

# شبیه سازی عددی جریان حول یک شناور زیر آبی و محاسبه ضرائب نیروهای هیدرودینامیکی با کمک معادله موريسون

محسن ثقفیان<sup>۱</sup> و بهداد فروغی مهر<sup>۲</sup>  
 دانشکده مهندسی مکانیک  
 دانشگاه صنعتی اصفهان

مجتبی مدح خوان<sup>۳</sup>  
 پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا

## چکیده

در کار حاضر جریان لزج تراکم ناپذیر اطراف یک شناور زیر آبی کنترل شونده در دو حالت دائم و غیر دائم به کمک نرم افزار فلوئنت تحلیل عددی شده است. در این شبیه سازی ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی در محدوده حرکت‌های تعریف شده آن محاسبه شده است. این حرکات شامل حرکت افقی و عمودی شناور بصورت شتابدار و بدون شتاب می‌باشد. با توجه به اینکه نیروی وارد به شناور در حرکت‌های شتابدار شامل دو بخش حقیقی و مجازی است، برای تفکیک این دو بخش از معادله موريسون استفاده شده است. نتایج بدست آمده قابلیت معادله موريسون را در برآورد نیروهای وارد بر این شناور نشان می‌دهد. علاوه بر آن، مقایسه ضرائب نیروی مجازی وارد به شناور در حرکات گوناگون نشان می‌دهد که نوع حرکت تاثیر شدیدی بر مقدار این ضرائب ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** ضرائب هیدرودینامیکی، معادله موريسون، شناور زیر آبی

## Numerical Simulation of Fluid Flow over an Underwater Vehicle and Calculation of Hydrodynamic Force Coefficients Using the Morison Equation

M. Saghafian and B. Forughi-Mehr

Mech. Eng. Dept.

Isfahan Univ. of Tech.

M. Madhkhan

Subsea R&D Centre

### ABSTRACT

In present work viscous flow over a remotely operated vehicle (ROV) was investigated numerically using the FLUENT CFD software. In this simulation, the ROV hydrodynamic forces and dimensionless force coefficients are estimated in defined motions. These motions include horizontal and vertical movement with and without acceleration. Hydrodynamic forces in accelerating motion include two parts; actual and virtual. The Morrison's equation was used to separate these two parts. Results show that the Morison equation is capable of estimating forces in such accelerating motions. In addition, the type of motion does not seem to have considerable effects on virtual force coefficients.

**Key Word:** Hydrodynamic Coefficients, Morison Equation, Underwater Vehicle

۱- استاد یار (نویسنده پاسخگو): saghafian@cc.iut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد

۳- کارشناس ارشد

## ۱- مقدمه

خود را با ساختن نمونه ای از شناور و آزمایش آن در تونل باد تایید نمودند. در سال ۱۹۹۳ ناهن<sup>۴</sup> [۳] برای تخمین ضرائب هیدرودینامیکی یک نمونه شناور زیر آبی از بسته نرم افزاری دات کام<sup>۵</sup> استفاده کرد. سایر<sup>۶</sup> [۴] در سال ۱۹۹۶ ضریب نیروی درگ وارد به ROV سوپر اسکورپیو<sup>۷</sup> با استفاده از نرم افزار فلونت محاسبه نمود. او ضرائب بدست آمده از نرم افزار را با نتایج حاصل از آزمایش مدل یک چهارم شناور مقایسه کرد که اختلاف ناچیز بین نتایج هر دو روش را نشان می‌داد. در سال ۲۰۰۱ کلاوس<sup>۸</sup> و همکارانش [۵] تحقیق هیدرودینامیکی و دینامیکی کاملی روی ROV مدوس<sup>۹</sup> انجام دادند. برای بدست آوردن بهترین طراحی ممکن چهار هندسه مختلف تهیه و توسط نرم افزار فلونت تحلیل شد که طراحی نهایی این ROV کاهش بیش از ۲۰٪ درگ در حرکت افقی شناور را به همراه داشته است. کلاوس و همکاران نتایج این تحلیل هیدرودینامیکی را با نتایج حاصل از آزمایش مدل واقعی ROV مقایسه کردند و صحت جوابها را نشان داده اند. در سال ۲۰۰۵ ایوب<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۶] در مرکز بین المللی تحقیقات مهندسی اسلام آباد به کمک نرم افزار فلونت جریان اطراف شناور زیر آبی دارپا<sup>۱۱</sup> را تحلیل کردند. آنها با در نظر گرفتن سه هندسه متفاوت برای این شناور با سه طول مختلف، اثر افزایش یا کاهش طول شناور را بر نیروهای وارد به آن بررسی کردند.

