محاسبات پسای موج سازی یک شناور

حسن قاسمی[۱] ، حمیدرضا شاهی‌فر[۲]

۱- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد یزد)

چکیده

این مقاله با استفاده از روش المان مرزی BEM (Boundary Element Method) برای محاسبات پسای موج سازی شناور مورد بررسی و تحلیل عددی قرار گرفته است. در این روش سطح جسم و سطح آزاد را به المان های چهار وجهی تقسیم نموده و با استفاده از قضیه گرین، برای هر نقطه از میدان جریان معادله انتگرالی پتانسیل سرعت را روی جسم و سطح آزاد اعمال نموده و با تشکیل سیستم معادلات و اعمال شرایط مرزی، پتانسیل سرعت را تعیین می نمائیم. سپس با مشتق گیری از پتانسیل مقادیر فشار و نیروها محاسبه می شوند. این محاسبات شامل پسای موج سازی و اثرات عمق غوطه وری جسم و تغییرات ارتفاع موج در بالای جسم (روی سطح آزاد) است. ابتدا محاسبات را برای یک بیضیگون انجام داده ایم که نتایج قابل قبولی بدست آمده است. سپس محاسبات را برای شناور UV11 اعمال نمودیم. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این روش از قابلیت بالایی برخوردار است و یک ابزار مناسب و قوی برای تحلیل و محاسبات پسای موج سازی شناورهای زیرسطحی و سطحی است.

کلمات کلیدی: روش المان مرزی، شناور زیرسطحی، پسای موج سازی، اثر عمق غوطه وری

Computations of Wave - Making Drag for Underwater Vehicle

Abstract

This paper is presents The computation of the wave-making drag of underwater vehicle by boundary element method (BEM). The method is employed constant strength doublet and source distributions on each quadrilateral element representing the body and free surface. Using Green's function, boundary integral equation is constituted for all elements by a matrix form to determine the potential on each element, and then calculate the pressure and wave-making drag at different vehicle speeds and water depths. The computed results indicate that the present method is in good agreement with other results and, its results are shown that the method is more capable and powerful tool for prediction and analysis of wave-making drag of underwater (*UV11*) vehicle.

Keyword: Boundary Element Method (BEM), Underwater Vehicle, Wave-Making drag, Submerged Depth Effect

۱- مقدمه

پسای کل حرکت هر جسمی در آب دارای دو مولفه پسای لزجی و فشاری است که برای شناورهای سطحی و شناورهای زیرسطحی (نزدیک سطح آب آزاد) اصطلاحاً به پسای لزجی و پسای موج‌سازی معروف می‌باشند. این بدین منظور است که هر جسمی که بر روی و یا نزدیکی سطح آب حرکت می‌کند موجی را روی سطح تشکیل می‌دهد که سبب افزایش پسای شناور می‌گردد. در واقع، این مولفه ناشی از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]

اختلاف فشاری است که روی بدنه ایجاد می‌شود مربوط است. تجربه نشان می‌دهد که مولفه پسای موج سازی با توان n- ام سرعت شناور ارتباط مستقیم دارد و مقدار n برای بدنه های مختلف متفاوت است. بطور عملی می‌توان گفت که پسای لزجی شامل دو جمله پسای اصطکاکی (تابعی از عدد رینولدز) و پسای فرم بدنه است و پسای موج سازی از جنس نیروی گرانشی است و انرژی موج ایجاد شده در ناحیه سینه کشتی است و تابعی از عدد فرود است. پسای فرم بدنه یک تابع ترکیبی است که هم به عدد فرود و هم به عدد رینولدز بستگی دارد ولی در جریان آشفته تقریباً مستقل از رینولدز است. مسائلی که بر اساس فرضیات فرود استوار است می‌توان با استفاده از روش المان مرزی جریان پتانسیل حل نمود[۱] [۴] [۱۲].

طی دو دهه اخیر روشهای عددی المان محدود، حجم محدود و المان مرزی برای تحلیل و محاسبات نیروهای هیدرودینامیکی شناورها استفاده شده است. نتایج محققان نشان می‌دهد که روش المان مرزی ابزاری مناسب برای پیشگویی تشکیل الگوی موج و محاسبه پسای موج‌سازی شناورها می‌باشد و در حال حاضر نیز یک مبارزه تحقیقاتی در بین محققان دریایی برای این روش وجود دارد. بر حسب نوع کمیت در روش المان مرزی برای جریان پتانسیل، دو روش محاسباتی بصورت گسترده برای محاسبه پسای موج‌سازی استفاده می گردد. روش اول با استفاده از چشمه موج کلوین به عنوان تابع تکینه و روش دوم ترکیب توابع چشمه و دابلت می باشد[۱] [۳] [۱۱].

روش استفاده از معادلات ناویر استوکس نیز توسط بعضی از محققان دیگری استفاده و انجام شده است. حل این معادلات نیازمند یکسری فرضیاتی است تا بتوان آن را به صورت عددی حل نمود ولی هنوز مشکلات زیادی برای استفاده از این روش وجود دارد [۹][۱۰]. برای حل مسائل عددی باید دقت، هزینه و زمان محاسبات را مد نظر داشت لذا روشی را باید بکار برد که همه این گزینه ها را در بر گیرد. روش المان مرزی برای بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی و سیالاتی نتایج قابل قبولی ارائه گردید و بر خلاف روش اجزا محدود که ممکن است برای حل بعضی از مسائل برای کاربر خسته کننده و زمان بر باشد. از طرفی در روش المان مرزی، چون المانها و تحلیل آن در مرز جسم تعریف می‌شود می‌تواند با سهولت و با نتایج بهتر قابل استفاده باشد. مولف مقاله نیز با استفاده از روش المان مرزی و توسعه غیرخطی موج سطح آزاد را برای جسم غوطه‌ور (شناور زیرسطحی UV11) اعمال نموده است و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش حاضر نتایج مطلوب و قابل قبولی را نشان می‌دهد. این محاسبات شامل پسای موج‌سازی و اثرات عمق غوطه‌وری جسم و تغییرات ارتفاع موج در بالای جسم (روی سطح آزاد) است که الگوی این امواج ایجاد شده در اثر حرکت جسم قابل قبول است و ضریب پسای موج‌سازی بر حسب عدد فرود دارای شرایط برآمدگی و فرورفتگی(Hump and Hollow) که از خصوصیات حرکت شناور در روی سطح و یا نزدیکی سطح آزاد است را نشان می‌دهد. اثر عمق غوطه‌وری نیز روی پسای موج سازی نشان می‌دهد که با افزایش عمق اثر این پسای از بین می‌رود.

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

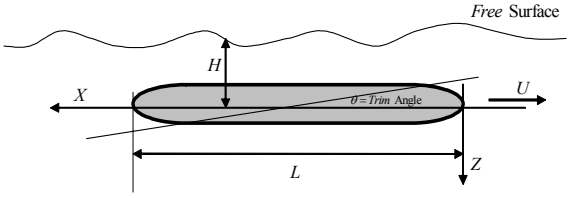
یک جسم شبیه زیردریائی را در نظر بگیرید که در ارتفاع H از سطح آزاد آب با سرعت U در جهت خلاف محور X در حرکت است. محور Z در جهت پایین و محور Y در جهت خارج عمود بر صفحه است. میدان جریان مورد بررسی به صورت سیال تراکم ناپذیر، غیرلزج و غیرچرخشی فرض می‌شود که منجر به معادله لاپلاس می‌گردد. برای بدست آوردن جواب عمومی این معادله از انتگرال گرین و تحلیل عددی آن از روش المان مرزی استفاده می‌کنیم. به این ترتیب که جسم مورد نظر و سطح آزاد را با مجموعه‌ای از المان‌های چهار وجهی مدلسازی نموده و پتانسیل در هر المان محاسبه می‌شود و سپس نیروها و ممانها بدست می‌آیند. رابطه بین پتانسیل سرعت کل $\Phi(X,Y,Z)$ و پتانسیل سرعت جزئی $\phi(X,Y,Z)$ با در نظر گرفتن مرتبه دوم و اثر تریم بصورت زیر بیان می شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]

(۱)

$$\Phi = \vec{U}.\vec{x} + \sum_{n=1}^{2} \varepsilon^n \phi_n = \vec{U}.\vec{x} + \varepsilon\phi_1 + \varepsilon^2(\phi_2 + t\varphi_t)$$

که در آن $\vec{U}$ سرعت برداری جسم ، $\vec{x}$ بردار موقعیت جسم، ε پارامترجزئی $(\varepsilon << 1)$ و تریم شناور t، $(t = \tan\theta / L)$ است. پتانسیلهای جزئی ϕ_1 و ϕ_2 در شرایط مرزی تعریف شده اند و پتانسیل φ_t مربوط به اثر تریم است. جریان در اطراف جسم که توسط پتانسیل جزیی ایجاد می‌شود باید معادله لاپلاس را ارضاء نماید $(\nabla^2\phi = 0)$. شکل (۱) شمای حرکت جسم و مختصات آن در نزدیکی سطح آزاد را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مختصات حرکت جسم و سطح آزاد

با استفاده از قضیه گرین، معادله انتگرالی پتانسیل سرعت $\phi(X,Y,Z)$ بر روی هر نقطه p از میدان روی سطح جسم و سطح آزاد و با در نظر گرفتن تکینه‌های چشمه و دابلت روی جسم و چشمه روی سطح آب رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$\begin{aligned} 4\pi E\,\phi(p) = & \int_{S_B} \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) dS \\ & + \int_{S_B} \frac{\partial\phi}{\partial n} \frac{\partial}{\partial n_q}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) dS \\ & + \int_{S_F} \sigma(q)\left(\frac{1}{R}\right) dS \end{aligned} \quad (۲)$$

که در آن :

$$\begin{cases} R(p;q) = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q - z_p)^2} \\ R'(p;q) = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q + z_p + H)^2} \end{cases}$$

(۳)

$$\sigma(q) = 2\frac{\partial\phi(q)}{\partial n_q} \qquad on\ S_F \qquad (۴)$$

و پارامترهای فوق بصورت زیر تعریف می شوند:

R: فاصله بین نقطه کنترل p و نقطه تکینه q روی جسم واقعی

n_q: بردار واحد عمود بر سطح جسم

$\frac{\partial\phi}{\partial n}$: مشتق نرمال پتانسیل

R': فاصله بین نقطه کنترل p و نقطه تکینه q روی جسم تصویری

H: فاصله جسم تا سطح آزاد آب

$\sigma(q)$: قدرت چشمه روی سطح آزاد آب

ضریب E بستگی به نقطه کنترل دارد. اگر نقطه کنترل روی جسم باشد مقدار آن برابر ۱/۲ $(E = 0.5)$ و اگر روی سطح آزاد آب باشد برابر ۱ $(E = 1)$ است. برای حل معادله (۲) باید شرایط مرزی زیر را تعریف نمائیم:

i) شرط مرزی سینماتیکی روی سطح جسم:

این شرط بیان می کند که مولفه سرعت کل عمود بر سطح جسم برابر صفر است. شرایط مرزی برای مرتبه اول و دوم برای ε از معادله (۱) بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon \ : \frac{\partial\phi_1}{\partial n} = -\vec{U}.\vec{n} \qquad \text{on} \quad S_B \qquad (۵)$$

$$\varepsilon^2 \ : \frac{\partial\phi_2}{\partial n} = 0 \qquad \text{on} \quad S_B \qquad (۶)$$

بردار $\vec{n} = n_x i + n_y j + n_z k$ بردار واحد عمود بر سطح است.

ii) شرط سطح آزاد:

اگر $f(\phi) = \frac{\partial^2\phi(p)}{\partial^2 x_p} + K_0 \frac{\partial\phi(p)}{\partial z_p}$ را تعریف کنیم شرط سطح آزاد بصورت زیر بیان می شود:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]

$$f(\phi_1) = 0 \qquad \text{on } S_F \tag{۷}$$

$$f(\phi_2) = g(\phi_1) \quad \text{on } S_F \tag{۸}$$

$$g(\phi_1) = -\frac{1}{U}\frac{\partial}{\partial x}(\nabla\phi_1)^2 + \frac{U}{g}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}\frac{\partial}{\partial z}f(\phi_1) = 0 \tag{۹}$$

که در آن $\vec{U} = (U,0,0)$ و $K_0 = \frac{g}{U^2}$ عدد موج است.

iii) شرط ارتفاع آب:
شرایط محیطی حرکت شناور در دریای عمیق است.

$$\nabla\phi \to 0 \quad \text{as} \qquad z \to -\infty \tag{۱۰}$$

iv) شرط انتشار (Radiation) :
شرط انتشار باید برای تحلیل امواج سطحی تولید شده در جریان یکنواخت اعمال شود. در این روش محاسبات ، روش عددی Dawson و از مشتقات پاره ای در جهت x از معادلات (۷) و (۸) استفاده شده است [۵].
از معادله (۲) و معادلات شرایط مرزی *(i)* و *(ii)* داریم:

$$\frac{1}{2\pi}\int_{S_B}\left\{\phi(q)\frac{\partial^2}{\partial^2 x_p}\frac{\partial}{\partial n_q}\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right) - Un_x\frac{\partial^2}{\partial^2 x_p}\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right)\right\}dS - \frac{1}{4\pi}\int_{S_F}\sigma(q)\frac{\partial^2}{\partial^2 x_p}\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right)dS - \frac{1}{2}K_0\sigma(p) = 0 \tag{۱۱}$$

با حل همزمان معادلات (۲) و (۱۱) مقادیر پتانسیل در هر المان روی سطح جسم و سطح آزاد بدست می آید. سپس فشار وارده بر بدنه و ارتفاع موج روی سطح آزاد از روابط زیر بدست می آیند:

$$\xi = -\frac{U}{g}\frac{\partial\phi}{\partial x} \qquad on \qquad S_F \tag{۱۲}$$

$$P = \rho\left[-\frac{\partial\phi}{\partial t} - |\nabla\phi|^2 - gz\right] \tag{۱۳}$$

ضریب بی بعد فشار نیز بصورت زیر بیان می شود:

$$C_P = 1 - \left(\frac{\nabla\Phi}{U}\right)^2 \tag{۱۴}$$

سپس نیروها (پسای موج سازی، نیروی برا) و ممانها بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{F} = (F_1, F_2, F_3) = \iint_{S_B} P\vec{n}dS \tag{۱۵}$$

$$\vec{M} = (M_1, M_2, M_3) = \iint_{S_B} P(\vec{r}\times\vec{n})dS \tag{۱۶}$$

که در آن $\vec{r}$ بردار موقعیت ، $R_W = -F_1$ پسای موج سازی و F_3 نیروی عمودی بطرف بالا (برا *(Lift)*) و یا بطرف پائین نیروی فروبری *(Sink Force)* است.
بعبارتی با جایگزین کردن روابط (۱۲) در (۱۴) نیروی پسای موج سازی با ضریب آن و نیروی لیفت (برا) با ضریب آن روی جسم بصورت زیر محاسبه می گردد.

$$R_W = \rho\int_{S_B}\left(\frac{1}{2}\nabla\phi.\nabla\phi - \frac{1}{2}U^2 + gz\right)n_x dS - \frac{\rho g}{2}\oint_{WL}\xi^2 n_x dl \tag{۱۷}$$

$$C_W = \frac{R_W}{0.5\rho U^2 S_{Wet}} \tag{۱۸}$$

$$L = \rho\int_{S_B}\left(\frac{1}{2}\nabla\phi.\nabla\phi - \frac{1}{2}U^2 + gz\right)n_z dS - \frac{\rho g}{2}\oint_{WL}\xi^2 n_z dl \tag{۱۹}$$

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho U^2 S_{Wet}} \tag{۲۰}$$

نیروی برا در حالت تریم (زاویه طولی) شناور می تواند قابل توجه باشد ولی در حالت بدون تریم*(t=0)* مقدار آن بسیار ناچیز است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]

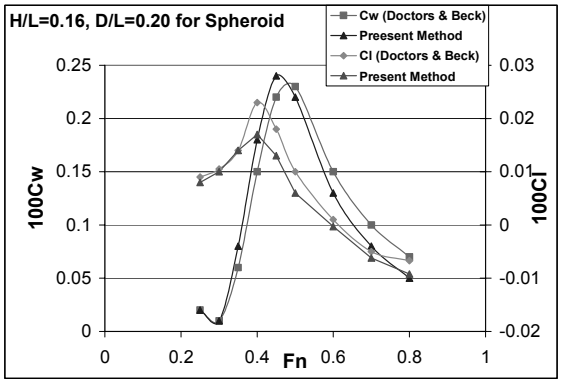
۳- بکارگیری روش عددی

برای به دست آوردن راه حل عددی برای معادله انتگرالی، سطح جسم را به المان های چهار وجهی کوچک تقسیم می‌شود. المانهای چهار وجهی صفحه‌ای برای تقریب سطح استفاده می‌شد اما چون بدنه دارای سطوح انحناء غیر صفحه ای است. لذا المانهای صفحه‌ای سبب ایجاد فاصله در گوشه المان و در نتیجه ایجاد خطاهای عددی می‌شوند. برای به دست آوردن سطح بسته و پیشگیری از چنین خطاهای عددی از المان های چهار وجهی هذلولوی استفاده می شود. بطور کلی نوع المان و تولید المان سطحی یکی از مهمترین بخشهای این روش است اگر چه در همه روشهای محاسبات عددی نوع المان و تولید المان خیلی مهم می‌باشد و در نتایج محاسبات اثر مستقیم دارد و ممکن است قسمت حل کننده خوب عمل کند ولی تولید شبکه نامناسب سبب خطا در نتایج محاسبات می‌شود.

مجموع تعداد المانها برای شناور و سطح آزاد برابر $N_{Tot} = 1800$ انتخاب شده است که تجربه محاسباتی مولف نشان می‌دهد که این تعداد المان برای تحلیل و محاسبات کافی است. واضح است که تعداد کل دستگاه سیستم معادلات برابر تعداد المانها می‌باشد که باید ۱۸۰۰ کمیت مجهول پتانسیل در هر المان توسط دستگاه سیستم معادلات از روش گوس سایدل بدست می‌آیند. سپس با مشتق گیری از پتانسیل سرعت، مقدار فشار در هر المان روی جسم و ارتفاع موج در روی سطح آزاد محاسبه می‌گردد و در نتیجه نیروی پسای موج سازی و نیروی لیفت وارده بر شناور محاسبه می‌گردد.

۳-۱- محاسبات و بحث و بررسی نتایج

ابتدا یک مدل از بیضیگون بطول واحد و نسبت قطر بطول برابر ۰,۲۰ در ارتفاع غوطه وری برابر $H = 0.16L$ نیروی پسای موج سازی و نیروی برا در عددهای فرود مختلف بررسی و محاسبه نمودیم و نتایج بدست آمده را با محاسبات داکترز و بک (Doctors & Beck) در شکل (۲) مقایسه شده است که قابل قبول و رضایت‌بخش می‌باشد.



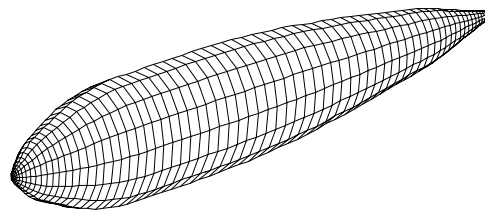
شکل ۲- مقایسه ضرایب موج سازی و برا برای بیضیگون

سپس مدل اصلی و مورد نظر ما در این مقاله یک شناور زیرسطحی $UV11$ به ابعاد (طول ۲۱/۵ متر، قطر ماکزیمم ۳/۵ متر و محل قطر ماکزیمم در فاصله ۴/۵ متری از دماغه جلوئی) داده شده را در نظر می‌گیریم و آن را به المان‌های چهار وجهی تقسیم می‌نماییم. سطح آب را در محدوده مشخصی که شناور زیرسطحی قرار دارد را نیز المان‌بندی می‌نماییم. شکل (۳) تولید المان را برای شناور $UV11$ نشان می‌دهد.

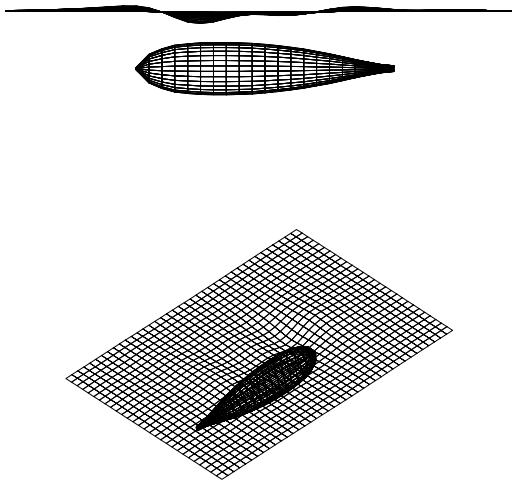
شکلهای (۴) و (۵) بترتیب موج ایجاد شده ناشی از حرکت شناور زیرسطحی روی سطح آزاد در سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه (تقریباً برابر ۱۰ و ۲۰ گره دریایی) در دو نما (نمای جانبی و نمای ایزومتریک) را نشان می‌دهد. در این شکلها بطور واضح مشخص است که هر چه سرعت شناور زیر سطحی افزایش می‌یابد ارتفاع موج ایجاد شده بر روی سطح آب بیشتر می‌گردد. در واقع این تغییرات ایجاد شده روی سطح آب دریا ناشی از تغییرات فشار روی بدنه شناور زیرسطحی است. واضح است که در قسمت جلو و عقب شناور زیرسطحی منطقه پر فشار است و سبب بالا آمدن موج روی سطح آب می‌گردد. شکل (۶) همین پروفیل موج (ξ / L) را در چهار Y_i/L و بصورت کمیت عددی نشان می‌دهد.

توزیع پتانسیل سرعت و ضریب فشار بر روی سطح بدنه شناور در اثر موج ایجاد شده ناشی از حرکت شناور (ارتفاع غوطه وری $H/D=0.50$ و سرعت ۵ متر بر ثانیه) در شکل (۶) نشان می دهد. منطقه پر فشار در ناحیه جلو و عقب در شکل دیده می شود و افت فشار

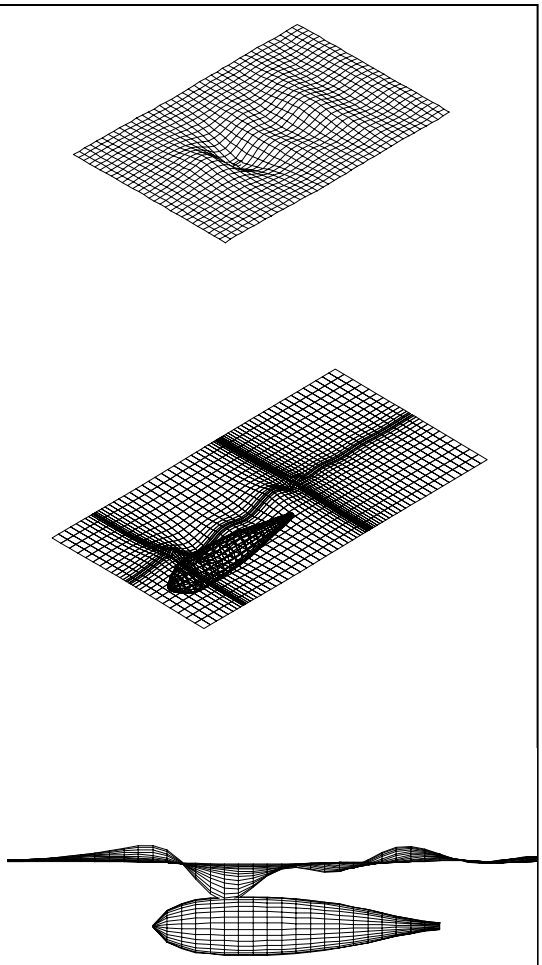
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]



شکل ۳- المان بندی بدنه *UV11*



شکل ۵- شرایط کیفی موج ایجاد شده درسطح آزاد Vs= 5[m/s]

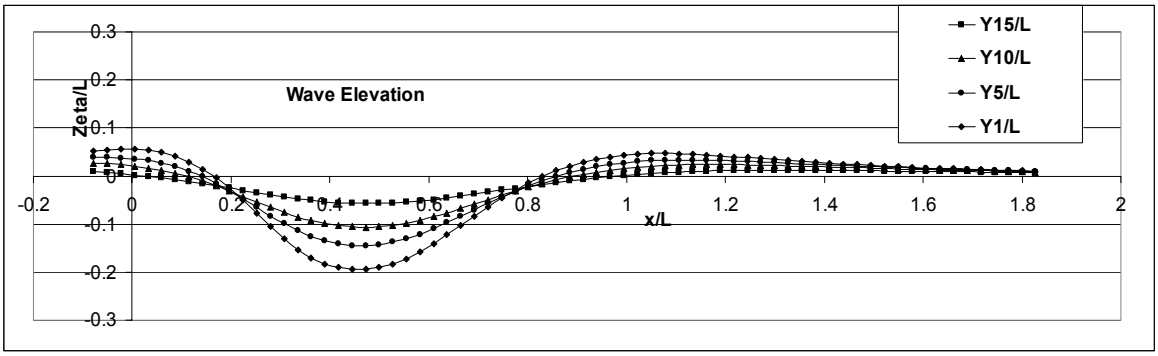


شکل ۴- شرایط کیفی موج ایجاد شده در سطح آزاد آب [m/s] Vs=۱۰

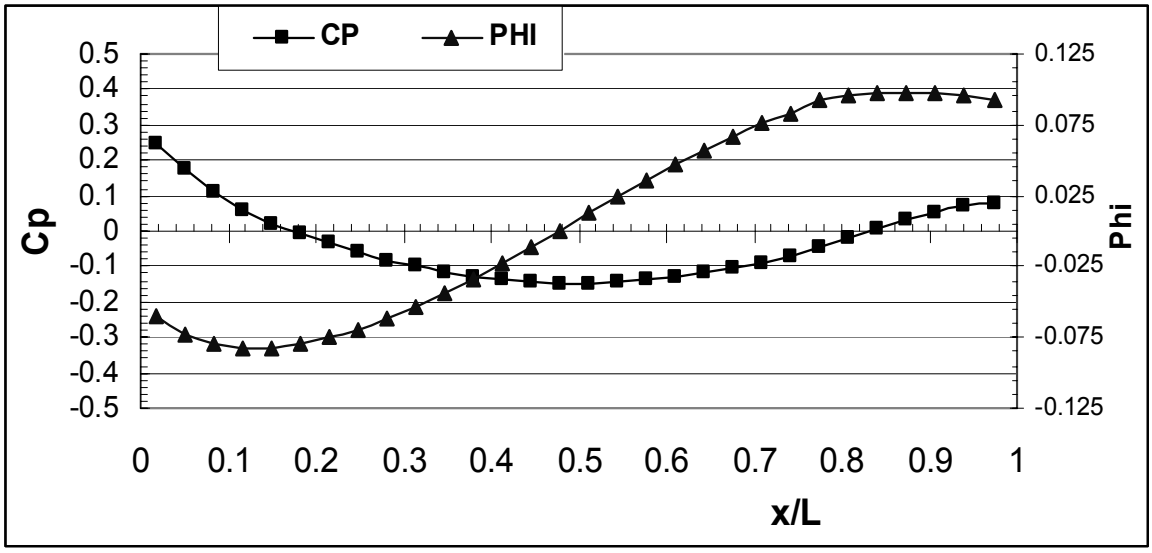
کمی در عقب ناشی از افت دامنه موج است. محاسبات را برای سرعتهای مختلف ادامه داده و ضریب لیفت و ضریب پسای موج سازی (ضرایب هیدرودینامیکی) بر حسب عدد فرود $\left(F_n = U/\sqrt{L_S g}\right)$ تعیین نموده‌ایم که این ضرایب را در شکلهای (۸) و (۹) برای شناور زیرسطحی بر حسب عدد فرود نشان داده شده اند.

شرایط محاسبات برای $D/L_S = 0.20$ و $H/L_S = 0.16$ انجام شده است. ضریب لیفت در عدد فرود $F_n = 0.35$ حداکثر مقدار ضریب لیفت برابر $C_L = 2.6\times10^{-4}$ می‌باشد و بعد از آن کاهش می یابد. اثر ضریب لیفت بسیار کوچک است و چندان حائز اهمیت نیست. پسای موج سازی دارای دو برآمدگی (Hump) وجود دارد که اولین برآمدگی در عدد فرود $F_n = 0.3$ و دومین برآمدگی در عدد فرود $F_n = 0.45$ اتفاق افتاده است. ضریب پسای موج سازی در عدد فرود $F_n = 0.46$ حداکثر مقدار ضریب لیفت برابر $C_W = 2.3\times10^{-3}$ می‌باشد و بعد از آن کاهش می‌یابد. شکل (۱۰) ضریب پسای باقیمانده (پسای فرم+پسای موج سازی) بر حسب عمق غوطه‌وری در عدد فرود $F_n = 0.40$ را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]



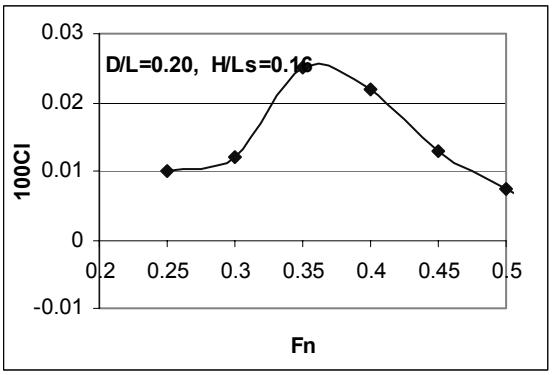
شکل ۶- ارتفاع موج ایجاد شده در سطح آزاد (*H/D=0.50* و Vs=5[m/s])



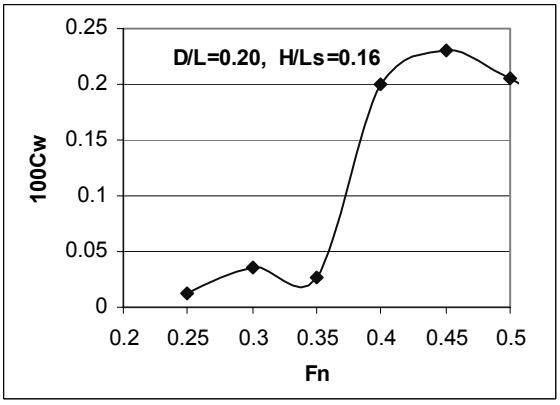
شکل ۷- توزیع پتانسل سرعت و ضریب بی بعد فشار بر روی سطح بدنه شناور (در سطح بالای و در جهت طولی) در اثر انرژی موج ایجاد شده ناشی از حرکت شناور (*H/D=0.50* و Vs=5[m/s])

که در عمق بیشتر از ۲۰ متر مقدار ضریب پسای ثابت است و فقط پسای فرم بدنه وجود دارد که فقط تابعی از فرم بدنه و مستقل از سرعت است. این ضریب برای زیردریائی و یا اجسام لاغر (Streamline) خیلی کوچک است ولی برای اجسام چاق (Bluff) مثل کره خیلی بزرگ است. با استفاده از روش حاضر نمی‌توان مقدار پسای فرم بدنه را محاسبه نمود سعی کردیم از فرمولهای تجربی برای چنین جسم استفاده کنیم و ضریب پسای فرم بدنه را تعیین نمائیم. واضح است که حل دقیق این مولفه در نظر گرفتن مسئله لزج و بدست آوردن پسای لزج (پسای اصطکاکی و پسای فرم) است که نیازمند حل عددی معادلات ناویر استوکس است و تابعی از عدد رینولدز می‌باشد. در این روش و محاسبات هدف ما حل پسای موج‌سازی یک جسم غوطه ور و اثر سطح آزاد بوده است که تابعی از عدد فرود است و نتایج حاصل نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای محاسبات مولفه پسای موج‌سازی رضایتبخش و قابل قبول باشد.

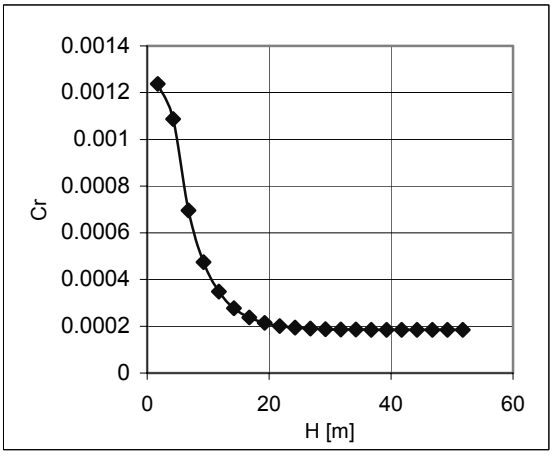
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]



شکل ۸- ضریب لیفت برای شناور زیرسطحی بر حسب عدد فرود



شکل ۹- ضریب پسای موج سازی برای شناور زیرسطحی بر حسب عدد فرود



شکل۱۰- ضریب پسای باقیمانده (پسای فرم + پسای موج سازی) بر حسب عمق غوطه وری در عدد فرود
$F_n = 0.40$

۴- نتیجه گیری

روش المان مرزی برای بررسی و محاسبه پسای موج سازی برای دو شناور بیضیگون و شناور زیرسطحی $UV11$ اعمال شده است. از محاسبات بعمل آمده، نتایج مفیدی قابل استنباط است که در اینجا به آنها اشاره می کنیم.

۱. مقایسه پسای موج سازی برای شناور بیضیگون نشان می‌دهد که این روش (المان مرزی) از قابلیت بالایی برخوردار است.

۲. ارتفاع موج تولید شده با افزایش سرعت شناور زیرسطحی ارتباط مستقیم دارد که در محاسبات بدست آمده این را نشان می‌دهد. شرایط نوسانی در منحنی پسای- سرعت شکل (۹) بیانگر این است که در سرعتهای مختلف برخورد و تداخل امواج تولید شده در دماغه جلو و پاشنه (عقب) شناور زیرسطحی است و این روش می‌تواند در سرعتهای مختلف (عدد فرود مختلف) پیشگویی مناسبی داشته باشد.

۳. روش حاضر فقط برای محاسبه پسای موج سازی می باشد و با در نظر گرفتن لایه مرزی برای سیال لزج می‌توان بطور ترکیبی (روش المان مرزی و روش تئوری لایه مرزی) پسای لزجی را حل نمود که امید است در آینده با کمک و حمایتهای صنعت صورت پذیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]

نمادهای اختصاری

عدد موج	K_0
سطح المان آب آزاد	S_F
سطح المان روی جسم	S_B
سطح خیس شده جسم	S_{Wet}
تریم شناور	t
زاویه تریم	θ
ضریب لیفت	C_L
ضریب پسای موج سازی	C_W
ضریب پسای باقیمانده	C_r
نیروی لیفت	L
نیروی پسای موج سازی	R_W
بردار واحد در جهت x	n_x
بردار واحد در جهتz	n_z
شتاب جاذبه	g
قطر ماکزیمم شناور زیرسطحی	D
طول شناور زیرسطحی	L_S
بردار موقعیت جسم	$\vec{x}$
سرعت شناور زیرسطحی	U
عدد فرود	F_n
فاصله بین نقاط کنترل و تکینه روی جسم واقعی	R
فاصله بین نقاط کنترل تکینه روی جسم تصویری	R'
ارتفاع غوطه وری جسم	H
خط آبخور	WL
پارامتر پتانسیل جزئی	ε
دانسیته آب	ρ
گرادیان پتانسیل سرعت کل	$\nabla\Phi$
پتانسیل سرعت کل	Φ
قدرت چشمه روی سطح آزاد	σ
پتانسیل سرعت جزئی	ϕ
ارتفاع موج	ξ

۵- مراجع

1-Gadd, G.E. : "A Method of Computing the Flow and Surface Wave Pattern Around Full Forms", The Royal Institute of Naval Architects, (RINA), 1975.

2-Tsutsumi, T. : " Calculation of the Wave Resistance of Ships by the Numerical Solution of Neumann-Kelvin Problem" Proceedings of the workshop on Ship Wave-Resistance Computations, Vol. 2, Nov. 1979.

3-Park, K., Suzuki, K. and Ikehata, M. : "Application of Panel Method to Second Order Theory of Free Surface Flow Around Ships" , 5th Symposium on Nonlinear and Free-Surface Flow, Hiroshima, 1997.

4-Hong, S. and Choi, H. : Steady and Unsteady Ship Waves by a Higher-Order Boundary Element Method, 19the Symposium of Naval Hydrodynamics, 1996.

5-Dawson, C.W. : "A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems, 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1977.

6-Wehausen, J.V.: "The Wave Resistance of Ship", Advances in Applied Mechanics, 1993.

7-Nakos, D.E.: "Ship Wave Patterns and Motions by a Three Dimensional

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]

Rankine Panel Method", Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge , Mass., 1990.

8-Nakon, D.E. and Scvlavounos P.D., : "Kelvin Wake and Wave Resistance of Cruiser- and Transom-Ships", Journal of Ship Research, Vol. 38, No. 1, pp. 9-29, 1994.

9-Larson L. and Baba, E. : "Ship resistance and Flow Computations", Chapter 1 of the Textbook of Advances in Marine Hydrodynamics, Edited by M. Ohkusu, 1996.

10-Liu, H & Kodama, Y. : " Computation of Waves Generated by a Ship Using an NS Solver with Global Conservation", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, 1993.

11-Doctors, J., Beck, R.: "Numerical Aspects of the Neumann-Kelvin Problem", Journal of Ship Research, Vol. 31 No. 1, 1987, pp. 1-13.

12-Janson, C.E. : "A Method for the Prediction of Wave Resistance, Lift and Induced Drag", Ph.D. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chalmers Univ. of Tech., Gotehenburg, Sweden. 1993.

13-Suzuki, K, Kai, H.: "Fundamental Investigation on Wave Making Interaction Around Multi-Hull Vessel", 6th Inter. Conf. on Hydrodynamics, Nov. 2004, Australia.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-10-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1386.4.6.4.5]