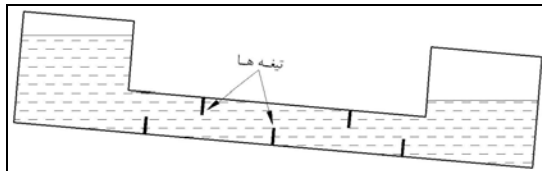
(۱) اثر سطح آزاد مخازن باعث کاهش پایداری می‌شود به طوری که در شناورهایی که دارای مخازن ضد غلتش هستند باید مقدار پایداری به حدی باشد که اثر سطح آزاد مخازن باعث حد بحرانی پایداری نگردد.

(۲) جابجایی سیال داخل مخازن از لختی و تأخیر فاز نسبت به جابجایی شناور برخوردار است. این تأخیر فاز به میزان آزادی سیال برای جابجا شدن بین دو ناحیه از مخزن بستگی دارد. در مؤثرترین حالت، این تأخیر فاز به اندازه نصف پریود غلتش شناور می‌باشد. بدترین حالت نیز «هم فاز» شدن با پریود غلتش شناور است که نه تنها باعث کاهش غلتش نمی‌گردد بلکه دامنه غلتش را شدیدتر می‌نماید. لذا برای ایجاد تأخیر فاز مناسب، مخازن ضد غلتش را معمولاً به شکل U می‌سازند که در قسمت بالا یا پایین بدنه قرار می‌گیرند.

سه نوع مخزن ضد غلتش برای شناورها می‌توان برشمرد:

(۱) مخزن معمولی^۱:

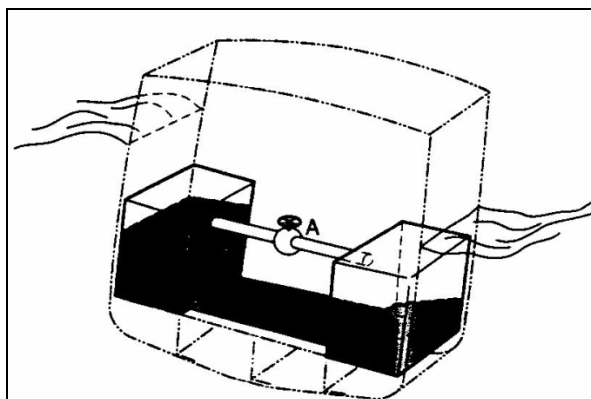
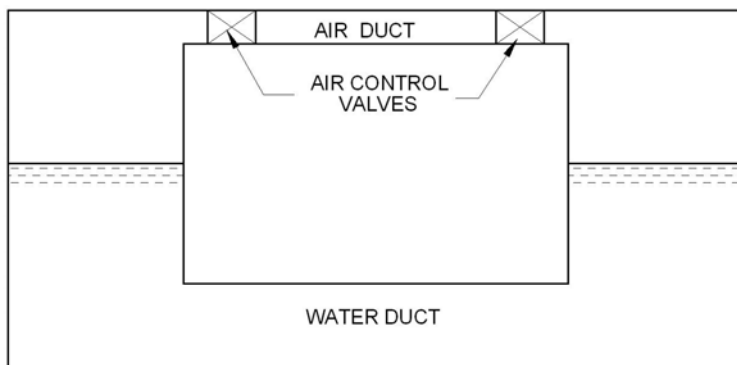
این مخازن مطابق شکل دارای دو بال به شکل U می‌باشند که در طول محدودی از بدنه (بالا یا پایین بدنه) قرار می‌گیرد. در داخل کانال ارتباطی بین این مخازن نیز تیغه‌هایی قرار گرفته‌اند که بتوانند از غلتش آزاد سیال به دو بال مخزن جلوگیری و تأخیر فاز مورد نیاز را ایجاد کنند.



شکل ۵: مخزن معمولی ضد غلتش

(۲) مخزن کنترل شده معمولی^۱:

این مخازن دارای شکلی شبیه به مخازن معمولی فوق می‌باشند با این تفاوت که در قسمت فوقانی مخازن، یک کانال هوا (ونت^۲ هوای مخازن) وجود دارد که این کانال هوا دارای یک یا دو شیر کنترل هوا می‌باشد (شکل ۶). می‌دانیم که در یک مخزن بسته نیمه‌پر از سیال که بالای آن هوا قرار گرفته است، اگر این هوا به راحتی اجازه تخلیه یا انتقال پیدا نکند، ورود آب به داخل مخزن نیز دشوار می‌شود که تخلیه هوای داخل مخزن برای وارد شدن سیال به آن را در اصطلاح «تهویه شدن مخازن» گویند.

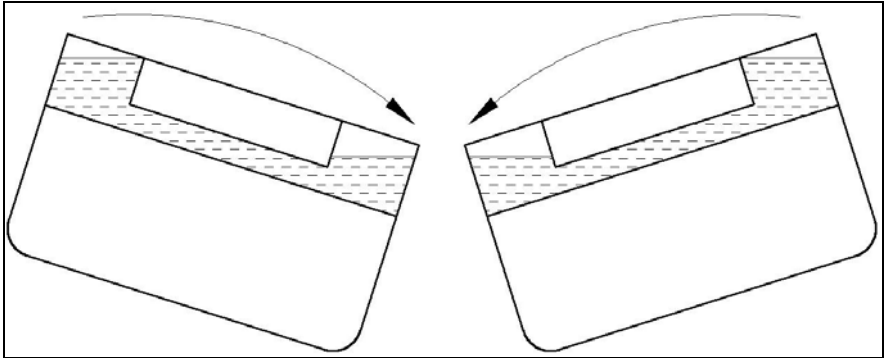


شکل ۶: مخازن ضد غلش کنترل شده معمولی

1 - Passive Controlled tanks

2 - vent

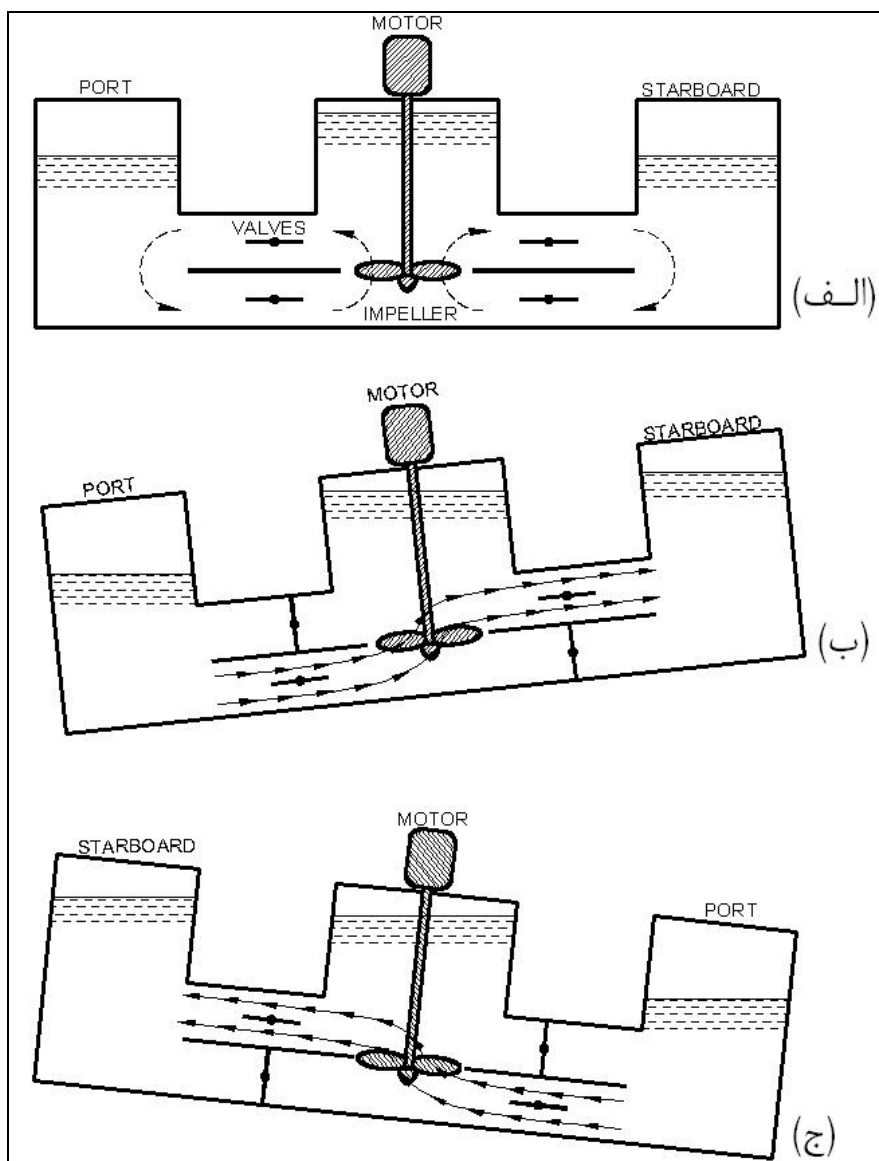
در این حالت ایجاد تأخیر فاز مناسب بر عهده شیرهای هوا می‌باشد. بهترین حالت کاهش غلتش در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که ممان ایجاد شده توسط سیال داخل مخازن با تأخیر فاز ۱۸۰ درجه باعث کاهش غلتش عرضی شناور می‌شود.



شکل ۷: تأخیر فاز ۱۸۰ درجه مخازن در کاهش غلتش

۳) مخازن کنترل شده فعال^۱:

مقطع این مخازن که به شکل W یا دو حرف U در کنار هم می‌باشد، دارای یک پروانه در قسمت میانی (بال میانی) می‌باشد (شکل ۸). این پروانه توسط یک موتور الکتریکی یا هیدرولیکی تحریک و کنترل می‌شود. این پروانه وظیفه ایجاد تأخیر فاز بین حرکت سیال داخل مخازن و غلتش شناور را بر عهده دارد.



شکل ۸: مخازن کنترل‌شده و وضعیت باز و بسته بودن شیرها

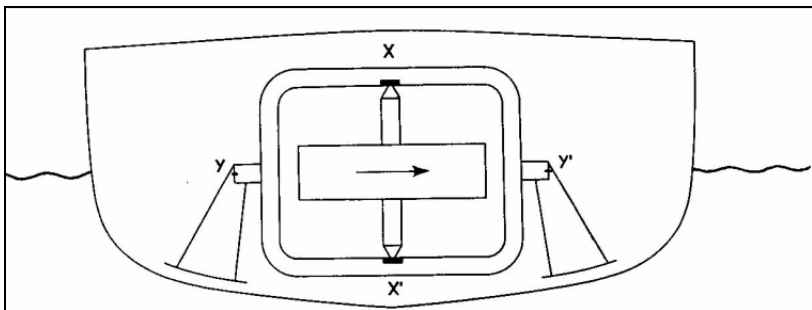
قسمت تحتانی مخازن توسط یک صفحه تخت به دو کانال تقسیم شده است که هر کانال نیز دارای یک شیر ارتباطی می باشد. حالت (الف) مربوط به حالت قائم شناور می باشد که پروانه همواره در حال کار کردن و کلیه شیرهای ارتباطی مخازن باز است.

وقتی شناور به سمت چپ غلتش می کند، حالت (ب) اتفاق می افتد و مطابق شکل، شیرها به گونه ای باز می شوند که آب داخل مخازن از سمت چپ به راست انتقال یابند. در غلتش شناور به سمت راست نیز عکس این عمل اتفاق می افتد (حالت ج) به گونه ای که غلتش عرضی شناور مهار شود.

این روش نیازمند سیستم کنترل کامپیوتری می باشد، به گونه ای که حرکت موتور پروانه و شیرها را به صورت خودکار کنترل کند. این روش دارای هزینه بالاتری نسبت به مخازن قبل می باشد ولی اثر بیشتری بر کاهش غلتش عرضی شناور دارد.

۴- ژیرسکوپ ضد غلتش

اصول کارکرد ژیرسکوپ ضد غلتش براساس تئوری ژیرسکوپ های معمولی می باشد. مطابق شکل ۹ ژیرسکویی را در نظر بگیرید که در داخل قاب ژیرسکوپ حول محور xx' در حال دوران است. این ژیرسکوپ به بدنه کشتی از طریق محور yy' ثابت شده است. حال فرض کنید کشتی در معرض یک ممان خارجی قرار گرفته و حول محور طولی، غلتش عرضی (رول) انجام می دهد.



شکل ۹: نحوه قرارگیری ژیرسکوپ ضد غلتش در داخل شناور

با این غلتش محور ژيروسکوپ نیز تغییر زاویه می‌دهد و برآیند اثر نیروهای وارده ژيروسکوپ، به برگشت شناور به حالت اولیه خود کمک می‌کند. این نیروها براساس تئوری ژيروسکوپ قابل تحلیل می‌باشند. ژيروسکوپ‌ها دارای دو نوع فعال و غیر فعال هستند و معمولاً در شناورهای متوسط و کوچک نصب می‌شوند مانند کشتی‌های راهنما^۱ و شناورهای تفریحی کرانه‌پیما.

علت این امر این است که ژيروسکوپها معمولاً در اندازه‌های خیلی بزرگ ساخته نمی‌شوند که بتوانند بر روی شناورهای اقیانوس‌پیما نصب شده و بر کاهش غلتش نیز مؤثر باشند. تاکنون بزرگترین شناوری که بر روی آن ژيروسکوپ ضد غلتش نصب شده است، کشتی لوکس مسافری ایتالیایی conte di savoia با تناژ بیش از ۴۰ هزار تن می‌باشد. این کشتی دارای سه ژيروسکوپ ضد غلتش با قطر قسمت دوار حدود ۴ متر است. وزن هر ژيروسکوپ ۲۳۰ تن! و مجموع ژيروسکوپ‌ها دارای وزن ۶۹۰ تن (یعنی حدود ۱/۷ درصد جابجایی کل کشتی!) هستند.

ژيروسکوپها معمولاً حدود ۶۰ درصد و در بهترین کارایی تا ۸۰ درصد از غلتش عرضی شناور را می‌توانند کاهش دهند. اندازه و جرم ژيروسکوپ‌ها و تعداد آنها بر کاهش غلتش شناور بسیار مهم هستند و از آنجا که ژيروسکوپها معمولاً دارای جرم خیلی زیاد نیستند لذا معمولاً در شناورهای کوچک و متوسط نصب می‌شوند که کارایی لازم را داشته باشند. در شناورهای بزرگ معمولاً از روش مخازن و بالکهای ضد غلتش استفاده می‌شود. ابعاد تقریبی ژيروسکوپ نسبت به بدنه شناور را می‌توان در شکل ۹ ملاحظه کرد.

مزیت عمده این روش کارایی بسیار زیاد در کاهش غلتش عرضی و عیب آن هزینه زیاد نصب و نگهداری می‌باشد.

۵ - روشهای کاهش غلتش طولی

برای کاهش غلتش طولی شناور اقدام مؤثری همانند روشهای کاهش غلتش عرضی نمی‌توان انجام داد چرا که ممان‌های طولی خیلی بزرگتر از ممان‌های عرضی هستند و براحتی نمی‌توان بر آنها غلبه کرد. دو روش اصلی در کاهش غلتش طولی مؤثر است:

۱) بالکهای سینه: در برخی مواقع که حرکات غلتش طولی شناور بسیار شدید باشد می‌توان از بالکهایی در منتهی‌الیه جلوی سینه استفاده کرد. این بالکها در کاهش غلتش طولی شناور بسیار مؤثر هستند ولی دو ایراد اصلی دارند:

اولاً: باعث ایجاد ارتعاش زیاد در بدنه می‌شوند و ثانیاً در بسیاری موارد این بالکها در اثر حرکات شدید سینه دچار شکست شده‌اند لذا باید دارای سازه بسیار محکم و سنگین باشند.

۲) حبابی سینه^۱: حبابی سینه دارای کاربردهای هیدرودینامیکی زیادی است ولی در کنترل غلتش طولی نیز بسیار مؤثر است چرا که به عنوان یک حجم بویانسی بزرگ در منتهی‌الیه جلوی سینه می‌باشد که ممان طولی زیادی برای برگرداندن شناور در حالت اولیه ایجاد می‌کند.

در حالت کلی، شناورهایی که دارای سینه باریک و تیز (همانند کشتی‌های نظامی) هستند دارای غلتش طولی (حرکات پیچ) شدیدتری نسبت به شناورهای دارای سینه توپر (همانند نفتکش‌ها) هستند.

بخش ۲-۲۸: ۱ انجام آزمایش کجی

انجام آزمایش کجی^۲ از مهمترین آزمایشاتی است که پس از ساخته شدن شناور انجام می‌شود. در این بخش مباحث زیر در مورد این آزمایش بیان می‌شوند:

- هدف از انجام آزمایش کجی
- تئوری انجام آزمایش
- محاسبه KG در آزمایش کجی
- روش خواندن زاویه غلتش
- سایر دستاوردهای آزمایش کجی
- نکات مهم در انجام آزمایش کجی

۱- هدف از انجام آزمایش کجی

هدف اصلی از انجام این آزمایش، تعیین محل دقیق مرکز گرانش (KG) می‌باشد چراکه در حین ساخت شناور معمولاً تعیین دقیق وزن‌ها و مراکز وزن، امکان پذیر نیست.

در این آزمایش هم مرکز عمودی و هم مرکز طولی مرکز ثقل قابل تعیین است ولی از آنجا که پایداری عرضی شناور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا محاسبه دقیق KG (مرکز عمودی ثقل) دارای اهمیت خاصی است که در این آزمایش به دقت تعیین می‌شود.

از موارد دیگری که در این آزمایش قابل تعیین است، وزن سبک^۳ شناور می‌باشد. همچنین اگر کشتی دارای زاویه لیست^۱ باشد، این زاویه در حین آزمایش مشخص

۱- منابع: [4]، [7]، [14]

2 - Inclining test
3 - light weight

خواهد شد. پس از تعیین KG براحتی می توان ارتفاع متاستری (GM) را نیز تعیین کرد و تعیین دقیق ارتفاع متایتتری عرضی از اهمیت خاصی در تحلیل پایداری برخوردار است.

۲- تئوری انجام آزمایش

همانطور که می دانیم، شناور در مقابل هر ممان هیل دهنده^۲ وارده بر شناور، ممانی عکس آن را وارد می کند که شناور را به جای اولیه خود بازگرداند (البته در شناورهای دارای پایداری مثبت) که بدان ممان بازگرداننده^۳ گویند. در این آزمایش، ممان هیل دهنده به وسیله جابجایی وزنه ها بر روی شناور انجام می گیرد که این ممان برابر است با:

$$HM=w.x$$

w: وزن وزنه های هیل دهنده

x: جابجایی عرضی وزنه

وزن w باید در حدود ۲ درصد وزن سبک شناور باشد. لذا برای یک شناور ۱۰۰ تنی، وزن وزنه های جابجا شونده (w) در حدود ۲۰۰۰kg باید باشد. مقدار این وزنه ها باید بتواند زاویه هیل در حدود ۲-۳ درجه ایجاد کند لذا اگر وزن وزنه ها کمتر هم باشد، با افزایش فاصله جابجایی باید بتوان این مقدار زاویه هیل را ایجاد کرد.

معمولاً در استانداردهای دریایی زاویه کمتر از ۲ درجه توصیه نمی شود چراکه مقدار آن بسیار کم بوده و خواندن این زاویه از شاقول (یا پاندول) مشکل است و در نتیجه خطای انجام آزمایش افزایش می یابد.

1 - list angle

2 - Heeling Moment

3 - righting moment

زاویه بیشتر از ۳ درجه نیز توصیه نمی‌شود هرچند که خواندن آن راحت‌تر است ولی دو شرط اساسی آزمایش را تحت الشعاع قرار می‌دهد:

۱- ثابت بودن مرکز متاستر:

برای انجام آزمایش زاویه هیل باید به حدی باشد که نقطه M ثابت بماند چراکه در زوایای غلتش زیاد، مرکز متاستر، یک مسیر منحنی را طی می‌کند و نقطه ثابتی نیست. در تحلیل پایداری نقطه متاستری M، تا حدود ۸ درجه ثابت تخمین زده می‌شود که برای آزمایش کجی قابل قبول نیست و برای داشتن دقت کافی، زاویه ۲ درجه توصیه شده است. به عبارت دیگر، زاویه غلتش باید به حدی باشد که بتوان مساحت سطح آبخور را ثابت در نظر گرفت.

۳ - تغییر مرکز ثقل فقط بر اثر حرکت وزنه‌ها

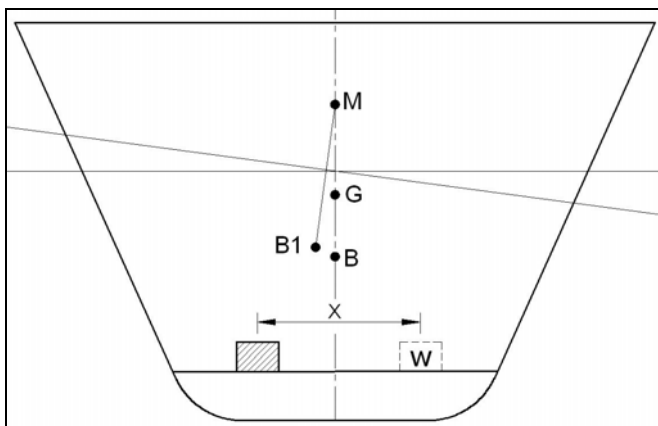
در غلتش شناور یا تغییر مرکز ثقل آن، فقط باید حرکت وزنه‌ها دخیل باشند و جابجایی ناخواسته جرم‌های درون شناور، آزمایش را با نتایج مردودی مواجه خواهد کرد. لذا برای حصول اطمینان، زاویه ۲ درجه می‌تواند اطمینان بخش باشد چراکه جسم‌هایی که در جای خود ثابت نشده‌اند و به راحتی از محل خود حرکت می‌کنند نیز تا زاویه ۲ درجه هیچگونه حرکتی نخواهند داشت. البته اجسام آویزان درون شناور باید در حین انجام آزمایش حذف شوند یا اثر منفی آنها بر کاهش GM دقیقاً محاسبه گردد. همچنین اثر سطح آزاد مخازن نیز باید لحاظ گردد.

ممان هیل دهنده ایجاد شده باید به وسیله ممان بازگرداننده شناور جبران شود. ممان بازگرداننده برابر است با:

$$RM = GM \cdot \sin \phi \cdot \Delta = GZ \cdot \Delta$$

$$RM = HM$$

$$GM \sin \phi \Delta = w.x \Rightarrow GM = \frac{w.x}{\Delta \sin \phi}$$



شکل ۱: جابجایی وزنه‌های انجام آزمایش و غلتش شناور

$$GM = \frac{w.x}{\Delta \sin(\phi)} \quad \text{رابطه}$$

بدین معناست که هر مقدار وزنه که به مقدار دلخواه x جابجا شود و زاویه ϕ را ایجاد کند باید یک GM ثابت را نتیجه دهد (برای زوایای غلتش کوچک).

ولی از آنجا که همواره مقادیر تجربی با خطا مواجه هستند، این مقادیر یکسان به دست نمی‌آیند لذا از چندین حالت مختلف استفاده می‌شود و در نهایت مقدار میانگین GM به دست آمده مورد پذیرش واقع می‌شود.

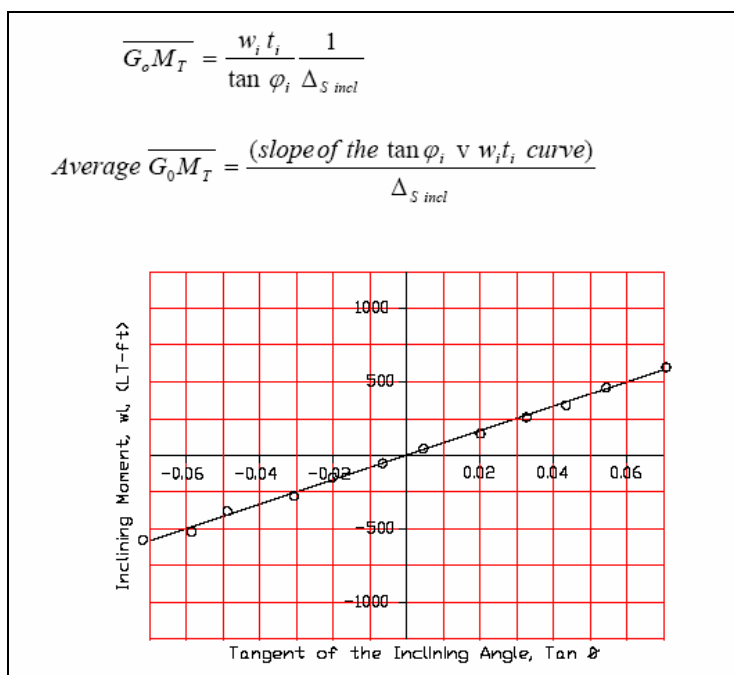
(نحوه خواندن ϕ در قسمت مربوطه آمده است).

۴ - نحوه استخراج نتایج

برای استخراج نتایج، نموداری تشکیل داده می‌شود که محور عمودی آن ممان هیل دهنده $(w.x)$ می‌باشد و محور افقی آن $\sin(\phi)$ می‌باشد. می‌دانیم که در مجموع سه

متغیر (φ, x, w) و یک مقدار ثابت (Δ) داریم. لذا GM وابسته به سه پارامتر فوق تغییر می‌کند. اگر آزمایش برای چند حالت جابجایی وزنه‌های آزمایش انجام شود، نقاط متعددی روی نمودار بدست می‌آید که می‌توان یک خط شیب‌دار بهینه از آنها عبور داد. اگر نتایج آزمایش، بدون خطا باشد، کلیه نقاط دقیقاً روی یک خط شیب‌دار خواهند بود ولی بدلیل خطاهای آزمایش، معمولاً این نقاط روی یک خط نیستند و باید یک خط به صورت بهینه از این نقاط عبور داد. طبق رابطه زیر شیب این نمودار برابر با مقدار $(\Delta.GM)$ می‌باشد.

$$\Delta.GM = \frac{w.x}{\sin\varphi}$$



شکل ۲: استفاده از نمودار برای استخراج نتایج آزمایش

برای یادداشت کردن نتایج در حین انجام آزمایش، باید جدولی مطابق جدول ۱ تنظیم شود و در هر مرحله از انجام آزمایش (هر مرحله از جابجایی وزنه‌ها)، مقادیر

w ، x و φ یادداشت شوند. هر یک از سطرهای این جدول به منزله نقطه‌ای از نمودار شکل ۲ هستند که طبق توضیحات قبلی منجر به استخراج $\Delta \cdot GM$ می‌شود و Δ که مشخص است لذا GM تعیین می‌شود.

w	x	$M = w \cdot x$	زاویه غلتش φ	$\sin \varphi$	$\Delta \cdot GM = \frac{M}{\sin \varphi}$

جدول ۱

۵- محاسبه KG به کمک GM به دست آمده

تا اینجا مقدار GM به کمک میانگین‌گیری یا استفاده از شیب خط نمودار ترسیم شده به دست می‌آید. با استفاده از شکل زیر و روابط داده شده می‌توان KG را دقیقاً تعیین کرد.

دو روش برای محاسبه KM وجود دارد:

$$KM = KG + GM$$

$$KM = KB + BM$$

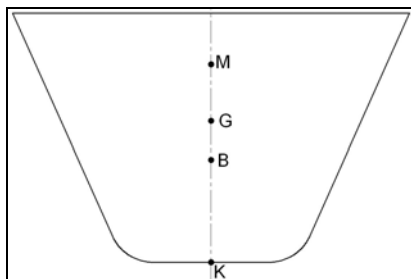
ابتدا از روش بویانسی KM را به دست می‌آوریم:

مرکز بویانسی (از نقشه‌های کامپیوتری یا روابط سیمسون به دست می‌آید) : KB

$$BM = \frac{I}{\nabla}$$

I : ممان دوم سطح آبخور

∇ : حجم جابجایی



شکل ۳: مثالی از موقعیت K ، G ، B و M در یک شناور

(موقعیت B و G می‌تواند برعکس باشد)

با داشتن KB و BM داریم:

$$KM = KB + BM$$

از طرفی GM را در روابط مرحله قبل به دست آوردیم لذا KG برابر است با:

$$KG = KM - GM$$

بدین ترتیب ارتفاع عمودی مرکز ثقل که نقش اصلی در بررسی پایداری شناور دارد، تعیین می‌شود. KG مهمترین دستاورد انجام آزمایش کجی است.

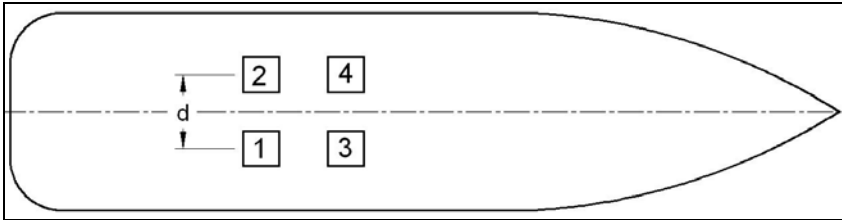
۶- نحوه جابجایی وزنه‌ها

برای جابجایی وزنه‌ها، دو حالت می‌توان در نظر گرفت:

الف- قراردادن وزنه‌ها در خط مرکزی و سپس جابجا کردن آنها به سمت چپ و

راست

ب- قراردادن وزنه‌ها در طرف چپ و راست خط مرکزی و جابجا کردن آنها برای حالت «ب» می‌توان مطابق شکل ۵ نوبت جابجا کردن وزنه‌ها را به صورت زیر در نظر گرفت این شکل، وزنه‌های آزمایش به چهار دسته تقسیم شده‌اند.



شکل ۵: نمونه‌ای از چیدمانی وزنه‌ها در آزمایش کجی

وضعیت انتقال وزنه‌ها	مراحل ۱
وزنه‌های ۱ به ۲	۱
وزنه‌های ۳ به ۴	۲
وزنه‌های ۲ به ۱	۳
وزنه‌های ۴ به ۳	۴

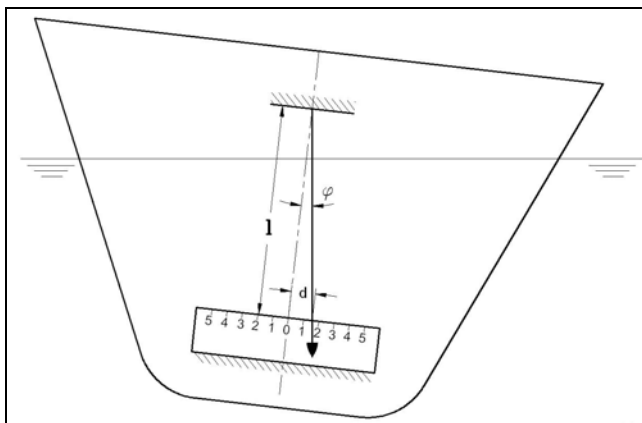
توجه شود که تعداد دسته‌های وزنه‌ها دلخواه است.

۷- روش خواندن زاویه غلتش

وقتی شناور در اثر جابجایی وزنه‌ها دچار زاویه کجی عرضی می‌شود، شاقول که به سقف آویزان است و همواره در راستای قائم باقی می‌ماند ولی ظرف مدرج شده متناسب با کجی عرضی شناور، کج می‌شود و زاویه ϕ تشکیل می‌شود.

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{d}{\ell}$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1}(d/\ell)$$



شکل ۴: جابجایی ظرف حاوی سیال

برای کاهش اثرات نوسان شاقول، آن را در داخل ظرفی که حاوی یک سیال (آب یا روغن) است قرار می‌دهند. در قسمت فوقانی ظرف می‌توان با قرار دادن یک خط کش دقیق، میزان فاصله انحراف را اندازه‌گیری کرد. ریسمان شاقول نباید به مانعی گیر داشته باشد. برای ایجاد دقت بیشتر و کاهش خطا معمولاً از دو یا سه شاقول استفاده می‌کنند که در سینه، وسط و پاشنه شناور قرار می‌گیرد و در شناورهای کوچکتر در دو نقطه قرار می‌گیرند.

اطلاعات حاصل از هر شاقول در جدول ۱ یادداشت و سپس وارد نمودار شکل ۲ می‌شوند. همان‌طور که گفته شد از شیب نمودار شکل ۲ نیز مقدار GM و در نهایت KG محاسبه می‌شود.

- سایر دستاوردهای آزمایش کجی

(۱) تعیین وزن سبک شناور^۱

از آنجا که برای انجام آزمایش کجی، آبخورهای سینه و پاشنه و وسط کشتی به دقت اندازه‌گیری می‌شوند، با داشتن آبخورها و با استفاده از منحنی‌های هیدرواستاتیک شناور، می‌توان جابجایی شناور را مشخص کرد. از آنجا که آزمایش کجی برای وزن سبک شناور انجام می‌شود، لذا وزن سبک در این آزمایش قابل تعیین است. تعیین این وزن برای مراحل بعدی آزمایش نیز مورد نیاز است.

(۲) مرکز ثقل طولی^۲

مرکز ثقل طولی شناور را می‌توان به کمک مرکز بویانسی طولی آن به دست آورد. شناور به حالت مستقیم یا دارای شیب باشد با تعیین آبخورهای سینه و پاشنه و وسط، می‌توان به کمک منحنی‌های هیدرواستاتیک، LCB را تعیین کرد. از آنجا که برای تعادل طولی B و G همواره باید در یک امتداد باشند، لذا LCB همان LCG در شناور می‌باشد.

(۳) تعیین زاویه لیست یا لل (کجی اولیه)

اگر شناور دارای زاویه کجی اولیه (طولی یا عرضی) باشد، نصب شاقول برای انجام آزمایش، این مقدار کجی را مشخص خواهد کرد. ضمن اینکه اگر شناور دارای زاویه کجی اولیه باشد، انجام آزمایش کجی به چپ^۳ و راست^۴ نتایج یکسانی به دست نخواهد آمد که نشان از وجود زاویه کجی اولیه شناور دارد.

1 -Light weight

2 - LCG

3 - port

4 - star board

۹ - نکات مهم در آزمایش کجی

نکات بسیار مهم و حساسی در انجام آزمایش کجی وجود دارد که حاصل حوادث تلخی می‌باشد که برای کشتی‌های مختلف در حین انجام آزمایش بوجود آمده است. این نکات به صورت توصیه‌های مختلف و متفاوتی در استانداردها و مؤسسات رده‌بندی شناور آمده است که به مهمترین اصول آن در زیر اشاره می‌شود:

۱) قرار دادن وزنه‌های زیاد بر روی عرشه فوقانی شناور، باعث افزایش ارتفاع مرکز ثقل می‌شود که پایداری شناور را به شدت کاهش می‌دهد یا ناپایداری می‌کند. اثر این وزنه‌ها بر ارتفاع KG باید در نظر گرفته شود. یعنی KG بدست‌آمده از آزمایش در شرایطی است که وزنه‌های آزمایش هم روی شناور وجود دارند. لذا KG واقعی زمانی بدست می‌آید که اثر این وزنه‌ها از محاسبات حذف شوند.

۲) وزن وزنه‌های آزمایش باید ۲ درصد وزن کل کشتی (وزن سبک) باشد. اگر وزن این وزنه‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای باشد (برای کشتی‌های بزرگ) باید به جای وزنه از جرثقیل برای هیل دادن شناور استفاده شود.

۳) اگر شناور دارای عرشه‌های متعدد باشد، بهتر است در عرشه‌های میانی یا تحتانی، وزنه‌های آزمایش را قرار داد که به بهبود پایداری کمک می‌کند. اگر محاسبات پایداری برای قراردادن وزنه‌های آزمایش روی عرشه‌های فوقانی انجام نشده باشد، احتمال ناپایداری شناور در حین انجام آزمایش وجود دارد.

۴) وجود مخازن نیمه‌پر و اجسام آویزان از عوامل منفی بر انجام آزمایش است که باید حذف شوند و در غیر این صورت، اثرات آنها بر کاهش GM لحاظ گردد. (این دو اثر علل اصلی واژگون شدن بسیاری از کشتی‌های سانحه دیده در حین آزمایش است).

۵) آزمایش باید در شرایط آب آرام انجام شود یعنی بدون باد، موج و جزر و مد. این شرایط در حوضچه‌های بندری و آن هم در شرایط بسیار آرام جوی امکان پذیر

است. برای زیردریایی بهتر است که آزمایش کجی در زیر آب و در عمقی که اثرات موج سطح آب اثر نمی‌کند، انجام شود.

(۶) GM به دست آمده برای شناور با کشتی‌های مشابه^۱ مقایسه شود. اگر درصد تفاوت زیاد باشد آزمایش باید دوباره انجام شود.

(۷) زاویه هیل باید به حدی باشد که بتوان سطح آب‌خور را ثابت فرض کرد یعنی نقطه M ثابت باشد. زاویه هیل برای این آزمایش در حدود ۲-۳ درجه مناسب است.

(۸) آزمایش کجی پس از تکمیل ساخت شناور انجام می‌شود و قبل از انجام آزمایش، مدارک زیر باید موجود باشد:

(۱) جداول و نمودارهای هیدرواستاتیک

(۲) مارک‌های نشان دهنده عمق آب‌خور روی بدنه

(۳) خطوط بدنه

(۴) کالیبره کردن مخازن و داشتن مشخصات سطح آزاد مخازن

(۵) جانمایی دقیق

(۹) برای کشتی‌هایی که بسیار بزرگ هستند، به جای جابجایی وزنه از یکی از دو روش زیر استفاده می‌شود:

(۱) استفاده از جرثقیل برای کج کردن شناور

(۲) جابجایی آب بین مخازن (در این حالت اثرات سطح آزاد مخازن، در طرفین بدنه، به طور دقیق باید ارزیابی شود).

(۱۰) دک (عرشه) قرارگیری وزنه‌ها باید استحکام سازه‌ای لازم برای تحمل وزن وزنه‌ها را داشته باشد.

(۱۱) جانمایی رایج برای قرارگیری وزنه‌ها

معمولاً وزنه‌ها به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که ۲ گروه در سمت چپ و دو گروه در سمت راست بدنه قرار می‌گیرند. بنابراین در آزمایش، کلیه وزنه‌ها در یک محل قرار نمی‌گیرند.

(۱۲) نکات لازم برای اعمال ممان هیل دهنده به کمک جابجایی سیال بین مخازن

در مواردی که امکان جابجایی وزنه‌های آزمایش وجود ندارد، از جابجایی سیال از مخزنی در یک طرف بدنه به طرف دیگر استفاده می‌شود که نکات زیر را باید در نظر داشت:

- ۱) مرکز وزن و وزن آب داخل مخازن باید به طور دقیق مشخص باشد.
- ۲) اثرات سطح آزاد مخازن نیز در نظر گرفته شود که در نتیجه هندسه مخزن باید کاملاً مشخص باشد.
- ۳) توصیه به استفاده از مخازن مکعبی برای انجام آزمایش می‌شود.
- ۴) چگالی سیال داخل مخزن باید به وسیله هیدرومتر تعیین گردد.
- ۵) در انتقال آب از یک مخزن به مخزن دیگر، نشی نباید وجود داشته باشد. این انتقال می‌تواند بوسیله پمپ انجام شود.
- ۶) مجموع مایعات درون شناور (مربوط و غیر مربوط به آزمایش) نباید از ۲۵ درصد وزن سبک آن بیشتر باشد.

(۱۳) کاملاً پر یا کاملاً خالی بودن مخازنی که برای انجام آزمایش نیاز نیستند.

(۱۴) شاقول‌های اندازه‌گیری معمولاً در دو یا سه محل نصب می‌شوند که شاقول‌های انتهایی باید حداقل ۱۰ درصد طول از سینه و پاشنه فاصله داشته باشند.

۱۵) باید منتظر بود تا نوسانات شاقول (که در داخل سیال میراکننده وجود دارد) از بین برود و بتوان زاویه را به طور دقیق مشخص کرد.

۱۶) طول شاقول‌ها ممکن است متفاوت باشد. شاقول کوچکتر باید حداقل دارای طول $۰/۶$ ارتفاع بدنه باشد و شاقول بزرگتر حداکثر $۱/۲$ برابر شاقول کوچکتر باشد.

۱۷) قبل از شروع آزمایش باید کلیه افراد در محل‌های مشخص شده خودشان باشند و حرکت نکنند. وظایف هر یک نیز در حین آزمایش به طور کامل مشخص باشد. کلیه افراد غیرضروری نسبت به انجام آزمایش، خارج از شناور باشند.

۱۸) کلیه اقدامات احتیاطی با فرض واژگون شدن شناور انجام شود (کلیه شیرهای ورودی بدنه و منافذ آب بند بسته باشند، کپسول اطفاء حریق مهیا باشد و ...)

