

## شبیه‌سازی دو بعدی هیدروفویل هوشمند غوطه ور در نزدیکی سطح آزاد آب و مقایسه با هیدروفویل معمولی

دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد  
کارشناس ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد

محمدحسن جوارشکیان  
علی اسماعیلی

### چکیده

استفاده از مواد هوشمند در هیدروفویل‌ها می‌تواند باعث افزایش بازده قایق‌های تندرو گردد. هدف از این تحقیق، توسعه و شبیه‌سازی جریان حول هیدروفویل هوشمند و مقایسه آن با هیدروفویل معمولی است. سپس اثر عمق غوطه‌وری ( $h/c$ ) و زاویه بالچه (AOF) و عدد فرود ( $Fr$ ) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین موج ایجاد شده در سطح آزاد توسط این دو نوع هیدروفویل با هم مقایسه شده و اثر هوشمندسازی بر طول موج و دامنه نوسان این امواج به ازای عمق غوطه‌وری مختلف بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی بالچه هوشمند نیز پروفیل خمشی تیر یک سر گیردار تحت بارگذاری غیر یکنواخت در نظر گرفته شده، به طوری که به خوبی می‌تواند رفتار مواد هوشمند را مدل کند. همچنین در شبیه‌سازی عددی از روش ضمنی فشار مینا برای حل معادلات ناویر-استوکس و از مدل حجم سیال (VOF) برای شبیه‌سازی دو فاز آب و هوا بهره گرفته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که مواد هوشمند سبب افزایش نسبت برآ به پسا ( $L/D$ ) بیشتری در هیدروفویل هوشمند می‌شوند و در مقایسه با هیدروفویل‌های معمولی عملکرد مناسب‌تری دارند.

کلمات کلیدی: مواد هوشمند، ضرایب هیدرودینامیکی، هیدروفویل، موج، تروکوئید.

## Two Dimensional Simulation of Smart Submerge Hydrofoil Closed to the Water Free Surface and Compare with Conventional Hydrofoil

M. H. Djavareshkian

Associate Professor, Mechanical Engineering  
Department, Ferdowsi University of Mashhad

A. Esmaili

M.Sc., Mechanical Engineering Department, Ferdowsi  
University of Mashhad

### Abstract

Using of smart materials in hydrofoils increases the efficiency of high-speed boats. The aim of this paper is development and simulation of flow around the smart hydrofoil and comparison of it with the conventional ones. Then, the effect of submerge distance ( $h/c$ ), angle of flap (AOF) and Froude number ( $Fr$ ) is studied. The free surface waves, generated by two types of hydrofoils, will be compared with together and the smart martial influence on the wavelength and amplitude is investigated for different submerge distance. To simulate the smart flap behavior, a parametric bending profile of a cantilever beam under a non-uniform load is considered so that it can simulate the smart martial treat very well. Moreover, a pressure-based implicit procedure is applied to solve the Navier-Stokes equations and Volume of Fluid (VOF) model is also utilized to simulate air and water. Phases. Results demonstrate that the smart hydrofoils increase the lift to drag ratio ( $L/D$ ) when compares with the conventional hydrofoils; finally, they have a suitable efficiency against the conventional ones.

**Keywords:** Smart Materials, Hydrodynamic coefficients, Hydrofoil, Wave, Trochoid.

## ۱- مقدمه

تاریخ دریانوردی نشان می‌دهد که درک کنونی بشر از وسایل دریایی خیلی مدیون به پدیده‌های زیستی بوده و تجارب زیادی از عوامل طبیعی بدست آمده است. از طرفی با توجه به اینکه بخش زیادی از کره زمین را آب تشکیل داده، حمل و نقل در آن از اهمیت بسزایی برخوردار است؛ بخصوص به منظور دستیابی به سرعت زیاد و ماکزیمم عملکرد قایق‌های اثر سطحی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این قایق‌ها از هیدروفویل استفاده می‌شود که این هیدروفویل‌ها در داخل آب غوطه‌ور هستند و با استفاده از آن‌ها می‌توان قدرت مانورپذیری، پایداری و سرعت وسیله دریایی را افزایش داد. عملکرد هیدروفویل‌ها نقش بسیار مهمی در طراحی قایق‌های تندرو دارند؛ به طوری که با افزایش بازده آن‌ها، این قایق‌ها می‌توانند با سرعت بیشتر، مانورپذیری بالاتر، پایداری و عملکرد بسیار بالاتری حرکت کنند. به همین منظور، تحقیقات گسترده‌ای تاکنون انجام شده و تکنیک‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از این تکنیک‌ها بهینه‌سازی هیدروفویل است. اسپمیتز و همکارانش با استفاده از شبکه‌های عصبی شکل هیدروفویل را بهینه‌سازی کردند [۱]. چانگ و همکاران نیز از جریان پتانسیل برای محاسبه جریان سیال حول هیدروفویل و از روش لاگرانژ برای بهینه‌سازی آن استفاده کردند [۲]. همچنین یانگ و همکاران به مطالعه محاسباتی و بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی در سیستم‌های پیشران دریایی پرداختند [۳]. اما نکته حائز اهمیت این است که بهینه‌سازی شکل هیدروفویل سبب می‌شود هیدروفویل در یک شرایط خاصی ماکزیمم عملکرد داشته باشد و در صورت تغییر شرایط، عملکرد آن دیگر ماکزیمم نیست. برای دستیابی به ماکزیمم بازده، بهترین راه حل این است که شکل هیدروفویل در هر شرایطی تغییر کند به طوری که در آن شرایط ماکزیمم عملکرد حاصل شود. لذا بکارگیری مواد هوشمند می‌تواند مفید باشد و رسیدن به این هدف را ممکن سازد. مواد هوشمند هنوز در مرحله تحقیقاتی قرار دارند. برای آشنایی بیشتر با تکنولوژی مواد هوشمند تاریخچه‌ای از تحقیقات بعمل آمده لازم و ضروری است. ریدینیوتیس و همکارانش امکان‌پذیری استفاده از محرک‌هایی از جنس آلیاژ نیکل-تیتانیوم (Ni-Ti) را در یک هیدروفویل به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی کردند [۴]. در سال ۲۰۰۵، کوآکین بوش و همکارانش [۵] با بکارگیری آلیاژهای حافظه دار در ورودی یک فن چند تیغه توانستند عملکرد ناوهای دریایی را افزایش دهند. در سال ۲۰۰۹، مینگ و همکاران [۶] با استفاده از فیبر کامپوزی پیژوالکتریک هیدروفویل ساختند. وانگ و همکاران [۷] سیم‌های ساخته شده از جنس آلیاژهای هوشمند را در داخل یک ماده الاستیک

همانند سیکلون قرار دادند و از آن برای پیشران‌ش زیردریایی‌های کوچک استفاده کردند. ریدینیوتیس و همکاران [۸] هیدروفویلی را که از تکنولوژی محرک‌های آلیاژهای حافظه‌دار توسعه داده و تست کردند. همچنین در سال ۲۰۱۳ در تحقیقی معادله موج ایجاد شده توسط هیدروفویل هوشمند بدست آمد و همچنین معادله جدیدی برای بیان شکل موج ارائه شد [۹].

