

بررسی معادلات تعادل دینامیکی، بالانسینگ و سرعت معکوس زیردریایی‌های نظامی با لحاظ کردن ملاحظات کنترل زیردریایی

محمد مونسان^{۱*}، سجاد اردشیری^۲، احمد عسگری جزی^۳

۱ عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شاهرود، m.moonesun@gmail.com

۲ فارغ التحصیل دکترای دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع مکانیک sajjad_ardeshiri@yahoo.com

۳ احمد عسگری جزی، محقق سازمان صنایع دریایی

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

کلمات کلیدی:

زیردریایی

معادلات تعادل

مانور

بالانسینگ

سرعت معکوس

این مقاله، مروری بر معادلات دینامیکی زیردریایی‌های نظامی با لحاظ کردن همه پارامترهای موثر بر آن انجام داده و مجموعه کاملی از معادلات موجود را جمع‌بندی و بصورت خلاصه ارائه نموده است. معمولاً معادلات دینامیکی زیردریایی بدلیل تعدد پارامترهای موجود در آن، پیچیده و دشوار هستند بخصوص در زیردریایی‌های نظامی که هم دارای شرایط عادی و هم اضطراری مانند صعود اضطراری هستند. این پارامترها شامل موارد زیر می‌باشد که همگی در این مقاله بصورت فشرده بررسی شده‌اند: توزیع وزن و بویانسی، تغییرات بار و تغییرات آب داخل مخازن تریم و متغیر، ارتفاع متاسنتری، مقدار تراست و فاصله عمودی بین راستای نیروی تراست و مرکز ثقل، موقعیت بالک سینه و پاشنه و ممان‌های حاصل از بالکها، مرکز فشار و اثرات سرعت بر تغییرات رفتار دینامیکی زیردریایی. همچنین، سرعتی در مانور زیردریایی تعریف می‌شود که کنترل زیردریایی در این سرعت و سرعتهای کمتر از آن، با استفاده از بالک‌های پاشنه امکان پذیر نیست و به آن سرعت معکوس می‌گویند. به دلیل اهمیت این پدیده، سرعت معکوس و روابط آن نیز در این مقاله ارائه شده‌اند.

Investigation of naval submarine dynamic equilibrium, balancing and reverse speed considering control considerations

Mohammad Moonesun¹, Sajjad Ardeshiri^{2*}, Ahmad Asgari Jazi³

¹ Faculty of Civil Engineering of Shahrood University of Technology; m.moonesun@gmail.com

² Doctorate graduate of Malek Ashtar University of Technology; sajjad_ardeshiri@yahoo.com

³ Researcher of Marine Industries Organization

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 17 May 2023

Accepted: 03 Sep 2023

Keywords:

Naval Submarine

Equilibrium equations

Maneuver

Balancing

Reverse speed

ABSTRACT

This article has reviewed the dynamic equations of naval submarines by considering all parameters affecting them and summarized a complete set of existing equations. Usually, submarine dynamic equations are complicated and difficult due to the multitude of parameters in them, especially in military submarines that have both normal and emergency conditions such as emergency ascent. These parameters include the following, all of which have been compactly reviewed in this article: Weight and buoyancy distribution, load changes and water changes inside the trim and compensation tanks, metacentric height, amount of thrust force and vertical distance between the thrust direction and the center of gravity, the position of the hydroplanes and their moments, the center of pressure and the effects of speed on Submarine dynamic behavior. Also, a speed is defined in the submarine maneuver that the control of the submarine by after hydroplanes is not possible. Due to the importance of this phenomenon, the reverse speed and its formulation are also presented in this article.

۱ - مقدمه

در مقام مقایسه با کشتی‌ها که بر روی سطح آب حرکت می‌نمایند، زیردریایی‌ها امکان انجام مانورهای فضایی را دارا می‌باشند. در این-گونه مانورها به صورت همزمان، عمق غوطه‌وری و مسیر، تغییر می-یابند. هریک از مانورهای فضایی را می‌توان به دو مانور صفحه‌ای تقسیم نمود:

۱- مانور در صفحه عمودی

۲- مانور در صفحه افقی

صفحات مانوری دارای گروه بزرگی از ویژگی‌های مختص به خود هستند. قابل ذکر است که هرگونه مانوری با تامین قابلیت کنترل مربوطه صورت می‌پذیرد. سازماندهی انجام یک مانور مشخص با بهره‌گیری از سیستم نیروها و ممان‌های موثر بر روی زیردریایی با استفاده از تجهیزات تامین قابلیت کنترل صورت می‌پذیرد. در این میان می‌توان به مکانیزم تولید نیروی حرکتی در حال کار، بارهای زیردریایی و بالکهای کنترلی اشاره نمود. نقش مکانیزم تولید نیروی حرکت در تامین قابلیت کنترل بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نکته یاد شده را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که:

نیروی جلوبرنده تولید شده توسط آن تعیین‌کننده سرعت حرکت بوده و در نتیجه مشخص کننده نیروی هیدرودینامیکی به وجود آمده خواهد بود. در این ارتباط، تغییرات وضعیت کاری مکانیزم تولید نیروی حرکتی، تاثیرات بسیار شدیدی بر روی بردار اصلی نیرو و ممان خواهد داشت. تعداد زیادی از مانورها بدون تغییر در تعداد دور گردش پروانه صورت می‌پذیرد. این امر بخصوص در ارتباط با این نکته می‌باشد که تغییر وضعیت کاری تاسیسات و مکانیزم‌های تولید انرژی و نیروی حرکتی، افزایش و گسترش امواج آکوستیک را در پی دارند. در چنین شرایطی بهره‌گیری از پروانه‌ها بعنوان عنصری فعال در تجهیزات تامین قابلیت کنترل امکان‌پذیر نخواهد بود. دلایلی که باعث می‌شود از بار زیردریایی بعنوان یکی از مولفه‌های تامین قابلیت کنترل نام برده شود به ترتیب زیر هستند:

نیروی وزنی و شناوری، دارای تاثیر بر روی صفحه عمودی ممان بازگرداننده می‌باشند. این ممان به نوبه خود یکی از عناصر تشکیل-دهنده ممان اصلی می‌باشد. علاوه براین، تریم استاتیکی پدید آمده که به صورتی آنی ایجاد می‌گردد را می‌توان برای دستیابی و انجام یک مانور مشخص، به شکل تغییر در جهت تاثیرات بردار اصلی نیروها و ممان‌های موثر بر روی زیردریایی مورد استفاده قرار داد. سه نوع سیستم مختصاتی به ترتیب زیر در این مطالعه استفاده شده است (شکل ۱):

۱- سیستم مختصاتی غیر متحرک متناسب با زمین (اینرسیال) OXYZ: در این سیستم، محور Y در جهت عمودی به طرف بالا و مبدا مختصات O ، بر روی سطح دریا قرار دارند.

۲- سیستم مختصاتی متصل به زیردریایی $Gx_1y_1z_1$: در این حالت: نقطه G مرکز ثقل زیردریایی می‌باشد. محور x_1 بر روی صفحه دیامتریال موازی با صفحه اصلی نقشه تئوریک، در جهت سینه می‌باشد.

محور عمودی y_1 نیز بر روی صفحه دیامتریال، ولی عمود بر صفحه اصلی و در جهت عرشه می‌باشد. محور Z_1 (محور عرضی) در جهت پهلو راست زیردریایی است.

۳- سیستم نیمه متصل $Gx_*y_*z_*$ دارای مواضع مشترک با سیستم مختصات متصل بوده، ولی محورهای آن در تمامی اوقات، موازی با محورهای سیستم مختصاتی ثابت OXYZ می‌باشند. سیستم‌های ارائه شده دارای مشخصه راستگرد هستند.

۴- معادله‌های غوطه‌وری پایدار و یا حالت صعود به سطح در زیردریایی (معادله تعادل دینامیکی)

بررسی مانورهای صفحه‌ای را از آنالیز حرکت پایدار زیردریایی در صفحه عمودی آغاز می‌نماییم. در این حالت فرض می‌کنیم صفحه دیامتریال، در تمامی اوقات، در وضعیت عمودی قرار دارد. چنین مانورهایی اغلب اوقات بنام «مانورهای بر روی صفحه طولی» خوانده می‌شوند. در شرایط مورد بررسی، جهت‌گیری محورهای سیستم-های مختصاتی غیر مرتبط و ثابت را می‌توان برگزید که محورهای Z_* و Z_1 با یکدیگر منطبق گردند.

۲- پارامترهای حرکت پایدار زیردریایی در صفحه عمودی

مانور زیردریایی در صفحه عمودی به صورت حرکت در صفحات موازی جسم صلب می‌باشد. به همین علت برای آنکه بتوانیم به صورت کامل این مانور را تفسیر نماییم کافی است، از سه تابع زمانی، دو نقطه مختصاتی G بر روی صفحه Oxy و همچنین زاویه گردش زیردریایی متناسب با محور Z_1 را داشته باشیم. اما در عمل در هنگام بهره‌برداری از زیردریایی و ویژگی‌های چنین مانورهایی، لزوم استفاده از حوزه وسیع‌تری از مقادیر یاد شده را اجتناب ناپذیر می-نماید. اغلب اوقات، مانورهای غوطه‌وری پایدار و صعود به سطح توسط پارامترهای زیر توصیف می‌گردند (شکل ۲):

۱- سرعت حرکت v (قدرمطلق بردار سرعت مرکز ثقل G)

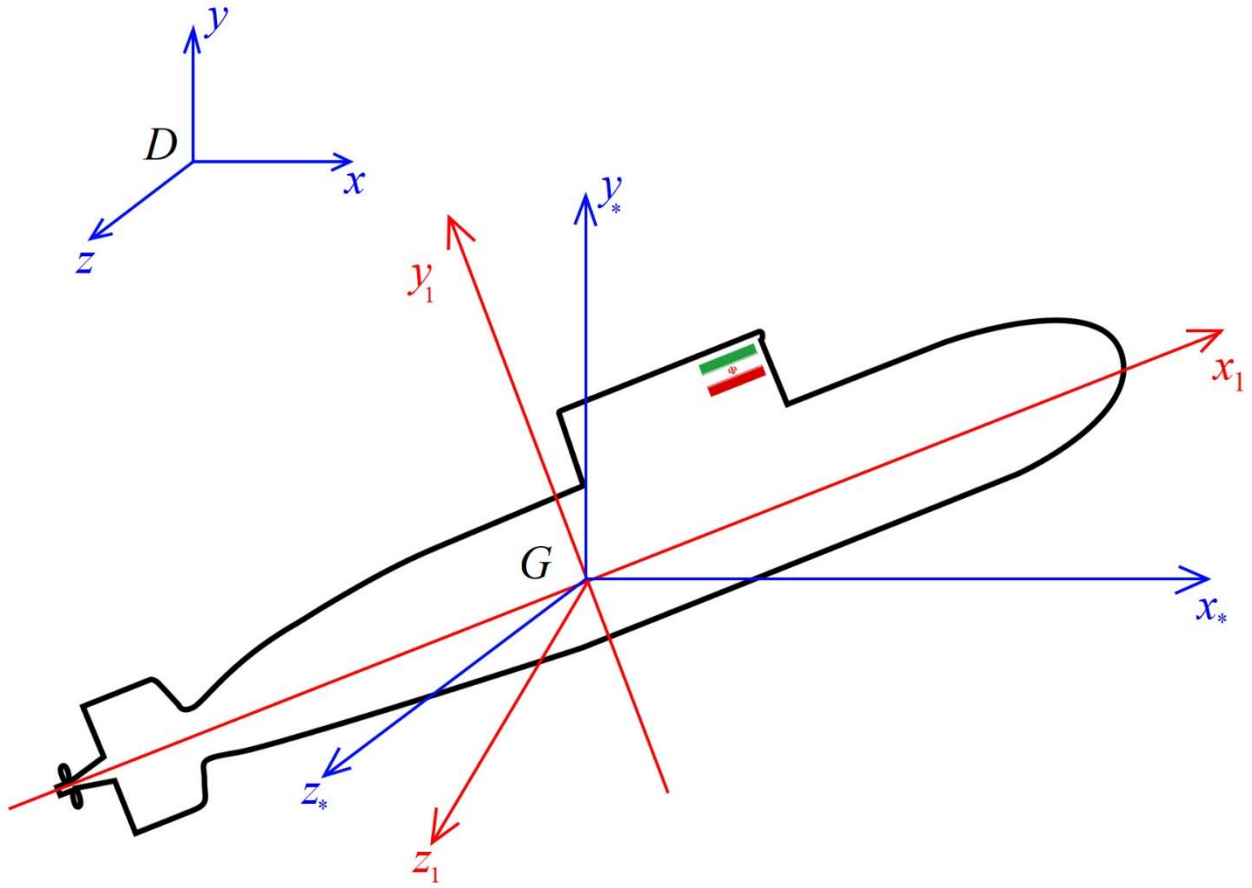
۲- زاویه تریم ψ زاویه بین محورهای x_* و x_1

۳- زاویه حمله α زاویه بین جهت سرعت و محور x_1

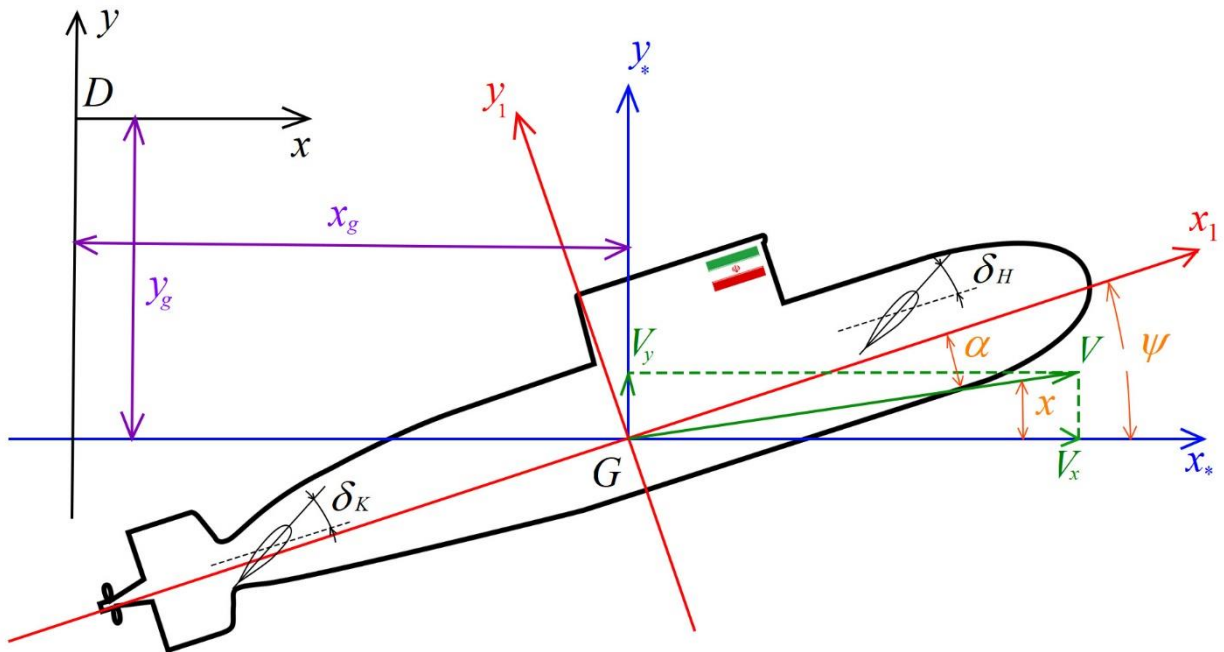
۴- زاویه مسیر χ زاویه بین محور افقی x_* و جهت سرعت

۵- زوایای انحراف بالک پاشنه δ_k (KTP) و بالک سینه δ_H (HTP)

۶- مختصات مرکز ثقل x_g و y_g



شکل ۱- تعریف سه دستگاه مختصات در کنترل زیردریایی



شکل ۲- پارامترهای دینامیکی در صفحه عمودی

صفحه دیامتریال بدست می‌آیند. به همین دلیل معادله مانور پایدار را بنام «معادلات تعادل دینامیکی» نیز می‌نامند. بر روی زیردریایی سه گروه از ممان‌ها و نیروها تاثیر می‌نمایند که عبارتند از:

۱- نیروها و ممان‌های ناشی از شناوری و وزن زیردریایی
۲- نیروها و ممان‌های پدید آمده به دلیل کار مکانیزم تولید نیروی حرکتی

۳- نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی
در هنگام بررسی این نیروها و ممان‌ها محور عرضی Z_1 بعنوان محوری که این نیروها و ممان‌ها برحسب آن تعیین گردیده برگزیده شده است.

۳-۱- نیروی شناوری و بار زیردریایی

نیروی شناوری در زیردریایی مقدار ثابتی را تشکیل داده و برابر است با حاصلضرب چگالی آب (ρ) در شتاب جاذبه زمین (g) و در میزان حجم جابجایی آب.