۱۹) کلیه اجسام غیرضروری از شناور خارج شوند و اجسام ضروری نیز حتی المقدور در جای خود ثابت شوند.

۲۰) حالت اولیه کشتی بدون هیل باشد. در غیر اینصورت جابجایی اقلام وزنی داخل شناور انجام شود تا هیل اولیه صفر درجه حاصل شود.

۲۱) هیچ یک از طناب‌های مهار در حین آزمایش، تحت کشش قرار نگیرند.

۲۲) محل اولیه و ثانویه (پس از جابجایی) وزنه‌ها بالا قبلاً روی دک مشخص شده باشد.

۲۳) اندازه‌گیری چگالی آب دریا در محل آزمایش

۲۴) مشخص بودن دقیق وزن و مراکز وزن وزنه‌های وارد شده برای انجام آزمایش

۲۵) جابجایی وزنه‌ها یا انتقال سیال برای هیل دادن شناور، باید به تدریج و غیر دفعی انجام شود.

۲۶) هیچ نقطه‌ای از شناور در اثر غلتش در زوایای کوچک به نقطه‌ای در بیرون شناور برخورد یا تکیه نکند (دکل‌ها، دک و ...)

۲۷) اگر اختلاف برخی مقادیر به دست آمده برای GM با مقدار میانگین GM بیش از ۵ درصد باشد، آزمایش دوباره تکرار می‌شود. احتمالاً شناور در هنگام آزمایش دارای زاویه لیست (هیل) اولیه بوده است یا مقدار θ زاویه پاندول درست خوانده نشده است.

۲۸) اگر کشتی دارای GM منفی باشد یا قرار دادن وزنه‌ها به روی عرشه، باعث منفی شدن GM شده باشد، با کوچکترین تکان‌ها، شناور دچار تلاطم شدید می‌شود یا در یک زاویه لال قرار می‌گیرد. لذا آزمایش باید فوراً متوقف شود و در این حالت نمی‌توان GM را مشخص کرد.

۲۹) یکی از موارد اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از آزمایش کجی، مقایسه آن با مشخصات کشتی مشابه^۱ آن می‌باشد. (کشتی که دارای کاربری و شکل هندسی یکسان، وزن سبک برابر و مرکز گرانس طولی برابر باشند را می‌توان کشتی‌های مشابه نامید که باید مرکز عمودی گرانس آنها نیز تقریباً با هم برابر باشد).

۳۰) گزارش آزمایش کجی شناور به همراه نتایج حاصل شده و مقایسه انجام شده با کشتی مشابه، باید در مدارک پایداری شناور آورده شود.

در اینجا به دو آزمایش دیگر اشاره می‌شود که شبیه به آزمایش کجی هستند ولی برای اهداف متفاوتی انجام می‌شوند. این آزمایش‌ها عبارتند از:

۱) آزمایش هیل دادن شناور^۲

این آزمایش برای اثبات کارایی تجهیزات در زوایای هیل مشخص انجام می‌شود. تجهیزات و دستگاههای مختلف باید بتوانند مطابق با توانایی تعریف شده برای آنها، در یک زاویه هیل مشخص برای مدت معین به کارکرد خود

1 - sister ship

2 - Heeling test

ادامه دهند و اختلالی در کارآیی کشتی ایجاد نکنند. برای مثال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مختل و متوقف شدن کارآیی پمپ‌ها یا کاهش دبی مکش پمپ
- یاتاقانهای موتورهای الکتریکی در اثر اعمال بار اضافی ناشی از اعمال زوایای غلتش زیاد، ممکن است دچار اختلال در کارکرد شوند.
- قایق‌های نجات را ممکن است بخاطر هیل زیاد کشتی به یک طرف، نتوان از طرف مقابل آن آب‌اندازی کرد.

(۲) آزمایش یکبر شدن کشتی^۱

این آزمایش برای ناوهای جنگی انجام می‌شود و برای بررسی تراز بودن تجهیزات جنگی نسبت به وضعیت مبنا در زوایای مختلف غلتش، انجام می‌شود مانند پرتاب‌کننده موشک‌ها، اژدرافکن‌ها و توپ‌های روی عرشه.

فصل ۳

پایداری طولی و مباحث مرتبط

بخش ۳-۱: پایداری طولی شناور

۱- تعاریف

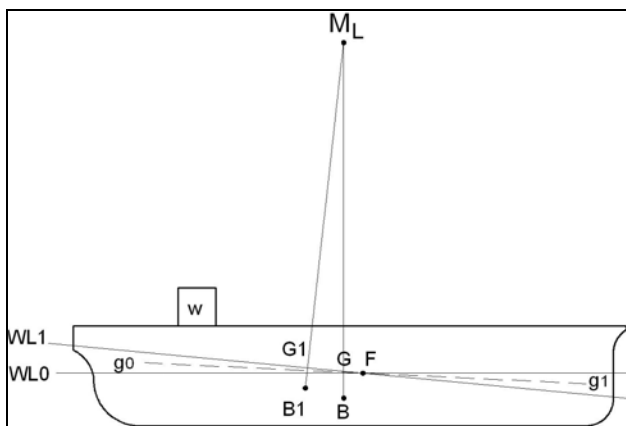
- شیب (تریم): شیب طولی شناور را گویند که به دو صورت زیر بیان می‌شود:

* اختلاف آبخور سینه و پاشنه - اگر آبخور سینه بیشتر از پاشنه باشد حالت «شیب سینه» و اگر آبخور پاشنه بیشتر از سینه باشد «شیب به پاشنه» داریم.

* زاویه شیب عبارتست از زاویه‌ای که بین راستای اولیه (افقی) و ثانویه شناور ایجاد می‌شود. این خطوط یکدیگر را در «مرکز شناوری» قطع می‌کنند یا به عبارت دیگر تریم‌کردن شناور حول مرکز شناوری انجام می‌شود. مقدار شیب در شکل ۱ نشان داده شده است.

- مرکز شناوری (F)

مرکز سطح صفحه آبخور را «مرکز شناوری» گویند که شیب و هیل حول این نقطه اتفاق می‌افتد (شکل ۱).



شکل ۱: جابجایی مرکز ثقل و بویانسی و شیب شناور

- **متاستر طولی (M_L):** غلتش طولی^۱ شناور، حول این نقطه انجام می‌شود. این نقطه همانند متاستر عرضی از تقاطع امتداد مرکز بویانسی اولیه و ثانویه (پس از غلتش) به دست می‌آید، با این تفاوت که نقطه متاستر طولی همواره ثابت در نظر گرفته می‌شود چرا که زوایای غلتش طولی نسبت به غلتش عرضی بسیار کوچکتر هستند. لازم به ذکر است که غلتش دینامیکی حول متاستر (M_L) و غلتش استاتیکی حول مرکز شناوری (F) انجام می‌شود (شکل ۱).

- **ارتفاع متاستر طولی (GM_L):** ارتفاع متاستر طولی، همانند ارتفاع متاستر عرضی (GM_L) مبنای بررسی پایداری می‌باشد که ارتفاع آن می‌تواند به بیش از صد متر برسد. ارتفاع متاستر طولی را معمولاً برابر با شعاع متاستر طولی (BM_L) در نظر می‌گیرند چرا که ارتفاع نقطه متاستر طولی بسیار بالا می‌باشد و اختلاف (BM_L) و (GM_L) (یا مقدار BG) چندان قابل ملاحظه نیست (شکل ۱).

شعاع متاستر طولی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$BM_L = \frac{I_L}{V}$$

که I_L برابر ممان دوم طولی سطح آب‌خور حول محور عرضی گذرنده از مرکز شناوری و V برابر حجم زیر آب بدنه می‌باشد. ممان دوم طولی برای یک سطح مستطیلی شکل به طول L و عرض B حول محور عرضی گذرنده از مرکز سطح آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_L = \frac{1}{12} BL^3$$

$$I_t = \frac{1}{12} LB^3 \quad \text{ممان دوم عرضی حول مرکز سطح برابر بود با:}$$

بدین ترتیب شعاع متاستری برای یک بارج برابر است با:

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla} \text{ یا } \frac{I_L}{V} = \frac{BL^3}{12V}$$

$$V = L.B.T$$

$$BM_L = \frac{BL^3}{12L.B.T} = \frac{L^2}{12T}$$

که T برابر ارتفاع آبخور است.

مقدار I_L برای شناورهایی که سطح آبخور آنها دارای شکل هندسی نامعین است، با استفاده از روشهای عددی (مانند روش سیمسون) انجام می شود.

مثال) شعاع متاستری طولی (BM_L) را برای شناور مدل ۲ در آبخور ۴ متر محاسبه کنید.

حل: شناور مدل ۲ یک بارج می باشد لذا داریم:

$$T = 4 \text{ m}$$

$$\nabla = LBT = 80 \times 13.6 \times 4 = 4352 \text{ m}^3$$

$$I_L = \frac{1}{12} BL^3 = \frac{1}{12} \times 13.6 \times (80)^3 = 580266.66 \text{ m}^4$$

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla} = 133.3 \text{ m}$$

یا از رابطه زیر بطور مستقیم می توان شعاع متاستری طولی را محاسبه کرد:

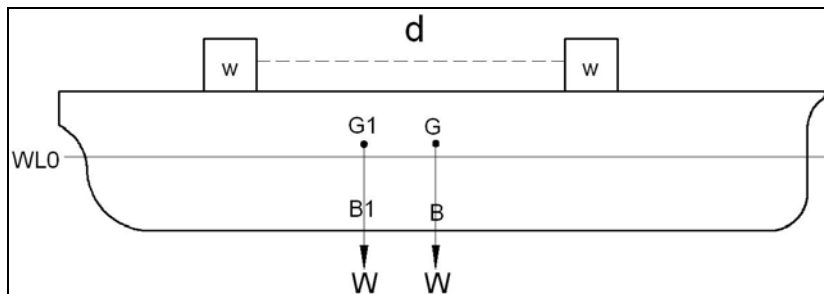
$$BM_L = \frac{L^2}{12T} = \frac{(80)^2}{12 \times 4} = 133.3 \text{ m}$$

۲- علت تریم کردن شناور

علت تریم کردن (شیب گرفتن) شناور (مانند هیل) ، جابجا شدن مرکز ثقل می باشد. مطابق شکل ۲ فرض کنید وزن w به اندازه d در طول شناور جابجا شود. این جابجایی باعث انتقال مرکز ثقل شناور از G به G_1 می شود:

$$W \times GG_1 = w.d$$

$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$



شکل ۲: جابجایی بار باعث جابجایی مرکز ثقل و شیب گرفتن شناور می‌شود.

ملاحظه می‌شود که در این حالت ممانی بین راستای G_1 و B ایجاد شده است که این ممان برابر با $W \times GG_1$ می‌باشد و باعث غلتش طولی شناور می‌شود. این غلتش تا جایی ادامه می‌یابد که مرکز ثقل و بویانسی جدید، هم امتداد (در امتداد قائم) شوند (مطابق شکل ۱). لذا غلتش شناور تا جایی ادامه می‌یابد که ممان ایجاد شده صفر شود.

۳- ممان لازم برای تغییر شیب به اندازه یک سانتیمتر (MCTC)

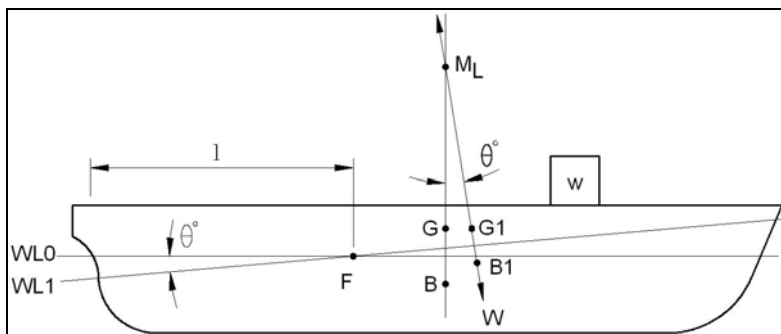
MCTC عبارتست از مقدار گشتاور لازم برای تغییر شیب شناور به اندازه یک سانتیمتر.

مثلاً اگر در یک شناور $MCTC = 5 \text{ t.m}$ باشد یعنی اگر ۵ تن بار به اندازه ۱ متر روی عرشه به صورت طولی جابجا شود، شیب شناور یک سانتی متر تغییر خواهد کرد. مطابق شکل ۳ داریم:

$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$

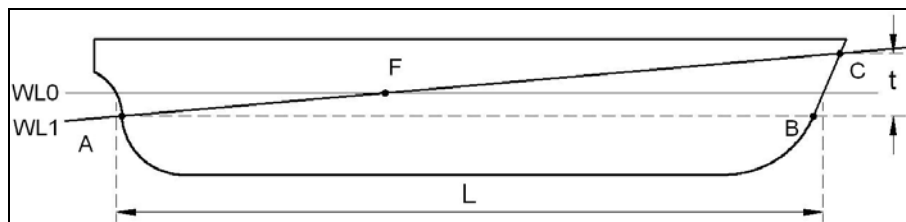
$$\tan \theta = \frac{GG_1}{GM_L}$$

$$\tan \theta = \frac{w.d}{W.GM_L}$$



شکل ۳: زاویه شیب شناور حول مرکز شناوری

از طرف دیگر با توجه به شکل ۴ اگر از نقطه A (عمود پاشنه) خطی افقی ترسیم کنیم که عمود سینه را در B قطع کند، و با در نظر گرفتن مثلث ABC داریم:



شکل ۴

$$\tan \theta = \frac{t}{L}$$

که t برابر اختلاف آبخور سینه و پاشنه یا همان شیب شناور است.

اگر t برابر یک سانتیمتر باشد (۰/۰۱ متر) داریم : $\tan \theta = \frac{1}{100 L}$

اگر شیب (t) برابر یک سانتیمتر باشد مقدار w.d برابر است با ممان لازم برای یک سانتیمتر شیب، یعنی همان MCTC. بنابراین از روابط فوق داریم:

$$\tan \theta = \frac{w.d}{W \times GM_L} \quad , \quad \tan \theta = \frac{1}{100 L}$$

$$\frac{MCTC}{W \cdot GM_L} = \frac{1}{100 L}$$

$$MCTC = \frac{W \cdot GM_L}{100 L}$$

گفتیم که می‌توان GM_L, BM_L را برابر فرض کرد لذا می‌توان نوشت:

$$MCTC = \frac{W \times BM_L}{100 \times L}$$

هم اکنون کاربرد MCTC را در حل مسائل پایداری طولی می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\text{ممان} \quad \text{تغییر تریم اعمال شده به شناور} \\ \text{تغییر شیب} = \frac{MCTC}{MCTC}$$

مقدار تغییر شیب بدست آمده از این حالت، بر حسب سانتیمتر می‌باشد.

مثال) در شناور مدل ۲ در آب‌خور ۴ متر، باری ۷۰ تنی به اندازه ۳۵ متر به سمت سینه جابجا می‌شود. مقدار شیب شناور را به دو روش زیر محاسبه کنید ($KG = 3.2 \text{ m}$)

الف- روش جابجایی مرکز ثقل

ب- روش MCTC

(حل)

الف-

$$KB = \frac{T}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ m}$$

$$BM_L = 133.3 \text{ m} \text{ از مثال قبل}$$

$$KM_L = KB + BM_L = 135.3 \text{ m}$$

$$GM_L = KM_L - KG = 135.3 - 3.2 = 132.1 \text{ m}$$

$$W = \rho \times L \times B \times T = 1.025 \times 4352 = 4461 \text{ t}$$

$$d = 35 \text{ m} \text{ (فاصله جابجایی بار)}$$

$$G_0 G_1 = \frac{w.d}{W} = \frac{70 \times 35}{4461} = 0.55 \text{ m}$$

$$\tan \theta = \frac{G_0 G_1}{GM_L} = \frac{0.55}{132.1} = 0.0041$$

$$\theta = 0.24^\circ$$

$$t = \tan \theta . L = 0.0041 \times 80 = 0.329 \text{ m} \text{ شیب}$$

یعنی اختلاف آب‌خور سینه و پاشنه (شیب) ناشی از جابجایی این بار برابر ۰/۳۲۹ متر می‌باشد.

$$MCTC = \frac{W \times BM_L}{100 \times L} = \frac{4461 \times 133.3}{100 \times 80} = 74.33 \left(\frac{\text{t.m}}{\text{cm}} \right)$$

ب-

$$t = \frac{w.d}{MCTC} = \frac{70 \times 35}{74.33} = 32.9 \text{ cm} = 0.329 \text{ m}$$

مثال (MCTC شناور مدل ۲ را در آبخورهائى مختلف محاسبه کنید.

حل)

$$MCTC = \frac{W \times BM_L}{100 \times L}$$

در اینجا در رابطه MCTC نمى توان از GM_L استفاده کرد چرا که مرکز ثقل در هر آبخور در دسترس نیست و مى تواند تغییر کند لذا BM_L بجای آن استفاده مى شود. مقدار W و BM_L در هر آبخور از جدول هیدرواستاتیک بدست مى آید يعنى:

$$BM_L = KM_L - KB$$

طول آبخور (L) در هر آبخور نیز از روی نقشه بدست آمده است. البته در مثالها مى توان برای ساده تر شدن حل، طول بین دو عمود را در نظر گرفت.

آبخور (m)	وزن (W)	طول آبخور (L)	BM_L	MCTC
1	493.3	76.2	262.7	17.01
2	1135.4	77.4	154.8	22.71
3	1858	78.5	123.67	29.27
4	2665.4	79.3	114.19	38.38
5	3560.2	80	108.63	48.34

مثال) شناور مدل ۱ در آبخور ۳ متر شناور است. با استفاده از نیمه عرضهای جدول آفست

مقادیر زیر را محاسبه کنید:

الف) مقدار MCTC

ب) تغییر شیب ناشی از جابجا شدن یک بار ۴۰ تنی به اندازه ۶۰ متر به طرف جلو.

همچنین جابجایی تا آبخور ۳ متر برابر ۱۸۵۸ تن ، $KG = 6.1 \text{ m}$ و

$KB = 1.6 \text{ m}$ مى باشد.

حل:

مراحل زیر را برای حل مسئله طی می‌کنیم:

$$I_{yy} \dots BM_L \dots KM_L \dots GM_L \dots MCTC \dots t$$

با استفاده از جدول زیر I_{yy} را تعیین می‌کنیم. ابتدا I_{AP} را حول عمود پاشنه بدست می‌آوریم، سپس با استفاده از قضیه محورها موازی I_{yy} را حول مرکز شناوری محاسبه می‌کنیم:

شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	تابع سطح	بازو	تابع ممان اول	بازو	تابع ممان دوم
0	0	0.5	0	0	0	0	0
0.5	0.911	2	1.822	0.5	0.911	0.5	0.4555
1	2.443	1.5	3.6645	1	3.6645	1	3.6645
2	5.219	4	20.876	2	41.752	2	83.504
3	6.225	2	12.45	3	37.35	3	112.05
4	6.37	4	25.48	4	101.92	4	407.68
5	6.528	2	13.056	5	65.28	5	326.4
6	6.073	4	24.292	6	145.752	6	874.512
7	3.559	1.5	5.3385	7	37.3695	7	261.5865
7.5	1.139	2	2.278	7.5	17.085	7.5	128.1375
8	0	0.5	0	8	0	8	0

SUM=	109.257	451.084	2197.99
------	---------	---------	---------

$$h = \frac{80}{8} = 10 \text{ m}$$

$$\text{مساحت} = 2 \times \frac{1}{3} \times h \times \text{sum0} = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 109.257 = 728.38 \text{ m}^2$$

$$x = h \times \frac{\text{sum1}}{\text{sum0}} = \frac{10 \times 451.08}{109.257} = 41.28 \text{ m}$$

$$I_{AP} = 2 \times \frac{1}{3} \times h^3 \times \text{sum2} = 2 \times \frac{1}{3} \times 10^3 \times 2197.99 = 1465326.66 \text{ m}^4$$

برای بدست آوردن ممان دوم عرضی حول محور عرضی گذرنده از مرکز سطح

آبخور، با استفاده از قضیه محورها موازی داریم:

$$I_{yy} = I_{NA} = I_{AP} - A \cdot X^2 = 223769.8 \text{ m}^4$$

$$BM_L = \frac{I_{yy}}{\nabla} = \frac{223769.8}{1858} = 120.43 \text{ m}$$

$$KM_L = KB + BM_L = 1.6 + 120.43 = 122.03 \text{ m}$$

$$KG = 6.1 \text{ m}$$

$$GM_L = KM_L - KG = 122.03 - 6.1 = 115.93 \text{ m}$$

$$MCTC = \frac{W \times GM_L}{100 \times L} = \frac{1858 \times 115.93}{100 \times 80} = 26.92 \left(\frac{t.m}{cm} \right)$$

(ب)

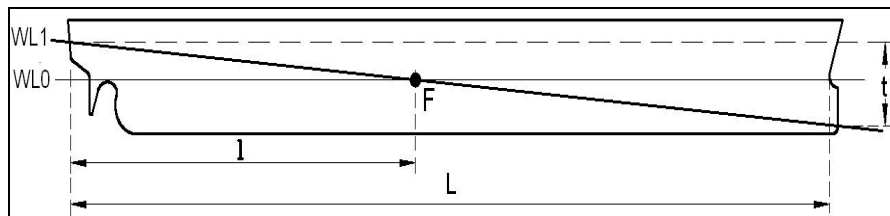
$$t = \frac{\text{moment}}{MCTC} = \frac{40 \times 60}{26.92} = 89.15 \text{ cm}$$

۴- توزیع شیب

مطابق شکل ۵ چنانچه مرکز شناوری در فاصله l متری عمود پاشنه باشد و تغییر شیب برابر t در کشتی بوجود آید، با استفاده از تشابه مثلث‌های موجود داریم:

$$\text{تغییر شیب در پاشنه} = \frac{l}{L} \times t$$

$$\text{تغییر شیب پاشنه} = \frac{(L-l)}{L} \times t = t - \text{تغییر شیب در سینه}$$



شکل ۵: توزیع شیب در شناور

از طرفی می‌دانیم که قراردادن یا برداشتن جرمی به وزن w باعث تغییر آبخور شناور می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{w}{TPC}$$

بنابراین مجموع تغییر آبخور در سینه یا پاشنه را به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد. برای تغییر آبخور پاشنه داریم:

$$\pm (\text{تغییر شیب در پاشنه}) \pm (\text{تغییر آبخور}) = \pm (\text{تغییر آبخور پاشنه})$$

$$\pm (\text{تغییر شیب در پاشنه}) = \pm \frac{w}{TPC} \pm \frac{\ell \times w \times d}{L \times MCTC}$$

همچنین برای تغییر آبخور سینه داریم:

$$\pm (\text{تغییر شیب در سینه}) \pm (\text{تغییر آبخور}) = \pm (\text{تغییر آبخور سینه})$$

$$\pm (\text{تغییر آبخور سینه}) = \pm \frac{w}{TPC} \pm \frac{(L - \ell) \times w \times d}{L \times MCTC}$$

مثبت یا منفی بودن علامت‌های فوق بستگی به مثبت یا منفی ممان طولی و همچنین بارگذاری یا باربرداری از روی شناور دارد (معمولاً ممان به سمت سینه مثبت و ممان به سمت پاشنه منفی در نظر گرفته می‌شود).

اگر بخواهیم شرایطی را در نظر بگیریم که با تغییرات وزن بار و ممان طولی انتقال آن، آبخور سینه یا پاشنه ثابت بماند داریم (مثلاً برای پاشنه):

$$0 = \pm (\text{تغییر شیب پاشنه}) \pm (\text{تغییر آبخور})$$

$$\text{تغییر شیب پاشنه} = \text{تغییر آبخور}$$

$$\frac{w}{TPC} = \frac{l}{L} \times \frac{w.d}{MCTC}$$

که در این رابطه w وزن بار و d محل مناسب قرار گرفتن بار برای ثابت ماندن آبخور پاشنه است (d فاصله بار تا مرکز شناوری می باشد).

لازم به یادآوری است که عبارت $\frac{w}{TPC}$ تنها زمانی وجود دارد که یک جرم روی شناور قرار گرفته یا از روی آن برداشته شده باشد.

برای ثابت ماند آبخور سینه نیز به همین ترتیب داریم:

$$\frac{w}{TPC} = \frac{(L-l)}{L} \times \frac{w \times d}{MCTC}$$

واضح است که در صورت تغییر بارگذاری روی شناور، هم آبخور سینه و هم آبخور پاشنه نمی توانند به طور همزمان ثابت بمانند بلکه ثابت ماندن یکی مستلزم تغییر آبخور دیگری است.

مثال) در شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر، باری به وزن ۱۰۰ تن در فاصله ۳۰ متری از وسط شناور قرار می گیرد. آبخور سینه و پاشنه را پس از قرار گرفتن این بار مشخص کنید.

(حل)

$$BM_L \dots GM_L \dots MCTC \dots t \dots t_f, t_a \text{ : مراحل حل}$$

با استفاده از مشخصات شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر و در سناریوی بارگیری ۱ داریم:

$$KG = 5.1 \text{ m}$$

$$BM_L = 108.63 \text{ m}$$

$$KB = 2.79 \text{ m}$$

$$KM_L = 111.42$$

$$GM_L = KM_L - KG = 106.32 \text{ m}$$

$$MCTC = \frac{W \times GM_L}{100 \times L} = \frac{3500 \times 106.32}{100 \times 80} = 46.5 \frac{t.m}{cm}$$

$LCF = 3.1 \text{ m}$: از وسط شناور F فاصله

$d = 30 - 3.1 = 26.9 \text{ m}$ فاصله از مرکز شناوری (F)

$$t = \frac{w.d}{MCTC} = \frac{100 \times (26.9)}{46.5} = 57.85 \text{ cm}$$

LCF داده شده در جداول هیدرواستاتیک نسبت به وسط شناور است. لذا فاصله F

از عمود پاشنه عبارتست از:

$$l = 40 - LCF = 40 - 3.1 = 36.9 \text{ m}$$

$$t_a = \frac{l}{L} . t = \frac{36.9}{80} \times 57.85 = 26.68 \text{ cm}$$

$$t_f = t - t_a = 57.85 - 26.68 = 31.17 \text{ cm}$$

مقادیر t_f , t_a ناشی از ممان اعمال شده توسط بار هستند. مقدار تغییر آبخور ناشی از قرارگرفتن بار روی شناور عبارتست از:

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{w}{TPC}$$

TPC در آبخور ۵ متر از جدول هیدرواستاتیک عبارتست از:

$$TPC = 9.34 \left(\frac{t}{cm} \right)$$

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{100}{9.34} = 10.7 \text{ cm}$$

آبخور پاشنه (cm)	آبخور سینه (cm)	
500	500	آبخور اولیه
26.68	- 31.17	تغییر آبخور ناشی از ممان
10.7	10.7	افزایش آبخور ناشی از بارگذاری
537.38	479.53	مجموع

مثال) شناور مدل ۱ در آبخور ۴ متر قرار دارد و بارگیری زیر را انجام می‌دهد:

وزن (t)	شماره انبار
۸۰	۴
۲۵	۳
-۴۰	۱

شیب ایجاد شده ناشی از این بارگیری را بیان کنید.

حل: از مشخصات شناور داریم:

$LCF = 2.32 \text{ m}$ در آبخور ۴ متر از وسط شناور

ممان به سینه مثبت و به پاشنه منفی فرض می‌شود:

شماره انبار	فاصله از عمود پاشنه	فاصله از F	وزن (t)	ممان (t.m)
4	75	37.32	80	2985.6
3	60	22.32	25	558
1	25	-12.68	-40	507.2

4050.8	65
--------	----

مجموع:

در آبخور ۴ متر از جدول هیدرواستاتیک برای MCTC و TPC داریم:

$$TPC = 8.51 \frac{t}{cm}$$

$$MCTC = 38.38 \left(\frac{t.m}{cm} \right)$$

$$t = \frac{\text{long. moment}}{MCTC} = \frac{4050.8}{38.38} = 105.54 \text{ cm}$$

$$l = 40 - 2.32 = 37.68 \text{ m}$$

$$t_a = \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{79.3} \times 10554 = 5015 \text{ cm}$$

$$t_f = t - t_a = 10554 - 5015 = 5539 \text{ cm}$$

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{w}{TPC} = \frac{65}{8.51} = 7.64 \text{ cm}$$

آبخور پاشنه (cm)	آبخور سینه (cm)	
400	400	آبخور اولیه
7.64	4.64	میزان فرو رفتگی
-50.15	55.39	تغییر شیب
357.49	460.03	مجموع

مثال) شناور مدل ۱ در جابجایی ۲۵۶۰ تن می‌خواهد ۱۰۰ تن بار را بین انبار ۱ و ۳ به گونه‌ای بارگیری کند که آبخور پاشنه ثابت بماند. توزیع بار بین این دو انبار را محاسبه کنید.

حل:

$$t = ۲۶۶۰ + ۱۰۰ = ۲۵۶۰ \text{ تن جابجایی کل پس از بارگیری}$$

که این جابجایی معادل آبخور ۴ متر است که در آن:

$$TPC = 8.51 \frac{t}{cm}$$

$$MCTC = 38.38 \frac{t.m}{cm}$$

$$l = 40 - 2.32 = 37.68 \text{ m}$$

$$L = 79.3 \text{ طول آبخور در آبخور ۴ متر}$$

برای ثابت ماندن آبخور پاشنه باید داشته باشیم:

$$\frac{w}{TPC} = \frac{l}{L} \times \frac{w.d}{MCTC}$$

از رابطه فوق مقدار d را بدست می‌آوریم که نشان‌دهنده برآیند مرکز ثقل بار ۱۰۰ تنی می‌باشد که باید بین دو انبار توزیع گردد. در واقع برآیند مرکز ثقل بارهای توزیع شده بین دو انبار باید در d قرار گیرد.

$$d = \frac{w \times L \times MCTC}{w \times l \times TPC} = \frac{L}{l} \times \frac{MCTC}{TPC} = \frac{79.3}{37.68} \times \frac{38.38}{8.51} = 9.5 \text{ m}$$

یعنی مرکز ثقل بار باید ۹/۵ متر جلوتر از F باشد. اگر w_1 بار قرار گرفته در انبار شماره ۱ باشد، بار قرار گرفته در انبار ۳ برابر است با $100 - w_1$ و از طرفی فاصله انبار ۱ برابر ۱۲/۶۸ متر عقب‌تر از F و انبار ۳، برابر ۲۲/۳۲ متر جلوتر از F است لذا خواهیم داشت:

$$12.68 \times w_1 = 22.32(100 - w_1)$$

$$35w_1 = 2232$$

$$w_1 = 63.77 \text{ t}$$

$$w_3 = w - w_1 = 36.23 \text{ t}$$

یعنی ۶۳/۷۷ تن در انبار شماره ۱ و ۳۶/۲۳ تن در انبار شماره ۳ باید بارگیری شود.

۵- تعیین آبخور در مرکز شناوری

فرض کنیم که شناور دارای آبخور t باشد. طول شناور L فاصله مرکز شناوری از عمود پاشنه برابر l می‌باشد. مطابق شکل ۶، آبخور در مرکز شناوری برابر d_m ، آبخور پاشنه برابر d_a و اختلاف d_a و d_m برابر c می‌باشد.



شکل ۶: تعیین آبخور در مرکز شناوری با استفاده از آبخور پاشنه

اگر از محل عمود سینه یا پاشنه یک خط افقی ترسیم کنیم ، با تشابه مثلث‌ها داریم:

$$\frac{c}{\ell} = \frac{t}{L}$$

$$c = \frac{\ell}{L} \times t$$

همچنین داریم:

$$d_a - d_m = c$$

$$d_m = d_a - c$$

بنابراین آبخور در محل مرکز شناوری (d_m) توسط آبخور پاشنه (d_a) یا آبخور سینه و مقدار شیب شناور (t) قابل محاسبه است.

$$d_m = d_a - \frac{\ell}{L} \times t$$

اگر در یک حالت غیرعادی، شناور دارای شیب سینه باشد رابطه فوق تبدیل به رابطه زیر می‌شود:

$$d_m = d_a + \frac{\ell}{L} \times t$$

همچنین یادآوری می‌شود که اگر آبخور سینه d_f و آبخور پاشنه d_a باشد، مقدار

شیب (t) برابر است با:

$$t = d_a - d_f$$

مثال) در شناور مدل ۱، آبخور پاشنه برابر $\frac{3}{2}$ متر و آبخور سینه برابر $\frac{2}{8}$ متر است. فاصله F از عمود پاشنه برابر $\frac{39}{24}$ متر می‌باشد. اگر بخواهیم از مشخصات جدول هیدرواستاتیک استفاده کنیم، در چه آبخوری باید این مشخصات استخراج شود؟ (حل)

از آنجا که آبخور سینه و پاشنه متفاوت است لذا دو روش کلی وجود دارد:
۱- آبخور متوسط:

$$draft = \frac{d_a + d_f}{2} = \frac{3.2 + 2.8}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ m}$$

۲- آبخور در محل مرکز شناوری:

طول آبخور (L) در این حالت برابر $\frac{78}{5}$ متر می‌باشد

$$t = 3.2 - 2.8 = 0.4 \text{ m}$$

$$d_m = d_a - \frac{1}{L} \cdot t = 3.2 - \frac{39.24}{78.5} \times 0.4 = 3.2 - 0.119 = 3.001 \text{ m}$$

ملاحظه می‌شود که آبخور بدست آمده در هر دو روش تقریباً برابر هستند و از این آبخور می‌توان مشخصات را از جدول هیدرواستاتیک شناور استخراج کرد.

مثال) در مثال قبل اگر شناور بخواهد از آبخور پاشنه $\frac{3}{2}$ متر و آبخور سینه $\frac{2}{8}$ متر به آبخور پاشنه $\frac{3}{4}$ متر و آبخور سینه $\frac{2}{9}$ متر تغییر وضعیت دهد، چند تن بار می‌تواند بارگیری کند؟ در این حالت $l = 39.24 \text{ m}$ و $L = 78.5 \text{ m}$ و $TPC = 7.63 \frac{t}{cm}$ می‌باشد.

(حل)

به دو روش می‌توان تغییرات آبخور را محاسبه کرد و با استفاده از رابطه

$$\text{مقدار } w \text{ (مقدار بار بارگیری شده) را محاسبه کرد: } \frac{w}{TPC}$$

الف) روش آبخور متوسط:

$$\text{آبخور متوسط اولیه} = \frac{t_f + t_a}{2} = \frac{3.2 + 2.8}{2} = 3 \text{ m}$$

$$\text{آبخور متوسط ثانویه} = \frac{t_f + t_a}{2} = \frac{3.4 + 2.9}{2} = 3.15 \text{ m}$$

$$\text{تغییر آبخور متوسط} = 3.15 - 3 = 0.15 \text{ m}$$

$$0.15 = \frac{w}{TPC} = \frac{w}{7.63}$$

$$W = 1.144 \text{ t}$$

ب) روش آبخور در محل مرکز شناوری:

$$t = 3.2 - 2.8 = 0.4 \text{ m}$$

حالت اولیه:

$$d_m = d_a - \frac{l}{L} \cdot t$$

$$d_m = 3.2 - \frac{39.24}{78.5} \times 0.4 = 3.001 \text{ m}$$

حالت ثانویه:

$$t = 3.4 - 2.9 = 0.5 \text{ m}$$

$$d_m = d_a - \frac{l}{L} \times t$$

$$d_m = 3.4 - \frac{39.24}{78.5} \times 0.5 = 3.15 \text{ m}$$

$$\text{تغییر آبخور در محل مرکز شناوری} = 3.15 - 3.001 = 0.149 \text{ m}$$

$$0.149 = \frac{w}{TPC} = \frac{w}{7.63}$$

$$w = 1.136 \text{ t}$$

ملاحظه می‌شود که مقادیر بدست آمده در دو روش، تفاوت چندانی با هم ندارند.

۶- تعیین ارتفاع متاستری طولی با استفاده از شیب شناور

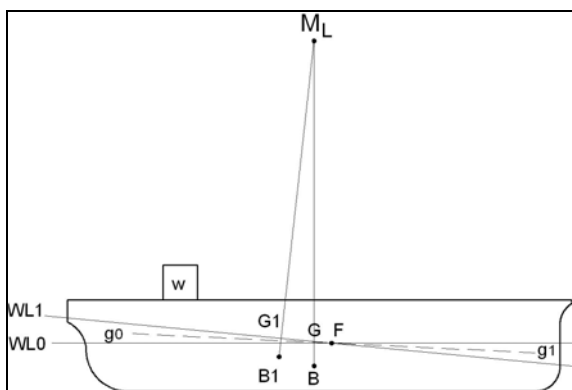
مطابق شکل ۷ فرض کنید شناور تا زاویه θ تریم کرده باشد که داریم:

$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$

با استفاده از تشابه مثلث‌ها:

$$\frac{GM_L}{GG_1} = \frac{L}{t}$$

$$GM_L = \frac{L}{\uparrow} \times GG_1 = \frac{L}{\uparrow} \times \frac{w.d}{W}$$



شکل ۷: رابطه ارتفاع متاسنتری طولی با شیب شناور

بدین ترتیب با داشتن مقدار شیب می‌توان GM_L و در نتیجه MCTC را نیز محاسبه کرد.

۷- تعیین موقعیت طولی مرکز ثقل با استفاده از شیب

در شکل ۸ شناوری در حالت شیب دارای آب‌خور $w_0 L_0$ و جابجایی W است. مرکز ثقل آن G و در امتداد B_0 قرار دارد. اگر شناور فوق که بر اثر ممان یک نیروی خارجی

قسمت جلوی عرشه قرار دهیم، شیب به سینه داریم. حال هر چه این وزنه را به سمت عقب حرکت دهیم، شیب سینه کمتر می‌شود تا جاییکه شیب به پاشنه ایجاد می‌گردد. یعنی وزنه از مرکز شناوری به عقب‌تر حرکت کرده است. لذا در این حالت باید مجدداً وزنه را رو به جلو حرکت دهیم تا جاییکه شیب شناور صفر شود. در این شرایط، محل قرارگیری بار، همان مرکز شناوری است چرا که بارگذاری در محل مرکز شناوری باعث تغییر شیب نمی‌گردد.

روش دیگر، استفاده از روابط پایداری طولی است. فرض کنید شناور دارای شیب اولیه t_1 باشد. باری به وزن w را در فاصله a متری از وسط شناور (یا یک نقطه مشخص) قرار می‌دهیم که باعث شیب ثانویه t_2 می‌شود. در این شرایط تغییر شیب برابر با $t_2 - t_1$ می‌باشد.

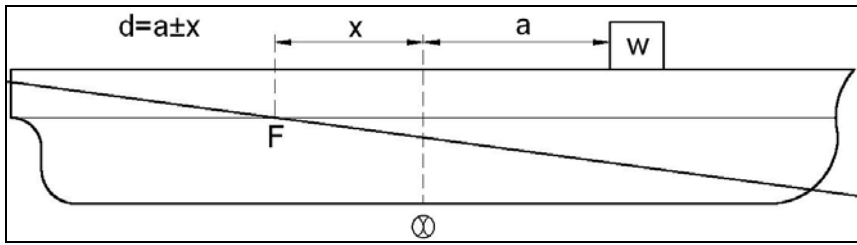
از رابطه زیر داشتیم:

$$\text{ممان اعمال شده} = \frac{w.d}{MCTC} = \frac{\text{تغییر شیب}}{MCTC}$$

که در اینجا d فاصله بار تا مرکز شناوری می‌باشد. در این معادله کلیه مقادیر به جز d معلوم هستند لذا مقدار d بدست می‌آید. از مقدار d طبق رابطه زیر و شکل ۹ می‌توان فاصله مرکز شناوری را تا وسط شناور نیز به دست آورد:

$$d = a \pm x$$

که x فاصله وسط شناور تا مرکز شناوری است (با فرض رایج اینکه مرکز شناوری عقب‌تر از وسط شناور است).



شکل ۹: تعیین محل مرکز شناوری با استفاده از مقدار شیب

MCTC نیز با استفاده از GM_L و آن هم با استفاده از مقدار شیب محاسبه می‌شود که نحوه محاسبه آن در قسمت‌های قبل بیان شد. کاربرد این روش در اطمینان از محل مرکز شناوری می‌باشد که کاربرد بسیاری در نحوه بارگیری شناور دارد.