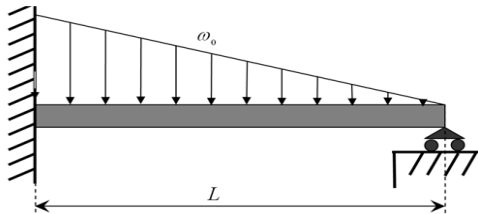
مواد هوشمند به طور وسیعی در صنعت هوافضا بکار گرفته شده است. با توجه به مزایای این مواد، می‌توان بالواره‌هایی ساخت که توانایی تغییر انحنای آن وجود دارد [۱۰]. یکی از مزایای بالواره‌های تطبیقی (بالواره‌هایی که از مواد هوشمند برای تغییر شکل خود استفاده کردند) کوچک شدن گردابه‌های تولید شده و در نتیجه کاهش مصرف انرژی است [۱۱]. ارتفاعات پره‌های هلیکوپتر [۱۲] و تولید صدای ایجاد شده توسط هواپیما و هلیکوپتر را نیز می‌توان با بکارگیری مواد هوشمند در ساختار آن‌ها کاهش داد [۱۳]. در سال ۲۰۱۰ بارلیس و همکاران [۱۴] یک ایده جدید در زمینه بکارگیری تکنولوژی مواد هوشمند در پره‌های توربین بادی را مطرح کردند. همچنین مواد هوشمند مانند پیژوالکتریک یا آلیاژهای هوشمند (SMA) می‌توانند در ریب‌ها (Rib) و پوسته‌های بال (Wing skin) استفاده شوند [۱۵-۱۷]. چیناسامی و همکاران [۱۸] نشان دادند که استفاده از مواد هوشمند سبب بهبود ضرایب آیرودینامیکی می‌شود. از جمله تحقیقات دیگر می‌توان به کارهای ماتروزکی و توری [۱۹]، ارمیرا و واتکینس [۲۰] و ارمیرا و همکارانش [۲۱] اشاره کرد.

با در نظر گرفتن کاربرد مواد هوشمند در صنایع دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که این مواد می‌توانند در قایق‌ها نیز بکار روند. یکی از موارد کاربرد مواد هوشمند در ساختار هیدروفویل‌ها به عنوان بالچه می‌باشد. بالچه‌ها بازده هیدروفویل‌ها را افزایش می‌دهند، اما استفاده از بالچه‌های هوشمند می‌تواند اثر بیشتری بر این روند صعودی داشته باشد. نوآوری موجود در این مقاله، استفاده از مواد هوشمند به عنوان بالچه در هیدروفویل‌ها در جهت افزایش بازده عملکردی آن‌ها می‌باشد؛ به طوری که در اکثر مطالعات انجام شده، اثر مواد هوشمند در هیدروفویل‌ها به عنوان بالچه مورد توجه قرار نگرفته است.

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی دو بعدی بالچه هوشمند در هیدروفویل‌هایی است که در نزدیکی سطح آزاد آب حرکت می‌کنند. در ابتدا به مقایسه هیدروفویل هوشمند با هیدروفویل معمولی پرداخته می‌شود و میزان تأثیرگذاری نوع هیدروفویل بر ضرایب هیدرودینامیکی، طول موج و دامنه نوسان امواج تولیدی در سطح آزاد آب مطالعه می‌شود. سپس شبیه‌سازی به ازای عمق غوطه‌وری، زاویه بالچه و عدد فرودهای مختلف انجام

$$a = \frac{1 - B^4}{B^2}$$

به طوری که طول تیر ( $B$ )، مدول یانگ ( $E$ )، وزن واحد طول ( $\omega_0$ ) و ممان اینرسی ( $\bar{I}$ ) می‌باشد. شکل ۲ به خوبی تیر معادل با بالچه هوشمند را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدل تیر یک سرگیردار

### ۲-۲- معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال

معادلات اساسی که بقای جرم، ممنتوم و اسکالر را بیان می‌کند، در حالت برداری و مستقل از سیستم مختصات به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \otimes \vec{V} - \vec{T}) = \vec{S}_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \phi - \vec{q}) = \vec{S}_\phi \quad (4)$$

به طوری که  $\rho$  چگالی،  $\vec{V}$  بردار سرعت و  $\phi$  به عنوان یک متغیر مستقل اساسی است.  $\vec{T}$  تانسور تنش و  $\vec{q}$  بردار شار بر اساس متغیرهای وابسته بیان می‌شوند. تانسور تنش برای سیال نیوتنی به فرم زیر است:

$$\vec{T} = -P\vec{I} \quad (5)$$

و بردار شار بر اساس قانون فوریه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\vec{q} = \Gamma_\phi \text{grad} \phi \quad (6)$$

در این مطالعه مدل  $k - \varepsilon$  برای شبیه‌سازی جریان آشفتنه استفاده شده است. علت انتخاب این مدل به خاطر سادگی، پایداری بسیار خوب و همگرایی آسان بوده است. از طرف دیگر زاویه حمله هیدروفویل صفر می‌باشد و ماکزیمم زاویه بالچه  $7.5^\circ$  درجه است، در نتیجه جدایش جریان خیلی قوی اتفاق نمی‌افتد. بنابراین جریان چندان پیچیده نیست و با مدل  $k - \varepsilon$  می‌توان جریان آشفتنه را شبیه‌سازی کرد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j k - \Gamma_k \frac{\delta k}{\delta x_j} \right) = G - \rho \varepsilon \quad (7)$$

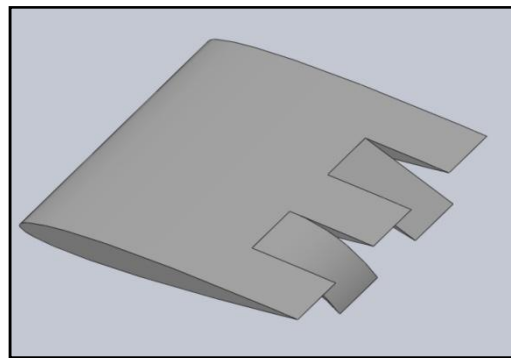
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j \varepsilon - \Gamma_\varepsilon \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

می‌شود و عملکرد هیدروفویل هوشمند در این شرایط نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### ۲- مراحل حل عددی و شرایط آن

