

بررسی اثر انحنا عرضی شناور تندرو بر مولفه‌های هیدرودینامیکی آن

امین نجفی*

مجتبی علوی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

چکیده

با توجه به کاربردهای مختلف شناورهای تندرو، تقاضا برای استفاده از این شناورها افزایش یافته است. از اهداف مهم طراحی این دسته از شناورها، دست یابی به سرعت‌های بالاتر می‌باشد که یکی از موانع این مهم مسئله ناپایداری طولی می‌باشد. جهت جلوگیری از وقوع ناپایداری طولی در شناور روش‌های مختلفی بیان شده است که از آن جمله می‌توان به اضافه نمودن المان‌های کنترلی مانند اینترسیتور، تریم تب و... به بدنه شناور اشاره کرد. از مهم‌ترین معایب استفاده از این المان‌ها موضوع تعمیر و نگهداری و کنترل آن‌ها می‌باشد، در نتیجه اگر بتوان ناپایداری طولی شناور را به روشی حل کرد که نیاز به تعمیرات و نگهداری نداشته باشد مفید و عملی خواهد بود. در این تحقیق روش جدیدی جهت رفع ناپایداری طولی شناور تندرو ارائه شده است. در این روش با استفاده از انحنا عرضی بدنه ناپایداری شناور رفع گردیده است. جهت بررسی تأثیر انحنا عرضی بدنه از روش عددی استفاده شده است. همچنین جهت اعتبارسنجی روش عددی، از تست مقاومت شناور در حوضچه کشش استفاده شده است. شناور کوگار یک شناور تندرو تک بدنه هاردچاین با ددرایزی ثابت در پاشنه شناور می‌باشد. از تست تجربی پارامترهایی چون مقاومت، تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل حاصل می‌شوند که این پارامترها جهت اعتبارسنجی روش عددی نیز به کار برده می‌شوند. نتایج نهایی در قالب تأثیر انحنا بر ناپایداری طولی، مقاومت و زاویه‌ی تریم دینامیکی برای سرعت‌های ورودی مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که، تغییر انحنا عرضی تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی ناپایداری طولی دارد.

واژه‌های کلیدی: ناپایداری طولی، انحنا عرضی، شناور تندرو، شناور کوگار، روش عددی.

The effect of the transverse curvature of planning hull on Longitudinal Stability

A. Najafi

M. Alavi

Department of Mechanical Engineering, University of Imam hossein, Tehran, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Imam hossein, Tehran, Iran

Abstract

Due to the various applications of planning hulls, the demand for these floats has increased. One of the important goals in designing this category of boats is achieving higher speeds. One of the factors preventing this, is the longitudinal instability problem. In this regard, various methods have been proposed to prevent the occurrence of longitudinal instability in the hull, including the addition of control elements such as the interceptors, the trimtab etc. The main disadvantages of using these elements are the maintenance and control of these elements. As a result, if the vessel's longitudinal instability solved in a way that does not need maintenance it will be useful and practical. In this research, a new method is proposed to solve vessel's longitudinal instability. In this method, the vessel's instability has been removed using the transverse curvature. The numerical method has been used to investigate the effect of the transverse curvature of the hull. For validation of the numerical method, a planning hull resistance test in the towing tank has been used. Cogar hull is a hardchine single-hull planning hull with constant deadrise in stern. From the empirical tests parameters such as resistance, dynamical trim and center of gravity rise are obtained, which are also used to validate the numerical method. The final results are presented in the form of curvature effect on longitudinal instability, resistance and dynamic trim for different input velocities. According to the results, the change in the curvature has a significant effect on longitudinal instability.

Keywords: Longitudinal instability, transverse curvature, planning hull.

دینامیکی و کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور می‌شود. در چند سال اخیر، روش دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل قدرت غیرقابل چشم پوشی آن در تحلیل و تجزیه جریان اطراف یک شناور و پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر آن جایگاه ویژه‌ای در این زمینه پیدا کرده است. یکی از نخستین مطالعات در مورد شبیه‌سازی عددی شناورهای تندرو مربوط به کاپوننتو [۲] است که از حل گر RANS^۱ برای تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور تندرو استفاده کرد. به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در کنار تست مدل‌های آزمایشگاهی می‌تواند تعداد مدل‌های ساخته شده برای تست تجربی را به مقدار زیادی کاهش دهد و این یعنی صرفه‌جویی در هزینه و زمان. لطفی و همکاران [۳] و کلمنت و بلونت [۴] تست‌های تجربی را برای

۱- مقدمه

به دلیل استفاده روزافزون از شناورهای تندرو در کاربردهای مختلف اعم از نظامی و غیرنظامی، روز به روز بر اهمیت آن‌ها افزوده شده و تقاضا برای استفاده از این شناورها در حال افزایش است. به همین علت تعداد این دست شناورها به میزان قابل چشم‌گیری افزایش یافته است. برای این شناورها طراحی مناسب فرم بدنه به دلیل تأثیرگذاری آن روی وزن شناور و همچنین بارهای وارده بر آن و به دنبال آن هزینه‌های ناشی از آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به همین دلیل طراحی بهینه بدنه و ارائه مفاهیم و ایده‌های نو در بهینه‌سازی آن ضروری به نظر می‌رسد. نیروی برآ هیدرودینامیکی تولیدشده توسط سطوح پلنینگ یکی از دلایل مهم افزایش سرعت شناوری است [۱]. افزایش سرعت شناور سبب تغییر زاویه‌تری

¹ RANS(Reynolds-averaged Navier–Stokes equations)

[۱۱] با ارائه یک روش خاص برای طراحی هیدرودینامیکی شناورهای پروازی پدیده پورپویزینگ را نیز در بحث طراحی شناورها مورد بررسی قرارداد. وی با بیان آن که در بین داده‌های آزمایش شده آن سال‌ها، آزمایش‌های دی و هاگ بیشترین کاربرد را در طراحی شناورهای پروازی دارد، رابطه‌ای تجربی را برای پیش‌بینی تریم بحرانی شناورهای پروازی ارائه داد. در سال ۱۹۶۳ کلمنت و بلونت [۱۲] آزمایش‌هایی را برای اندازه‌گیری مشخصات هیدرودینامیکی شناورهای پروازی در آب آرام انجام دادند و نتیجه گرفتند که موقعیت طولی مرکز ثقل، اثر بسیار مهمی بر ناپایداری شناورهای پروازی دارد. محققین بسیاری نیز برای یافتن مکانیزم پورپویزینگ و پیش‌بینی آن تلاش کرده‌اند [۱۳]. حمید زراعتگر و همکارانش [۱۴] به منظور بررسی اثر زاویه خیز کف بر مقاومت و رفتار هیدرودینامیکی شناور منشوری پروازی، مدل ۱/۵ متری بدنه فریدزما با زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه را با شرایط یکسان در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس تست کرده‌اند. در این تحقیق مقاومت، تریم و بالآمدگی مرکز ثقل دو مدل با هم مقایسه شده است. این مقایسه نشان داد که با افزایش زاویه خیز کف در حالت پروازی، مقدار مقاومت افزایش، مقدار تریم کاهش و بالآمدگی مرکز ثقل شناور افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۶ آقای متویو و همکاران [۱۵] مقاله‌ای را در تاثیر زاویه خیز کف بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور دارای پله ارائه دادند. آن‌ها مدل شناور پروازی دارای پله را در زاویه‌های ددرایز مختلف و در دو سرعت متفاوت را، با مدل ریاضی بررسی و نتایج آن را ارائه کردند. پارامترهای هندسی مدل‌ها برابر و فقط در زاویه خیز کف بخش جلو و عقب شناور اختلاف است. در مرحله اول محاسبات، زاویه خیز کف در قسمت جلو شناور β_1 بین ۰ و ۱۵ درجه تغییر کرده است و زاویه خیز کف در قسمت پاشنه شناور $\beta_2 = 0$ است. با افزایش زاویه خیز کف در قسمت جلوی شناور، نیروی برآ کاهش و در نتیجه غرق شدگی پله افزایش و زاویه تریم کاهش یافته است. در مرحله دوم محاسبات، $\beta_1 = 0$ و $0 < \beta_2 < 15$ تغییر کرده است. در این حالت با افزایش زاویه خیز کف، تریم و غرق شدگی شناور بیشتر شده است. پرویز قدیمی و همکاران [۱۶] به ارائه یک مدل ریاضی برای ارزیابی آثار زاویه خیز کف متغیر بر عملکرد شناورهای پروازی پرداختند. در این پژوهش با تهیه یک مدل ریاضی، زاویه تریم، و مقاومت شناورهای پروازی با زاویه خیز کف متغیر محاسبه گردیده است. با استفاده از این روش اثرات تغییر زاویه خیز کف در راستای طول شناور بر عملکرد شناور مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که در صورتی که شیب تغییرات زاویه خیز کف در راستای طولی شناور کم باشد، عملکرد شناور نسبت به حالت منشوری شکل مطلوب‌تر خواهد بود. همچنین توصیه‌های زیر را از منظر طراحی در ارتباط با پدیده پورپویزینگ باید مدنظر قرارداد. ۱- برای هر شناور با یک ددرایز و فرم بدنه خاص، بین تریم بحرانی و ضریب برآ یک رابطه وجود دارد. ۲- بر طبق مشاهدات، هرچه میزان برآ کاهش یابد یا به عبارتی شناور سبک‌تر باشد احتمال کاهش تریم بحرانی و قرار گرفتن شناور در یک حالت نوسانی بالا خواهد رفت. همچنین برای از بین بردن و یا کاهش ناپایداری‌های طولی شناور راه‌کارهای زیر وجود دارد راه‌کار اول به پیش از طراحی شناور پروازی برمی‌گردد. در این زمان می‌توان وزن بیشتری را انتخاب کرد. در صورتی که وزن و ابعاد شناور مشخص باشد و قابل تغییر نباشد، دو روش را می‌توان پیش گرفت اول انتقال مرکز ثقل

یافتن پسی مدل‌هایی با ددرایزهای متفاوت را بررسی کردند. اگرچه کار آن‌ها با ارزش بود و داده‌های حاصل شده از آزمایش‌های آن‌ها، منبعی با ارزش برای کارهای آینده شد اما آزمایش‌های آن‌ها بسیار گران و زمان‌بر بوده و همچنین برای شرایط تعیین شده و محدودی معتبر هستند. نقطه آغاز مطالعات و مشاهدات در ارتباط با ناپایداری شناورهای پروازی را می‌توان در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی یافت. در آن سال‌ها، پرینگ [۵] گزارشی را مبنی بر پایداری شناورهای پروازی در صفحه قائم و احتمال وقوع پدیده پورپویزینگ منتشر کرد. چند سال بعد بنسنن [۶] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، شناورهای پروازی هاردچاین را با هدف بررسی پدیده ناپایداری پورپویزینگ مورد بررسی قرارداد. مشاهدات وی نشان داد که عواملی همچون وزن شناور و نقطه کشش شناور (معادل مرکز ثقل) بر پدیده پورپویزینگ تأثیرگذار هستند. وی در همه نتایج خود مشاهده کرد که در هر سرعت و وزن خاص، یک محدوده مشخص برای زاویه تریم وجود دارد. در صورتی که زاویه تریم از این زاویه کمتر باشد، پدیده پورپویزینگ رخ داده و اگر از این زاویه بیشتر باشد، پدیده پورپویزینگ رخ نخواهد داد. در سال ۱۹۴۳ کنت، داویدسون و لاک [۷] آزمایش‌های هدفمندی را به منظور مطالعه پدیده پورپویزینگ و برطرف کردن آن در شناورهای پروازی انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها دستاوردهای مهمی هم از نظر کاربردی و هم از نظر مفهومی داشت. از جمله این دستاوردها می‌توان به ۱- در طی پورپویزینگ دو حرکت نوسانی هیو و پیچ با پریود یکسان حاصل می‌شوند. ۲- فاز حرکات هیو و پیچ اتفاق افتاده باهم یکسان نیستند. ۳- عامل پدیده پورپویزینگ نیروی پیش‌برنده پروانه در راستای افقی است. با بررسی راهکارهای حذف و یا کاهش این پدیده کنت و همکاران راه‌های زیر را پیشنهاد دادند: ۱- تغییرات در پشت شناور منجر به تغییراتی در زاویه تریم بالا می‌شود. این زاویه تریم در نزدیکی نقطه هامپ و در اعداد فرود پایین رخ می‌دهد. بهترین روش برای محقق کردن این امر، اضافه کردن یک المان در راستای کیل به شناور و افزایش زاویه آن می‌باشد. ۲- ایجاد تغییرات در جلو شناور هم به عنوان روشی دیگر مطرح شد. مناسب‌ترین گزینه برای ایجاد تغییرات در بدنه جلوی، ایجاد یک حالت وارپ شکل (تغییرات ددرایز از پاشنه به سمت سینه) در بدنه است. هر چه میزان افزایش زاویه ددرایز در راستای طولی شناور بیشتر باشد، اثرات به صورت بیشتری قابل ملاحظه است. پیشنهاد اول کنت و همکاران یعنی استفاده از تریم تب و اینترسپتور مهم‌ترین روش برای حذف و یا کاهش پدیده پورپویزینگ می‌باشد. اینترسپتور قطعه‌ای است که همراه با یک صفحه نازک عمودی در پاشنه شناور نصب می‌شود [۸]. بررسی‌ها حاکی از آن است که این قطعه مقدار فشار در پاشنه شناور را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن اینترسپتور سطح خیس، ضریب پسا و تریم دینامیکی را نیز کاهش می‌دهد [۹]. نقطه عطف تمامی مطالعات کلاسیک انجام شده در سال ۱۹۵۲ توسط دی و هاگ [۱۰] در مجموعه‌ای از آزمایش‌های منظم قابل یافتن است. این آزمایش‌ها برای سه مجموعه شناور پروازی با زاویه ددرایز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه انجام شد. آن‌ها در نتایج به دست آمده حد بالایی تریم ناپایداری طولی را مورد توجه قرار دادند و نمودارهایی را برای این زاویه تریم رسم کردند و تریم بالا را تریم بحرانی نامیدند. نمودارهای رسم شده آن‌ها حاکی از این قضیه بود که زاویه تریم بحرانی شدیداً به ضریب نیروی لیفت بستگی دارد. در سال ۱۹۶۴ ساویتسکی

مدل‌ها مسائل را برای حل دو معادله انتقالی اضافی و معرفی یک مدل گردابی برای پیدا کردن تنش رینولدز ساده می‌کنند. در این روش معادله اصلاح فشار چندین بار حل شده و بر اساس آن سرعت‌ها اصلاح می‌شوند، تا پیوستگی در میدان محاسباتی حاصل شود. برای مدل سازی سطح تماس بین دو فاز آب و هوا از روش کسر حجمی^۳ استفاده می‌شود. در اینجا معادلات غیر دائم RANS و پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در این معادلات g_i بردار شتاب گرانش، چگالی ρ ، μ لزجت دینامیکی و τ_{ij} تانسور تنش رینولدز می‌باشد. در این شبیه‌سازی تانسور تنش رینولدز به کمک مدل آشفتگی K- ϵ مدل می‌شود.

۲-۲- معادلات توربولانسی

برای مدل کردن جریان آشفتگی اطراف شناور، از مدل آشفتگی K- ϵ که یکی از پرکاربردترین مدل‌های توربولانسی برای مسائل هیدرودینامیکی است، استفاده شده است. در این مدل برای محاسبه تنش‌های رینولدز، لزجت گردابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم و ϵ نرخ اتلافات انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم است. k و ϵ از معادلات انتقال (معادلات ۵، ۶ و ۷) حاصل خواهند شد.

نحوه محاسبه لزجت گردابی در نرم افزار Star CCM+ با حل‌گرهای عددی دیگر نظیر Ansys اندکی متفاوت است. نرم افزار Ansys برای محاسبه لزجت گردابی از معادله (۳) استفاده می‌کند در حالی که نرم افزار Star CCM+ لزجت گردابی را مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌کند.

$$\mu_t = \rho C_\mu k \hat{T}, \hat{T} = \max\left(\frac{k}{\epsilon}, C_\epsilon \sqrt{\frac{\theta}{\epsilon}}\right) \quad (4)$$

فریزگر و همکاران [۸] همچنین در روش‌های معمول در شبیه‌سازی حرکات شناور عموماً از تغییر شکل سازه و تأثیر آن بر نتایج صرف نظر شده و سازه شناور به صورت جسم صلب در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) \quad (6)$$

جمله تولید انرژی آشفتگی است و P_k در معادلات انتقال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = \mu_t \nabla \bar{U} \cdot (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{U} \left[(3\mu_t \nabla \cdot \bar{U} + \rho_K) \right] \quad (7)$$

مقادیر ثابت $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ و C_μ توسط تکرارهای متعدد داده برای طیف وسیعی از جریان‌های آشفتنه بدست آمده است. در این معادلات