روش دیگر استفاده از دو وزنه در طرفین قسمت میانی شناور می‌باشد به گونه‌ای که شیب شناور دچار تغییر نگردد. اگر وزنه‌ها دارای وزن w_1, w_2 و به فاصله ℓ_1, ℓ_2 از وسط شناور باشد و فرض کنیم فاصله وسط شناور تا مرکز شناوری نیز برابر x باشد داریم:

$$w_1(\ell_1 + x) - w_2(\ell_2 - x) = 0$$

$$x = \frac{w_1 \ell_1 - w_2 \ell_2}{w_1 - w_2}$$

بدین ترتیب فاصله مرکز شناوری از وسط شناور (x) به دست می‌آید.

۹- محاسبه شیب ناشی از بارهای سنگین

اگر شناوری در حالت سبک قرار گرفته باشد و بر اثر بارگیری با تغییرات خط آب‌خور زیاد مواجه شود، روشهای تشریح شده در قسمت‌های قبل دارای دقت کافی نیستند چرا که با تغییر خط آب‌خور، مشخصات صفحه آب‌خور عوض می‌شود و در نتیجه مرکز شناوری، BM_L و MCTC تغییر می‌نماید. بنابراین برای محاسبات پایداری طولی و شیب، باید مراحل زیر رعایت شوند:

۱- تعیین موقعیت طولی مرکز ثقل در حالت اولیه

۲- تعیین موقعیت طولی مرکز ثقل در حالت ثانویه (بعد از بارگیری)

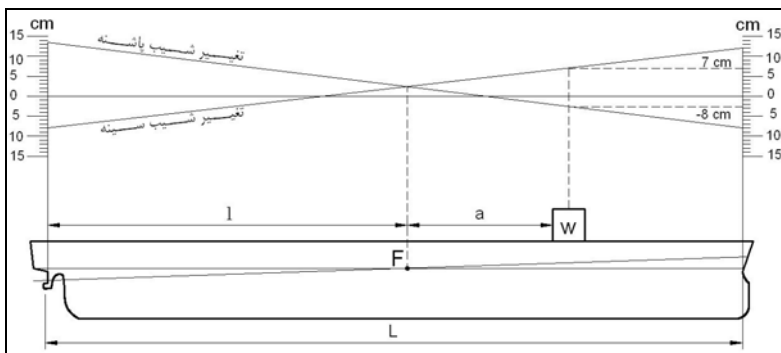
۳- تعیین موقعیت طولی مرکز بویانسی، مرکز شناوری، MCTC و آبخور در محل مرکز شناوری در حالت ثانویه با استفاده از اطلاعات جداول و نمودارهای هیدرواستاتیک.

۴- تعیین ممان تغییر شیب و محاسبه تغییر شیب با استفاده از فاصله افقی بین LCG و LCB.

۱۰- نمودار ضربدری شیب

این نمودار کمک می‌کند که بدون انجام محاسبات، بتوان شیب شناور را در صورت بارگیری یک جسم در محل مشخصی از بدنه، محاسبه کرد. نحوه ترسیم این نمودار به صورت زیر می‌باشد:

مطابق شکل ۱۰، شناوری به طول L با مرکز شناوری به فاصله l از عمود پاشنه، باری به وزن w را در فاصله d متر نسبت به مرکز شناوری بارگیری نموده است.



شکل ۱۰: کاربرد نمودار ضربدری شیب در تعیین تغییر آبخور سینه و پاشنه

$$\text{تغییر در آبخور پاشنه} = \frac{w}{TPC} - \frac{l \times w \times d}{L \times MCTC} \quad \text{بنابراین:}$$

برای واحد بار، $\frac{w}{TPC}$ ثابتی برابر با k_0 و $\frac{l \times w}{L \times MCTC}$ نیز ثابت دیگری مثل K_1 است:

$$\text{تغییر آبخور پاشنه} = K_0 + K_1.d$$

برای همین بار، تغییر آبخور در سینه عبارت است از:

$$\text{تغییر آبخور در سینه} = \frac{w}{TPC} + \frac{(L - \ell) \times w \times d}{L \times MCTC}$$

که $\frac{w}{TPC} = K_0$ و $\frac{L - \ell}{L \times MCTC} = K_2$ و بنابراین معادله خط مستقیم که نشان دهنده تغییر آبخور سینه می‌باشد عبارت است از:

$$\text{تغییر آبخور سینه} = K_0 + K_2.d$$

علامت بین دو عبارت در فرمولهای فوق، وابسته به علامت d می‌باشد. بار واحد می‌تواند مثلاً ۱۰ یا ۱۰۰ تن در نظر گرفته شود. مطابق شکل ۱۰، این دو خط که به صورت دو خط متقاطع هستند برای یک شناور رسم شده‌اند. محورهای عمودی که در طرفین رسم شده‌اند، نشان دهنده تغییر آبخور و محور افقی برابر طول شناور است. در این شکل، بار واحدی در فاصله $d + \ell$ متری از عمود سینه قرار گرفته است. تغییر آبخور سینه ناشی از این بارگیری برابر $\frac{6}{9}$ سانتیمتر و تغییر آبخور پاشنه برابر $\frac{2}{5} -$ سانتیمتر است.

مثال) اولاً نمودار ضربدری شیب را برای شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر بدست آورید.

ثانیاً: با استفاده از این نمودار مشخص کنید که اگر یک بار ۳۰ تنی در فاصله ۱۰ متری عمود پاشنه قرار گیرد، تغییر آبخور سینه و پاشنه چه مقدار است؟

حل: با استفاده از مشخصات هیدرواستاتیک در آبخور ۵ متر داریم:

$$TPC = 9.34 \frac{t}{cm}$$

$$MCTC = 48.34 \left(\frac{t.m}{cm} \right)$$

$$LCF = 3.1 \text{ m} \quad , \quad l = 40 \quad 3.1 = 36.9 \text{ m}$$

الف- اگر بار در FP بارگیری شود:

$$d = 3.1 - 40 = -36.9 \text{ m}$$

اگر بار در AP بارگیری شود:

$$d = 40 + 3.1 = 43.1 \text{ m}$$

اگر بار واحد ۱۰ تن در نظر گرفته شود داریم:

$$w = 10 \text{ t}$$

$$K_0 = \frac{w}{TPC} = \frac{10}{9.34} = 1.07$$

$$K_1 = \frac{l.w}{L \times MCTC} = \frac{36.9 \times 10}{80 \times 48.34} = 0.095$$

$$K_2 = \frac{(L-l)w}{L \times MCTC} = \frac{(80-36.9) \times 10}{80 \times 48.34} = 0.11$$

* خط تغییرات آبخور پاشنه

$$\text{خط تغییرات} = K_0 + K_1 d = 1.07 + (0.095) \times d$$

این خط درجه ۱ را می‌توان با ۲ نقطه ابتدایی و انتهایی تعیین کرد:

۱- بارگیری در AP:

$$d = 43.1 \text{ m}$$

$$\text{تغییر آبخور پاشنه} = 1.07 + (0.095) \times (43.1) = 5.16 \text{ cm}$$

۲- بارگیری در FP:

$$d = -36.9 \text{ m}$$

$$\text{تغییر آبخور پاشنه} = 1.07 + (0.095) \times (-36.9) = -2.43 \text{ cm}$$

* خط تغییرات آبخور سینه

$$K_0 + K_2 d = 1.07 + (0.11) d$$

دو نقطه ابتدایی و انتهایی این خط عبارتند از:

۱- بارگیری در AP:

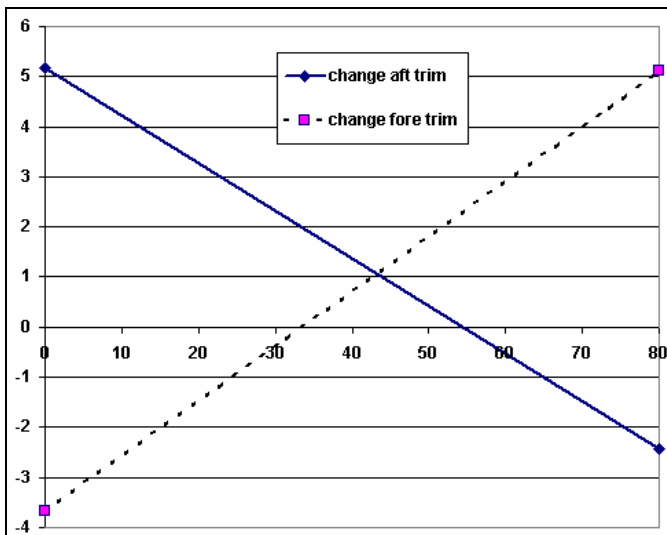
$$d = -43.1 \text{ m}$$

$$\text{تغییر آبخور سینه} = 1.07 + (0.11) \times (-43.1) = -3.67 \text{ cm}$$

۲- بارگیری در FP:

$$d = 36.9 \text{ m}$$

$$\text{تغییر آبخور سینه} = 1.07 + (0.11)(36.9) = 5.13 \text{ cm}$$



ب- حال اگر یک بار ۳۰ تنی در فاصله ۱۰ متری عمود پاشنه قرار گیرد داریم:

$$4.2 \text{ cm}$$

۱) تغییر شیب پاشنه ناشی از ۱۰ تن بارگیری:

$$4.2 \times 3 = 12.6 \text{ cm}$$

تغییر شیب پاشنه ناشی از ۳۰ تن بارگیری:

$$-2.5 \text{ cm}$$

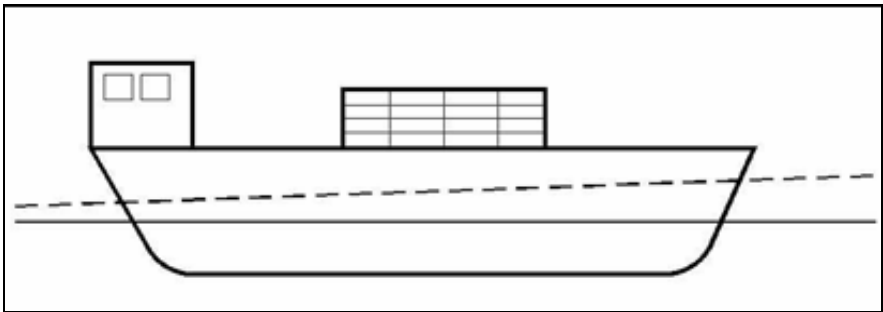
۲) تغییر شیب سینه ناشی از ۱۰ تن بارگیری:

$$-2.5 \times 3 = -7.5 \text{ cm}$$

تغییر شیب سینه ناشی از ۳۰ تن بارگیری:

بخش ۳-۲: اثرات تغییر چگالی آب دریا بر پایداری شناور

شناورها در مسیر تردد خود از آبهایی با چگالی‌های مختلف عبور می‌کنند. این محدوده تغییر چگالی از $1/005$ در دهانه رودخانه‌ها و مناطق قطبی تا $1/028$ t/m^3 در دریاچه‌های نمک و خلیج‌ها تغییر می‌کند. در برخی مواقع نیز فرض می‌شود شناور در آب شیرین با چگالی $1 t/m^3$ شناور است. تغییر شیب باعث دو تغییر اساسی در وضعیت شناور می‌شود (مطابق شکل ۱):



شکل ۱: تغییر چگالی باعث تغییر شیب شناور می‌شود.

۱- تغییر آبخور: این تغییر آبخور به دلیل تغییر چگالی رخ می‌دهد چرا که از رابطه زیر، حجم زیر آب بدنه تغییر می‌یابد:

$$\rho_1 \times V_1 = \rho_0 \times V_0 = \text{جابجایی}$$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho_1}$$

فرض کنید $\rho_0 > \rho_1$ باشد در نتیجه $V_1 > V_0$ است یعنی:

$$V_1 = V_0 + v$$

که v حجم فرو رفته در داخل آب در اثر تغییر چگالی است.

$$V + v = \frac{\rho_0}{\rho_1} \cdot V$$

$$\boxed{v = V \times \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} - 1 \right)} \quad (۳)$$

ب) اگر تغییرات حجم به صورت منشوری باشد و تغییر آب‌خور به مقدار S را داشته باشیم:

$$\frac{0 + S}{d_0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad d_0 + S = d_0 \times \frac{\rho_0}{\rho_1}$$

$$S = d_0 \times \frac{\rho_0}{\rho_1} - d_0 = d_0 \times \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} - 1 \right)$$

$$v = S \times A = \text{مساحت صفحه آب‌خور} \times \text{تغییر آب‌خور}$$

از طرفی داشتیم:

$$TPC = \frac{A \cdot \rho}{100} \rightarrow A = \frac{TPC \times 100}{\rho}$$

$$v = S \times \frac{TPC \times 100}{\rho} \quad (۴)$$

بدین ترتیب برای حل مسئله از رابطه (۳) یا (۴) مقدار v را محاسبه کرده و با استفاده از رابطه (۲) مقدار $B_0 B_1$ را محاسبه و با جاگذاری در رابطه (۱) مقدار تغییر شیب شناور ناشی از تغییر چگالی آب دریا را محاسبه می‌کنیم. میزان فرورفتگی شناور در اثر تغییر چگالی نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{میزان فرورفتگی} = \frac{v \times \rho}{TPC} \quad (۵)$$

بدین ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۵) می‌توان تغییرات آب‌خور سینه و پاشنه را محاسبه کرد.

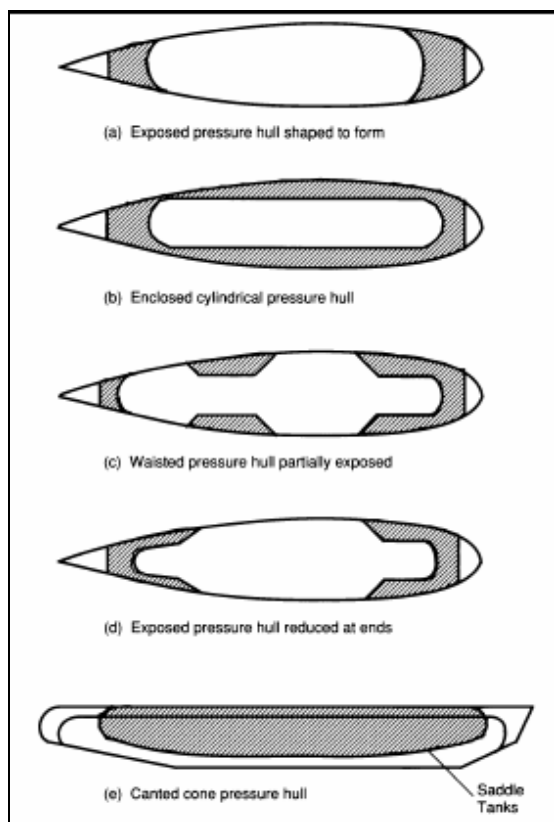
فصل ۴

هیدرواستاتیک زیر دریایی

بخش ۴-۱: هیدرواستاتیک زیر دریایی

۱- مقدمه

در این قسمت مشخصه‌های هیدرواستاتیکی زیر دریایی بررسی می‌شود. زیر دریایی برخلاف کشتی‌ها، دارای یک بدنه تقریباً استوانه‌ای شکل است که حجم جابجایی ایجاد می‌کند و در صورت بسته بودن درب اصلی آن، در هیچ زاویه غلتشی، آب وارد بدنه نمی‌شود.



شکل ۱: طرح‌های مختلف بدنه فشار و بدنه کاذب در زیر دریایی‌ها

زیردریایی مطابق شکل ۱ دارای دو بدنه می‌تواند باشد:

- **بدنه فشار:** که حجم جابجایی ایجاد می‌کند و تحمل فشار عمق آب را دارد. این بدنه از اجزاء استوانه‌ای، مخروطی و نیم‌کره تشکیل شده است ولی در این قسمت فرض می‌شود کل بدنه استوانه‌ای باشد و با این فرض، پایداری زیردریایی بررسی می‌شود که البته، چون مقطع بدنه در هر قسمت به صورت دایره‌ای است، این فرض می‌تواند دقت خوبی داشته باشد.

- **بدنه کاذب:** این بدنه، حجم جابجایی ایجاد نمی‌کند و قابلیت تحمل فشار عمق آب را ندارد و در واقع آب از منافذ این بدنه وارد می‌شود. این بدنه شکل هیدرودینامیکی مناسب برای کاهش درگ را تأمین می‌کند و بنابراین در مبحث هیدرواستاتیک چندان حائز اهمیت نیست. در فضای بین این بدنه و بدنه فشار، مخازن متعددی قرار می‌گیرند که حجم جابجایی ایجاد می‌کنند.

زیردریایی‌ها به دو حالت کلی ساخته می‌شوند:

۱- زیردریایی تک پوسته که تنها دارای بدنه فشار است و پوسته کاذب تنها در قسمت سینه و پاشنه قرار دارد. در این بخش فرض می‌شود که زیردریایی تک پوسته است.

۲- زیردریایی دو پوسته که دارای بدنه فشار و بدنه کاذب است. پایداری این زیردریایی‌ها تا حدودی با زیردریایی‌های تک پوسته متفاوت است چرا که بخش‌هایی از بیرون بدنه فشار (مخازن) نیز حجم‌های جابجایی ایجاد می‌کنند و لذا نمی‌توان بدنه را شبیه به استوانه در نظر گرفت.

در این قسمت، مطالب با فرض استوانه‌ای و تک پوسته بودن بدنه بررسی و بیان می‌شوند.

- **ذخیره بویانسی:** در این قسمت تعریف ذخیره بویانسی و محدوده آن در زیردریایی بررسی می‌شود.

- پایداری در حالت سطحی، زیرسطحی و انتقال: رفتار نقطه متاستری در آبخورها و زوایای غلش مختلف در حالت سطحی بررسی شده و در حین انتقال از سطح به زیرسطح و در زیر آب نیز موقعیت متاستری و رفتار پایداری زیردریایی ارزیابی می‌شود.

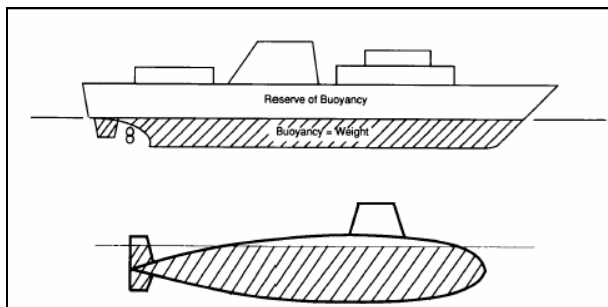
- **مروری بر مؤلفه‌های خاص پایداری:** در این قسمت، مشخصه‌های خاص پایداری زیردریایی نسبت به کشتی‌ها بیان می‌شود.

- نسبت وزن به حجم در زیردریایی: روش تأمین برابری وزن و بویانسی و درصدهای تقریبی وزنی - حجمی اجزاء داخلی زیردریایی تحلیل می‌شوند.

- حجم‌بندی مخازن و چندضلعی تریم: از مهمترین مباحث در طراحی هیدرواستاتیکی زیردریایی، حجم‌بندی مخازن متعدد زیردریایی و تعیین محل آنها می‌باشد که به کمک چندضلعی تریم بررسی می‌گردند.

۲- ذخیره بویانسی در زیردریایی

ذخیره بویانسی (ROB)^۱ در شناورها عبارتست از حجم آب‌بند^۲ بالای خط آب. ذخیره بویانسی در زیردریایی‌ها خیلی کمتر از کشتی‌ها می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: مقایسه ذخیره بویانسی در زیردریایی و کشتی

1- Reserve of Buoyancy

2 - Watertight

وقتي زیردریایی به زیر آب می‌رود، باید حجم بالای آب را نیز به زیر آب انتقال دهد. برای این منظور، مخازن شناوری یا بالاست^۱ در نظر گرفته شده‌اند که حجم این مخازن برابر حجم آب‌بند بالای آب‌خور یا همان ذخیره بویانسی می‌باشد و به عبارت دیگر:

ذخیره بویانسی = حجم مخازن شناوری = حجم آب‌بند بالای خط آب‌خور

نسبت ذخیره بویانسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{نسبت ذخیره بویانسی} = \frac{\text{حجم مخازن شناوری}}{\text{حجم جابجایی بدنه}}$$

منظور از حجم جابجایی، حجمی از بدنه است که قابلیت جابجا کردن آب را دارد که به آن «حجم بویانسی» هم می‌گویند. حجم داخل بدنه کاذب که آب وارد آن می‌شود جزء حجم جابجایی محسوب نمی‌شود.

مطابق شکل ۳ زیردریایی برای رفتن به زیر آب مخازن شناوری را پر از آب می‌کند یعنی مقداری از حجم بویانسی بدنه را از دست می‌دهد تا بتواند حجم آب‌بند بالای آب را به زیر آب بکشد. در این شرایط که «شرایط غوطه‌وری»^۲ نامیده می‌شود، ذخیره بویانسی برابر صفر می‌باشد.

ذخیره بویانسی زیردریایی‌های تک پوسته‌ای حدود ۱۰ درصد و ذخیره بویانسی زیردریایی‌های دو پوسته‌ای تا حدود ۳۰ درصد می‌باشد.

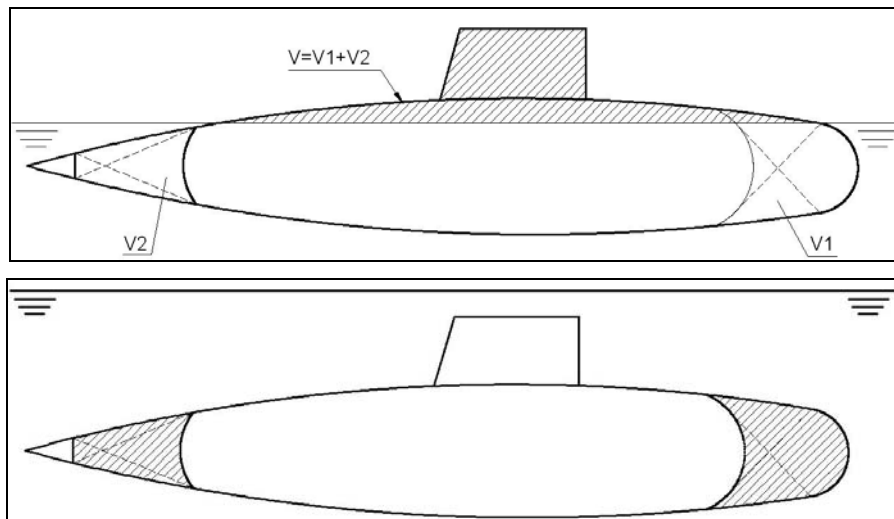
هر چه ذخیره بویانسی زیردریایی بیشتر باشد، ایمنی و احتمال نجات آن در صورت آب‌گرفتگی یکی از بخش‌های بدنه، بیشتر است.

1 - Ballast

2- منظور از حجم جابجایی، حجمی از بدنه است که قابلیت جابجا کردن آب را دارد که به آن «حجم بویانسی» هم می‌گویند. حجم داخل بدنه کاذب که آب وارد آن می‌شود جزء حجم جابجایی محسوب نمی‌شود.

3 - Submerged Condition

مخازن شناوری که به منزله ذخیره بویانسی زیردریایی هستند، در بیرون بدنه فشار نصب می‌شوند چرا که نیازی به تحمل فشار عمق ندارند زیرا در زیر سطح آب پر از آب هستند. در زیردریایی‌های تک پوسته، فقط از فضای بدنه کاذب سینه و پاشنه برای نصب مخازن شناوری استفاده می‌شود و لذا ذخیره بویانسی نمی‌تواند چندان زیاد باشد ولی در زیردریایی‌های دو پوسته‌ای (که در قسمت میانی بدنه هم بدنه کاذب وجود دارد)، علاوه بر سینه و پاشنه، از فضای بین دو پوسته نیز برای نصب مخازن شناوری استفاده می‌شود و بدین ترتیب می‌توان ذخیره بویانسی زیادی را برای این زیردریایی‌ها تأمین کرد و یک مزیت عمده برای آنها محسوب می‌شود.



شکل ۳: نقش مخازن شناوری در غوص و صعود زیردریایی

۳- پایداری در حالت سطحی، زیرسطحی و انتقال

در این بخش، پایداری زیردریایی تک پوسته‌ای با فرض کاملاً استوانه‌ای بودن بدنه بررسی می‌شود. بررسی پایداری زیردریایی در سه بخش کلی انجام می‌شود:

الف- پایداری در سطح آب

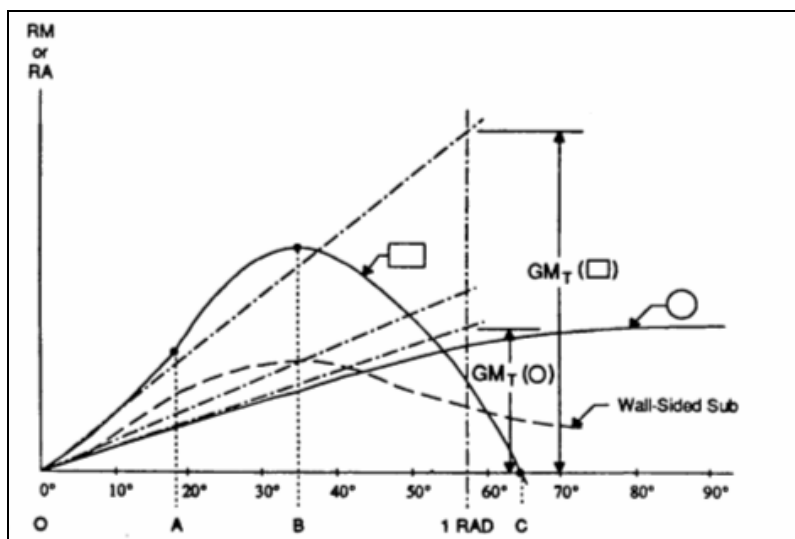
ب- پایداری در زیر آب

ج- پایداری در حین انتقال

هر یک از موارد فوق در زیر بررسی می‌شوند:

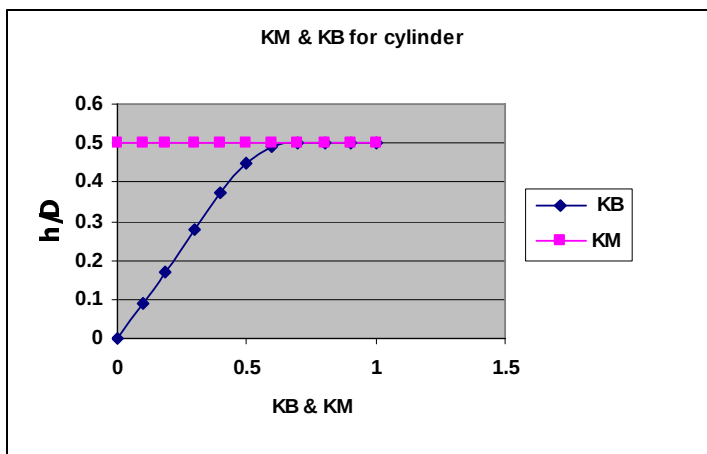
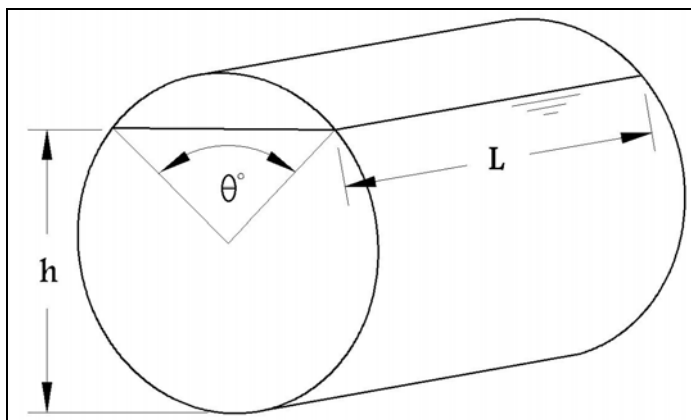
الف- پایداری در سطح آب

از آنجا که مساحت سطح آب‌خور زیردریایی نسبت به کشتی‌ها بسیار کوچکتر است، لذا در حالت کلی، پایداری سطحی زیردریایی از کشتی هم تناژ آن بسیار ضعیف‌تر است. به طور مثال ارتفاع متاستری یک زیردریایی ۱۰۰۰ تنی برابر ۳۲ سانتی‌متر و یک بارج ۱۰۰۰ تنی برابر ۷۴ سانتی‌متر می‌باشد. علت این تفاوت را می‌توان در شکل ۴ ملاحظه نمود. در این شکل تفاوت‌های منحنی GZ و ارتفاع متاستری GM برای دو نوع بدنه استوانه‌ای (زیردریایی) و مکعبی (بارج) مقایسه شده است که مؤلفه‌های پایداری بدنه استوانه‌ای خیلی ضعیف‌تر از بدنه مکعبی می‌باشد.



شکل ۴: مقایسه مؤلفه‌های پایداری بدنه استوانه‌ای و مکعبی

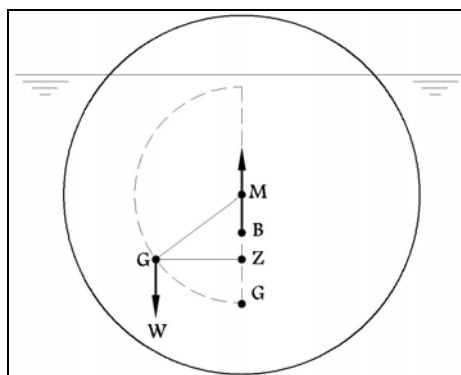
تغییرات نقطه متاستری از عوامل کلیدی در بررسی پایداری است که در این بخش در دو حالت بررسی می‌شود:



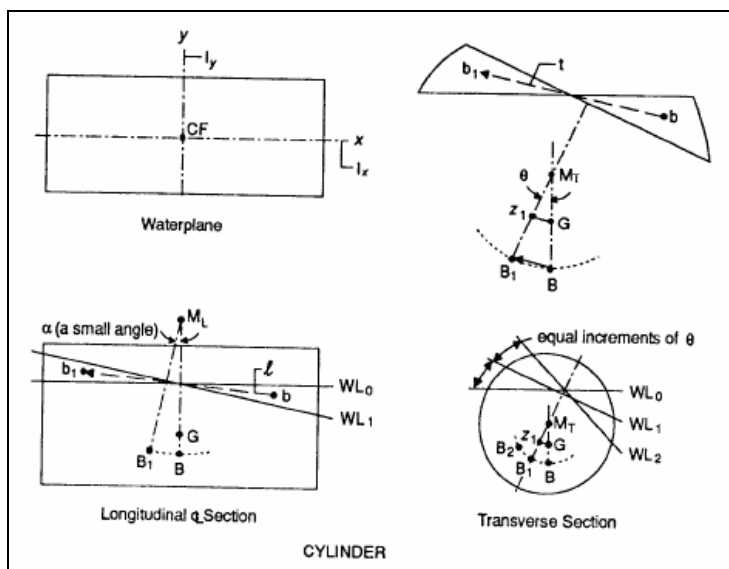
شکل ۵: تغییرات KB و KM در آب‌خورهای مختلف

(۱) تغییرات نقطه متاستری با تغییرات آب‌خور (شکل ۵).

(۲) تغییرات نقطه متاستری در زوایایی غلتش مختلف که به طور مجزا بررسی می‌شوند.



شکل ۶: مقدار GZ در بدنه استوانه‌ای که در زاویه 90° درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل ۷: وضعیت حجم زیر آب بدنه استوانه‌ای در غلتش طولی و عرضی

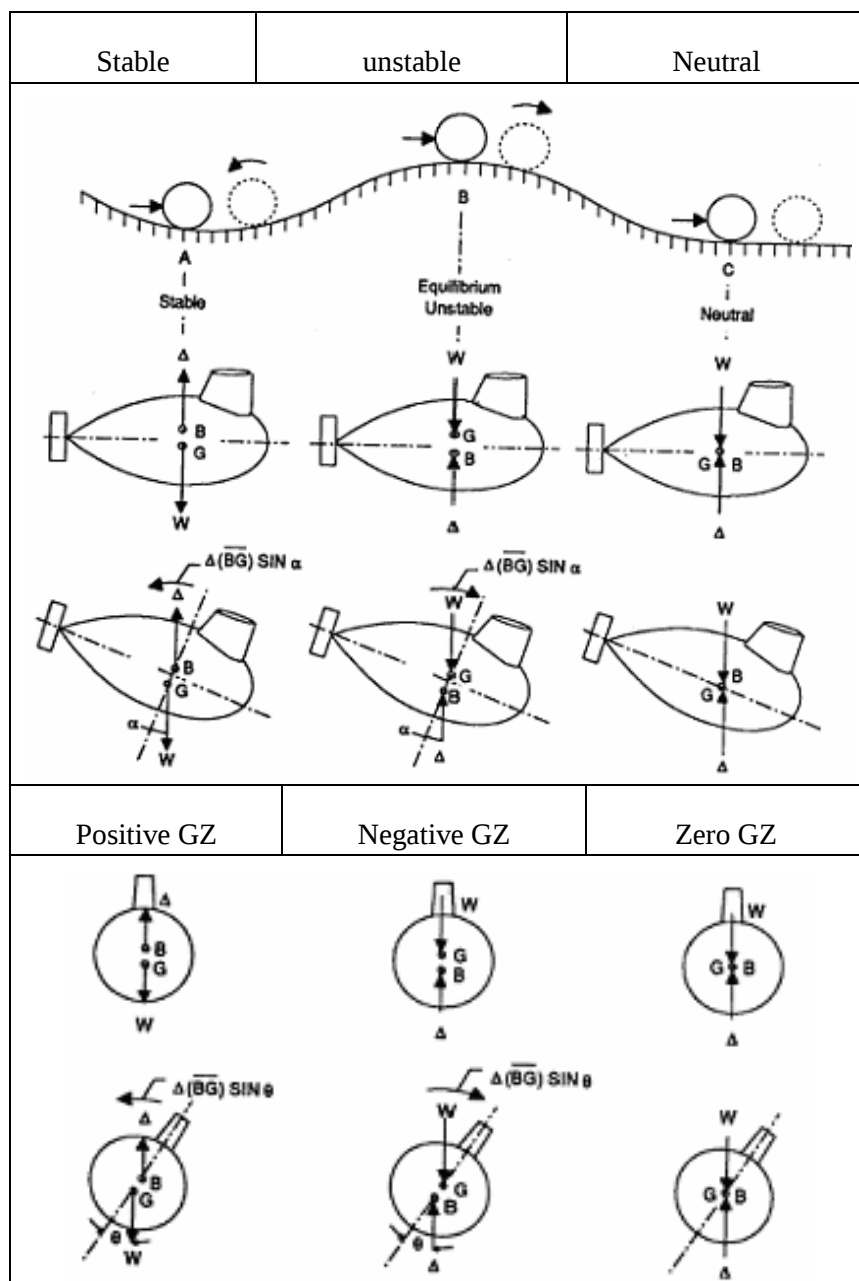
مطابق با یک قانون هندسی در دایره، خطی که بر قطاعی از دایره عمود شود، از مرکز دایره عبور کرده و منطبق بر یکی از شعاع‌های دایره است. حال اگر مقطع یک استوانه را در نظر بگیریم، سطح آب‌خور، به منزله قطاعی از دایره می‌باشد. مرکز حجم این قطاع داخل آب، در واقع مرکز بویانسی می‌باشد که در هر زاویه غلتشی، یک نقطه

ثابت است، چرا که شکل قسمت زیر آب در زوایای غلتش مختلف تغییر نمی‌کند. حال، مطابق شکل ۶ برای به دست آوردن مرکز متاستر، باید از مرکز بویانسی، عمودی بر خط آب رسم کرد که خط مرکزی را قطع کند. طبق قانون هندسی بیان شده، این نقطه تقاطع، همان مرکز دایره (مرکز استوانه) است که همواره نقطه‌ای ثابت می‌باشد. علت ثابت بودن این نقطه در مرکز دایره را می‌توان عدم تغییر شکل قسمت زیر آب و شکل صفحه آب‌خور، در هر زاویه غلتشی بیان کرد. به عبارت دیگر حجمی از بدنه که از آب خارج می‌شود دقیقاً برابر و مشابه قسمتی است که وارد آب می‌شود (مطابق شکل ۷). البته در سایر شناورها، این مسئله وجود ندارد و صفحه آب‌خور در هر زاویه غلتش تغییر می‌کند و متناسب با آن، مرکز متاستری نیز تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که در بدنه استوانه‌ای، مرکز متاستر عرضی چه با تغییر آب‌خور و چه با تغییر زاویه غلتش، همواره منطبق بر مرکز استوانه می‌باشد و تغییر نمی‌یابد اثبات رابطه $KM = R$ در بخش‌های قبل ارائه شد. برای متاستر طولی در سطح آب چنین رابطه‌ای برقرار نیست چنانچه طبق شکل ۸، M_L تنها در زوایایی غلتش کوچک، ثابت است.

ب- پایداری در زیر آب

نقطه متاستری زیردریایی در زیر آب بر مرکز بویانسی منطبق می‌شود و در واقع مرکز بویانسی، وظایف نقطه متاستری را بر عهده دارد. علت این تطابق از تعریف نقطه متاستری در سطح آب برمی‌آید که از محل تقاطع امتداد مرکز بویانسی (عمود بر خط آب) با خط مرکزی به دست می‌آید و در زیر آب که خط آب‌خوری وجود ندارد، در واقع مرکز بویانسی همان نقطه متاستری خواهد بود یعنی $KB=KM$ و $BG=GM$. حال مطابق شکل ۸ یک زیردریایی را در زیر آب در نظر بگیرید. در این شکل وضعیت پایداری زیرسطحی در سه حالت پایدار (حالت A)، پایداری خنثی (حالت C) و ناپایدار (حالت B) آمده که در آنها، هم وضعیت پایداری طولی و هم پایداری عرضی بررسی شده است که در هر دو حالت طولی و عرضی، حتی برای زوایایی غلتش بزرگ، بازوی بازگرداننده برابر است با:

$$GZ=BG \cdot \sin \theta$$



شکل ۸: پایداری طولی و عرضی زیردریایی در زیر آب در سه حالت پایدار، ناپایدار و خنثی

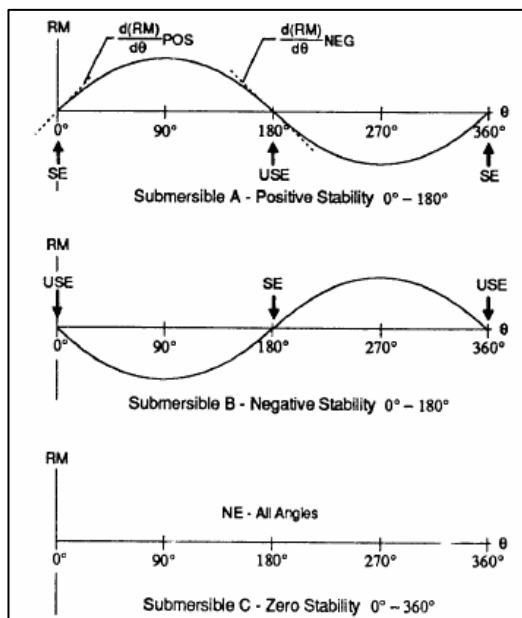
در حالت پایدار (حالت A)، مرکز ثقل زیردریایی در زیر مرکز بویانسی قرار داشته و ارتفاع متاستری اولیه مثبت است. ($BG > 0$).

در حالت تعادل خشی (حالت C)، مرکز ثقل و مرکز بویانسی بر هم منطبق هستند و ارتفاع متاستری اولیه صفر می‌باشد ($BG = 0$).

در حالت تعادل ناپایدار (حالت B)، مرکز ثقل در زیر مرکز بویانسی قرار دارد و ارتفاع متاستری اولیه منفی می‌باشد ($BG < 0$).

بر این اساس می‌توان ممان بازگرداننده ($W \times BG \times \sin \theta$ یا $W \times GZ$) را مطابق شکل ۹ در نظر گرفت که در حالت پایدار، محدوده پایداری تا 180° درجه می‌باشد و در شکل ۱۰ می‌توان آن را تصور کرد.

مقدار BG در زیردریایی حدود ۳-۴ درصد قطر بدنه فشار می‌باشد.