#### ۲-۱- شبیه‌سازی تغییر شکل بالچه هوشمند

شبیه‌سازی مواد هوشمند و اضافه کردن آن به حل عددی با مشکلات زیادی همراه است و برای دستیابی به این کار دو راه وجود دارد؛ اول اینکه معادلات مربوط به نحوه رفتار این مواد استخراج شده و به طور همزمان با معادلات اساسی مربوط به حل جریان سیال حل شوند. این روش بسیار مشکل بوده و مستلزم هزینه و وقت زیادی می‌باشد. روش دوم این است که از سیستم‌های معادل استفاده شود؛ به طوری که حرکت این مواد هوشمند با یک سیستم شناخته شده، معادل شود. این معادل‌سازی بسیار مفید خواهد بود و هزینه طراحی به شدت کاهش می‌یابد. از آنجایی که بالچه‌های هوشمند دارای تغییرشکلی به صورت منحنی می‌باشند، لذا معادله کلی تغییر شکل بالچه هوشمند را می‌توان همانند معادله تغییر شکل تیریکسرگیردار که در سر دیگر آن تکیه‌گاه غلتکی قرار گرفته است در نظر گرفت [۲۲]. به همین دلیل در این مطالعه، تغییر شکل بالچه هوشمند توسط یک تیر یکسر گیردار مدل‌سازی شده، به طوری که معادله خمشی تیر بیانگر تغییر شکل وتر بالچه هوشمند است. در شکل ۱ بالچه هوشمند و معمولی مقایسه شده‌اند.



شکل ۱- طرحواره بالچه‌های هوشمند و معمولی

معادله خمشی تیر که برای معادل‌سازی بالچه هوشمند در نظر گرفته شده است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y = \frac{\omega_0(-X^5 + 2B^2X^3 - B^4X)}{120E\bar{I}B}$$

$$Y_{Upper} = Y_u + K_u(-X^5 - aX^3 + X) \quad (1)$$

$$Y_{Lower} = Y_L + K_L(-X^5 - aX^3 + X)$$

تفاضلی بالا دست مرتبه دوم برای بدست آوردن ترم‌های جابه-جایی استفاده شده است. با قرار دادن ترم نفوذ و جابه‌جایی در معادله گسسته شده، نتایج معادلات گسسته شده برای هر تقریبی به فرم زیر است:

$$A_p \cdot \phi_p = \sum_{m=E,W,N,S} A_m \cdot \phi_m + S'_\phi \quad (14)$$

به طوری که  $A$  شامل ضرایب نفوذ و جابه‌جایی می‌باشد. جمله  $S'_\phi$  شامل افزایش کمیت در اثر نامتعاد بودن، جملات پخش عددی، چشمه خارجی، ضرایب تصحیح مربوط به گام زمانی یا تکرار مرحله قبل می‌باشد.

برای مدل سازی جریان دو فازی نیز از مدل حجم سیال (Volume of Fluid (VOF)) استفاده شده است. در این روش، در محل تماس دو فاز، معادله پیوستگی درصد حجمی (Volume Fraction) برای یک فاز یا هر دو فاز حل می‌شود. اگر تعداد فازها  $q$  باشد این معادله عبارت است از:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}) = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (15)$$

به طوری که  $\dot{m}_{pq}$  دبی جرمی انتقال یافته از فاز  $p$  به فاز  $q$  و  $\dot{m}_{qp}$  دبی جرمی انتقال یافته از فاز  $q$  به فاز  $p$  می‌باشد.  $S_{\alpha q}$  نیز جمله چشمه می‌باشد که در این مسئله مقدار آن صفر است.  $\alpha$  بیانگر درصد حجمی در یک سلول از فاز  $q$  می‌باشد. معادله درصد حجمی برای فاز اولیه قابل حل نخواهد بود. لذا درصد حجمی فاز اولیه بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (16)$$

معادله درصد حجمی می‌تواند به هر دو روش ضمنی و صریح حل شود که در این تحقیق به روش ضمنی حل شده است.

### ۲-۳- شبکه بندی و حوزه حل جریان

در این تحقیق هیدروفویل دو بعدی که نزدیک سطح آزاد آب حرکت می‌کند مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا جریان حول هیدروفویل با مقطع NACA4412 انجام شده است. شبکه استفاده شده در شبیه سازی عددی فوق به دلیل سادگی و انطباق پذیری با شکل کلی جریان از نوع شبکه سازمان یافته بوده و شبکه بندی  $H$  مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۴ شرایط مرزی را نشان می‌دهد. در ورودی شرط مرزی سرعت و در خروجی شرط مرزی فشار برای هر دو مرز آب و هوا در نظر گرفته شده است. شرط مرزی لغزش نیز در سطوح بالا و پایین

لذجت توربولانسی و ضریب شار به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$\Gamma_\phi^t = \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\phi^t} \right) \quad (10)$$

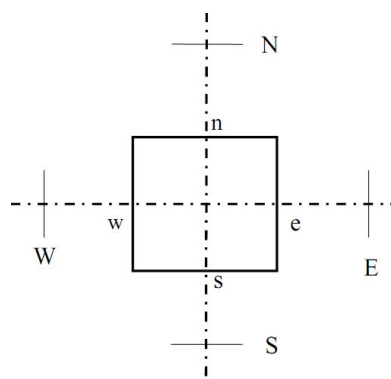
و جمله  $G$  موجود در معادلات (۷) و (۸) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = \mu_t \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (11)$$

گسسته‌سازی معادلات بالا به روش حجم محدود صورت گرفته است. ابتدا محوطه حل به تعدادی حجم گسسته یا سلول تقسیم می‌شود، به طوری که همه متغیرها در مرکز آن سلولها تقسیم می‌شود (شکل ۳).