به سمت جلو و دوم استفاده از تریم تب در انتهای شناور. در این تحقیق برای کاهش و یا حذف ناپایداری طولی شناور از تغییر فرم بدنه شناور استفاده می‌شود. به این صورت که انحای عرضی شناور تغییر می‌یابد و تأثیر آن را روی مشخصات هیدرودینامیکی شناور بررسی می‌شود. در بیشتر شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌گرفته شبیه‌سازی به صورت پایا انجام‌گرفته است ولی در این مقاله، یک شناور تندرو تک بدنه از نوع کوگار با معادلات RANS غیر دائم حل می‌شود. برای اعتبار سنجی نتایج عددی، تعدادی تست تجربی روی مدل ساده کوگار در حوضچه کشش انجام شده است. بعد از اعتبار سنجی روش عددی، مدل بهینه شده به وسیله تغییر انحای عرضی بدنه با ثابت ماندن وزن و مرکز جرم و ابعاد اصلی در سرعت‌های مختلف مورد شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرد این مدل بهینه از بین چندین مدل با زوایای ددرایز متفاوت انتخاب شده است. بدنه اصلی و بدنه تغییر شکل یافته در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در آخر نیز نتایج با هم مقایسه می‌شوند تا تأثیر تغییر انحای بدنه را روی پارامترهای هیدرودینامیکی شناور بررسی شود.

(الف)



(ب)



شکل ۱- نمای کلی بدنه، (الف) بدنه اصلی، (ب) بدنه تغییر شکل یافته

۲- معادلات حاکم

دینامیک ناپایای یک شناور هاردچاین با دو درجه آزادی هیو و پیچ در سرعت‌های مختلف و به کمک نرم افزار تجاری Star CCM+ بر پایه روش حجم محدود انجام می‌گیرد.

۲-۱- معادلات جریان سیال

شبیه‌سازی جریان سیال بر پایه حل معادلات غیردائم RANS^۱، مدل آشفتگی کی K- ϵ ^۲ و به کمک الگوریتم Simple برای کوپلینگ میدان فشار و سرعت انجام می‌گیرد. در روش میانگین گیری معادلات ناویر استوکس (معادلات RANS)، معادلات ناویراستوکس که متوسط گیری زمانی شده‌اند حل می‌شوند. در این روش تنش‌های رینولدز که به صورت مجهول در معادلات ناویراستوکس ظاهر می‌شوند به کمک یک مدل آشفتگی مدل سازی می‌شوند. مدل‌های RANS اقتصادی‌ترین روش را برای محاسبه جریان‌های صنعتی پیچیده ارائه می‌دهند. این

^۱ URANS(Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations)

^۲ K-epsilon

^۳ Volume of Fraction

$C_{\mu} = 0.09, C_{z1} = 1.44, C_{z2} = 1.92$ در نظر گرفته می‌شود.

۴- دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و شبکه‌بندی

۴-۱- دامنه محاسباتی:

در انتخاب دامنه محاسباتی همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است به این نکته توجه شده که تأثیرات حل روی مرزها تا حد ممکن مینیمم شود.

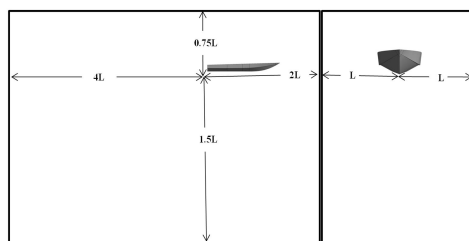
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده شرایط مرزی مطابق زیر است:

الف- برای مرزهای بالا و پایین دامنه جریانی با یک سرعت ثابت و یکنواخت اعمال شده است.

ب- برای مرزهای راست و چپ شرط مرزی تقارن با شرایط فشار هیدرو استاتیکی در نظر گرفته شده است.

ج- بدنه شناور به صورت دیواره‌ای با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

د- برای مرز خروجی-پایین دست جریان شرط فشار خروجی تعریف شده است.



شکل ۴- دامنه حل

۴-۲- شبکه‌بندی

برای شبکه بندی ناحیه محاسباتی از مش با سازمان در نرم افزار Star CCM+ استفاده می‌شود. با توجه به تقارن مسئله برای صرفه جویی در زمان و هزینه به شبیه‌سازی نیمی از دامنه محاسباتی پرداخته می‌شود. اندازه مش در محل‌هایی چون نزدیک جسم، سطح آزاد آب و همچنین ناحیه پشت شناور ریزتر می‌شود. همچنین به منظور مدل کردن دینامیک شناور از تکنیک Overset استفاده می‌شود. این روش از مزیت دومش تداخلی استفاده می‌کند، یکی برای ناحیه متحرک و دیگری برای ناحیه ثابت. به‌منظور حرکت جسم، قسمت متحرک که به عنوان Overset شناخته می‌شود از روش چرخش و جایجایی استفاده می‌کند. در این روش تمام سلول‌ها شکل خود را حفظ می‌کنند و حرکت مش به کمک بردار جایجایی و زاویه چرخش توصیف می‌شود. این دو مش از طریق یک فصل‌مشترک به هم مرتبط می‌شوند. برای ریز کردن مش در نواحی ذکر شده حجم کنترل‌هایی در آن نواحی تعریف می‌شود. مش تولید شده برای تمام دامنه محاسباتی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

برای لایه مرزی آشفته که در مناطقی از سطح خیس شناور اتفاق می‌افتد، ارتفاع نخستین سلول‌های نزدیک به سطح شناور نقش به سزایی در نتایج محاسبات دارد. برای ارزیابی کیفیت مش در لایه مرزی از پارامتر بی بعد y^+ استفاده می‌شود. این پارامتر فاصله بی‌بعد نخستین گره مش از سطح را نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

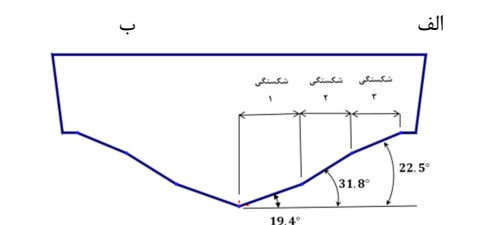
۳- مشخصات هندسی

در مطالعه حاضر شناور تندرو تک بدنه کوگوار مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ مشخصات هندسی، وزن و سرعت بدنه اصلی شناور و مدل آن با مقیاس ۵:۱ گزارش شده است.

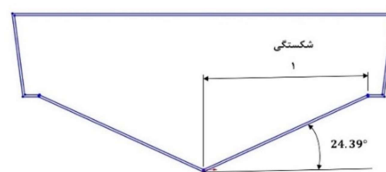
جدول ۱- ابعاد بدنه اصلی و مدل

اندازه مدل	اندازه بدنه واقعی	پارامتر
۲/۶۳۸	۱۳/۱۹	طول(متر)
۰/۵۵۲	۲/۷۶	عرض(متر)
۰/۱۴۷	۰/۷۳۵	آبخور(متر)
۰/۷۹۱	۳/۹۵۵	طول مرکز ثقل(متر)
۸۶/۰۳	۱۰۷۵۳/۷۵	جرم(کیلوگرم)

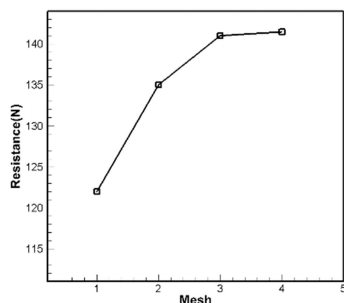
بدنه شناور کوگوار مطابق شکل ۳ دارای انحنای عرضی ثابت می‌باشد، در این مقاله دررایز ثابت آن مطابق شکل ۲ به سه دررایز با زوایای متفاوت تبدیل می‌شود. این مدل نهایی از بین چندین مدل نمونه انتخاب شده است. برای مقایسه درست بین دو مدل وزن کل و مرکز ثقل برای هر دو مدل یکسان در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- بدنه تغییر شکل یافته الف-بادی پلن ب-باتوک ج-مقطع عرضی از پاشنه



شکل ۳- بدنه اصلی الف-بادی پلن ب-باتوک ج-مقطع عرضی از پاشنه



شکل ۷- مطالعه استقلال از مش

۵- اعتبارسنجی حل

برای اعتبارسنجی حل، از تست تجربی شناور کوگار و مقایسه نتایج تجربی آن با نتایج حل عددی استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها در حوضچه کشش آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس انجام شده و مشخصات اصلی این حوضچه در جدول شماره ۲ گزارش شده است. سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در حوضچه کشش از نوع ارابه ریلی سرنشین دار بوده و قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای مختلف هیدرودینامیکی را دارد.

مشخصات فنی حوضچه کشش در جدول ۲ لیست شده‌اند:

جدول ۲- مشخصات حوضچه کشش

مشخصه	اندازه
طول کانال (متر)	۴۰۰
عرض کانال (متر)	۶
عمق کانال (متر)	۴
بیشینه سرعت ارابه (متر بر ثانیه)	۱۹
چگالی آب حوضچه کشش (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۰۰۲

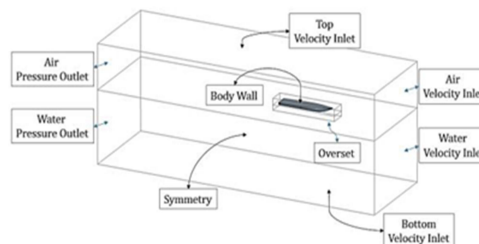
تست‌ها بر روی مدلی انجام شده‌اند که دارای وزن ۸۶ کیلوگرم بوده و مرکز ثقل آن در ۳۰٪ پاشنه است. یعنی مرکز ثقل در فاصله ای برابر با ۰/۷۹۱ متر از پاشنه شناور قرار داد. نمایی از تست در شکل ۹ نشان داده شده است. آزمایش‌های انجام شده از سرعت ۵ الی ۸ متر بر ثانیه و در چهار سرعت ۵، ۶، ۷ و ۸ متر بر ثانیه انجام گشته و نتایج تست در جدول شماره ۳ گزارش شده‌اند. در این جدول کلیه نتایج از جمله مقاومت و تریب دینامیکی گزارش شده‌اند. در ضمن طول آب‌خور شناور برای محاسبه عدد فرود ۲/۳۱ متر و برابر آب‌خور استاتیکی می‌باشد.

جدول ۳- شرایط و نتایج تست حوضچه کشش

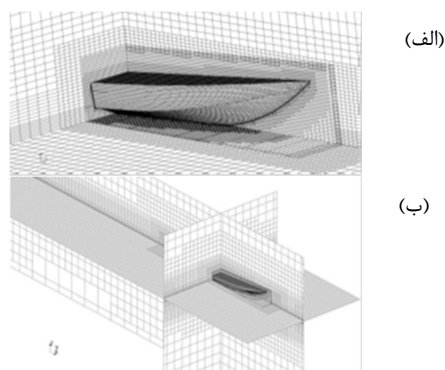
ردیف	سرعت متر بر ثانیه	فرود	تریب استاتیکی درجه	تریب دینامیکی درجه	مقاومت نیوتون
۱	۵	۱/۰۷	۲/۳۴	۷/۳۹	۱/۷۰۴ ۱۳۶
۲	۶	۱/۲۸	۲/۳۴	۶/۶۳	۱۳۳/۸۶
۳	۷	۱/۴۹	۲/۳۴	۵/۸۱	۱۳۵/۳۳
۴	۸	۱/۷۱	۲/۳۴	پورپویز	پورپویز

$$\gamma^+ = \frac{\rho u_{\tau} \Delta y}{\mu} \quad (8)$$

جایی که Δy فاصله بین دیواره و نخستین گره مش و u_{τ} سرعت اصطکاکی می‌باشد. برای لایه مرزی آشفته که به کمک مدل آشفتگی K-ε مدل می‌شود مقدار γ^+ توصیه شده بین ۵۰ تا ۱۵۰ می‌باشد. مقدار این پارامتر در این پژوهش برابر ۷۵ می‌باشد.



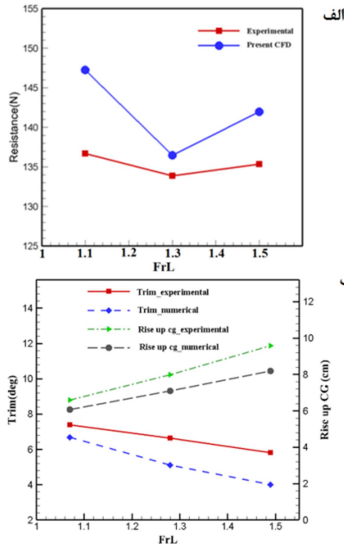
شکل ۵- شرایط مرزی



شکل ۶- مش دامنه محاسباتی، (الف) مش نزدیک ناحیه محاسباتی، (ب) مش نمای دور دامنه محاسباتی

۴-۳- مطالعه استقلال از مش

مسئله مهم دیگر در مورد شبکه، استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه است به این معنی که نتایج تحلیل باید مستقل از تعداد و اندازه مش باشند. برای اطمینان از این موضوع ۴ شبکه (۱ درشت با تعداد مش ۹۰۰ هزار (۲ متوسط با تعداد ۱ میلیون مش (۳ ریز با تعداد ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار (۴ خیلی ریز با تعداد ۱/۵ میلیون مش در نظر گرفته می‌شود. شناور در سرعت ۷ متر بر ثانیه برای این ۴ شبکه‌بندی تحلیل می‌شود و مقدار مقاومت برای این شبکه‌بندی‌ها با هم مقایسه می‌شود (مطابق شکل ۷). این شبیه‌سازی روی یک پردازنده اینتل هشت هسته‌ای با بیشینه فرکانس ۴ گیگاهرتز با ۱۶ گیگابایت رم انجام می‌گیرد. مقدار گام زمانی برابر ۰/۰۰۰۵ در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۷، با تغییر مش از شبکه بندی ۳ به ۴ نتایج تغییر محسوسی نمی‌کند پس شبکه انتخابی شبکه ۳ با تعداد ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار سلول برای نیمی از دامنه محاسباتی است.



شکل ۱۰- نتایج عددی و آزمایشگاهی الف-مقاومت ب-تیریم دینامیکی و بالا آمدگی مرکز ثقل

۶- نتایج

به منظور بررسی و تحلیل اثر انحنای عرضی بدنه شناور تندرو، روی رفتار دینامیکی و مقاومت آن در سرعت‌های متفاوت، شناور تغییر شکل یافته در همان شرایط شناور اولیه و در سرعت‌های متفاوت به کمک نرم افزار Star CCM+ مورد شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرد. این شبیه‌سازی‌ها روی شناور کوگار که یک شناور پروازی با سرعت نسبی کم می‌باشد انجام شده است. وزن شناور برابر ۸۶ کیلوگرم و طول مرکز ثقل ۰/۷۹۱ متر و در سرعت‌های ۵، ۶، ۷، ۸ و ... انجام می‌گیرد. همه این شبیه‌سازی‌ها در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. نتایج حاصله از این شبیه‌سازی‌ها شامل مقاومت و تیریم دینامیکی نیز در جدول ۶ گزارش شده‌اند.

جدول ۵- شرایط و نتایج تست حوضچه کشش

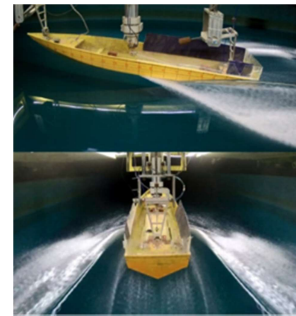
نوع بدنه	شماره تست	سرعت (متر بر ثانیه)	جرم (کیلوگرم)	فاصله طولی مرکز ثقل (میلی‌متر)
بدنه اصلی	۱	۵	۸۶	۷۹۱
	۲	۶		
	۳	۷		
	۴	۸		
بدنه اصلاح شده	۵	۵		
	۶	۶		
	۷	۷		
	۸	۸		
	۹	۹		
	۱۰	۱۰		

همان‌طور که در جدول ۶ گزارش شده است، در بعضی از تست‌ها حرکت ناپایای شناور پررنگ شده است، در این موارد برای گزارش



شکل ۸- نمایی از ارابه کشش حوضچه آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، نتایج مقاومت و تیریم در جدول ۴ با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است بیشینه اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مقاومت کمتر از ۸٪ می‌باشد. در شکل ۱۰ نیز مقایسه جامعی بین نتایج عددی و تجربی انجام شده است. همچنین روش عددی قادر بوده است که سرعتی را که در آن ناپایداری طولی اتفاق می‌افتد به درستی پیش‌بینی کند، که این امر بیانگر مطابقت خوبی بین روش تجربی و عددی است.



شکل ۹- نمایی از تست شناور در حوضچه کشش

جدول ۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

سرعت	مقاومت تجربی نیوتون	مقاومت عددی نیوتون	اختلاف نتایج عددی و تجربی	تیریم تجربی درجه	تیریم عددی درجه
۵	۱۳۶/۷	۱۴۷/۲۳	۷/۶	۷/۳۹	۶/۶۷
۶	۱۳۳/۸۶	۱۳۶/۴۷	۱/۹	۶/۶۳	۵/۱۰
۷	۱۳۵/۳۳	۱۴۱/۹۶	۴/۹	۵/۸۱	۴/۰
۸	پورپویز	پورپویز	پورپویز	پورپویز	پورپویز

با توجه به جدول ۶ و با مقایسه تست شماره (۵و۱) و (۶و۲) و (۷و۳) مشخص می‌شود که با تبدیل تغییر فرم بدنه مقاومت اندکی افزایش می‌یابد. به طوری که در سرعت ۵ متربرثانیه مقاومت ۱/۱۳۵٪ در سرعت ۶m/s به مقدار ۳/۲۶٪ و در سرعت ۷ m/s مقاومت به مقدار ۱/۲۵٪ افزایش یافته است. همچنین مقدار برای شناور در حالتی که فرم بدنه تغییر یافته در سرعت‌های ۵،۶،۷ m/s به ترتیب ۰/۱۵٪ و ۰/۱۵۹٪ و ۰/۱۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به مقایسه تست شماره ۴ با ۸ که هر دو در سرعت یکسان ۸m/s انجام می‌شوند مشخص است که بدنه اصلی در این سرعت دچار ناپایداری طولی (پروپوزینگ) شده است، درحالی که در بدنه تغییر شکل یافته در این سرعت به این پدیده دچار نشده بلکه در شماره تست ۱۰ و در سرعت ۱۰ m/s دچار این پدیده شده است که نشانگر پایداری بهتر این بدنه می‌باشد. همچنین باید به این نکته توجه کرد که با افزایش سرعت شناور، مرکز فشار هیدرودینامیکی شناور به طرف جلو شناور حرکت می‌کند و اگر مرکز فشار هیدرودینامیکی پشت سر مرکز طولی ثقل قرار بگیرد امکان ایجاد ناپایداری طولی زیاد است.

۷- نتیجه‌گیری

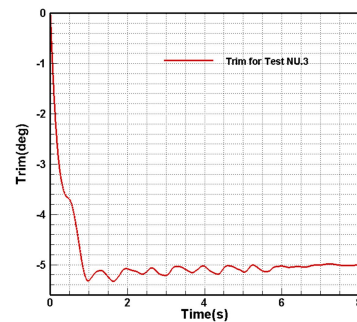
یک آنالیز هیدرودینامیکی تجربی و عددی برای یک شناور پروازی هاردچاین انجام شده است تا تأثیر انحنای عرضی روی رفتار هیدرودینامیکی شناور مشخص شود. در ابتدا تست‌های آزمایشگاهی برای مدل شناور کوگار و در سرعت‌های مختلف انجام گرفته است. سپس به کمک نرم‌افزار Star CCM+ و با استفاده از تکنیک Overset Mesh شناور کوگار مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی یک تطابق خوب را بین آن‌ها نشان می‌دهد. اکنون که اعتبار روش شبیه‌سازی مشخص شد، بدنه جدید که دارای انحنای عرضی متفاوتی با بدنه کوگار است نیز مورد شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرد. این بدنه جدید دارای همان وزن و موقعیت طولی مرکز ثقل می‌باشد. مطابق با شکل ۱۳ نتایج نشان می‌دهد که بدنه جدید اگرچه در اکثر سرعت‌ها دارای اندک مقاومت بیشتری نسبت به بدنه جدید است (شکل ۱۲-الف) ولی باعث پایداری بیشتر شناور در سرعت‌های بالاتر شده و امکان دستیابی به سرعت‌های بالاتر را ایجاد کرده است. همچنین بدنه جدید دارای نیروی لیفت بزرگ‌تر (شکل ۱۲-ب) و زاویه‌تریم دینامیکی کمتری نسبت به بدنه اولیه می‌باشد (شکل ۱۲-ج). در مجموع می‌توان این نتیجه را گرفت که برای از بین بردن ناپایداری طولی شناور می‌توان به جای اضافه کردن ملحقاتی چون اینترسپتور و تریم تب و... که هم زحمت و هزینه نصب و تعمیرات و نگهداری بالایی دارند و هم کنترل آن‌ها نسبتاً مشکل است، از تغییر انحنای عرضی بدنه استفاده کرد که هم کم هزینه‌تر بوده و هم نیاز به تعمیرات و نگهداری خاصی ندارد. همچنین اگر بدنه به خوبی طراحی شده باشد همان توان موتورهای اولیه می‌تواند برای بدنه جدید مناسب باشد و نیازی به تعویض موتور نخواهد بود. ضمن این‌که بدنه بهینه شده بدون نیاز به اضافه کردن ملحقاتی اضافی دارای پایداری طولی بهتری خواهد بود و می‌توان به سرعت‌های بالاتری با آن دست یافت.

نتایج مقاومت و تریم و ... حد بالا و پایین نتایج به دست آمده گزارش شده است. این رفتار هارمونیک و ناپایایی شناور درون آب را حالت ناپایداری پروپوزینگ می‌گویند که یک پدیده آشنا برای شناورهای پروازی در سرعت‌های بالا می‌باشد.

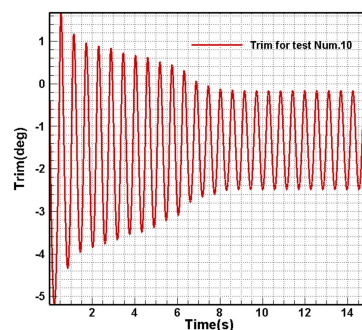
جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی عددی

شماره تست	رفتار دینامیکی	مقاومت(نیوتون)	تریم(درجه)	لیفت(نیوتون)
۱	همگرا	۱۴۷/۲۳	۶/۶۷	۸۴۴
۲	همگرا	۱۳۶/۴۷	۵/۱	۸۴۴
۳	همگرا	۱۴۱/۹۶	۴/۲۴	۸۴۴
۴	پروپوزینگ	۱۳۰-۱۵۱	۵-۸	۸۲۵-۸۶۵
۵	همگرا	۱۴۹/۲۵	۴/۲۵	۸۴۸/۲۳
۶	همگرا	۱۴۱/۵۶	۳/۸۵	۸۴۸/۶۵
۷	همگرا	۱۴۳/۰۵	۳/۱	۸۴۹/۰۳
۸	همگرا	۱۴۶/۶۸	۲/۳۵	۸۴۹
۹	همگرا	۱۵۸/۹۸	۲	۸۴۹/۵
۱۰	پروپوزینگ	۱۳۵-۱۷۴	۱.۱-۱.۵۵	۸۳۵-۸۶۰

به‌عنوان نمونه‌ای از حالت غیر پروپوزینگ و پروپوزینگ نمودارتریم برحسب زمان برای تست‌های شماره ۲ و ۱۰ به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، در حالت پروپوزینگ نمودار به یک مقدار ثابت همگرا نمی‌شود ولی در حالت غیر پروپوزینگ نمودار به یک مقدار ثابت میل می‌کند.



شکل ۱۱- تغییرات زاویه‌تریم برحسب زمان برای تست شماره ۲



شکل ۱۲- تغییرات زاویه‌تریم برحسب زمان برای تست شماره ۱۰

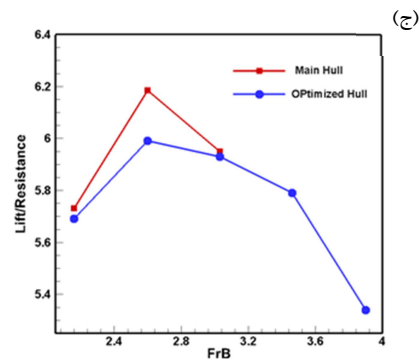
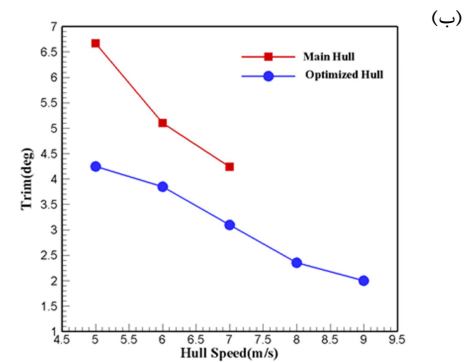
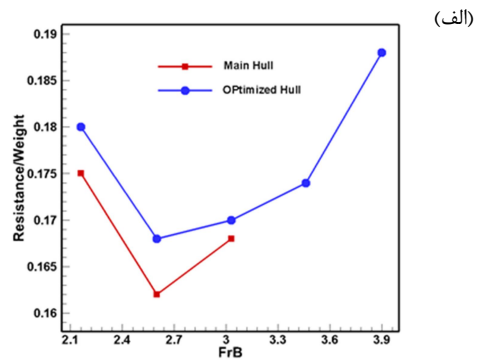
National Advisory Committee for Aeronautics; Washington, DC, United States, NACA-WR-L-479.

- [7] Kenneth SM, Davidson SM, Locke JR., Some systematic model experiments on the porpoising characteristics of flying-boat hulls, NACA ARR No. 3F12.
- [8] Troesch AW., On the hydrodynamics of vertically oscillating planing hulls. J ShipRes;36(4):31-317, 1992.
- [9] Ghassemi H., Mansoori M., Interceptor hydrodynamic analysis for handlingtrim control problems in the high-speed crafts. J Mech Eng Sci/Proc IMechE;Vol.225(Part C), 2011.
- [10] Day JP, Haag RJ. Planing boat porpoising. A thesis submitted to Webb Institute of Naval Architecture.
- [11] Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls, Marine Technology, 1(1), pp.71-95.
- [12] Clement E, Blount D., Resistance tests of a systematic series of planing hull forms, Transactions, 71.
- [13] Katayama T, Ikeda Y. A study on coupled pitch and heave porpoising instability of planing craft (3rd Report). J Kansai Soc Naval Archit Jpn;228:56-149, 1997.

[۱۴] ح. زراعتگر، ح. قاسمی، ع. ا. مقدس آهنگری، ع. عسگری، س. ا. هاشمی. "بررسی اثر تغییر زاویه خیز کف شناور منشوری پروازی بر مقاومت، تریم و بالا آمدگی به روش تست مدل و فرمول های تجربی (رگرسیون)". پنجمین همایش ملی شناورهای تندرو، ۲۰۱۷.

[15] Matveev K. I. and Bari G. S., Effect of deadrise angles on hydrodynamic performance of a stepped hull, Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ., Vol. 230, No. 4, pp. 616-622, 2016.

[۱۶] پ. قدیمی، س. توکلی، ع. دشتی منش، "ارایه یک مدل ریاضی برای ارزیابی آثار زاویه راس متغیر بر عملکرد شناورهای پروازی." فصلنامه دریافنون، ۱۳۹۶.



شکل ۱۳- نتایج مقاومت، لیفت و تریم دوبدنه باهم، (الف) مقاومت، (ب) تریم، (ج) لیفت

۸- مراجع

- [1] Doctors L. J. Hydrodynamics of Highspeed Small Craft, University of Michigan, No.292, Technical Report, (1985).
- [2] Caponnetto, M. Practical CFD simulations for planing hulls, Proceedings of Second International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles, Hamburg, pp.128-138, 2001.
- [3] Lotfi, P., Ashrafizaadeh, M., Esfahan, R. K. Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water, Ocean Engineering, Vol. 94, pp.103-110, 2015 (in Persia).
- [4] Clement EP., Blount, D.L., Resistance tests of a systematic series of planing hull forms. Trans. SNAME 71.491-579, 1963.
- [5] Perring WG., Glauert H., The stability on the water of a seaplane in planing condition. R & M 1493.
- [6] Benson JM., The porpoising characteristics of a planing surface representing the forebody of a flying-boat hull,