

مدل تجربی محاسبه‌ی فشار در کف شناورهای پروازی پله‌دار

تک‌بدنه

ساسان توکلی^۱، عباس دشتی‌منش^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، sasan_tavakoli@aut.ac.ir

^{۲*} استادیار هیدرودینامیک دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، p.dashtimanesh@pgu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱۴)

چکیده:

در این مقاله، یک مدل تجربی به منظور محاسبه‌ی توزیع فشار در کف شناور پروازی پله‌دار ارائه شده است. این مدل تجربی با بکارگیری روابط تجربی پیشین و ارائه‌ی یک روش به منظور تخمین سطح خیس‌شده‌ی بدنه‌ی پشتی شناور تهیه شده است. بر همین اساس، روابطی برای محاسبه‌ی تجربی فشار در هر دو بدنه‌ی شناور معرفی شده‌اند. این روابط فشاری از مقاطع موازی با خط سکون بهره می‌گیرند. در این مدل، رفتار پله مانند رفتار ترانسوم در نظر گرفته شده است و از روابط تجربی مربوط به ویک شناورهای پروازی بهره گرفته شده است. مدل نهایی به صورتی تهیه شده است که فشار را در هر دو بدنه محاسبه نماید. نتایج حاصل از مدل حاضر با نتایج پیشین مقایسه شده و مشاهده شده است که روش حاضر دارای دقت مناسبی در تخمین فشار و نیروی لیفت حاصل از آن می‌باشد. مطالعاتی نیز در مورد اثرات ارتفاع و طول پله صورت پذیرفته است و مشاهده شده که افزایش ارتفاع پله منجر به افزایش فشار در بدنه‌ی پشتی می‌شود. همچنین، این نتیجه حاصل شده است که در صورتی که نسبت طول پله به طول خیس‌شده در بدنه‌ی جلویی کاهش یابد، فشار در بدنه‌ی پشتی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شناور پروازی پله‌دار، توزیع فشار، مدل تجربی، مقاطع موازی خط سکون، آب آرام.

Empirical model for bottom pressure of stepped planning monohulls

Sasan Tavakoli¹, Abbas Dashtimanesh^{2*}

¹ M.Sc. Graduate of Naval Architecture, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; sasan_tavakoli@aut.ac.ir

^{2*} Assistant Professor of Marine Hydrodynamics, Department of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

(Submitted: 2017/Nov/13; Accepted: 2017/Dec/5)

Abstract:

In this paper, an empirical based model for estimation of bottom pressure of stepped planning hulls is developed. This model is established by using previous empirical equations of pressure and wake of planning surfaces. Within the paper, equations for pressure distribution on fore and aft body are presented. These equations are derived based on sections parallel to stagnation line of planning craft. The step is assumed to act like transom, and its wake is predicted using previous equations develop for predicting the wake of transom. The final proposed model is able to predict pressure on both aft and fore body. The predicted results are compared against previous experimental data and it is observed that proposed method has good accuracy. Parametric studies are carried out and it is seen that if the height of step is increased, pressure of aft body increases. In addition to this, it is observed that the ratio of step height over keel has an inverse relation with pressure of aft body.

Keywords: stepped planning hull, bottom pressure, empirical equations, sections parallel to stagnation line, calm water.

محاسبه‌ی توزیع فشار، مقدار بیشینه‌ی آن و محل اعمال مرکز آن از جمله مواردی هستند که برای بررسی هیدرودینامیکی و طراحی سازه‌ای شناورهای پروازی بسیار مهم می‌باشند. تا به امروز، روش‌های مختلفی همچون روش‌های آزمایشگاهی، عددی، روابط تجربی و نظری دو و نیم بُعدی برای محاسبه‌ی توزیع فشار در کف شناورهای پروازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما، بررسی‌های پروازی پله‌دار بیشتر به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تنها مدل‌های ارائه‌شده برای بررسی هیدرودینامیکی آنها، همچنان به صورت کامل پیشرفت نکرده‌اند. لذا، در این مقاله، سعی می‌شود که یک مدل تجربی برای محاسبه‌ی توزیع فشار در کف این شناورها تهیه شود. این مدل می‌تواند در آینده‌ی نزدیک به کمک مهندسان بیاید و آنها را در مدل‌سازی هیدرودینامیکی شناور و بررسی عوامل مؤثر بر سرعت شناور یاری کند.

۱-۲- مروری بر مطالعات پیشین

مطالعات آغازین در زمینه‌ی مدل‌سازی شناورهای پروازی به اواخر دهه‌ی ۱۹۲۰ و اوایل دهه‌ی ۱۹۳۰ برمی‌گردد. در آن سال‌ها، مفهوم شناورهای پروازی به تازگی توسط مهندسين مورد استفاده قرار می‌گرفت [۱]. فن کارمان [۲] و واگنر [۳] سعی نمودند با ساده‌سازی مسأله به ورود یک جسم گوه‌ای شکل به آب، توزیع فشار و نیروی عمودی وارد بر شناور را محاسبه نمایند. مطالعات آنها مفاهیم ابتدایی‌ای را در مورد توزیع فشار در شناورهای پروازی، مانند ایجاد یک فشار بیشینه در محل تماس آب با جسم و یا بالآمدگی فشار را برای همگان روشن کرد. اما، مشکلی که در این روابط تجربی وجود داشت، عدم توانایی آن روزهای محققین در توسعه‌ی نتایج به نتایج شناور واقعی بود. لذا، نسل بعدی محققان به استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و تعیین فشار با استفاده از فشارسنج‌ها روی آوردند. کاپریان و بوید [۴] مجموعه‌ای از مفاهیم عمیق در مورد توزیع فشار در کف شناورهای پروازی ایجاد کردند. ابتدای امر آنها به این نکته اشاره کردند که در کف یک شناور پروازی یک خطی به نام خط سکون به وجود می‌آید که از خط مرکزی

شناور به چپین می‌رسید. فشار روی این خط دارای مقدار بیشینه می‌باشد و این مقدار بیشینه با حرکت از خط مرکزی به سمت چپین به مرور کاهش می‌یابد. سپس، آنها به این نکته اشاره نمودند که در چپین و در ترانسوم، فشار برابر صفر است.

در همان سال‌ها، اسمایلی [۵] و [۶] به بررسی فشار در شناورهای پروازی پرداخت. بر خلاف کاپریان و بوید، وی با دید توزیع فشار در راستای طولی مطالعات خود را صورت داد. در نتایج آزمایش‌های وی در به این مطلب پرداخت که از آغاز نقطه‌ی سکون به سمت پاشنه‌ی شناور فشار کاهش یافته، به مقدار صفر در پاشنه می‌رسد. همچنین، اسمایلی بر این نکته تأکید کرد که در صورتی که توزیع فشار طولی در باتوک‌های طولی مختلف ترسیم شود، می‌توان مشاهده نمود که هر چه باتوک‌ها به چپین نزدیک‌تر می‌شوند، فشار کاهش می‌یابد.

در اواسط دهه‌ی ۱۹۶۰، ساویتسکی [۷] با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از آزمایش‌های از پیش صورت گرفته، یک مدل تجربی برای محاسبه‌ی عملکرد شناور پروازی در آب آرام ارائه کرد. اگرچه این مدل برای محاسبه‌ی عملکرد شناور پروازی بود، اما با توجه به آنکه با انجام مطالعه‌ی جامع بر هیدرودینامیک شناورهای پروازی توسعه یافته بود، نکات ارزشمندی را به همراه داشت. در این مقاله، ساویتسکی [۷] به این نکته اشاره کرد که فشار در کف شناورهای پروازی از دو بخش هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی تشکیل شده است و هرچه میزان سرعت شناور افزایش یابد، فشار هیدرواستاتیکی کاهش می‌یابد. بعد از ارائه‌ی این مدل و در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی، مجدداً محققان روش‌های دو و نیم بُعدی و استفاده از تئوری‌های مربوط به ورود گوه به آب، مسأله‌ی فشار و توزیع نیروهای وارد بر شناورهای پروازی را مطرح کردند. مارتین [۸] و زارنیک [۹] و [۱۰] مدل‌های ریاضی برای محاسبه‌ی نیروهای حاصل از فشارهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی ارائه دادند. در دهه‌ی ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ میلادی، محققان بیشتر توجه خود را معطوف به افزایش دقت محاسبات این روش اختصاص دادند [۱۱-۱۳].