حال این معادلات برای همه حجم کنترلها بر اساس تئوری گوسین بکار گرفته می‌شود. برای هر متغیر  $\phi$  (که می‌تواند مولفه‌های سرعت باشد) شکل کلی معادلات به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial v}{\partial t} [(\rho\phi)_p^{n+1} - (\rho\phi)_p^n] + I_e - I_w + I_n - I_s = S_\phi \delta v \quad (12)$$



شکل ۳- حجم کنترل و نقاط گرهی

$I$  ترکیبی از جمله جابه‌جایی ( $I^C$ ) و جمله نفوذ ( $I^D$ )

می‌باشد. شار نفوذ به وسیله تفاضل مرکزی بیان می‌شود. گسسته‌سازی شار جابه‌جایی به توجه خاصی نیاز دارد و همین امر است که موضوع توسعه طرح‌های تفاضلی مختلف شده است. شار جابه‌جایی برای سطح سلول  $e$  به صورت زیر است:

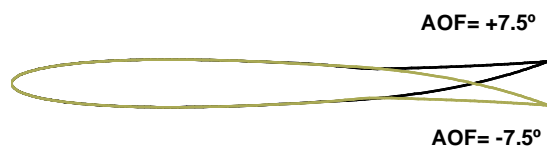
$$I_e^C = (\rho \cdot V \cdot A)_e \phi_e = F_e \phi_e \quad (13)$$

که  $F_e$  نشان دهنده شار جرم جابه‌جا شده در واحد سطح سلول و  $\phi_e$  نیز مقدار خاصیت در سطح سلول است و مقدار آن نامشخص است و برای یافتن آن باید از طریق درون‌یابی از نقاط شبکه‌های کناری آن تخمین زده شود. در این تحقیق از روش

حال با توجه به دست یابی استقلال از شبکه و اعتبار سنجی، پارامترهای مناسب برای شبیه سازی حالت‌های جدید بدست آمده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این تحقیق، شبیه سازی عددی جریان حول یک هیدروفویل متقارن NACA 0009 صورت گرفته، به طوری که این هیدروفویل دارای بالچه هوشمند بوده و به ازای زاویه بالچه مختلف (۷.۵، ۵، ۲.۵، -۲.۵، -۵، -۷.۵) و عمق غوطه‌وری متفاوت (۱، ۰.۷، ۰.۵) شبیه‌سازی انجام شده است. البته باید ذکر گردد که زاویه بالچه بیانگر میزان تغییر شکل لبه فرار هیدروفویل هوشمند است و منظور از مثبت و منفی بودن زاویه بالچه این است که این تغییر شکل به سمت بالا باشد و یا پایین، به طوری که این امر به خوبی در شکل ۶ نشان داده شده است. عدد رینولدز نیز برابر  $3.1 \times 10^6$  در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی به ازای عدد فرودهای مختلف ۰.۵، ۰.۸، ۱، ۱.۲، ۱.۴ و ۱.۶ انجام شده است.



شکل ۶- نمایی از نحوه تغییر شکل هیدروفویل هوشمند

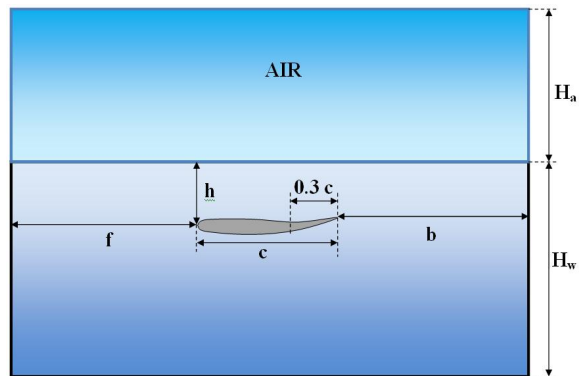
از آنجایی که در این تحقیق عملکرد هیدروفویل هوشمند مورد بررسی قرار می‌گیرد لذا در ابتدا به مقایسه این نوع هیدروفویل با هیدروفویل معمولی پرداخته خواهد شد. در جدول ۱ ضرایب برآ و پسا هیدروفویل هوشمند با معمولی مقایسه شده است. البته علامت منفی ضریب برآ نشان دهنده جهت رو به پایین نیروی برآ می‌باشد. همانطور که این جدول نشان می‌دهد مقدار ضریب برآ در هیدروفویل هوشمند بسیار بیشتر از هیدروفویل معمولی است؛ هر چند که با بکارگیری مواد هوشمند ضریب پسا نیز افزایش ناچیزی دارد.

همچنین نمودار تحلیل خطای موجود بین این دو نوع هیدروفویل در شکل ۷ نشان داده شده است. خطای محاسبه شده در این نمودار بر اساس رابطه زیر می‌باشد:

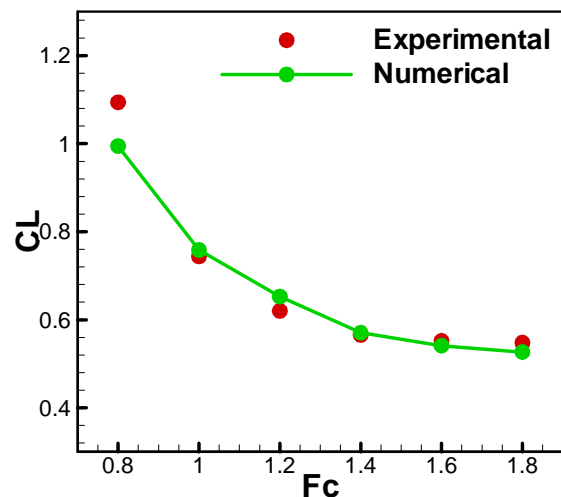
$$\% \varepsilon = \frac{C_{smart} - C_{convention}}{C_{smart}} \times 100 \quad (17)$$

این شکل به خوبی نشان می‌دهد که میزان افزایش ضرایب برآ در هیدروفویل هوشمند بسیار زیاد است و علیرغم اینکه

حوزه حل استفاده شده است. سطوح هیدروفویل دارای شرط مرزی دیواره است. بر اساس این شکل ابعاد حوزه حل بعد از چندین مرتبه تغییر طول انتخاب شده است. استقلال از شبکه نیز به ازای چندین شبکه با تعداد سلول مختلف انجام شده است. نتایج استقلال از شبکه نشان داده است که به ازای ۸۴۰۰۰ سلول جواب حاصله مستقل از تعداد سلول‌ها می‌شود.



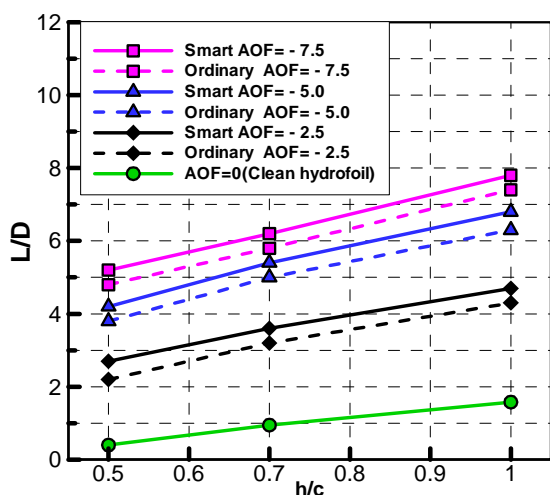
شکل ۴- حوزه حل جریان و شرایط مرزی در حالت دو بعدی