شکل ۹: وضعیت منحنی GZ در سه حالت پایدار، ناپایدار و خشی

ج- پایداری در حالت انتقال از سطح آب به زیر آب

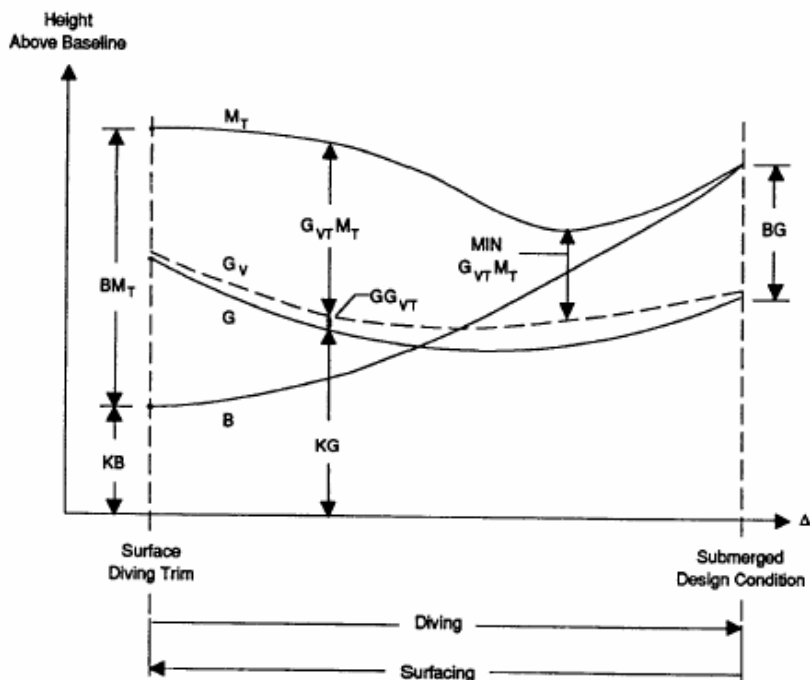
زیردریایی در هنگام انتقال از سطح آب به زیر آب دچار دو تغییر اصلی می‌شود:

(۱) تغییرات مرکز بویانسی : همانطور که بیان شد، مخازن شناوری (بالاست) زیردریایی وظیفه انتقال زیردریایی از سطح آب به زیر آب را بر عهده دارند. به هنگام غوص کردن، مخازن شناوری پر از آب می‌شوند و معادل آن، حجمی از بالای بدنه (بالای بدنه فشار، عرشه و برجک به همراه تجهیزات داخل آنها) به زیر آب می‌رود یعنی در واقع یک حجم بویانسی از بدنه زیر آب کم شده و به بالای بدنه افزوده شده است. این انتقال باعث بالا آمدن مرکز بویانسی می‌شود تا جاییکه مرکز بویانسی و مرکز متاستری بر هم منطبق می‌شوند.

(۲) مرکز ثقل مجازی: می‌دانیم که مخازن شناوری دارای حجم بزرگی حدود ۱۰-۳۰ درصد حجم کل بدنه فشار هستند. در حین انتقال از سطح به زیر آب یا بالعکس، این مخازن در یک محدوده زمانی، به صورت نیمه پر می‌شوند و اثر سطح آزاد زیادی ایجاد می‌کنند.

اثر سطح آزاد منجر به تعریف مرکز ثقل مجازی (G_v) می‌شود (که در بخش اثر سطح آزاد مخازن بررسی شد).

این دو اثر باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پایداری و ایجاد حالت بحرانی می‌شود. نمودار تغییرات مشخصه‌های پایداری در انتقال بین سطح و زیر آب در شکل ۱۰ برای یک زیردریایی دو پوسته‌ای ترسیم شده است که این تغییرات بررسی می‌شوند.



شکل ۱۰: تغییرات مرکز ثقل، بویانسی و متاستری در انتقال از سطح آب به زیر آب

محور عمودی (در این شکل) ارتفاع از زیر بدنه (یا خط مبنا^۱) می‌باشد و محور افقی نیز عمق تغییرات آب‌خور در انتقال از سطح آب به زیر آب است.

همانطور که بیان شد منحنی B یک منحنی صعودی است تا جاییکه وقتی زیردریایی کاملاً به زیر آب رفت، مرکز بویانسی و مرکز متاستری (M_T) بر هم منطبق می‌شوند. منحنی (M_T) نیز دارای یک مینیمم است چرا که در زیردریایی‌های دو بدنه، همانطور که بیان شد، مخازن متعددی در فاصله بین پوسته سخت و نرم قرار می‌گیرند که سطح آب‌خور را در حالت سطحی افزایش می‌دهند و وقتی زیردریایی به زیر آب می‌رود، این مساحت آب‌خور مضاعف حذف می‌شود، در نتیجه نقطه متاستری به یکباره پایین

می‌آید. تا جائیکه بر مرکز بویانسی منطبق می‌گردد. اگر زیردریایی تک بدنه باشد، همانطور که بیان شد، مرکز متاستری همواره بر مرکز دایره مقطع بدنه، منطبق خواهد ماند و در این نمودار به صورت یک خط مستقیم ترسیم می‌شد. نمودار G نیز به دلیل آگیری مخازن متغیر در زیر بدنه، در اندکی کاهش ارتفاع دارد و منحنی G_V نیز مرکز ثقل مجازی است که در اثر سطح آزاد مخازن (که اغلب آن مربوط به سطح آزاد مخازن شناوری در حین انتقال است) در آن لحاظ شده است. فاصله بین منحنی M_t و G_V در هر لحظه، بیانگر ارتفاع متاستری (GM_t) می‌باشد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، ارتفاع متاستری در حین انتقال، در یک لحظه به کمترین مقدار خود می‌رسد که «حالت بحرانی در حین انتقال» نامیده می‌شود. این ارتفاع باید همواره مثبت باشد و در برابر نیروی امواج و جریانات دریایی مقاومت کند و منفی شدن آن به معنای زوایای غلتش بسیار بزرگ است که می‌تواند بسیار خطرآفرین باشد. در برخی مواقع ارتفاع متاستری طولی (GM_L) می‌تواند، حالت بحرانی‌تری از ارتفاع متاستری عرضی داشته باشد که این مشخصه خاص زیردریایی بوده و در کشتی‌ها هیچگاه چنین اتفاقی نمی‌افتد.

اگر در حین انتقال از سطح به زیر سطح حالتی اتفاق بیافتد که منحنی M_t ، منحنی G_V را قطع کند، این بدین معناست که زیردریایی در یک لحظه به حالت ناپایدار رسیده است و لذا طراحی باید به گونه‌ای صورت پذیرد که این اتفاق هیچگاه رخ ندهد یا اگر به ناچار رخ دهد، زیردریایی به سرعت از این حالت ناپایدار عبور کند.

۴- مروری بر مؤلفه‌های خاص پایداری زیردریایی

مشخصه‌های خاص پایداری را نسبت به کشتی‌ها به صورت زیر می‌توان مرور کرد:

(۱) محدوده پایداری ۱۸۰ درجه

محدوده پایداری زیردریایی در سطح آب و زیر آب برابر ۱۸۰ درجه می‌باشد در حالیکه در شناورها، محدوده پایداری کمتر از ۹۰ درجه است. حداکثر بازوی

بازگرداننده زیردریایی هم به طور ثابت در زاویه 90° درجه رخ می‌دهد که علت آنرا می‌توان ثابت بودن مرکز متاستر و رابطه $GZ = GM \cdot \sin(\theta)$ دانست (شکل ۹).

۲) ارتفاع متاستری اولیه

ارتفاع متاستری اولیه (GM) زیردریایی نسبت به کشتی هم تناژ آن، خیلی کوچکتر است. این مسئله را می‌توان در شیب اولیه منحنی GZ ملاحظه کرد (شکل ۴).

۳) اهمیت بیشتر پایداری طولی نسبت به پایداری عرضی در زیر آب

در زیر آب، همانطور که بیان شد، مرکز بویانسی هم در نقش متاستر عرضی و هم متاستر طولی است. در کشتی‌ها ارتفاع متاستری طولی خیلی بزرگتر از متاستر عرضی است که باعث شده پایداری عرضی شناور خیلی مهمتر از پایداری طولی باشد ولی در زیردریایی در زیر آب، نقطه متاستری و ارتفاع متاستری طولی و عرضی یکسان هستند ($GM_t = GM_L = BG$) در حالی که ممان‌های طولی وارد شده بر بدنه خیلی بزرگتر از ممانهای عرضی هستند لذا پایداری طولی در زیر آب از اهمیت خاصی برخوردار است (شکل ۸).

۴) عدم وجود زاویه ل در زیر آب

زاویه ل در زیر آب وجود ندارد. در شناورها اگر GM اولیه شناور منفی باشد، شناور تا حدی غلتش می‌کند که GM صفر شود و به این زاویه غلتش «زاویه ل» گویند. در زیردریایی در زیر آب، اگر BG اولیه منفی باشد، عاملی برای صفر یا مثبت کردن آن وجود ندارد مگر اینکه زیردریایی به اندازه 180° درجه (!) دوران کند تا BG صفر شود که این به معنای نابودی آن است.

۵) ثابت بودن متاستر عرضی و متغیر بودن متاستر طولی در سطح آب

همانطور که بیان شد، در یک شکل استوانه‌ای، مرکز متاستر عرضی همواره بر مرکز استوانه منطبق است و در هنگام غلتش عرضی، قسمت بیرون آمده از آب همواره برابر

قسمت فرو رفته در آب است ولی مطابق شکل ۷ در غلتش طولی حجم‌های قسمت بیرون آمده و فرو رفته با هم برابر نیستند و متاسنتر طولی نمی‌تواند ثابت باشد.

۶) شرط پایداری

در زیردریایی در زیر آب شرط پایداری وابسته به موقعیت B و G نسبت به هم است ولی در سطح آب، موقعیت G و M نسبت به هم، شرط پایداری است و البته ارتفاع متاستری چه در سطح آب و چه در زیر آب، برابر شعاع بدنه است.

۵- نسبت وزن به حجم در زیردریایی

اصل حاکم بر این بخش این است که وقتی زیردریایی در زیر آب است، وزن و بویانسی آن دقیقاً با هم برابر هستند.

یعنی اگر مخازن شناوری (بالاست) زیردریایی از آن جدا شوند، زیردریایی به حالت غوطه‌ور با ذخیره بویانسی صفر می‌رسد. اتصال مخازن شناوری به آن، به معنای انتقال از حالت غوطه‌وری به شناوری می‌باشد. بنابراین صرفنظر از حجم بویانسی مخازن شناوری، وزن و جابجایی سایر اجزاء باید دقیقاً با هم شوند به گونه‌ای که چگالی کل زیردریایی حدوداً برابر چگالی آب دریا باشد و این چگالی نباید بیشتر از چگالی آب دریا باشد. مثلاً اگر زیردریایی در چگالی $(\frac{t}{m^3}) 1.02$ شناور است، چگالی زیردریایی نیز باید برابر همین مقدار باشد. اگر چگالی زیردریایی برابر چگالی آب دریا باشد، زیردریایی با ذخیره بویانسی صفر به حالت غوطه‌ور می‌ماند و اگر چگالی آن بیشتر از آب دریا باشد، زیردریایی با بویانسی منفی غرق می‌شود و اگر چگالی آن کمتر از چگالی آب دریا باشد، زیردریایی با بویانسی مثبت به حالت شناور می‌ماند. بویانسی مثبت باید صرفاً در حالتی که مخازن خالی هستند، وجود داشته باشد. یعنی در این حالت چگالی زیردریایی کمتر از آب دریا بوده و زیردریایی به حالت شناور باقی

می ماند و این همان مفهوم ذخیره بویانسی می باشد. اگر ذخیره بویانسی ۱۰ درصد باشد ، چگالی زیردریایی به همراه مخازن شناوری خالی تقریباً برابر ۰/۹ است.

چگالی شناور نسبت	نوع شناور
۱	زیردریایی با مخازن شناوری پر (در زیر آب)
۰/۹	زیردریایی با مخازن شناوری خالی با ذخیره بویانسی
۰/۳	کشتی فریگیت
۰/۲	ناو هواپیمابر
۰/۸	کشتی فله بر
۰/۸۵	نفتکش

جدول ۱: مقایسه چگالی شناورهای مختلف

جدول ۱ مقایسه ای بین چگالی شناورهای مختلف را بیان می دارد .

از چگالی های فوق می توان فهمید که در مقایسه زیردریایی با هر شناور تجاری یا نظامی، فضای باز داخل زیردریایی بسیار محدود و چیدمانی داخلی آن بسیار فشرده است. بطور مثال فضای آزاد داخل یک ناوچه حدود ۳/۵ برابر یک زیردریایی هم تناژ آن است.

زیردریایی برای رسیدن به چگالی بالا باید دارای حجم بدنه کوچک و وزن زیاد باشد. عمده اقلام وزنی اصلی زیردریایی شامل سازه بدنه فشار، باطری ها و ماشین آلات موتورخانه می باشد. هر یک از این بخش ها حجم خاصی از بدنه را اشغال می کنند که درصد حجمی و وزنی هر قسمت از اجزاء زیردریایی را می توان طبق جداول ۲ و ۳ در نظر گرفت.

درصد وزنی	درصد حجمی	اجزاء زیردریایی
۹	۲۸	سلاح
۴۳	—	سازه
۳۵	۵۶	ماشین آلات و موتورهای
۴	۱۱	قسمت استراحت خدمه
۱	۵	انبارها
۸	—	سرب

جدول ۲: درصد وزنی و حجمی اجزاء زیردریایی دیزل الکتریک

درصد وزنی	درصد حجمی	اجزاء زیردریایی
۸	۳۰	سلاح
۴۵	—	سازه
۳۵	۵۵	ماشین آلات و موتورخانه
۴	۱۰	قسمت استراحت خدمه
۱	۵	انبارها
۷	—	سرب

جدول ۳: درصد وزنی و حجمی اجزاء زیردریایی اتمی غیر بالستیک

۳۵ - ۴۵ درصد از کل وزن زیردریایی به وزن سازه اختصاص دارد و حدود ۶۰ درصد از وزن سازه نیز وزن بدنه فشار می‌باشد.

همچنین حدود نیمی از حجم داخل بدنه به ماشین‌آلات اصلی و فرعی (شامل موتور الکتریکی، دیزل و ژنراتور) اختصاص دارد. ۳۰ درصد از حجم داخل بدنه نیز به سلاح و سیستم سلاح تعلق دارد. حجم باقی مانده برای محل استراحت خدمه نیز برابر ۱۰ درصد است که فضای بسیار محدودی در مقایسه با کشتی‌های نظامی و تجاری می‌باشد. فضای رفاهی برای خدمه در کشتی‌های نظامی حدود ۳۰ درصد می‌باشد. نکته مهم در اینجا است که اگر پس از ساخته شدن زیردریایی، بویانسی از وزن بیشتر باشد، می‌توان با افزودن وزنه‌های سربی به برابری وزن و بویانسی دست یافت. صورتی که اگر وزن از بویانسی بیشتر باشد، چاره کار بسیار دشوار است از جمله:

۱) برداشتن سرب‌های موجود در داخل زیردریایی که باعث کاهش پایداری می‌شود چرا که این سرب‌ها از قسمت زیر بدنه برداشته و باعث بالا آمدن مرکز ثقل می‌شوند.

۲) نصب فوم بر روی بدنه (جهت افزایش بویانسی) که مضراتی از جمله افزایش درگ و شکل ظاهری غیر زیبا دارد. ضمن اینکه این فوم‌ها در عمق آب فشرده شده و باعث به هم خوردن تعادل وزن و بویانسی می‌شوند.

بنابراین برای جلوگیری از بروز اضافه وزن در زیردریایی، باید دسته‌بندی جامعی از اقلام وزنی زیردریایی در نظر گرفت و هر جزء وزنی را قبل از نصب شدن بر روی زیردریایی توزین و مختصات محل نصب آن را تعیین کرد به گونه‌ای که بتوان با بیشترین دقت، وزن و مرکز ثقل زیردریایی را تعیین کرد.

برای ایجاد ضریب اطمینان کافی در حین انجام طراحی، دو نوع وزنه‌های سربی در زیردریایی در نظر می‌گیرند:

۱) وزنه‌های سربی ثابت: این وزنه‌ها حدود ۱-۳ درصد از وزن کل زیردریایی هستند که در قسمت‌هایی که در آینده احتمال تغییر دارند، قرار می‌گیرند مانند قسمتی

که قرار است در آینده در آنجا سلاح نصب شود. بقیه سرب‌ها در داخل کیل قرار می‌گیرند و افزایش پایداری را به دنبال دارند. این وزنه‌ها حتماً باید در زیردریایی وجود داشته باشند.

۲) وزنه‌های سربی احتیاطی: این وزنه‌ها در ابتدای طراحی در حدود ۳-۴ درصد در نظر گرفته می‌شوند و خطاهای طراحی و ساخت را پوشش می‌دهند به گونه‌ای که شاید پس از آب‌اندازی، چیزی از این درصد وزنی باقی نمانده باشد به عبارت دیگر، طراح زیردریایی، این درصد وزنی را در قبال جبران خطاهای انجام شده خرج می‌کند.

برای پرهیز از خطاهای بیش از حد در مرحله طراحی، ضریب اطمینان‌های متفاوتی برای اجزاء زیردریایی در نظر می‌گیرند که برای اقلام مشابه‌سازی شده کمترین ضریب اطمینان و برای اقلام ابداعی یا اقلامی که قبلاً مشابه‌سازی نشده‌اند، بیشترین ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین تخمین ابعاد و حجم بدنه را باید طوری در نظر گرفت که با وزن زیردریایی برابری کند. برای رسیدن به این مطلوب، یکی از دو روش کلی زیر می‌تواند مبنا قرار گیرد:

۱) مبنای وزنی: در این مبنا سعی بر این است که بتوان با کمترین حجم پوسته سخت، به برابری وزن و بویانسی دست یافت. در این مبنا معمولاً ملاحظاتى مانند راحتی خدمه (فضای مورد نیاز استراحت و رفاه خدمه) و تسهیلات تعمیر و نگهداری (به دلیل چیدمانی فشرده تجهیزات) چندان در اولویت قرار نمی‌گیرند. ولی این مبنا، باعث رسیدن به کمترین حالت وزنی زیردریایی و کمترین سطح خیس بدنه (کاهش درگ) می‌شود.

۲) مبنای حجمی: در این مبنا سعی بر این است که بتوان اجزاء داخل بدنه را به گونه‌ای اصولی جانمایی و چیدمانی کرد که خدمه از راحتی نسبی برخوردار بوده و دسترسی و تعمیر و نگهداری دستگاه‌ها هم راحت‌تر باشند. این روش به کمترین حجم و سطح خیس ممکن بدنه نمی‌رسد و باید درصد وزنی سرب‌های موجود در بدنه را

افزایش داد به گونه‌ای که بتوان به برابری وزن و بویانسی دست یافت. در عوض این مبنا باعث سهولت تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه‌های آن می‌شود و خدمه از راحتی بیشتری برخوردارند.

۶- حجم‌بندی مخازن زیردریایی

در این قسمت حجم‌بندی کلیه مخازن زیردریایی بررسی شده است که شامل تعیین حجم و محل قرارگیری مخازن زیر می‌باشد: مخازن متغیر (جبران وزنی) - مخزن جبران اژدر - مخازن تریم - مخزن غوص سریع - مخازن بالاست (بالاست میانی و طرفینی) - مخازن آب شیرین - مخزن سوخت - مخزن فاضلاب - مخزن خن.

از این مخازن برخی دارای کاربرد حفظ تعادل و غوص و صعود هستند (مانند مخازن متغیر، بالاست، غوص سریع، جبران اژدر و تریم) و برخی برای ذخیره مواد مصرفی (مانند سوخت و آب شیرین) و برخی دیگر دارای کاربرد بهداشتی و دفع مواد زائد (مانند فاضلاب و سیستم خن).

تعیین حجم این مخازن تابعی از نیازمندیهای فنی اولیه ۱ و سناریوی کاربری ۲ می‌باشد. به طور مثال ذخیره آب شیرین وابسته به تعداد خدمه و مدت زمان حضور در دریا و ذخیره سوخت وابسته به حداکثر برد مورد نیاز (در سرعت کروز) می‌باشد. از این مخازن، مخازنی که مربوط به حفظ تعادل و غوص و صعود زیردریایی هستند از اهمیت حیاتی برخوردارند، چرا که زیردریایی در سطح آب باید دارای ذخیره بویانسی کافی باشد و در زیر آب نیز وزن و بویانسی دقیقاً با هم برابر باشند که حفظ تعادل در زیر سطح از دشواری و اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. افزایش ناخواسته وزن و عدم جبران آن باعث غوص ناخواسته و خطر برخورد با کف دریا یا رسیدن به عمق

انهدام سازه‌ای^۱ می‌شود و کاهش ناخواسته وزن و عدم جبران آن نیز باعث صعود ناخواسته به سطح آب و خطر برخورد با شناورهای سطحی و یا شناسایی شدن را در پی دارد. از طرفی جابجایی افراد داخل زیردریایی یا جابجایی اجسام یا مصرف مواد مصرفی نباید باعث شیب غیر قابل کنترل شود و باید بتوان در هر شرایط تغییر ممان زیردریایی را از نظر طولی بالانس نمود. برای تعیین محدوده تغییرات وزنی و ممان وزنی، چندضلعی تریم ترسیم می‌گردد که در این بخش بدان نیز پرداخته خواهد شد.

در زیر به نحوه طراحی حجم‌بندی مخازن اشاره می‌گردد:

۱) تعیین حجم مخزن جبران وزن (مخزن متغیر)

زیردریایی به هنگام غوطه‌وری در زیر آب دارای ذخیره بویانسی صفر است یا به عبارتی وزن و بویانسی زیردریایی دقیقاً با هم برابر هستند. البته در حالت واقعی، اغلب زیردریایی‌های نظامی با اندکی بویانسی مثبت به زیر آب می‌روند که با نیروی بالک‌ها بر آن غلبه می‌کنند ولی در حالت کلی باید بتوان هرگونه افزایش یا کاهش وزن را جبران نمود. البته باید توجه داشت که تغییرات بویانسی نیز باعث به هم خوردن تعادل وزن و بویانسی می‌گردد که وظیفه جبران تغییرات بویانسی نیز بر عهده مخازن متغیر می‌باشد که در اصطلاح کلی به این مخازن. «مخازن جبران وزنی» گویند. این مخزن در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد. مهمترین عوامل تغییرات وزن و بویانسی عبارتند از:

۱-۱) تغییرات چگالی آب دریا

تغییرات چگالی آب دریا باعث تغییرات بویانسی می‌شود چرا که:

$$\text{displacement} = V \times \rho$$

که با تغییر چگالی، مقدار جابجایی، تغییر می‌کند. تغییرات چگالی هم در نقاط مختلف سطح دریا تغییر می‌کند و هم در عمق آب. در سطح آب چگالی آب دریا از ۱/۰۰۵ در دهانه رودخانه‌ها و مناطق قطبی تا ۱/۰۲۸ در دریاچه‌های نمک و مناطق

گرمسیری تغییر می‌کند. چگالی آب در سطح آب همیشه کمتر از عمق آب است. در هر صورت افزایش چگالی در عمق چندان قابل ملاحظه نیست و تغییرات چگالی در نقاط مختلف در سطح آب بررسی می‌شود. فرض کنید مطابق سناریوی کاربری، محدوده تغییرات چگالی در عملیات یک زیردریایی از 1.022-1.028 باشد که بدین ترتیب داریم:

$$V = \text{حجم بدنه}$$

$$V(\rho_2 - \rho_1): \text{تغییرات نیروی بویانسی}$$

آب اولیه که باید در مخازن جبران زیردریایی موجود باشد تا هنگامی که زیردریایی به منطقه با چگالی کمتر می‌رود، بتواند آنرا تخلیه کند، محدوده 1.022-1.025 می‌باشد که داریم:

$$m_f = V \times (1.025 - 1.022)$$

البته باید توجه داشت که چگالی معیار طراحی زیردریایی معمولاً $\frac{t}{m_3}$ 1.025 در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲) فشردگی بدنه در عمق

هر چه بدنه فشار به عمق بیشتری غوص می‌کند، بدنه دچار فشردگی می‌شود و بنابراین کاهش حجم بدنه به معنای کاهش نیروی بویانسی است. بنابراین باید بتوان مقداری از وزن زیردریایی را کاهش داد تا وزن و بویانسی باز هم برابر شوند. این کاهش وزن به وسیله خارج کردن آب داخل مخازن متغیر که به همین منظور در نظر گرفته شده انجام می‌شود. مقدار فشردگی بدنه در عمق معمولاً $\frac{0.3}{100}$ حجم بدنه در نظر گرفته می‌شود که برابر با وزن آب اولیه مورد نیاز موجود در مخزن متغیر برای جبران فشردگی بدنه است. نکته جالب در اینجا است که غوص زیردریایی به عمق آب باعث دو اثر مغایر هم می‌شود: فشردگی بدنه در عمق که باعث کاهش بویانسی می‌گردد و افزایش چگالی آب دریا که باعث افزایش بویانسی می‌شود. لذا زیردریایی به هنگام غوص می‌تواند در یک عمق مشخص که برآیندی از اثرات فوق بر بدنه وارد

شود، با برابری وزن و بویانسی به حالت تعادل برسد ولی در حجم‌بندی مخازن، تغییرات چگالی در عمق‌های مختلف در نظر گرفته نمی‌شود.

۱-۳) جبران وزن غذا و آب آشامیدنی

متناسب با مصرف غذا و دفع آنها توسط مخزن فاضلاب، باید آبیگری انجام شود تا وزن و بویانسی با هم برابر بمانند.

۱-۴) جبران وزن غواص‌ها

وزن هر غواص به همراه تجهیزات غواصی و کپسول هوای آن حدود ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد که در صورت حضور نداشتن غواص‌ها، باید آبیگری معادل وزن آنها انجام شود.

۱-۵) جبران وزن هوای فشرده کپسول‌ها

زیردریایی دارای مخازن هوای فشرده متعددی است که مصرف آنها باعث سبکتر شدن زیردریایی می‌شود و باید آبیگری لازم برای جبران آنها انجام شود.

۱-۶) بالا آمدن دکل‌ها

زیردریایی در عمق اسنورکل و عمق پریسکوپ، دکل‌های متعددی را افرشته می‌دارد که هر یک دارای حجم قابل ملاحظه‌ای هستند. اگر این دکل‌ها به صورت نفوذی یا تلسکوبی باشند، بالا آمدن آنها به معنای افزایش حجم بویانسی زیردریایی است. از طرفی در عمق اسنورکل یا پریسکوپ زیردریایی نباید صعود ناخواسته به سطح داشته باشد لذا این مقدار افزایش بویانسی با آبیگری مخزن متغیر جبران می‌شود.

۱-۷) آبیگری مخزن خروج غواص

برای خروج غواص از مخزن در نظر گرفته شده، قبل از باز شدن درب بیرونی مخزن باید حجم داخل مخزن از آب پر شده باشد. این آب از مخزن جبران تهیه می‌شود.

* معمولاً در زیردریایی‌های نظامی حجم مخزن متغیر $2/5-3$ درصد حجم کل بدنه می‌باشد.

۲) تعیین حجم مخزن جبران اژدر

زیردریایی نظامی دارای درصد وزنی مشخصی برای حمل سلاح می‌باشد که بدان payload گفته می‌شود و معادل این وزن باید حجم مناسب برای جبران وزن سلاح وجود داشته باشد. این مخزن در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد.

۳) تعیین مخازن تریم

مخازن تریم زیردریایی که حتی‌المقدور در منتهی‌الیه سینه و پاشنه (داخل بدنه) نصب می‌شوند برای تنظیم تریم زیردریایی بکار می‌روند. این مخازن به دو قسمت چپ و راست در سینه و پاشنه تقسیم شده‌اند به گونه‌ای که یکی از مخازن آب را از سینه به پاشنه و دیگری آب را از پاشنه به سینه می‌فرستد. این مخزن در واقع کمک می‌کند که مرکز ثقل و بویانسی از نظر طولی در یک امتداد قرار گیرند. ابتدا تخمین اولیه از حجم این مخازن انجام شود و سپس کارایی حجم تخمین زده شده، در چند ضلعی تریم بررسی می‌گردد. دو روش برای تخمین اولیه حجم مخازن تریم وجود دارد: (۱) ایجاد زاویه شیب 20° درجه (۲) حجم آب داخل مخازن تریم نیم درصد از حجم پوسته سخت

۴) تعیین حجم مخزن غوص سریع^۱

مخزن غوص سریع از مخازنی است که به غوص کردن زیردریایی از عمق پریسکوپ کمک می‌کند. دو علت اصلی را می‌توان برای کارایی این مخزن در نظر گرفت که عبارتند از:

۱- برای فرار از خطر در عمق اسنورکل یا پریسکوپ به گونه‌ای که زیردریایی در کمترین زمان ممکن غوص کند.

1 - Negative tank (or) quick dive tank

۲- هنگامیکه زیردریایی در امواج حرکت می‌کند، تلاطم امواج از آبرگرفتنی کامل بخش‌های آبنگیر آزاد (FF) جلوگیری می‌کند و لذا با حبس شدن هوا در این فضاها، زیردریایی با آبنگیری مخازن بالاست، به سختی غوص می‌کند و حالت شناوری را حفظ می‌نماید. بنابراین غوص کردن در آبهای موج بسیار مشکل است که البته جهت امواج در راحتی غوص کردن مهم است. ترتیب مشکل بودن غوص در جهت امواج عبارتست از: ۱- از روبرو ۲- از پشت ۳- به صورت عرضی

برای غلبه بر این مشکل از مخزن غوص سریع استفاده می‌شود.

اگر زیردریایی با مخازن غوص سریع پر، به زیر آب برود دارای بویانسی منفی می‌باشد لذا پس از رفتن به زیر آب باید بتواند به سرعت مخازن غوص سریع را تخلیه کند. مخزن غوص سریع باید روی مرکز بویانسی یا کمی جلوتر از مرکز بویانسی باشد به گونه‌ای که زیردریایی بتواند با شیرجه سینه به زیر آب برود. این مخزن باید به صورت کپسولی باشد به گونه‌ای که امکان دمیدن آن در عمق، وجود داشته باشد و حجم آن باید به گونه‌ای باشد که کمی بیشتر از حجم دکل‌های افراشته، در حالت عمق پریسکوپی باشد. مزیت عمده این مخازن، قطر بزرگ ورودی مخزن است که تخلیه و آبنگیری با دبی بسیار بالا را فراهم می‌کند. این سرعت زیاد آبنگیری باعث می‌شود از اینرسی غوص نیز بتوان برای زیر آب رفتن هر چه سریعتر زیردریایی استفاده کرد. این مخزن، داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد.

۵) تعیین حجم مخازن بالاست^۱

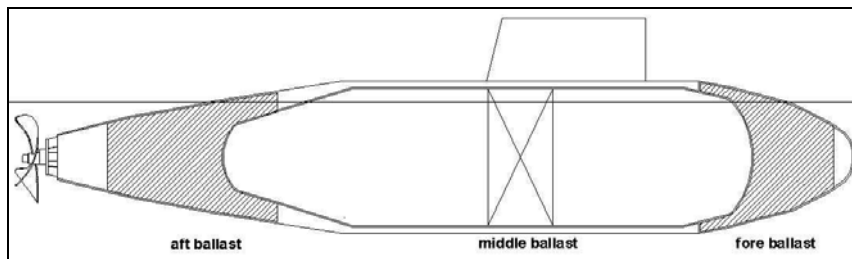
مخازن بالاست در واقع وظیفه تأمین ذخیره بویانسی زیردریایی را به عهده دارند یعنی در حالت بارگیری معمولی^۲، در سطح آب، حجم بالای خط آبخور برابر حجم مخازن بالاست می‌باشد.

1 - Balladt tanks

2 - Normal Load

این مخازن در سطح آب خالی و در زیر آب پر از آب هستند. تخلیه این مخازن با هوای فشرده انجام می‌شود و این مخازن در بیرون بدنه فشار قرار گرفته و جزء مخازن نرم محسوب می‌شوند. در زیردریایی‌های دو بدنه این مخازن به حداقل سه قسمت در طول بدنه تقسیم می‌شوند (مخازن میانی، سینه و پاشنه) و بین بدنه فشار و بدنه کاذب قرار می‌گیرند (شکل ۱۳). ولی در زیردریایی‌های تک بدنه، تنها از فضای سینه و پاشنه (داخل بدنه کاذب و بیرون بدنه فشار) می‌توان برای این منظور استفاده کرد. لذا در زیردریایی‌های تک بدنه نمی‌توان مخزنی را در قسمت میانی به عنوان «مخازن بالاست میانی» در نظر گرفت مگر اینکه این مخزن در داخل پوسته سخت (بدنه فشار) نصب شود که معمولاً محدودیت فضای داخل بدنه، اجازه این امر را نمی‌دهد.

کاربرد اصلی مخازن بالاست میانی این است که زیردریایی ابتدا برای حرکت در سطح آب، کل مخازن را نمی‌دمد بلکه ابتدا با تخلیه مخازن میانی، مقدار اندکی از بدنه را بالای خط آب قرار می‌دهد و در صورت بروز خطر، زیردریایی می‌تواند در مدت زمان کمتری به زیر آب غوص کند. برای مناطقی که زیردریایی از امنیت منطقه مطمئن نیست قرار گرفتن در این حالت می‌تواند برای زیردریایی بسیار مهم و ارزشمند باشد. این حالت از قرارگیری زیردریایی که نه کاملاً در سطح آب و نه کاملاً در زیر آب است را حالت آماده^۱ می‌گوییم.



شکل ۱۳: سه دسته از چیدمانی مخازن بالاست در زیردریایی دو بدنه (در این شکل مخازن بالاست میانی دمیده شده و زیردریایی در حالت آماده قرار گرفته است).

زیردریایی پس از اطمینان از امنیت منطقه، با دمیدن سایر مخازن بالاست می‌تواند کاملاً در حالت سطحی قرار گیرد و با حداکثر ذخیره بویانسی و بیشترین فری برد به حرکت خود ادامه دهد.

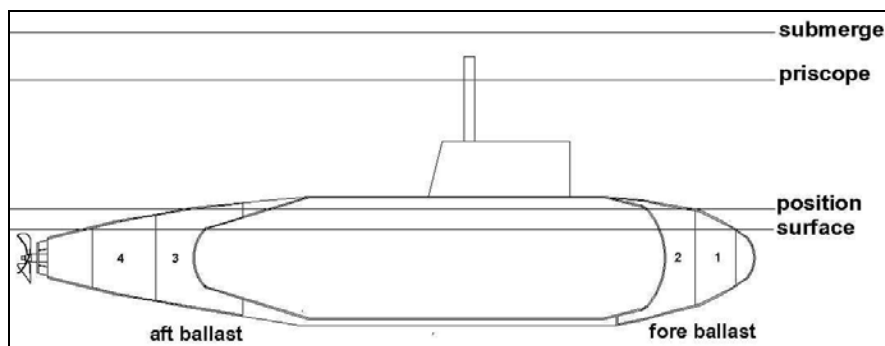
بنابراین حالات زیر را می‌توان برای وضعیت غوطه‌وری و شناوری برشمرده (مطابق شکل ۱۴):

۱- حالت غوطه‌وری^۱

۲- حالت پریسکوپ و اسنورکلی^۲

۳- حالت آماده^۳

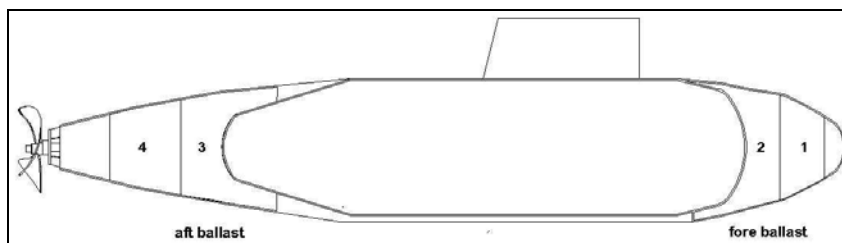
۴- حالت سطحی^۴



شکل ۱۴: حالات مختلف عمق حرکت زیردریایی

برای زیردریایی‌های تک بدنه به جای مخازن بالاست نصب شده در وسط بدنه می‌توان از دو نیم کردن مخازن بالاست سینه و پاشنه به عنوان مخازن بالاست میانی استفاده کرد (شکل ۱۵).

-
- 1 - Submerged state
 - 2 - priscopes state
 - 3 - position state
 - 4 - surface state



شکل ۱۵: در زیردریایی‌های تک‌بدنه، مخازن ۲ و ۳ وظیفه مخازن بالاست میانی را انجام می‌دهند.

مطابق شکل اگر زیردریایی دارای چهار مخزن بالاست مجزا باشد مخازن بالاست ۲ و ۳ در نقش مخازن بالاست میانی می‌باشند به گونه‌ای که دمیدن این مخازن، زیردریایی را در حالت آماده قرار می‌دهد. مخازن بالاست منتهی‌الیه سینه پاشنه (مخزن ۱ و ۴) را نیز «مخازن بالاست طرفینی» می‌نامیم. بدین ترتیب زیردریایی تک بدنه نیز می‌تواند به کمک این مخازن میانی در حالت آماده قرار گیرد. درصد حجمی مشخصی برای مخازن بالاست نمی‌توان برشمرد بلکه تعیین حجم آنها تابعی از دو پارامتر مهم می‌باشد:

الف) تأمین پایداری مناسب در حالت آماده

ب) مرکز حجم طولی قسمت بیرون آمده از آب در حالت آماده منطبق بر مرکز حجم مخازن بالاست میانی باشد به گونه‌ای که باعث شیب ناخواسته در سطح آب نگردد.

تأمین پایداری در حالت آماده از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است چرا که سطح آبخور در این حالت بسیار کوچک است و بخش اندکی از بالای بدنه در بیرون از آب قرار دارد. از طرفی بدنه در معرض باد و امواج سطح دریا قرار دارد و نیروهای وارد آن نسبت به حالت غوطه‌وری بسیار بزرگتر هستند.

۶) تعیین حجم مخزن آب شیرین

تعیین حجم این مخزن وابسته به تعداد خدمه و مدت عملیات زیردریایی می‌باشد. این آب برای مصارف نوشیدنی و استحمام مصرف می‌شود. این مخزن در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد.

۷) تعیین حجم مخزن سوخت

جهت تامین سوخت لازم برای موتورهای دیزل زیردریایی باید ذخیره سوخت کافی وجود داشته باشد. این مخازن می‌توانند هم در بیرون و هم داخل بدنه فشار نصب شوند.

۸) تعیین حجم مخزن فاضلاب

این مخزن برای دفع فاضلاب دستشویی و حمام از زیردریایی استفاده می‌گردد. این مخزن، کپسولی شکل می‌باشد و در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد به گونه‌ای که در عمق آب بتواند تخلیه فاضلاب را انجام دهد.

۹) تعیین حجم مخزن خن^۱

این مخزن برای تخلیه هرز آبهای موتورخانه در عمق آب بکار می‌رود و به صورت کپسولی شکل و در داخل بدنه قرار می‌گیرد.

۷- چندضلعی تریم^۲

* چندضلعی تریم چیست؟

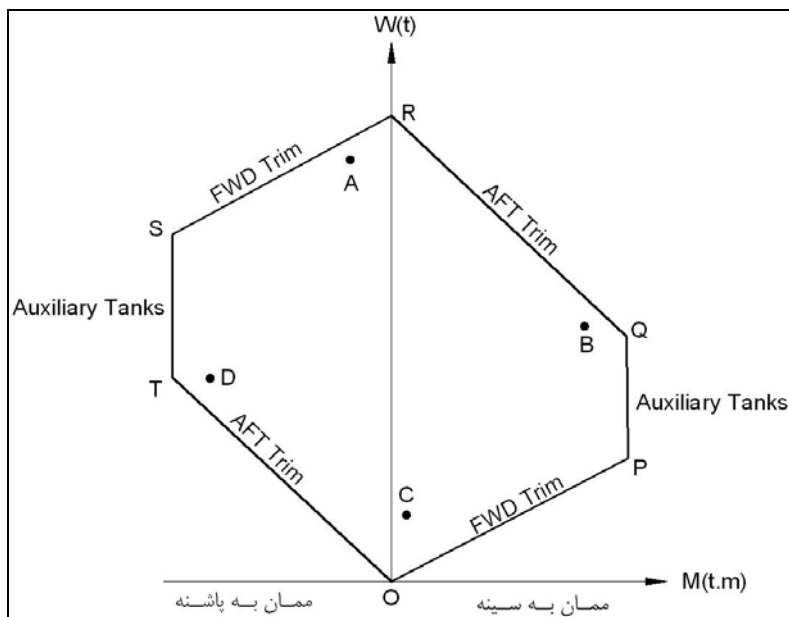
چندضلعی تریم که چندضلعی تعادل^۳ نیز نامیده می‌شود، وسیله‌ای برای تبیین گرافیکی تغییرات وزن و ممان وزن می‌باشد. محور افقی معرف ممان طولی و محور عمودی معرف وزن می‌باشد. این چندضلعی به کمک وزن آب داخل مخازن و ممان‌هایی که ایجاد می‌کنند ترسیم می‌گردد. مخازنی باید در اینجا لحاظ شوند که آب داخل آنها را می‌توان در مواقع نیاز، تغییر داد. شکل ۱۶ نمونه‌ای از این چندضلعی می‌باشد. مخازن تریم جلو، تریم عقب، متغیرها و احیاناً مخزن فاضلاب جزء مخازنی

1 - Bilge tank

2 - Trim polygon

3 - equilibrium polygon

هستند که در ترسیم منحنی تریم به کار می آیند چراکه تخلیه، آگیری یا جابجایی آب داخل آنها می تواند باعث ایجاد ممان طولی در زیردریایی گردد. مخازن بالاست، از آنجا که کاملاً پر یا کاملاً خالی هستند، در اینجا به کار نمی آیند. در شکل فوق، مخازن تریم و مخازن فرعی دیگر که ممکن است در زیردریایی وجود داشته باشد ترسیم شده است.



