

بررسی الگوی موج اطراف یک شناور پلنینگ استپ‌دار

سجاد تاج گله ویسی^۱، حسن قاسمی^۲، محمد بختیاری^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران؛ sajad.veysi@yahoo.com

^۲ هیات علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران؛ gasemi@aut.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران؛ navalarchitect2000@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۲)

چکیده:

امروزه، کاهش درگ در شناورهای تندروی تک‌بدنه به منظور دستیابی به سرعت‌های بالا امری مهم بوده و بسیار مورد توجه می‌باشد. کاهش درگ، با استفاده از روش‌هایی مانند پوشش‌های مختلف، نصب تجهیزات متفرقه و تغییر در فرم بدنه‌ی شناور تندرو میسر می‌شود. از جمله روش‌های کارآمد در این زمینه می‌توان به ایجاد استپ^۱ در کف شناور پلنینگ اشاره کرد که در سرعت‌های بالا، باعث کاهش سطح خیس و در نهایت کاهش قابل ملاحظه درگ می‌شود. تاکنون، اکثر مطالعات بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی شناورهای استپ‌دار انجام شده‌اند و کمتر به بررسی الگوی موج تولیدشده‌ی اطراف این شناورها پرداخته شده است. در این مقاله، الگوی موج تولیدشده در اطراف یک شناور پلنینگ استپ‌دار به روش عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور، از معادلات RANS همراه با مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی جریان مغشوش حول بدنه‌ی شناور استپ‌دار استفاده می‌شود. سطح آزاد جریان نیز با بکارگیری مدل دوفازی VOF مدل‌سازی می‌شود. برای اعتبارسنجی، مقایسه‌ای بین نتایج عددی به دست آمده از این روش و نتایج به دست آمده از روابط نیمه‌تجربی ارائه‌شده توسط ساویسکی برای پروفیل ویک ایجادشده در پاشنه‌ی شناور انجام می‌شود. این مقایسه سازگاری نسبتاً خوبی را بین این دو روش نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:

شناور تندرو، درگ، استپ، دینامیک سیالات محاسباتی.

Investigation of Wave Pattern Around a Stepped Planning Hull

S. Veysi¹, H. Ghassemi², M. Bakhtiari³

¹MSc degree, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology

³Professor, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology

²PhD student, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology

(Submitted: 2016/July/20; Accepted: 2016/Aug/2)

Abstract

Today, the drag reduction in high speed planning hull vessel, in order to achieve higher speeds, is of great importance and there is a considerable interest to it. Drag reduction becomes possible through using various coating methods, installation of various equipments and changes in the hull form. Using step at the bottom of the hull is one of the most efficient methods to reduce drag. So far, most studies have been conducted on the hydrodynamic behavior of stepped planning hull, and wave pattern created around the hull has been less studied. In this paper, wave pattern around a stepped planning hull is investigated by numerical method. For this purpose, the RANS equations with $k-\epsilon$ turbulence model are implemented to simulate the turbulent flow around the hull. The VOF model is also used to model free surface. A comparison between the results of present simulation and Savitsky's empirical formula for wake profile was done, that showed a good agreement between the two methods.

Key words: High speed vessel, Drag, Step, Computational fluid dynamics.