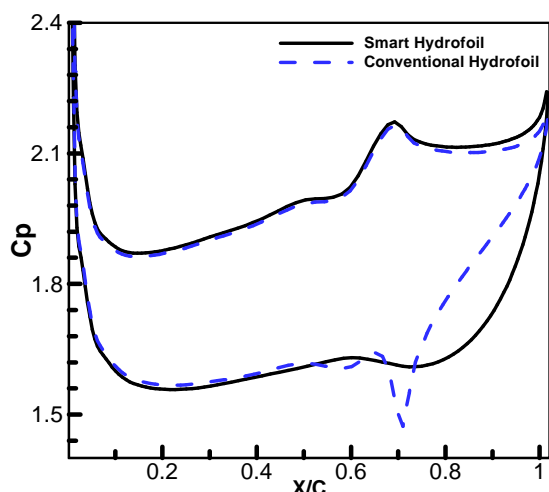
شکل ۵- مقایسه حل عددی حاضر با نتایج تجربی حول هیدروفویل NACA 4412 در شرایط  $AOA=5^\circ$ ،  $h/c=1$

برای دست یابی به صحت حل عددی، در ابتدا شبیه سازی جریان حول هیدروفویلی با مقطع NACA 4412 انجام شده است و نتایج حاصله با نتایج تجربی منتشر شده مقایسه گردیده است [۲۳]. در شکل ۵ ضرایب برآ حاصل از حل عددی هیدروفویل با مقطع NACA 4412 با نتایج تجربی در شرایط  $h/c=1$  مقایسه شده است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که نتایج عددی مطابقت بسیار مناسبی با نتایج تجربی منتشر شده دارد.

رفتار به معنی آن است که هیدروفویل هوشمند عملکرد موثرتری دارد و مناسب‌تر از هیدروفویل معمولی است و با بکارگیری این تکنیک، میزان ضرایب هیدرودینامیکی بهبود می‌یابد.



شکل ۸- تغییرات نسبت برآ به پسا به صورت تابعی از عمق فروری مختلف



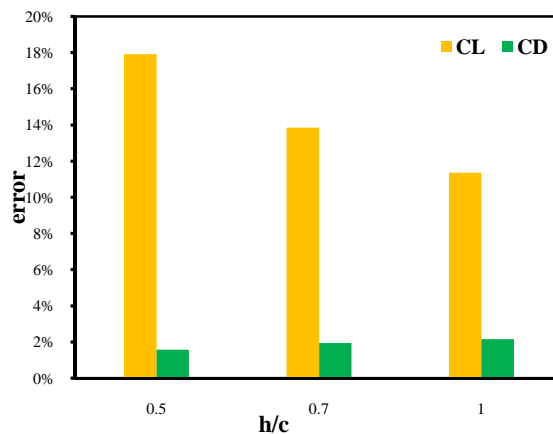
شکل ۹- توزیع ضریب فشار روی سطوح هیدروفویل هوشمند و معمولی در  $h/c=1$ ،  $AOF=-5^\circ$

برای مقایسه بهتر این هیدروفویل‌ها و یافتن دلیل این اختلاف‌ها می‌توان توزیع فشار حول جسم را مد نظر قرار داد. شکل ۹ توزیع ضریب فشار روی سطوح هیدروفویل هوشمند و معمولی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین در ناحیه بکارگیری مواد هوشمند بیشتر از آن مقدار در حالت معمولی است. تغییرات فشار نیز در لبه فرار در حالت هوشمند هموارتر بوده، در حالی که در سطح بالایی هیدروفویل معمولی یک تغییر ناگهانی در ضریب فشار رخ می‌دهد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از یک بالچه هوشمند سبب گرادیان فشار ملایم در ناحیه اتصال بالچه به

ضریب پسا نیز افزایش می‌یابد، این افزایش کم‌تر از ۲ درصد می‌باشد.

جدول ۱- مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی هیدروفویل هوشمند با معمولی در  $h/c=0.7$

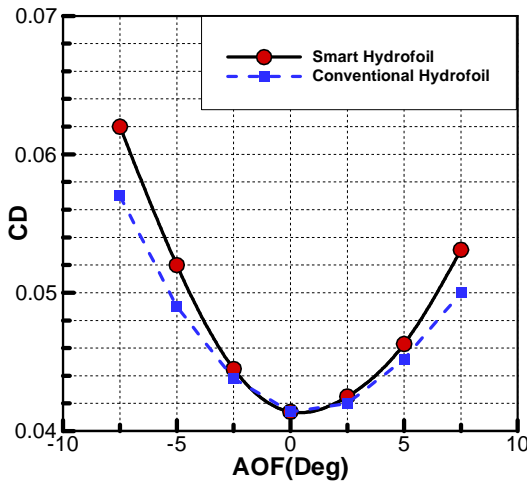
الف- ضریب برآ		
زاویه بالچه	هیدروفویل هوشمند	هیدروفویل معمولی
۲,۵	-۰,۰۷۷۳	-۰,۰۶۳
-۲,۵	۰,۱۶۶	۰,۱۴۳
۵	-۰,۱۹۳	-۰,۱۶۳
-۵	۰,۲۹	۰,۲۵
۷,۵	-۰,۳۰۷	-۰,۲۶
-۷,۵	۰,۴۰۵	۰,۳۴۵
ب- ضریب پسا		
زاویه بالچه	هیدروفویل هوشمند	هیدروفویل معمولی
۲,۵	۰,۰۴۲۹	۰,۰۴۲۸
-۲,۵	۰,۰۴۶۱	۰,۰۴۵۲
۵	۰,۰۴۶۸	۰,۰۴۵۷
-۵	۰,۰۵۳۹	۰,۰۵
۷,۵	۰,۰۵۳۷	۰,۰۵۱۲
-۷,۵	۰,۰۶۵	۰,۰۵۹۶



شکل ۷- نمودار تحلیل خطا بین دو هیدروفویل به ازای  $AOF=-2,5^\circ$

به همین دلیل اگر مقادیر نسبت برآ به پسا بین این دو نوع هیدروفویل مقایسه گردد، مشاهده می‌شود که این نسبت برای هیدروفویل هوشمند در تمامی شرایط بیشتر از حالت معمولی است. این مقایسه در شکل ۸ انجام شده است و نکته قابل تامل این است که نسبت برآ به پسا با افزایش زاویه بالچه و عمق غوطه‌وری افزایش می‌یابد. همچنین مقدار نسبت برآ به پسا برای هیدروفویل هوشمند بیشتر از هیدروفویل معمولی است. این

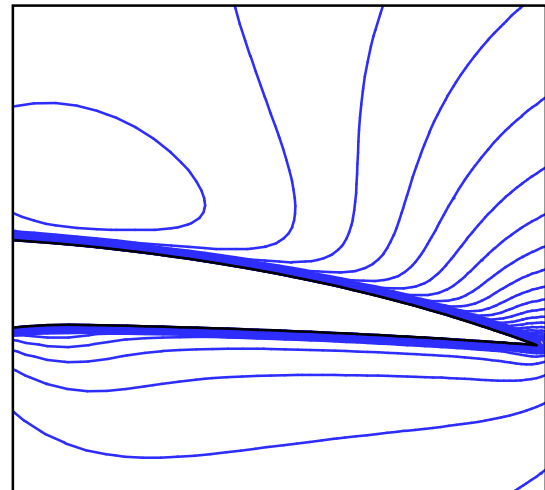
هوشمند و معمولی به ازای زاویه بالچه متفاوت رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که استفاده از بالچه هوشمند تغییرات بیشتری در نیروی پسا به ازای زاویه بالچه مختلف نسبت به هیدروفویل معمولی ایجاد می‌کند.