P نیروی ثقل در زیردریایی و وزن آب جابجاشده توسط بدنه باید با هم در تعادل باشند یعنی:

$$\rho g V_{\pi} - P = 0 \quad (5)$$

V_{π} میزان کل جابجایی آب در عمق است. نیروی $\rho g V_{\pi}$ بر روی مرکز بویانسی C_{π} مربوط به حجم V_{π} وارد می‌شود. بدین ترتیب نقطه C_{π} بر روی محور y_1 (محور عمودی) و در فاصله h_{π} از مبدا مختصات G قرار دارد (شکل ۳). h_{π} : ارتفاع متاسنتریک متعلق به جابجایی کل در عمق V_{π} (جابجایی زیرسطحی) می‌باشد. چنانچه ارتفاع متاسنتریک مربوط به حجم آب در بخش‌های غیر نفوذپذیر بدنه باشد، براحتی می‌توان پارامتر h_{π} را محاسبه نمود. با تکیه بر این نکته که ضریب پایداری در ارتباط با روش تعیین جابجایی نمی‌باشد، می‌توان گفت که:

$$\rho g V_{\pi} h_{\pi} = \rho g V_m h_m \quad (6)$$

به همین دلیل نیز داریم:

$$h_{\pi} = \frac{V_m}{V_{\pi}} h_m \quad (7)$$

بار زیردریایی در تمامی وضعیت‌های عملی بهره برداری به صورت زیر تعیین می‌گردد:

a- وزن P در زیردریایی در حین تریم استاتیکی که بر روی نقطه G تاثیر می‌نماید.

b- ممان تریم M_p موثر بر روی صفحه دیامتریال و ناشی از جابجایی بار در داخل زیردریایی دارای تریم استاتیک (بعنوان مثال به دلیل جابجایی آب بین مخازن تریم)

c- باقیمانده شناوری Q

d- ممان ناشی از باقیمانده شناوری M_q

یادآوری می‌کنیم که قوانین محاسباتی برای تمامی پارامترها با توجه به راستگرد بودن سیستم‌های مختصاتی برگزیده می‌شوند. اغلب اوقات برای مشاهده‌کننده‌ای که در جهت مثبت محور Z_1 نگاه می‌کند، مقدار $\psi > 0$ بوده و زیردریایی در جهت حرکت عقربه‌های ساعت گردش می‌نماید.

به همین ترتیب زاویه حمله نیز با توجه به جهت سرعت به صورت مثبت بوده، زاویه مسیر مثبت با توجه به محور افقی X_* و همچنین زاویه‌های بالک‌های بخش پاشنه و سینه با توجه به وضعیت خنثای آنها مثبت هستند. لازم به ذکر است که در اصطلاحات دریایی چنانچه $\delta_H > 0$ باشد بالک‌های سینه در جهت صعود به سطح زیردریایی عمل کرده و اگر $\delta_H < 0$ باشد، بالک‌های پاشنه در جهت غوص زیردریایی عمل می‌نمایند. با توجه به شکل ۲ که در آن تمامی پارامترهای زاویه‌ای مثبت در نظر گرفته شده‌اند داریم:

$$\chi = \psi - \alpha \quad (1)$$

بدین ترتیب زاویه مسیر به صورت مستقل نخواهد بود، اما این امر در ادامه کار با توجه به نقطه نظرات زیر راحت‌تر درک می‌شود:

- چنانچه $\chi > 0$ باشد زیردریایی از آب بیرون می‌آید (صعود می‌کند).
- اگر $\chi < 0$ باشد زیردریایی به عمق می‌رود (غوص می‌کند).
- به ازای $\chi = 0$ زیردریایی با عمق ثابت به حرکت اولیه ادامه می‌دهد (حرکت در رژیم اصلی).

در هنگام غوطه‌وری ثابت و یا صعود به سطح، پارامترهای یادشده، ثابت می‌باشند. در اینجا تنها پارامترهای مختصات مرکز ثقل x_g و y_g در ارتباط با زمان هستند. عملاً اگر v_x و v_y مولفه‌های بردار سرعت بر روی محورهای افقی و عمودی باشند، خواهیم داشت:

$$v_x = \frac{dx_g}{dt} = v \cos \chi \quad (1)$$

$$v_y = \frac{dy_g}{dt} = v \sin \chi \quad (2)$$

با انتگرال‌گیری از معادلات بالا داریم:

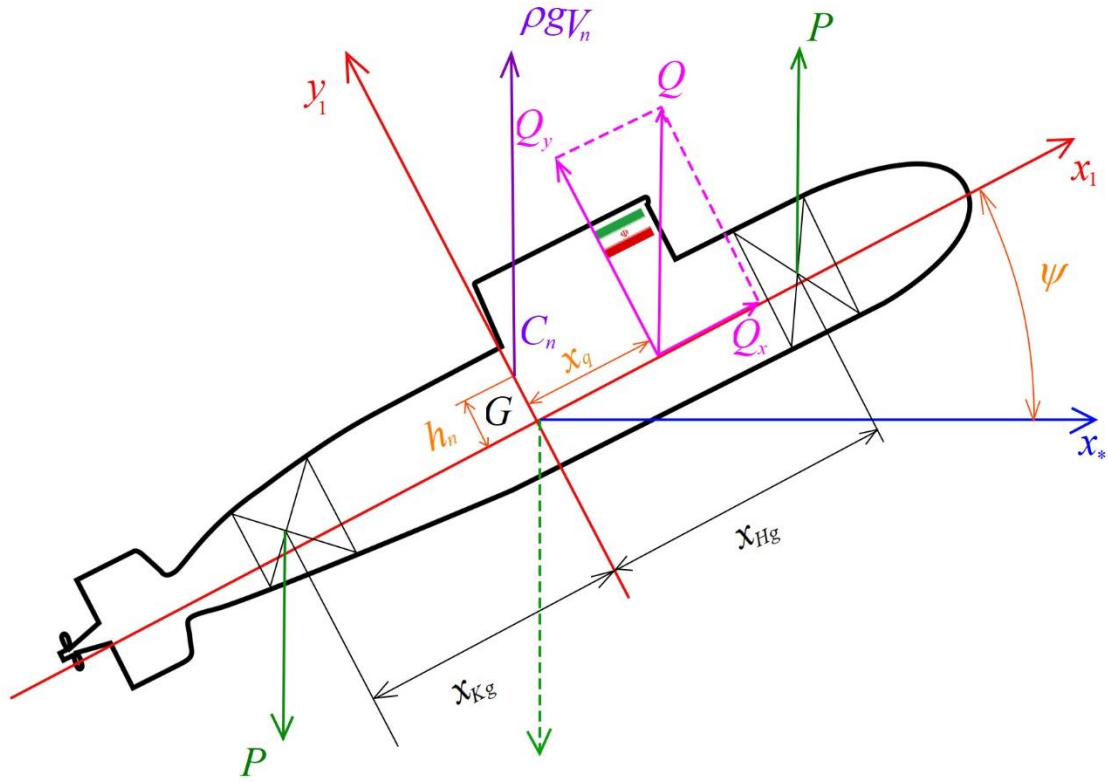
$$x_g = x_{g0} + vt \cos \chi \quad (3)$$

$$y_g = y_{g0} + vt \sin \chi \quad (4)$$

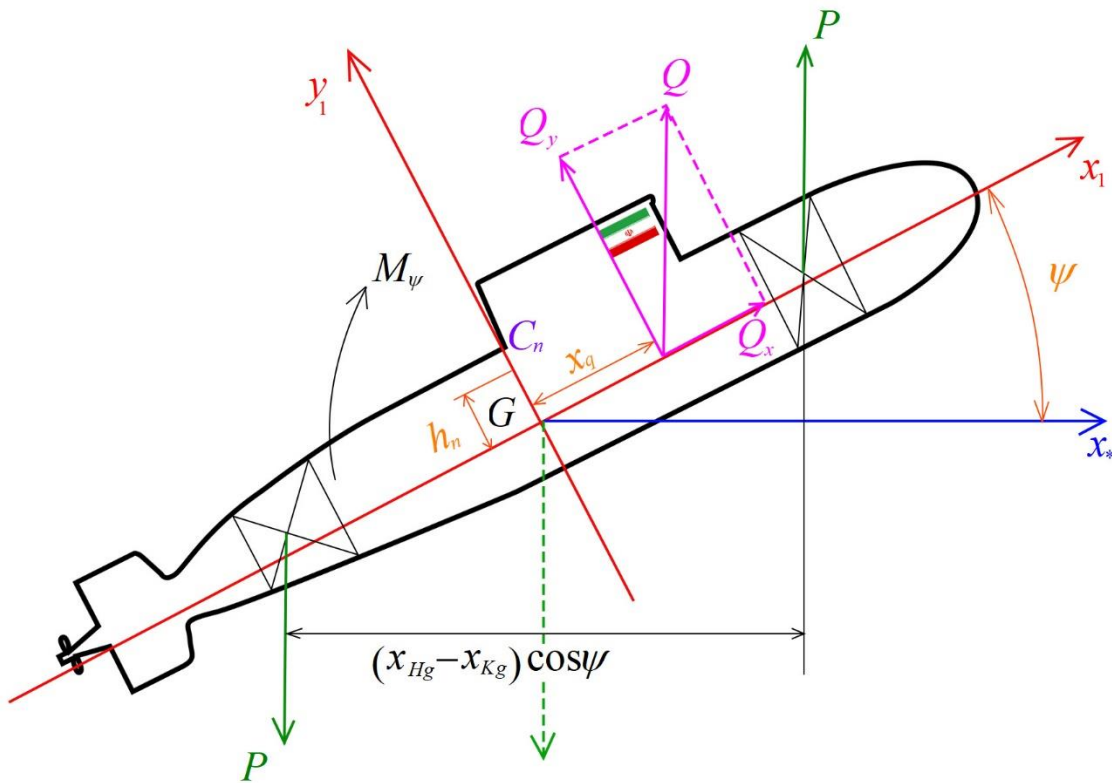
در اینجا: x_{g0} و y_{g0} مختصات مرکز ثقل زیردریایی در لحظه زمان اولیه می‌باشند.

۳- نیروها و ممان‌های موثر بر روی زیردریایی

تمامی پارامترهای زیردریایی با بهره‌گیری از معادله حرکت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مانورهای پایدار در صفحه عمودی این معادلات با برابر صفر قراردادن مجموع مولفه‌های نیروهای موثر بر روی محورهای سیستم مختصاتی و مجموع ممان‌های موثر بر روی



شکل ۳- نیروهای اصلی وارد بر یک زیردریایی دارای تریم استاتیکی



شکل ۴- نیروها و ممان های تریم دهنده

در انتها اضافه می‌نماییم، در هنگام محاسبه ممان M_q (باقیمانده شناوری) برای سادگی بیشتر و بدون ایجاد تغییر در ماهیت قضیه، محل نیروی Q را بر روی محور طولی در نظر می‌گیریم. در این حالت چنانچه x_q بیانگر مؤلفه X باقیمانده شناوری باشد، خواهیم داشت:

$$M_q = Qx_q \cos \psi \quad (12)$$

بدین ترتیب گروه اول نیروها و ممان‌ها، منجر به پیدایش ممان بازگرداننده طولی M_{ψ} ، ممان M_p (ممان تریم‌دهنده)، باقیمانده نیروی شناوری با مولفه‌های Q_x و Q_y و ممان ناشی از باقیمانده نیروی شناوری M_q می‌گردند. عملکرد این نیروها و ممان همانطوریکه می‌دانیم بستگی به سرعت حرکت زیردریایی نداشته و این امر یکی از ویژگی‌های مهم و قابل تمایز در کنترل زیردریایی در هنگام حرکت در صفحه عمودی می‌باشد.

در صورت مانوردهی زیردریایی در صفحه افقی، این نیروها و ممان -ها در کنترل حرکت دخالتی نخواهند داشت. تمامی نیروها و ممان -هایی که به دلیل شناوری و بار پدید می‌آیند مجدداً در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. تنها وجه تمایز بین این تصویر و تصویر شکل ۳ نمایش ممان M_{ψ} توسط خط فلش‌دار منحنی و عدم نمایش نیروهای $\rho g V_{\pi}$ و P در آن می‌باشد. همچنین ممان M_{ψ} در شکل ۴ دو مرتبه نشان داده شده است. این قوانین را باید در تمامی تصاویری که نقش مهمی در نمایش چگونگی و آنالیز انجام مانورها در زیردریایی ایفا می‌نمایند، رعایت نمود.

۳-۲- تراسه حاصله از عملکرد پروانه و ممان ناشی از آن
در ابتدا این نکته را در نظر می‌گیریم که خطوط شفت‌های پروانه‌ها با صفحه اصلی نقشه تئوریک موازی هستند. در این حالت مجموعه نیروی تراسه تولیدی P_e کاملاً بر روی محور X_1 استقرار می‌یابد (شکل ۵).

می‌بایست به این نکته توجه کرد که، ممکن است خطوط شفت‌ها از مرکز ثقل G عبور نکند. در این حالت بر روی صفحه دیامتریال، ممان ناشی از نیروی تراسه تاثیر خواهد نمود:

$$M_p = -Pe y_p \quad (12)$$

در اینجا: y_p بازوی نیروی تراسه می‌باشد.

حال به بررسی تاثیرات مشترک نیروی P و نیروی شناوری $\rho g V_{\pi}$ می‌پردازیم. از آنجاییکه این نیروها با یکدیگر برابر بوده و در جهت عمود و متقابل بر یکدیگر تاثیر می‌نمایند، بنابراین مولفه‌های آنها بر روی هر مورد دلخواه با یکدیگر برابر خواهد بود. عملکرد و تاثیر این نیروها منجر به پیدایش ممان بازگرداننده طولی M_{ψ} می‌گردد:

$$M_{\psi} = -\rho g V_{\pi} h_{\pi} \sin \psi \quad (8)$$

یادآوری می‌نماییم که علامت منفی در سمت راست مبین قوانین علامات در سیستم‌های مختصاتی راستگرد می‌باشد. حال ممان تریم‌دهنده M_p را تعیین می‌نماییم. این ممان به دلیل جابجایی بار در داخل زیردریایی پدید می‌آید. در هنگام انجام چنین جابجایی‌هایی مختصات عرضی بارها نمی‌بایست، تغییر نماید. در غیر اینصورت، زیردریایی دارای زاویه هیل (حول محور طولی) خواهد گردید. به این ترتیب در هنگام حرکت در صفحه عمودی، این زاویه رول وجود نخواهد داشت.

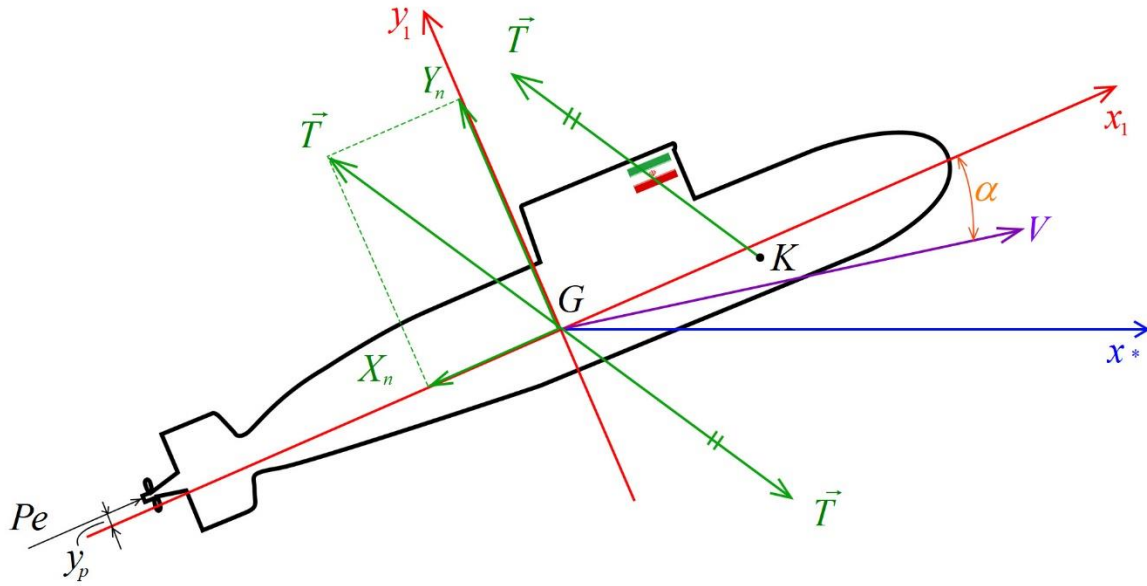
همچنین یادآوری می‌نماییم که جابجایی بار در امتداد محور عمودی باعث تغییرات چندانی در میزان ممان M_p نمی‌گردد. این امر به دلیل اندازه‌های ابعادی نسبتاً کوچک بدنه فشار از نظر ارتفاع می‌باشد. به همین علت نیز در ادامه، تنها تغییرات مختصات طولی در هنگام جابجایی بارها را در نظر می‌گیریم. عملاً ممان تریم‌دهنده به هنگام جابجایی آب بین مخازن مختلف به وجود می‌آید. فرض کنیم که p ، نیروی ثقل مقدار آب جابجاشده بین مخازن باشد. در این حالت خواهیم داشت (شکل ۴):

$$M = p(x_{\pi g} - x_{kg}) \cos \psi \quad (9)$$

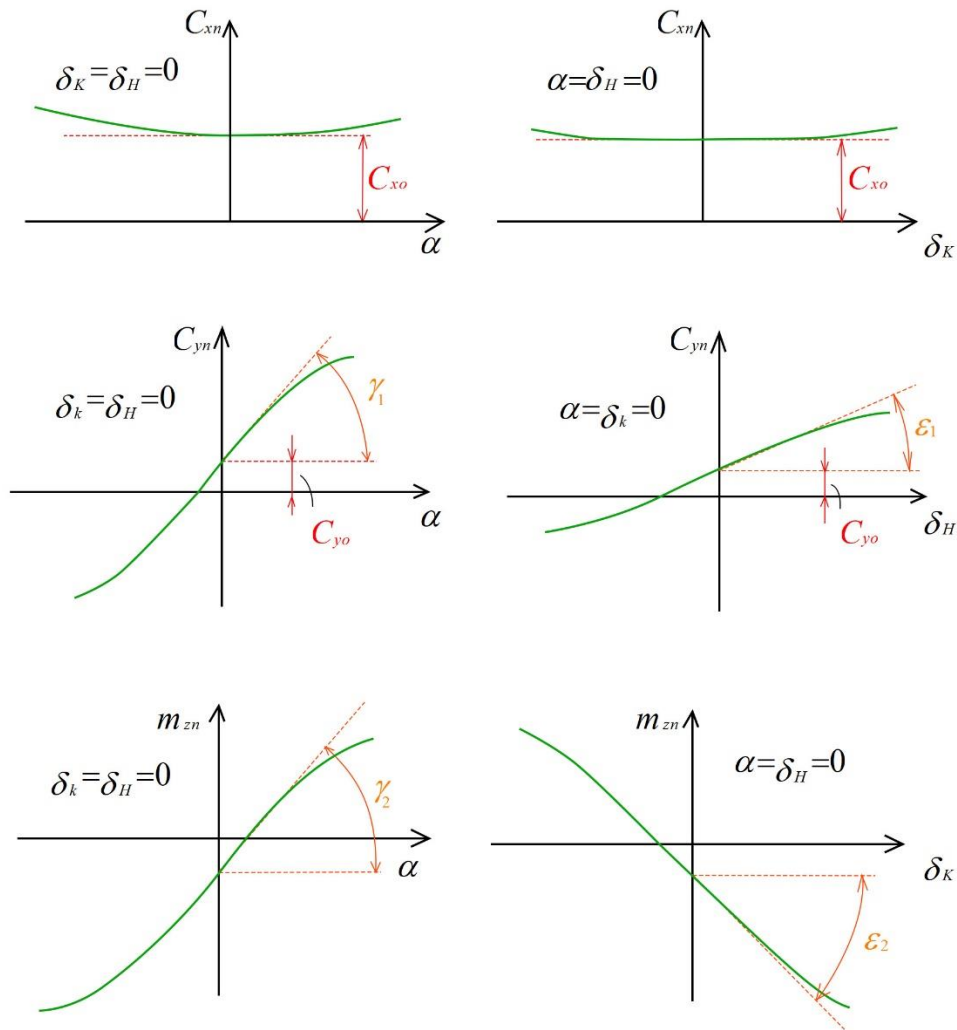
در اینجا: x_{kg} و x_{Hg} به ترتیب مختصات مخازن تریم مستقر در سینه و پاشنه زیردریایی می‌باشند. با توجه به رابطه (۳) نتیجه می‌گیریم که در سیستم مختصاتی مورد استفاده، مقدار p به هنگام جابجایی از سینه به طرف پاشنه به صورت $p > 0$ خواهد بود. پارامتر باقیمانده شناوری Q عبارت است از: اختلاف بین نیروی شناوری و مقدار عملی نیروی ثقل زیردریایی. چنانچه Q_x و Q_y به ترتیب مولفه‌های پارامتر باقیمانده شناوری (Q) بر روی محورهای طولی و عمودی باشند، خواهیم داشت (شکل ۴):

$$Q_x = Q \sin \psi \quad (10)$$

$$Q_y = Q \cos \psi \quad (11)$$



شکل ۵- نمایش راستای نیروی تراست و ممان حاصل از آن



شکل ۶- نمایش تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی بر حسب زاویه حمله و زوایای بالکها

۳- نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی

$$M_{z\pi} = m_{z\pi}(\alpha, \delta_k, \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_\pi \quad (20)$$

ضرایب بدون بعد $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ بنام ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی طولی موضعی، نیروی عمودی هیدرودینامیکی موضعی و در نهایت ممان هیدرودینامیکی موضعی خوانده می‌شوند. برای هر زیردریایی این ضرایب به صورت‌های تجربی و در حوضچه-های کشش یا در تونل‌های باد به ازای زوایای مختلف حمله و وضعیت‌های زاویه بالکها مشخص می‌گردند. برخی از مقادیر ضرایب $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

در بخش قبل بدون هیچگونه فرضیه‌ای، تمامی نیروها و ممان‌های موثر بر روی زیردریایی در هنگام غوطه‌وری پایدار یا هنگام صعود به سطح ارائه گردیدند. تمامی آنها (با توجه به ترسیم قوانین مربوط به بهره‌گیری از فلش‌های منحنی شکل) در شکل ۷ آورده شده‌اند. حال می‌توان معادله حرکت را با برابر صفر قراردادن مجموع مولفه-های نیرو بر روی محورهای X_1 و Y_1 و همچنین ممان‌های موثر بر روی صفحه دیامتریال نوشت.

در این هنگام نیروی X_π را مثبت در نظر گرفته و آن را با علامت منفی در معادله می‌نویسیم، خواهیم داشت:

$$Pe - X_\pi + Q_x = 0 \quad (20)$$

$$Y_\pi + Q_y = 0 \quad (21)$$

$$M_\psi + M_g + M_q + M_p + M_{z\pi} = 0 \quad (22)$$

و یا با بهره‌گیری از آنچه که در خصوص مقادیر نیروها و ممان‌ها گفته شد، می‌توان نوشت:

$$Pe - C_{x\pi} \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} + Q \sin \psi = 0 \quad (23)$$

$$C_{y\pi} \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} + Q \cos \psi = 0$$

$$-\rho g h_\pi V_\pi \sin \psi + p(x_{Hg} - x_{kg}) \cos \psi + Q x_q \cos \psi - P e y_p$$

$$+ m_{z\pi} \frac{\rho v^2}{2} V_\pi = 0$$

سیستم معادلاتی بدست آمده در این حالت برای هرگونه مانور پایدار در صفحه عمودی قابل استفاده می‌باشد. به همین علت نیز نام آن را «سیستم معادلاتی تعادل دینامیکی برای مانورهای شدید» نام-گذاری کرده‌اند. در دیدگاه اول، سیستم معادلاتی (۲۳) بسیار ساده به نظر می‌رسد. اما همین سادگی نیز گول زنده می‌باشد. عدم خطی بودن ضرایب هیدرودینامیکی موضعی که بستگی به چگونگی تعیین پارامترهای حرکتی زیردریایی دارند، این سیستم را به شدت غیر خطی کرده و حل کردن آن (بعنوان مثال برحسب ψ یا v) تنها با کمک کامپیوتر و حل عددی در ارتباط با توابع $m_{z\pi}(\alpha, \delta_k, \delta_H)$ و $C_{y\pi}(\alpha, \delta_k, \delta_H)$ و $C_{x\pi}(\alpha, \delta_k, \delta_H)$ امکان‌پذیر می‌باشد.

در هنگام حرکت زیردریایی، فشارها و تنش‌های مماسی هیدرودینامیکی بر روی سطح خیس آن تاثیر می‌گذارند. انتگرال-گیری از این نیروها برحسب تمامی سطح خیس زیردریایی منجر به پیدایش بردار اصلی \vec{T} نیروهای هیدرودینامیکی می‌گردد که به دلیل تقارن جریانها بر روی بدنه بر روی صفحه دیامتریال استقرار می‌یابد. نقطه استقرار K و قدر مطلق این بردار، بستگی به پارامترهای حرکتی دارد. با ادامه ترسیم بردار \vec{T} به مرکز ثقل G ، دو بردار مشابه بدست می‌آوریم که در جهت مخالف یکدیگر می‌باشند (شکل ۵). بدین ترتیب تاثیر بردار \vec{T} بر روی زیردریایی معادل تاثیرات نیروهای X_π و Y_π و همچنین ممان ناشی از نیروهای دوگانه با ترسیم تکراری در شکل ۵ خواهد بود. نیروهای X_π و Y_π بنام نیروهای هیدرودینامیکی طولی و عمودی خوانده شده و ممان $M_{z\pi}$ بنام ممان هیدرودینامیکی موضعی خوانده می‌شود. برای یک زیردریایی مشخص، این نیروها و ممان‌ها بستگی به چگالی آب ρ ، سرعت حرکت v ، زاویه حمله α و وضعیت زاویه بالک‌های (پاشنه و سینه) δ_H و δ_K دارند:

$$X_\pi = X_\pi(\rho, v, \alpha, \delta_k, \delta_H) \quad (12)$$

$$Y_\pi = Y_\pi(\rho, v, \alpha, \delta_k, \delta_H) \quad (13)$$

$$M_{z\pi} = M_{z\pi}(\rho, v, \alpha, \delta_k, \delta_H) \quad (14)$$

نتیجه می‌گیریم که تنش‌های هیدرودینامیکی با چگالی مایع نسبت مستقیم دارند. به ازای حرکت با سرعت ثابت، فشار هیدرودینامیکی دارای نسبت مستقیم با v^2 ، تنش‌های توربولنتی، نسبت مستقیم با سرعت با توان $1/9$ خواهند داشت. سپس می‌توان گفت که X_π و Y_π و $M_{z\pi}$ دارای نسبت مستقیم با هد سرعت $\rho v^2/2$ بوده که به نوبه خود اندازه آن با اندازه فشار تطابق دارد. با ضرب هد سرعت در مشخصه سطحی $V_\pi^{2/3}$ مقداری را بدست می‌آوریم که بیانگر اندازه نیرو خواهد بود. با ضرب هد سرعت در مشخصه حجمی V_π ، مقدار بدست‌آمده نشان‌دهنده اندازه ممان می‌باشد. بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$X_\pi \sim \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (15)$$

$$Y_\pi \sim \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (16)$$

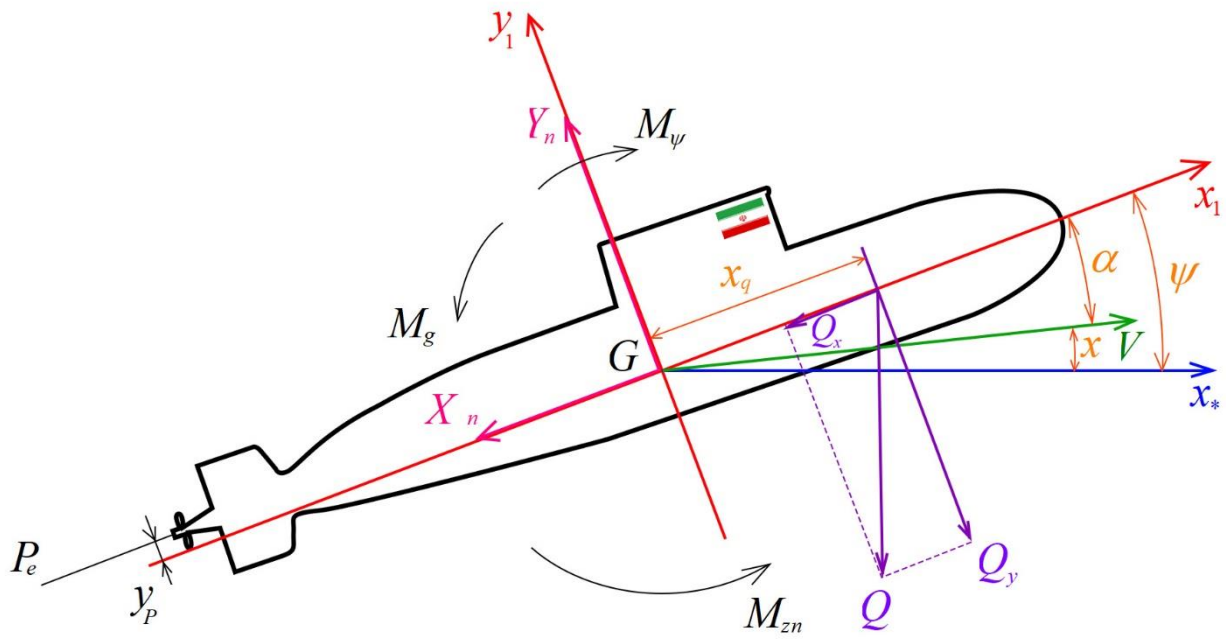
$$M_{z\pi} \sim \frac{\rho v^2}{2} V_\pi \quad (17)$$

(علامت \sim بیانگر متناسب بودن می‌باشد).

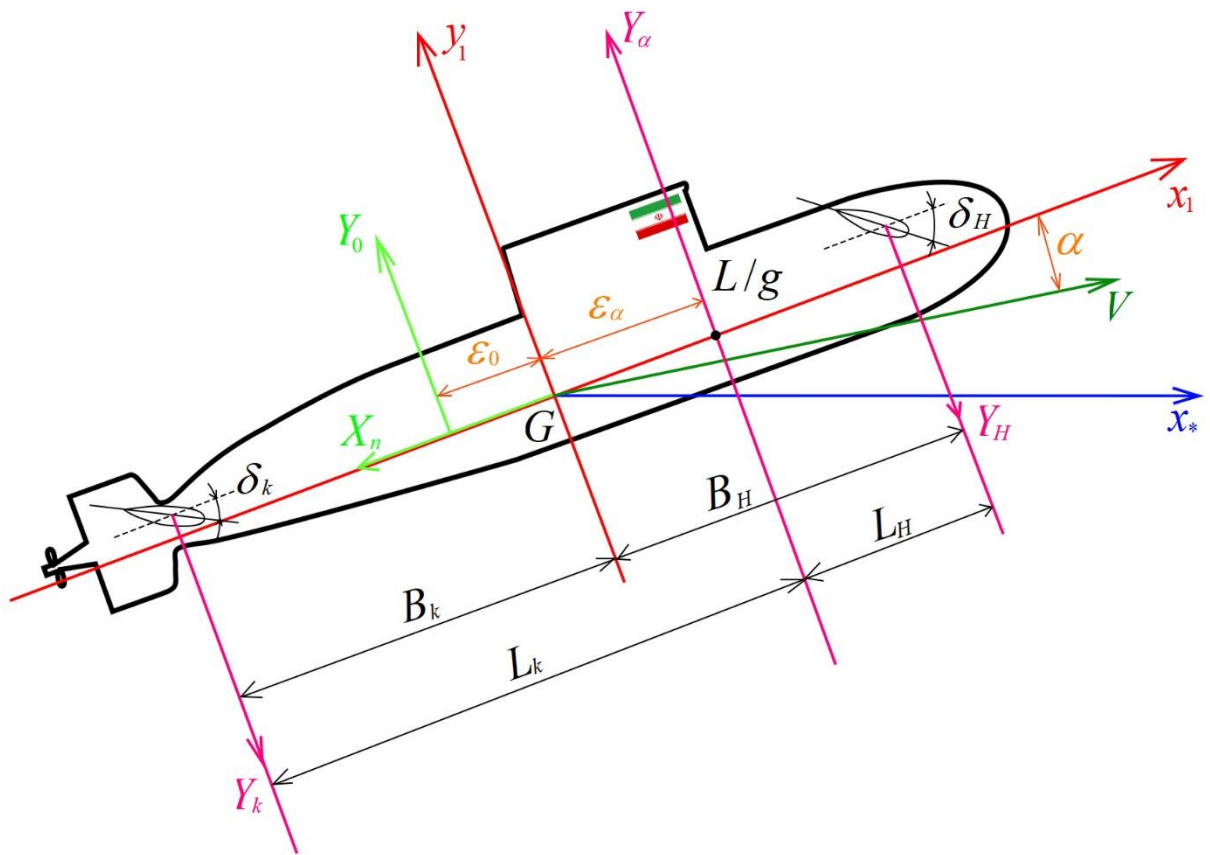
با توجه به آنچه که گفته شد، ضرایب نسبت مستقیم در فرمول‌های قبل تنها بستگی به α و δ_K و δ_H دارند. در نتیجه خواهیم داشت:

$$X_\pi = C_{x\pi}(\alpha, \delta_k, \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (18)$$

$$Y_\pi = C_{y\pi}(\alpha, \delta_k, \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (19)$$



شکل ۷- نمایش مجموع نیروها و ممان‌ها بر روی زیردریایی در حالت تریم



شکل ۸- نیروها و ممان‌های وارد شده به هنگام مانورهای ثابت سبک در صفحه عمودی

۴- نیروها و ممان‌های موثر بر روی زیردریایی در هنگام مانور های پایدار سبک

حل عددی سیستم معادلاتی (۲۳) پاسخ های مهمی را ارائه می نماید. اما همین پاسخ های عددی نیز محدودیت هایی را در پی دارند. بدین معنا که آنها نمی توانند قوانین کیفی قابلیت کنترل در صفحه عمودی را ارائه دهند. در همین ارتباط بهتر است امکان تفسیر مانورهای پایدار در صفحه عمودی با کمک معادلات خطی که برخی محدودیت های غیر خطی را همراه ندارند، صورت پذیرد. طبیعتاً چنین ساده سازی هایی (خطی کردن معادلات) تنها هنگامی مفهوم خود را باز می یابند که انجام آنها شرایط فیزیکی اعمال شده را پاسخگو باشند.

غیرخطی بودن سیستم معادلاتی (۲۳)، به دلیل خطی نبودن ضرایب هیدرودینامیکی موضعی و همچنین مثلثاتی بودن زوایای تریم می باشد. خطی کردن معادلات (۲۳) برحسب زاویه ψ تنها تا زمانی امکان پذیر است که از نقطه نظر عملی تقریبی $\cos\psi = \psi$ و $\sin\psi = 1$ قابل دستیابی باشند. در اینجا لازم به ذکر است که این شرایط، اساسی و بدون تغییر نبوده و حتی به ازای $\psi = 15^\circ$ میزان خطای پدید آمده در مقادیر تقریبی عبارات ذکر شده از ۳ درصد بیشتر نخواهد بود. بنابراین مسئله مهم تنها در ارتباط با خطی کردن ضرایب $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ خواهد بود.

باتوجه به گرافیک های ارائه شده که مشابه آن را در شکل ۶ می بینید، می توان به این نتیجه رسید که در تمامی موارد، برخی محدوده های تغییراتی زوایای حمله و وضعیت زاویه بالکها وجود دارند که در آنها می توان گرافیک هایی با دقت کافی را با بخش هایی از خط های منقطع تفکیک نمود. در نتیجه در این بخش های تفکیک شده می توان اقدام به خطی کردن ضرایب یاد شده نمود. البته متذکر می گردیم که تطابق مستقیم این گرافیکها با گرافیک های جایگزین از خط های منقطع، امکان برقراری محدوده ای که در آن می توان سیستم را خطی کرد را امکان پذیر می نماید.