شکل ۱۶: چندضلعی تریم زیردریایی جهت بررسی وزن و ممان های وزنی قابل تأمین توسط مخازن

* تغییرات مجاز وزن و ممان براساس چندضلعی تریم

در زیردریایی معمولاً چند عامل مهم برای تغییرات وزن و بویانسی وجود دارد:

- تغییر چگالی آب دریا

- فشردگی بدنه

- سناریوهای کاربری

- دفع زباله و فاضلاب

- آبگرفتگی

همچنین مهمترین عوامل تغییر ممان طولی عبارتند از:

- تغییرات وزنی بیان شده که باتوجه به موقعیت آنها، تغییرات ممان

ایجاد می شود.

- تجمع افراد در یک محل به دلایل: زمان استراحت و تجمع در اتاق

استراحت یا آشپزخانه، بروز یک سانحه و تجمع افراد برای رفع نقص

- جابجایی بارهای داخلی (باتوجه به سناریوی کاربری)

این تغییرات وزن و ممان در هر صورت باید در داخل چندضلعی تریم باشند. در واقع اگر مختصات این تغییرات در داخل این چندضلعی باشد، اثر آنها را می توان به وسیله مخازن، جبران کرد و اگر این تغییرات در بیرون چندضلعی باشد، با استفاده از مخازن نمی توان به طور کامل این وزن ها و ممان ها را خنثی کرد لذا زیردریایی دچار شیب ناخواسته و غیرقابل کنترل می شود.

این مسئله در زیردریایی های میدجت بسیار حساس تر است و کوچکترین جابجایی ها (حتی جابجایی خدمه)، بر میزان شیب زیردریایی مؤثر و مشهود است. زمان و تعداد تجمع افراد نیز باید طبق منحنی تریم برای یک زیردریایی در هر سناریو به طور مجزا تعریف شده باشد. وجود وزنه های سربی این امکان را فراهم می کند که با جابجا کردن آنها، نقاط را به داخل چندضلعی منتقل کرد. مثلاً اگر در یک شرایط خاص، قسمت سینه بیش از حد سنگین شده است به طوریکه خارج از چندضلعی قرار می گیرد با عقب دادن وزنه های سربی می توان این نقطه را به داخل چندضلعی هدایت کرد. این وزنه ها در زیردریایی های بسیار کوچک در داخل بدنه هستند. در سایر زیردریایی ها نیز سرب داخل کیل ها را می توان برای این منظور استفاده کرد. این روش

در صورتی موثر است که حالت ایجاد شده، استثنایی و موقتی باشد به گونه‌ای که پس از رفع شدن این شرایط خاص، بتوان سرب‌ها را به محل اول خود بازگردانید.

* ممان‌گیری تغییرات وزن

در ابتدا لازم به ذکر است که نیروهای اعمال شده در این چندضلعی و ممان حاصل از آنها، فقط ممان‌های هیدرواستاتیکی هستند و ممان‌های هیدرودینامیکی در اینجا در نظر گرفته نمی‌شوند.

ممان‌گیری باید حول یک نقطه مبنا باشد که می‌توان حول هر نقطه‌ای انتخاب شود به شرطی که تغییرات وزن اعمال شده نیز حول ممان نقطه باشد.

از آنجا که زیردریایی در زیر آب حول مرکز بویانسی و در سطح آب حول مرکز شناوری (مرکز سطح صفحه آب‌خور) شیب می‌کند، بهتر است یکی از این نقاط یا ترجیحاً مرکز بویانسی به عنوان نقطه مبنای ممان‌گیری انتخاب شود. چراکه چندضلعی تریم برای حالت غوطه‌وری (زیر آب) ترسیم می‌شود. لازم به یادآوری است که چندضلعی تریم فقط براساس وزن و ممان حاصل از آب داخل مخازن ترسیم می‌گردد و تغییرات وزن و ممان اشیاء و افراد داخل زیردریایی باید به صورت نقاطی داخل این چندضلعی قرار گیرند و اثر مستقیمی بر رسم چندضلعی تریم ندارد. چندضلعی تریم را از آنچه در طراحی به دست آمده باید اندکی کوچکتر فرض کرد تا خطاهای طراحی یا اشکالات ساخت (کالیبره کردن مخازن) جبران شود.

* نحوه ترسیم چندضلعی تریم

برای ترسیم این چندضلعی ابتدا کلیه مخازن خالی فرض می‌شوند، سپس مخازن سینه به ترتیب پر می‌شوند تا به قسمت پاشنه برسد. (از قبیل مخازن تریم و متغیر).

اگر ممان به سمت سینه (ساعتگرد) مثبت و ممان به سمت پاشنه (پادساعتگرد)، منفی فرض شود با پر شدن از سینه به پاشنه باعث می شود سمت راست چندضلعی تکمیل گردد. سپس بار دیگر مخازن از قسمت پاشنه به سمت سینه پر می شوند و سمت چپ نمودار تکمیل می گردد. این توضیحات، طبق شکل عبارتست از: (برای یک زیردریایی کوچک به طور مثال):

پر شدن مخازن از قسمت سینه:

- پر شدن مخزن تریم جلو، انتقال از O به P: ایجاد ممان مثبت رو به سینه و افزایش وزن

- پر شدن مخازنی که تقریباً در محل مرکز بویانسی هستند: انتقال از P به Q: صرفاً باعث افزایش وزن می شود و ممان طولی ایجاد نمی کند.

- پر شدن مخزن تریم عقب: انتقال از Q به R: ایجاد ممان منفی رو به پاشنه و افزایش

بدین ترتیب قسمت راست چندضلعی تریم تکمیل می شود. برای تکمیل قسمت چپ چندضلعی تریم، فرض می کنیم مخازن از پاشنه به سینه پر شوند:

- پر شدن مخزن تریم عقب: انتقال از O به T

- پر شدن مخازن میانی، انتقال از T به S

- پر شدن مخزن تریم سینه: انتقال از S به R

هم اکنون هر حالتی از بارگذاری که وزن و ممان وزن خاص را به دنبال دارد، باید در داخل این چندضلعی قرار گیرد به طور مثال چهار حالت حدی (نقاط A و B و C و D) بر روی این نمودار توضیح داده می شوند:

- وضعیت A: زیردریایی در حالت سبک در آب شور

- وضعیت B: زیردریایی دارای پاشنه سبک در چگالی متوسط آب دریا

- وضعیت C: زیردریایی در حالت سنگین در آب شیرین

- وضعیت D: زیردریایی در حالت سینه سبک در چگالی متوسط آب

دریا

هر حالت تغییر وزن و ممان وزنی که احتمال دارد زیردریایی با آن مواجه شود باید به صورت نقاطی در داخل چندضلعی تریم قرار گیرند در غیر اینصورت باید حجم مخازن را به گونه‌ای افزایش داد که باعث بزرگتر شدن چندضلعی تریم شود و هیچ نقطه‌ای از تغییرات و ممان وزن خارج از چندضلعی قرار نگیرد. استفاده از وزنه‌های سربی نیز راه حل دیگری است که قبلاً بیان شد.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: زیردریایی نظامی اژدرافکن - السابحات



ایران به پشتوانه دانشمندان و محققین خود، توانسته است به دانش طراحی و ساخت زیردریایی های پیشرفته نظامی دست یابد. این زیردریایی ها به گونه ای طراحی شده اند که دارای توانایی های خاصی برای عملیات در آب های کم عمق خلیج فارس هستند. این زیردریایی در سال ۸۵ توانست رتبه اول تحقیقات کاربردی جشنواره خوارزمی را کسب کند. بدین ترتیب ایران جزء معدود کشورهای سازنده زیردریایی در دنیا می باشد.

فصل ۵

به گل نشستن

و

پایداری در حالت صدمه دیده

بخش ۵-۱: به داک بردن و به گل نشستن شناور

در این بخش دو مبحث که از نظر پایداری شباهت زیادی به هم دارند بررسی می‌شود: به داک بردن و به گل نشستن شناور.

* به داک بردن شناور

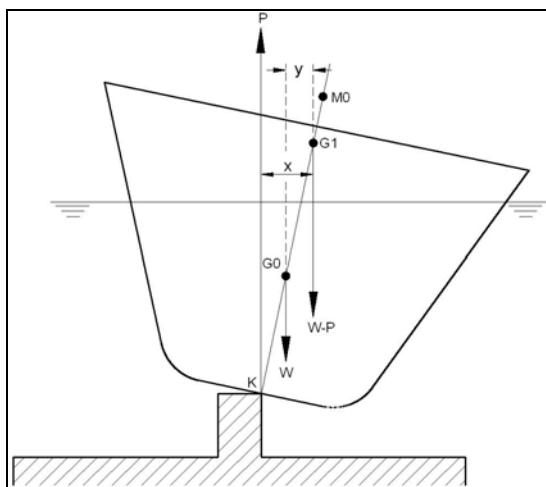
وقتی شناور وارد داک (حوضچه تعمیر) می‌شود باید بر روی بلوک‌های قرار داده شده در کف داک، بنشیند. از طرف بلوکها، نیروی رو به بالای P بر شناور وارد می‌شود که این نیرو عامل کاهش پایداری است که آن را به دو طریق می‌توان در نظر گرفت:

(۱) بالا رفتن مرکز ثقل (افزایش KG)

(۲) پایین آمدن مرکز متاستر

این موارد به صورت زیر بررسی می‌شوند:

(۱) بالا رفتن مرکز ثقل را می‌توان مطابق شکل ۱ توجیه کرد.



شکل ۱: تأثیر نیروی بلوک‌های داک (P) بر افزایش KG .

اگر وزن شناور W و نیروی P ناشی از بلوکها باشد، برآیند آنها $W-P$ خواهد بود که داریم:

$$W.y = P.x$$

$$x = KG_1.\sin\theta$$

$$y = G_0G_1.\sin\theta$$

$$W \times G_0G_1 \times \sin\theta = P \times KG_1 \times \sin\theta$$

$$W \times G_0G_1 = P \times KG_1$$

$$W \times G_0G_1 = P \times (KG_0 + G_0G_1)$$

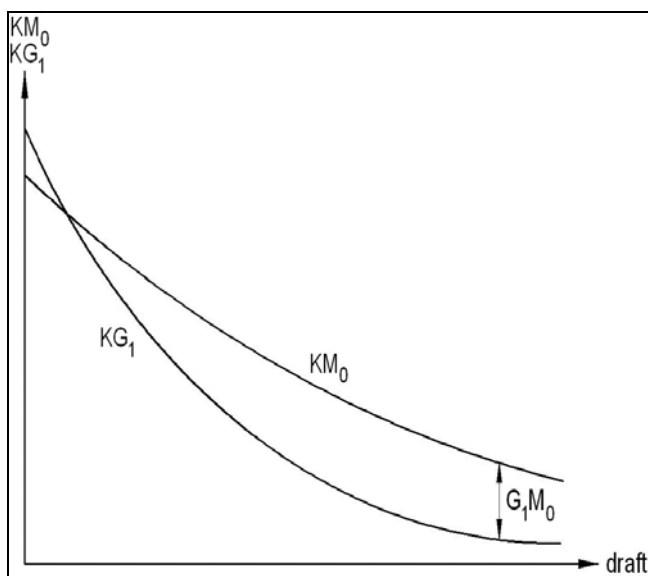
$$W \times G_0G_1 = P \times KG_0 + P \times G_0G_1$$

$$(W - P)G_0G_1 = P \times KG_0$$

$$G_0G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P}$$

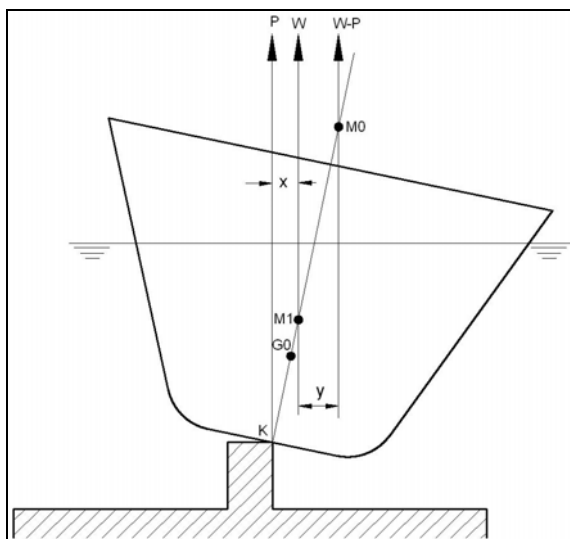
G_0G_1 نشان‌دهنده افزایش ارتفاع مرکز ثقل ناشی از نشست شناور روی بلوکها می‌باشد که باعث تضعیف پایداری می‌گردد چرا که ارتفاع متاستری اولیه برابر G_0M_0 و در حالت نشست روی بلوکها برابر G_1M_0 می‌باشد.

هر چه آب داخل داک بیشتر تخلیه می‌شود و آب‌خور شناور کاهش می‌یابد، مقدار نیروی P بزرگتر و کاهش پایداری شدیدتر می‌شود، به گونه‌ای که نمودار شکل ۲ را می‌توان برای تغییرات آب‌خور و مقدار ارتفاع متاستری در نظر گرفت.



شکل ۲: تغییرات پایداری با تغییر ارتفاع آب داخل داک

(۲) پایین آمدن مرکز متاستری از نشستن شناور در داک را می توان مطابق شکل ۳ در نظر گرفت. فرض کنید وزن شناور W باشد در نتیجه نیروی بویانسی برابر W رو به بالا باید وجود داشته باشد. حال بخشی از نیروی رو به بالا را P جبران کرده است و برای رسیدن به نیروی رو به بالای W ، مقدار نیروی $W-P$ باید در محل نشان داده شده در شکل ۳، بر شناور وارد شود که برآیند آنها نیروی W شود. این نیروی برآیند W ، خط مرکزی شناور را در نقطه M_1 قطع می کند که می توان تصور کرد که نقطه متاستر از M_0 به M_1 منتقل شده باشد (با فرض زوایای غلتش کوچک). یعنی ارتفاع متاستر اولیه که G_0M_0 بوده است به G_0M_1 تغییر یافته است.



شکل ۳: تأثیر نیروی بلوک‌های داک (P) بر کاهش ارتفاع متاسنتر

محاسبه مقدار کاهش ارتفاع متاستر (M_0M_1) با توجه به شکل ۳ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(W - P).y = P.x$$

$$x = KM_1 \cdot \sin \theta$$

$$y = M_0 M_1 \cdot \sin \theta$$

$$(W - P) \times M_0 M_1 \times \sin \theta = P \times K M_1 \times \sin \theta$$

$$W \times M_0 M_1 - P \times M_0 M_1 = P \times K M_1$$

$$W \times M_0 M_1 = P \times K M_1 + P \times M_0 M_1$$

$$M_0 M_1 = \frac{P \times K M_0}{W}$$

مثال) کشتی مدل ۱ در سناریوی وزنی اصلی باید به حوض خشک انتقال یابد. مقادیر GM را در حین کاهش آب داخل حوضچه از ۲ تا ۵ متر بدست آورید. آبخوری را که شناور در آن ناپایدار می شود تعیین کنید.

حل)

$$G_0 G_1 = \frac{P \times KG}{W - P}$$

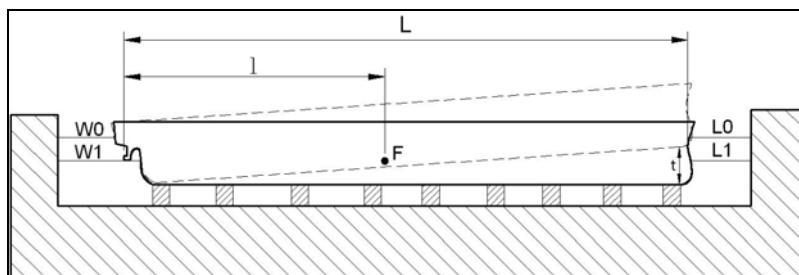
آبخور	جابجایی اولیه	W-P (t)	P (t)	KG 0	G0G1	KG1	KM0	G1M0
5	3560	3560	0	5.1	0.00	5.10	6.14	1.04
4	3560	2665.4	894.6	5.1	1.71	6.81	6.13	-0.68
3	3560	1858	1702	5.1	4.67	9.77	6.5	-3.27
2	3560	1135.4	2424.6	5.1	10.89	15.99	7.78	-8.21

عبارت W-P ذکر شده در جدول، در واقع بیانگر مقدار جابجایی در هر آبخور می باشد که به کمک آن و جابجایی اولیه شناور، مقدار P محاسبه می شود.

شناور در آبخوری بین ۵ و ۴ متر ناپایدار می شود. این آبخور برابر ۴/۲ متر می باشد. بدین ترتیب وقتی آبخور در داخل داک به ۴/۲ متر می رسد، باید تکیه گاه های لازم برای جلوگیری از یکبر شدن شناور در نظر گرفته شود.

* لحظه بحرانی در ورود شناور به داک بردن بار شیب سینه یا پاشنه

با پایین آمدن سطح آب، P بطور یکنواخت شروع به افزایش می کند و پایداری شناور پیوسته کاهش می یابد. حالت بحرانی هنگامی است که کشتی با شیب زیاد وارد داک شده و با بلوک های سینه و پاشنه تماس پیدا می کند و آبخور شناور در داخل داک به حدی کم شده است که سینه شناور در حال نشستن روی بلوک ها می باشد (شکل ۴). این حالت به لحظه بحرانی معروف است.



شکل ۴: نمایش لحظه بحرانی در حالتی که شناور با شیب وارد داک می‌شود.

اگر شناور با شیب t وارد حوضچه شود، نیروی بحرانی P به صورت زیر بدست می‌آید:

$$t = \frac{P \times l}{MCTC}$$

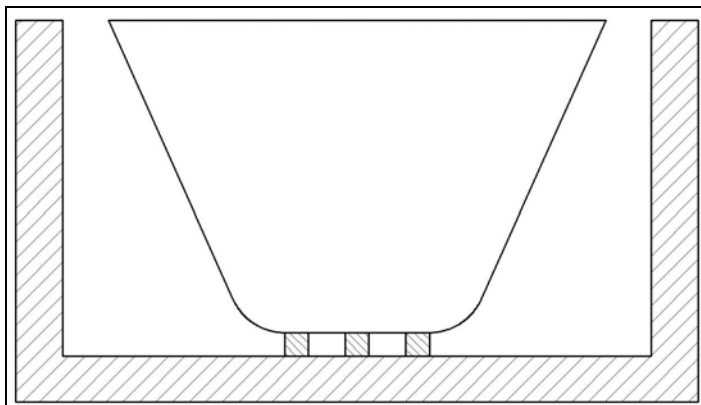
$$P = \frac{t \times MCTC}{l}$$

بدین ترتیب نیروی P که در محاسبه میزان کاهش پایداری (G_0G_1 یا M_0M_1) لحاظ می‌گردد، از مقدار شیب شناور به هنگام ورود به داک به دست می‌آید. ابتدا سینه یا پاشنه روی یکی از بلوکها می‌نشیند که بحرانی‌ترین موقعیت را به دلیل داشتن بیشترین فاصله از مرکز شناوری دارد. بدین ترتیب در بحث به داک بردن، ارتباط نزدیک و وابسته‌ای بین پایداری عرضی و طولی برقرار می‌شود. همچنین از مقدار حداکثر مجاز P (که ارتفاع متاستر را صفر کند) می‌توان حداکثر مقدار زاویه شیب مجاز در ورود به داک را محاسبه کرد. در برخی موارد که سینه یا پاشنه شناور دچار آبگرفتگی شده باشد، شیب زیاد سینه یا پاشنه اجتناب‌ناپذیر است و باید از حجم‌های بویانسی جداگانه‌ای برای کاهش شیب استفاده کرد.

معمولاً برای کاهش احتمال واژگونی شناور در هنگام به داک بردن، اقدامات زیر انجام می‌شود:

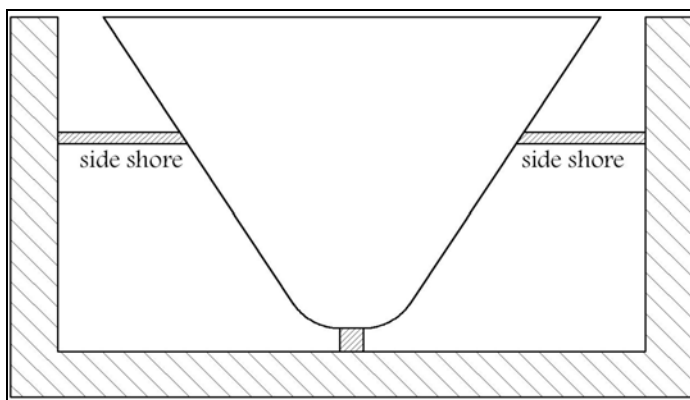
۱- ورود شناور بدون زاویه شیب به داخل داک

۲- استفاده از بلوکهای عرضی چند ردیفه به گونه‌ای که شناور فقط بر روی یک بلوک میانی تکیه نکند (مطابق شکل ۵) در این هنگام نیروی P به طور متقارن بر بدنه وارد می‌شود.



شکل ۵: افزایش تعداد بلوک‌ها در عرض بدنه، عاملی برای کاهش حالت بحرانی

۳- استفاده از تکیه‌گاههای عرضی^۱ بین شناور و داک که از واژگونی شناور جلوگیری می‌کند (شکل ۶).



شکل ۶: استفاده از تکیه‌گاههای جانبی برای جلوگیری از واژگونی شناور

مثال) شناور مدل ۱ می‌خواهد با آب‌خور سینه ۳/۶ متر و آب‌خور پاشنه ۴/۴ متر با $KG = 5.6 \text{ m}$ وارد حوضچه خشک شود. مطلوبست:

الف) GM در لحظه بحرانی

ب) ممان بازگرداننده در زاویه غلتش ۵ درجه

ج) آب‌خور سینه و پاشنه در لحظه بحرانی

حل) آب‌خور متوسط در این حالت برابر ۴ متر می‌باشد. از مشخصات هیدرواستاتیکی در آب‌خور ۴ متر داریم:

$$t_a = 4.4 \text{ m}$$

$$t_f = 3.6 \text{ m}$$

$$t = 4.4 - 3.6 = 0.8 \text{ m}$$

$$KG_0 = 5.6 \text{ m}$$

$$KM_0 = 6.13 \text{ m}$$

$$MCTC = 38.38 \frac{t.m}{cm}$$

$$TPC = 8.51 \frac{t}{cm}$$

$$LCF = 2.32 \text{ m} \text{ از وسط شناور}$$

$$l = 40 - 2.32 = 37.68 \text{ m} \text{ فاصله F از عمود پاشنه}$$

$$\Delta = 2665.4 \text{ t}$$

الف)

$$P = \frac{t \times MCTC}{l} = \frac{0.8 \times 38.38}{37.68} = 0.81 \text{ t}$$

$$G_0 G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P} = \frac{0.81 \times 5.6}{2665.4 - 0.81} = 0.0017 \text{ m} = 1.7 \text{ mm}$$

$$M_0 M_1 = \frac{P \times KM_0}{W} = \frac{0.81 \times 6.13}{2665.4} = 0.0018 = 1.8 \text{ mm}$$

ب) ممان بازگرداننده به دو روش قابل محاسبه است:

روش اول:

$$G_1 M_0 = KM_0 - KG_0 - G_0 G_1 = 6.13 - 5.6 - 0.0017 = 0.5283 \text{ m}$$

ممان بازگرداننده

$$= (W - P) \times G_1 M_0 \times \sin \theta = (2665.4 - 0.81) \times 0.5283 \times \sin 5^\circ = 123.1 \text{ t.m}$$

$$G_0 M_1 = KM_0 - KG_0 - M_0 M_1 = 6.13 - 5.6 - 0.0018 = 0.5282 \text{ m}$$

$$\text{ممان بازگرداننده} = W \times G_0 M_1 \times \sin 5^\circ = 2665.4 \times 0.5282 \times \sin 5^\circ = 122.7 \text{ t.m}$$

ملاحظه می شود که جواب در هر دو روش تقریباً برابر هستند.

ج)

$$P = \frac{\text{کاهش آبخور ناشی از نیروی}}{TPC} = \frac{0.81}{8.51} = 0.095 \text{ cm}$$

$$\text{تغییر شیب پاشنه} = \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{80} \times 0.8 = 0.377 \text{ m} = 37.7 \text{ cm}$$

$$\text{تغییر شیب سینه} = t - t_a = 0.8 - 0.377 = 0.423 \text{ m} = 42.3 \text{ cm}$$

آبخور پاشنه (cm)	آبخور سینه (cm)	
440	360	آبخور اولیه
-0.095	-0.095	بالا آمدگی ناشی از p
-37.7	42.3	تغییر شیب
402.2	402.2	مجموع

مثال) شناور مدل ۱ در شرایط مثال قبل وارد حوضچه خشک می شود. عمق اولیه آب در

حوضچه برابر ۵ متر می باشد. مطلوب است:

الف) تعیین GM شناور را بعد از پائین آمدن سطح آب به اندازه ۱ متر.

ب) تعیین آبخورها پس از کاهش عمق آب فوق

حل: با توجه به شرایط مثال قبل داریم:

5 m	عمق آب
4.4 m	آبخور پاشنه
0.6 m	فاصله پاشنه از كف حوضچه
1 m	کاهش عمق آب
0.4 m	تغییر آبخور پس از نشستن پاشنه

تغییر شیب پاشنه + بالا آمدگی ناشی از P = تغییر آبخور پاشنه

$$-0.4 = \frac{-P}{TPC} - \frac{l \times P \times l}{L \times MCTC}$$

با فرض اینکه شناور از عمود پاشنه روی بلوکهای حوضچه می‌نشیند داریم:

$d = l$. لذا داریم:

$$-0.4 = \frac{-P}{8.51} - \frac{(37.68)^2 \times P}{79.3 \times 38.38}$$

$$15126 P = 10360$$

$$P = 0.68 \text{ t}$$

$$G_0 G_1 = \frac{P \times K G_0}{W - P} = \frac{0.68 \times 5.6}{26654 - 0.68} = 0.0014 \text{ m} = 1.4 \text{ mm}$$

$$G_0 M_0 = K M_0 - K G_0 = 6.13 - 5.6 = 0.53 \text{ m}$$

$$G_1 M_0 = G_0 M_0 - G_0 G_1 = 0.53 - 0.0014 = 0.5286 \text{ m}$$

(ب)

$$P \text{ بالا آمدگی ناشی از } P = \frac{P}{TPC} = \frac{0.68}{8.51} = 0.08 \text{ cm}$$

$$t: \text{تغییر شیب} = \frac{P \times l}{MCTC} = \frac{0.68 \times 37.68}{38.38} = 0.667 \text{ cm}$$

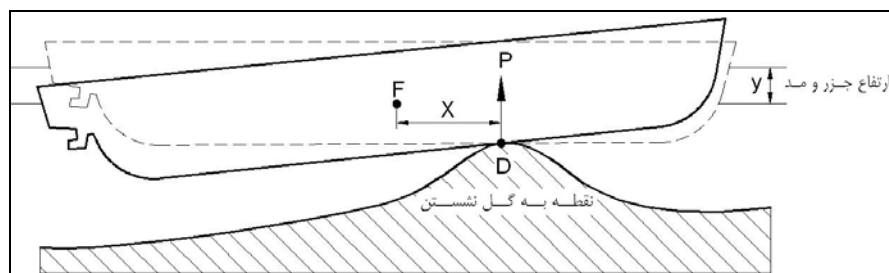
$$t_a = \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{79.3} \times 0.667 = 0.317 \text{ cm}$$

$$t_f = t - t_a = 0.667 - 0.317 = 0.35 \text{ cm}$$

آبخور پاشنه (cm)	آبخور سینه (cm)	
440	360	آبخور اولیه
-0.08	-0.08	بلا آمدگی ناشی از p
-0.317	0.35	تغییر شیب
439.6	360.27	مجموع

* به گل نشستن شناور

در مبحث به گل نشستن نیز همانند به داک بردن، نیروی P باعث کاهش پایداری می‌شود که این نیروی P نیروی ناشی از کف دریا بر زیر شناور می‌باشد و وابسته به میزان جزر و مد آب دریا است (شکل ۷).



شکل ۷: کاهش پایداری ناشی از به گل نشستن از یک نقطه

این کاهش پایداری را می‌توان همانند به داک بردن شناور با بالا رفتن G یا پایین آمدن M بررسی کرد.

در حالت به گل نشستن، تغییر آبخور در محل تماس با بستر دریا معلوم است که البته وابسته به میزان جزر و مد محل به گل نشستن شناور می‌باشد. مطابق شکل ۷، شناوری به طول L در نقطه C به فاصله x از مرکز شناوری، با بستر دریا کرده است. بر اثر جزر و مد، سطح آب به اندازه y تغییر نموده است و آبخور شناور تغییر یافته است. تغییر آبخور در محل تماس شناور با بستر دریا، برابر با همان مقدار افت جزر و مد یعنی y است. بنابراین:

$$y = \frac{P}{TPC} + \frac{x}{L} \times \frac{P \times x}{MCTC}$$

که از این رابطه مقدار P مجهول و قابل محاسبه است (با فرض مشخص بودن میزان جزر و مد (y)).

بعد از مشخص شدن P ، می‌توان آبخورهای جدید را محاسبه کرد.

می‌دانیم که مقادیر $MCTC$ و TPC در آبخورهای مختلف تغییر می‌کنند ولی در حل مسائل، برای ساده‌تر شدن حل، این مقادیر را ثابت فرض می‌کنند و در واقع فرض می‌شود تغییرات آبخور، اندک باشد.

اگر تغییرات آبخور زیاد باشد باید از مقادیر مختلف $MCTC$ و TPC در آبخور در هنگام جزر و هنگام مد استفاده کرد.

مثال) شناور مدل ۱ به آبخور سینه ۳/۶ متر و آبخور پاشنه ۴/۴ متر با $KG = 5.6 \text{ m}$ در نقطه‌ای به فاصله ۶۰ متر از عمود پاشنه به گل می‌نشیند. اگر جزر آب در آن منطقه برابر ۵۰ سانتی‌متر باشد مطلوبست:

الف- بررسی پایداری شناور پس از جزر آب

ب- آبخورهای سینه و پاشنه پس از جزر آب

حل: در آبخور متوسط ۴ متر، اطلاعات هیدرواستاتیکی در مثال قبل ارائه شده است.

$$LCF = 2.32 \quad m \quad \text{از وسط شناور}$$

$$LCF = 40 - 2.32 = 37.68 \quad m \quad \text{از عمود پاشنه}$$

$$x = 60 - 37.68 = 22.32 \quad m$$

$$y = \frac{P}{TPC} + \frac{x}{L} \times \frac{P \cdot x}{MCTC}$$

$$50 = \frac{P}{8.51} + \frac{22.32}{80} \times \frac{P \times 22.32}{38.38}$$

$$50 = \frac{P}{8.51} + 0.1P$$

$$50 = 0.11P + 0.16P = 0.27P$$

$$P = 185.2 \quad t$$

الف- تعیین مقدار GM:

$$G_0 G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P} = \frac{185.2 \times 5.6}{35000 - 185.2} = 0.03 \quad m$$

$$KM_0 = 6.13 \quad m$$

$$G_1 M_0 = 6.13 - 0.03 = 6.1 \quad m$$

از آنجا که GM هنوز مثبت است لذا شناور پایدار می ماند.

ب- تعیین مقدار آبخورهای سینه و پاشنه

$$P \text{ کاهش آبخور ناشی از نیروی } = \frac{P}{TPC} = \frac{185.2}{8.51} = 21.76 \quad cm$$

$$t \text{ تغییر شیب } = \frac{P \times x}{MCTC} = \frac{185.2 \times 22.32}{38.38} = 107.7 \quad cm$$

$$\text{تغییر شیب پاشنه} = \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{80} \times 107.7 = 50.72 \quad cm$$

$$t - t_a = 107.7 - 50.72 = 56.98 \text{ cm}$$

تغییر شیب سینه

آبخور پاشنه	آبخور سینه	
440	360	آبخور اولیه
-21.76	-21.76	کاهش آبخور ناشی از P
50.72	-56.98	تغییر شیب
468.96	281.26	مجموع

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: سکوی ثابت دریایی



شرکت سازنده: شرکت صدرا

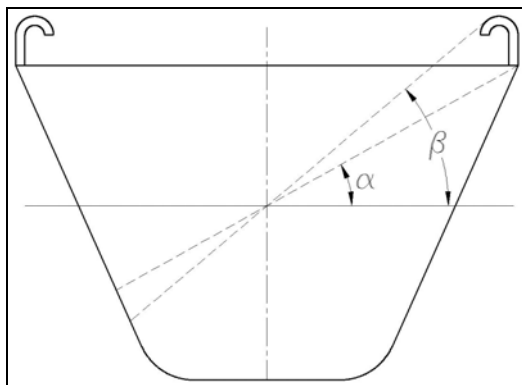
شکل حاضر نشان دهنده یک سکوی ثابت دریایی است که بر روی بارج، بارگیری شده تا به محل نصب در دریا منتقل شود. امروزه شرکتهای بسیاری در ایران به فعالیتهای فراساحل اشتغال دارند از جمله: صدرا، خلیج فارس، تاسیسات دریایی، صف

و ...

بخش ۵-۲:

پایداری در حالت صدمه دیده^۲

آبگرفتگی^۳ باعث ورود آب به داخل بدنه شناور می‌شود که دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد، از جمله شکاف بدنه ناشی از تصادم یا انفجار، شکستگی شیرها و اتصالات مرتبط با آب دریا و ورود آب از روی عرشه شناور. برای جلوگیری از آبگرفتگی، حداکثر قابلیت اطمینان در طراحی بدنه، اتصالات و شیرها رعایت می‌گردد و برای ممانعت از ورود آب به داخل بدنه در زوایای غلتش بزرگ، منافذ روی بدنه را با یک لوله خرطومی مطابق شکل ۱ بر روی عرشه اصلی قرار می‌دهند تا زاویه ورود آب به داخل شناور افزایش یابد. این منافذ باید با هوای بیرون مرتبط باشند که اغلب شامل تهویه انبارها و فضاهای داخل بدنه است.



شکل ۱: لوله‌های خرطومی روی عرشه برای افزایش زاویه آبگرفتگی منافذ

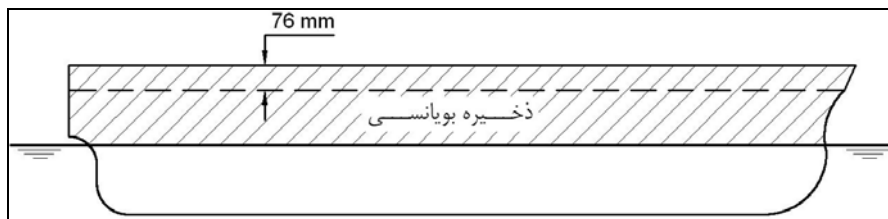
ولی با تمام تمهیدات انجام شده باز هم احتمال ورود آب به داخل بدنه وجود دارد به خصوص در شرایط بروز تصادم و شکافتگی بدنه. در این شرایط تمهیداتی باید انجام شود که با آبگرفتگی بدنه اولاً از توسعه آن جلوگیری شود ثانیاً تا زمانی که شناور

۱- منابع: [10] , [12] , [14]

2 - damaged stability

3 - Bilging

دارای ذخیره بویانسی می‌باشد، خط ایمن^۱ شناور به زیر آب نرود. خط ایمن به فاصله ۷۶ میلیمتر پایین‌تر از عرشه اصلی (عرشه آب ناپذیر) است (شکل ۲).



شکل ۲: نمایش ذخیره بویانسی و خط ایمن در شناورها

برای افزایش دوام شناور در برابر آبگرفتگی، مقداری ذخیره بویانسی^۲ برای شناور در نظر می‌گیرند که در شرایط حداکثر بارگیری مجاز، باز هم مقداری حجم آب ناپذیر بالای خط آب وجود دارد که به آن «ذخیره بویانسی» گویند.

بنابراین خط ایمن در ۳ حالت ممکن است به زیر آب برود.

۱- مقداری آب وارد شناور شود که مقدار ذخیره بویانسی کاهش یافته و نزدیک به صفر برسد که در این شرایط بخش عمده بدنه به زیر آب می‌رود یا بدنه به طور کامل به زیر آب رفته و در کف دریا جای می‌گیرد. در برخی موارد برای جلوگیری از غرق شدن کامل شناور، حجم‌های بویانسی استوانه‌ای یا مکعبی شکل (مطابق شکل ۳) به بدنه شناور صدمه دیده متصل می‌کنند که به آنها «بویانسی نجات»^۳ می‌گویند.

1 - Margine Line

2 - Reserve of buoyancy

3 - Camel



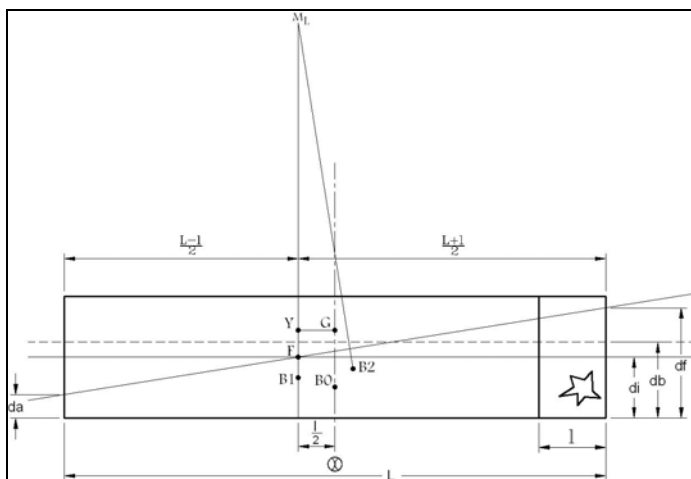
شکل ۳: اتصال حجم‌های بویانسی به بدنه برای جلوگیری از غرق‌شدن شناور

۲- آبگرفتگی در گوشه چپ یا راست بدنه به گونه‌ای که ذخیره بویانسی هنوز از بین نرفته ولی خط ایمن به دلیل زاویه هیل شدید به زیر آب می‌رود (شکل ۴).



شکل ۴: آبگرفتگی در گوشه چپ یا راست بدنه

۳- آبگرفتگی در سینه یا پاشنه شناور به گونه‌ای که علی‌رغم وجود ذخیره بویانسی، خط ایمن به دلیل شیب شدید به زیر آب می‌رود (شکل ۳ و ۵).



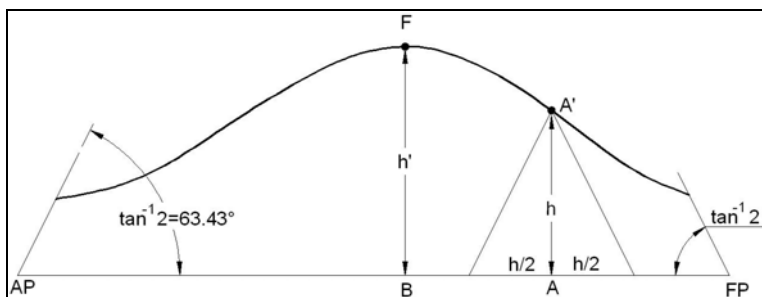
بنابراین شناور باید طوری طراحی شود که حداقل بر اثر آبگرفتگی یک کمپارتمان در هر نقطه‌ای از شناور اولاً ذخیره بویانسی آن صفر نشود ثانیاً زاویه هیل به قدری نباشد که خط ایمن به زیر آب برود و ثالثاً مقدار شیب باعث زیر آب رفتن خط ایمن نگردد.

* منحنی طول آبگرفتگی^۱ چیست؟

منحنی طول آبرفتگی مطابق شکل ۶ می‌باشد که طول آن برابر طول بین دو عمود (عمود سینه FP و عمود پاشنه AP) می‌باشد. در واقع محور طولی آن همان خط مینای طولی^۲ شناور است.