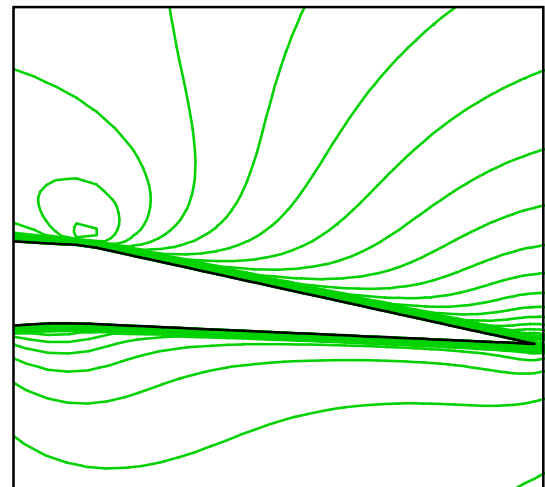
شکل ۱۱- تغییرات ضریب پسا به صورت تابعی از AOF در هیدروفویل هوشمند و معمولی به ازای  $h/c=0.5$

علت بیشتر بودن نیروی پسای تولیدی توسط هیدروفویل هوشمند نسبت به هیدروفویل معمولی را می‌توان در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ یافت. این شکل‌ها پروفیل سرعت روی سطح بالچه و در پشت هیدروفویل را نشان می‌دهد. شکل ۱۲-الف نشان می‌دهد که سرعت در سطح پایینی بالچه هیدروفویل هوشمند بیشتر از هیدروفویل معمولی است و سرعت در سطح بالایی بالچه آن هیدروفویل کم تر از هیدروفویل معمولی است. شکل ۱۲-ب پروفیل سرعت پشت هیدروفویل را نشان می‌دهد که حاکی از قوی تر بودن گردابه‌های پشت هیدروفویل هوشمند نسبت به هیدروفویل معمولی است. همچنین این رفتار برای تغییر زاویه رو به بالا بالچه نیز وجود دارد که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. شکل ۱۳-الف نشان می‌دهد که اختلاف سرعت بین سطح بالا و پایین هیدروفویل هوشمند بیشتر از هیدروفویل معمولی است و شکل ۱۳-ب نیز نشان می‌دهد که به ازای زاویه رو به بالا بالچه، گردابه‌های ایجاد شده در پشت هیدروفویل هوشمند قوی تر از هیدروفویل معمولی است.

هیدروفویل می‌شود. همین امر سبب افزایش چشمگیر در ضریب پسا در هیدروفویل هوشمند می‌شود.



(الف)



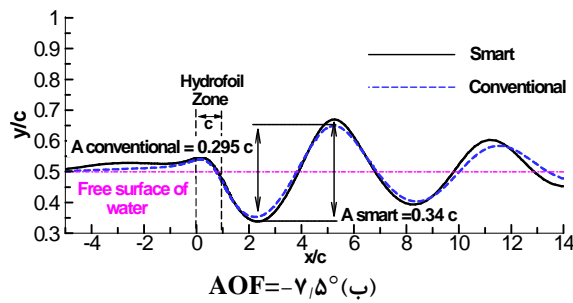
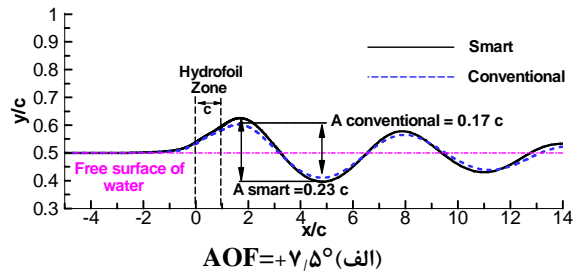
(ب)

شکل ۱۰- توزیع سرعت حول (الف) هیدروفویل هوشمند، (ب) هیدروفویل معمولی در  $h/c=1$

در شکل ۱۰ توزیع سرعت حول هیدروفویل هوشمند و معمولی رسم شده است. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود گردان سرعت در هیدروفویل معمولی در نواحی لبه فرار بیشتر از دیگر هیدروفویل است؛ در حالی که در هیدروفویل هوشمند سرعت به طور همواری توزیع شده است. در حقیقت با بکار بردن مواد هوشمند، مومنتم بیشتری به سیال القا شده و همین امر منجر به توزیع یکنواخت‌تر سرعت شده است.

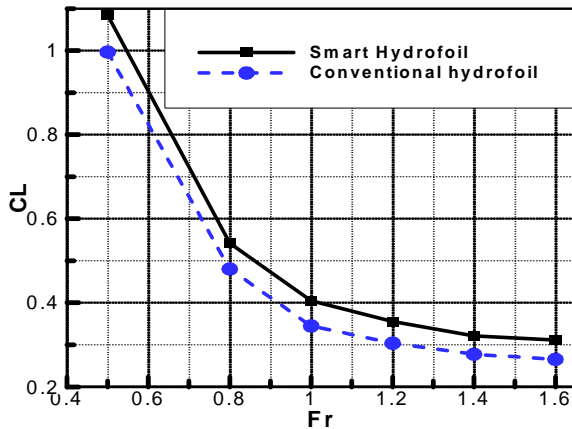
نکته دیگری که در مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی دو نوع هیدروفویل مورد توجه قرار می‌گیرد اختلاف ناچیز بین ضرایب پسا می‌باشد؛ به طوری که ضریب پسا در هیدروفویل هوشمند افزایش ۲ درصدی دارد. در شکل ۱۱ ضریب پسا هیدروفویل

ایجاد شده توسط این دو نوع هیدروفویل دارای طول موج یکسانی هستند.