با آغاز پیشرفت‌ها در مدل‌سازی‌های عددی دینامیک سیالات، روش‌های عددی نیز توجه محققان را به سمت خود جلب کردند. جا دارد که به این نکته اشاره شود که در اکثر این مطالعات، هدف محققین محاسبه‌ی عملکرد

شناور شامل زاویه تریم و مقاومت شناور بود. البته، در میان محاسبات، توزیع فشار وارد بر کف شناور پروازی نیز ارائه می‌شود. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات ولیکام و جهانگیر [۱۴] تا آخرین مطالعات صورت گرفته در طی سال‌های منتهی به ۲۰۱۰ اشاره کرد [۱۸-۱۵]. در این مطالعات، نویسندگان فشار وارد بر کف شناور را نمایش می‌دادند. نتایج عددی همگی از تطابق آنچه در شبیه‌سازی‌های عددی مشاهده شده بود با رفتارهای ثبت شده در آزمایش‌ها حاکی بود. یکی از آخرین مطالعات عددی در این زمینه توسط موسوی راد و همکاران [۱۹] صورت پذیرفته است که در آن با حل سیال ویسکوز با دقت مناسبی رفتار شناور را پیش‌بینی نموده‌اند.

در کنار همه‌ی مطالعات عددی مطرح‌شده، مورابیتو [۲۰ و ۲۱] اخیراً مدل تجربی برای محاسبه‌ی فشار در کف شناورهای پروازی پایه‌گذاری کرد. این مدل توسط قدیمی و همکاران [۲۲] مورد مطالعه قرار گرفت و سپس، آنها یک مدل نیز برای محاسبه‌ی عملکرد شناور پروازی با استفاده از این مدل فشار تجربی پایه‌گذاری کردند [۲۳]. همچنین، ساویتسکی [۲۴] با استفاده از روابط مربوط به این کد سعی بر بحث در مورد توزیع فشار در کف شناورهای پروازی غیر منشوری کرد. اخیراً، پنینو و همکاران [۲۵] از این مدل فشار نیز روشی را برای تخمین عملکرد شناور پروازی غیرمنشوری ارائه دادند.

در طی سالیان اخیر، شناورهای پروازی پله‌دار به صورت گسترده‌ای مورد استفاده‌ی شرکت‌های مختلف دریایی قرار گرفته‌اند. عملکرد بهتر این شناورها در آب آرام که همراه با مقاومت کمتر و زاویه تریم دینامیکی کوچکتر می‌باشد، دلیل اصلی این نگرش می‌باشد. به دنبال این قضیه، تحقیقات زیاد و گسترده‌ای بر روی شناورهای پروازی پله‌دار صورت پذیرفت [۲۶-۳۱]. در این میان چند مدل تجربی برای پیش‌بینی رفتار آنها در آب آرام تهیه شد [۳۲-۳۴]. همچنین، مدل‌های ریاضی نیز اخیراً به منظور پیش‌بینی حرکت این شناورهای در آب آرام و آب موج تهیه شده‌اند. علی‌رغم توانایی بالای این مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی حرکات شناورهای پروازی، روابط تجربی نیز می‌توانند کمک شایانی به ایجاد درک درست از توزیع فشار در کف این شناورها نمایند.

در پژوهش حاضر، یک مدل تجربی برای محاسبه و تخمین توسعه‌ی فشار سه‌بعدی در کف شناورهای پروازی توسعه می‌یابد. این مدل با بکارگیری روابط تجربی پیشین استفاده شده برای محاسبه‌ی توزیع فشار در کف شناورهای پروازی و استفاده از شکل جریان در پشت پاشنه‌ی ترانسوم پایه‌گذاری می‌شود. این مدل برخلاف روش‌های پیشین استفاده‌شده برای شناورهای پروازی، از مقاطع عمود بر خط سکون این شناورها برای محاسبه‌ی فشار استفاده می‌نماید. هم فشار هیدرودینامیکی، هم فشار هیدرواستاتیکی و هم توزیع فشار روی خط سکون محاسبه خواهند شد. همچنین، اثرات پله و پاشنه‌ی ترانسوم بر فشار قابل محاسبه است. ادامه‌ی این مقاله به صورت زیر ارائه می‌شود.

در بخش دوم، فیزیک مسأله تشریح می‌شود و روابط مربوط به مدل تجربی ارائه خواهند شد و سپس، مدل مورد نظر توسعه می‌یابد. در بخش سوم، نگاهی بر دقت روش خواهد شد، و مقایسه‌ای با نتایج پیشین صورت خواهد پذیرفت تا از دقت روش اطمینان حاصل شود. در بخش چهارم، نتایج اصلی مقاله شامل اثر پله بر نحوه‌ی توزیع فشار در کف شناور پروازی ارائه و مورد بحث قرار خواهند گرفت. در بخش پنجم مقاله، یک جمع‌بندی همراه با خلاصه‌ای از نتایج ارائه خواهند شد و سپس، یک نمای کلی نسبت به کارهای آتی نویسندگان به تصویر در خواهد آمد.

۲- توسعه‌ی مدل

۲-۱- فرض مسأله

در این مسأله فرض می‌شود که یک شناور پروازی پله‌دار با فرم‌بندنی منشوری با سرعت ثابت U در حال حرکت رو به جلو می‌باشد. یک پله در کف شناور وجود دارد و کف شناور را به دو بدنه‌ی جلویی و پشتی تقسیم می‌کند. موقعیت طولی پله نسبت به انتهای شناور با L_s مشخص می‌شود و ارتفاع آن با h_s تعریف می‌شود. نمای از شناور در شکل ۱ نمایش داده شده است. از سوی دیگر، با توجه به آنکه شناور در رژیم جریان پروازی به سمت جلو حرکت می‌کند، یک زاویه‌ی تریم دینامیکی (T) دارد. طول خیس‌شده‌ی شناور با L_K مشخص می‌شود و طول خیس‌شده‌ی بدنه‌ی جلویی و پشتی به ترتیب با L_{W1} و L_{W2} نمایش داده می‌شوند.

شناور روی خط باتوک ۱/۴ عرض نیز با استفاده از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\eta(x) = 0.17(0.75 + 0.03 \frac{L_K}{B} \tau^{1.5}) \sin\left(\frac{\pi}{Fn_B} \left(\frac{x}{3}\right)^{1.5}\right) \quad (3)$$

تصویری از سطح آزاد و بدنه‌ی شناور در شکل ۲ نشان داده شده است. در صورتی که بدنه‌ی شناور به صورت یک بدنه‌ی دو پله قرار بگیرد، می‌توان یک معادله‌ی خط نیز برای بدنه‌ی پشتی به صورت زیر نوشت:

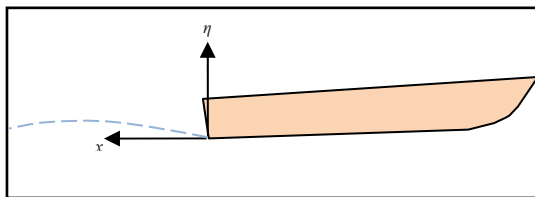
$$f(x) = h - x \tan(\tau) \quad (4)$$

در صورتی که معادله‌ی

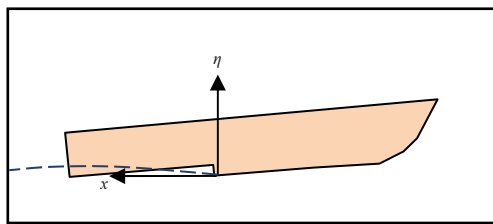
$$f(x) = \eta(x) \quad (5)$$

با ارتفاع آب در خط مرکزی نقطه تقاطع آب آرام با شناور در خط مرکزی (x_W) به دست می‌آید (شکل ۳). طول خیس‌شده‌ی بدنه‌ی پشتی با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل تخمین است.

$$L_{W2} = L_S - x_W \quad (6)$$



شکل (۲): بالاآمدگی سطح آب پشت پاشنه‌ی ترانسوم.



شکل (۳): تقاطع آب با بدنه‌ی پشتی.

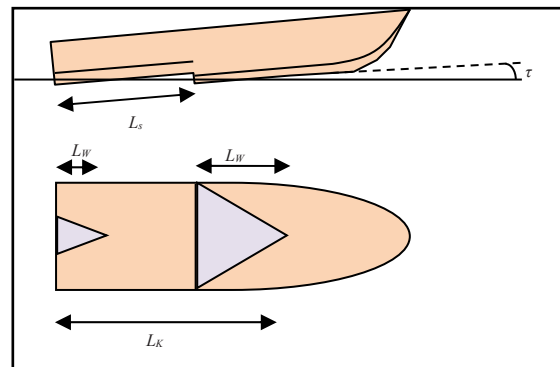
۲-۳- محاسبه‌ی مشخصات محلی بدنه‌ی پشتی

در بدنه‌ی جلوئی، زاویه‌ی تریم شناور و همچنین، زاویه‌ی ددرایز شناور معادل مقادیر واقعی هستند. یعنی، می‌توان بیان داشت که:

$$\beta_1 = \beta \quad (7)$$

$$\tau_1 = \tau \quad (8)$$

اما در بدنه‌ی پشتی، به علت تغییر شکل جریان، این دو پارامتر تغییراتی خواهند داشت. ددرایز محلی شناور (شکل ۴) با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:



شکل (۱): هندسه‌ی شناور پروازی پله‌دار مورد بررسی.