¹ Step

شناورهای پلنینگ جزو آن دسته از شناورهای تندرو قرار می‌گیرند که مشخصه‌ی اصلی آن بهره‌مندی از نیروی هیدرودینامیکی در هنگام دریانوردی می‌باشد و در واقع درصد پایینی از وزن توسط نیروی شناوری تحمل می‌شود. نیروی هیدرودینامیکی نقش اساسی در رفتار و قابلیت‌های دریانوردی و تعادل دینامیکی و سرعت شناور دارد و همچنین، مقدار نیرو به سرعت، سطح خیس، فرم بدنه و عوامل دیگر وابسته می‌باشد. پس از ساخت اولین شناورهای تندرو در قرن هجدهم و بکارگیری آنها برای مصارف گوناگون، همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها، افزایش توان و سرعت شناور و کاهش نیروی درگ بوده است. امروزه، استپ به ابزاری مهم برای مهندسين جهت تحقق این امر تبدیل شده است. دلیل اصلی استفاده استپ در شناورهای تندو این است که به دلیل شکستگی در بدنه‌ی شناور، جدایش جریان روی بدنه اتفاق افتاده و سطح خیس کاهش می‌یابد. همچنین، علاوه بر کاهش سطح خیس، شناور به چند بخش کوچک تقسیم می‌شود که عرض هر یک از این قسمت‌ها در مقایسه با طول آن بزرگ‌تر شده و ضریب منظری بالاتری را نتیجه می‌دهد. این کاهش سطح خیس شناور، منجر به کاهش نیروی درگ و کاهش سوخت مصرفی می‌شود. همچنین، مقدار لیفت تولیدشده در سطوح با ضریب منظری بالا بیشتر از سطوح دارای ضریب منظری پایین است. بنابراین، شناور نسبت به حالت بدون استپ دارای لیفت بیشتری است. این امر به شناور کمک می‌کند تا با فاصله گرفتن از سطح آب، دارای سطح خیس کمتر و در نتیجه مقاومت اصطکاکی کمتری باشد [۱].

سالونسن^۲ برای اولین بار از روش تئوری نواری برای به دست آوردن ضرایب لیفت و درگ شناورهای پلنینگ که بر مبنای جریان پتانسیل بود، استفاده کرد. در این تکنیک، بدنه‌ی شناور به چندین صفحه‌ی دوبعدی تقسیم و جریان به صورت دوبعدی روی بدنه‌ی مورد آنالیز قرار می‌گیرد [۲]. فراندولی^۳ این روش را بهبود بخشید و نشان داد که تئوری نواری بیانگر نتایج نسبتاً قابل قبولی در اعداد فرود بالا می‌باشد [۳]. روش دیگر در تحلیل شناورهای پلنینگ روش 2.5D می‌باشد که برای اولین بار

توسط تولین مورد استفاده و در ادامه توسط زاهو برای مطالعه رفتار این شناورها در آب آرام بسط داده شد [۴]. ساوندرا^۴ و همکارانش با استفاده از مقادیر مرزی در مسئله‌ی صفحه پلنینگ توانستند ارتباط بین اختلاف پتانسیل و توزیع ورتکس را به دست بیاورند. آنها هیدرودینامیک فشاری و نیروهای لیفت و درگ را برای حالت پلنینگ به دست آوردند [۵]. قاسمی و همکاران با توسعه یک کد کامپیوتری یک روش ترکیبی برای تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ ارائه نمودند. در این روش، با استفاده از المان مرزی و تئوری لایه‌ی مرزی به تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناور پلنینگ پرداخته شد. همچنین، آنها از این کد برای مطالعه الگوی موج و ضریب فشار نیز استفاده نمودند [۶] و [۷]. ساویتسکی^۵ و مورابیتو^۶ طی یک آزمایشات گسترده بر روی بدنه‌های منشوری و یک حاصل از استپ در بدنه عقبی یک شناور استپ‌دار را مورد بررسی قرار دادند و روابطی برای ارتفاع پروفیل موج در پاشنه شناور در نواحی سنترلاین^۷ و یک‌چهارم عرض استخراج نمودند [۸]. تانتون و همکارانش در دانشگاه ساهمپتون انگلیس آزمایشاتی را بر روی یک سری بدنه‌ی پلنینگ هاردچاین انجام دادند. آنها ابتدا چهار بدنه‌ی یکسان (A,B,C,D) با تفاوت در نسبت طول به عرض (L/B) را بررسی نمودند. سپس، با ایجاد استپ در مدل C نمودارهای هیدرودینامیکی از قبیل تغییرات درگ، تریم، سطح خیس و آبخور را ترسیم نمودند [۹].

تاکنون، اکثر مطالعات بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی شناورهای استپ‌دار انجام گرفته است و کمتر بر روی الگوی موج اطراف این شناورها پرداخته شده است. در این مقاله، الگوی موج اطراف یک شناور پلنینگ استپ‌دار به صورت عددی با نرم‌افزار سی.اف.ایکس بررسی می‌شود و نتایج با روش‌های نیمه‌تجربی مقایسه می‌شود.

۲- پروفیل و یک پاشنه

⁴ Savander

⁵ Savitsky

⁶ Morabito

⁷ Centerline

² Salvansen

³ Ferandoli

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) + g_i \quad (4)$$

که در آن u, p و g به ترتیب سرعت، فشار و شتاب جاذبه می‌باشند و $\rho \overline{u'_i u'_j}$ بیانگر تنش‌های رینولدز می‌باشند. بر اساس روابط ویسکوزیته گردابه‌ای^{۱۰} که تنش‌های رینولدز و گرادیان‌های سرعت را با هم مرتبط می‌سازد.

معادلات مهم دیگر، معادلات آشفتگی می‌باشند. مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ یکی معروف‌ترین مدل‌های دو معادله‌ای است که پاسخ مناسبی برای طیف وسیعی از پدیده‌ها ارائه می‌نماید و در آن k معرف انرژی جنبشی جریان آشفته^{۱۱} و ε نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته نامیده می‌شود. در این مدل ویسکوزیته توربولانسی به وسیله‌ی معادله (۵) به ترم‌های انرژی جنبشی ویسکوزیته و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی مرتبط می‌شوند:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

که در آن C_μ عددی ثابت و مقادیر k و ε از طریق معادله‌های انتقال^{۱۲} که در زیر آمده است، به دست می‌آیند:

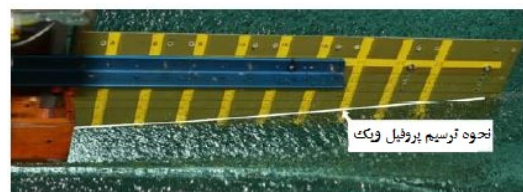
$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

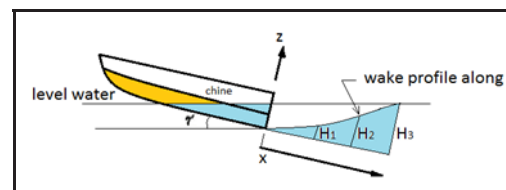
که در آن P_k مقادیری ثابت و ترم $\sigma_k, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 1}$ توربولانس ناشی از نیروهای ویسکوز نام دارد.

مسئله‌ی مهم دیگر مدل‌سازی سطح آزاد می‌باشد که به منظور شبیه‌سازی تغییر شکل‌های پیچیده در سطح مشترک دو سیال، از روش حجمی مدل‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. در این حالت، یک معادله انتقال برای محاسبه‌ی نسبت حجمی دو فاز سیال (برای مثال آب و هوا) به صورت زیر در هر گام زمانی حل می‌شود.

در سال ۲۰۰۹ ساویستکی و مورابیتو آزمایشاتی را بر روی بدنه‌های منشوری استپ‌دار به منظور یافتن ویک ایجادشده در پاشنه انجام دادند. برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح ویک پشت بدنه در خط سنترلاین و یک چهارم عرض^۸ تست‌های متعددی در زوایای ددرایز^۹ مختلف و زوایای تریم مختلف برای چندین بدنه انجام گرفت. شکل ۱ نمایی از آزمایش و چگونگی اندازه‌گیری پروفیل ویک پاشنه را نشان می‌دهد [۸]. محل قرارگیری محور مختصات برای محاسبه ارتفاع ویک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۱): نحوه‌ی اندازه‌گیری پروفیل ویک پاشنه توسط ساویستکی [۸].



شکل (۲): محور مختصات پروفیل ویک برای محاسبه ارتفاع ویک.

پس از استخراج نتایج و آنالیز آنها به کمک نرم‌افزارهای آماری، نتایجی به صورت روابط نیمه‌تجربی ارائه شد. در نهایت، ارتفاع ویک پاشنه برای زوایای ددرایز ۲۰ از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$H = 0.17 [2 + 0.03 L_k \tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \text{ for centerline} \quad (1)$$

$$H = 0.17 [0.75 + 0.03 L_k \tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \text{ for 1/4 beam buttock} \quad (2)$$

۲-۱- معادلات حاکم و گسسته‌سازی

معادلات حاکم بر جریان برای بقای جرم و مومنتم به ترتیب عبارتند از:

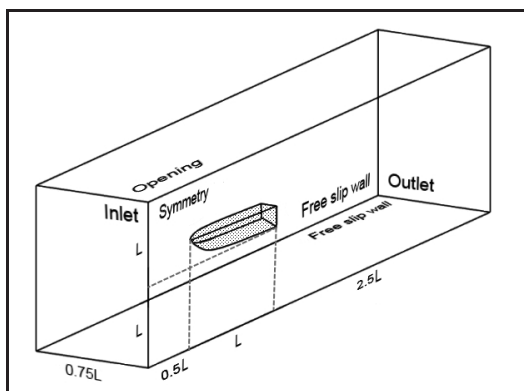
¹⁰ Eddy Viscosity

¹¹ Turbulent Kinetic Energy

¹² Transport Equations

⁸ 1/4 Beam Buttock

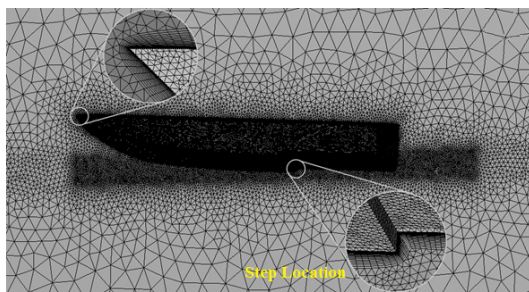
⁹ Deadrise



شکل (۳): دامنه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی.

۲-۳- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

مش مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها به علت پیچیدگی هندسی بدنه به صورت غیر سازمان‌یافته و با سلول‌های شش‌وجهی می‌باشد. لایه‌ی مرزی روی بدنه‌ی شناور نیز به صورت منظم شبکه‌بندی شده است. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی دامنه حل به سه ناحیه‌ی کلی تقسیم شده است. ناحیه اول، که نزدیک سطح آزاد است و مش با سایز کوچک زده شده است. ناحیه دوم، نزدیک بدنه که سایز مش خیلی کوچک است و ناحیه سوم که دور از بدنه است و از مش نسبتاً درشت استفاده شده است. شکل (۴) نمایی از مش‌بندی را نشان می‌دهد. شرایط مرزی انتخابی برای حل مسأله نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۴): نمای نزدیک از شبکه محاسباتی.

۳- نتایج

برای شبیه‌سازی جریان اطراف بدنه در این مسأله به منظور به دست آوردن مقادیر متغیرها، محدوده حل یک دامنه دوفازی می‌باشد که دارای دو سیال آب با چگالی $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ و هوا با $\rho = 1.185 \text{ kg/m}^3$ می‌باشد و دمای آب ۲۵ درجه سانتیگراد فرض شده است. برای اطمینان از دقت حل و همگرایی جواب تکرارها تا زمانی

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{u}) = 0 \quad (۸)$$

پس از حل معادله‌ی انتقال نسبت حجمی، چگالی و لزجت سیال معادل طبق رابطه‌ی زیر محاسبه گردیده و در دیگر محاسبات لحاظ می‌شود:

$$\rho_{eff} = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (۹)$$

$$\nu_{eff} = \alpha \nu_1 + (1 - \alpha) \nu_2 \quad (۱۰)$$

در روابط بالا، زیرنویس‌های ۱ و ۲ بیانگر دو فاز سیال (آب و هوا) هستند. α نسبت حجمی و به عبارت دیگر درصد حضور دو سیال درون هر المان محاسباتی می‌باشد.

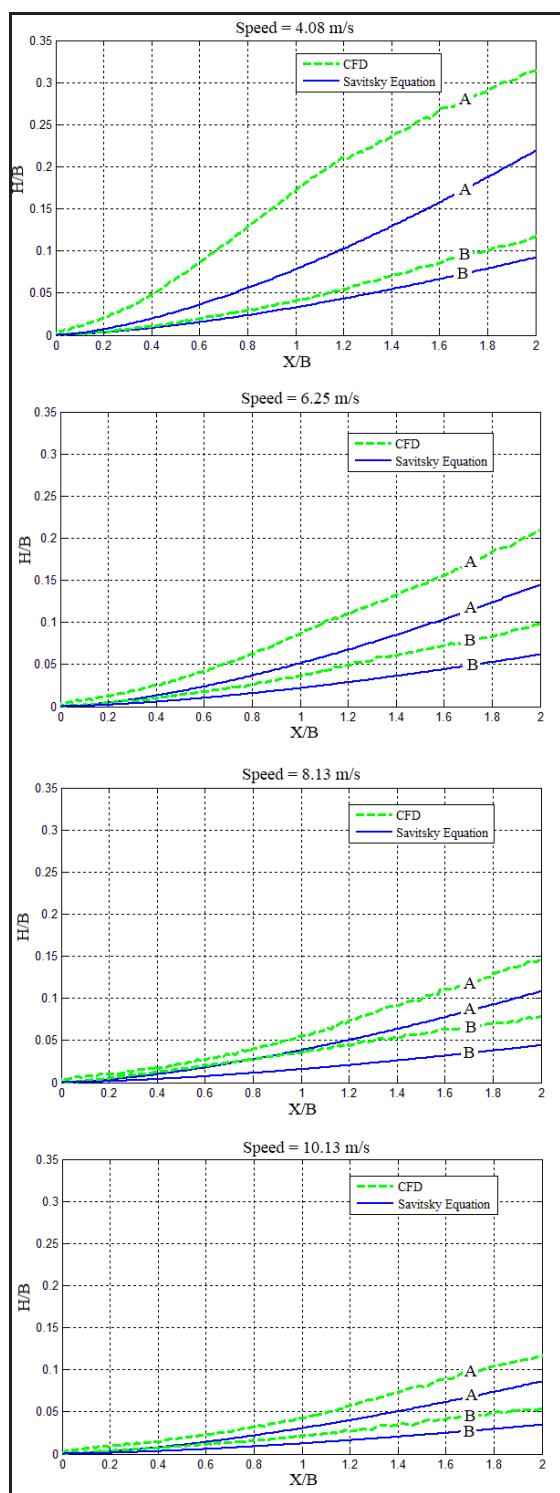
۲-۲- هندسه مدل و دامنه‌ی محاسباتی

بدنه‌ی انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی‌های عددی، مدل C1 از سری بدنه‌های تست‌شده در دانشگاه ساهمپتون در سال ۲۰۱۱ می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است [۹].

جدول (۱): مشخصات بدنه شناور.

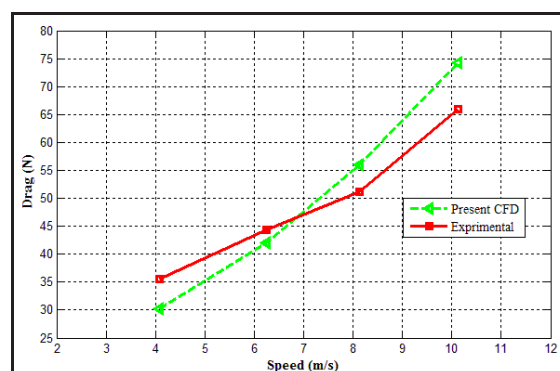
Parameters	Value
Length overall (m)	2
Beam (m)	0.46
Draft (m)	0.09
Displaced weight (N)	243.4
Deadrise angle (degree)	22.5
Distance of the step from transom (m)	0.62
Height of step (m)	0.02

با توجه به شرایط جریان حول بدنه لازم است تا دامنه‌ی محاسباتی به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا مرزهای دامنه به اندازه‌ای در دور دست واقع شوند که تأثیری بر پارمترهای جریان اطراف بدنه و جواب مسأله نداشته باشند. بزرگ بودن بیش از حد دامنه نیز باعث بالا رفتن حجم محاسبات خواهد شد. از این رو، بهینه‌ترین فواصل برای مرزهای شبکه‌ی محاسباتی به طوری که در نتایج حل تأثیرگذار نباشند، انتخاب گردیده و در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به مقارن بودن هندسه شناور و به دلیل کاهش حجم محاسبات تنها نیمی از بدنه‌ی مدل شده است.



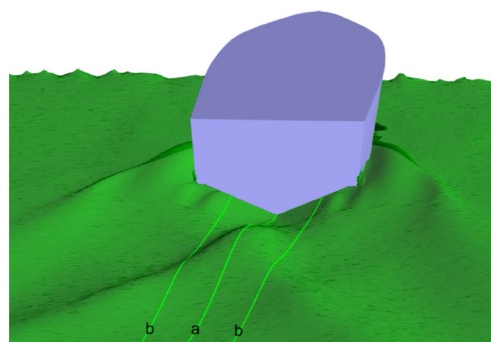
شکل (۷): مقایسه پروفیل ویک در پاشنه شناور با روابط ساویتسکی. (A) سنترلین، (B) 1/4 beam buttock

که دقت مقدار باقیمانده ها زیر 10^{-4} برسد و همچنین، مقدار نیروی درگ نیز ثابت شود، ادامه می یابد. محاسبات از سرعت ۴ متر بر ثانیه شروع و با فواصل تقریبی ۲ متر بر ثانیه تا سرعت ۱۰ متر بر ثانیه انجام می شود. برای اعتبارسنجی شبیه سازی انجام گرفته، نیروی درگ را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و در شکل ۵ آورده شده است.



شکل (۵): مقایسه نتایج نیروی درگ با مقادیر آزمایشگاهی.

شکل ۶ پروفیل های ویک به دست آمده در پاشنه شناور را در موقعیت های سنترلین و یک چهارم عرض بدنه برای سرعت ۶٫۲۵ متر بر ثانیه نشان می دهد.

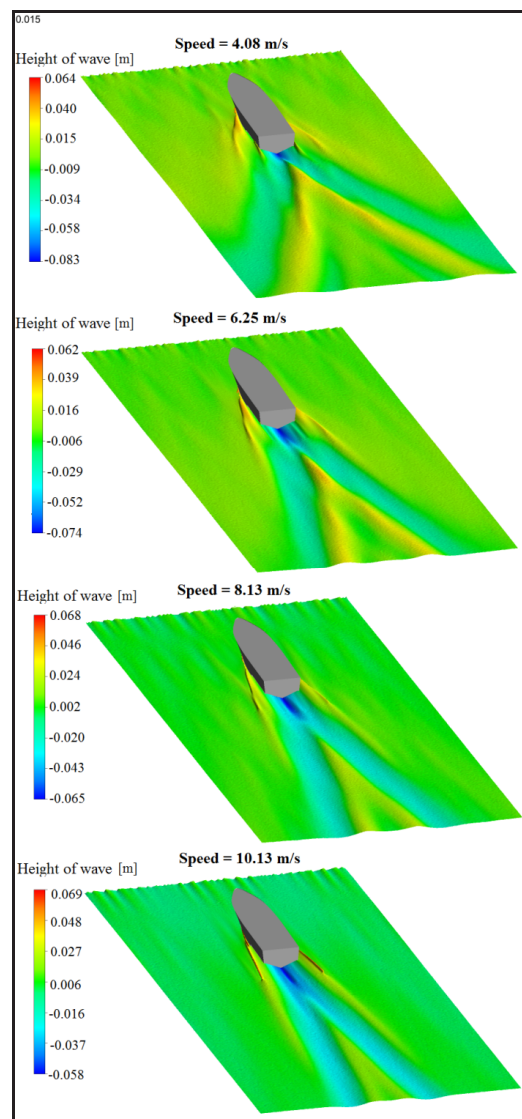


شکل (۶): پروفیل های ویک در پاشنه شناور برای سرعت ۶٫۲۵ متر بر ثانیه. (a) سنترلین، (b) 1/4 beam buttock

در شکل ۷ نیز مقایسه ای بین این پروفیل های ویک با پروفیل های ویک به دست آمده از روابط ساویتسکی در سرعت های مختلف انجام شده است. الگوی موج اطراف بدنه نیز در شکل ۸ به تصویر کشیده شده و برای سرعت های مختلف با هم مقایسه شده است.

مراجع:

- [1] Potgieter, K., "Understanding design and performance of Stepped Hulls," Technical Note in Kobus Naval Design. 2011.
- [2] Salvansen, N., Tuck, E., and Faltinsen, O., "Ship motions and sea loads" *Transactions of the SNAME*, Vol. 78, 1997, pp. 250–79.
- [3] Ferandoli, P., Merola, L., Pino, E., and Sebastiani, L., "The role of seakeeping calculations at the preliminary design stage" In: NAV 2000 conference, Venice, Italy, 2000, pp. 951–959.
- [4] Zhao, R., Faltinsen, O. M., and Haslum, H. A., "A simplified nonlinear analysis of a high speed planning craft in calm water" In: FAST'97. Sydney, Australia, 1997, pp. 431–438.
- [5] Savander, B. R., Scorpio, S. M., and Taylor, R. K., "Steady hydrodynamic of planning surface" *Journal of Ship Research*, Vol. 46, 2002, pp. 248–279.
- [6] Ghassemi, H., and Ghiasi, M., "A combined method for the hydrodynamic characteristics of planing crafts" *Ocean Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 310–322.
- [7] Kohansal, A. R., and Ghassemi, H., "A numerical modeling of hydrodynamic characteristics of various planning hull forms" *Ocean Engineering*, 2008, pp. 498–510.
- [8] Savitsky, D., and Morabito, M., "Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planning hulls" *Marine Technology*, Vol. 47, No. 1, 2010, pp. 1–16.
- [9] Taunton, D., Hudson, D., and Shenoi, R., "Characteristics of a series of high speed hard chine planning hulls-part 1: performance in calm water" *International Journal of Small Craft Technology*, Vol. 1, No. 5, 2011, pp. 55–75.



شکل (۸): الگوی موج تولید شده در اطراف بدنه در سرعت‌های مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوی موج اطراف یک شناور تندرو استپ‌دار به صورت عددی شبیه‌سازی گردید و با توجه به اینکه استفاده از روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی، هزینه کمتری دارد در صورت معتبرسازی، می‌توان از نتایج این روش‌ها استفاده نمود. و یک پشت پاشنه در خطوط سنترل‌لین و یک چهارم عرض ترسیم گردید و با روابط نیمه‌تجربی ساویتسکی مقایسه شد و نتایج از تطابق خوبی برخوردار است. الگوی موج اطراف بدنه ترسیم گردید و مشاهده گردید که با افزایش سرعت شناور، زاویه پخش موج کمتر و میزان فرو رفتگی موج پشت پاشنه بیشتر می‌شود.