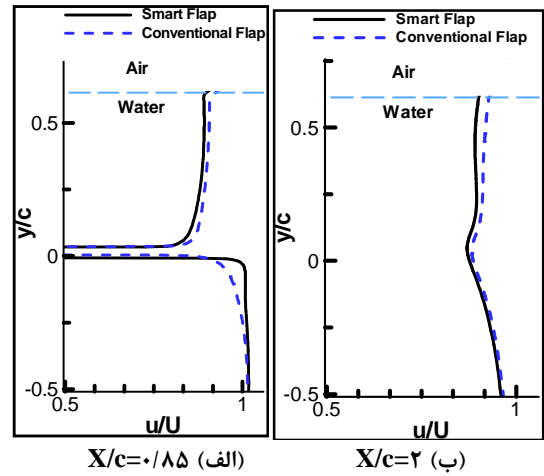


شکل ۱۴- شکل موج هیدروفویل هوشمند و معمولی به ازای  $h/c = (x=0.1x_{ac}) \cdot 0.5$

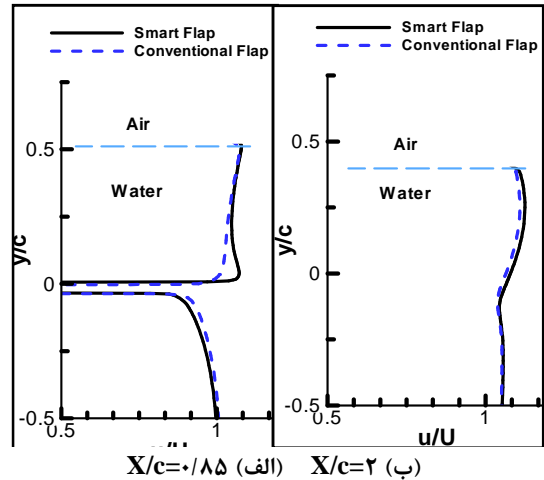
مقایسه دو هیدروفویل را نیز می‌توان به ازای عدد فرود مختلف بررسی کرد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ضرایب برآ و پسا دو هیدروفویل به ازای فرودهای مختلف رسم شده است. همانطور که از شکل ۱۵ پیدا است ضریب برآ در هیدروفویل هوشمند همواره بیشتر از هیدروفویل معمولی است و در شکل ۱۶ نیز نشان داده شده است که ضریب پسای هیدروفویل هوشمند بیشتر از هیدروفویل معمولی است؛ اما نسبت برآ به پسا در هیدروفویل هوشمند همچنان بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۵- ضریب برآ هیدروفویل هوشمند و معمولی به ازای عدد فرودهای مختلف در  $h/c = 0.7$ ,  $AOF = +7.5^\circ$



شکل ۱۲- پروفیل سرعت (الف) در ناحیه وسط بالچه، (ب) پشت هیدروفویل در شرایط  $AOF = +7.5^\circ$  و  $h/c = 0.5$



شکل ۱۳- پروفیل سرعت (الف) در ناحیه وسط بالچه، (ب) پشت هیدروفویل در شرایط  $AOF = -7.5^\circ$  و  $h/c = 0.5$

حال به مقایسه امواج ایجاد شده در سطح آزاد آب که در اثر حرکت هیدروفویل‌ها ایجاد شده‌اند، پرداخته می‌شود. شکل ۱۴- الف و ۱۴-ب موج ایجاد شده در اثر حرکت هیدروفویل‌های هوشمند و معمولی را در  $h/c = 0.5$  مقایسه کرده است. این شکل نشان می‌دهد که دامنه نوسان موج سطح آب در هیدروفویل معمولی برابر  $0.17c$  و برای هیدروفویل هوشمند برابر  $0.23c$  می‌باشد؛ به طوری که موج‌های ایجاد شده توسط هیدروفویل‌های هوشمند، دامنه نوسان بیشتری دارند که نشان دهنده قدرت بیشتر این موج‌ها می‌باشد. این اختلافات دامنه نوسان را می‌توان ناشی از همان اختلاف نیروی پسا دانست. در واقع قدرت امواج سطحی بیان کننده نیروی پسا فشاری است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف در نیروی پسا در هیدروفویل‌ها ناشی از سهم فشاری این نیرو است. اما نکته قابل توجه این است که امواج



۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی جریان حول هیدروفویل‌های مغروق هوشمند و معمولی انجام شده و اثر عمق غوطه‌وری، زاویه بالچه و عدد فرود مورد مطالعه قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی بالچه هوشمند، پروفیل خمشی تیر یک سر گیردار تحت بارگذاری غیر یکنواخت در نظر گرفته شده، به طوری که به خوبی توانست رفتار مواد هوشمند را مدل کند. اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل است:

- (۱) نوع هیدروفویل هیچ تأثیری بر طول موج ندارد و هیدروفویل‌های هوشمند و معمولی امواج سطح آزادی تولید می‌کنند که در شرایط ثابت دارای طول موج یکسان می‌باشند.
- (۲) دامنه نوسان موج ناشی از هیدروفویل هوشمند بیشتر از هیدروفویل معمولی است. این پدیده به خاطر اختلاف نیروی پسای فشاری در هیدروفویل‌ها می‌باشد.
- (۳) طول موج به زاویه بالچه بستگی دارد، اما دامنه نوسان موج با افزایش زاویه بالچه بیشتر می‌شود.
- (۴) قدر مطلق ضریب برآ هیدروفویل هوشمند بیشتر از هیدروفویل معمولی است.
- (۵) مقدار نسبت برآ به پسا هیدروفویل هوشمند بیشتر از آن مقدار برای هیدروفویل معمولی است. پس به کارگیری هیدروفویل هوشمند بسیار موثرتر از هیدروفویل معمولی است و با بکارگیری آن می‌توان بازده قایق‌های تندرو را افزایش می‌دهد.

مراجع

[1] Schmitz, A., Besnard, E., Hefazi, H. "Automated Hydrodynamic Shape Optimization Using Neural Networks", Paper No. C6 (D19), presented at the SNAME Maritime Technology Conference & Expo, Sept. 2004.

[2] Hsin, C., Wu, J. L., Chang, S. "Design and optimization method for a two-dimensional hydrofoil", J. of Hydrodynamics, Ser B, Vol. 18, pp. 323-332, 2006.

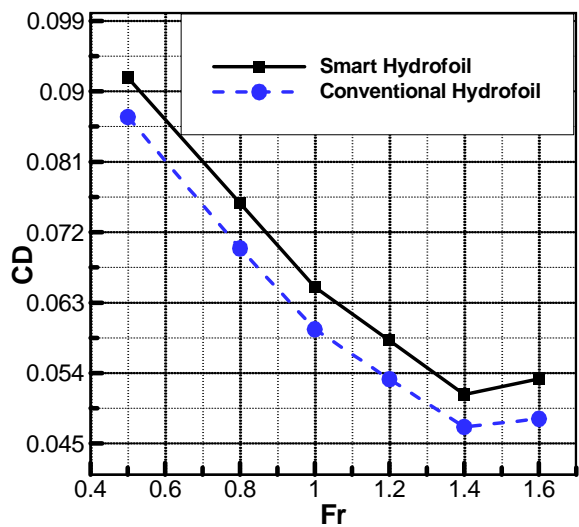
[3] Yang, S., Xi, W., Ma, L., Zhang, H., Yang, Z. "Optimizing-Computation of Controlling Parameters of Intelligent Propulsion System of a Hydrofoil Sliding Craft Propelled by Adjustable-Pitch Screw", Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC: IEEE, pp. 1815-1823, 2009.