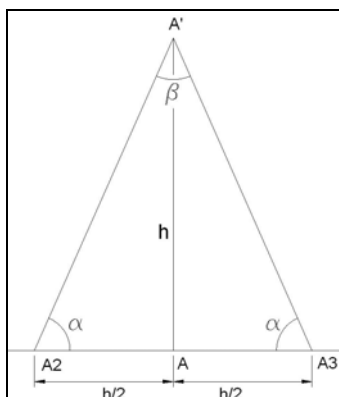
1 -floodable length curve
2 - Base Line

مؤلفه عمودی هر نقطه از این منحنی که به فواصل مشخص از خط مبنای طولی ترسیم می‌شود، بیانگر «طولى از شناور است که به مرکزیت آن نقطه می‌تواند آبرگرفته شود، بدون اینکه خط ایمن به زیر آب برود.»



شکل ۶: مفهوم طول مجاز آبرگرفتنی

بطور مثال فرض کنید نقطه A به طول l از عمود سینه قرار گرفته است. فاصله نقطه A از منحنی طول آبرگرفتنی برابر h می‌باشد. فاصله h به این معنی است که طولی از بدنه به مرکزیت نقطه A که می‌تواند آبرگرفته شود برابر h می‌باشد. از آنجا که A مرکز این طول است یعنی طول مجاز آبرگرفتنی برابر $\frac{h}{2}$ در طرفین این نقطه می‌باشد. بدین ترتیب مطابق شکل ۷ نقاط A_3, A_2 به دست می‌آیند. بین این نقاط، مثلث $A'_1 A_2 A_3$ تشکیل می‌شود که هم طول قاعده آن و هم ارتفاع آن برابر h است.



شکل ۷: نحوه محاسبه زوایای α و β

بدین ترتیب زاویه α را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{h/2} = 2$$

در نتیجه α برابر است با:

$$\alpha = \tan^{-1}(2)$$

از شکل ۷ می‌توان تشخیص داد که زاویه β برابر است با:

$$\frac{\beta}{2} = 90 - \alpha$$

$$\beta = 180 - 2\alpha$$

در قسمت تعیین محل دیواره‌های عرضی ملاحظه خواهد شد که زاویه $\tan^{-1} 2$ دارای کاربرد زیادی است. ابتدا و انتهای منحنی طول آبگرفتگی که با خط $\tan^{-1} 2$ جدا شده است، نیز بر همین مبنا ترسیم شده است.

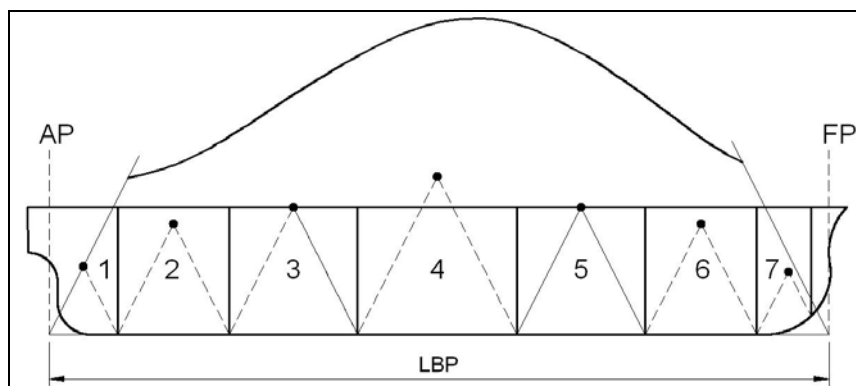
مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌شود که این منحنی دارای یک نقطه ماکزیمم می‌باشد. چرا نقطه ماکزیمم در قسمت میانی منحنی (یا طول شناور) می‌باشد؟ علت آن است که هر چه کمپارتمان به سینه یا پاشنه نزدیکتر باشد، در ازای آبگرفتگی، شیب بیشتری ایجاد می‌کند چرا که فاصله آن از مرکز شناوری (F) بیشتر شده است. لذا طول مجاز آبگرفتگی در منتهی الیه سینه و پاشنه، کمترین مقدار و در قسمت میانی، بیشترین مقدار است. مطابق شکل ۶، طول مجاز آبگرفتگی در قسمت میانی (نقطه B) برابر h' و در نقطه A برابر h است که $h' > h$ می‌باشد.

* کاربردهای منحنی طول آبگرفتگی :

در مبحث آبگرفتگی آنچه معیار پایداری در حالت صدمه دیدگی است، منحنی طول آبگرفتگی است که خروجی و نتیجه مباحث آبگرفتگی است.

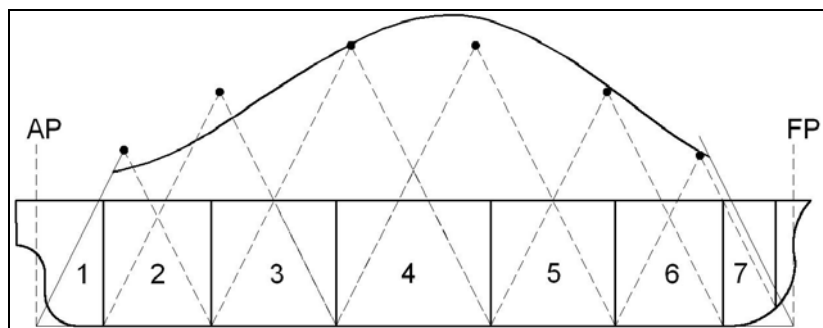
در این قسمت ابتدا منحنی آبگرفتگی و چگونگی استفاده از آن را توضیح می‌دهیم و سپس به کمک روابط ریاضی موجود چگونگی ترسیم این منحنی را بررسی می‌کنیم. در واقع به کمک منحنی طول آبگرفتگی می‌توان محل دیواره‌های عرضی (بالکهدا) را تعیین کرد.

فرض کنید منحنی طول آبگرفتگی برای یک شناور خاص مطابق شکل ۸ ترسیم شده است و محل دیواره‌های عرضی و کمپارتمان‌بندی‌ها هم انجام گرفته است.



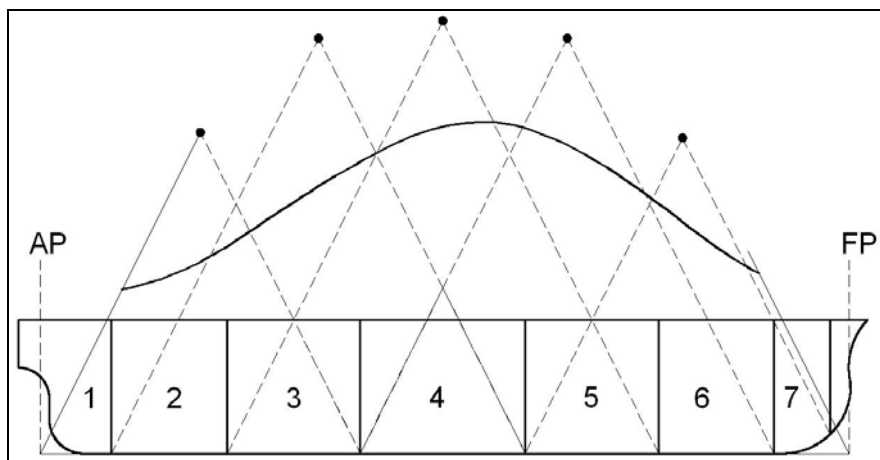
شکل ۸

برای اینکه تشخیص دهیم با آبگرفتگی یک کمپارتمان، آیا خط ایمن زیر آب می‌رود یا خیر، از کنار هر دیواره یک خط با زاویه $\tan^{-1} 2$ رسم می‌کنیم. رأس مثلث محل تقاطع این خطوط، باید پایین‌تر از منحنی طول آبگرفتگی باشد. حال فرض کنیم دو کمپارتمان مجاور آبگرفته شده باشند. برای بررسی اینکه آیا باز هم خط ایمن به زیر آب می‌رود یا نه، از کنار هر دو کمپارتمان مجاور، یک خط با زاویه $\tan^{-1} 2$ رسم می‌کنیم که باز هم محل تقاطع این خطوط، باید زیر منحنی طول آبگرفتگی باشد (با فرض اینکه کشتی برای آبگرفتگی مجاز دو کمپارتمان طراحی شده باشد).



شکل ۹

حال می‌خواهیم بررسی کنیم که آیا با آبرفتگی سه کمپارتمان مجاور هم خط ایمن به زیر آب می‌رود یا خیر. مجدداً خطوط $\tan^{-1} 2$ را هم بین هر سه کمپارتمان ترسیم می‌کنیم. که محل تقاطع خطوط $\tan^{-1} 2$ با یکدیگر باید زیر منحنی طول آبرفتگی باشد.



شکل ۱۰

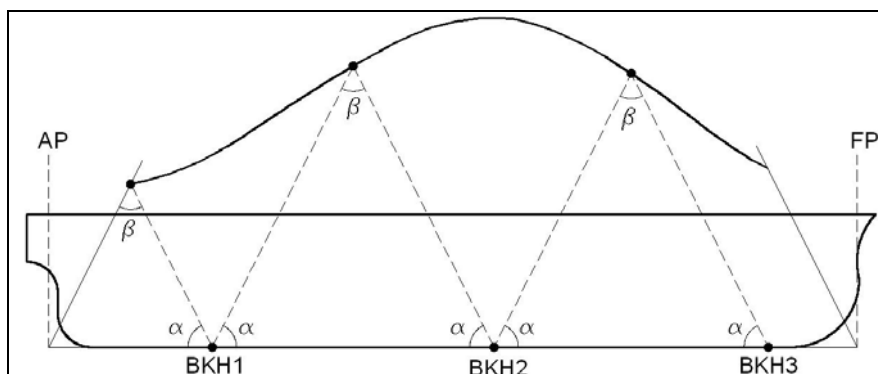
ملاحظه می‌شود که محل تقاطع تعدادی از خطوط با زاویه $\tan^{-1} 2$ که بین هر سه کمپارتمان ترسیم شده است، بالاتر از منحنی طول آبرفتگی افتاده است که به معنی زیر آب رفتن خط ایمن در کمپارتمان‌ها مربوطه می‌باشد.

کمپارتمان‌هایی که محل تقاطع خطوط $\tan^{-1} 2$ آنها بر روی منحنی یا زیر منحنی طول آبگرفتگی افتاده است، بدین معناست که آبگرفتگی آن کمپارتمانهای مجاور، باعث به زیر آب رفتن خط ایمن نمی‌گردد. لازم به ذکر است که حداقل تعداد مجاز آبگرفتگی کمپارتمان‌ها در کشتی‌های تجاری ۱ کمپارتمان و در کشتی‌های نظامی ۲ کمپارتمان است.

* تعیین محل دیواره‌های عرضی

تعیین محل دیواره‌های عرضی به کمک منحنی طول آبگرفتگی ترسیم می‌شود و وابسته به این است که آبگرفتگی چند کمپارتمان مجاور مطلوب می‌باشد. این مورد وابسته به نوع شناور و نظر کارفرما می‌باشد.

حال فرض کنید مطابق شکل ۹ منحنی طول آبگرفتگی یک شناور با فرض اینکه آبگرفتگی فقط یک کمپارتمان مجاز باشد، ترسیم شده است (چگونگی ترسیم این منحنی در قسمت‌های بعدی تشریح می‌شود).



شکل ۱۱

برای تعیین محل دیواره‌ها از عمود پاشنه شروع می‌کنیم. از محل تقاطع خط $\tan^{-1} 2$ عمود پاشنه با منحنی طول آبگرفتگی (نقطه A)، زاویه β را جدا می‌کنیم که

نقطه BKH1 به دست می‌آید که می‌تواند محل اولین بالکهد باشد. حال از همین نقطه زاویه $\alpha = \tan^{-1} 2$ را جدا می‌کنیم تا منحنی طول آبگرفتگی را در نقطه B قطع کند. از نقطه B باز هم زاویه β را جدا می‌کنیم تا BKH 2 به دست آید که محل دومین بالکهد بدست آید. ملاحظه می‌شود که در این نمونه، تنها با ۲ دیواره می‌توان حجم داخل شناور را طوری تقسیم‌بندی کرد که با آبگرفتگی یک کمپارتمان، خط ایمن هم مرز خط آب قرار گیرد که البته ضریب اطمینان کافی ندارد لذا فاصله دیواره‌ها را معمولاً کمتر از حالت مرزی می‌گیرند. به گونه‌ای که محل تقاطع خطوط با شیب α دقیقاً روی منحنی طول آبگرفتگی قرار نگیرند بلکه زیر این منحنی قرار گیرند که در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان ملاحظه کرد.

البته باید توجه داشت که تعیین محل دیواره‌ها تنها وابسته به منحنی طول آبگرفتگی نیست بلکه یکی دیگر از عوامل مهم، نوع باری است که شناور در انبارها می‌خواهد حمل کند. فرض کنید در کشتی‌های کانتینربر، طول انبارها باید ضریبی از طول کانتینر باشد، که در غیر اینصورت اتلاف فضای داخلی کمپارتمان را در پی خواهد داشت. در تعیین اولین و آخرین دیواره (دیواره انتهای موتورخانه و دیواره تصادم) نیز قوانین و محدودیتهای خاصی وجود دارد که در قسمت قوانین مؤسسه LR بدانها اشاره شده است.

* ضریب نفوذ^۱ و ضریب بارگیری^۲

منحنی‌های طول آبگرفتگی که به صورت یکپارچه ترسیم شده‌اند، با این فرض بوده‌اند که ضریب نفوذ کل قسمت‌های داخلی بدنه یکسان هستند در حالی که در واقعیت چنین نیست.

1 - Permeability factor

2 - stowage factor

ضریب نفوذ از مقدار آبی که در صورت آبرگرفتی یک کمپارتمان امکان ورود به داخل بدنه را دارد، بدست می‌آید که رابطه آن عبارتست از:

$$\text{ضریب نفوذ} = \frac{\text{حجم آب قابل وارد شدن به داخل انبار}}{\text{حجم کل انبار}}$$

بنابراین برای هر انبار و کمپارتمان شناور، یک ضریب نفوذ خاص تعریف می‌شود که باید برای هر کمپارتمان مشخص باشد ولی به طور تقریبی می‌توان مقادیر زیر را در نظر گرفت:

کمپارتمان	ضریب نفوذ (PF) (درصد)
فضای موتورخانه	۸۰-۸۵
فضای رفاهی خدمه و کابین‌ها	۹۵
انبارهای مواد غذایی	۶۵
انبار حمل فله	۶۰-۶۵
انبار حمل اتومبیل (کشتی‌های RO-RO)	۸۵
انبار حمل کالای عمومی	۷۰
کمپارتمان‌های کشتی‌های نظامی	۹۷
انبار حمل ذغال سنگ	۳۵
انبار حمل الوار چوب	۲۰

عامل دیگری که برای تبیین میزان نفوذ آب می‌توان در نظر گرفت، ضریب بارگیری، است. اگر p (تن بر متر مکعب) چگالی بار باشد، حجم اشغال شده توسط یک تن بار

$$\text{برابر } \frac{1}{p} \text{ می‌باشد.}$$

معمولاً بارها را کاملاً به هم چسبیده نمی‌توان بارگیری نمود و فضاهای خالی در بین بارها وجود دارد. اگر حجم اشغال شده توسط یک تن بعد از بارگیری را «ضریب بارگیری» (SF) بنامیم، حجم موجود برای آب ورودی به داخل بدنه عبارتست از:

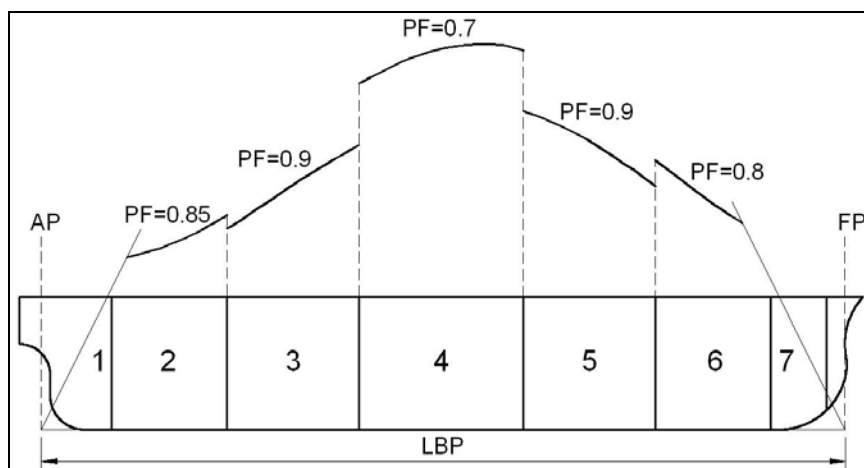
$$\text{حجم} = \left(\text{SF} - \frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\text{m}^3}{\text{t}} \right) \text{ (بر حسب)}$$

ورود آب

که بدین ترتیب ضریب نفوذ (PF) برابر است با:

$$\text{PF} = \frac{\text{SF} - \frac{1}{\rho}}{\text{SF}}$$

حال در نمونه‌های بیان شده فرض کنید ضریب نفوذ هر یک کمپارتمان‌ها متفاوت باشد. بدین ترتیب منحنی طول آبرفتگی به صورت پیوسته نیست بلکه به صورت بریده بریده می‌باشد چرا که مقدار آب قابل وارد شدن به بدنه وابسته به ضریب نفوذ هر کمپارتمان، متفاوت است که در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۲

* برخی قوانین مؤسسه رده‌بندی LR در مورد فاصله بین دیواره‌ها

حداقل تعداد دیواره‌ها در کشتی‌های حمل کالا مشخص شده است: یک دیواره تصادم^۱ در قسمت سینه، یک دیواره در منتهی‌الیه پاشنه^۲ و دو دیواره در طرفین موتورخانه. بنابراین در کشتی‌هایی که موتورخانه در قسمت میانی بدنه است، حداقل تعداد دیواره‌ها برابر ۴ است. برای کشتی‌هایی که موتورخانه در قسمت عقب بدنه است، حداقل تعداد دیواره‌ها برابر ۳ است چرا که دیواره منتهی‌الیه پاشنه و دیواره پشت موتورخانه با هم یکی می‌شوند.

از این دیواره‌ها، دیواره تصادم مهمترین دیواره است چرا که ۵۰ درصد تصادف کشتی‌ها از قسمت سینه اتفاق می‌افتد. این دیواره نه باید خیلی نزدیک به جلوی سینه باشد (به گونه‌ای که در برابر ضربه به راحتی از بین نرود) و نه خیلی دور از سینه باشد (به گونه‌ای که آبگرفتگی قسمت سینه باعث شیب شدید نگردد). این دیواره باید بین ۵-۷/۵ درصد طول بدنه جلوتر از عمود سینه باشد. دیواره منتهی‌الیه پاشنه نیز باید در جلوی روکش شافت^۳ قرار گیرد به گونه‌ای که نفوذ آب از آن، باعث آبگرفتگی کمپارتمان نگردد. همچنین این دیواره نباید از منتهی‌الیه پاشنه چندان دور باشد به گونه‌ای که آبگرفتگی باعث شیب شدید پاشنه نگردد. دیواره‌های موتورخانه نیز ماشین‌آلات پیشران را احاطه کرده‌اند به گونه‌ای که آبگرفتگی کمپارتمان‌های مجاور باعث صدمه دیدن موتور، ژنراتور، بویلر و سایر ماشین‌آلات نگردد. از طرفی این دیواره در صورت بروز آتش‌سوزی موتورخانه، از سرایت آتش به کمپارتمان‌های مجاور جلوگیری می‌کند.^۴

1 - Collision Bulkhead

2 - aft peak Bulkhead

3 - stern tube

۱- این دیواره را دیواره ضد آتش (fire Bulkhead) نیز می‌گویند که طبق قوانین SOLAS به دیواره‌ای گفته می‌شود که در برابر دمای ۱۵۰۰ درجه فارنهایت به مدت یک ساعت مقاومت می‌کند.

برای کشتی‌های حمل کالا با طول بیش از ۹۰ متر، مطابق جدول زیر تعداد دیواره‌ها توصیه می‌گردد (با فرض فواصل برابر).

اغلب دیواره‌ها تا عرشه فوقانی اصلی امتداد یافته‌اند (به خصوص دیواره تصادم) ولی حداقل ارتفاع این دیواره‌ها باید بالاتر از علامت خط آب‌خور باشد.

تعداد دیواره‌ها		طول کشتی (متر)
موتورخانه در پاشنه	موتورخانه در وسط بدنه	
۵	۵	۹۰-۱۰۵
۵	۶	۱۰۵-۱۱۵
۶	۶	۱۱۵-۱۲۵
۶	۷	۱۲۵-۱۴۵
۷	۸	۱۴۵-۱۶۵
۸	۹	۱۶۵-۱۹۰
نیازمند تحلیل	نیازمند تحلیل	بیش از ۱۹۰ متر

* بررسی مقدار فرو رفتن بدنه در صورت آبگرفتگی

در قسمت‌های قبل بیان داشتیم که خط ایمن در سه حالت ممکن است به زیر آب برود:

۱- از دست رفتن کامل ذخیره بویانسی ۲- آبگرفتگی در گوشه چپ یا راست بدنه

۳- آبگرفتگی در ابتدا یا انتهای شناور

در حالت ۲ و ۳ ذخیره بویانسی هنوز وجود دارد ولی شیب زیاد یا هیل زیاد باعث زیر آب رفتن خط ایمن می شود. در این قسمت روش محاسبه میزان فرو رفتن بدنه در آب بررسی می شود.

۱- آبرگفتگی در قسمت میانی بدنه:

اگر قسمت میانی بدنه یا به عبارتی قسمت منطبق بر مرکز بویانسی بدنه دچار آبرگفتگی شود بدنه بدون شیب و بدون هیل و به صورت یکنواخت در آب فرو می رود. برای بررسی میزان فرو رفتن داخل آب دو روش کلی وجود دارد:

روش اول) بار افزوده^۱: در این روش فرض می شود که آب وارد شده به بدنه به منزله وزن اضافه شده می باشد و فرض می شود که بویانسی بدنه ثابت باشد. این روش چندین نقص دارد که عبارتند از: مشکل بودن تخمین مقدار آب نفوذ کرده به انبار، نیاز به در نظر گرفتن تغییرات KG و نیاز به در نظر گرفتن تأثیر سطح آزاد آب درون انبار.

روش دوم) بویانسی از دست رفته^۲: در این روش فرض می شود که قسمت دچار آبرگفتگی، از مقدار بویانسی بدنه کسر گردیده است. یعنی در واقع وزن کشتی ثابت است و مقدار بویانسی کمپارتمان آبرگرفته، از دست رفته است. مسلماً در این حالت، مرکز ثقل ثابت است و مرکز بویانسی تغییر می کند. البته باید در نظر داشت که مقدار جابجایی، قبل و بعد از آبرگفتگی ثابت می ماند چرا که به ازای بویانسی از دست رفته کمپارتمان آبرگرفته، بدنه در آب فرو می رود و این بویانسی جبران می گردد که داریم:

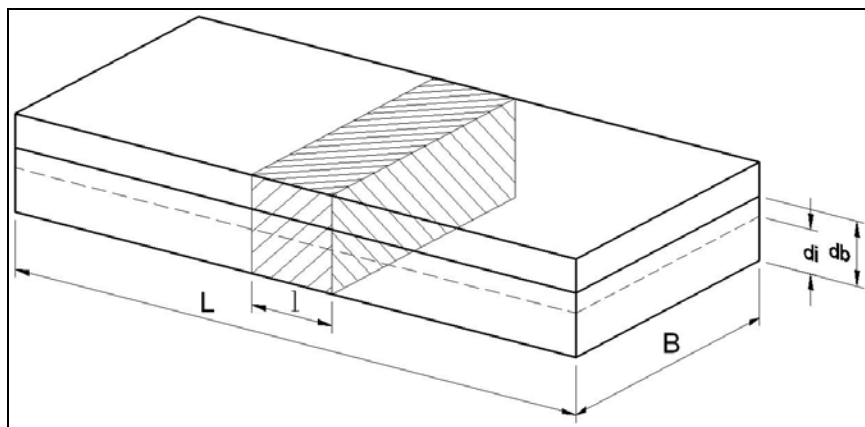
حجم سالم زیر آب بعد از آبرگفتگی = حجم سالم زیر آب قبل از آبرگفتگی

در شکل ۱۳ یک بارج به طول L ، عرض B و آبخور d_i نمایش داده شده است. انبار متقارنی در وسط کشتی قرار گرفته که طول آن ℓ ، عرض آن b و ارتفاع آن برابر ارتفاع شناور می باشد و دچار آبرگفتگی می شود. اگر آبخور بعد از آبرگفتگی را d_b بنامیم با توجه به رابطه بالا داریم:

1 - Added Weight

2 - Lost Buoyancy

$$LBd_i = LBd_b - \ell b d_b$$



شکل ۱۳: موقعیت آبخور شناور در قبل و بعد از آبرگرفتی کمپارتمان میانی

پایداری شناور به دو علت تغییر می‌کند: ۱- جابجایی مرکز بویانسی ۲- تغییر شکل صفحه آبخور و در نتیجه تغییر ممان دوم صفحه آبخور

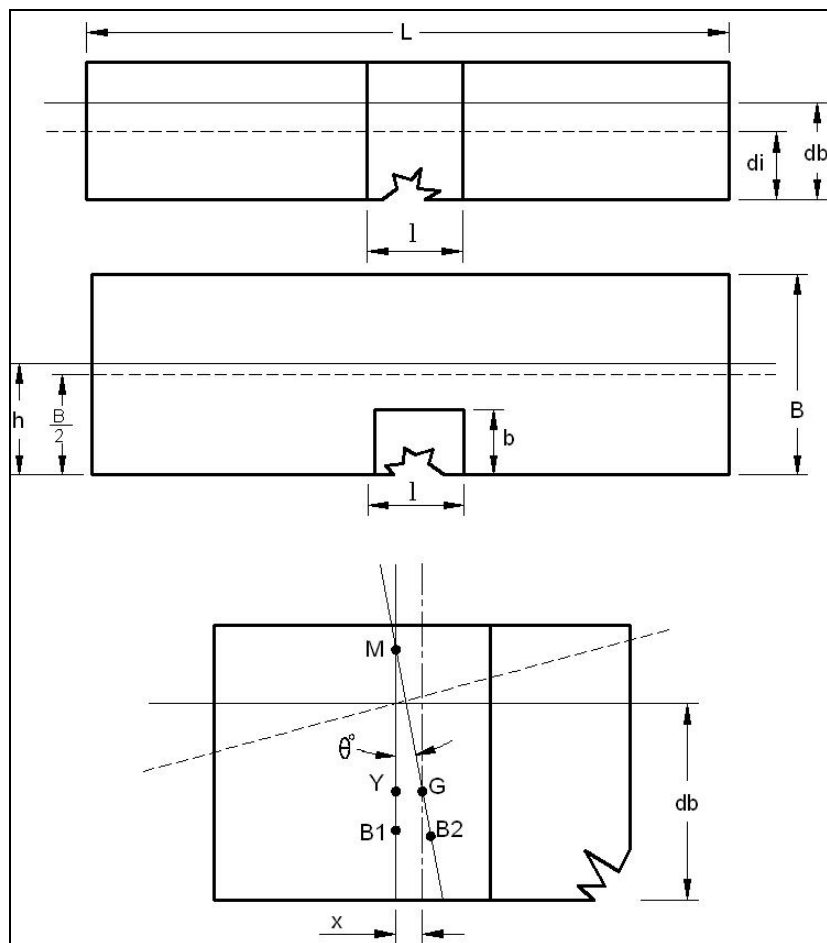
۲- آبرگرفتی یک انبار کناری در قسمت میانی بدنه

در شکل ۱۴ یک بارج به طول L ، عرض B با آبخور d_i نمایش داده شده است. یک انبار خالی کناری به طول l و عرض b که دارای ارتفاعی برابر ارتفاع شناور است، آبرگرفته می‌شود و شناور از آبخور $W_0 L_0$ به آبخور $W_1 L_1$ می‌رسد. آبخور ثانویه d_b می‌باشد. در این حالت مرکز بویانسی به صورت عرضی جابجا می‌شود و به $B1$ منتقل می‌شود. اگر فاصله بین G و $B1$ برابر x باشد، ممان هیل دهنده زیر اعمال می‌شود:

$$HM = W.x$$

اگر متاستر در حالت آبرگرفته برابر M_b باشد (و درست در بالای $B1$ قرار گیرد) و زاویه غلتش شناور، کوچک باشد، شناور تا زاویه θ غلتش می‌کند تا $B1$ به $B2$ منتقل گردد (هم امتداد مرکز ثقل G). مطابق شکل داریم:

$$\tan \theta = \frac{GY}{YM_b}$$



شکل ۱۴: اثر آبگرفتگی قسمت چپ یا راست بدنه بر پایداری

برای محاسبه GY فرض می‌کنیم خط قائم گذرنده از $B1$ از مرکز سطح آب‌خور نیز بگذرد. در شکل ۱۴ اگر مرکز شناوری به فاصله h از کنار بدنه باشد داریم:

$$h = \frac{\text{ممان سطح حول خط کنار شناور}}{\text{مساحت}} = \frac{L \times B \times \frac{B}{2} - l.b. \frac{b}{2}}{LB - lb}$$

و چون G بر روی خط مرکزی قرار دارد، فاصله آن از کنار بدنه برابر $\frac{B}{2}$ است که برای GY داریم:

$$GY = h - \frac{B}{2}$$

در صورتی که انبار دارای ارتفاعی برابر ارتفاع شناور باشد:

$$KB = \frac{d_b}{2}$$

$$B_1M_b = \frac{I_b}{\nabla}$$

البته I_b باید نسبت به خط گذرنده از مرکز سطح آب‌خور جدید (مرکز شناوری جدید) محاسبه شود.

$$I_{side} = \frac{LB^3}{3} - \frac{lb^3}{3}$$

$$I_b = I_{side} - Ah^2 = I_{side} - (LB - lb)h^2$$

$$B_1M_b = \frac{I_b}{\nabla}$$

$$KM_b = KB_1 + B_1M_b$$

و همچنین:

$$YM_b = KM_b - KG$$

$$\tan \theta = \frac{GY}{YM_b}$$

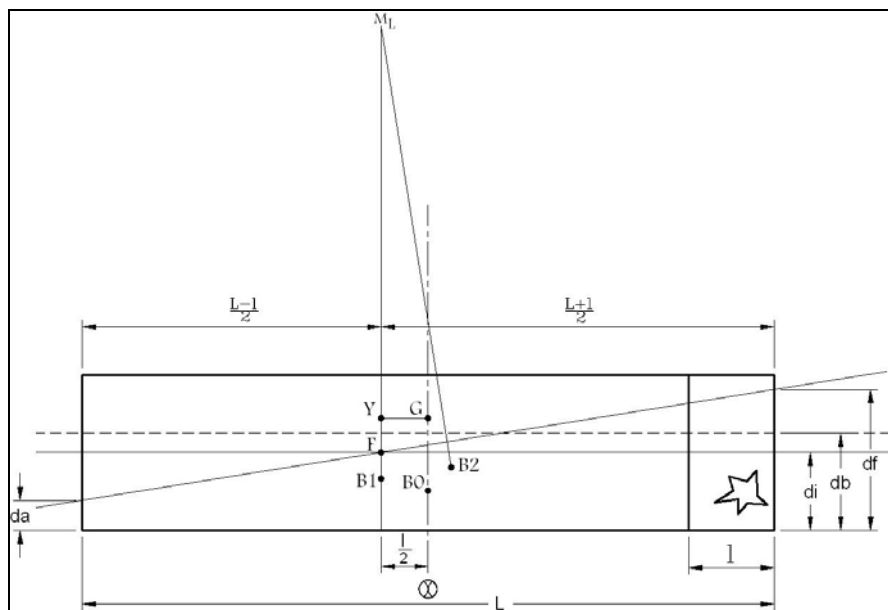
که مقادیر GY و YM_b طبق روابط بیان شده، محاسبه می‌شوند.

لازم به یادآوری است که برای این نتیجه سه فرض در نظر گرفته شده است که ممکن است نتایج را با خطای زیادی مواجه کند ولی برای رسیدن به یک تقریب، کفایت می‌کند. این فرضیات عبارتند از:

- ۱- هم امتداد بودن $B1$ و M_b
- ۲- کوچک بودن زاویه غلتش
- ۳- خط قائم گذرنده از $B1$ از مرکز سطح آبخور (مرکز شناوری) جدید عبور کند.

۳- آبگرفتگی یک انبار در سینه یا پاشنه

در شکل ۱۵، شناوری به طول L ، عرض B و آبخور اولیه d_i می‌باشد. یک انبار به طول l واقع در انتهای کشتی صدمه می‌بیند و خط آبخور به W_1L_1 و مرکز بویانسی به $B1$ انتقال می‌یابد.



شکل ۱۵: اثر آبگرفتگی یک قسمت از سینه یا پاشنه بر پایداری شناور

اگر ارتفاع انبار آبرگرفته برابر ارتفاع شناور باشد داریم:

$$AP = \frac{L - \ell}{2} = \text{فاصله مرکز بویانسی نسبت به}$$

فاصله مرکز ثقل برابر $\frac{L}{2}$ از عمود پاشنه است. بنابراین فاصله افقی بین B1 و G عبارتست از:

$$\frac{L}{2} - \frac{L - \ell}{2} = \frac{\ell}{2} = GY$$

اگر جابجایی شناور برابر W باشد، ممان شیب دهنده برابر $W \times GY$ بوده و داریم:

$$(t) \text{ تغییر شیب} = \frac{\text{ممان تغییر تریم}}{MCTC} = \frac{W \times GY}{MCTC}$$

در اینجا MCTC مربوط به حالت آبرگرفته است.

فصل ٦

آباندازی شنور

بخش ۶-۱: آب اندازی شناور^۲

۱- مقدمه

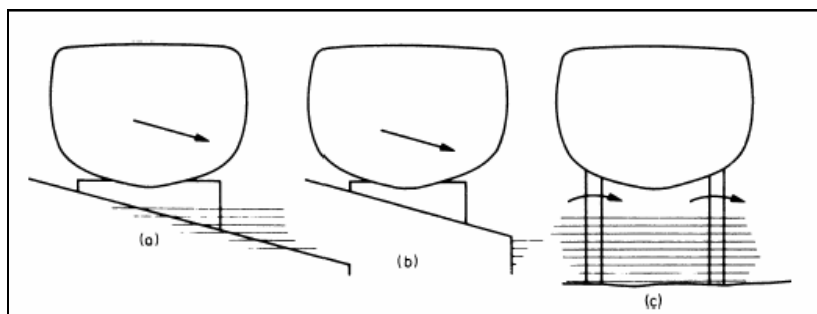
کار ساخت یا تعمیر شناور باید در خشکی انجام شود که دو روش کلی دارد:

۱- ساخت یا تعمیر و آب اندازی در داک خشک یا داک شناور که وضعیت پایداری در این حالت در بخش های قبل بررسی شد.

۲- ساخت یا تعمیر در داخل کارخانه و انتقال بر روی سرسره آب اندازی^۳ که این عمل را «آب اندازی» گویند که به ۳ طریق انجام می شود: (۱) آب اندازی از پاشنه (۲) آب اندازی از سینه (۳) آب اندازی از پهلوی.

آب اندازی به صورت طولی (با سینه یا پاشنه) مستلزم داشتن فاصله عرضی مناسب از ساحل تا طرف مقابل می باشد و ضمناً باید عمق کافی برای جلوگیری از برخورد کشتی با کف دریا وجود داشته باشد. این نوع آب اندازی در کارخانجات کنار رودخانه ها که دارای عرض کم و عمق کم هستند، امکان پذیر نیست. آب اندازی طولی، اغلب با پاشنه انجام می شود چرا که پاشنه دارای حجم بویانسی بیشتر (پرتز) می باشد و شناور زودتر به حالت شناوری می رسد. آب اندازی از پهلوی در رودخانه های کم عرض انجام می شود که البته این نوع آب اندازی، دارای حالت بحرانی پایداری می باشد و در صورت بروز خطا در محاسبات، امکان واژگونی شناور وجود دارد. کشتی های کوچک یا کشتی هایی که دارای پایداری مناسبی باشند را می توان از پهلوی آب اندازی کرد. سه روش رایج برای آب اندازی از پهلوی مطابق شکل عبارتند از:

[۱- منبع: ۲]



شکل ۱: روش‌های آب‌اندازی شناور از پهلو

۱- کشتی از پهلو به طرف پایین سرسره آب‌اندازی هدایت می‌شود و به پهلو وارد آب می‌شود (حالت a).

۲- کشتی یک بر شده و تا انتهای سرسره بر روی ریل هدایت می‌شود. در این حالت کشتی مسافت زیادی را روی ریل حرکت می‌کند و خود سرسره نیز در حین آب‌اندازی تغییر زاویه می‌دهد (حالت b).

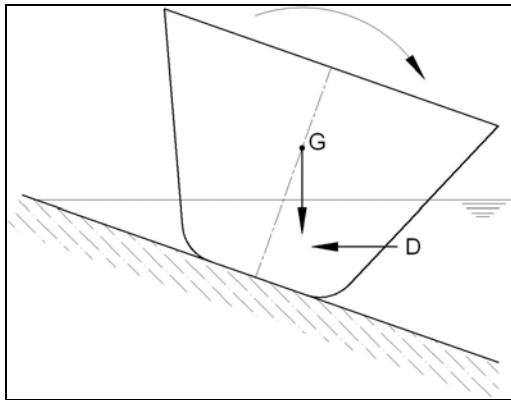
۳- کشتی بر روی پایه‌هایی ساخته می‌شود و نحوه طراحی این پایه‌ها به گونه‌ای است که با اعمال فشار از پهلو متلاشی شده و کشتی در داخل آب قرار می‌گیرد. تمهیدات لازم برای پرهیز از برخورد بدنه شناور با پایه‌ها هنگام آب‌اندازی در نظر گرفته می‌شود (حالت c).

در تمامی این روش‌ها شناور با غلتش عرضی زیاد که ممکن است بیش از ۳۰ درجه باشد، به داخل آب می‌افتد. امواج به وجود آمده از غلتش عرضی، ممکن است باعث ایجاد خسارت در ساحل مقابل سرسره شود. شیب سرسره آب‌اندازی معمولاً به نسبت ۱ به ۸ (حدود ۷ درجه) می‌باشد به گونه‌ای که شناور با سرعت مناسب آب‌اندازی شود.

در روش آب‌اندازی از پهلو، کل طول بدنه به یکباره وارد آب می‌شود. برخلاف روش آب‌اندازی طولی که طول شناور مرحله به مرحله وارد آب می‌شود.

در آب‌اندازی از پهلو، ممان واژگون‌کننده شامل شیب عرضی بدنه و سرسره

(جایجایی مرکز ثقل) و نیروی مقاوم آب (D) و نیروی ناشی از شتاب زاویه‌ای بدنه می‌باشد که باید توسط ممان بازگرداننده جبران شود.



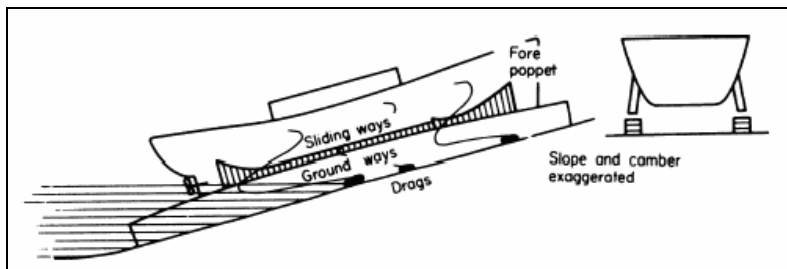
شکل ۲: ممان‌های واژگون‌کننده وارد بر شناور به هنگام آب‌اندازی از پهلو

لذا اولویت اول، در آب‌اندازی شناور به صورت طولی می‌باشد که امکان واژگونی شناور خیلی کمتر است. بیشترین خطرات در این حالت، امکان برخورد با کف دریا، امکان برخورد با طرف مقابل رودخانه، وارد شدن نیروی موضعی زیاد بر سینه (در آب‌اندازی از پاشنه) یا بر پاشنه (در آب‌اندازی از سینه) می‌باشد. لذا برای پرهیز از این خطرات، باید نیروهای هیدرواستاتیکی حین آب‌اندازی به دقت بررسی شوند. این نیرو وابسته به ارتفاع جزر و مد آب نیز می‌باشد لذا پس از بررسی‌های لازم معین می‌شود که شناور در چه ارتفاعی از جزر و مد می‌تواند آب‌اندازی شود. در این بخش ضمن تشریح نقاط مختلف سراسره آب‌اندازی نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیکی، حین انتقال بررسی می‌شوند.