بدین ترتیب در این مسئله هیچ نقطه نامعلومی وجود ندارد. تنها محدودیت غیر قابل تغییر در اینجا مربوط به زاویه حمله می باشد. این موضوع در مورد فرمدهی قضیه مربوط به خطی کردن معادله تعادل دینامیکی می باشد. از سوی دیگر با توجه به تجربیات بدست آمده در عمل مشخص شده است که در زیردریایی با وضعیت غیراضطراری که دارای باقیمانده شناوری کمی نیز می باشند، مانورهای غوطه وری و صعود به سطح، پایدار و با دارابودن زاویه حمله، بر اساس قاعده، در محدوده خطی بودن ضرایب هیدرودینامیکی صورت پذیرفته است. در نتیجه چنین مانورهایی که بنام مانورهای سبک نیز خوانده می شوند، نکته قابل توجهی در مواقع بهره برداری پدید می آورند.

با توجه به گرافیک ضرایب هیدرودینامیکی (شکل ۶) نتیجه می گیریم که این ضرایب در نقطه $\alpha = \delta_K = \delta_H = 0$ به صورت پیوسته بوده و حداقل دارای یک مشتق برحسب هریک از اجزا می باشند. به همین علت از فرم خطی ارائه شده مربوط به تابع های $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ می توان برای تفکیک به شیوه تیلور در نقطه مورد نظر (مجموعه های مک لورن) و با حفظ تنها اجزایی که در بردارنده پارامترهای α و δ_K و δ_H می باشند، در توان «صفر و یک» استفاده کرد. چنین تفکیکی برای توابع چند متغیری $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ شکل زیر را دارا می باشد:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \\ &= f(x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0) \quad (24) \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0)}{\partial x_i} x_i \\ &+ R \end{aligned}$$

در اینجا: R مبین اعضای باقیمانده گروه بوده که دارای تنها توان هایی از نوع x_1^2 و x_2^2 و $x_1 x_2$ و \dots در محدوده خطی $R = 0$ هستند. با بهره گیری از آنچه که گفته شد و استفاده از مشخصه های به کار گرفته شده در تئوری قابلیت کنترل، می توان اقدام به تفکیک توابع مربوط به $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ در مانورهای سبک بدین شکل نمود:

$$C_{x\pi} = C_{x0} = C_x^a \alpha + C_x^k \delta_k + C_x^H \delta_H \quad (25)$$

$$C_{y\pi} = C_{y0} + C_y^a \alpha + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_H \quad (26)$$

$$m_{z\pi} = m_{z0} + m_z^a \alpha + m_z^k \delta_k + m_z^H \delta_H \quad (27)$$

مفهوم تمامی مقادیر نوشته شده در سمت راست معادلات (۲۵) تا (۲۷) را می توان با توجه به آنچه که در معادله (۱۰) آورده شده است، مشخص نمود. برای این کار از C_{x0} آغاز می نمایم. مطابق با معادله (۲۴) خواهیم داشت:

$$C_{x0} = C_{x\pi}(\alpha = \delta_k = \delta_H = 0) \quad (28)$$

در این صورت C_{x0} دارای شکلی از ضریب $C_{x\pi}$ می باشد که بیانگر حرکت زیردریایی در امتداد محور طولی و وضعیت بالکها در حالت خنثی است. بدین ترتیب ضریب مقاومت خواهد بود (که مربوط به سطح خیس شده بدنه نبوده و همانظوری که در ویژگی های حرکتی در نظر می گیرند مربوط به مشخصه سطح $V_\pi^{2/3}$ می باشد). در ادامه خواهیم داشت:

$$C_x^a = \frac{\partial C_{x\pi}(\alpha = \delta_k = \delta_H = 0)}{\partial \alpha} \quad (29)$$

$$C_x^k = \frac{\partial C_{x\pi}(\alpha = \delta_k = \delta_H = 0)}{\partial \delta_k} \quad (30)$$

بدین ترتیب ضرایب C_{y0} و m_{z0} ، که بیانگر عدم تقارن هیدرودینامیکی بدنه تحت شرایط زاویه صفر در بالکها هستند، را بنام ضرایب اولیه نیروی Y_{π} و ممان $M_{z\pi}$ می‌نامند. در ارتباط با فرم بدنه انتخاب شده در هنگام طراحی زیردریایی، این ضرایب ممکن است مثبت یا منفی و یا صفر باشند. در شکل ۶ یکی از انواع شکل‌های ممکن نشان داده شده است ($C_{y0} > 0$ و $m_{z0} < 0$) (۰). ممان ناشی از عدم تقارن هیدرودینامیکی M_0 بیانگر ممان نیروی Y_0 حول محور Z_1 می‌باشد. به همین دلیل چنانچه b_0 نشان‌دهنده محور X برای نیروی Y_0 باشد، می‌توان نوشت:

$$M_0 = b_0 Y_0 \quad (۴۲)$$

و یا با بهره‌گیری از (۳۸) و (۳۹) خواهیم داشت:

$$\frac{m_{z0}}{C_{y0}} = \frac{b_0}{V_{\pi}^{1/3}} = \bar{b}_0 \quad (۴۳)$$

در اینجا: $V_{\pi}^{1/3}$ مشخصه اندازه خطی و \bar{b}_0 محور X بدون بعد ناشی از عدم تقارن هیدرودینامیکی هستند. در ادامه با توجه به فرمول‌های (۳۴) و (۳۵) خواهیم داشت:

$$Y_{\alpha} = C_y^{\alpha} \alpha \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۴۴)$$

$$M_{\alpha} = m_z^{\alpha} \alpha \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi} \quad (۴۵)$$

در اینجا با توجه به عبارت (۲۴) داریم:

$$C_y^{\alpha} = \frac{\partial C_{y\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \alpha} \quad (۴۶)$$

$$m_z^{\alpha} = \frac{\partial m_{z\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \alpha} \quad (۴۷)$$

به همین دلیل در شکل ۶ داریم:

$$C_y^{\alpha} = \tan \gamma_1 \quad (۴۸)$$

$$m_z^{\alpha} = \tan \gamma_2 \quad (۴۹)$$

با توجه به فرمول (۴۵) می‌توان نتیجه گرفت که: Y_{α} نیروی پدید آمده به دلیل حرکت زیردریایی با زاویه حمله α و ممان M_{α} مربوط به نیروی Y_{α} حول محور Z_1 می‌باشند. یادآوری می‌کنیم که: پارامترهای Y_{α} و M_{α} در بردارنده نیروها و ممان‌های روی بالکها تحت شرایط زاویه‌ای صفر می‌باشد. با در نظر گرفتن ویژگی‌های ساده فیزیکی می‌توان دریافت که به ازای $\alpha > 0$ نیروی $Y_{\alpha} > 0$ می‌باشد. به همین علت $C_y^{\alpha} > 0$ است. اما آنچه که در خصوص علامت ضریب m_z^{α} می‌توان گفت، این است که در اینجا قانون بدون تغییری وجود ندارد.

همچنین روشن است، در اجسام با فرم متقارن محوری نیروی Y_{α} (آن را اغلب اوقات بنام مرکز فشار می‌نامند)، بر روی نقطه مستقر در فاصله $1/4$ طول جسم از سینه، به ازای مقادیر کم زاویه حمله

$$C_x^H = \frac{\partial C_{x\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \delta_H} \quad (۳۱)$$

بدین ترتیب این سه ضریب نشان‌دهنده تانژانت زوایای شیب مبدأ مماس‌ها بر گرافیک $C_{x\pi}$ بر حسب پارامترهای α و δ_K و δ_H می‌باشد. به هنگام مانورهای سبک، تمامی آنها به مراتب کمتر از پارامتر C_{x0} بوده و به همین علت در شرایط مورد بررسی آن را به صورت زیر در نظر می‌گیرند:

$$C_{x\pi} = C_{x0} \quad (۳۲)$$

به همین علت در هنگام مانورهای سبک خواهیم داشت:

$$X_{\pi} = C_{x0} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۳۳)$$

در ادامه به نوشتن عبارات برای Y_{π} و $M_{z\pi}$ تحت شرایط

مانورهای سبک می‌پردازیم. در این کار لازم است عبارات (۲۶) و (۲۷) را در معادله‌های دوم و سوم سیستم معادلات (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) قرار دهیم و به این ترتیب خواهیم داشت:

$$Y_{\pi} = (C_{y0} + C_y^{\alpha} \alpha + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۳۴)$$

$$M_{z\pi} = (m_{z0} + m_z^{\alpha} \alpha + m_z^k \delta_k + m_z^H \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi} \quad (۳۵)$$

و یا این که بدین صورت:

$$Y_{\pi} = Y_0 + Y_{\alpha} + Y_k + Y_H \quad (۳۶)$$

$$M_{z\pi} = M_0 + M_{\alpha} + M_k + M_H \quad (۳۷)$$

در اینجا اغلب اوقات:

$$Y_0 = C_{y0} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۳۸)$$

$$M_0 = m_{z0} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi} \quad (۳۹)$$

به جز آنچه که نوشته شد مطابق با عبارات (۲۴)، (۲۶) و (۲۷) می‌توان نوشت:

$$C_{y0} = C_{y\pi}(\alpha = \delta_k = \delta_H = 0) \quad (۴۰)$$

$$m_{z0} = m_{z\pi}(\alpha = \delta_k = \delta_H = 0) \quad (۴۱)$$

از همین جا می‌توان نتیجه گرفت: نیروی Y_0 در امتداد محور Y_1 در هنگام حرکت زیردریایی با زاویه حمله و وضعیت زاویه‌ای برابر صفر، تاثیر کرده، ممان M_0 بر روی صفحه دیامتریال، تحت همان شرایط، اثر کرده که C_{y0} و m_{z0} ، ضرایب این نیرو و ممان هستند.

چنانچه بدنه زیردریایی دارای فرم متقارن محوری باشد، به دلیل تقارن جریان‌ها، $Y_0 = M_0 = C_{y0} = m_{z0} = 0$ خواهد بود. حال اگر فرم بدنه غیر از متقارن محوری را در زیردریایی داشته باشیم، (بعنوان مثال به دلیل استفاده از برجک و یا هر بخش دارای برآمدگی نامتقارن) در حالت کلی $Y_0 \neq 0$ ، $M_0 \neq 0$ بوده و در نتیجه نیز $C_{y0} \neq 0$ و $m_{z0} \neq 0$ خواهند بود.

موضعی ضرایب نیروی Y_π و ممان $M_{Z\pi}$ برحسب تغییر وضعیت زاویه‌ای بالکهای پاشنه)، با یکدیگر در ارتباط هستند. چنانچه b_k بازوی X مربوط به بالکهای پاشنه باشد، خواهیم داشت:

$$M_K = b_K Y_K \quad (57)$$

از همین جا نیز داریم:

$$\frac{m_Z^k}{C_y^k} = \frac{b_k}{V_\pi^{1/3}} = \bar{b}_k \quad (58)$$

در اینجا: \bar{b}_k محور بدون بعد X مربوط به بالکهای پاشنه می‌باشد. در انتها به بررسی Y_H و ممان M_H می‌پردازیم. در این هنگام داریم:

$$Y_H = C_y^H \delta_H \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (59)$$

$$M_H = m_Z^H \delta_H \frac{\rho v^2}{2} V_\pi \quad (60)$$

$$C_y^H = \frac{\partial C_{y\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \delta_H} \quad (61)$$

$$m_Z^H = \frac{\partial m_{Z\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \delta_H} \quad (62)$$

همانطوری که می‌دانید: Y_H نیروی بر بالکهای سینه که به دلیل تغییر وضعیت زاویه بالکها به میزان δ_H پدید آمده و M_H ممان نیروی یاد شده حول محور Z_1 است. همانطوری که قبلاً نیز داشتیم چنانچه $\delta_H > 0$ باشد، خواهیم داشت $Y_H > 0$ و در نتیجه نیز $C_y^H > 0$ خواهد بود. در شرایطی که بالکهای سینه جلوتر از مرکز ثقل قرار داشته باشد $M_H > 0$ خواهد بود. در این حالت مطابق رابطه‌های (۶۱) و (۶۲) خواهیم داشت $m_Z^H > 0$. چنانچه b_H بازوی X مربوط به بالکهای سینه باشد، خواهیم داشت:

$$M_H = b_H Y_H \quad (63)$$

با جاگذاری مقادیر M_H و Y_H مطابق با رابطه‌های (۶۱) و (۶۲) می‌توان تناسب مشتق‌های موضعی ضرایب نیروی عمودی و ممان طولی با زاویه وضعیت بالک افقی سینه را به دست آورد:

$$\frac{m_Z^H}{C_y^H} = \frac{b_H}{V_\pi^{1/3}} = \bar{b}_H \quad (64)$$

در تصویر ۸ تمامی مولفه‌های نیروی عمودی Y_π و ممان طولی $M_{Z\pi}$ و همچنین نیروی X_π در هنگام انجام مانورهای پایدار سبک زیردریایی در صفحه عمودی نشان داده شده‌اند.

در این شکل نیروی حاصله به دلیل عدم تقارن هیدرودینامیکی مثبت فرض شده و ممان آن منفی در نظر گرفته شده است ($m_{Z0} < 0$ و $C_{y0} > 0$). به همین علت نیز $b_0 < 0$ خواهد بود. علامت تمامی دیگر مولفه‌های نیروی Y_π و ممان $M_{Z\pi}$ بر اساس آنچه که در شکل نشان داده شده مطابق با

α قرار دارد. اما آنچه که در خصوص مرکز ثقل زیردریایی باید گفت این است که بر اساس قاعده، مرکز یاد شده نزدیک مقطع میانی طولی قرار دارد. به عبارت دیگر در عقب مرکز فشار مستقر است. تحت شرایطی که $\alpha > 0$ باشد نیروی $Y_\alpha > 0$ پدید می‌آید که ممان ناشی از آن سعی در برگرداندن زیردریایی در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌نماید و یا به عبارت دیگر $M_\alpha > 0$ می‌باشد. در این هنگام مطابق فرمول (۴۵) نیز داریم: $m_Z^\alpha > 0$.

ثابت‌های بدون بعد m_Z^α و C_y^α بنام ضرایب مشتقی موضعی نیروی عمودی Y_π ، ممان طولی $M_{Z\pi}$ ، برحسب زاویه α نامیده می‌شوند. با نشان دادن b_α بعنوان محور X مربوط به مرکز فشار خواهیم داشت:

$$M_\alpha = b_\alpha Y_\alpha \quad (49)$$

و یا با بهره‌گیری از فرمول (۴۵) می‌توان نوشت:

$$\frac{m_Z^\alpha}{C_y^\alpha} = \frac{b_\alpha}{V_\pi^{1/3}} = \bar{b}_\alpha \quad (50)$$

در اینجا: \bar{b}_α محور X بدون بعد مربوط به مرکز فشار می‌باشد. حال به بررسی نیروی Y_K و ممان M_K مندرج در عبارات (۳۶) و (۳۷) می‌پردازیم. مطابق با عبارات (۳۴) و (۳۵) داریم:

$$Y_K = C_y^k \delta_k \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (51)$$

$$M_K = m_Z^k \delta_k \frac{\rho v^2}{2} V_\pi \quad (52)$$

در اینجا داریم:

$$C_y^k = \frac{\partial C_{y\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \delta_k} \quad (53)$$

$$m_Z^k = \frac{\partial m_{Z\pi}(\alpha=\delta_k=\delta_H=0)}{\partial \delta_k} \quad (54)$$

و به همین علت نیز خواهیم داشت (شکل ۶):

$$C_y^k = \tan \varepsilon_1 \quad (55)$$

$$m_Z^k = \tan \varepsilon_2 \quad (56)$$

کاملاً روشن است:

Y_K : نیروی روی بالکهای پاشنه است که به دلیل تغییر وضعیت زاویه‌ای بالکها به میزان δ_K پدید آمده است.

M_K : ممان نیروی یاد شده حول محور Z_1 می‌باشد.

در این هنگام چنانچه $\delta_k > 0$ باشد، خواهیم داشت $Y_k > 0$ در این حالت با توجه به عبارت (۵۲) نتیجه می‌گیریم که $C_y^k > 0$ می‌باشد. در چنین شرایطی ممان M_K سعی در برگرداندن زیردریایی، در جهت حرکت عقربه‌های ساعت داشته ($M_K < 0$) و به همین علت نیز $m_Z^k < 0$ خواهد بود. در همین ارتباط یادآور می‌شود که بالکهای پاشنه در قسمت عقب و عقب‌تر از مرکز ثقل G قرار دارند. ثابت‌های بدون بعد m_Z^k و C_y^k (مشتق‌های

دوم بر $\rho v^2 V_\pi / 2$ به فرم بدون بعد تبدیل نماییم که خواهیم داشت:

$$C_{y0} + C_y^\alpha \alpha + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_H + \bar{Q} = 0 \quad (68)$$

$$-\frac{2gh_\pi}{v^2} \psi + \bar{p}(\bar{x}_{H\Delta} - \bar{x}_{K\Delta}) + \bar{Q} \bar{x}_q \quad (69)$$

$$-C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \alpha \delta_k + m_z^H \delta_H = 0$$

در اینجا داریم:

$$\bar{p} = \frac{p}{\rho v^2 V_\pi^{2/3} / 2} \quad (70)$$

$$\bar{Q} = \frac{Q}{\rho v^2 V_\pi^{2/3} / 2} \quad (71)$$

$$\bar{x}_{H\Delta} = \frac{x_{H\Delta}}{V_\pi^{1/3}} ; \quad \bar{x}_{K\Delta} = \frac{x_{K\Delta}}{V_\pi^{1/3}} \quad (72)$$

$$\bar{x}_q = \frac{x_q}{V_\pi^{1/3}} ; \quad \bar{y}_p = \frac{y_p}{V_\pi^{1/3}} \quad (73)$$

می‌توان نتیجه گرفت روابط (68) بیانگر شرط برابری مولفه صفر نیرو بر روی محور عمود y_1 می‌باشد. در میان این نیروها، نیروی باقیمانده شناوری Q نیز وجود دارد که نقش آن در مقایسه با سایر نیروها (نیروهای هیدرودینامیکی) با افزایش سرعت حرکت، کم‌رنگ‌تر می‌گردد. به خصوص این نکته در خصوص باقیمانده شناوری بدون بعد $\bar{Q} \sim v^{-2}$ صدق می‌کند. معادله (70) (در حالت بدون بعد خود) نشان‌دهنده معادله تعادل ممان‌هایی می‌باشد که بر روی صفحه دیامتریال تاثیر می‌گذارد. در این حالت، ممان استاتیکی طولی بازگرداننده M_ψ ، ممان تریوم‌دهنده M'_Δ و ممان شناوری باقیمانده M_q ، بستگی به سرعت حرکت نداشته و سایر ممان‌ها با v^2 نسبت مستقیم دارند. این امر دلیل موجودیت یافتن اعضای در معادله (70) می‌باشد که دارای نسبت مستقیم با مربع سرعت بوده و با افزایش سرعت کاهش می‌یابند. متذکر می‌شویم که در هنگام انجام مانورهای سبک، میزان باقیمانده شناوری به دلیل تغییرات مقدار آب در مخازن جبران وزن، تغییر می‌نماید. محور X در مخازن تعادلی با x_{yp} نشان داده می‌شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$x_q = x_{yp} \quad \text{و} \quad \bar{x}_q = \bar{x}_{yp} \quad (74)$$

بدین ترتیب به ازای سرعت مشخص زیردریایی در معادلات (68) و (70)، شش عضو به ترتیب α ، ψ ، δ_k ، δ_H ، \bar{Q} ، \bar{p} ، در بحث قابلیت کنترل، تاثیرگذار می‌باشند. سیستم معادلاتی ما از دو معادله تشکیل شده است: چهار تایی آنها را می‌بایست حل کرده و دو عدد باقیمانده را با حل کردن کل سیستم مشخص کرد. به جز این فرض می‌نماییم که میزان بار زیردریایی مشخص بوده (\bar{p} و \bar{Q}) و وضعیت زاویه بالک‌ها، δ_k و δ_H نیز معلوم هستند.

علامات α و δ_k و δ_H خواهند بود. در پایان لازم است دو نکته را یادآور شویم:

تمامی نیروها و ممان‌هایی که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته‌اند دارای منشأ هیدرودینامیکی بوده و به همین دلیل دارای نسبت مستقیم با مربع سرعت حرکت زیردریایی می‌باشند. علاوه بر این باید متذکر شد که تفکیک‌های انجام شده در عبارات (36) و (37) تنها برای مانورهای سبک، صادق بوده و کاربرد دارند. بهره‌گیری از آنها تنها در محدوده خطی بودن ضرایب (α و δ_k و δ_H) $C_{x\pi}$ قابل استفاده می‌باشند.

۵- معادله تعادل دینامیکی در هنگام مانورهای سبک

با بهره‌گیری از معادله تعادل دینامیکی برای مانورهای شدید (معادله (23)) نتیجه می‌گیریم که ضرایب $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ در شرایط حاضر، نشان‌دهنده برابری‌های اشاره شده در معادلات (25)، (26) و (27) بوده و همچنین $\psi = \sin\psi$ و $\cos\psi = 1$ می‌باشد. در این حالت معادله اول رابطه (23) را بصورت زیر خواهیم داشت:

$$Pe - C_{x0} \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} + Q\psi = 0 \quad (65)$$

در ادامه خاطر نشان می‌کنیم در زیردریایی بدون وضعیت اضطراری، باقیمانده شناوری Q با مقادیر مرتبه اول کمیت نشان داده می‌شود. به همین علت حاصلضرب $Q\psi$ به صورت مقادیر مرتبه دوم کمیت بوده و باید با توجه به حاصلضرب‌های مشابه در هنگام خطی کردن ضرایب (α و δ_k و δ_H) $C_{x\pi}$ حذف گردیده و کنار گذاشته شوند. در این حالت خواهیم داشت:

$$Pe = C_{x0} \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} \quad (66)$$

رابطه (66) طبق این نکته می‌باشد که در هنگام انجام مانورهای پایدار سبک، تراست تولید شده توسط مکانیزم تولید نیروی حرکتی برابر با مقاومت آب در مقابل حرکت زیردریایی است. برای تحقیق بر روی قابلیت کنترل، معادله یادشده هیچگونه اطلاعات اضافی دیگری را در اختیار نمی‌گذارد. معادلات دوم و سوم در سیستم معادلاتی (23) با توجه به معادله (66) شکل زیر را به خود می‌گیرند:

$$\left. \begin{aligned} (C_{y0} + C_y^\alpha \alpha + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_\pi^{2/3} + Q = 0 \\ -\rho g V_\pi h_\pi \psi + p(x_{H\Delta} - x_{K\Delta}) + Qx_q + \\ + (m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^k \delta_k + m_z^H \delta_H) \frac{\rho v^2}{2} V_\pi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (67)$$

بهتر است که سیستم معادلاتی تعادل دینامیکی (67) در هنگام مانورهای سبک را با تقسیم معادله اول به $\rho v^2 V_\pi^{2/3} / 2$ و معادله

نقش ممان بازگرداننده استاتیکی در مقایسه با ممان حاصل از زاویه حمله می‌باشد (شکل ۹).

به ازای مقادیر پایین سرعت، تمامی ممان‌های هیدرودینامیکی از جمله M_α مقادیر کوچکی را دارا بوده و بنابراین $\bar{b}_{h\alpha}$ مقادیر بسیار بزرگی را به خود می‌گیرد. این بدان معناست که نقش ویژه ممان بازگرداننده استاتیکی در مقادیر پایین سرعت حرکت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بالعکس در سرعت‌های بالا، نقش این ممان چندان تعیین‌کننده نیست. در سیستم معادلات (۷۶) و (۷۷) مقادیر زیر وجود دارند. این مقادیر از نقطه‌نظر تامین وضعیت حرکتی اصلی قابل توجه بوده و عبارتند از:

$$\bar{p}, \bar{Q}, \psi, \delta_H, \delta_k. \quad (79)$$

همانطور که قبلاً اشاره شد \bar{p} و \bar{Q} به ترتیب مقادیر بدون بعد نیروهای وزن و باقیمانده شناوری هستند. ψ ، δ_k و δ_H به ترتیب زوایای تریم (حمله)، وضعیت زاویه‌ای بالک‌های پاشنه و سینه هستند. بدین ترتیب در معادله یادشده، سه مورد از مقادیر یاد شده را باید مشخص کرد و دوتای باقیمانده را بعنوان پاسخ حل سیستم معادلاتی تعادل هیدرودینامیکی بدست آورد. آنچه که بیان شد، یکی از روش‌های اصلی تامین وضعیت حرکتی اصلی و یا به عبارت دیگر از روش‌های بالانس کردن زیردریایی در این وضعیت (رژیم اصلی حرکت) می‌باشد. چنین روش‌هایی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردد:

۱- بالانس کردن با تنظیم بارها: در این روش تمامی پارامترهای زاویه‌ای (ψ و δ_k ، δ_H) مشخص شده و با حل سیستم‌های معادلاتی (۷۶) و (۷۷)، مقادیر \bar{p} و \bar{Q} (یا p ، Q) را تعیین می‌نماید؛ مقادیر یاد شده برای آنکه زیردریایی در عمق ثابت به حرکت ادامه دهد، لازم هستند. اغلب اوقات زمانیکه $\delta_k = \delta_H = \psi = 0$ باشد، این روش بالانس کردن، بنام «تنظیم تریم به هنگام حرکت» خوانده می‌گردد.

۲- بالانس کردن با بهره‌گیری از یک جفت بالک افقی: در این روش، مقادیر زاویه جفت بالک‌های بدون استفاده، باقیمانده شناوری، نیروی ثقل، جابجایی آب بین مخازن مختلف، در مقابله با وضعیت تریم استاتیکی مشخص گردند.

پارامترهای باقیمانده نامعلوم (زاویه بالانس وضعیت بالکها مورد استفاده و همچنین زاویه بالانسی تریم)، با حل کردن معادله تعادل دینامیکی بدست می‌آید. اغلب اوقات، این روش تحت عنوان تامین وضعیت حرکتی اصلی با بهره‌گیری از یک جفت بالک و وضعیت ثابت جفت بالک‌های باقی‌مانده نامیده می‌گردد.

۳- بالانس کردن با بهره‌گیری از دو جفت بالک: این روش با معلوم بودن مقادیر ψ ، Q و p موجودیت می‌یابد. تنها نکته بسیار قابل توجه در اینجا، بحث زاویه تریم می‌باشد که تعیین کردن آن تنها با توجه به شرایط بهره‌برداری و یا به هنگام بهره‌گیری از تسلیحات،

آنچه که گفته شد امکان حل سیستم معادلاتی تعادل دینامیکی برحسب زاویه α و زاویه تریم ψ را امکان پذیر مینماید. بدین ترتیب وضعیت مهمی را اثبات کرده‌ایم که در آن، با مشخص بودن میزان بار و وضعیت معلوم زاویه‌ای بالکها، نشان دهنده حرکت زیردریایی با زاویه حمله α و تریم ثابت Ψ و در عین حال زاویه مسیر ثابت $\chi = \psi - \alpha$ می‌باشد.

آنچه که در بالا اشاره شد به نوبه خود بیانگر این نکته است که در شرایط یادشده حرکت زیردریایی در یک مسیر مستقیم انجام می‌شود و زیردریایی در وضعیت غوطه‌وری یا صعود به سطح قرار دارد. طبیعتاً آنچه که بعنوان نتیجه گیری ارائه گردید، در شرایط گفته شده برای معادله تعادل دینامیکی و یا به عبارت دیگر در شرایط انجام مانورهای سبک صدق می‌کند.

۶- بالانس کردن زیردریایی در وضعیت غیر اضطراری در وضعیت حرکتی اصلی

بخش زیادی از زمان حرکت زیردریایی در حالت حرکتی اصلی طی می‌گردد. در این حالت، سرعت حرکت، مسیر و عمق غوطه‌وری به صورت متوسط، ثابت نگه داشته می‌شوند، و حفظ مسیر حرکت، مشکل چندان ناداشته و تنها در تامین پایداری عملی حرکت در صفحه افقی، خلاصه می‌گردد. اما آنچه که در ارتباط با حفظ عمق غوطه‌وری می‌توان گفت این است که تامین این وضعیت (بالانس- کردن زیردریایی در وضعیت حرکتی اصلی)، به مراتب مشکل‌تر بوده و نیازمند تحقیق ویژه می‌باشد.

۶-۱- روش‌های ساده بالانس کردن زیردریایی در وضعیت حرکتی اصلی

وضعیت حرکتی اصلی در زیردریایی در وضعیت غیر اضطراری از موارد پر تکرار وضعیت حرکتی مانورهای پایدار سبک در صفحه عمودی می‌باشد. مشخصه اصلی آن، افقی بودن بردار سرعت مرکز ثقل است. به همین علت داریم:

$$\chi = 0 ; \quad \psi = \alpha \quad (75)$$

بنابراین سیستم معادلاتی تعادل دینامیکی (۶۸) و (۶۹) شکل زیر را به خود خواهد گرفت:

$$C_{y0} + C_y^\alpha \psi + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_H + \bar{Q} = 0 \quad (76)$$

$$C_y^\alpha (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha}) \psi + \bar{p} (\bar{x}_{HD} - \bar{x}_{KD}) + \quad (77)$$

$$\bar{Q} \bar{x}_{yp} - C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \delta_k + m_z^H \delta_H = 0$$

در اینجا داریم:

$$\bar{b}_{h\alpha} = \frac{2gh\pi}{C_y^\alpha v^2} \quad (78)$$

$\bar{b}_{h\alpha}$ به نام بازوی بدون بعد ممان بازگرداننده استاتیکی طولی خوانده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود $\bar{b}_{h\alpha}$ نشان‌دهنده

عمودی موضعی لازم می‌باشد. عملاً به همین علت باید $Q \sim v^2$ باشد. اما آنچه که در خصوص جابجا کردن آب قابل ذکر است اینست که عملیات یاد شده، با هدف متعادل ساختن ممان استاتیکی طولی، ممان باقیمانده شناوری، و دو ممان هیدرو دینامیکی دیگر، (ممان تراست و ممان موضعی طولی) به کار می‌رود. به همین علت نیز $p \sim v^2$ است. یادآوری می‌نماییم که مطابق با قوانین محاسباتی در صورتیکه علامت ممان $p > 0$ باشد، می‌بایست آب از مخازن تریم سینه به مخازن تریم پاشنه منتقل گردیده و بالعکس.

در برخی موارد در هنگامی که $\psi_0 = \delta_{k0} = \delta_{H0} = 0$ باشد (در هنگام تنظیم تریم در حین حرکت) مطابق با فرمول‌های (۸۰) و (۸۱) خواهیم داشت:

$$Q = -C_{y0} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۸۲)$$

$$p = \frac{C_{x0} \bar{y}_p - m_{z0} - C_{y0} \bar{x}_{yp}}{\bar{x}_{Hg} - \bar{x}_{Kg}} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۸۳)$$

بدین ترتیب، در اینجا باقیمانده شناوری تنها برای متعادل ساختن نیروی Y_0 تولید گردیده و توزیع آب بین مخازن نیز برای متعادل ساختن ممانهای تراست Y_0 و Q بکار گرفته می‌شود. طبیعتاً به دلیل آنچه که قبلاً گفتیم $Q \sim v^2$ و $p \sim v^2$ بوده و به علت محدودیت حجم مخازن بالاست کمکی، روش بالانس مورد بحث را تنها می‌بایست در هنگام مقادیر نسبتاً پایین سرعت مورد استفاده قرار داد.

در شکل ۱۰ زیردریایی را مشاهده می‌نماییم که در حین حرکت، تریم آن تنظیم شده است. در این شکل نیروی حاصل از عدم تقارن هیدرو دینامیکی، Y_0 مثبت ($C_{y0} > 0$)، ممان آن M_0 منفی، ($m_{z0} < 0$ و $b_0 < 0$) و ممان تراست M_p منفی ($y_p > 0$) و ممان باقیمانده شناوری M_q ($x_q = x_{yp} > 0$) منفی در نظر گرفته شده است.

طرز می‌شود. بیشتر اوقات زمانی که مقادیر $\psi = Q = p = 0$ باشند، این روش «ایجاد تریم مطلق» نامیده می‌شود.

روشهای یاد شده را می‌توان با یکدیگر ترکیب نمود، بعنوان مثال بالانس کردن در سرعت متوسط حرکتی با بهره‌گیری از یک جفت بالک افقی و پیش از آن ایجاد تریم در سرعت پایین و در هنگام حرکت. یادآوری می‌کنیم از میان تمامی روشهای بالانس کردن، بهره‌گیری از سه روش ساده که در ابتدا ذکر شده بسیار متداول می‌باشد.

۲-۶-۲ بالانس کردن با تنظیم بار

۲-۶-۱ تنظیم تریم در هنگام حرکت

با کمک ψ_0 ، δ_{k0} و δ_{H0} به ترتیب زوایای تریم (حمله)، وضعیت زاویه‌ای بالک‌های پاشنه و سینه را در روش بالانس کردن مورد بحث نشان می‌دهیم. می‌بایست به این نکته توجه داشت که این زوایا باید در محدوده خطی بودن، ضرایب هیدرو دینامیکی $C_{x\pi}$ ، $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ قرار داشته باشند. تنها در این هنگام است که شرایط بهره‌گیری از معادله تعادل دینامیکی (۷۶) و (۷۷) برقرار می‌شوند.