۲-۲- محاسبه‌ی طول خیس‌شده‌ی شناور در دو بدنه‌ی جلوئی و پشتی

برای محاسبه‌ی فشار در کف شناور، پیش از هر چیز نیاز است که شکل سطح خیس‌شده در بدنه‌ی جلوئی و بدنه‌ی پشتی شناور به دست آیند. در صورتی که طول خیس‌شده‌ی کلی شناور برابر با L_K باشد، طول خیس‌شده‌ی سطح جلوئی شناور با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$L_{W1} = L_K - L_S \quad (1)$$

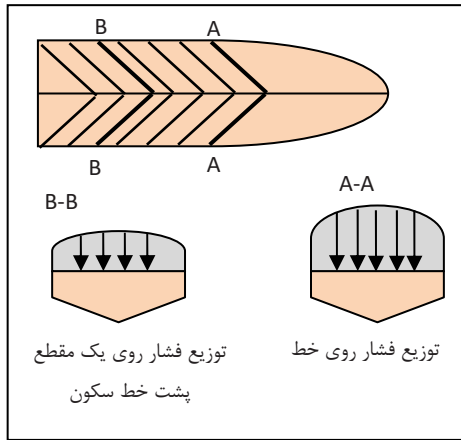
به منظور به دست آوردن طول خیس‌شده‌ی شناور در بدنه‌ی پشتی فرض می‌شود که پله مانند ترانسوم عمل می‌کند. با این فرض می‌توان شکل جریان در پشت پله را به دست آورد و سپس، با استفاده از آن محل تقاطع شکل تغییریافته‌ی آب را با بدنه‌ی پشتی به دست آورد. مورابیتو و ساویتسکی [۳۷] با استفاده از مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در آزمایشگاه داویدسون آمریکا، شکل جریان در پشت شناورهای پروازی پله‌دار را به دست آوردند. آنها فرمول‌های تجربی‌ای را ارائه دادند که زاویه‌ی تریم دینامیکی، عدد فرود عرضی و طول خیس‌شده‌ی جلوئی پاشنه متغیرهای اصلی این روابط هستند. شکل آب در پشت شناور روی خط تقارن با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\eta(x) = 0.17(A + 0.03 \frac{L_K}{B} \tau^{1.5}) \sin\left(\frac{\pi}{Fn_B} \left(\frac{x}{3}\right)^{1.5}\right) \quad (2)$$

که در آن A یک عدد ثابت می‌باشد که برای زاویه‌ی ددرایز زیر ۱۰ درجه برابر ۱/۵ و برای زوایای ددرایز بزرگ‌تر از ۱۰ درجه برابر با ۲ می‌باشد. همچنین، در این روابط B عرض شناور است. همچنین، شکل آب در پشت

۵-۲- محاسبه‌ی توزیع فشار در هر بدنه

فشار در هر بدنه با استفاده از روابط تجربی‌ای که پیش از این مورابیتو [۲۱] برای شناورهای پروازی تک بدنه داده بود محاسبه می‌شود. برای این منظور، اطلاعات محلی هر شناور در این روابط ارائه می‌شود. البته پیش از پرداختن به روابط، یک نگاه کلی به این روش می‌شود. در این روش تجربی، برخلاف روش‌های معمول در مدل‌سازی شناورهای پروازی که مقاطع را عمود بر شناور در نظر می‌گیرند [۳۸-۴۶]، مقاطع به صورت عمود بر خط سکون در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵). ریشه‌ی چنین فرضی به اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی که ساویتسکی و برسلین [۴۷] به دنبال بررسی پاشش در سطوح پروازی بودند برمی‌گردد.



شکل (۵): فرضیه‌ی اصلی تئوری مقاطع موازی برخط سکون.

در صورتی که این تئوری برای شناورهای پروازی پله‌دار استفاده شود، می‌توان از این نظریه در هر یک از بدنه‌ها استفاده نمود. همانند شکل ۶ یک دستگاه مختصات دُبعدی تعریف می‌شود.

در هر بدنه، فرض می‌شود که فشار از دو فشار هیدرودینامیکی (p^{HD}) و فشار هیدرواستاتیکی (p^{HS}) تشکیل شده است. در صورتی که این فشارها با استفاده از عبارت $0.5\rho U^2$ بی‌بعد شود، می‌توان برای فشار کل وارد بر کف شناور عبارت را نوشت:

$$C_p = C_p^{HD} + C_p^{HS} \quad (15)$$

$$\beta_2 = \beta - \quad (9)$$

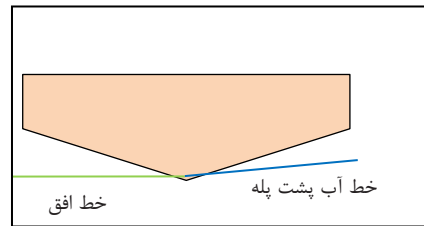
$$\tan^{-1} \left(\frac{\eta(x_w)^{1/4} + \frac{B}{4} \tan \beta - \eta(x_w)^{CL}}{\frac{B}{4}} \right)$$

همچنین، زاویه‌ی تریب در بدنه‌ی پشتی با مشتق‌گیری از شکل جریان به شکل

$$\beta_2 = \beta - \quad (10)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{\eta(x_w)^{1/4} + \frac{B}{4} \tan \beta - \eta(x_w)^{CL}}{\frac{B}{4}} \right)$$

به دست می‌آید.



شکل (۴): شکل جریان در مقطع بدنه‌ی پشتی.

۴-۲- محاسبه‌ی شکل سطح خیس‌شده‌ی بدنه‌ها

زاویه‌ی خط سکون در کف شناور پروازی برای هر بدنه با استفاده از رابطه‌ی تجربی [۷]

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{\pi \tan \tau_i}{2 \tan \beta_i} \right) \quad (11)$$

به دست می‌آید. طول خیس‌شده‌ی چاین در هر کدام از بدنه‌های جلویی و پشتی با کمک رابطه‌ی زیر تخمین زده می‌شود [۷].

$$L_{Ci} = L_{Wi} - \frac{B \tan \tau_i}{\pi \tan \beta_i} \quad (12)$$

در صورتی که طول خیس‌شده‌ی چاین منفی شود، می‌بایست مقدار آن را برابر با صفر قرارداد. طول خیس‌شده‌ی میانگین شناور با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$L_{Mi} = \frac{L_{Wi} + L_{Ci}}{2} \quad (13)$$

و با استفاده از رابطه‌ی

$$\lambda_i = \frac{L_{Mi}}{B} \quad (14)$$

بی‌بعد می‌شود.

$$K_i = \frac{C_i^{1.5}}{2.58(C_p^{Max})_i^{1.5}} \quad (22)$$

با استفاده از $C_p^{Max}_i$ ضریب فشار بیشینه در هر مقطع بوده که با استفاده از به دست خواهد آمد:

$$C_p^{Max} = R_{St} \sin^2 \alpha_i \quad (23)$$

که در آن R_{St} ضریب اثر دوری از خط سکون بوده که با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$R_{St} = (1.02 - 0.25\zeta_i^{1/4}) \frac{0.5 - \zeta_i}{0.51 - \zeta_i} \quad (24)$$

همچنین، فشار هیدرواستاتیکی در هر بدنه با استفاده از عبارت زیر تخمین زده می‌شود.

$$C_p^{HS} = \frac{2R_{St} P_{Y_i} \sin \tau_i}{F n_B} \left(\zeta_i + \zeta_i \left(\frac{1}{\tan \alpha_i} - \frac{1}{\tan \alpha_{wi}} \right) \right) \quad (25)$$

در این رابطه، α_{wi} زاویه‌ی آب آرام با خط مرکزی شناور بوده و به صورت به دست می‌آید.

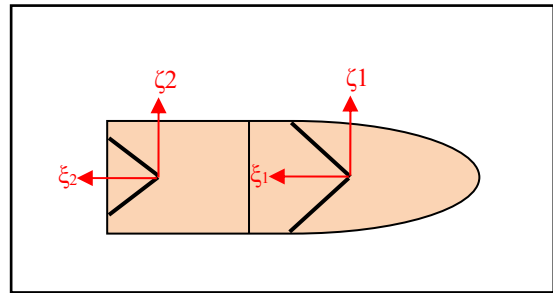
$$\alpha_{wi} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \tau_i}{\tan \beta_i} \right) \quad (26)$$

۶-۲- انجام محاسبات

به منظور انجام محاسبات برای پیش‌بینی توزیع فشار در کف یک شناور پروازی، در ابتدا طول خیس‌شده و شکل طول خیس‌شده در هر شناور به دست می‌آید. می‌بایست به این نکته اشاره نمود که برای حل عددی معادله‌ی ۵ از روش نیوتن رافسون استفاده می‌شود. سپس، در کف هر کدام از بدنه‌ها یک شبکه‌بندی ایجاد می‌شود. ابتدا، C_{pi}^L در هر بدنه با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه می‌شود. سپس، اثرات ترانسوم و پله در هر بدنه محاسبه می‌شوند و در رابطه‌ی ۱۵ اعمال می‌شوند تا فشار هیدرودینامیکی در هر بدنه به دست آید. بعد از آن، فشار هیدرواستاتیکی با کمک رابطه‌ی ۲۵ تخمین زده می‌شود. تمامی محاسبات برای هر نقطه از شبکه‌بندی صورت می‌پذیرند. یک کد محاسباتی برای این مدل ارائه شده در نرم افزار متلب تهیه شده است.

۳- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی روابط ارائه شده و کد تهیه شده، مقایسه‌هایی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است.



شکل (۶): استفاده از مقاطع موازی خط سکون برای شناور پروازی پله‌دار.

فشار هیدرودینامیکی وارد بر کف هر صفحه‌ی پروازی را می‌توان با بکارگیری رابطه تجربی پیشنهادشده توسط مورایتو [۲۱] با استفاده از به دست آورد.

$$C_{pi}^{FD} = R_{Ti} C_{pi}^L \quad (16)$$

در این رابطه R_{Ti} ضریب اثر ترانسوم می‌باشد. در این پژوهش فرض شده است که ترانسوم و پله مانند هم عمل می‌کنند. لذا با استفاده از این فرض در هر بدنه اثر ترانسوم با استفاده از رابطه‌ی به دست می‌آید.

$$R_{Ti} = \frac{(\lambda_{\zeta_i} - \zeta_i)^{1.4}}{(\lambda_{\zeta_i} - \zeta_i)^{1.4} + 0.05} \quad (17)$$

در این رابطه داریم:

$$\lambda_{\zeta_i} = \lambda_i - \frac{\zeta_i - 0.25}{\tan \alpha_i} \quad (18)$$

C_{pi}^L ضریب توزیع طولی فشار می‌باشد که با استفاده از عبارت تجربی زیر قابل تخمین است:

$$C_{pi}^L = \frac{C_i \zeta_i^{1/3}}{\zeta_i + K_i} \quad (19)$$

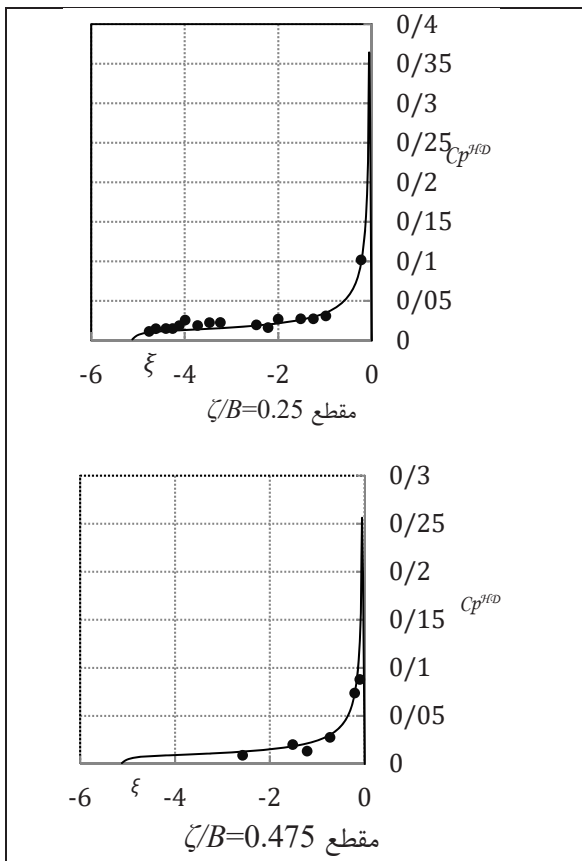
C و K دو ضریب تجربی می‌باشند که نمادهای توزیع فشار روی مقاطع موازی با خط سکون و فاشر بیشینه‌ی هر مقطع هستند. ضریب C با استفاده از عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_i = 0.006 P_{Y_i} \tau_i^{1/3} \quad (20)$$

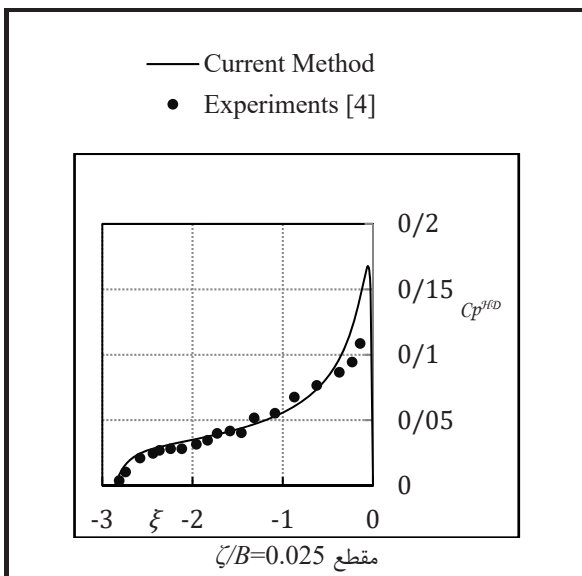
در رابطه‌ی (۱۸) عبارت P_Y با کمک رابطه‌ی زیر تخمین زده می‌شود:

$$P_{Y_i} = (1.02 - 0.05(\beta + 5)\zeta_i^{1/4}) \frac{0.5 - \zeta_i}{0.51 - \zeta_i} \quad (21)$$

ضریب K نیز با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:



شکل (۷): توزیع فشار در کف شناور پروازی با زاویه ددرایز صفر درجه و زاویهی تریم دینامیکی ۴ درجه.

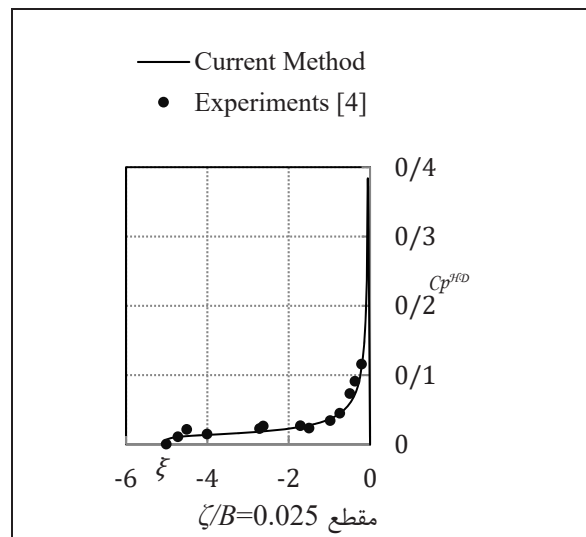


می‌بایست به این نکته اشاره کرد که آزمایش مشخصی برای ارائه‌ی توزیع فشار در کف شناور پروازی پله‌دار ارائه نشده است. اما در این مقاله، سعی می‌شود از آزمایش‌های دیگر و در دو مرحله دقت روش و کد را مورد ارزیابی قرار داد.

۳-۱- مقایسه نتایج با شناور بدون پله

با آنکه بیان شد، پیش از این آزمایش خاصی برای اندازه‌گیری فشار در کف شناورهای پروازی پله‌دار ارائه نشده است، اما برای شناورهای بدون پله نتایجی موجود است که توسط کاپریان و بوید [۴] گزارش شده‌اند. در این بخش، مقایسه‌های با این نتایج انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی برای شناور پروازی با زاویهی ددرایز صفر درجه و تریم ۴ درجه در شکل ۷ در سه مقطع طول مختلف نشان داده شده است. با توجه به آنچه در شکل ۷ نشان داده شده است، کد ارائه شده شکل توزیع فشار را شبیه نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند و همچنین، مقادیر پیش‌بینی‌شده به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط کاپریان و بوید [۴] نزدیک می‌باشند.

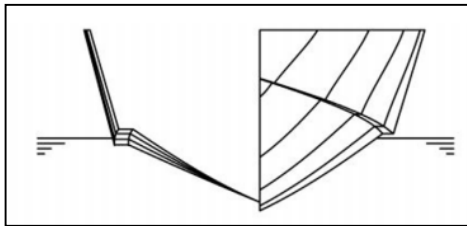
مقایسه‌هایی نیز برای زاویهی ددرایز ۲۰ درجه صورت پذیرفته است. مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از کد حاضر و نتایج کاپریان و بوید [۴] برای یک شناور پروازی با زاویهی تریم ۶ درجه و ددرایز ۲۰ درجه در شکل ۸ به تصویر در آمده است.



سپس، نیروی لیفت محاسبه شده با نیروی وزن شناور مقایسه گردیده تا دقت روش مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول (۱): مشخصات شناور پروازی پله دار بررسی شده توسط دی مارکو و همکاران [۴۸].

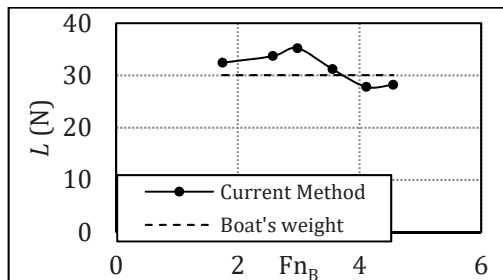
مقدار	پارامتر
۰/۹۳۵	طول کلی شناور (متر)
۰/۳۳۵	بیشترین عرض شناور (متر)
۲۳	زاویه ی ددرایز (درجه)
۳۰/۰۷۵	وزن (نیوتن)
۶	ارتفاع پله (میلی متر)
۰/۳۳	موقعیت طولی پله نسبت به پاشنه (متر)



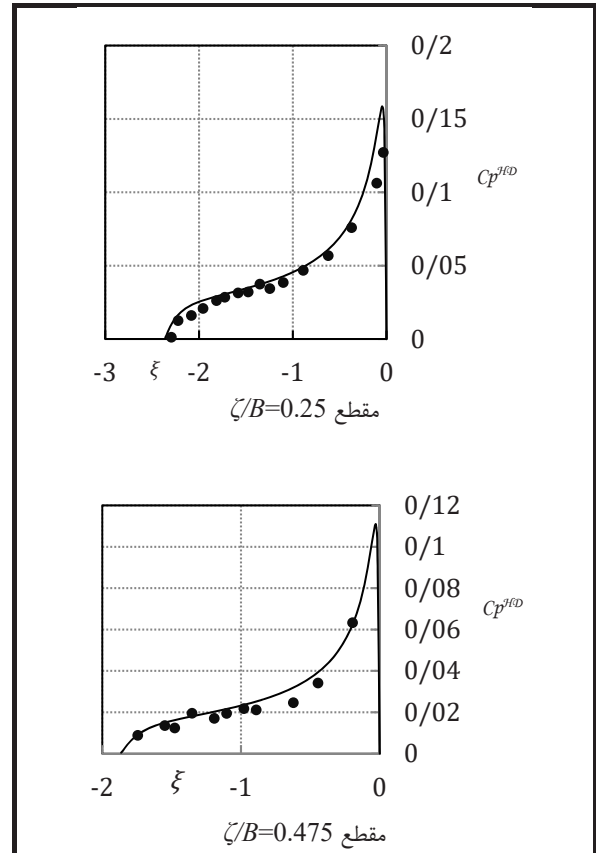
شکل (۹): خطوط بدنه ی عرضی شناور مورد بررسی توسط دی مارکو و همکاران [۴۸].

جدول (۲): ویژگی های عملکردی شناور بررسی شده توسط دی مارکو و همکاران [۴۸].

عدد فرود عرضی	زاویه تریم دینامیکی (درجه)	بالا آمدگی مرکز ثقل (میلی متر)
۱/۷۵	۳/۹۵	۷/۳۱
۲/۵۷	۲/۶۷	۱۲/۰۲
۲/۹۷	۲/۱۵	۲۱/۱۴
۳/۵۵	۱/۸۰	۲۱/۴۰
۴/۱۱	۱/۵۲	۲۲/۵۹
۴/۵۵	۰/۳۳	۲۷/۲۷



شکل (۱۰): مقایسه نیروی لیفت محاسبه شده با وزن شناور.



شکل (۸): توزیع فشار در کف شناور پروازی با زاویه ددرایز ۲۰ درجه و زاویه ی تریم دینامیکی ۶ درجه.

۳-۲- مقایسه نیروی لیفت محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی

برای مقایسه دقت روش حاضر در پیش بینی توزیع فشار وارد بر کف شناور پروازی پله دار، از نتایج آزمایشگاهی دی مارکو و همکاران [۴۸] استفاده شده است. آنها عملکرد یک شناور پروازی پله دار را در سرعت های مختلف در رژیم پروازی محاسبه نمودند. اطلاعات این شناور پروازی پله دار در جدول ۱ نشان داده شده است. خطوط بدنه ی عرضی این شناور نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. زاویه ی تریم دینامیکی و بالا آمدگی مرکز ثقل شناور مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است. با استفاده از این اطلاعات، توزیع فشار وارد بر شناور به دست آمده است و سپس، نیروی لیفت وارد بر شناور با استفاده از رابطه ی زیر به دست آمده است.

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 \left(\int_{L_k} c_p^{FD} d\xi + \int_{L_k} c_p^{FS} d\xi \right) \quad (27)$$

۴- نتایج

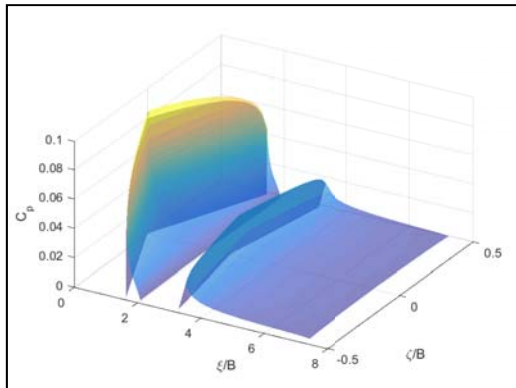
پیش از این در مطالعات پیشین، محققان زیادی نشان داده‌اند که در یک شناور پروازی، افزایش زاویه تریم منجر به افزایش فشار و همچنین، افزایش زاویهی ددرایز منجر به کاهش فشار می‌شود. اما در این پژوهش، شناورهای پروازی پله‌دار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لذا، در این پژوهش به بررسی اثر پله بر توزیع فشار در شناورهای پروازی پرداخته می‌شود.

۴-۱- اثر ارتفاع پله بر توزیع فشار

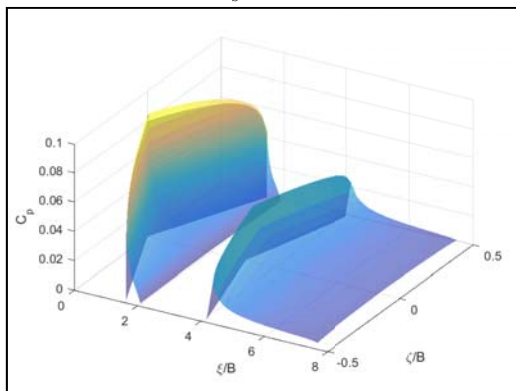
در ابتدای امر سعی بر این می‌شود تا بررسی شود که ارتفاع پله چگونه بر توزیع فشار در کف شناور پروازی اثر می‌گذارد. برای این مورد شناور پروازی‌ای با طول خیس‌شده‌ی ۱۰ (بی‌بعد شده با عرض)، زاویهی ددرایز ۱۰ و زاویهی تریم ۲ درجه در نظر گرفته شده است. فشار در کف آن در سه ارتفاع مختلف ۰/۱ تا ۰/۳ (بی‌بعد شده با عرض) محاسبه شده و در شکل (۱۱) نشان داده شده است. از این شکل مشخص است که ارتفاع پله تأثیری بر توزیع فشار در بدنه‌ی جلویی نداشته، اما منجر به افزایش مقادیر فشار در بدنه‌ی پشتی می‌شود. شکل کاملاً گویایی این مطلب است که با افزایش ارتفاع پله مقادیر بیشینه‌ی فشار از ۰/۰۲ به ۰/۰۴ افزایش می‌یابند. همچنین، از شکل ارائه‌شده می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع پله شکل سطح خیس‌شده‌ی بدنه‌ی پشتی به حالت باریک‌تری تبدیل می‌شود (یعنی زاویه‌ی سکون افزایش می‌یابد).

نتایجی برای زاویه‌ی ددرایز ۱۰ درجه با در نظر گرفتن زاویه‌ی تریم شش درجه و طول خیس‌شده‌ی بی‌بعد ۲ نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع پله منجر به افزایش مقادیر فشار در بدنه‌ی پروازی پشتی می‌شود. اما نکته‌ی قابل توجه این است که در زاویه‌ی تریم ۶ درجه، بدنه‌ی پشتی در مقابل بدنه‌ی جلویی فشار بسیار کمی دارد و افزایش ارتفاع پله منجر به افزایش چشمگیری در فشار نمی‌شود. لذا، سعی بر این خواهد شد که زاویه‌ی تریم بزرگ‌تری نیز مدل شود تا این قضیه در آن نیز بررسی شود. نتایج حاصل از توزیع فشار برای شناور پروازی با زاویه‌ی رأس ۱۰ درجه، طول خیس‌شده‌ی بی‌بعد ۲ و زاویه‌ی تریم ۱۲ درجه در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

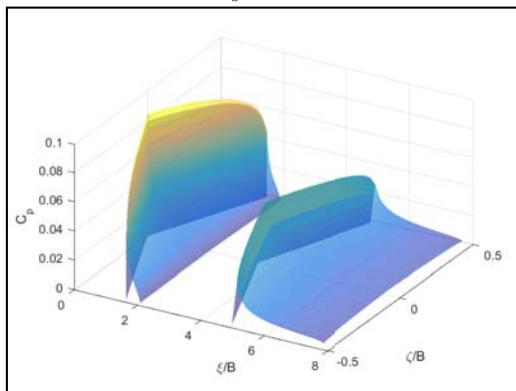
از این شکل مشخص است که همانند آنچه بیان شد افزایش ارتفاع پله منجر به افزایش فشار در بدنه‌ی پشتی می‌شود، اما در زوایای تریم بزرگ (۶ به بالا) اثرات چشمگیر نیست. البته، نکته مهم این است که شناورهای پروازی پله‌دار معمولاً به زوایای تریم بالای ۶ درجه نمی‌رسند و لذا، پله برای آنها دارای اثرات مفید و مؤثر در نیروی لیفت می‌باشد.



$h_s=0.1B$



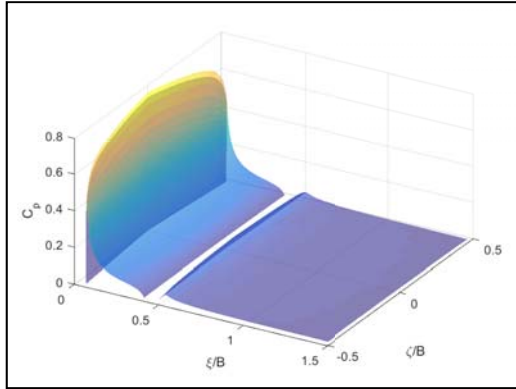
$h_s=0.2B$



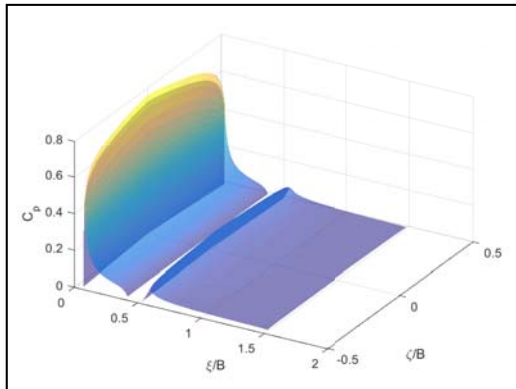
$h_s=0.3B$

شکل (۱۱): توزیع فشار محاسبه‌شده برای شناور پروازی پله‌دار با زاویه‌ی ددرایز ۱۰ درجه، تریم ۲ درجه، طول خیس‌شده‌ی بی‌بعد ۸.

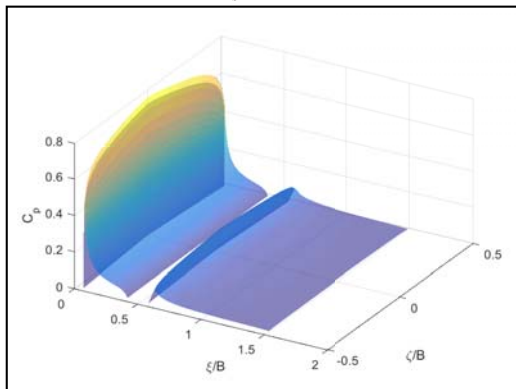
سه طول پله‌ی متفاوت در نظر گرفته شده و برای هر کدام فشار محاسبه شده است. بر اساس نتایج حاصل شده، کاهش نسبت طول طول پله به طول خیس شده در بدنه‌ی جلویی منجر به افزایش فشار در بدنه‌ی پشتی می‌شود.



$h_s=0.1B$



$h_s=0.2B$

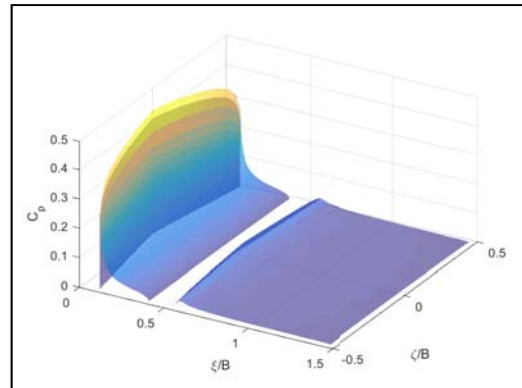


$h_s=0.3B$

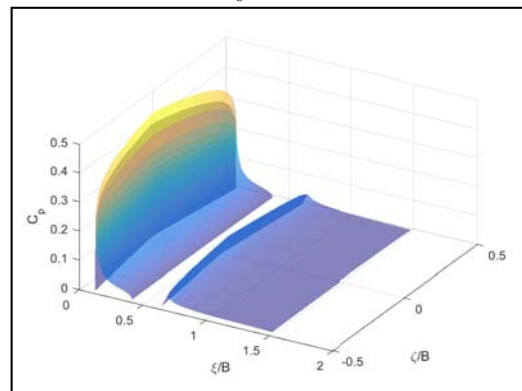
شکل (۱۲): توزیع فشار محاسبه شده برای شناور پروازی پله‌دار با زاویه‌ی ددرایز ۱۰ درجه، تریم ۱۲ درجه، طول خیس شده‌ی بی‌بعد ۱/۵.

۲-۴- اثر طول پله بر فشار

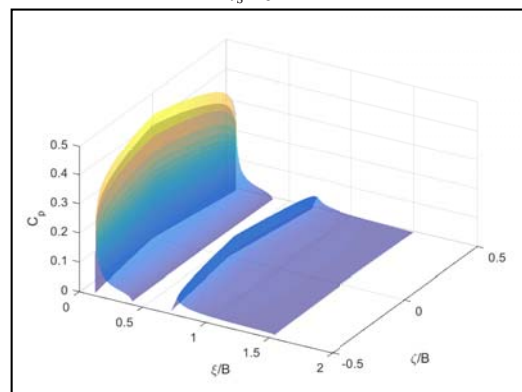
بعد از بررسی اثر ارتفاع پله بر توزیع فشار، اثر طول پله نیز بر فشار وارد بر کف شناور پروازی پله‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور شناور پروازی ۱۰ درجه با زاویه‌ی تریم ۲ درجه و عدد فرود عرضی ۳ و ارتفاع پله بی‌بعد شده‌ی ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود.



$h_s=0.1B$



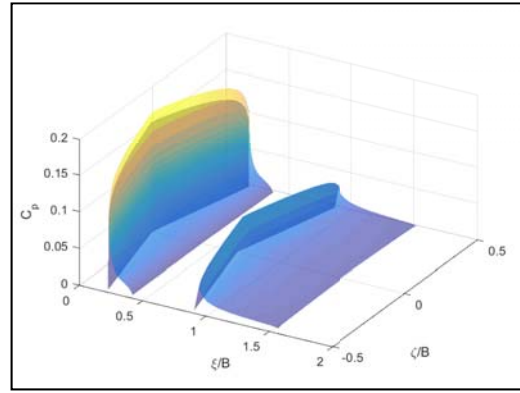
$h_s=0.2B$



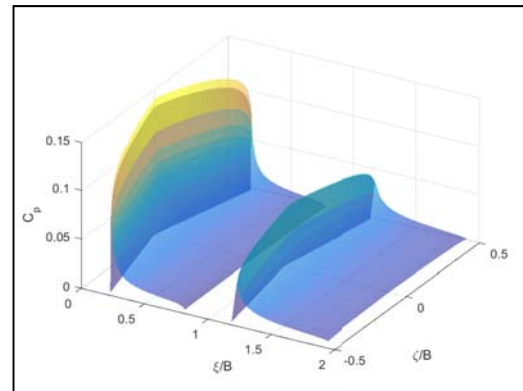
$h_s=0.3B$

شکل (۱۱): توزیع فشار محاسبه شده برای شناور پروازی پله‌دار با زاویه‌ی ددرایز ۱۰ درجه، تریم ۶ درجه، طول خیس شده‌ی بی‌بعد ۱/۵.

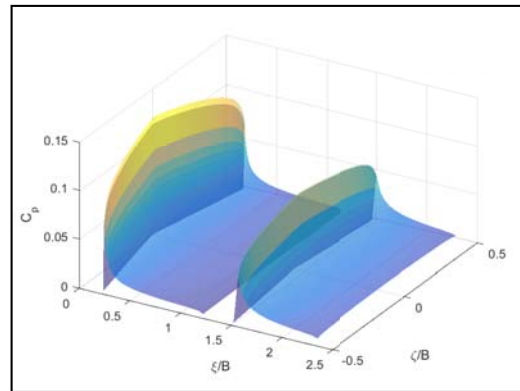
بی‌بُعد شده برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در شکل ۱۴ نمایش داده شده‌اند. همانگونه که از این شکل مشخص است، در تمامی سه حالت با افزایش زاویه‌ی تریم، نیروی لیفت در هر دو بدنه افزایش پیدا می‌کند. اما نکته قابل توجه آن است که در شناورهای ا ددرایز بزرگ‌تر این افزایش‌های حاصل‌شده در نیروی لیفت بدنه‌ی پشتی کمتر هستند.



$L_s = 2L_{W1}$



$L_s = L_{W1}$

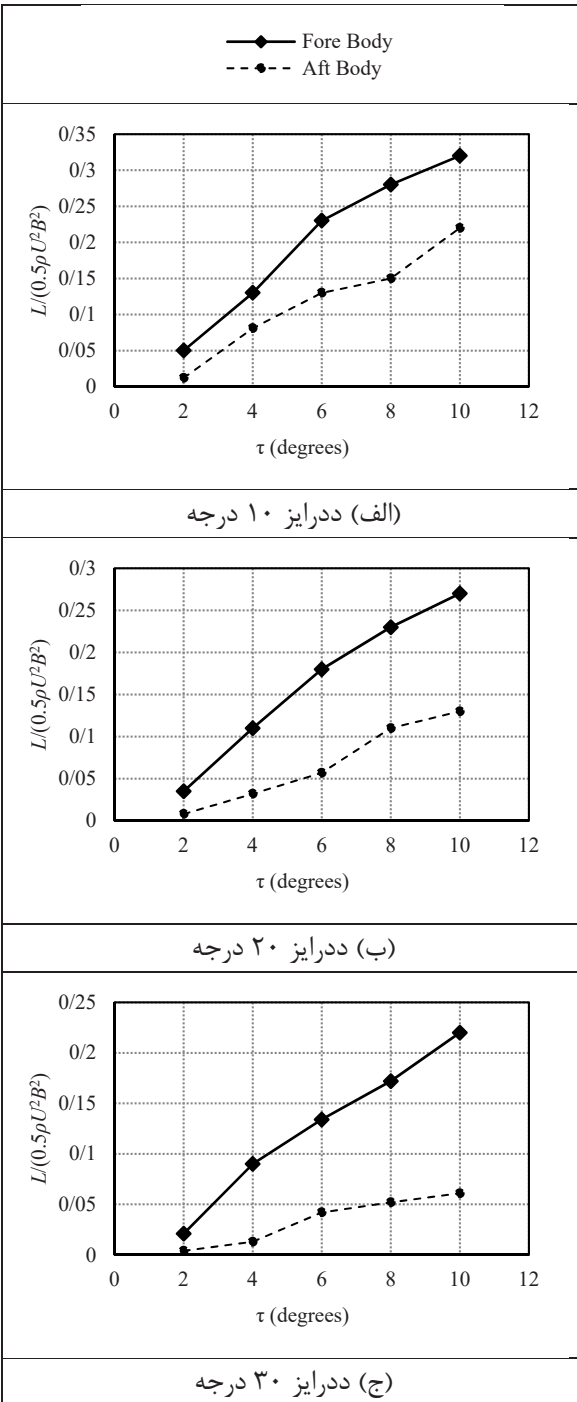


$L_s = 0.5L_{W1}$

شکل (۱۳): توزیع فشار محاسبه‌شده برای شناور پروازی پله‌دار با زاویه‌ی ددرایز ۱۰ درجه، تریم ۳ درجه، ارتفاع پله‌ی بی‌بُعد یک دهم.

۳-۴- نیروی لیفت محاسبه‌شده

به منظور بررسی زاویه‌ی تریم بر میزان اثر بدنه‌ی پشتی بر نیروی لیفت وارد بر شناور، سه شناور با زوایای رأس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند. در همه‌ی این شناورها طول خیس‌شده‌ی بی‌بُعد شناور برابر با ۲ در نظر گرفته شده و سعی شده است که اثرات افزایش زاویه‌ی تریم نشان داده شود. در تمام این حل‌ها، عدد فرود عرضی شناور برابر با ۳ فرض شده و طول پله



شکل (۱۴): اثر زاویه‌ی تریم بر نیروی لیفت تولید شده در بدنه‌ی جلویی و پشتی.

C_p^L	ضریب توزیع فشار طولی
C_p^{Max}	ضریب فشار بیشینه
B	عرض شناور (متر)
f	تابع کف شناور در بدنه‌ی پشتی (متر)
F_{NB}	عدد فرود عرضی
h_s	ارتفاع پله (متر)
L_{Ci}	طول خیس‌شده‌ی چپین در بدنه‌ی i (متر)
L_K	طول خیس‌شده‌ی کیل (متر)
L_{Mi}	طول خیس‌شده‌ی میانگین در بدنه‌ی i (متر)
L_s	موقعیت عمودی پله نسبت به پاشنه (متر)
L_{Wi}	طول خیس‌شده‌ی در بدنه‌ی i (متر)
p	فشار (پاسکال)
P_{Yi}	ضریب اثردهی فاصله از خط مرکزی در هر بدنه
R_T	ضریب اثر ترانسوم یا پله
R_{St}	ضریب اثر خط سکون
U	سرعت پیشروی شناور (متر بر ثانیه)
x_W	محل تقاطع آب و بدنه‌ی پشتی (متر)
α_i	زاویه‌ی خط سکون در بدنه i (درجه)
α_{wi}	زاویه‌ی آب آرام به خط مرکزی در بدنه i (درجه)
β	زاویه‌ی ددرایز شناور (درجه)
β_i	زاویه‌ی ددرایز محلی شناور در بدنه i (درجه)
η	بالآمدگی پشت شناور (متر)
λ_i	طول خیس‌شده‌ی میانگین بی بعد در بدنه‌ی i
$\lambda_{\tau i}$	طول بی‌بعد مورد اثر قرار گرفته توسط ترانسوم و پله در هر بدنه
τ	زاویه‌ی تریم دینامیکی

مراجع:

- [1] Vorus, W. S., "Hydrodynamics of planing monohull watercraft," Springer, 2017.
- [2] Von Karman T., "The impact of seaplanes floats during landing," Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.
- [3] Wagner, H., "The landing of seaplanes," Technical Report, Technical Note 622, 254. NACA, 1932.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، یک مدل ریاضی به منظور مدل‌سازی توزیع فشار کف شناورهای پروازی پله‌دار تهیه شد. این مدل ریاضی با استفاده از روابط پیشین مربوط به ویک پشت یک ترانسوم یک بدنه‌ی پروازی و روابط پیشین مربوط به توزیع فشار توسعه یافت. فشار با استفاده از مقاطعی موازی با خط سکون محاسبه شد و اثرات ترانسوم اعمال گردید. یک روش محاسباتی برای محاسبه‌ی توزیع فشار در کف شناور پروازی معرفی شد. مقایسه‌هایی با نتایج آزمایشگاهی پیشین صورت پذیرفت و مشاهده شد که روش حاضر توزیع فشار در کف شناورهای پروازی بدون پله را مشابه نتایج آزمایشگاهی پیشین تخمین می‌زند. همچنین، به دلیل آنکه نتیجه‌ی آزمایشگاهی‌ای برای توزیع فشار در کف شناورهای پروازی پله‌دار موجود نبود، سعی شد تا با انتگرال‌گیری از فشار، نیروی لیفت وارد بر کف شناور محاسبه شود تا دقت محاسبات تخمین زده شود. مقایسه‌ی بین نیروی لیفت با نیروی وزن یک شناور پله‌دار نشان از دقت مناسب روش در محاسبات فشار و نیروی حاصل از فشار می‌داد.

مدل حاضر برای بررسی اثرات ارتفاع پله و طول آن مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد که در اثر افزایش ارتفاع پله، میزان فشار در بدنه‌ی پشتی افزایش می‌یابد. همزمان با این امر شکل سطح خیس‌شده در بدنه‌ی پشتی باریک‌تر می‌شود. از سوی دیگر، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نشان دادند که با کاهش نسبت طول خیس‌شده در بدنه‌ی جلویی به طول پله، میزان فشار در بدنه‌ی پشتی افزایش می‌یابد.

مطالعات پیشین به مدل‌سازی حرکات شناور پروازی در صفحه‌ی افقی و پیش‌بینی نیروهای مانور این شناورها با استفاده از این مدل می‌پردازد.

فهرست علائم

A	ضریب موجود در رابطه‌ی ویک
C	ضریبی در محاسبه‌ی توزیع فشار
$C_p^{f/D}$	ضریب فشار هیدرودینامیکی
$C_p^{f/S}$	ضریب فشار هیدرواستاتیکی

planning hulls in calm water,” Royal Institution of Naval Architects, No. 2, pp. 53–70, 1978.

[15] Azcueta, R., “Steady and unsteady RANSE simulations for planning crafts,” 7th International conference on Fast Sea Transportation (FAST 2003), Ischia, Italy, 2003.

[16] Carponnetto, M., “Particular CFD simulations for planning hulls,” 2nd International Conference on High Performance Marine Vehicles (HIPER 01), Hamburg, Germany, 2004.

[17] Brizzolara, S., and Serra, F., “Accuracy of CFD codes in the prediction of planning surfaces hydrodynamic characteristics,” 2nd International Conference on Marine Research and Transportation (ICM RT 2007), Naples, Italy, 2007.

[18] Kohansal, A. R., and Ghassemi, H., “A numerical modeling of hydrodynamic characteristics of various planning hull forms,” Ocean Engineering, Vol. 37, pp. 498-510, 2008.

[19] Mousaviraad, S. M., Zhang, W., and Stern, F., “URANS studies of hydrodynamic performance and slamming loads on high-speed planning hulls in calm water and waves for deep and shallow conditions,” Applied Ocean Research, Vol. 51, pp. 222-240, 2015.

[20] Morabito, M. G., “On the spray and bottom pressures of planning surfaces,” PhD thesis, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ, US, 2010.

[21] Morabito, M. G., “Empirical equations for planning hull bottom pressures,” Journal of Ship Research, Vol. 58, 185-200, 2014.

[22] Ghadimi, P., Tavakoli, S., Dashtimanesh, S., and Djeddi S. R., “Three-dimensional mathematical investigation of dynamic and hydrostatic pressure distributions on planning hulls,” Journal of Computational Engineering, Vol. 2013, pp. 1-13, 2013.

[23] Ghadimi, P., Tavakoli, S., Dashtimanesh, A., and Feizi-Chekab, M. A., “Introducing a particular mathematical

[4] Kapryan, W. J., and Boyd, G. M., “Hydrodynamic pressure distribution obtained during a planning investigation of five related prismatic surfaces,” NACA Technical Note, 1955.

[5] Smiley, R. F., “A study of water pressure distribution during landing with special reference to a prismatic model having a heavy loading and a 30-degree angle of deadrise,” NACA Translation, 1950.

[6] Smiley, R. F., “An experimental study of the water-pressure distributions during landing and planning of a heavily loaded rectangular flat-plate model,” NACA Technical Note 2453, 1951.

[7] Savitsky, D., “Hydrodynamic design of panning hulls,” Marine Technology, Vol. 1, pp. 71-95, 1964.

[8] Matrin, M., “Theoretical prediction of motions of high-speed planning boats in waves,” DTNSRDC. Report 76-0069. Bethesda, MD, USA, 1976.

[9] Zarnickh, E. E., “A nonlinear mathematical model of motions of a planning boat in regular waves,” Bethesda Maryland: David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1978.

[10] Zarnickh, E. E., “A nonlinear mathematical model of motions of a planning boat in Irregular waves,” Bethesda Maryland: David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1979.

[11] Akers, R. H., “Dynamic analysis of planning hulls in vertical plane,” In Proceedings of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, New England Section, 1999.

[12] Payne, P. R., “Contribution to planning theory,” Vol. 22, pp. 699-729, 1995.

[13] Van Deyzen, A., “A nonlinear mathematical model for motions of a planning monohull in head seas,” International Conference on High Performance Marine Vehicles, Naples, Italy, 2008.

[14] Wellicome, J. F., and Jahangeer, Y. M., “The prediction of pressure loads on

آرام»، مهندسی شناورهای تندرو، شماره ۵۰، صفحات ۲۸-۳۴، ۱۳۹۴.

[33] Dashtimanesh, A., Tavakoli, S., and Sahoo P. K., "Development of a simple mathematical model for calculation of trim and resistance of two stepped planning hulls with transverse steps," Proceedings of the 1st International Conference on Ships and Offshore Structures, Hamburg, Germany, 2016.

[34] Dashtimanesh, A., Tavakoli, S., and Sahoo P. K., "A simplified method to calculate trim and resistance of a two-stepped planning hull," Ships and Offshore Structures, 12(sup1), S317-S329, 2017.

[۳۵] نیازمند بیلندی، رسول، دشتیمنش، عباس، و توکلی، ساسان، «محاسبه‌ی کارآیی شناور دوپله‌ی پروازی با رویکرد توزیع فشار نامتقارن»، پنجمین همایش ملی شناور تندرو، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اردیبهشت ۱۳۹۶.

[۳۶] نیازمند بیلندی، رسول، دشتیمنش، عباس، و توکلی، ساسان، «توسعه یک مدل ریاضی غیرخطی برای شبیه‌سازی رفتار بدنه‌های پروازی دوپله در امواج منظم»، مهندسی شناورهای تندرو، شماره ۵۰، ص. ۷۲-۸۷، ۱۳۹۶.

[37] Savitsky, D., and Morabito, M., "Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planning hulls," Marine Technology, Vol. 47, Jan. 2010.

[38] Ghadimi, P., Tavakoli, S., and Dashtimanesh, A., "Calm water performance of hard-chine vessels in semi-planning and planning regimes." Polish Maritime Res, Vol. 23, pp. 23-45, 2017.

[39] Ghadimi, P., Tavakoli, S., and Dashtimanesh, A., "An analytical procedure for time domain simulation of roll motion of the warped planning hulls," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 230, pp. 600-615, 2016.

[40] Ghadimi, P., Tavakoli, S., and Dashtimanesh, A., "Coupled heave and pitch motions of planning hulls at non-zero heel angles," Applied Ocean Research, Vol. 59, pp. 286-303, 2016.

model for predicting the resistance and performance of prismatic planning hulls in calm water by means of total pressure distribution," Vol. 12, pp. 73-94, 2015.

[24] Savitsky, D., "The effect of bottom warp on the performance of planning hulls," 3rd Chesapeake Powerboat Symposium, Annapolis, MD, US, 2012.

[25] Pennino, S., Scamaedella, A., and Klymenko, H., "Resistance evaluation for warped hulls by means of total pressure distribution," 11th High-Speed Marine Vehicle Conference, Naples, Italy, 2017.

[26] Taunton, D. J., Hudson, D. A., and Sheno, R. A., "Characteristics of a series of high speed hard chine planning hulls-Part I: Performance in Calm Water," International Journal of Small Craft Technology, Vol. 152, pp. B55-B77, 2010.

[27] Taunton, D. J., Hudson, D. A., and Sheno, R. A., "Characteristics of a series of high speed hard chine planning hulls-part II: performance in waves," International Journal of Small Craft Technology, Vol. 153, pp. B1-B22, 2011.

[28] Lee, E., Pavkov, M., and McCue-Weil, W. "The systematic variation of step configuration and displacement for a double-step planning craft," Journal of Ship Production and Design, Vol. 30, pp. 89-97, 2013.

[29] Morabito, M., Pavkov, M., Timmins, and Beaver, B., "Experiments on directional stability of stepped planning hulls," In proceedings of the 4th Chesapeake Power boat symposium, Annapolis, MD, US, 2014.

[30] Faison, L. A., "Design of a high speed planning hull with a cambered step and surface piercing hydrofoils," PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts, US, 2011.

[31] De Marco, A., Mancini, S., Miranda, S., and et al. "Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planning hull," Applied Ocean Research, Vol. 64, pp. 135-154, 2017.

[۳۲] دشتیمنش، عباس، و قلی‌زاد، محمد، «ارائه یک مدل محاسباتی برای ارزیابی کارایی بدنه‌های دوپله در آب

[41] Ghadimi, P., Tavakoli, S., and Dashtimanesh, A., Zamanian, R., "Steady performance prediction of heeled planning boat in calm water using asymmetric 2D+T model," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 231, No. 1, 234-257, 2017.

[42] Tavakoli, S., Ghadimi, P., and Dashtimanesh, A., "A non-linear mathematical model for coupled heave, pitch and roll motions of a high-speed planning hull," Journal of Engineering Mathematics, Vol. 104, 157-194, 2017.

[43] Tavakoli, S., Dashtimanesh, A., and Sahoo, P. K., "An oblique 2D+T approach for hydrodynamic modeling of yawed planning boats in calm water," Journal of Ship Production and Design, Published Online, DOI: 10.5957 / JSPD. 160032, 2017.

[44] Tavakoli, S., and Dashtimanesh, A., "Running attitudes of yawed planning hulls in calm water: development of an oblique 2D+T approach," Journal of Ships and Offshore Structures, Vol. 12, pp. 1086-1099, 2017.

[۴۵] قدیمی، پرویز، توکلی ساسان، و دشتی‌منش، عباس، «ارائه یک مدل ریاضی برای ارزیابی اثرات زاویه‌ی رأس متغیر بر عملکرد شناورهای پروازی»، دریافنون، دوره ۴، ص. ۳۹-۵۲، ۱۳۹۶.

[۴۶] توکلی، ساسان، قدیمی، پرویز، و دشتی‌منش، عباس، «مدلسازی ریاضی حرکت رول شناورهای پروازی با روش دوبعد به اضافه‌ی زمان نامتقارن»، هجدهمین همایش صنایع دریایی، کیش، ایران، ۱۳۹۵.

[47] Savitsky, D., and Breslin, J. P., "On the main spray generated by planning surfaces," NACA Technical Note No. 678, 1958.

[48] De Marco, A., Mancini S., Miranda, S., and et al., "Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planning hull," Applied Ocean Research, Vol. 67, 135-154, 2017.