۲- ساختمان سراسره آب‌اندازی^۱ و روش آب‌اندازی

سراسره آب‌اندازی مطابق شکل ۳ دارای دو بخش ثابت (پی) و متحرک (گهواره)

می‌باشد. ارتباط بین این بخش ثابت و متحرک به وسیله یک ریل با لایه‌ای از روغن برقرار می‌شود. بخش ثابت (پی) متصل به زمین بوده و بخش متحرک (گهواره) روی بخش ثابت می‌لغزد.



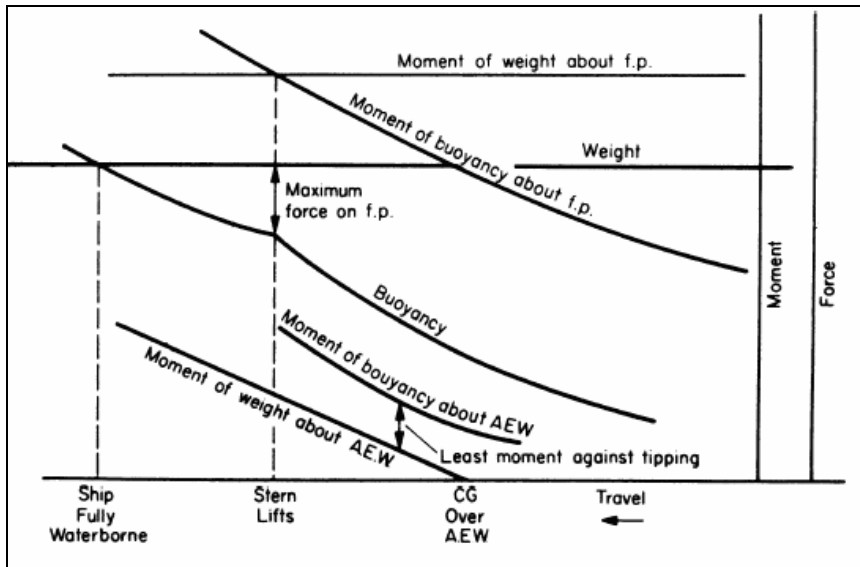
شکل ۳: شناور بر روی سرسره آب اندازی

شناور روی گهواره قرار می‌گیرد. مطابق شکل، شناور به همراه گهواره وارد آب می‌شود و در حین انتقال، حول «لبه پی»^۱ (شکل ۵) گشتاور ایجاد می‌کند که در این شرایط گشتاور نیروی وزن بیشتر از گشتاور نیروی بویانسی می‌باشد. با پیشروی گهواره در داخل آب، نیروی بویانسی افزایش یافته و گشتاور بویانسی از گشتاور وزن حول لبه پی بیشتر می‌شود. در این حالت، شناور بر روی «پایه سینه»^۲ (شکل ۶) تکیه و حول این نقطه دوران می‌کند. در این حالت نیروی موضعی بسیار شدیدی بر این نقطه (پایه سینه) وارد می‌شود و شناور هنوز به طور کامل شناور نشده است. با افزایش پیشروی گهواره به داخل آب نیروی بویانسی همواره افزایش می‌یابد تا جایی که نیروی وزن و بویانسی با هم برابر شوند. در این حالت، در صورتی که شناور با شتاب وارد آب گردد ممکن است پاشنه به طور کامل زیر آب برود لذا تمهیدات لازم باید انجام شود. گهواره در حین آب‌اندازی، از وارد شدن نیروهای موضعی بر بدنه جلوگیری می‌کند. در لحظه شناور شدن و جدایی شناور از گهواره، سازه گهواره باید استحکام کافی در برابر نیروها و گشتاورهای وارده را داشته باشد.

1 - AEW : After End of Way

۳- پایه سینه : اولین پایه زیر بدنه که محل تماس بدنه شناور با گهواره می‌باشد. (fore poppet)

منحنی تغییرات وزن و بویانسی و گشتاور آنها حول لبه پی و «پایه سینه» در شکل ۴ ترسیم شده است.



شکل ۴: نمودار نیروها و ممان‌های وارد بر شناور در حین آب‌اندازی طولی

این مقادیر در نمودار شکل ۴ ملاحظه می‌شوند که در آن محور افقی، طول سرسره آب‌اندازی و محور عمودی نیرو (وزن یا بویانسی) و ممان نیرو است. در مورد این منحنی نکات زیر قابل تأمل می‌باشد:

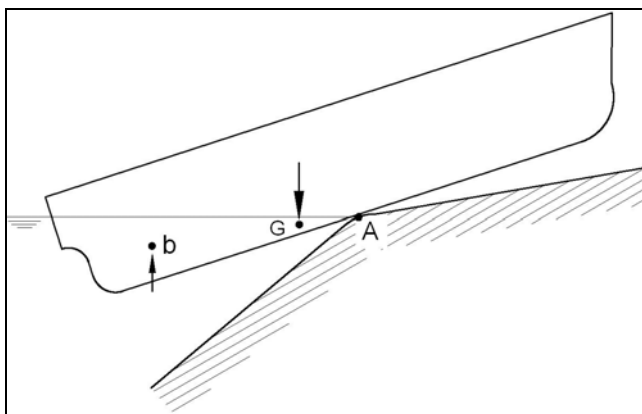
- ۱) در نقطه‌ای که گشتاوری ناشی از نیروی بویانسی حول پایه سینه برابر با گشتاور ناشی از وزن، حول این نقطه می‌گردد، پاشنه شناور بلند می‌شود.
- ۲) اختلاف مقدار بین منحنی‌های نیروی وزن و بویانسی در موقعیت بالا رفتن پاشنه، بیشترین نیرویی می‌باشد که بر روی پایه سینه اعمال می‌گردد.
- ۳) منحنی گشتاور ناشی از نیروی بویانسی حول لبه پی می‌بایست کاملاً در بالای منحنی گشتاور ناشی از نیروی وزن قرار گیرد چرا که در غیر اینصورت کشتی دچار

شیرجه پاشنه^۱ شده و امکان برخورد با کف دریا را دارد. بنابراین این دو منحنی هیچگاه نباید یکدیگر را قطع کنند بلکه باید حداقل فاصله معینی بین آنها وجود داشته باشد. برای پرهیز از این اتفاق دو اقدام کلی انجام می‌شود:

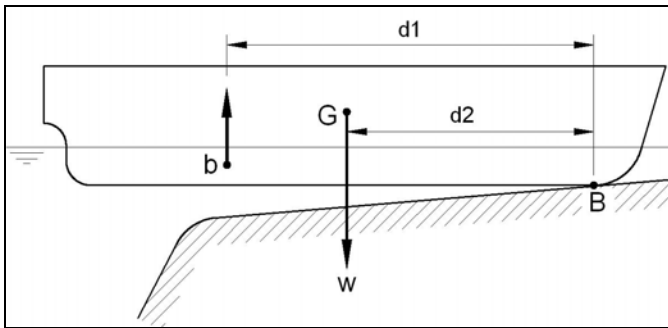
- افزایش طول سرسره آب‌اندازی، به گونه‌ای که قبل از اینکه مرکز ثقل از لبه پی عبور کند، گشتاور مرکز بویانسی قسمت داخل آب حول لبه پی، از گشتاور وزن بیشتر شود و حالت شیرجه پاشنه اتفاق نیافتد.

- پر کردن مخازن بالاست سینه به گونه‌ای که مرکز ثقل به جلوتر منتقل شده و فرصت کافی برای افزایش بویانسی قسمت داخل آب برای ایجاد گشتاور لازم، فراهم شود.

بدین ترتیب به هنگام آب‌اندازی طولی، شناور قبل از رسیدن به حالت شیرجه پاشنه (شکل ۶) (و تکیه بر لبه پی) باید بتواند بر روی پایه سینه تکیه کند (شکل ۶) و سپس شناور شود.



شکل ۵: نمایش حالت شیرجه پاشنه (نقطه A: لبه پی)



شکل ۶: جداسدن شناور از سرسره حول پایه سینه (B: پایه سینه)

۴- اگر در حین انتقال کشتی به پایین سرسره، برابری نیروی وزن و بویانسی قبل از رسیدن سینه به لبه پی صورت گیرد، پایه سینه (تکیه‌گاه سینه روی قسمت متحرک سرسره) به داخل آب نمی‌افتد در غیر این صورت این پایه به داخل آب می‌افتد و لذا باید عمق آب کافی باشد تا قسمت سینه با پایه برخورد نکند. در محاسبه امکان برخورد سینه، مواردی نظیر ممتوم حرکت سینه، اختلاف وزن و بویانسی در لحظه افتادن سینه و اثرات میرایی آب باید لحاظ گردند.

این ویژگی‌ها در دو مورد اصلی کاربرد دارند:

۱- حداقل طول و شیب سرسره مورد نیاز برای آب اندازی شناورها

۲- ارتفاع جزر و مد مناسب در حین آب اندازی (توجه شود که شکل ۲ برای هر ارتفاع جزر و مد یا ارتفاع آب، متفاوت است و پس از ترسیم برای چندین حالت، سرانجام حداقل ارتفاع آب مناسب انتخاب می‌شود).

در هر مرحله از حرکت شناور به پائین سرسره، می‌توان با داشتن زاویه شیب سرسره و با استفاده از منحنی بونژان، مقدار نیروی بویانسی و مرکز آن را تعیین کرد. بدین ترتیب در هر لحظه می‌توان مقدار نیرو و گشتاور بویانسی را با وزن و گشتاور آن مقایسه کرد و تشخیص داد که در چه لحظه‌ای، پاشنه از روی پایه بلند می‌شود، شناور در چه لحظه‌ای بطور کامل شناور می‌شود، آیا شیرجه پاشنه اتفاق می‌افتد و آیا پایه سینه به داخل آب می‌افتد یا خیر.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: سکوی خود بالا بر^۱



شرکت سازنده: شرکت صدرا- نکاء

شکل حاضر نشان دهنده یک سکوی سه پایه دریایی می باشد که برای اولین بار در ایران ساخته شده است. این سکو در نقاط کم عمق دریای خزر بر روی سه پایه خود می ایستد و عملیات حفاری را انجام می دهد.

فصل ۷

ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی

بخش ۷-۱: ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی

ممان های خمشی وارد بر بدنه شناور در دو حالت قابل بررسی است:

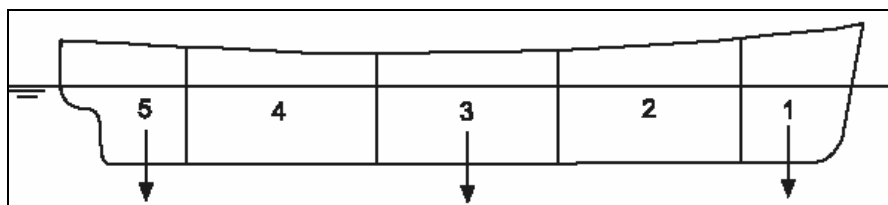
الف- ممان های خمشی در آب آرام

ب- ممان های خمشی در اثر امواج

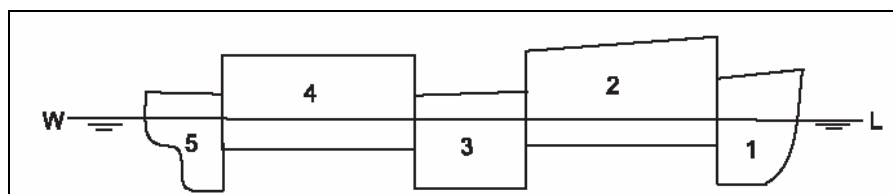
در حالات فوق، کشتی همانند یک تیر، تحت خمش قرار می گیرد و به صورت زیر بررسی می شوند:

الف- ممان خمشی در آب آرام

می دانیم که برای شناور ماندن کشتی، وزن و بویانسی شناور باید دقیقاً با هم برابر باشند یعنی برآیند اقلام وزنی با برآیند اجزاء بویانسی ناشی از بدنه با هم برابر شوند. حال اگر توزیع نیروی وزن و بویانسی در هر قسمت از طول شناور دقیقاً با هم قرینه باشند، هیچگونه ممان خمشی بر شناور وارد نمی گردد ولی در واقعیت هیچگاه این اتفاق نمی افتد. علی رغم برابری برآیند نیروی وزن و بویانسی، توزیع آنها در طول یکسان نیست و این تفاوت توزیع نیرو باعث اعمال خمش بر بدنه شناور می شود. مطابق شکل ۱ شناوری را در نظر بگیرید که دارای ۵ قسمت مجزا باشد. قسمت های ۱، ۳ و ۵ به دلیل استقرار تجهیزات لنگر و سکان (قسمت ۱)، موتورخانه (قسمت ۳ - با فرض موتورخانه در قسمت میانی بدنه) و تجهیزات شافت و پروانه (قسمت ۵)، دچار افزونی وزن بر بویانسی هستند. قسمت های ۲ و ۴ سبک هستند و در آنها وزن از بویانسی کمتر است. حالت اغراق آمیز نسبت وزن و بویانسی این قسمت ها را می توان در شکل ۲ ملاحظه نمود.



شکل ۱: قسمت‌های مختلف طول شناور با وزن و بویانسی مختلف

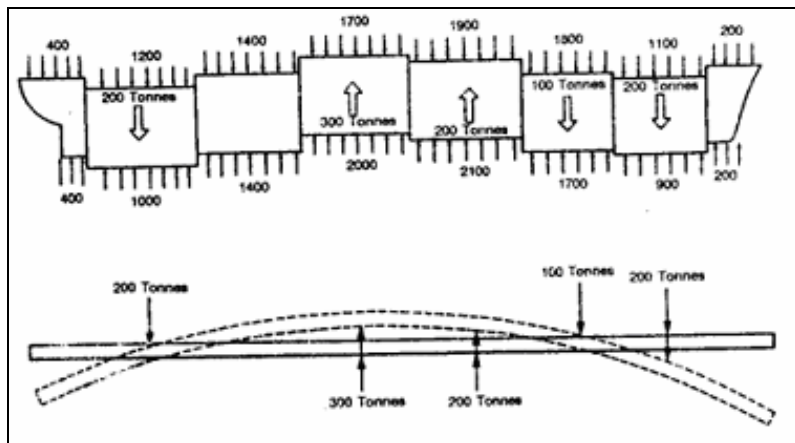


شکل ۲: نمایش افزونی وزن و بویانسی در قسمت‌های مختلف

اگر آب‌خور شناور WL باشد، قسمت‌های ۱، ۳ و ۵ که دچار افزونی وزن هستند مایل به فرو رفتن بیشتر در آب هستند که بویانسی را افزایش دهند تا برابر وزن آن قسمت گردد. قسمت‌های ۲ و ۴ که سبک هستند مایل به بیرون آمدن از آب هستند تا اضافه بویانسی را کاهش دهند و برابری وزن و بویانسی در آن قسمت هم برقرار گردد ولی در واقع امکان بروز هیچ یک از آنها وجود ندارد چرا که کشتی یک جسم صلب است و آب‌خور WL نیز ثابت است (برای یک حالت وزنی معین). این تمایلات متفاوت قسمت‌های مختلف شناور باعث اعمال ممان خمشی می‌گردد، لذا هنر طراح کشتی در این است که توزیع وزنی را در طول شناور به گونه ای انجام دهند که باعث اعمال کمترین ممان خمشی بر بدنه گردد.

شکل ۳ توزیع وزن و بویانسی واقعی را در یک کشتی حمل کالای عمومی ۹۷۰۰ تنی نشان می‌دهد. در قسمت‌های میانی به دلیل توپر بودن بدنه، نیروی بویانس بیشتر از وزن است و در قسمت سینه و پاشنه، به دلیل باریک شدن بدنه، نیروی وزن بیشتر از بویانسی شده است. در برخی از قسمت‌های بدنه نیز حتی المقدور سعی شده که وزن و

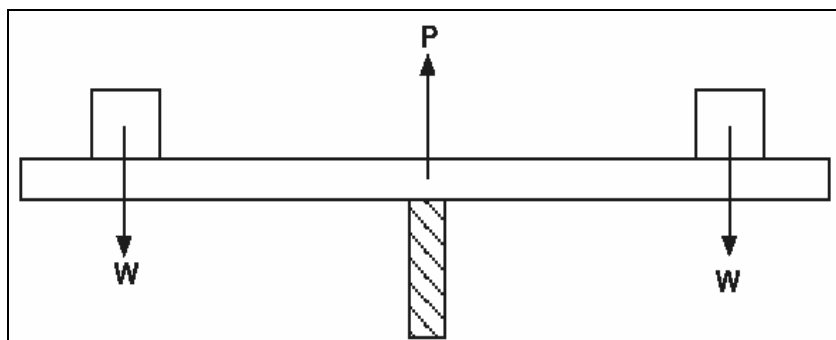
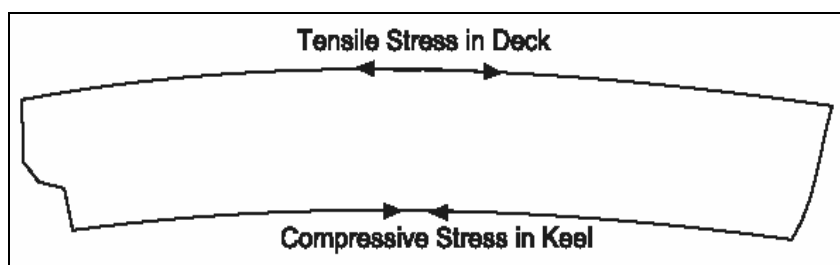
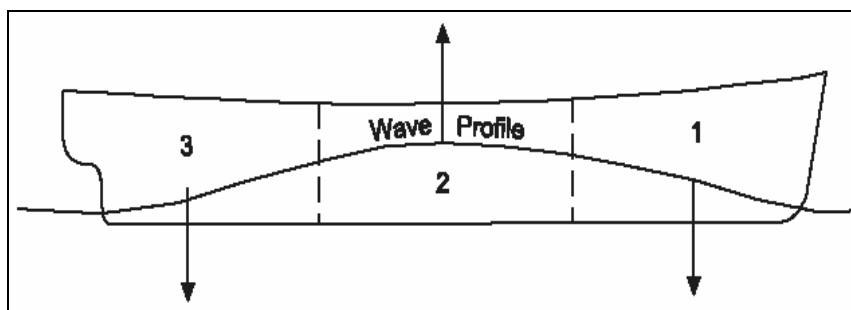
بویانسی با هم برابر و برآیند آن صفر شود و باعث اعمال ممان خمشی بر شناور نگردند. ملاحظه می شود که مجموع اجزاء وزنی برابر ۹۷۰۰ تن و مجموع اجزاء بویانسی بدنه نیز برابر ۹۷۰۰ تن شده است ولی بطور یکسان در طول توزیع نشده اند. بنابراین ممان خمشی در آب آرام وابسته به توزیع وزن و بار بر روی شناور و همچنین هندسه بدنه است.



شکل ۳: شبیه سازی نیروهای وزن و بویانسی با نیروهای وارد بر یک تیر و اعمال خمش

ب- ممان خمشی در اثر امواج

دانستیم که عدم تقارن نیروی وزن و بویانسی باعث اعمال ممان خمشی می گردد. از طرفی امواج بخصوص امواج تولید شده توسط خود بدنه از جمله عوامل تغییر در توزیع نیروی بویانسی هستند و بدترین حالت، زمانی است که طول موج برابر با طول شناور باشد. شکل ۴ را در نظر بگیرید که طول موج برابر طول شناور و قله موج در وسط شناور قرار گرفته است.

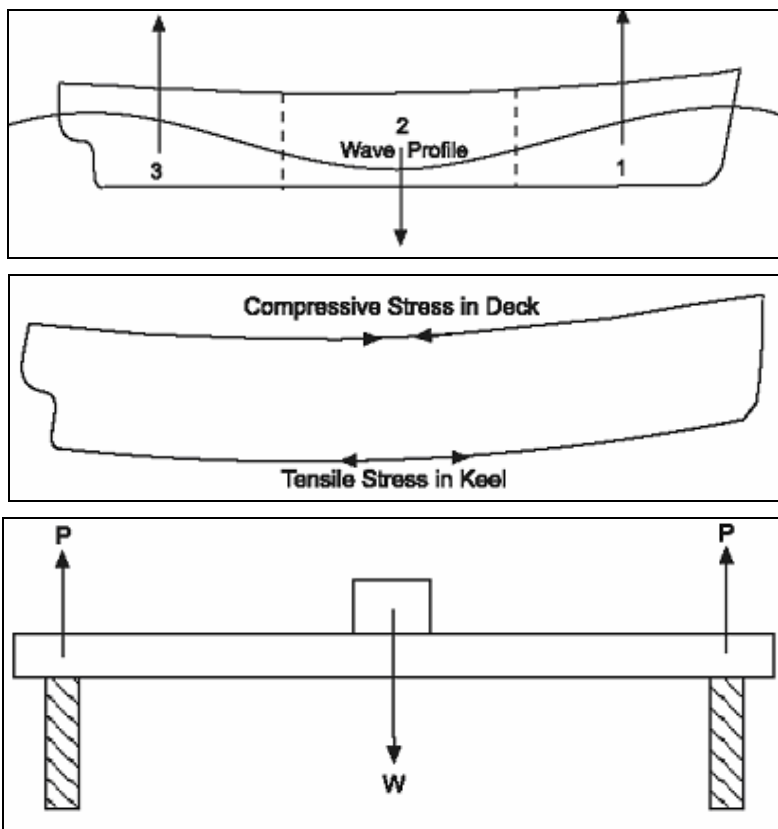


شکل ۴: اعمال نیروی خمشی هاگینگ بر بدنه شناور

در این حالت قسمت میانی با افزونی نیروی بویانسی و قسمت سینه و پاشنه با افزونی وزن مواجه شده است که باعث کشش در قسمت فوقانی (دک) و حالت فشاری در کف می شود. شناور به مثابه یک تیر دارای تکیه گاه میانی شبیه سازی می شود که دو

وزنه در طرفین تیر قرار گرفته‌اند. این حالت را در مهندسی دریایی «hogging» گویند که بحرانی‌ترین و بدترین حالت ممکن در اعمال ممان خمشی بر شناور است.

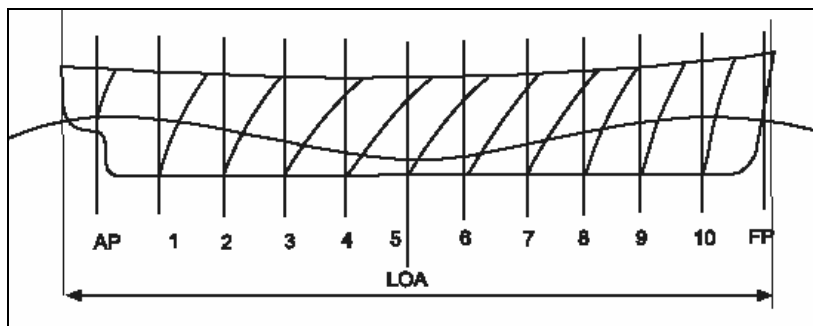
عکس این حالت که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود را «sagging» گویند که قعر موج در قسمت وسط شناور است. کف تحت کشش و عرشه تحت فشار قرار می‌گیرد.



شکل ۵: اعمال نیروی خمشی سگینگ بر بدنه شناور

محاسبه توزیع نیروی بویانسی در حالت موج‌دار بودن آب دریا به وسیله منحنی بونژان مطابق شکل ۶ انجام می‌شود که نحوه استفاده از منحنی بونژان در قسمت‌های

قبل توضیح داده شد. ابتدا به وسیله منحنی بونژان، مساحت زیر خط آب هر مقطع به دست می‌آید و از این مساحت‌ها نیز حجم و مرکز حجم زیر آب بدنه محاسبه شود.



شکل ۶: استفاده از منحنی بونژان در تعیین حجم و مرکز حجم بدنه در امواج

فصل ٨

آسكوآت و اثرات متقابل

بخش ۸-۱: آسکوات

اسکوات عبارتست از تغییر شیب ناشی از سرعت حرکت شناور در مناطق کم عمق نظیر کانالها و رودخانه‌ها.

در اینجا آبهای کم عمق اصطلاحاً به آبهایی گفته می‌شود که عمق آب کمتر از ۱/۵ برابر آب‌خور شناور باشد.

توصیف اولیه و کلی پدیده اسکوات به وسیله قانون برنولی امکان پذیر است:

$$\text{ثابت} = mgh + \frac{mp}{\rho} + \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{قانون برنولی}$$

اگر فرض کنیم که ارتفاع سیال ثابت است داریم:

$$\frac{mp}{\rho} + \frac{1}{2}mv^2 = \text{ثابت}$$

بنابراین اگر سرعت سیال افزایش یابد، فشار سیال کاهش می‌یابد به گونه‌ای که رابطه بالا همواره برابر مقدار ثابتی باشد. حرکت شناور در داخل آب را می‌توان بطور نسبی به صورت حرکت سیال و شناور ثابت، فرض کرد. از طرفی بیان داشتیم که نیروی بویانسی ناشی از فشار سیال جابجا شده توسط بدنه است لذا اگر فشار سیال کاهش یابد، آب‌خور شناور افزایش می‌یابد تا مقدار بویانسی لازم، مجدداً تأمین گردد. همانطور که در بخش‌های قبل گفتیم، فرو رفتن شناور در داخل آب باعث تغییر شیب شناور می‌شود. لذا در نهایت می‌توان گفت:

«حرکت شناور در آبهای کم عمق، باعث تغییرات زیاد فشار شده و آن نیز باعث تغییر شیب شناور می‌شود».

در سال های ۱۹۶۰-۱۹۹۰ ابعاد کشتی ها رشد چشمگیری یافت و نفتکش های غول پیکر ۳۵۰/۰۰۰ تنی با طول و آبخور بسیار بزرگ به وجود آمدند. از طرفی سرعت کشتی ها نیز افزایش یافت و این سه عامل باعث بحرانی شدن اسکوات برای این کشتی ها، بخصوص در مناطق کم عمق شد چرا که حتی نیم درجه شیب ناشی از اسکوات می توانست تغییر آبخور پاشنه به اندازه بیش از ۱ متر را به دنبال داشته باشد و خطر برخورد پاشنه یا پروانه با کف بسیار جدی بود. همینطور کشتی های دیگر که ابعاد بزرگی داشتند و از سرعت بالایی برخوردار بودند مانند کانترینرها با سرعت بالای ۲۵ گره) در معرض خطر بودند^۱. بطور مثال کشتی نفتکش ۲۶۰/۰۰۰ تنی Diamond Grace در سال ۱۹۹۷ در یکی از مناطق کم عمق اطراف توکیو بر اثر پدیده اسکوات با کف دریا برخورد کرد و بدنه و سیستم رانش آن با خسارت هنگفتی مواجه شد. حوادث مشابه باعث تحقیقات گسترده در زمینه پدیده اسکوات شد که نتایج زیر را در برداشت:

$$\delta = \frac{C_B \times S^{0.81} \times V_K^{2.08}}{20} \quad (۱)$$

اسکوات

این رابطه برای آبهای آزاد (بدون محدودیت عرض) عبارتست از:

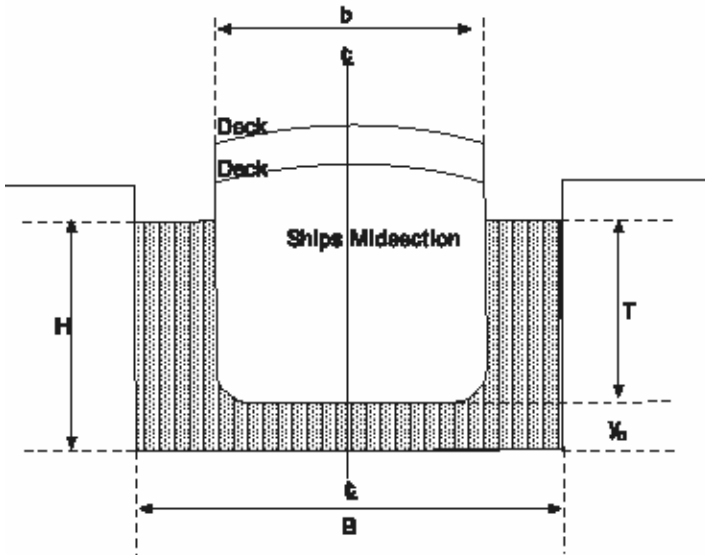
$$\delta = \frac{C_B \times V_K^2}{100} \quad (۲)$$

که در آن $\frac{H}{T}$ (عمق به آبخور) در محدوده ۱/۴-۱/۱ باشد.

در کانالها برای مقادیر S در محدوده ۰/۱-۰/۲۶۵ می توان رابطه زیر را بکار برد:

$$\delta = \frac{C_B \times V_K^2}{50} \quad (۳)$$

۱- بزرگترین نفتکش دنیا Jahre Viking با وزن مرده حدود ۵۶۵۰۰۰ تن می باشد و بزرگترین کشتی کانترینر دنیا NYK Antares با وزن مرده ۷۲۰۰۰ تن و با سرعت ۲۳ گره می باشد.



شکل ۱: نمایش پارامترهای نشان داده شده در فرمول‌ها

ضریب محدودیت محیط (S) از رابطه زیر به دست می آید:

$$S = \frac{\text{مساحت مقطع عرضی کشتی}}{\text{مساحت مقطع کانال}} = \frac{b \times T}{B \times H} \quad (۴)$$

که این پارامترها در شکل ۱ قابل ملاحظه هستند.

که در روابط بالا داریم :

b : عرض شناور

B : عرض کانال

H : عمق آب

T : آب‌خور کشتی در حالت بدون شیب

C_B : ضریب بلوکی

V_K : سرعت نسبى كشتى و آب (مثلاً رودخانه ها)

S : ضريب محدوديت محيط

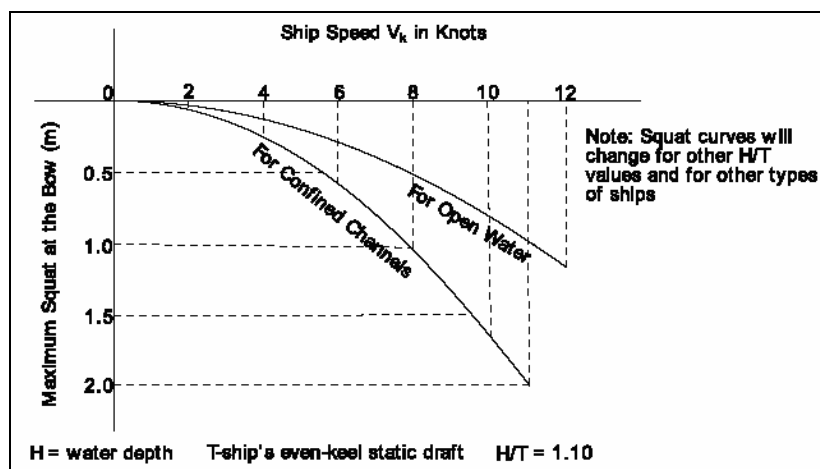
اگر بخواهيم رابطه (۴) را براى يك آب آزاد^۱ محاسبه كنيم، عرض معادل B از رابطه زير به دست مى آيد:

$$B = \{7.7 + 20(1 + C_B)^2\} \quad (5)$$

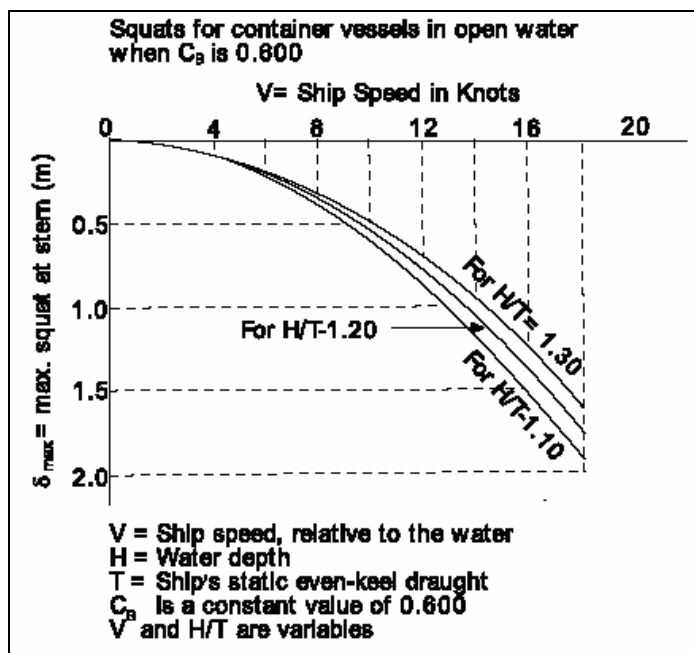
همچنين بايد بدانيم كه در كشتيهائى توپير مانند نفتكشهاى غول پيكر (با $C_B > 0.7$)، اغلب اسكوات به سينه اتفاق مى افتد و در كشتى هاى با C_B كوچك ($C_B < 0.7$) مانند كشتى هاى نظامى، مسافبرى و كانتينبر، اغلب اسكوات در پاشنه بروز مى كند.

از رابطه (۱) ملاحظه مى شود كه حداكثر اسكوات وابسته به ضريب بلوكى (C_B)، ضريب محدوديت محيطى (S) و سرعت نسبى سيال و كشتى (V_K) مى باشد. با ثابت فرض كردن برخى پارامترها و متغير در نظر گرفتن پارامتر ديگر مى توان نمودارهاى حداكثر اسكوات را ترسيم كرد.

شكل ۲ تغييرات اسكوات برحسب سرعت را براى دو حالت آب آزاد و آب داخل كانال نشان داده است كه طبق اين شكل، اسكوات در داخل كانال بسيار بيشتر از آب آزاد است. در اين شكل $\frac{H}{T} = 1.1$ در نظر گرفته شده است. شكل ۳ نيز تغييرات اسكوات با سرعت را در نسبتهاى $\frac{H}{T}$ مختلف ارائه كرده است.

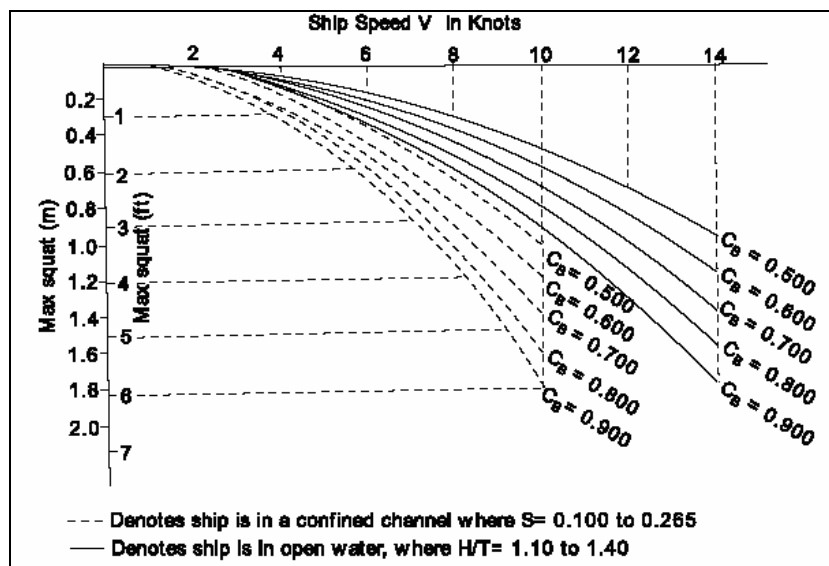


شکل ۲: مقایسه اسکوات برای آب آزاد و شناور داخل کانال



شکل ۳: تغییرات اسکوات با سرعت

شکل ۴ تغییرات اسکوات با سرعت را در مقادیر مختلف C_B ارائه کرده است. جدول زیر این شکل محدوده C_B را برای انواع کشتی‌ها بیان داشته است.



Ship type	Typical C_B , fully loaded	Ship type	Typical C_B , fully loaded
ULCC	0.850	General cargo	0.700
Supertanker	0.825	Passenger liner	0.625
Oil tanker	0.800	Container ship	0.575
Bulk carrier	0.750	Coastal tug	0.500

شکل ۴: تغییرات اسکوات بر حسب C_B

در نهایت می‌توان گفت تنها راه چاره کاپیتان شناور برای جلوگیری از به گل زدن شناور در اثر اسکوات، کاهش سرعت به هنگام ورود به آبهای کم‌عمق است. ورود به آبهای کم‌عمق را می‌توان با نشانه‌های زیر تشخیص داد:

۱- افزایش ارتفاع امواج تشکیل شده از حرکت بدنه بخصوص در قسمت سینه

۲- کاهش فرمان پذیری سکان

۳- کاهش خودبخود دور موتور که در آبهای آزاد حدود ۱۵ درصد و در کانالها حدود ۲۰ درصد است.

۴- کاهش سرعت حرکت شناور که در آبهای آزاد حدود ۳۰ درصد و در کانالها حدود ۶۰ درصد است.

۵- کاهش حرکات رول ، پیچ و هیو

۶- گل آلود شدن اطراف بدنه (برای مناطق شنی)

۷- افزایش قطر گردش شناور در صفحه افقی به حدود ۲ برابر

۸- افزایش زمان و فاصله توقف

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کشتی کانتینربر اقیانوس پیما



شرکت سازنده: کشتی سازی خلیج فارس

تعداد کانتینر: ۲۵۰۰ کانتینر

طول: ۲۰۷/۴ متر

عرض: ۲۹/۸ متر

آبخور: ۱۱/۴ متر

این کشتی اولین کشتی کانتینربر اقیانوس پیمای ایران می باشد که در کشتی سازی خلیج فارس ساخته شده است. با ساخت این کشتی، ایران به فناوری ساخت کشتی های اقیانوس پیمای دست یافت.

بخش ۸-۲: اثرات متقابل دو شناور در حال حرکت^۲

اثر متقابل شامل تغییر شیب یا هیل دو شناور گذرنده از کنار هم می‌باشد که این اثر در رودخانه ها و کانالها بسیار محسوس است. تبعات زیر را می‌توان برای اثر متقابل برشمرد:

۱- هنگامی که عرض میانی دو شناور در امتداد هم قرار می‌گیرند و شناورها در داخل کانال و رودخانه‌ها هستند، اثر متقابل باعث دو برابر شدن اسکوآت می‌شود.

۲- اثر متقابل فرمان‌پذیری سکان را دشوار و غیر قابل پیش‌بینی می‌کند.

۳- کشتی کوچکتر ممکن است به دلیل اثر متقابل، از مسیر خارج و به کناره های رودخانه برخورد کند.

۴- خطر واژگونی کشتی کوچکتر در شرایط خاص وجود دارد.

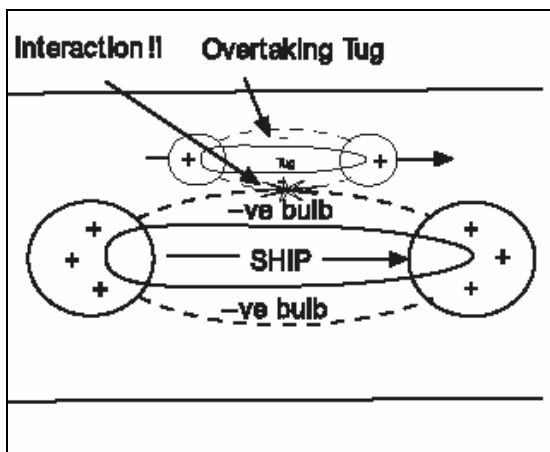
به صورت کلی، سه حالت را می‌توان برای اثر متقابل برشمرد:

۱- اثر متقابل بین دو کشتی متحرک مجاور هم

۲- اثر متقابل بین کشتی و دیواره های کناری رودخانه یا کانال

۳- اثر متقابل بین کشتی و کف رودخانه یا کانال (اسکوآت)

علت بروز اثر متقابل، تغییرات فشار در اطراف بدنه می‌باشد که مطابق شکل ۱ می‌توان آن را نشان داد.



شکل ۱: اثر متقابل بین دو کشتی متحرک

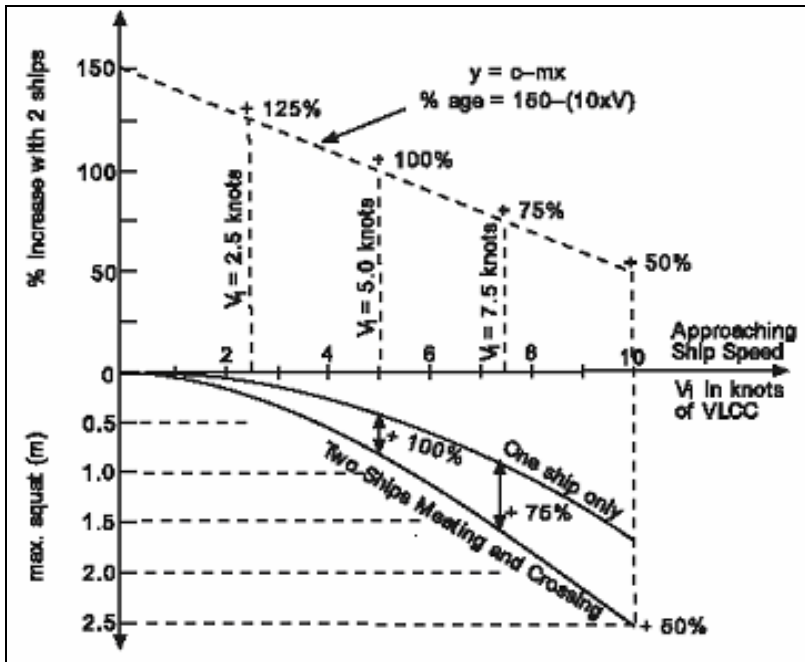
در این شکل، کشتی با سرعت V رو به جلو در حال حرکت می‌باشد که در قسمت سینه و پاشنه نواحی پرفشار و در قسمت میانی شناور ناحیه کم فشار به وجود می‌آید و ناحیه کم فشار باعث مکش از ناحیه اطراف می‌گردد. اگر ناحیه تغییرات فشار نشان داده شده بین دو کشتی با هم متداخل شود، «اثر متقابل» بروز می‌کند.

نتیجه اثر متقابل، تغییر شیب و هیل است که در قسمت الف و ب توضیح بیشتری در مورد آنها ارائه می‌گردد. البته این اثر بر گردش در صفحه افقی^۱ نیز مؤثر است که در قسمت ج بررسی می‌شود.

الف- تأثیر اثر متقابل بر اسکوات

می‌دانیم که از عوامل مؤثر بر اسکوات، ضریب محدودیت محیط (S) می‌باشد. وقتی دو شناور در کنار هم و در داخل کانال قرار می‌گیرند در واقع ضریب S افزایش یافته و به تبع آن، اسکوات افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بطور مثال دو شناور یکی با $C_B = 0.85$ و دیگری $C_B = 0.52$ را در نظر بگیرید که در داخل کانال به یکدیگر

نزدیک می‌شوند. مقایسه تفاوت مقادیر اسکوآت برای کشتی بزرگتر، در شکل ۲ نشان داده شده است.



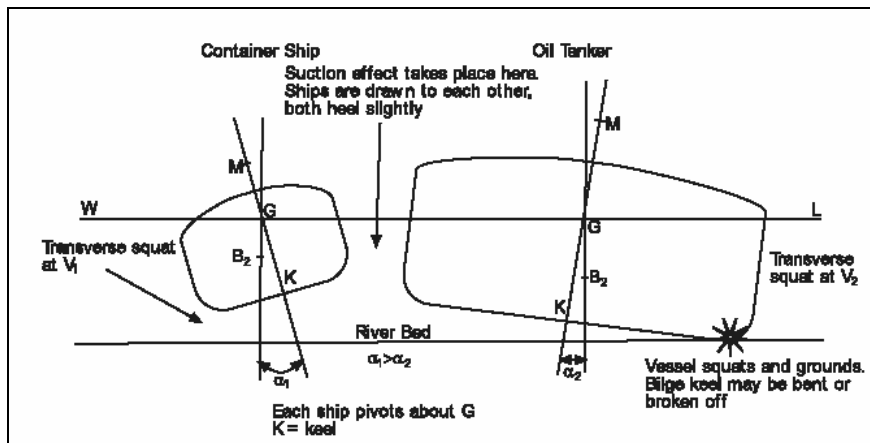
شکل ۲: تأثیر اثر متقابل بر اسکوآت

خط چین‌های قسمت بالایی نمودار، درصد افزایش اسکوآت را نشان می‌دهد که تا بیش از ۱۲۵ درصد نیز رسیده است. نکته قابل توجه در اینجا است که کشتی بزرگتر از آنجا که $C_B > 0.7$ دارد، اسکوآت به سینه دارد و کشتی کوچکتر که $C_B < 0.7$ دارد، اسکوآت به پاشنه دارد.

ب- تأثیر اثر متقابل بر غلتش عرضی

هنگامی که دو شناور از کنار هم عبور می‌کنند، (به‌خصوص اگر ابعاد آنها برابر نباشد)، وقتی عرض میانی دو شناور هم امتداد شود، در بین دو کشتی، تداخل نواحی کم فشاری به وجود می‌آید که مکش زیادی در ناحیه بین دو کشتی ایجاد

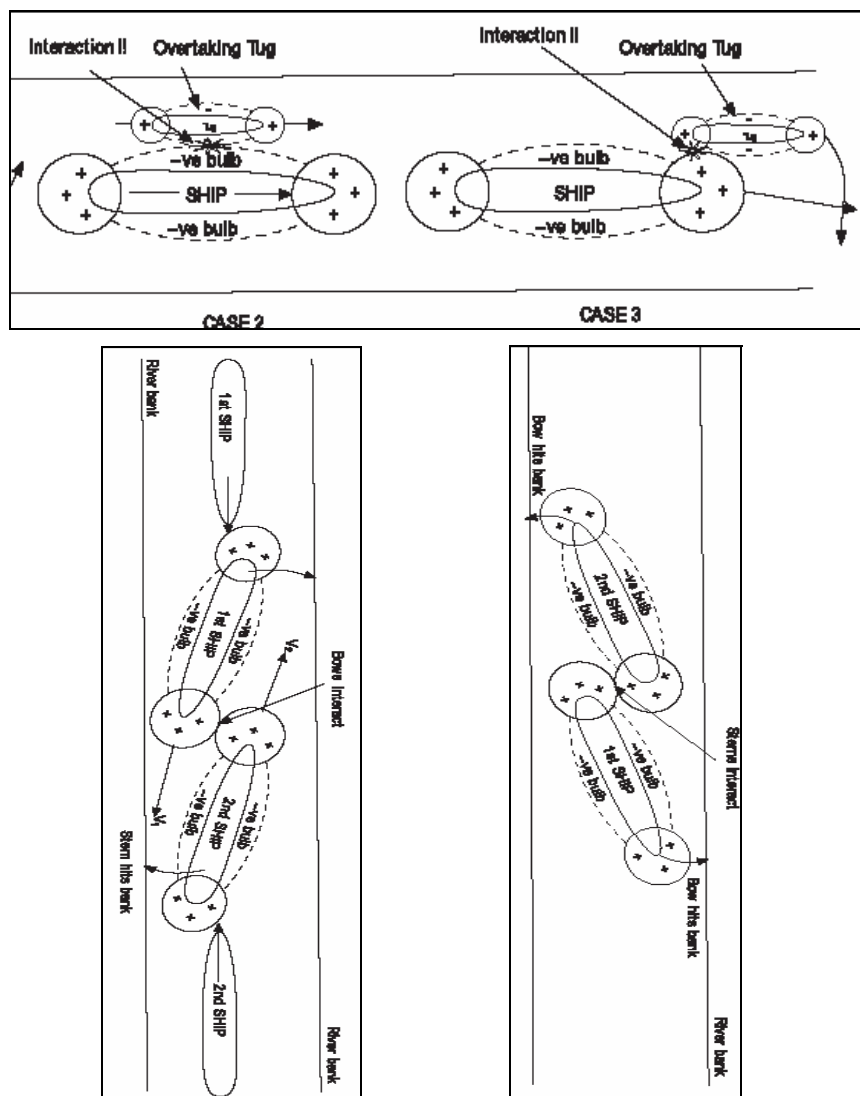
می‌کند (مطابق شکل ۳). این ناحیه کم فشار باعث هدایت جریان سیال از طرف مقابل به این ناحیه می‌شود که غلتش شناورها را مطابق شکل ۳ در پی دارد. غلتش کشتی کوچکتر، بیشتر از کشتی بزرگتر است ولی از آنجا که عرض کشتی بزرگتر خیلی بیشتر است، اگر عمق زیر شناور کافی نباشد، احتمال برخورد شناور بزرگتر با کف وجود دارد. در این حالت غلتش شناور حول G در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳: تأثیر اثر متقابل بر غلتش عرضی

ج- تأثیر اثر متقابل بر گردش در صفحه افقی

تداخل نواحی کم فشار و پرفشار دو شناور می‌تواند عکس‌العملهای متفاوتی از دو شناور را در صفحه افقی در پی داشته باشد. این حالات را می‌توان در شکل ۴ ملاحظه کرد. در این شکل، حالات مختلف تداخل نواحی پرفشار و کم‌فشار در قسمت سینه و پاشنه و میانی شناور نشان داده شده است. تغییر مسیر شناور نیز بر روی شکل نشان داده شده است. در حالت تداخل نواحی کم فشار قسمت میانی، شناورها ضمن کشیده شدن به سمت یکدیگر، باز هم به حرکت مستقیم ادامه می‌دهند ولی در بقیه حالات، تغییر مسیر شناور کوچکتر بسیار محسوس است.



شکل ۴: تأثیر اثر متقابل بر گردش در صفحه افقی

ضمائم

ضمیمه ۱:

ملاحظات طراحی پایداری در استاندارد کشتی سازی BV

BV : Part B / Chapter 3/

* مهمترین موارد این استاندارد در زمینه پایداری شناور، در زیر به اختصار مورد اشاره قرار می‌گیرند (شکل‌ها و نمودارها از متن اصلی انتهای این بخش ملاحظه شوند):

بخش ۱:

۱- توضیحات عمومی

* تمام کشتیهای با طول بزرگتر یا مساوی ۲۴ متر می‌توانند از این استاندارد استفاده کنند، البته به شرطی که پایداری در حالت سالم^۱ آنها به حد کافی باشد.

* برای کشتیهای با طول کمتر از ۲۴ متر نیز می‌توان از این استاندارد استفاده کرد با این تفاوت که بخش‌هایی از آن برای این کشتی‌ها، حذف می‌شود.

۲- فرآیند ارزیابی

۲-۱- مدارکی که باید تسلیم شوند:

* کلیه مدارکی که در قسمت 1, ch 3, sec 3 [1,1,2] گفته شده باید ارائه شود.

* مدارک پایداری که در قسمت 1, ch 3, sec 3 [1,2,1] بیان شد شامل موارد زیر باید ارائه شود:

- ارائه گزارش آزمایش کجی به صورتی که در بخش [2,2] بیان می‌شود یا ارائه اطلاعات پایداری و نتایج آزمایش کجی مربوط به کشتی مشابه^۲ به همراه وزن سبک^۳

1 - intact stability

2 - sister ship

3 - light weight

آن (اگر وزن سبک، به روشی غیر از آزمایش کجی به دست آمده، باید گزارش و نوع روش اندازه گیری ضمیمه گردد).

- دفترچه تریم و پایداری به گونه ای که بیان خواهد شد.

- محاسبات تقسیم بندی داخلی و طول مجاز آبگرفتگی به گونه ای که در قسمت E pr ، 11 CH ، 3 sec ، [1,3] بیان شده است.

- روش بارگیری غلات و فله به روش توضیح داده شده در E pr ، 4 ch ، 3 sec ، [2,2,2].

- محاسبه پایداری در حالت صدمه دیده مطابق قسمت 3 ch ، 3 sec.

- مدارک کامپیوتری بارگیری مطابق 3 ch ، 2 sec ، 3 sec.

* مؤسسه رده بندی این حق را دارد که کلیه مدارک نحوه بارگیری براساس تخمین وزن سبک شناور را درخواست کند.

* مدارک نهایی: مدارک نهایی پس از انجام آزمایش کجی یا کنترل وزن سبک^۱ تسلیم می شود. این نتایج [که پس از ساخت و آب اندازی ارائه می شود]. حداکثر می تواند به اندازه مقادیر زیر با مدارک اولیه ارائه شده تفاوت داشته باشد.

- تفاوت وزن سبک شناور به اندازه ۲ درصد.

- تفاوت مرکز ثقل طولی به اندازه ۱ درصد طول بین دو عمود.

همچنین مرکز ثقل عمودی ارائه شده نباید به هیچ عنوان بالاتر از مرکز ثقل عمودی ارائه شده در فازهای قبل باشد.

۲-۲- آزمایش کجی / کنترل وزن سبک

* تعاریف

- وزن سبک: شامل وزن شناور تکمیل شده بدون وجود مواد مصرفی، بار داخل انبارها و خدمه. البته مایعات داخل ماشین آلات مانند روغن هیدرولیک که برای کارکرد دستگاهها ضروری هستند جزء وزن سبک در نظر گرفته می‌شوند.

- آزمایش کجی: آزمایش کجی شامل جابجاکردن وزنه‌هایی با جرم مشخص، به صورت عرضی و اندازه‌گیری زاویه هیل ناشی از جابجایی‌ها می‌باشد که با بکاربردن روابط خاص، ارتفاع مرکز ثقل (KG یا VCG) تعیین می‌گردد.

- کنترل وزن سبک: به هنگام انجام آزمایش کجی (حالت بدون هیل شناور)، آب‌خور شناور از روی علامت خط آب‌خور خوانده می‌شود و با استفاده از منحنی‌های هیدرواستاتیک، می‌توان وزن سبک شناور را به دست آورد. البته باید وزن و مرکز ثقل طولی، عرضی و عمودی کلیه اقلام غیر ضروری موجود در شناور به هنگام انجام آزمایش کجی حذف و اقلامی که احیاناً بعداً باید نصب شوند نیز در محاسبات وزن سبک لحاظ شوند تا وزن سبک در حالت واقعی شناور به دست آید.

* مؤسسه رده بندی در موارد زیر اجازه می‌دهد که به جای آزمایش کجی تنها کنترل وزن سبک انجام شود:

- اگر نتایج آزمایش کجی و اطلاعات پایداری کشتی مشابه در دسترس باشد و وزن سبک شناور نیز بیش از ۱٪ با کشتی مشابه تفاوت نداشته باشد، دیگر نیازی به انجام آزمایش کجی نیست و مرکز ثقل عمودی کشتی مشابه را می‌توان برای شناور موضوع پروژه در نظر گرفت.

- نوع خاصی از کشتی‌ها مانند کاتاماران‌ها به شرطی که:

□ جزئیات اقلام وزنی و موقعیت مرکز ثقل آنها معلوم باشد.

□ کنترل وزن سبک انجام شده باشد و عدد حاصل شده بین وزن

تخمین زده شده و وزن تعیین شده باشد.

□ در تمام شرایط بارگیری، طبق دفترچه تریم و پایداری شناور، پایداری مناسبی وجود داشته باشد.

بخش ۲ :

۱- توضیحات عمومی :

شامل توضیحاتی از نیازمندی‌های تأیید پایداری، وزنه‌های سربی ثابت داخل شناور، شناورهای ابدائی، شرایط کاری و غیره.

۲- معیارهای طراحی:

۱-۲- معیارهای پایداری در حالت سالم:

۱-۱-۲- موارد توضیح داده شده در زیر حداقل‌های مورد نیاز برای تأمین پایداری هستند نه حداکثر مقادیر. البته باید توجه داشت که بیش از حد بزرگ شدن ارتفاع متاستری^۱ نیز نامناسب است چرا که باعث شتاب بالای حرکات شناور شده و کارکرد خدمه، دستگاهها و حتی ایمنی حمل بار را به خطر می‌اندازد. معیارهای پایداری در زیر بیان می‌شوند.

۲-۱-۲- مساحت زیر نمودار GZ :

- مساحت زیر نمودار GZ تا زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۰۵۵ متر - رادیان نباشد.

- مساحت زیر نمودار GZ تا زاویه ۴۰ درجه (یا زاویه‌ای کمتر از ۴۰ درجه (θ_f) که اولین عرشه غیر آب‌بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۹ متر - رادیان نباشد.

- مساحت زیر نمودار GZ در زاویه بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا θ_f درجه) نباید کمتر از ۰/۰۳ متر - رادیان باشد.

۲-۱-۳- حداقل بازوی بازگرداننده (GZ)

حداقل مقدار GZ در زاویه ۳۰ درجه یا بیشتر، باید برابر ۰/۲ متر باشد.

۲-۱-۴- زاویه ای که حداکثر بازوی بازگرداننده در آن به دست می آید:

- حداکثر مقدار GZ باید ترجیحاً در زاویه ای بیش از ۳۰ درجه و حداقل در ۲۵ درجه به دست آید.

- اگر منحنی GZ دارای دو نقطه حداکثر است، اولین نقطه حداکثری نباید کمتر از ۲۵ درجه رخ دهد.

- در برخی موارد خاص، مؤسسه رده بندی می تواند اجازه دهد که حداکثر زاویه ای که در آن بازوی بازگرداننده به حداکثر مقدار خود می رسد (θ_{max}) کمتر از ۲۵ درجه هم باشد (و در هیچ شرایطی کمتر از ۱۵ درجه نمی تواند باشد) به شرطی که مساحت کل زیر منحنی GZ کمتر از مقدار A نباشد. مقدار A از رابطه زیر به دست می آید:

$$A = 0,055 + 0,001 (30^\circ - \theta_{max})$$

۲-۱-۵- ارتفاع متاستری اولیه

ارتفاع متاستری اولیه (GM_0) شناور نباید کمتر از ۰/۱۵ متر باشد.

۲-۱-۶- مواردی که پایداری را تحت تأثیر قرار می دهند:

برخی موارد که در اینجا ذکر می شوند، پایداری را تحت تأثیر قرار می دهند و لذا باید در نظر گرفته شوند از جمله، باد عرضی با سطح بادخور زیاد، یخ زدگی عرشه فوقانی، آب جمع شده روی عرشه و برخورد امواج از پشت به شناور.

۲-۱-۷- مواردی که پایداری را کاهش می دهند:

باید ضریب اطمینان کافی برای مواردی که باعث کاهش پایداری می‌شوند را مد نظر گرفت مانند افزایش وزن در اثر جذب آب یا یخ‌زدگی بعضی بخش‌ها یا کاهش وزن در اثر مصرف موادی مانند سوخت و انبارها.

۳- معیار وزش باد شدید و غلتش (معیار آب و هوا):

۳-۱- توضیحات کلی

۳-۱-۱- مطالب این قسمت برای کشتی‌های با طول بیش از ۲۴ متر بکار می‌رود و مکمل بحث قبلی پایداری است.

۳-۲- معیار آب و هوا

۳-۲-۱- فرضیات:

بررسی مقاومت شناور در برابر اثرات باد عرضی و غلتش برای شرایط استاندارد بارگیری، براساس شکل ۱ به صورت زیر است:

* کشتی در معرض فشار باد یکنواخت به صورت عمود بر صفحه مرکزی شناور قرار می‌گیرد که بازوی نیروی باد L_{w1} می‌باشد.

* θ_0 زاویه تعادل استاتیکی و θ_1 زاویه‌ای است که شناور بر اثر نیروی موج رو به باد متمایل شده است.

* سپس کشتی در معرض فشار تندباد با بازوی هیل دهنده L_{w2} قرار می‌گیرد.

* اثر سطح آزاد مخازن نیز باید لحاظ گردد.

۳-۲-۲- معیار پایداری دینامیکی

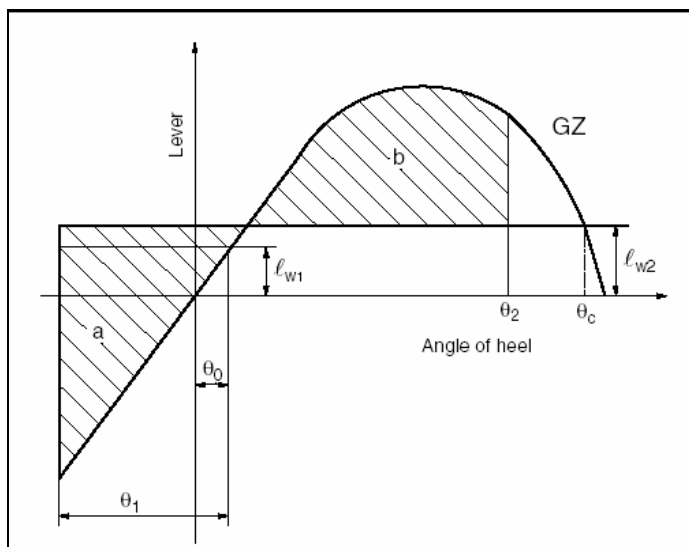
براساس فرضیات بیان شده، معیار به صورت زیر می‌باشد:

* مساحت b باید برابر یا بزرگتر از مساحت a باشد که:

a - مساحت بین منحنی GZ و بازوی هیل دهنده L_{w2} از محل برخورد دو نمودار تا زاویه θ_R (مطابق شکل ۱).

b - مساحت بین منحنی GZ و بازوی هیل دهنده L_{w2} از محل برخورد دو نمودار تا زاویه θ_2 (مطابق شکل ۱).

* θ_0 زاویه تعادل استاتیکی شناور در معرض وزش باد یکنواخت باید حداکثر ۱۶ درجه یا ۸۰ درصد زاویه خرسی عرشه باشد.



۳-۲-۳- بازوهای هیل دهنده:

بازوهای هیل دهنده باد L_{w1} و L_{w2} بر حسب متر، مقادیر ثابتی در همه زوایای غلتش هستند که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$L_{w1} = \frac{PAZ}{1000g\Delta}$$

$$L_{w2} = 1.5L_{w1}$$

که داریم:

P: برای ناوبری در مناطق نامحدود اقیانوسی برابر است با $504 \frac{N}{m^2}$ و برای ناوبری در مناطق محدود (غیر اقیانوسی) کمتر از این حد می‌باشد.

A: سطح جانبی در معرض وزش باد بر حسب m^2 که از سطح جانبی بدنه کشتی، روبناسازی و سطح جانبی بارهای روی عرشه به دست می‌آید.

Z: فاصله عمودی بر حسب متر از مرکز سطح A تا مرکز سطح جانبی زیر خط آبخور (که به صورت تقریبی نصف عمق آبخور در نظر گرفته می‌شود).

Δ : جابجایی بر حسب تن.

$$g: 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

۳-۲-۴- زوایای هیل:

برای محاسبه معیار بیان شده، زوایای تعریف شده در شکل ۱ به صورت زیر به دست می‌آید:

θ_0 : زاویه هیل برحسب درجه که از وزش باد یکنواخت ایجاد شده است.

θ_1 : زاویه رول برحسب درجه که ناشی از نیروی موج به سمت باد می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_1 = 109 K X_1 X_2 \sqrt{rs}$$

زاویه θ_1 برای کشتی‌هایی که دارای باله ضد غلتش هستند، در حالت بدون باله در نظر گرفته می‌شود.

θ_2 : زاویه به زیر آب رفتن عرشه (θ_f) برحسب درجه یا ۵۰ درجه یا θ_c .

θ_f : زاویه هیل برحسب درجه که در آن زاویه یکی از سوراخهای بدنه، روبناسازی یا اتاقک روی عرشه که آب‌بند نیست به زیر آب می‌رود.

θ_c : زاویه در محل تقاطع منحنی GZ با بازوی هیل دهنده L_{w2} .

θ_R : این زاویه برابر است با: $\theta_R = \theta_0 - \theta_1$.

X_1 : ضریبی که از جدول ۱ به دست می آید.

X_2 : ضریبی که از جدول ۲ به دست می آید.

K : ضریبی که از ملاحظات زیر به دست می آید:

- برای کشتی‌هایی با کف گرد بدون تیغه های ثابت کاهش غلتش یا تیغه کیل ، $K=1$ است .

- برای کشتی‌هایی با کف با زاویه تند $K=0.7$ است.

- برای کشتی‌هایی که دارای تیغه های ثابت کاهش غلتش یا تیغه کیل نیستند، K از جدول ۳ به دست می آید.

r : برابر است با : $r = 0.73 \pm 0.6(OG) / T_1$ که برای این رابطه داریم:

- OG : فاصله برحسب متر بین مرکز ثقل و خط آبخورد (اگر مرکز ثقل بالای خط آب باشد مثبت و اگر پائین خط آب باشد، منفی است).

- T_1 : عمق آبخورد متوسط بدون در نظر گرفتن ضخامت بدنه برحسب متر.

S : تعریف شده در جدول ۴ که T_R این جدول از رابطه زیر وارد می شود:

$$T_R = \frac{2CB}{\sqrt{GM}}$$

که در این رابطه C برابر است با:

$$C = 0.373 + 0.023 \frac{B}{T_1} - 0.043 \frac{L_w}{100}$$

در این رابطه نیز پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند:

L_w : طول خط آبخور بر حسب متر.

T_I : عمق آبخور متوسط بدون در نظر گرفتن ضخامت بدنه بر حسب متر.

A_k : مساحت کل تیغه‌های ثابت ضد غلتش یا مساحت جانبی کل هر یک از ملحقات بدنه به گونه‌ای که در برابر حرکت رول، جرم افزوده ایجاد می‌کند. (بر حسب متر مربع)

GM : ارتفاع متاستری بر حسب متر که اثر سطح آزاد مخازن در آن لحاظ شده است.

Table 2 : Values of coefficient X_2

C_B	X_2
$\leq 0,45$	0,75
0,50	0,82
0,55	0,89
0,60	0,95
0,65	0,97
$\geq 0,70$	1,00

Table 1 : Values of coefficient X_1

B/d	X_1
$\leq 2,4$	1,00
2,5	0,98
2,6	0,96
2,7	0,95
2,8	0,93
2,9	0,91
3,0	0,90
3,1	0,88
3,2	0,86
3,4	0,82
$\geq 3,5$	0,80

Table 4 : Values of factor s

T_R	s
≤ 6	0,100
7	0,098
8	0,093
12	0,065
14	0,053
16	0,044
18	0,038
≥ 20	0,035

Table 3 : Values of coefficient k

$\frac{\Delta_k \times 100}{L \times B}$	k
0,0	1,00
1,0	0,98
1,5	0,95
2,0	0,88
2,5	0,79
3,0	0,74
3,5	0,72
$\geq 4,0$	0,70

۴- اثر سطح آزاد سیال:

۴-۱- توضیحات عمومی: برای هر یک از شرایط عملیاتی و کاری، ارتفاع متاستری اولیه و بازوی بازگرداننده باید با لحاظ کردن اثر سطح آزاد اصلاح شود.

۴-۲- محدوده در نظر گرفتن اثر سطح آزاد:

۴-۲-۱- اثر سطح آزاد مایعات باید برای مخازنی که کمتر از ۹۸ درصد حجم مخزن پر شده اند، محاسبه گردد.

۴-۲-۲- برای کشتیهایی که مخازن آنها بیشتر از ۶۰ درصد حداکثر عرض بدنه است، اثر سطح آزاد مخازن حتی برای پر بودن مخزن به مقدار بیشتر از ۹۸ درصد نیز باید اعمال شود.

۴-۳- دسته بندی مخازن:

مخازنی که برای آنها سطح آزاد محاسبه می شود به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

* مخازنی که دارای سطح مایع ثابت هستند مانند مخازن اصلی حمل و آب مخازن بالاست که در این حالت مقدار واقعی سطح آزاد لحاظ می شود.

* مخازنی که دارای سطح مایع متغیر در داخل مخزن هستند مانند مخازن مواد مصرفی شامل سوخت، روغن و انتقال آب بین مخازن بالاست و نیمه پر بودن مخازن اصلی حمل بار. در این حالت، بدترین حالت سطح آزاد مخازن در نظر گرفته می شود.

۴-۴- مایعات مصرف شدنی:

۴-۵- مخازن بالاست (شامل مخازن بالاست و مخازن ضد غلتش)

۴-۶- عملیات انتقال مایعات

۴-۷- اصلاح ارتفاع متاستری اولیه و منحنی GZ: اصلاح ارتفاع متاستری و بازوی بازگرداننده به کمک ممان سطح آزاد مخازن (M_{fs}) و آن نیز به کمک ممان

دوم عرضی سطح آزاد سیال داخل مخزن به دست می‌آید. این ممان سطح آزاد سیال در حالت زاویه صفر درجه (بدون غلتش) محاسبه می‌گردد.

۴-۸- ممان سطح آزاد:

ممان سطح آزاد مخزن برای هر زاویه غلتش از رابطه زیر و برحسب $t.m$ به دست می‌آید:

$$M_{fs} = v.b.\rho.k.\sqrt{\delta}$$

که داریم:

v : حجم کل مخزن (m^3)

b : حداکثر عرض مخزن (m)

ρ : چگالی سیال داخل مخزن (t/m^3)

k : ضریب بدون بعدی که از جدول ۵ برحسب نسبت $\frac{b}{h}$ تعیین می‌گردد برای مقادیر میانی باید از میان‌یابی استفاده کرد.

δ : ضریب بلوکی (C_b) مخزن از رابطه مقابل: $\delta = \frac{v}{blh}$

که l حداکثر طول مخزن، h حداکثر ارتفاع مخزن می‌باشد.

CHAPTER 3 STABILITY

Section 1 General

1	General	43
1.1	Application	
2	Examination procedure	43
2.1	Documents to be submitted	
2.2	Inclining test/lightweight check	

Section 2 Intact Stability

1	General	45
1.1	Information for the Master	
1.2	Permanent ballast	
2	Design criteria	45
2.1	General intact stability criteria	
3	Severe wind and rolling criterion (weather criterion)	46
3.1	Scope	
3.2	Weather criterion	
4	Effects of free surfaces of liquids in tanks	48
4.1	General	
4.2	Consideration of free surface effects	
4.3	Categories of tanks	
4.4	Consumable liquids	
4.5	Water ballast tanks	
4.6	Liquid transfer operations	
4.7	GMO and GZ curve corrections	
4.8	Free surface moment	
4.9	Small tanks	
4.10	Remainder of liquid	

5	Cargo ships carrying timber deck cargoes	49
5.1	Application	
5.2	Definitions	
5.3	Stability criteria	
5.4	Stability booklet	
5.5	Calculation of the stability curve	
5.6	Loading conditions to be considered	
5.7	Assumptions for calculating loading conditions	
5.8	Stowage of timber deck cargoes	
6	Icing	50
6.1	Application	
6.2	Ships carrying timber deck cargoes	
6.3	Calculation assumptions	
6.4	Guidance relating to ice accretion	

Section 3 Damage Stability

1	Application	52
1.1	Ships for which damage stability is required	
2	General	52
2.1	Approaches to be followed for damage stability investigation	
3	Documents to be submitted	52
3.1	Damage stability calculations	
3.2	Permeabilities	
3.3	Progressive flooding	
4	Damage control documentation	54
4.1	General	

Appendix 1 Inclining Test and Lightweight Check

1	Inclining test and lightweight check	55
1.1	General	

Appendix 2 Trim and Stability Booklet

1	Trim and stability booklet	58
1.1	Information to be included in the trim and stability booklet	
1.2	Loading conditions	
1.3	Stability curve calculation	

Appendix 3 Probabilistic Damage Stability Method for Cargo Ships

1	Probabilistic damage stability method for cargo ships	63
1.1	Application	
1.2	Definitions	
1.3	Required subdivision index R	
1.4	Attained subdivision index A	
1.5	Calculation of factor p_i	
1.6	Calculation of factor s_i	
1.7	Permeability	
1.8	Stability information	
2	Interpretations	69
2.1	Interpretations on transverse subdivision	
2.2	Interpretations on combined transverse, horizontal, and longitudinal subdivision	
2.3	Interpretations on recesses	
2.4	Interpretation on the contribution to the attained index A applying various forms of watertight subdivision.	

مراجع

مراجع استفاده شده در ابتدای هر بخش آدرس دهی شده است.

- 1) Principles of Naval Architecture/ Vol.1/E.N.Lewis/1988
- 2) Basic Ship Theory / Vol.1/K.J.Rawson-E.C.Tupper/2001
- 3) Mechanics of Marine Vehicles/ B.R.Clayton-E.D.Bishop/1982
- 4) Ship Stability for Masters and Mates/ D.R.Derrett/2001
- 5) Modern Ship Design/ T.C.Gillmer/1975
- 6) Naval Architecture for non-Naval Architecture/ H.Benford/1991
- 7) Principles of Ship Performance/ Rob Vroman/2003
- 8) Submarine Design Notes/ H.A.Jackson/1980
- 9) Submersible Vehicle System Design /A Group of Authorities/1990
- 10) Introduction to Naval Architecture/ Eric Tupper/2002
- 11) Practical Ship Design/vol 1/ G.M.Watson/2002
- 12) Merchant Ship Stability/ A.R.Lester/1992
- 13) Creative Naval Architecture/ G.N.Hatch/1971

۱۴- تعادل و پایداری شناورها- دکتر محمد سعید سیف- دکتر مهدی سیف- ۱۳۷۴ - انتشارات دانشگاه هرمزگان

۱۵- شناخت کشتی - اسحاق علی میر

۱۶- پایداری و ایستایی کشتی- دکتر احمد باشی - ۱۳۷۴- انتشارات دانشگاه علوم دریایی نوشهر

۱۷- اصول طراحی زیردریایی - محمد مونسان - ۱۳۸۳- انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۱۸- مجموعه آزمونهای کارشناسی ارشد معماری کشتی - مصطفی قاسمی - مجید کریمی
راد - ۱۳۸۵

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: نفتکش ایران نکهاء



شرکت سازنده: شرکت صدرا

جابجایی: ۴۸۰۰ تن

شرکت صدرا تا کنون چندین فروند از این شناورها را برای بکارگیری در دریای خزر طراحی کرده و ساخته است.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا...

نام شناور: بارج ۱۵۰۰۰ تنی



شرکت سازنده: کشتی سازی خلیج فارس

جابجایی: ۱۵۰۰۰ تن

طول: ۱۳۰/۴ متر

عرض: ۲۹/۸ متر

ارتفاع: ۸/۳ متر

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا...

نام شناور: سکوی حفاری نیمه شناور - البرز



شرکت سازنده: شرکت صدرا

طول: ۹۸/۶ متر

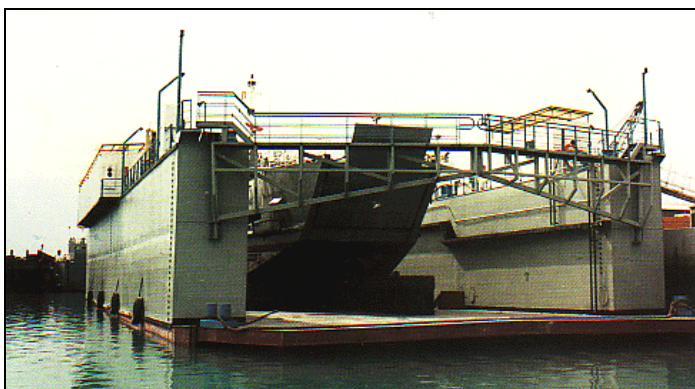
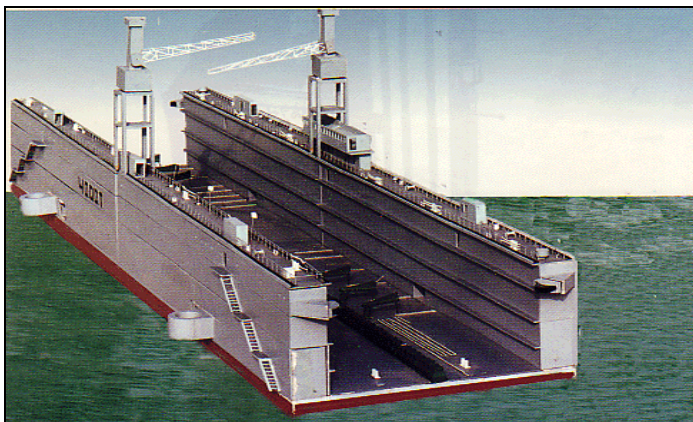
عرض: ۷۸/۸ متر

ارتفاع: ۳۶/۵

این سکوی حفاری نیمه شناور می باشد که در شرکت صدرا نکاء ساخته شده است. در قسمت مرکزی این سکوی حفاری وجود دارد که ارتفاع آن ۶۱/۵ متر می باشد. ابعاد عظیم این سکوی در شکل های بالا مشخص است.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: حوضچه شناور تعمیر و ساخت کشتی^۱



شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

طول: ۱۳۰ متر ، عرض: ۲۸ متر، ارتفاع: ۱۵ متر

این گروه با کسب دانش فنی ساخت این حوضچه ها، تاکنون چندین فروند از آنها را ساخته است. ایران جزء معدود کشورهای سازنده این حوضچه ها می باشد.

^۱ - floating dock

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: زیردریایی نظامی میدجت



این زیردریایی یکی از پیشرفته ترین زیردریایی های میدجت دنیا می باشد که توسط محققین و صنعتگران وزارت دفاع ساخته شده است. این زیردریایی اثباتی است بر توانمندی های منحصر بفرد صنایع زیرسطحی کشور. تعداد کثیری از این زیردریایی ها تحویل نیروهای مسلح ایران شده است.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: هتل بارج توریستی



شرکت سازنده: کشتی سازی خلیج فارس

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: یدک کش - ذوالجناح



شرکت سازنده: شرکت صدرا

طول: ۱۶/۲۵ متر

عرض: ۵/۱۸ متر

ارتفاع: ۳/۵ متر

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کشتی مسافربری - والفجر



شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

جابجایی: ۹/۵ تن

طول: ۱۲/۵ متر

عرض: ۳ متر

تعداد سرنشین: ۴۱ نفر

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کشتی آب نگار



شرکت سازنده: شرکت صدرا

تعداد خدمه: ۱۶ نفر

طول: ۳۴ متر

این کشتی برای اهداف آبنگاری و اقیانوس شناسی بکار می رود. امروزه اطلاعات درستی از مشخصات دریا‌های ایران وجود ندارد. این شناور به فعالیتهای تحقیقاتی در این زمینه کمک می کند. بدست آوردن این اطلاعات از اهمیت خاص تجاری و نظامی برخوردار است.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کاتاماران تندرو



شرکت سازنده: شرکت امواج براق

دارای سیستم رانش واترجت

طول: ۱۲/۳ متر

عرض: ۳/۸ متر

سرعت: ۱۸ گره

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: لندینگ کرافت



شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

جابجایی: ۱۳۰۰ تن

طول: ۶۰ متر

عرض: ۱۱ متر

ارتفاع: ۳/۴ متر

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: صیادی



شرکت سازنده: شرکت صدرا

طول: ۴۶ متر

عرض: ۱۰ متر

ارتفاع: ۵ متر

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: زیردریایی نظامی اژدرافکن - السابحات



ایران به پشتوانه دانشمندان و محققین خود، توانسته است به دانش طراحی و ساخت زیردریایی های پیشرفته نظامی دست یابد. این زیردریایی ها به گونه ای طراحی شده اند که دارای توانایی های خاصی برای عملیات در آب های کم عمق خلیج فارس هستند. این زیردریایی در سال ۸۵ توانست رتبه اول تحقیقات کاربردی جشنواره خوارزمی را کسب کند. بدین ترتیب ایران جزء معدود کشورهای سازنده زیردریایی در دنیا می باشد.

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: سکوی ثابت دریایی



شرکت سازنده: شرکت صدرا

شکل حاضر نشان دهنده یک سکوی ثابت دریایی است که بر روی بارج، بارگیری شده تا به محل نصب در دریا منتقل شود. امروزه شرکتهای بسیاری در ایران به فعالیتهای فراساحل اشتغال دارند از جمله: صدرا، خلیج فارس، تاسیسات دریایی، صف

و ...

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: سکوی خود بالابر^۱



شرکت سازنده: شرکت صدرا- نکاء

شکل حاضر نشان دهنده یک سکوی سه پایه دریایی می باشد که برای اولین بار در ایران ساخته شده است. این سکو در نقاط کم عمق دریای خزر بر روی سه پایه خود می ایستد و عملیات حفاری را انجام می دهد.

^۱ - jack up

ایران بزرگترین کشتی سازی غرب آسیا ...

نام شناور: کشتی کانتینربر اقیانوس پیما



شرکت سازنده: کشتی سازی خلیج فارس

تعداد کانتینر: ۲۵۰۰ کانتینر

طول: ۲۰۷/۴ متر

عرض: ۲۹/۸ متر

آبخور: ۱۱/۴ متر

این کشتی اولین کشتی کانتینربر اقیانوس پیمای ایران می باشد که در کشتی سازی خلیج -

فارس ساخته شده است. با ساخت این کشتی، ایران به فناوری ساخت کشتی های

اقیانوس پیما دست یافت.