[4] Rediniotis, OK., Lagoudas, DC., Mashio, T., Garner, LJ., Qidwai, MA. "Theoretical and experimental investigations of an active hydrofoil with SMA actuators", Vol. 3039, pp. 277, 1997.

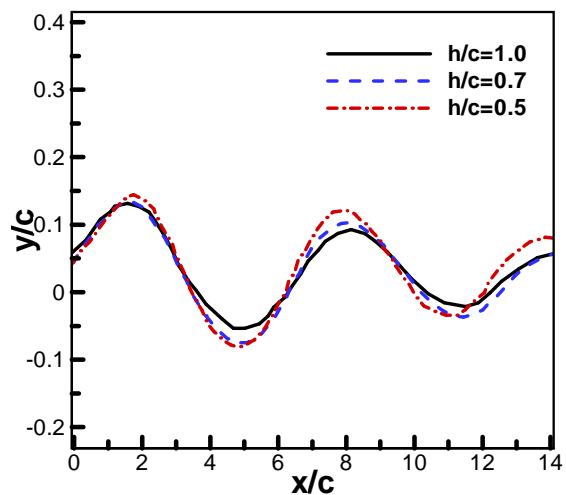
[5] Quackenbush, T., Carpenter, B., Gowing, S. "Design and Testing of a Variable Geometry Ducted Propulsor Using Shape Memory Alloy Actuation", AIAA paper 1077, 2005.

[6] Ming, A., Park, S., Nagata, Y., Shimojo, M. "Development of underwater robots using

بعد از مقایسه هیدروفویل هوشمند با نوع معمولی آن و آشکار شدن مزایا و معایب این هیدروفویل‌ها، لازم است که اثرات عمق غوطه‌وری و عدد فرود بر عملکرد آن‌ها بررسی و مطالعه شود. شکل ۱۷ سطح موج تشکیل شده به ازای فواصل مختلف غوطه‌وری را نشان می‌دهد. وقتی عمق غوطه‌وری افزایش می‌یابد امواج تشکیل شده ضعیف‌تر خواهند بود. امواج ضعیف نیز نشان دهنده فشار کم‌تر بین سطح بالایی هیدروفویل و سطح آزاد آب است و در نتیجه اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین هیدروفویل افزایش می‌یابد. اختلاف فشار زیاد نیروی رو به پایین (نیروی برآ) را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۶- ضریب پسا هیدروفویل هوشمند و معمولی به ازای عدد فرودهای مختلف در  $AOF=+7/5^\circ, h/c=0/7$



شکل ۱۷- موج تولید شده به ازای متفاوت  $h/c$  در  $AOF=+7/5^\circ$

- Structural Dynamics, and Materials Conference. Rhode Island, 2006.
- [20] Ermira, A. Bil, C., Watkins, S. "Application of Smart Materials for Adaptive Airfoil Control", 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, USA, 2009.
- [21] Ermira, A., Bil, C., Watkins, S. "Numerical Simulation of an Adaptive Airfoil System using SMA Actuators", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010.
- [22] Djavareshkian, M., Esmaeli, A., Parsani, A. "Aerodynamics of smart flap underground effect", J. Aerospace Science and Technology, Vol. 15, pp.642-652, 2011.
- [23] Kouh, J. S., Lin, T. J., Chau, W. "Performance an analysis of two-Dimensional hydrofoil under free surface", J. of National Taiwan University, Vol. 86, pp.113-123, 2002.
- piezoelectric fiber composite", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3821-3827, 2009.
- [7] Wang, Z., Hang, G., Wang, Y., Li, J., Du, W. "Embedded SMA wire actuated biomimetic fin: a module for biomimetic underwater propulsion", Int. J. Smart Materials and Structures, Vol. 17, pp. 25-39, 2008.
- [8] Rediniotis, O., Wilson, L., Lagoudas, DC., Khan, M. "Development of a shape-memory-alloy actuated biomimetic hydrofoil", J. of intelligent material systems and structures, Vol. 13, pp. 35-49, 2002.
- [9] Djavareshkian, M., Esmaeli, A., Parsani, A. "Numerical simulation of smart hydrofoil in marine system", J. Ocean Engineering, Vol. 73, pp.16-24, 2013.
- [10] Bolonki, A., Gilyard, G. "Estimated Benefits of Variable-Geometry Wing Camber Control for Transport Aircraft", NASA TM-1999-206586, 1999.
- [11] Pern, N.J., Jacob, J. D. "Wake vortex Mitigation using Adaptive Airfoils", American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Vol. 15, pp. 167-176, 1999.
- [12] Anusonti-Inthra, P., Gandhi, F., Frecker, M. "Design of a conformable rotor airfoil using distributed piezoelectric actuation", Int. J. AIAA, Vol. 8, pp. 1684-1695, 2005.
- [13] Tiseo, B., Koopmann, G. "Smart Tunable Dynamic Vibration Absorbers", 12th AIAA/ CEAS Aeroacoustics conference (27th AIAA Aeroacoustics conference). Cambridge, Massachusetts: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1801 Alexander Bell Drive, Suite 500, Reston, VA, 20191-4344, USA; 2006.
- [14] Barlas, T., van Kuik, G. "Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 46, pp. 1-27, 2010.
- [15] Campanile, L., Anders, S. "Aerodynamic and aeroelastic amplification in adaptive belt-rib airfoils", Int. J. Aerospace science and technology, Vol. 9, pp. 55-63, 2005.
- [16] Majji, M., Rediniotis, O., Junkins, J. "Design of a Morphing Wing: Modeling and Experiments", AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. South Carolina, 2007.
- [17] Wickramasinghe, V., Chen, Y., Martinez, M., Kernaghan, R., Wong, F. "Design and Verification of a Smart Wing for an Extremely-Agile Micro-Air-Vehicle", California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 2009.
- [18] Chinnasamy, P., Chen, Y. "Application of Computational Fluid Dynamics on Smart Wing Design", MSc Thesis University of Nevada, Las Vegas, 2005.
- [19] Matsuzaki, Y., Torii, H. "Flutter Boundary Prediction of an Adaptive Smart Wing during Process of Adaptation Using Steady-State Response Data", 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures,