A

تبيعلى رثوبتي تمكيك بازود والثارو

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۲/ صفحه ۲۱۳–۲۲۶

مجله علمی بژو، شق مکانیک سازه ماو شاره م



تحلیل پارامتریک هیدروفویل زیر سطحی به روش المان مرزی

سینا افخمی<sup>۱</sup>، محمود پسندیده فرد<sup>۲.\*</sup> و مهدی نوروزی<sup>۳</sup> <sup>۱</sup> کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی، مشهد <sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد <sup>۲</sup> دانشجو دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد تاریخ دریافت: ۱۳۹۵۴/۰۷/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵۴/۰۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰

#### چکیدہ

یکی از مهمترین مسائل هیدرودینامیک کاربردی بررسی هیدروفویل متحرک در نزدیکی سطح آزاد است. در این مقاله به شبیه سازی جریان حول هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد به روش المان مرزی پرداخته شده است. برای شبیه سازی با استفاده از روش المان مرزی، از یک روش تکرار مبتنی بر تئوری گرین استفاده شده است. برای این منظور مسئله به دو قسمت هیدروفویل و سطح آزاد تقسیم شده و اثرات هریک بر دیگری محاسبه میشود و پتانسیل اختلالی روی سطح آزاد و هیدروفویل بدست میآید. سپس به کمک یک الگوریتم تکرار مقادیر پتانسیلها در هر مرحله اصلاح میشوند تا جواب ها به مقادیر واقعی همگرا شوند. سپس به وسیله این پتانسیلها توزیع فشار روی هیدروفویل همچنین منحنی موج روی سطح آزاد بدست میآید. پس از اعتبارسنجی این روش به بررسی عوامل مختلف روی عملکرد هیدروفویل از قبیل ضخامت و انحنای هیدروفویل، عدد فرود، زاویه حمله و ارتفاع از سطح آزاد و همچنین سهم نیرو های برا و پسای حاصل از امواج پرداخته شده است. مشاهده میشود که نتایج روش المان مرزی با وجود فرض سیال ایدهآل، با تقریب خوبی، عملکرد جریان را پیش بینی میکند.

كلمات كليدى: تئورى گرين؛ اثر سطح آزاد؛ روش المان مرزى؛ هيدروفويل دوبعدى.

#### Parametric Analysis of Subsurface Hydrofoil with Boundary Elements Method

S. Afkhami<sup>1</sup>, M. Pasandideh-Fard<sup>2\*</sup>, M. Norozi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
 <sup>2</sup> Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.
 <sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### Abstract

One of the most important issues of applied Hydrodynamics is analysis of moving hydrofoils near the free surface. In this paper attention is being paid to the flow analysis of hydrofoil near the free surface. For this simulation, an iterative method based on Green's theorem is employed, and the problem is divided to hydrofoil and free surface and the effects on each other is calculated, and then perturbation potential on hydrofoil and free surface are acquired. Next, the values of these potentials are modified with an iterative algorithm until the results converge to real values. Then by having these potentials, pressure distribution on hydrofoil surface and curve wave on free surface are obtained. Having validated this method, various factors on the hydrofoil performance such as thickness, camber, angle of attack, the Froud number, distance from the free surface, and distance from depth are surveyed. It can be observed that the results of boundary element method with good approximation predict the flow performance, although the existence of an ideal fluid is assumed.

Keywords: Green's Theorem; Surface Effect; Boundary Elements Method; Two Dimension Hydrofoil.

آدرس پست الكترونيك: <u>fard\_m@um.ac.ir</u>

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۰۹۸۵۱۳۸۸۰۵۰۲۳

#### ۱– مقدمه

امروزه افزایش نیاز به استفاده از سیستمهای دریایی، محققان را به سمت مطالعه و طراحی آن سوق داده است. شناورهای تندرو به عنوان یکی از مهمترین سیستمهای دریایی، در چند دهه اخیر کاربرد رو به گسترشی یافته است. با استفاده بیشتر از انواع این شناورها، نقاط ضعف و قوت هر یک مشخص شده و اصلاحاتی برای برطرف کردن عیوب آنها ارائه شده است. یکی از مهمترین روشهای افزایش سرعت شناورها استفاده از هیدروفویل است. شناور هیدروفویلی گونهای از شناورهای تندرو است که علاوه بر قابلیت حرکت با سرعت بالا، دارای قدرت مانوردهی بالا، پایداری خوب و عملکرد مناسبی در برابر امواج است. بنابراین تحلیل عملکرد هیدروفویلها اهمیت می یابد. در سالهای گذشته تحقیقاتی توسط افراد مختلف براى تعيين يتانسيل سرعت اجسام تحت شرط مرزى نيومن انجام گرفته است. هوگ وموران [۱] با استفاده از نظریه ايرفويل نازک جريان حول صفحه تخت و هيدروفويل را بررسی کردند. جسینگ و اسمیت [۲] با استفاده از توزیع چشمه بر روی سطح جسم شرط مرزی سینماتیکی روی جسم را ارضا کردند و برای سطح آزاد از شرط مرزی خطی شده در سطح آزاد استفاده کردند و در نهایت معادله انتگرالهای بدست آمده را به صورت عددی محاسبه نمودند. بای ؓ [۳] از روش المان محدود برای حل عددی خود استفاده كرد و معادله انتگرالها را با استفاده از روش گالركين محاسبه نمود. یانگ و بوگر<sup>۴</sup> [۴] با استفاده از روش معادلات انتگرالی پیوندی بر اساس تئوری گرین و خطی کردن شرط مرزی سطح آزاد تحقیق خود را انجام دادند. سالواسن<sup>6</sup> [۵] برای بررسی اثرات غیرخطی سطح آزاد از تئوری اختلالی مرتبه دوم استفاده کرد. کنل<sup>6</sup> [۶] اثرات مرتبه دوم سطح آزاد را بر روی هیدروفویل نازک بررسی کرد. کووه<sup>۷</sup> و همکاران [۷] با استفاده از توزیع یکنواخت چشمه روی سطح آزاد و توزیع دابلت بر روی جسم و استفاده از شرط مرزی

- <sup>4</sup> Yeung And Bouger <sup>5</sup> Salvasen
- <sup>6</sup> Kennell
- <sup>7</sup> Kouh

دریشله به جای نیومن و خطی فرض کردن شرط مرزی سطح آزاد محاسبات خود را انجام دادند. بال^ [٨] با استفاده از توزيع چشمه و دابلت روى جسم و محاسبه معادلات انتگرالی با استفاده از تئوری گرین تحقیق خود را انجام داد. و برای ارضا شرط مرزی سطح آزاد از روش تصویرکردن استفاده کرد. داسکوفسکی ٔ و همکاران [۹] به بررسی نیروی برای تولیدی توسط هیدروفویل، به صورت نظری و تجربی پرداختند. بهبهانی نژاد و همکاران به بررسی غیردایم کاویتاسیون جزیی به روش المان مرزی پرداختند[۱۰]. سعیدی نژاد ٔ و همکاران به بررسی تجربی گردابه های ناشی از یک مدل زیر سطحی پرداختند[۱۱]. بورگوینه'' [۱۲] در مطالعه ای آزمایشگاهی جریان دو بعدی حول هیدروفویل را مطالعه و عملکرد آن را از جنبه نیروهای برا ویسا و نیز گردابه های ایجاد شده در پشت هیدروفویل را مطالعه کرد. هی و ویسونو<sup>۱۲</sup> [۱۳] با استفاده از شبکه تطبیقی به حل عددی سطح آزاد پرداختند و روش جدیدی را برای پیشبینی دقیق سطح آزاد ارائه کردند. کیم و یاماتو<sup>۱۳</sup> [۱۴] سعی کردند امواج تولیدی توسط وسایل دریایی دارای هیدروفویل را تخمین زده و از نوعی سیستم کنترلی استفاده کنند. زی و واسالوس<sup>۱۴</sup> [۱۵] با استفاده از روش پتانسیل هیدروفویل سه بعدی را مطالعه کردند. سادات حسینی<sup>۱۵</sup> و همکاران[۱۶] سطح آزاد امواج و شکست آنها و نیز جدایش ناشی از امواج را به صورت عددی شبیه سازی کردند. قاسمی<sup>۱۷</sup> و همکاران اجسام برازا را در نزدیکی سطح آزاد به روش المان مرزی تحلیل کردند[۱۷]. جوارشکیان<sup>۱۷</sup> و همکاران [۱۸] به بررسی عوامل موثر بر عملکرد هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. بال $^{1\Lambda}$ وكيناس[١٩] با استفاده از جريان پتانسيل و توزيع چشمه و

- <sup>9</sup>Daskovsky
- <sup>10</sup> Behbahani-Nejad
- <sup>11</sup> Saeidi Nezhad
- <sup>12</sup> Bourgoyne
- <sup>13</sup> Hay And Visonneau
   <sup>14</sup> Kim And Yamato
- <sup>15</sup> Xie And Vassalos
- <sup>16</sup> Sadathosseini
- <sup>17</sup> Djavareshkian
- <sup>18</sup> Bal And Kinnas

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hough And Moran

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Giesing And Smith

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Bai

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Bal

دابلت بر روی سطح هیدروفویل و سطح آزاد محاسبات خود را انجام دادند. آنها مساله را به دو مساله سطح آزاد و هیدروفویل تقسیم کردند و با استفاده از یک روش تکرار اثرات هرکدام را بر دیگری اعمال کردند. بال[۲۰] با استفاده از روشی مشابه به بررسی همزمان اثرات سطح آزاد و کف در داخل یک تانک پرداخت. طحانی<sup>(</sup> و همکاران[۲۱] به بررسی اثرات تغییرات هندسه بر مشخصات آیرودینامیکی بال شناوردر نزدیک سطح پرداختند.

در این مقاله برای تحلیل جریان حول یک هیدروفویل دو بعدی با سرعت ثابت و زاویه حمله مشخص در نزدیکی سطح آزاد از یک روش تکرار مبتنی بر تئوری گرین استفاده می شود. در این روش هیدروفویل و سطح آزاد به عنوان دو مسئله جداگانه در نظر گرفته می شوند و سطح هیدروفویل و سطح آزاد با المان هایی شامل چشمه و دابلت تقریب زده می شود، سپس اثرات هر یک روی دیگری محاسبه می شود. برای ارضا شرط مرزی روی سطح آزاد از ترکیب شرط مرزی سينماتيكي وديناميكي روى سطح آزاد به صورت خطى شده استفاده می شود. با حل عددی معادله انتگرال ها، مقادیر مجهول پتانسیلهای اختلالی روی سطح آزاد وهیدروفویل بدست میآید و در هر تکرار اصلاح می شود، تا مسئله همگرا شود. بعد از اعتبار سنجی این روش به بررسی پارامترهای موثر بر عملكرد هيدروفويل از قبيل ضخامت، انحنا، زاويه حمله عدد فرود، نسبت ارتفاع به کورد تا سطح آزاد پرداخته شده است. همچنین نیروهای برا و پسای ناشی از امواج نیز مورد بررسی قرار گرفته شد.

۲- روش المان مرزی

برای شبیه سازی به روش المان مرزی فرض بر این است که کاویتاسیون رخ نمی دهد، همچنین جریان پایدار، غیرچرخشی، غیر قابل تراکم و غیرلزج می باشد. مطابق شکل ۱ هیدروفویل با زاویه حمله مشخص و در ارتفاع معین از سطح آزاد که جریان با سرعت ثابت به صورت یکنواخت با آن برخورد می کند، نشان داده شده است. در مسائل زیر سطحی سرعت بر حسب عدد فرود بیان می شود.

<sup>1</sup> Tahani

$$F_c = rac{U}{\sqrt{gc}}$$
 (۱)  
به طوریکه منظور از (U) سرعت جریان آزاد، و (c) طول

کورد هیدروفویل است.



شکل ۱– نمای دوبعدی هیدروفویل مغروق در نزدیکی سطح آزاد

مطابق رابطه (۲) پتانسیل کل را می توان با دو ترم اختلالی و جریان آزاد نشان داد.

 $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \phi(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + U\mathbf{x}$ (۲) number on a state of the state of the

شرط های مرزی که می بایست ارضا شوند:

الف : شرط مرزی سینماتیکی روی سطح جسم: برای این که سطح هیدروفویل خط جریان باشد، می بایست سرعت عمودی بر هیدروفویل برابر صفر باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{U}.\vec{n} \tag{(f)}$$

به طوریکه منظور از 
$$ec{n}$$
 بردار یکه نرمال بر سطح هیدروفویل  
است.

ج : سرط مرری سینهانیدی روی سطح آراد. درات سیال می بایست سطح آزاد را دنبال کنند.  
$$DF(r, z)$$

$$\frac{DF(x,z)}{Dt} = 0 \qquad z = h + \zeta(x) \tag{(9)}$$

منظور از ((F(x,z)) تابعی است که سطح آزاد را توصیف می کند و منظور از ζ تابع منحنی موج می باشد. اگر از ترم های وهيدروفويل

$$\phi = \int_{s_{fs}+s_{H}} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n}\phi_{s} - \phi \frac{\partial \phi_{s}}{\partial n}\right] ds + \int_{s_{w}} \Delta \phi_{w} \frac{\partial \phi_{s}}{\partial n} ds$$
(14)

که منظور از  $\phi_{s}$  پتانسیل یک چشمه به قدرت واحد در حالت دوبعدی است.

$$\phi_s = \frac{1}{2\pi} . \ln r \tag{10}$$

منظور از  $S_H$  ،  $S_{fs}$  ،  $S_H$  و  $S_w$  "به ترتیب سطح هیدروفویل، سطح آزاد و سطح دنباله میباشد". منظور از ( $\Delta \phi_w$ ) اختلاف پتانسیل روی سطح دنباله می باشد.

$$\Delta \phi_w = \phi_w^+ - \phi_w^- \tag{19}$$

### ۳-۱- الگوريتم حل

رسيم:

روش تکرار شامل دو قسمت میباشد، قسمت هیدروفویل که برای پتانسیلهای مجهول روی سطح هیدروفویل نوشته می شود و قسمت سطح آزاد که برای پتانسیلهای مجهول روی سطح آزاد نوشته می شود. طبق معادله (۱۷) پتانسیل اختلالی در میدان حل که ناشی از هیدروفویل می باشد به صورت زیر است.

$$\phi_{H} = \int_{S_{H}} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_{s} - \phi \frac{\partial \phi_{s}}{\partial n} \right] ds + \int_{S_{W}} \Delta \phi_{w} \frac{\partial \phi_{s}}{\partial n} ds$$
(17)

همچنین طبق معادله (۱۸) پتانسیل اختلالی در میدان حل که ناشی از سطح آزاد می باشد به صورت زیر می باشد.

$$\phi_{fs} = \int\limits_{s_{fs}} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n}\right] ds \tag{1A}$$

با جاگذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۴) وهمچنین جاگذاری معادله (۱۸) در معادله (۱۴) به دو معادله (۱۹) و (۲۰) می

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = U \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \qquad z = h \tag{Y}$$

د : شرط مرزی دینامیکی روی سطح آزاد: فشار روی سطح آزاد باید برابر با فشار اتمسفر باشد. با نوشتن معادله برنولی روی سطح آزاذ وصرف نظر کردن از ترم های مرتبه دوم خواهیم داشت:

$$U.\frac{\partial\phi}{\partial x} + g.\zeta = 0 \quad z = h \tag{(A)}$$

با ترکیب شرط مرزی دینامیکی وسینماتیکی روی سطح آزاد داریم:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_0 \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = h \tag{9}$$

$$K_0 = \frac{g}{u^2} \quad \text{(A)}$$
arc and the equation of the e

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود این شرط می بایست در پایین دست جریان و در فاصله ای در بالادست جریان ( $X_0$ ) ارضا شود. بال [۱۹] به بررسی فواصل مختلف برای شرط مرزی تشعشعی پرداخت و نتیجه گرفت که طول مناسب برای ناحیه بالادست ( $X_0$ ) باید نصف طول موج باشد مناسب برای که منظور از  $\lambda$  طول موج ایجاد شده در سطح آزاد است.

$$\lambda = 2\pi \frac{U^2}{g} \tag{1.}$$

 هـ: شرط مرزی انتشار: به منظور جلوگیری از ایجاد موج در بالادست جریان می بایست مشتق اول و دوم پتانسیل اختلالی نسبت به جهت افق صفر باشد [۲۲].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \qquad x \to -\infty \tag{11}$$

برای بدست آوردن ترم های مشتق مرتبه اول و دوم نسبت به محور افق از رابطه ارائه شده توسط داسون [۲۳] که بر مبنای طرح تفاضل محدود مرتبه چهارم است استفاده می کنیم.

$$(\frac{\partial \phi}{\partial x})_i = CA_i \phi_i + CB_i \phi_{i-1} + CC_i \phi_{i-2} + CD_i \phi_{i-3}$$
(17)

$$\begin{aligned} (\frac{\partial^{2} \varphi}{\partial x^{2}})_{i} &= CA_{i} (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_{i} + CB_{i} (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_{i-1} \\ &+ CC_{i} (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_{i-2} \\ &+ CD_{i} (\frac{\partial \varphi}{\partial x})_{i-3} \end{aligned} \tag{17}$$





شکل۳- نمودار منحنی موج در سطح آزاد برای هیدروفویل جوکوفسکی در زاویه حمله ۵ درجه وعدد فرود ۰۹/۹۵ ارتفاع بی یعد برابر ۱



شکل۴- نمودار توزیع ضریب فشار حول هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه وعدد فرود ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱

$$\phi = \int_{s_H} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n}\right] ds + \int_{s_W} \Delta \phi_w \frac{\partial \phi_s}{\partial n} ds + \phi_{fs}$$
(19)

$$\phi = \int_{s_{f_s}} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds + \phi_H \tag{(Y.)}$$

با حل تکراری این دو معادله به طوریکه ابتدا معادله (۱۹) بدون در نظر گرفتن ترم سطح آزاد حل می شود، سپس با استفاده از پتانسیل های بدست آمده از معادله (۱۹) پتانسیل ناشی از هیدروفویل در میدان جریان را با استفاده از معادله (۱۷) بدست می آوریم. در مرحله بعد معادله (۲۰) با در نظر گرفتن ترم ناشی از هیدروفویل که در مرحله قبل بدست آمد حل می شود، سپس با مقادیر پتانسیل جدید پتانسیل ناشی از اثر سطح از معادله (۱۸) بدست می آید. سپس دوباره معادله (۱۹) این بار با در نظر گرفتن اثر سطح حل می شود. این دو مرحله آنقدر تکرار می شود تا اختلاف بین پتانسیل محاسبه شده از دو معادله (۱۹) و (۲۰) ناچیز شود.

# ۴- نتایج روش المان مرزی

برای شبیه سازی عددی لازم است استقلال از شبکه بررسی شود، به این منظور جریان حول هیدروفویل جوکوفسکی با ضخامت ۱۲ درصد در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود ۹۵/۰ و ارتفاع بیبعد برابر ۱ با نتایج بای [۳] مقایسه شد.

شکلهای ۲ و ۳ به ترتیب نمودار توزیع ضریب فشار و منحنی موج در سطح آزاد به ازای تعداد المانهای مختلف روی سطح آزاد و هیدروفویل میباشد. مشاهده می شود که در تعداد ۱۰۰ المان روی هیدروفویل و ۲۰۰ المان روی سطح آزاد جواب ها از تعداد المان ها مستقل میشوند.

به منظور تایید درستی روش ارائه شده در این مقاله، مقادیر محاسبه شده با نتایج بدست آمده از کار یانگ و بوگر [۴] و همچنین نتایج کوه و همکاران مقایسه شده است.

در شکل ۴ توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه وعددفرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱ بدست آمده است. همچنین شکل ۵ منحنی موج ایجاد شده توسط هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱ است.



شکل۵- نمودار منحنی موج در سطح آزاد برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۹/۰و نسبت ارتفاع به کورد برابر ۱

بعد از اطمینان از درستی روش حل به بررسی عوامل موثر بر عملکرد هیدروفویل در جریان زیر سطحی می پردازیم.

# ۴–۱– اثر ارتفاع از سطح آزاد

در ابتدا به بررسی اثر ارتفاع هیدروفویل تا سطح آزاد پرداخته شده است، به طوریکه به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر ارتفاع هیدروفویل از سطح آزاد، برای دو هیدروفویل متقارن و نامتقارن ناکا ۲۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در زوایای حمله ۳، ۵ و ۷ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاعهای مختلف از سطح آزاد مطابق شکلهای ۶ تا ۱۳ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶- توزیع ضریب فشار حول هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه وعدد فرود ۱ و ارتفاعهای بیبعد مختلف



شکل ۷- منحنی موج در سطح آزاد برای ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۳ درجه و عدد فرود ۱ و ارتفاعهای بی بعد مختلف



ممله ۵ درجه و عدد فرود ۱ و ارتفاعهای بی بعد مختلف



شکل ۹- منحنی موج سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۷ درجه، عدد فرود ۱ و ار تفاعهای بیبعد مختلف



شکل ۱۳ – منحنی موج سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۷ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاعهای بیبعد مختلف

جدول ۱- ضرایب برا و پسا ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ ، زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود برابر ۱، ار تفاعهای بیبعد مختلف

ضريب پسا	ضريب برا	ارتفاع بی بعد	هيدروفويل
•/• ٢٢١	٠/٣٩۵	١/•	ناکا ۰۰۱۲
•/• ١٣٧	• /۵۴	١/۵	ناکا ۰۰۱۲
•/••۶	• /۶	۲/۰	ناکا ۰۰۱۲
•/•	• /۶	۵/۰	ناکا ۰۰۱۲
•/•۶۵۴	• /YY	١/•	ناکا ۴۴۱۲
•/•۴١٣۵	۱/• ۴۵	١/۵	ناکا ۴۴۱۲
•/• ١٩	1/17	۲/۰	ناکا ۴۴۱۲
•/••٢٢	1/1•	۵/۰	ناکا ۴۴۱۲

مطابق شکلهای ۶ و ۱۰ مشاهده می شود که برای هر دو هیدروفویل ناکا ۲۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ با نزدیک شدن هیدروفویل به سطح آزاد فشار روی سطح بالایی هیدروفویل افزایش می یابد. بنابراین مطابق جدول ۱ با نزدیک شدن به سطح آزاد ضریب برا کاهش و ضریب پسا افزایش می یابد.

همچنین مطابق شکلهای ۲، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ وقتی عمق غوطهوری زیاد است انرژی زیادی از قدرت امواج مستهلک میشوند و در سطح آزاد موج با قدرت کمتری رخ میدهد. ولی وقتی عمق غوطهوری کمتر است انرژی کمتری در آب مستهلک میشود و موج با قدرت بیشتری در سطح آزاد رخ میدهد . بنابراین مشاهده میشود که با افزایش عمق



شکل ۱۰- توزیع ضریب فشار هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه ، عدد فرود ۱ و ارتفاعهای بی بعد مختلف



شکل ۱۱- منحنی موج در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۳ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاعهای بیبعد مختلف



شکل ۱۲ – منحنی موج در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاعهای بیبعد مختلف

آب تا حدود پنج برابر وتر هیدروفویل، میتوان از اثرات سطح آزاد صرف نظر کرد. همچنین برای هردو هیدروفویل مشاهده میشود که با افزایش زاویه حمله منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بزرگتر شده است.

سپس به منظور بررسی دقیقتر تغییرات ضرایب آیرودینامیکی بر اثر تغییر ارتفاع بیبعد هیدروفویل تا سطح آزاد، مطابق شکلهای ۱۴ تا ۱۷ ضرایب برا و پسا برای دو هیدروفویل ناکا ۲۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه به صورت تابعی از عدد فرود در ارتفاعهای بیبعد مختلف از سطح آزاد رسم شده است.



شکل ۱۴– نمودار ضریب برا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و نسبت ارتفاعهای بی بعد مختلف



شکل1۵ - ضریب پسا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، زاویه حمله ۵ درجه و نسبت ارتفاع های بیبعد مختلف



شکل ۱۶- ضریب برا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع های بیبعد مختلف



شکل ۱۷- نمودار ضریب پسا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاعهای بیبعد مختلف

به طور کلی دو عاملی که باعث تغییر ضرایب آیرودینامیکی در جریان زیر سطحی میشوند: فشار هیدرواستاتیکی و امواج سطح آزاد هستند. اگر یک جسم دو بعدی را در نزدیک سطح آزاد بدون موج در نظر بگیریم به طور طبیعی فشار وارد بر سطح زیرین این جسم به دلیل ارتفاع بیشتر از سطح آزاد، بیشتر است و این باعث تولید نیروی برا میشود. از طرفی اگر امواج روی سطح آزاد وجود داشته باشد همانطور که قبلا اشاره شد سیال بین هیدروفویل و سطح آزاد بیشتر محبوس شده و باعث افزایش فشار روی سطح بالایی هیدروفویل میشود و این باعث کاهش نیروی برا میشود. پس میتوان این طور استدلال کرد که وقتی دامنه و قدرت امواج سطح آزاد کم باشد، هرچه هیدروفویل به سطح

آزاد نزدیکتر شود به خاطر پررنگتر شدن اثر فشار هیدرواستاتیکی نیروی برا افزایش مییابد. و هنگامی که امواج سطح آزاد قوی باشند به دلیل استهلاکی که ایجاد می کنند باعث افت نیروی برا میشوند. و با توجه به این که امواج تولیدی روی سطح آزاد به عدد فرود وابسته است (به طوریکه مطابق رابطه (۸) دامنه موج تولیدی روی سطح آزاد با توان دوم عدد فرود رابطه مستقیم دارد) از این رو مطابق شکلهای ۱۴ تا ۱۷ مشاهده میشود که با نزدیک شدن هیدروفویل به سطح آزاد در اعداد فرود پایین ضریب برا افزایش و در اعداد فرود بالا ضریب برا کاهش می یابد. همچنین نیروی پسا با نزدیک شدن هیدروفویل به سطح آزاد، افزایش مییابد.



شکل ۱۸– نمودار ضریب برا بر حسب ارتفاع بیبعد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف



ناکا ۰۰۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف





شکل ۲۰ - نمودار ضریب برا بر حسب ار تفاع بیبعد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف



شکل ۲۱- نمودار ضریب برا بر حسب ار تفاع بیبعد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف

مطابق شکلهای ۱۸ تا ۲۱ نمودارهای ضرایب برا و پسا به صورت تابعی از ارتفاع بیبعد در زوایای حمله مختلف رسم شده است.

مشاهده می شود که با دور شدن از سطح آزاد ضریب برا افزایش و ضریب پسا کاهش می یابد. البته این ضرایب از ارتفاع بی بعد حدود ۳ به مقداری ثابت همگرا می شود که این نشان دهنده کمرنگ شدن اثر سطح آزاد در این ارتفاع بی بعد می باشد.

#### ۲-۴ اثر ضخامت هیدروفویل

پس از بررسی اثر زاویه حمله به بررسی اثر ضخامت هیدروفویل پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر تغییر ضخامت هیدروفویل، مطابق شکلهای ۲۲ و ۲۳ سه هیدروفویل ناکا ۲۰۰۹، ناکا ۲۰۱۲ و ناکا ۲۰۱۵ در ارتفاع بیبعد برابر ۱، عددفرود برابر ۱و زاویه حمله ۵ درجه مقایسه شده است.

مشاهده می شود که با افزایش ضخامت هیدروفویل فشار در بالا و پایین هیدروفویل کاهش می یابد، که البته این کاهش فشار در سطح بالا بیشتر است. بنابراین مطابق جدول ۲ مشاهده می شود که با افزایش ضخامت مقادیر ضرایب برا و پسا افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش ضخامت هیدروفویل، دامنه موج هم افزایش می یابد. زیرا با افزایش ضخامت هیدروفویل، دامنه موج هم افزایش بالایی کاهش بیشتری دارد و این تغییر فشار روی سطح بالایی سبب انتشار امواجی داخل آب می شود. بنابراین هرچه گرادیان فشار روی سطح هیدروفویل بیشتر باشد امواج منتشر شده قوی تر می باشند.

سپس به منظور بررسی دقیق تر تغییرات ضرایب آیرودینامیکی بر اثر تغییر ضخامت هیدروفویل، مطابق شکلهای ۲۴ و ۲۵ ضرایب برا و پسا برای این سه هیدروفویل به صورت تابعی از عدد فرود در ارتفاع بیبعد ۱ از سطح آزاد رسم شده است.



شکل ۲۲- نمودار توزیع ضریب فشار هیدروفویلهای ناکا با ضخامت های مختلف در زاویه حمله ۵درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بیبعد برابر ۱



شکل ۲۳- نمودار منحنی موج در سطح آزاد هیدروفویلهای ناکا با ضخامت های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بیبعد برابر ۱

جدول۲- مقادیر ضرایب برا و پسا هیدروفویلهای ناکا با ضخامتهای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱

ضريب پسا	ضريب برا	هيدروفويل
•/• 197	۰/٣٧٨٨	ناکا ۲۰۰۹
•/• TT I	۰/۳۹۵۰	ناکا ۰۰۱۲
•/• ۲۵۳	۰/۴۰۵۱	ناکا ۰۰۱۵



شکل ۲۴- نمودار ضریب برا بر حسب عدد فرود برای هیدروفویلهای ناکا با ضخامت های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بیبعد ۱ از سطح آزاد



هیدروفویلهای ناکا با ضخامت های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بیبعد ۱ از سطح آزاد

مشاهده میشود که افزایش ضخامت در تمامی اعداد فرود باعث افزایش ضرایب برا و پسا میشود.

# ۴–۳– اثر انحنای هیدروفویل

پس از بررسی اثر ضخامت هیدروفویل به بررسی اثر انحنای هیدروفویل پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر تغییر انحنای هیدروفویل، مطابق شکلهای ۲۶ و ۲۷ سه هیدروفویل ناکا ۲۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در ارتفاع بی بعد برابر ۱، عددفرود برابر ۱و زاویه حمله ۵ درجه مقایسه شده است.

ملاحظه می شود که با افزایش انحنا فشار در سطح بالا کاهش و در سطح پایین افزایش می یابد که این اتفاق به این دلیل است که، سرعت روی سطح بالا افزایش و متعاقبا فشار روی این سطح کاهش می یابد و سیال در سطح پایین با مانع بزرگتری در تماس است که این موجب افزایش فشار می شود.

سپس به منظور بررسی دقیق تر تغییرات ضرایب آیرودینامیکی بر اثر تغییر انحنای هیدروفویل، مطابق شکلهای ۲۸ و ۲۹ ضرایب برا و پسا را برای این سه هیدروفویل به صورت تابعی از عدد فرود در ارتفاع بی بعد ۱ از سطح آزاد رسم شده است.

٢٢٣	و همکاران	افخمي
111	و همداران	الحمى

جدول۳- مقادیر ضرایب برا و پساآزاد برای سه هیدروفویل ناکا با انحناهای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد ۱

ضريب پسا	ضريب برا	هيدروفويل
•/• ٣٣١	٠/٣٩۵	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۳۹۸	•/۵۸۴۵	ناکا ۲۴۱۲
•/•954	• /YY	4417 66



شکل ۲۶– توزیع ضریب فشار برای سه هیدروفویل ناکا با انحناهای مختلف در زاویه حمله ۵درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بیبعد برابر ۱



شکل ۲۷- نمودار منحنی سطح آزاد برای سه هیدروفویل ناکا با انحناهای مختلف در زاویه حمله ۵درجه عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بیبعد ۱

افخمی و همکاران ۲۲۴



شکل ۳۰– نمودار توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله های مختلف و عدد فرود برابر ۱و ارتفاع بیبعد ۱



شکل ۳۱- نمودار منحنی موج در سطح آزاد برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عددهای فرود مختلف و ار تفاع بیبعد ۱

مشاهده می شود که با افزایش عدد فرود سطح بالایی هیدروفویل نیز دچار مکش می شود. مطابق رابطه (۸) ارتفاع موج ایجاد شده روی سطح آزاد با توان دوم عدد فرود نسبت مستقیم دارد، بنابراین با افزایش عدد فرود موج تشکیل شده روی سطح آزاد قوی تر شده و سرعت انتشار امواج ثقلی کاهش می یابد و همانطور که در جدول ۴ مشخص است، با افزایش عدد فرود ضرایب برا کاهش و ضریب پسا کاهش می یابد.





شکل ۲۹- نمودار ضریب پسا بر حسب عدد فرود برای هیدروفویلهای ناکا با انحناهای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بیبعد ۱ از سطح آزاد

مشاهده میشود که افزایش انحنا در تمامی اعداد فرود باعث افزایش ضرایب برا و پسا میشود.

# ۴-۴- اثر عدد فرود

پس از بررسی اثر انحنای هیدروفویل به بررسی اثر عدد فرود بر جریان زیر سطحی پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر تغییر عدد فرود، مطابق شکلهای ۳۰ و ۳۱ هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵، ارتفاع بیبعد برابر ۱و اعداد فرود مختلف مقایسه شده است.

ی <b>و همکاران</b> ۲۲۵	افخمي
------------------------	-------

سرعت جریان آزاد	U
عدد فرود	$F_c$
	علائم يونانى
چگالی (kgm <sup>-3</sup> )	ρ
پتانسیل کل	Φ
پتانسیل اختلالی	$\phi$
تابع منحنى موج	ζ
	زيرنويسها
سطح آزاد	Fs
هيدروفويل	Н
دنباله	W

جدول۴- مقادیر ضرایب برا و پسا برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در ارتفاع های بیبعد مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و اعداد فرمد مختلف

	اعداد فرود مختلف	
ضريب پسا	ضريب برا	عدد فرود
• / • Y	۱/۰۵	• /A
•/•۶۵۴	• / \ \ \	١/•
•/•۵۳۹	• /88	1/۲

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد با استفاده از روش المان مرزی پرداخته شد. برای تحلیل به روش المان مرزی از یک روش تکرار مبتنی بر تئوری گرین استفاده شد، به طوریکه مسئله به دو قسمت هیدروفویل و سطح آزاد تقسیم شد، و هرکدام از قسمتها جداگانه حل شدند، سپس اثرات هر کدام از قسمت ها بر دیگری محاسبه شده و با استفاده از یک روش تکرار، یتانسیل اختلالی روی سطح آزاد و هیدروفویل بدست آمد آنگاه به وسيله اين يتانسيلها توزيع فشار روى سطح هيدروفويل بدست آمد. همچنین منحنی موج تشکیل شده روی سطح آزاد بدست میآید. پس از اعتبارسنجی این دو روش به بررسی عوامل مختلف روی عملکرد هیدروفویل از قبیل ضخامت هیدروفویل، عدد فرود، زاویه حمله و ارتفاع بی بعد از سطح آزاد پرداخته شده است. مشاهده گردید که با افزایش ضخامت و هیدروفویل ضرایب برا و پسا افزایش می یابد. همچنین با افزایش زاویه حمله جریان ضرایب برا و یسا افزایش می یابد. همچنین نزدیک شدن به سطح آزاد در اعداد فرود بالا ضريب برا كاهش و ضريب پسا افزايش مي يابد ولي در اعداد فرود پایین با نزدیک شدن به سطح آزاد ضرایب برا و پسا افزایش می یابد. به علاوه در ارتفاع های مختلف از سطح آزاد، با افزایش عدد فرود، ضریب برا کاهش می یابد و ضریب پسا افزایش می یابد.

#### ۶- علایم، نشانهها و ارقام

شتاب گرانش	G
طول کورد	С

۷- مراجع

- [1] Hough GR, Moran SP (1969) Froude number effects on two dimensional hydrofoils. J Ship Res 13: 53-60.
- [2] Giesing JP, Smith AM (1967) Potential flow about two-dimensional hydrofoil. J Fluid Mech 28: 113-120.
- [3] Bai KJ (1978) Alocalized finite-element method for two-dimensionalsteady potential flow swith free surface. J Ship Res 22: 216-230.
- [4] Yeung RW, Bouger YC (1979) Ahybrid -integral equation method for steady two dimension ship wave. Int J Numer Method Eng 14: 317-336.
- [5] Salvasen N (1969) On higher-order wave theory for submerged two-dimensional bodies. J Fluid Mech 38: 415-432.
- [6] Kennell C, Plotkin A (1984) A second order theory for the potential flow about thin hydrofoils. J Ship Res 28: 55-64.
- [7] Kouh JS, Lin TJ, Chau SW (2002) Preformance analysis of two-dimension hydrofoil under free surface. J Nat Tai Uni 86: 113-123.
- [8] Bal S (1999) A potential based panel method for two-dimensional hydrofoil. Int J Ocean Eng 28:243-261.
- [9] Daskovsky M (2000) The hydrofoil in surfaceproximity theory and experiment. Ocean Eng 27: 1129-1159.
- [10] Behbahani-Nejad Changizian M (2013) Reduced-Order modeling of unsteady partial cavity flows using the boundary element method. Modares Mech Eng 13(6): 140-152. (In Persian)
- [11] Saeidi Nezhad A, Dehghan AA, Manshadi M, Kazemi Esfeh M (2013)Experimental investigation of the vortex structure on a submersible model. Modares Mech Eng 13(15): 98-109. (In Persian)
- [12]Bourgoyne Dwayne A (2003) Flow over ahydrofoil with trailing edge vortex shedding athigh

228	افخمی و همکاران	مکانیک سازدها و شاردها/ سال ۱۳۹۵/ دوره 6/ شماره ۲

- [18] Djavareshkian MH, Esmaeli ali (2012) Parametric analysis of hydrofoil performance near the free surface. Hydraulic 6(4): 1-17. (In Persian)
- [19] Bal S, Kinnas S (2003) A numerical wave tank model forcavitating hydrofoils. J Comput Mech 259-268.
- [20] Bal S (2011) The effect of finite depth on 2D and 3D cavitating hydrofoils. J Mar Sci Technol 129-142.

هندسه بر ضرایب آیرودینامیکی بال شناور اثر سطحی. *نشریه علمی پژوهشی مکانیک سازهها و شارهها* ۲(۲): ۲۵–۸۷.

- [22] Nakos DE, Sclavounos PD (1990) On steady and unsteady shipwave patterns. J Fluid Mech 215: 263-288.
- [23] Dawson DW (1977) A practical computer method for solving shipwave problems. 2nd International Conference on Numerical ShipHydrodynamics.

Reynolds number, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Michigan.

- [13] Hay A, Visonneau M (2005) Computation freesurface flows with local mesh adaptation. Int J Numer Meth Fl 49: 785-816.
- [14] Kim SH, Yamato H (2005) The estimation of wave elevation and wave disturbance caused by the wave orbital motion of a fully submerged hydrofoil craft. J Mar Sci Technol 10: 22-31.
- [15] Xie N, Vassalos D (2007) Performance analysis of 3D hydrofoil under free surface. J Ocean Eng 34: 1257-1264.
- [16] Sadathosseini SH, Mousaviraad SM, Firoozabadi B, Ahmadi G (2008) Numerical simulation of freesurface waves and wave inducedseparation. Scientia Iranica 15(3): 323-331.
- [17] Ghassemi H, Kohansal A (2010) Boundary element method applied to the lifting bodies near the free surface. J Mar Eng 5(10):105-113.