حل معادلات یاد شده برحسب Q و $p = \bar{p}(\rho v^2/2)V_{\pi}^{2/3}$ به صورت زیر خواهد بود:

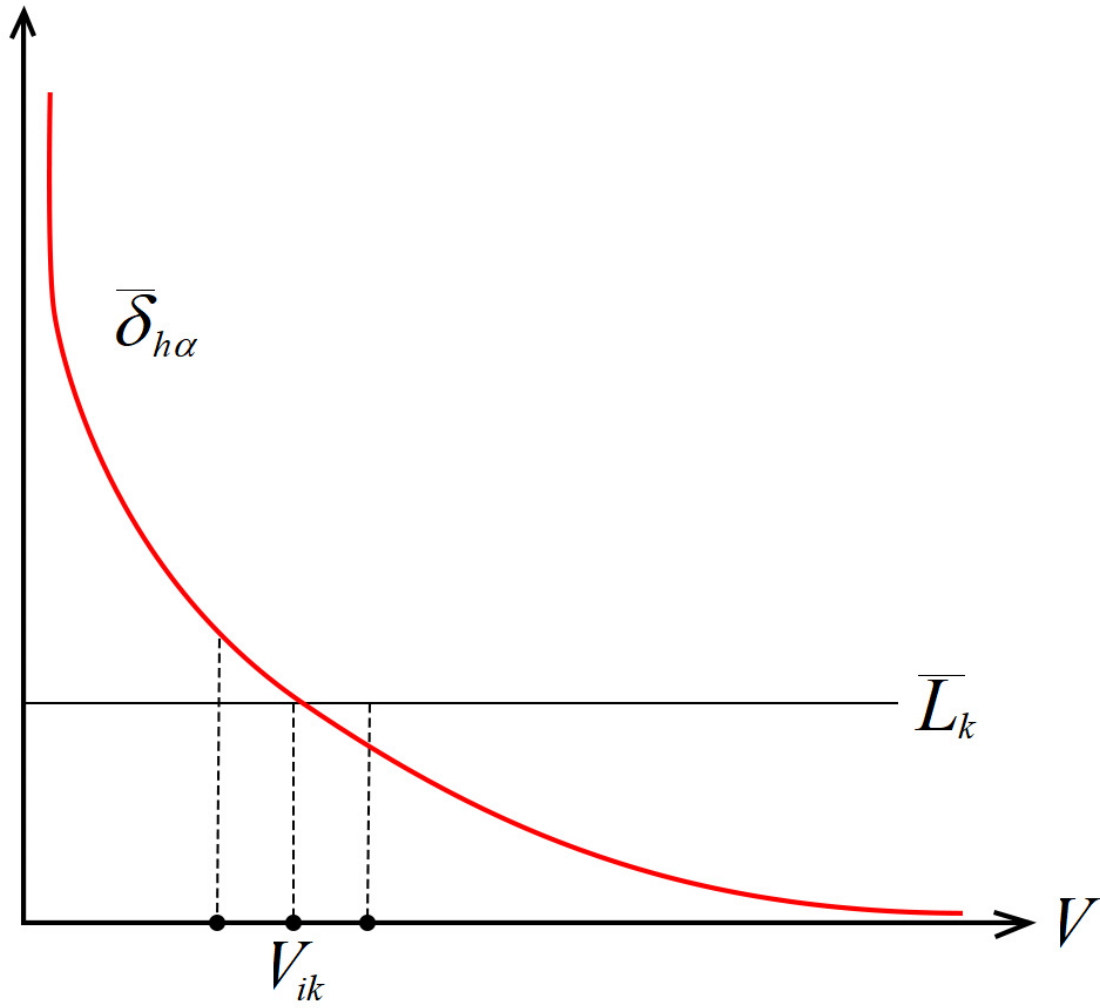
$$Q = -(C_{y0} + C_y^{\alpha} \psi_0 + C_y^k \delta_{k0} + C_y^H \delta_{H0}) \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} \quad (۸۰)$$

$$p = \frac{C_{x0} \bar{y}_p - m_{z0} + C_{y0} \bar{x}_{yp}}{\bar{x}_{Hg} - \bar{x}_{Kg}} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3} + \quad (۸۱)$$

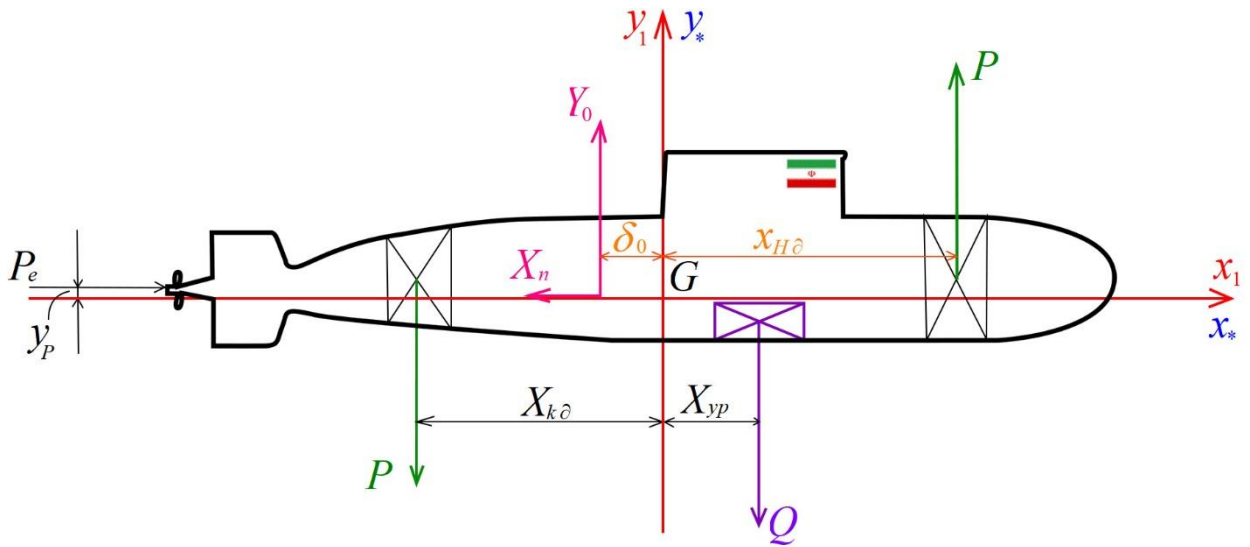
$$+ \frac{C_y^k (\bar{x}_{yp} - \bar{b}_k) + C_y^H (\bar{x}_{yp} - \bar{b}_H) - C_y^{\alpha} (\bar{b}_{\alpha} - \bar{b}_{H\alpha} - x_{yp})}{\bar{x}_{Hg} - \bar{x}_{Kg}} \frac{\rho v^2}{2} V_{\pi}^{2/3}$$

روابط (۸۰) و (۸۱)، فرمولهای محاسباتی هستند. این معادلات، امکان تعیین مقادیری از باقیمانده شناوری و همچنین میزان آبی که می‌بایست بین مخازن تریم جابجا شود تا زیردریایی با پارامترهای از پیش تعیین شده با عمق غوطه‌وری ثابت به حرکت ادامه دهد را فراهم می‌نمایند.

با توجه به فرمول (۸۰)، نتیجه می‌گیریم که مقدار باقیمانده شناوری برای متعادل کردن نیروهای باقیمانده هیدرو دینامیکی



شکل ۹- مقایسه بازوی بازگرداننده و بازوی ناشی از زاویه حمله



شکل ۱۰- تنظیم تریم حین حرکت با تنظیم بار

۲-۲-۶- بالانس کردن زیردریایی در وضعیت حرکتی اصلی ب کمک یک جفت بالک

برای سادگی بیشتر و بدون دخالت در ماهیت قضیه فرض می‌کنیم که زیردریایی دارای تریم استاتیکی می‌باشد. چنین مسئله‌ای را می‌توان به راحتی با روش زیر و در هنگامی که $p \neq 0$ و $Q \neq 0$ باشد حل کرد:

۱- در ابتدا به بررسی موردی می‌پردازیم که در آن بالانس کردن با کمک بالک‌های پاشنه، صورت گرفته و بالک‌های سینه، در وضعیت زاویه‌ی خنثی قرار دارند. در اینجا زاویه‌ای را باید بیابیم که به ازای آنها بالک‌های پاشنه به نحوی قرار گیرند که زیردریایی در عمق ثابت حرکت کرده و زاویه تریم (حمله) نیز بصورتی باشد که این حرکت، تداوم یابد. برای شروع، معادله‌ای را فرم‌دهی می‌کنیم که نشان‌دهنده تعادل دینامیکی در شرایط صفر بودن پارامترهای δ_H ، p و Q باشد. مطابق با فرمولهای (۷۶) و (۷۷) این معادله شکل زیر را خواهد داشت:

$$C_{y0} + C_y^\alpha \psi + C_y^k \delta_k = 0 \quad (۸۴)$$

$$C_y^\alpha (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha}) \psi - C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \delta_k = 0 \quad (۸۵)$$

با توجه به معادله (۸۴) که بیانگر صفر بودن مجموعه نیروهای موثر در امتداد محور عمود می‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت:

$$\psi = -\frac{C_{y0}}{C_y^\alpha} - \frac{C_y^k}{C_y^\alpha} \delta_k \quad (۸۶)$$

بدین ترتیب زاویه بالانس‌کننده تریم تنها بستگی به δ_k خواهد داشت. حال برای آنکه پاسخ اصلی مسئله، یعنی یافتن زاویه بالانس‌کننده وضعیت بالک‌های پاشنه، را بیابیم، کافیه عبارت (۸۶) را در معادله تعادل ممان‌ها (۸۵) قرار دهیم. در این حالت با توجه به اینکه: $C_y^k (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha}) - m_z^k = C_y^k (\bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha})$ می‌باشد، خواهیم داشت:

$$\delta_k = \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha})}{C_y^k (\bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha})} \quad (۸۹)$$

از این معادله می‌توان نتیجه گرفت که زاویه δ_k ، تامین‌کننده وضعیت اصلی حرکت زیردریایی بستگی به سرعت حرکت دارد. این رابطه را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با افزایش سرعت حرکت، بازوی بدون بعد ممان بازگرداننده استاتیکی طولی $\bar{b}_{h\alpha}$ کاهش می‌یابد. گاهی اوقات در زمانی که سرعت، کمترین میزان خود را داراست $\bar{b}_{h\alpha} \rightarrow \infty$ پس داریم:

$$\lim_{v \rightarrow 0} \delta_k = -\frac{C_{y0}}{C_y^k} \quad (۹۰)$$

در اینجا بخش سمت راست دارای مقدار ثابت برای زیردریایی است. علامت آن، همانطوریکه از تعابیر فیزیکی ارائه شده قبلی برمی‌آید،

مخالف با علامت نیروی Y_0 (حاصل از عدم تقارن هیدرودینامیکی) خواهد بود. در اینجا توجه شما را بدین نکته جلب می‌نماییم که در مخرج کسر مربوط به δ_k ، دو مقدار مثبت مربوط به \bar{l}_k و $\bar{b}_{h\alpha}$ قرار دارند. در این هنگام بازوی بالک‌های پاشنه ثابت بوده و $\bar{b}_{h\alpha}$ تمامی مقادیر مثبت از بینهایت تا صفر را به ازای افزایش v دارا می‌گردد. در همین ارتباط، سرعتی برای زیردریایی، v_* وجود دارد که اختلاف یادشده، به صفر میل کرده و تابع $\delta_k(v)$ ، ویژگی خاصی را به خود خواهد گرفت (به صورت یک مقدار بسیار بزرگ نامعلوم تبدیل می‌گردد). سرعت v_* را می‌توان به راحتی مشخص کرد در اینجا عملاً داریم:

$$\bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha} = \bar{l}_k - \frac{2gh\pi}{C_y^\alpha v_*^2} = 0 \quad (۹۱)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$v_* = \sqrt{\frac{2gh\pi}{C_y^\alpha \bar{l}_k}} = v_{ik} \quad (۹۲)$$

بدین ترتیب: v_* سرعت معکوس inverse برای بالک‌های پاشنه خواهد بود. البته پدیده نشان داده شده در اینجا، چندان هم غیرمنتظره نیست. پدیده یادشده مستقیماً از عملکرد مکانیزم بالک‌های پاشنه منتج شده و همان اتلاف قابلیت کنترل در سرعت‌های معکوس inverse برای این بالک‌ها می‌باشد. در اینجا تنها این نکته که تامین وضعیت حرکتی اصلی با کمک بالک‌های پاشنه تحت شرایط $v = v_{ik}$ امکان‌پذیر نمی‌باشد، مورد تایید قرار گرفته است. از سمت چپ، از سرعت معکوس inverse داریم: $\bar{l}_k < \bar{b}_{h\alpha}$ (شکل ۱۱). به همین دلیل داریم:

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik} - 0} \delta_k = \frac{A}{\text{беск. малая отриц. вел}} \quad (۹۳)$$

در اینجا داریم:

$$A = m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_k \quad (۹۴)$$

چنانچه: $v > v_{ik}$ باشد، خواهیم داشت: $\bar{l}_k > \bar{b}_{h\alpha}$. در نتیجه:

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik} + 0} \delta_k = \frac{A}{\text{беск. малая полож. вел}} \quad (۹۵)$$

با توجه به فرمول (۹۴) درمی‌یابیم که برای یک زیردریایی مشخص $A = \text{const}$ می‌باشد. در ارتباط با علامات و مقادیر مطلق m_{z0} ، C_{y0} و \bar{y}_p مقادیر A می‌تواند به صورت‌های $A < 0$ و $A > 0$ باشد. چنانچه بعنوان مثال $A > 0$ باشد، خواهیم داشت:

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik} - 0} \delta_k = -\infty, \quad \lim_{v \rightarrow v_{ik} + 0} \delta_k = +\infty \quad (۹۶)$$

و اگر $A < 0$ باشد، داریم:

در نتیجه در سرعت معکوس inverse زاویه بالانس‌کننده تریم دارای گسست بی‌نهایت، ولی با علامت مخالف گسست مربوط به δ_k خواهد شد. چنانچه سرعت v_0 به نحوی موجودیت یابد که به ازای آن شرط $\delta_k = 0$ برقرار گردد، بنابراین خواهیم داشت:

$$\psi(v_0) = -\frac{C_{y0}}{C_y^\alpha} \quad (103)$$

در نهایت مقادیر مجانبی برای ψ با جاگذاری عبارت (۹۹) در (۸۶) به دست خواهد آمد:

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \psi = -\frac{C_{y0}}{C_y^\alpha} - \frac{m_{z0} - C_{x0}\bar{y}_p - C_{y0}\bar{b}_\alpha}{C_y^k \bar{l}_k} \quad (104)$$

در شکل ۱۱ نمودار مربوط به $\delta_k(v)$ و $\psi(v)$ نشان داده شده است. در هنگام ترسیم این نمودار، تمامی نکاتی که قبلاً گفته شد، برای مواردی است که در آن $\bar{y}_p < 0$ و $m_{z0} > 0$ و $C_{y0} < 0$ و $A < 0$ رعایت گردیده و مد نظر قرار گرفته‌اند. همچنین نمودار یاد شده تحت عنوان دیاگرام بالانس برای بالکهای پاشنه خوانده می‌گردد.

تناسبات بدست آمده ذکر شده، بر اساس تحقیقات بر روی سیستم معادلات تعادل دینامیکی (۷۶) و (۷۷) نگاشته شده‌اند. البته متذکر می‌گردم، آنچه بدست آمده، تنها در شرایط مانورهای سبک صادق است. به همین علت می‌بایست در دیاگرام بالانس، عبارتی که محدوده آن را مشخص می‌نماید، درج گردد: در این دیاگرام تنها مقادیری از زاویه تریم و وضعیت زاویه بالکهای پاشنه نشان داده شده‌اند که در محدوده مقادیر خطی ضرایب $C_{y\pi}$ و $C_{x\pi}$ و $m_{z\pi}$ قرار دارند.

دیاگرام بالانس، امکان تعیین زاویه‌ای را می‌دهد که تحت آن، بالک-ها امکان تبدیل وضعیت تریم استاتیکی زیردریایی به وضعیت اصلی حرکتی با سرعت از پیش تعیین شده را فراهم کرده و همچنین زاویه تریمی که به ازای آن این حرکت تداوم می‌یابد را مشخص نماید. در عین حال، این دیاگرام آنالیز نیروها و ممانهای موثر بر روی زیردریایی را امکان‌پذیر می‌کند. در شکل ۱۲ این نیروها و ممان‌ها در هنگام حرکت زیردریایی با سرعت v_1 (مشخص شده در دیاگرام بالانس) نشان داده شده‌اند.

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik-0}} \delta_k = +\infty, \quad \lim_{v \rightarrow v_{ik+0}} \delta_k = -\infty \quad (97)$$

بدین ترتیب بدون توجه به علامت مقدار ثابت A ، سرعت معکوس inverse به صورت یک پارامتر مجانبی بوده که با نزدیک شدن زاویه بالانس‌کننده وضعیت بالکهای پاشنه به آن، این زاویه دارای گسست بی‌نهایت از علامت متغیر خواهد شد. طبیعتاً مقادیر بی‌نهایت بزرگ زاویه که در این بخش در خصوص آن بحث شده است، دارای ماهیت فیزیکی نمی‌باشد. اما از سویی نیز برقراری یک تناسب مفید و کاربردی در اینجا، امکان توضیح قوانین عمومی برای شرایط واقعی را امکان‌پذیر می‌سازد.

به ازای برخی مقادیر سرعت حرکت که آن را با کمک v_0 نمایش می‌دهیم، ممکن است زاویه بالانس‌کننده وضعیت بالکهای پاشنه به سمت صفر میل نماید. این پدیده را می‌توان در هنگامیکه صورت کسری عبارت (۸۹) به سمت صفر میل می‌کند، نشان داد. در این حالت خواهیم داشت:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2gh\pi}{C_y^\alpha}} \sqrt{\frac{C_{y0}}{C_{x0}\bar{y}_p + C_{y0}\bar{b}_\alpha - m_{z0}}} \quad (98)$$

از همین جا می‌توان نتیجه گرفت که، تنها زمانی سرعت v_0 موجودیت می‌یابد که مقدار زیر رادیکال دوم، مقادیر مثبت را دربرگرفته و یا برابر با صفر گردد. در اینجا $v_0 = 0$ می‌باشد. حال به محاسبه مقادیر فرض مربوط به δ_k تحت شرایط $v \rightarrow \infty$ و در هنگامیکه $\bar{b}_{h\alpha} = 0$ باشد می‌پردازیم. خواهیم داشت:

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \delta_k = \frac{m_{z0} - C_{x0}\bar{y}_p - C_{y0}\bar{b}_\alpha}{C_y^k \bar{l}_k} \quad (99)$$

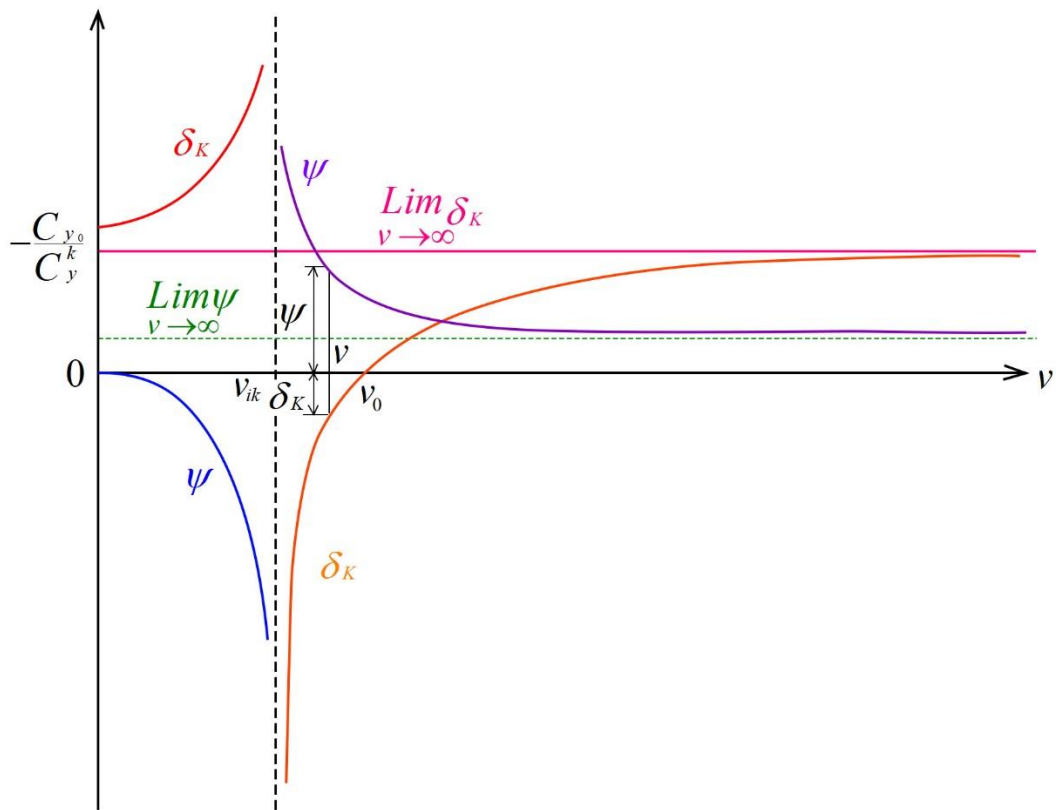
مقدار ثابت بدست آمده در ارتباط با مقدار مطلق تناسب‌های مقادیر C_{y0} ، m_{z0} و \bar{y}_p و همچنین علامات آنها می‌تواند به صورت‌های منفی یا مثبت باشد. پس از آنکه تمامی قوانین تابع $\delta_k(v)$ توصیف گردید، می‌توان به راحتی، خواص زاویه بالانس‌کننده تریم را توضیح داد. اغلب اوقات می‌توان با جاگذاری عبارت (۹۳) در (۸۶)، عبارت زیر را بدست آورد:

$$\lim_{v \rightarrow 0} \psi = 0 \quad (100)$$

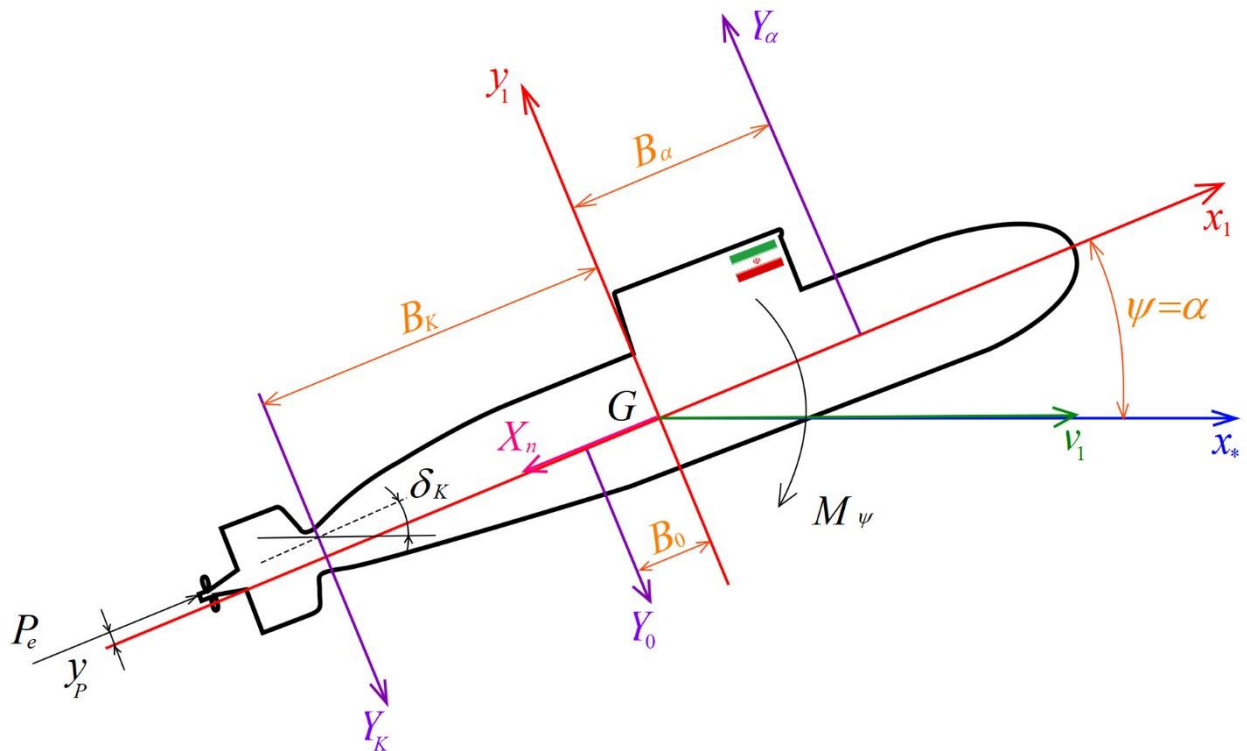
این نتیجه همچنین در هنگامی که زیردریایی دارای تریم استاتیکی گردیده قابل انتظار است. در ادامه با بهره‌گیری از عبارات (۹۴) و (۹۵) خواهیم داشت:

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik-0}} \psi = -\infty \cdot \text{sign} \left(\lim_{v \rightarrow v_{ik-0}} \delta_k \right) \quad (101)$$

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik+0}} \psi = -\infty \cdot \text{sign} \left(\lim_{v \rightarrow v_{ik+0}} \delta_k \right) \quad (102)$$



شکل ۱۱- نمودارهای δ_K و ψ در شرایط مختلف بر حسب سرعت (دیاگرام بالانس)



شکل ۱۲- نیروها و ممان‌های مؤثر بر زیردریایی در هنگام تنظیم تریم به کمک یک جفت بالک عقب

$C_{y0} < 0$ و $m_{z0} > 0$ و 0 رعایت گردیده‌اند. باید به این نکته توجه داشت که معادلات (۱۰۵) و (۱۰۶) تنها برای مانورهای سبک صادق هستند. به همین علت نیز در دیاگرام بالانسی، زوایای ψ و δ_H ، نباید از محدوده خطی ضرایب $C_{x\pi}$ و $C_{y\pi}$ و $m_{z\pi}$ برحسب زوایای حمله و وضعیت زاویه بالکهای سینه عدول نمایند. در شکل ۱۴ زیردریایی نشان داده شده است که با سرعت v_2 در وضعیت حرکتی اصلی حرکت کرده و در دیاگرام بالانسی نیز مشخص شده است.

خطوط مستقیم نشان داده شده در تصاویر شکل ۱۱ و شکل ۱۳، نشان می‌دهند که در هنگام بهره‌گیری از بالکهای پاشنه زوایای بالانسی به ازای تنها سرعت‌های متوسط یا بالا، به صفر رسیده و یا مقادیر کمی را تشکیل می‌دهند. اما در خصوص بهره‌گیری از بالک‌های سینه باید گفت که: معقولانه‌تر است که از آنها برای تامین وضعیت حرکتی اصلی، در مقادیر پائین یا متوسط سرعت استفاده نماییم.

۳- حال به بررسی وضعیتی می‌پردازیم که بالانس کردن زیردریایی با تریم استاتیکی در وضعیت حرکت اصلی با کمک بالک‌های پاشنه صورت گرفته و بالک‌های سینه در وضعیت زاویه‌ای δ_{H3} ثابت شده‌اند. در این هنگام، مقادیر معلوم عبارتند از $Q = p = \delta_H = \delta_{H3}$ و 0 و معادله‌های تعادل دینامیکی (۷۶) و (۷۷) شکل زیر را به خود خواهند گرفت:

$$C_{y0} + C_y^\alpha \psi + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_{H3} = 0 \quad (111)$$

$$C_y^\alpha (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha}) \psi - C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \delta_k + m_z^H \delta_{H3} = 0 \quad (112)$$

برای آنکه بتوانیم حل سیستم معادلاتی را به شکلی بنویسیم که راحت‌تر باشد، می‌نویسیم:

$$\delta_k = \delta_{k0} + \Delta \delta_k ; \quad \psi = \psi_0 + \Delta \psi \quad (113)$$

و فرض می‌کنیم که: δ_{k0} و ψ_0 زوایای بالانسی تحت شرایط $\delta_{H3} = 0$ هستند. در این حالت مقادیر $\Delta \delta_k$ و $\Delta \psi$ بعنوان مقادیر اصلاحی برای زوایای فیکس شده بالک‌ها δ_{k0} و ψ_0 خواهند بود. مقادیر یاد شده با کمک دیاگرام بالانسی بالکهای پاشنه مشخص شده‌اند. در ادامه با توجه به اینکه سیستم‌های معادلاتی (۱۱۱) و (۱۱۲) خطی هستند، خواهیم داشت:

$$\Delta \delta_k = D_k \delta_{H3} ; \quad \Delta \psi = A_k \delta_{H3} \quad (114)$$

که در آنها: D_k و A_k ضرایب مستقیمی هستند که در هنگام ثابت شدن بالکهای سینه به میزان یک درجه به مقادیر اصلاحی $\Delta \delta_k$ و $\Delta \psi$ مرتبط می‌گردند. در این حالت تمامی مسئله به یافتن

۲- در اینجا به بررسی وضعیتی می‌پردازیم که بالانس زیردریایی در وضعیت اصلی حرکتی با روش تریم استاتیکی و با کمک بالکهای سینه صورت پذیرفته و بالکهای پاشنه در وضعیت خنثی، یعنی غیر فعال قرار دارند. در این حالت معادلات (۷۶) و (۷۷) شکل زیر را به خود می‌گیرند:

$$C_{y0} + C_y^\alpha \psi + C_y^H \delta_H = 0 \quad (105)$$

$$C_y^\alpha (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha}) \psi - C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \delta_k = 0 \quad (106)$$

با توجه به عبارت (۱۰۵) بلافاصله می‌توان مقدار ψ را بدست آورد:

$$\psi = -\frac{C_{y0}}{C_y^\alpha} - \frac{C_y^H}{C_y^\alpha} \delta_H \quad (107)$$

پس از جاگذاری عبارت (۱۰۷) در (۱۰۹) نیز خواهیم داشت:

$$\delta_H = \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha})}{C_y^H (\bar{l}_H - \bar{b}_{h\alpha})} \quad (108)$$

در اینجا نیز همانطوریکه قبلاً داشتیم، زاویه بالانسی وضعیت بالکهای سینه، به دلیل تاثیرات ناشی از ممان بازگرداننده استاتیکی، بستگی به سرعت حرکت زیردریایی دارند. تنها به همین علت است که در سرعت‌های مختلف حرکتی، زاویه بالانسی تریم نیز متفاوت است. با توجه به آنچه که گفته شد و قبلاً نیز داشتیم به راحتی می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\lim_{v \rightarrow 0} \delta_k = -\frac{C_{y0}}{C_y^H} ; \quad \lim_{v \rightarrow 0} \psi = 0 \quad (109)$$

$$\left. \begin{aligned} \lim_{v \rightarrow \infty} \delta_H &= -\frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_\alpha}{C_y^H \bar{l}_H} \\ \lim_{v \rightarrow \infty} \psi &= -\frac{C_{y0}}{C_y^\alpha} - \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_\alpha}{C_y^\alpha \bar{l}_H} \end{aligned} \right\} (110)$$

همچنین سرعتی که در آن زاویه بالانسی وضعیت بالک‌های سینه به سمت صفر میل می‌کند، به همان صورتی است که در آن در هنگام بهره‌گیری از بالکهای پاشنه، زاویه تریم بالانسی به سمت صفر میل می‌کند. تنها وجه تمایز در مقایسه با نتایج بدست آمده در هنگام بهره‌گیری از بالکهای پاشنه، این است که در اینجا $l_H < 0$ می‌باشد. به همین علت، عبارت $\bar{l}_H - \bar{b}_{h\alpha}$ در مخرج فرمول (۱۰۸) قرار گرفته و به سمت صفر میل نخواهد کرد و حل معادلات (۱۰۷) و (۱۰۸) دارای ویژگی خاصی نخواهد بود. این نکته بیانگر پدیده‌هایی می‌باشد که در آن بالک‌ها، جلوتر از مرکز فشار قرار گرفته و سرعت معکوس inverse وجود ندارد.

در شکل ۱۳ دیاگرام بالانسی برای بالکهای سینه نشان داده شده است. همانطوریکه قبلاً نیز داشتیم در اینجا نیز شرایط $\bar{y}_p >$

نکته را متذکر می‌گردد که باید پس از حل معادلات یادشده (تعیین $\delta_k = \delta_{k0} + D_k \delta_{H3}$ و $\psi = \psi_0 + A_k \delta_{H3}$)، این پاسخ‌ها حتماً کنترل گردند. چنانچه مشخص گردد که مقادیر δ_k و ψ در محدوده خطی ضرایب $C_{y\pi}$ ، $C_{x\pi}$ و $m_{z\pi}$ قرار دارند، بنابراین امکان بالانس کردن زیردریایی در وضعیت حرکتی اصلی با بهره‌گیری از بالک‌های پاشنه و ثابت کردن بالک‌های سینه، تحت وضعیت خاص وجود خواهد داشت و صحت مقادیر بدست‌آمده کنترل می‌گردد.

چنانچه مقادیر δ_k و ψ خارج از محدوده خطی ضرایب یاد شده قرار گیرند، حل مسئله با بهره‌گیری از تقریب‌های خطی، نادرست خواهد بود. علاوه بر آنچه که گفته شد، شکل ۱۵، توضیح روشنی، در خصوص جبران ثابت بودن وضعیت زاویه بالک‌های سینه با کمک بالک‌های پاشنه و افزایش سرعت حرکت در مقایسه با سرعت معکوس inverse بیان می‌دارد.

۴- حال فرض می‌کنیم در زیردریایی دارای تریم استاتیکی، وضعیت زاویه‌ای بالک‌های پاشنه تحت زاویه δ_{k3} ثابت شده و لازم است که تأمین وضعیت حرکتی اصلی با کمک بالک‌های سینه صورت پذیرد. بدین ترتیب لازم است مقادیری از زاویه δ_H برای بالک‌های سینه را بیابیم که به ازای آن زیردریایی تحت شرایط یاد شده به حرکت خود با عمق ثابت، ادامه داده و زاویه تریم ψ نیز بصورتی باشد که این حرکت، تداوم یابد. این مسئله عیناً قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است. عملاً چنانچه فرض نماییم که:

$$\delta_H = \delta_{H0} + \Delta\delta_H \quad \text{و} \quad \psi = \psi_0 + \Delta\psi \quad (123)$$

(که در آن: δ_{H0} و ψ_0 زوایای بالانسی به ازای $\delta_{k3} = 0$ می‌باشد) بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Delta\delta_H = D_H \delta_{k3} \quad \text{و} \quad \psi = A_H \delta_{k3} \quad (124)$$

بدین ترتیب برای D_H و A_H سیستم معادلاتی را بدست می‌آوریم که از سیستم (۱۱۶) متمایز می‌گردد. این تمایز را در اندیس‌های "H" و "K" می‌توان یافت که جایگزین یکدیگر شده‌اند. با بهره‌گیری از چنین تقارنی، برای معادلات دارای اندیس "K" "H" مشابه با آنچه که (۱۱۷) در داشتیم، می‌توان نوشت:

$$D_H = -\frac{C_y^k \bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha}}{C_y^H \bar{l}_H - \bar{b}_{h\alpha}} \quad (125)$$

$$A_H = -\frac{C_y^k \bar{b}_k - \bar{b}_k}{C_y^H \bar{l}_H - \bar{b}_{h\alpha}} \quad (126)$$

در ادامه با توجه به ارتباط D_H و A_H با سرعت حرکت، خواهیم داشت:

$$\lim_{v \rightarrow 0} D_H = -\frac{C_y^k}{C_y^H} < 0 \quad ; \quad \lim_{v \rightarrow 0} A_H = 0 \quad (127)$$

$$\lim_{v \rightarrow \infty} D_H = -\frac{C_y^k \bar{l}_k}{C_y^H \bar{l}_H} > 0$$

مقادیر D_k و A_k معطوف می‌گردد. حل کردن مسئله ذکر شده، چندان پیچیده نمی‌باشد. برای اینکار لازم است در معادلات (۱۱۱) و (۱۱۲) به جای مقادیر δ_k و ψ ، مقادیر معادل آنها به ترتیب $\delta_{k0} + D_k \delta_{H3}$ و $\psi_0 + A_k \delta_{H3}$ را قرار دهیم، بنابراین خواهیم داشت:

$$[C_{y0} + C_y^{\alpha} \psi_0 + C_y^k \delta_{k0}] + C_y^{\alpha} A_k \delta_{H3} \quad (115) \\ + C_y^k D_k \delta_{H3} + C_y^H \delta_{H3} = 0 \\ [C_y^{\alpha} (\bar{b}_{\alpha} - \bar{b}_{h\alpha}) \psi_0 - C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \delta_{k0}] \\ + C_y^{\alpha} (\bar{b}_{\alpha} - \bar{b}_{h\alpha}) A_k \delta_{H3} +$$

$$+ m_z^k D_k \delta_{H3} + m_z^H \delta_{H3} = 0$$

در اینجا عبارات داخل کروشه‌ها برابر با صفر بوده و خواهیم داشت:

$$C_y^{\alpha} A_k + C_y^k D_k + C_y^H = 0 \quad (116)$$

$$C_y^{\alpha} (\bar{b}_{\alpha} - \bar{b}_{h\alpha}) A_k + m_z^k D_k + m_z^H = 0$$

با حل این سیستم خواهیم داشت:

$$D_k = -\frac{C_y^H \bar{l}_H - \bar{b}_{h\alpha}}{C_y^k \bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha}} \quad (117)$$

$$A_k = -\frac{C_y^H \bar{b}_H - \bar{b}_k}{C_y^{\alpha} \bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha}}$$

همان‌طوری که انتظار می‌رود، به دلیل تاثیرات ناشی از ممان بازگرداننده طولی، مقادیر D_k و A_k بستگی به سرعت حرکت زیردریایی دارند. همچنین داریم:

$$\lim_{v \rightarrow 0} D_k = -\frac{C_y^H}{C_y^k} < 0 \quad ; \quad \lim_{v \rightarrow 0} A_k = 0 \quad (118)$$

در سرعت‌های معکوس inverse مقادیر D_k و A_k دچار گسست خواهند شد. مشخصه‌های این گسست را می‌توان به راحتی با بهره‌گیری از شکل ۹ بدین صورت نشان داد:

$$\lim_{v \rightarrow v_{ik-0}} D_k = -\infty \quad ; \quad \lim_{v \rightarrow v_{ik+0}} D_k = +\infty \quad (119)$$

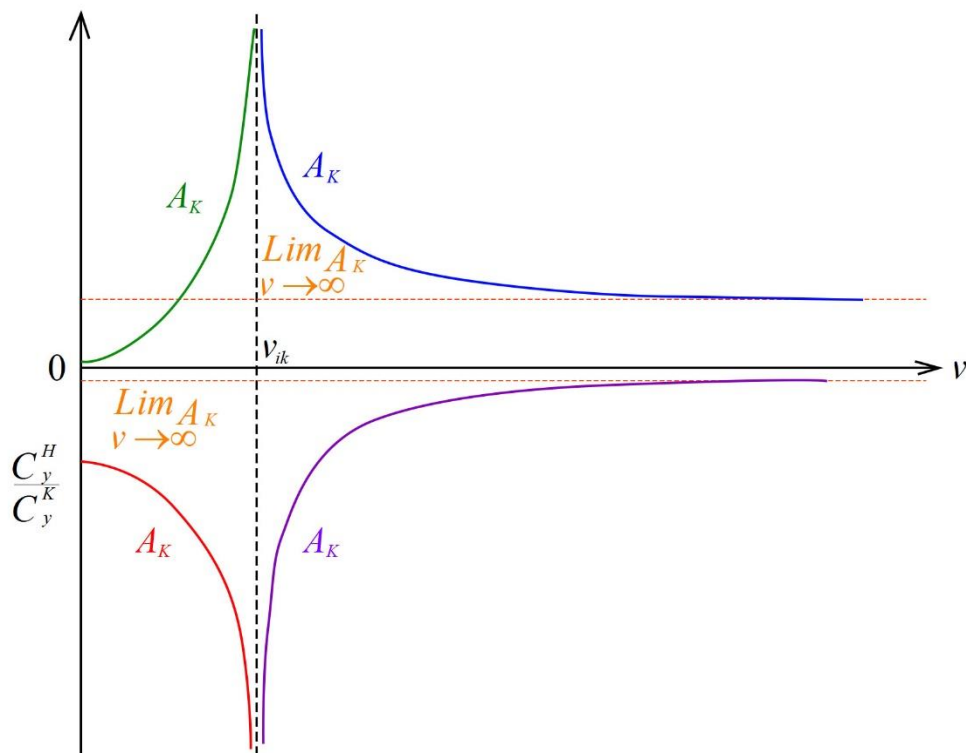
$$\lim_{v \rightarrow v_{ik-0}} A_k = +\infty \quad ; \quad \lim_{v \rightarrow v_{ik+0}} A_k = -\infty \quad (120)$$

به ازای $v > 0$ ، این توابع، دارای پاسخ صفر نبوده و به سمت مقادیر مجانبی خود میل می‌نمایند:

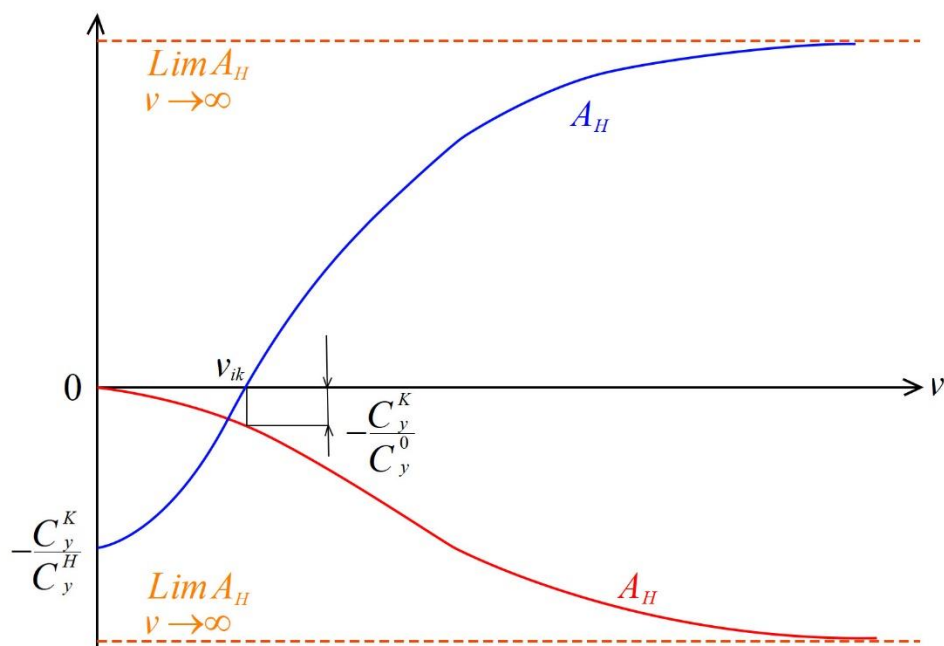
$$\lim_{v \rightarrow \infty} D_k = -\frac{C_y^H \bar{l}_H}{C_y^k \bar{l}_k} > 0 \quad (121)$$

$$\lim_{v \rightarrow \infty} A_k = -\frac{C_y^H \bar{b}_H - \bar{b}_k}{C_y^{\alpha} \bar{l}_k} < 0 \quad (122)$$

تناسبات بدست آمده، امکان ترسیم نمودار توابع $D_k(v)$ و $A_k(v)$ را فراهم می‌کنند (شکل ۱۵). بهره‌گیری از این نمودار به صورت عملی، مشکلی به همراه نخواهد داشت. تنها یک



شکل ۱۵- نمودار بالانس کردن زیردریایی با تریم استاتیکی در وضعیت حرکت اصلی با کمک بالک‌های پاشنه و در وضعیت زاویه‌ای δ_{H3} ثابت بالک‌های سینه همراه با ترسیم نمودار توابع $A_K(v)$ و $D_K(v)$



شکل ۱۶- ترسیم نمودار توابع $A_H(v)$ و $D_H(v)$ در بالانس کردن زیردریایی دارای تریم استاتیکی در وضعیتی که زاویه‌ای بالک‌های پاشنه تحت زاویه δ_{K3} ثابت شده و لازم است که تأمین وضعیت حرکتی اصلی با کمک بالک‌های سینه صورت گیرد

۷- نتیجه‌گیری

تمامی پارامترهای زیردریایی با بهره‌گیری از معادله حرکت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مانورهای پایدار در صفحه عمودی این معادلات با برابر صفر قراردادن مجموع مولفه‌های نیروهای موثر بر روی محورهای سیستم مختصاتی و مجموع ممان‌های موثر بر روی صفحه دیامتریال بدست می‌آیند. به همین دلیل معادله مانور پایدار را بنام «معادلات تعادل دینامیکی» نیز می‌نامند. در این مطالعه معادلات تعادل دینامیکی در سطح عمودی در مانورهای سبک و شدید مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نیروها و ممان‌های اعمالی بر روی زیردریایی شامل ۱- نیروها و ممان‌های ناشی از شناوری و وزن زیردریایی، ۲- نیروها و ممان‌های پدید آمده به دلیل کار مکانیزم تولید نیروی حرکتی، ۳- نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی تحلیل گردید. سیستم معادلاتی بدست آمده برای هرگونه مانور پایدار در صفحه عمودی را «سیستم معادلاتی تعادل دینامیکی برای مانورهای شدید» نام‌گذاری کرده‌اند. در بررسی مانورهای سبک مشخص گردید خطی کردن معادلات فوق برحسب زاویه ψ تنها تا زمانی امکان‌پذیر است که از نقطه نظر عملی تقریبی $\cos\psi = 1$ و $\sin\psi = \psi$ قابل دستیابی باشند. در اینجا لازم به ذکر است که در این شرایط، حتی به ازای $\psi = 15^\circ$ میزان خطای پدید آمده در مقادیر تقریبی عبارات ذکر شده از ۳ درصد بیشتر نخواهد بود. روش‌های بالانسینگ زیردریایی شامل: ۱- بالانس کردن با تنظیم بارها، ۲- بالانس کردن با بهره‌گیری از یک جفت بالک افقی و ۳- بالانس کردن با بهره‌گیری از دو جفت بالک بحث شد. مشخص شد که ممان بازگرداننده استاتیکی در مقادیر پایین سرعت حرکت بسیار حائز اهمیت می‌باشد و بالعکس در سرعت‌های بالا، نقش این ممان چندان تعیین‌کننده نیست. همچنین سرعت معکوس بالک‌های پاشنه مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که تامین وضعیت حرکتی اصلی با کمک بالک‌های پاشنه تحت شرایط $\nu = \nu_{ik}$ امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲-۳- بالانس کردن زیردریایی در وضعیت حرکتی اصلی

با کمک دو جفت بالک-تنظیم تریم مطلق

فرض می‌کنیم که تامین وضعیت اصلی حرکتی در زیردریایی با تریم استاتیکی با زاویه تریم Ψ_3 از پیش تعیین شده، مدنظر باشد. در این هنگام معادله (۷۶) و (۷۷) شکل زیر را به خود خواهد گرفت:

$$C_{y0} + C_y^\alpha \psi_3 + C_y^k \delta_k + C_y^H \delta_H = 0 \quad (129)$$

$$C_y^\alpha (\bar{b}_\alpha - \bar{b}_{h\alpha}) \psi_3 - C_{x0} \bar{y}_p + m_{z0} + m_z^k \delta_k + m_z^H \delta_H = 0$$

که در آن مقادیر نامعلوم، δ_k و δ_H خواهند بود. حل سیستم (۱۳۰) شکل زیر را خواهد داشت:

$$\delta_k = \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_H}{C_y^k (\bar{b}_H - \bar{b}_k)} + \frac{C_y^\alpha \bar{l}_H - \bar{b}_{h\alpha}}{C_y^k \bar{b}_H - \bar{b}_k} \psi_3 \quad (130)$$

$$\delta_H = \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_k}{C_y^H (\bar{b}_k - \bar{b}_H)} + \frac{C_y^\alpha \bar{l}_k - \bar{b}_{h\alpha}}{C_y^H \bar{b}_k - \bar{b}_H} \psi_3 \quad (131)$$

همانطور که می‌بینید هریک از زوایای δ_k و δ_H بستگی به سرعت حرکت دارند. نکته دیگر حائز اهمیت در اینجا، تامین وضعیت حرکتی اصلی، با زاویه تریم از پیش تعیین شده می‌باشد. البته امکان این کار با توجه به مقادیر δ_k ، δ_H و ψ_3 که می‌بایست در محدوده خطی ضرایب $C_{y\pi}$ ، $C_{x\pi}$ ، $m_{z\pi}$ باشند، دارای محدودیت است. در موارد خاص، در هنگامی که $\psi_3 = 0$ می‌باشد به جای (۱۳۰) و (۱۳۱) می‌توان نوشت:

$$\left. \begin{aligned} \delta_k &= \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_H}{C_y^k (\bar{b}_H - \bar{b}_k)} \\ \delta_H &= \frac{m_{z0} - C_{x0} \bar{y}_p - C_{y0} \bar{b}_k}{C_y^H (\bar{b}_k - \bar{b}_H)} \end{aligned} \right\} \quad (132)$$

از آنجایی که در ساختار ممان‌های موثر بر روی زیردریایی، ممان بازگرداننده استاتیکی طولی وجود ندارد، این روش از بالانس کردن زوایا، بستگی به سرعت ندارد. گذر از یک میزان سرعت به سرعت دیگر، نیازمند تغییر در وضعیت زاویه‌های بالک‌ها نیست. به همین دلیل، روش بالانسی یادشده، تحت عنوان «تنظیم تریم مطلق» نام‌گذاری می‌گردد. با توجه به فرمولهای (۱۳۲) درمی‌یابیم که علامت زوایای δ_k و δ_H در این روش بالانسی، بستگی به علامت m_{z0} و C_{y0} ، \bar{y}_p دارد.

با یادآوری این نکته که هریک از روشهای بالانسی نام برده شده تا به حال را می‌توان به صورت مستقل و یا ترکیبی از یکدیگر برای زیردریایی، به کار بست، بحث تحقیق بر روی روشهای ساده بالانسی برای تامین وضعیت حرکتی اصلی را پایان می‌بریم.

<https://sites.google.com/site/jkosme76/archives/back-issues>,
DOI:[10.5916/jkosme.2014.38.10.1217](https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.10.1217).

- 13-Javadi. M, Manshadi .M.D, Kheradmand .S, Moonesun .M.(2015) "Experimental investigation of the effect of bow profiles on resistance of an underwater vehicle in free surface motion", Journal of Marine Science and Application-Springer. http://link.springer.com/article/10.1007/s11804-015-1283-0?sa_campaign=email/event/articleAuthor/onlineFirst, DOI: [10.1007/s11804-015-1283-0](https://doi.org/10.1007/s11804-015-1283-0).
- 14-Grimble .M, van .G,(1993) der Molen, E.Liceaga-Castro, Submarine Depth and Pitch Control, IEEE Conf.Contr.Appl. Vancouver, Canada,.
- 15-Daniel ,C.J, Richards R.J.(1982) A Multivariable Controller for Depth Control of a Submersible Vehicle, Inst. of Meas. and Cont. Conf. on Application of Multivariable System,.
- 16-Griffin ,M.J,(2002) Numerical Prediction of the Maneuvering Characteristics of Submarines Operating Near the Free Surface, MIT, PhD thesis.
- 17-Moonesun.M, Javadi.M, Mousavizadegan .S.H., Dalayeli.H, Korol.Y.M, Gharachahi. A,(2016) Computational Fluid Dynamics Analysis on the Added Resistance of Submarine due to Deck Wetness at Surface Condition, Journal of Engineering for the Maritime Environment (Ins. Mechanical Engineering-Part M, SAGE). DOI: [10.1177/1475090215626462](https://doi.org/10.1177/1475090215626462).
- 18-Moonesun.M, Korol.Y.M, Dalayeli. H, Tahvildarzade.D, Javadi.M Jelokhaniyan.M, Mahdian.A,(2016)
 - 1- динамика подводной лодки (Submarine Dynamics) (in Russian), 1970, V.Razhdenstvenski.
 - 2- элементарная теория подводная лодка (Principles of Submarine Theory) (in Russian), 1977, U.Bolshakob.
 - 3- подводных Устройство лодок (Submarine Construction) (in Russian), 2008, C.Prasolov, M.Amitin.
 - 4- Wu, GX (1993). "Hydrodynamic Forces on a Submerged Circular Cylinder Undergoing Large-amplitude Motion," J Fluid Mech.
 - 5- Joubert .P.N,(2004), "Some aspects of submarine design: part 1: Hydrodynamics", Australian Department of Defence,.
 - 6- Renilson.M,(2015) Submarine Hydrodynamics.
 - 7- Feldman.J, Revised standard submarine equations of motion, Naval Ship Research and Development Centre, Wash. DC, Tech. Rep.DTNSRDC-SPD-0393-09.
 - 8- Fossen.T.I,(1999) Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons Ltd.
 - 9- Spencer .J.B, Stability and Control of Submarines, Parts I-IV, Reprint of the Royal Naval Scientific Service.
 - 10-Gertler .M, G.R.Hagen, Standard Equations of Motion for Submarine Simulation, Naval Ship Research and Development Centre, Wash. DC, Tech. Rep. RNSRDC2510.
 - 11-Richards .R.J,(1981) D.P.Stoten, Depth Control of a Submersible Vehicle, Int.Shipbuilding Progress.
 - 12-Monesun .M, Korol .Y.M., Tahvildarzade.D, Javadi .M, (2014) "Practical scaling method for underwater hydrodynamic model test of submarine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering.

Optimization on Submarine Stern Design, Journal of Engineering for the Maritime Environment (Ins. Mechanical Engineering. DOI: [10.1177/1475090215625673](https://doi.org/10.1177/1475090215625673)).

- 19- Booth .T.B, (1983) Optimal depth control of an underwater vehicle under a seaway, RINA Symp, Naval Submarines, London.
- 20-Lisegaga Castro .E, Molen. M, (1995) Submarine H_∞ depth control under wave disturbances, IEEE Transactions on Control Systems Technology .
- 21-Moonesun.M, Ghasemzadeh.F , Korol.Y, Nikrasov.V, Yastreba.A, Ursolov.A, Mahdian.A, (2016) Technical Notes on the Near Surface Experiments of Submerged Submarine, International Journal of Maritime Technology, IJMT.
- 22-Dogan.P.P,(1967), Optimum stabilization of a near surface submarine in random seas, Cambridge, MIT, AD651821.