در کار حاضر با حل عددی جریان تراکم ناپذیر آب اطراف شناور زیر آبی کنترل شونده (ROV) کاوش که در پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا (دانشگاه صنعتی اصفهان) در حال طراحی و ساخت است، ضرائب هیدرودینامیکی نیروهای وارد به آن محاسبه شده است. حرکات خاصی برای این ROV تعریف شد که بتواند حتی الامکان شرایط مختلفی را که شناور یا ROV در آنها قرار می‌گیرد، مدل نماید. در این مقاله نتایج بدست آمده برای حرکت‌های با سرعت ثابت افقی و عمودی، و حرکت‌های

عملیاتی اکتشافی و بهره برداری از میدانهای نفتی واقع در سواحل دریا باعث شده است تا در طول ۲۵ سال گذشته از شناورهای زیرآبی کنترل شونده<sup>۱</sup> (ROV)ها در کلیه فعالیتهای علمی و مهندسی اقیانوس استفاده شود [۱]. پیش بینی دقیق نیروهای وارد به بدنه ROV یکی از نیازهای اساسی صنایع سازنده این شناورهای زیرآبی کنترل شونده است. از نقطه نظر هیدرودینامیکی، بدنه ROV ها یک جسم جلو پهن است. بدنه ROV ها می‌توانند هر شکلی از قبیل کره، مکعب و نظایر این را دارا باشند. با توجه به شکل آنها، جریان سیال حول ROV در حرکت، به شدت در معرض جدایی است. از سوی دیگر ROV توسط یک کابل با مقطع دایره که از بالای سطح آب به آن متصل شده تغذیه و فرماندهی می‌شود که چنین کابلی خود نیز یک جسم جلو پهن دیگر محسوب می‌شود و نیروی مقاوم دیگری در برابر حرکت ROV ایجاد می‌کند. طراحی و ساخت ROV کاری سخت و پرهزینه است. در مراحل اولیه طراحی و قبل از ساخت یک شناور زیر آبی کنترل شونده لازم است نیروهای وارد به آن را در حرکات گوناگون بدست آورد تا تحلیل دینامیکی و کنترل شناور میسر شود. تخمین نیروها و ممانهای هیدرودینامیکی که در حین حرکت بر بدنه ROV عمل می‌کنند می‌تواند توسط روشهای ساده تجربی یا با اتکا به روش تحلیل میدان جریان و حل عددی معادلات مربوطه انجام گیرد. اگر طراحان تنها به آزمایش نمونه پیش ساخت<sup>۲</sup> بسنده کنند، فرآیند طراحی به درازا خواهد انجامید. خطر از دست دادن نمونه پیش ساخت بخاطر آزمایشهای زیاد و نیاز به تغییر در نمونه پیش ساخت، مستلزم صرف هزینه بسیار است. با بهره گیری از کدهای تجاری موجود و شبیه سازی میدان جریان می‌توان پیش از ساخت شناور تخمین مناسبی از پارامترهای هیدرودینامیکی آن بدست آورد. پس از ساخت وسیله میتوان پارامترهای مورد بحث را از طریق آزمایش اصلاح کرد.

در سال ۱۹۹۲ گوتیمر<sup>۳</sup> و همکارانش [۲] با نوشتن یک کد جریان لزج ضریب فشار وارد به هندسه بسیار ساده شده یک شناور زیر آبی را محاسبه کردند. آنها صحت نتایج

4- Nahon

5-Datcom

6-Sayer

7-Super Scorpio

8- Clauss

9 -MODUS

10 -Ayub

11- DARPA-2

1- Remotely Operated Veehcle (ROV)

2- Prototype

3- Gotimer

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

در رابطه فوق  $\sigma_k = 1$  عدد پرانتل انرژی جنبشی اغتشاش،  $C_\mu = 0.09$  ضریب ثابت،  $G_k$  جمله تولید انرژی جنبشی اغتشاشی در اثر گرادیان سرعت است. معادله نرخ اتلاف نیز بصورت زیر است:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

در این رابطه  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  عدد پرانتل نرخ اتلاف اغتشاش،  $C_{1\varepsilon} = 1.44$  و  $C_{2\varepsilon} = 1.92$  است.

جریانهای مغشوش به شدت تحت تاثیر وجود دیواره هستند. در این مقاله اثرات دیواره به کمک مدل تابع دیواره استاندارد در نظر گرفته شده است [۱۱].

برای حل مساله از نرم افزار *FLUENT 6.0.12* [۱۲] استفاده شده است. برای منفصل سازی جمله های جابجایی در معادله ناویر استوکس از روش *QUICK* و جمله های دیفیوژن به روش تفاضل مرکزی گسسته شده اند. برای شروع محاسبات ابتدا میدان فشار بر اساس حدسهای اولیه تعیین می شود، سپس معادلات مومنتوم  $u$ ،  $v$  و  $w$  هر یک به نوبت با استفاده از مقادیر فشار و جریانهای جرمی حل خواهند شد تا مقادیر سرعت تصحیح شوند. از آنجا که سرعت هایی که در این مرحله بدست آمده اند ممکن است به طور موضعی در معادلات پیوستگی صدق نکنند، یک معادله برای اصلاح فشار از معادلات پیوستگی و معادلات خطی شده مومنتوم بدست می آید. از روش *SIMPLE* برای حل دستگاه معادلات استفاده میشود تا بر روی مقادیر سرعت، فشار و جریانهای جرمی اصلاحات لازم به عمل آید و معادله پیوستگی ارضا شود. معادلات مربوط به مدل اغتشاش نیز پس از آن با استفاده از مقادیر تجدید یافته قبلی حل می شوند.

شتابدار افقی و عمودی ارائه می شود. در حرکت شتابدار نیروی وارد شده به ROV شامل دو بخش حقیقی و مجازی (ناشی از جرم مجازی) است که بایستی شیوه خاصی برای تفکیک ضرائب هیدرودینامیکی حقیقی و مجازی بکار رود. در کار حاضر برای این منظور از معادله موریسون<sup>۱</sup> [۷] استفاده شده است. نتایج مطالعه حاضر در شبیه سازی دینامیک ROV و نهایتاً در سیستم کنترل آن مورد استفاده قرار می گیرد.

## ۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان لزج تراکم ناپذیر معادلات پیوستگی و نویر-استوکس یا بقای مومنتوم هستند. معادله بقای جرم یا پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$

جریانهای لزج در رینولدزهای بالا اصولاً دچار اغتشاش می گردند. شاخصه جریانهای مغشوش، سرعت های نوسانی هستند که کمیت های انتقالی مانند مومنتوم، انرژی را دچار نوسان می کنند. از آنجایی که این نوسانات در اندازه کوچک و با فرکانس بالا اتفاق می افتد، همواره در محاسبات مهندسی برای تحلیل جریان مشکل ساز بوده اند. در کار حاضر عمدتاً از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شده است. این مدل از طریق دو معادله توربولانس  $\varepsilon$  و  $k$  (انرژی جنبشی توربولانس و  $\varepsilon$ : نرخ اتلاف در جریان)  $\mu_t$  را بصورت تابعی از آنها ارائه می کند.

بر این اساس معادله انتقالی انرژی جنبشی اغتشاشی بصورت زیر تعریف می گردد:

1- Morrison Eq.

### ۳-۲- نیروی وارد به شناور متحرک شتاب دار

در این حالت علاوه بر نیروهای حقیقی، نیروهای مجازی نیز به جسم وارد می شود که با استفاده از معادله موريسون نیروهای واقعی و نیروهای مجازی بصورت زیر از یکدیگر تفکیک می شوند:

$$F_x = \underbrace{1/2 \rho U_x |U_x| C_{xx} A_x}_{\text{Actual Force}} + \underbrace{\rho C'_{xx} \dot{U}_x \nabla}_{\text{Virtual Force}} \quad (7)$$

در این رابطه  $C'_{xx}$  ضریب نیروی هیدرودینامیکی مجازی در راستای  $x$  در اثر شتاب جریان در جهت  $x$  است.  $C_{xx}$  ضریب نیروی وارد به شناور در راستای  $x$  بخاطر حرکت شناور در جهت  $x$ ،  $A_x$  سطح تصویر شده هندسه در راستای  $x$ ،  $\nabla$  حجم جسم و  $\dot{U}_x$  شتاب آن در راستای  $x$  است.

در معادله موريسون که در واقع یک برازش از نیروهای واقعی وارد به جسم است،  $C_{xx}$  و  $C'_{xx}$  به گونه ای تعیین می شوند که نیروی ارائه شده توسط آن کمترین اختلاف را با نیروی واقعی وارد به جسم در حال حرکت شتابدار داشته باشد. فرض اساسی در معادله موريسون ثابت بودن ضرایب  $C_{xx}$  و  $C'_{xx}$  در کل حرکت شتابدار شناور یا سیال است. همین فرض معادله موريسون را به یک رابطه تقریبی برای نیرو تبدیل می کند.

ضرایب هیدرودینامیکی مجازی هم در غالب ماتریسی با ۹ درایه بصورت زیر بیان می شود:

$$C' = \begin{bmatrix} C'_{xx} & C'_{xy} & C'_{xz} \\ C'_{yx} & C'_{yy} & C'_{yz} \\ C'_{zx} & C'_{zy} & C'_{zz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

برای مثال مولفه  $C'_{xy}$  ضریب هیدرودینامیکی نیروی مجازی وارد شده در راستای  $y$ ، ناشی از حرکت جسم در راستای  $x$  است. و یا  $C'_{xx}$  ضریب هیدرودینامیکی نیروی مجازی در راستای  $x$  ناشی از شتاب در جهت  $x$  است.

### ۳- تحلیل نیروهای وارد بر شناور در سیال

نیروهای وارد بر شناور در سیال را می توان به دو دسته تقسیم نمود:

#### ۳-۱- نیروی وارد به شناور متحرک با سرعت ثابت

نیروی وارد به اجسامی که با شتاب صفر حرکت می کنند، یعنی هنگامیکه با سرعت ثابت حرکت می کنند را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود [۹]:

$$F_j = \frac{1}{2} \rho C_{ij} A_i U_i^2 \quad (5)$$

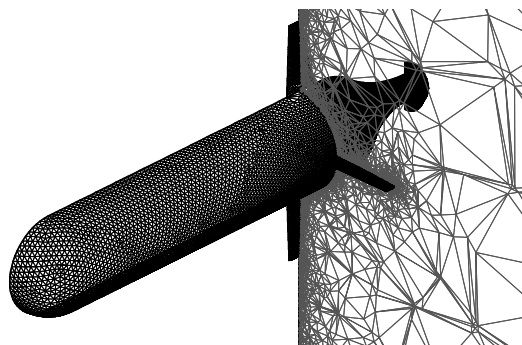
$i, j = 1, 2, 3$

که در این رابطه،  $\rho$  چگالی سیال،  $A_i$  سطح تصویر شده جسم در راستای  $i$ ،  $U_j$  سرعت جسم در راستای  $j$  و  $C_{ij}$  ماتریس ضرایب هیدرودینامیکی حقیقی می باشد که بصورت زیر تعریف می شود:

$$C = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که، برای مثال مولفه  $C_{xy}$  ضریب هیدرودینامیکی نیروی وارد شده در راستای  $y$ ، ناشی از حرکت جسم در راستای  $x$  است.

هنگامیکه شناور در هر سه راستا سرعت داشته باشد تمام ۹ مولفه این ماتریس قابل محاسبه است. اما برای حرکت شناور در هر یک از راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  تنها سه مولفه این ماتریس یعنی مولفه های روی یک سطر آن قابل محاسبه است. برای مثال در حرکت شناور در راستای  $y$  تنها مولفه های روی سطر دوم ماتریس یعنی  $C_{yx}$ ،  $C_{yy}$  و  $C_{yz}$  محاسبه می شوند. با توجه به اینکه هندسه شناور نسبت به صفحه  $xy$  متقارن است (شکل ۱)، در حرکت شناور در هر یک از راستاهای  $x$  و  $y$  مولفه های ضریب هیدرودینامیکی نیروی وارد به شناور در راستای  $z$  که به ترتیب  $C_{yz}$  و  $C_{zx}$  هستند، صفر خواهد بود.



شکل ۱: شبکه تولید شده روی سطح شناور سی اسکات و مقطع عرضی میدان حل.

در تحلیل دینامیکی شناورهای زیرآبی تنها مولفه‌های روی قطر اصلی این ماتریس یعنی  $C'_{xx}$ ،  $C'_{yy}$  و  $C'_{zz}$  مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. در کار حاضر با توجه به تقارن شناور، تنها ضرائب هیدرودینامیکی نیروی مجازی وارد به شناور در راستاهای  $x$  و  $y$  که به ترتیب  $C'_{xx}$  و  $C'_{yy}$  هستند، مورد توجه قرار می‌گیرند.

جدول ۱: مقایسه نیروی عددی وارد به شناور سی اسکات با نتایج آزمایش در سرعت  $2.5 (m/s)$ .

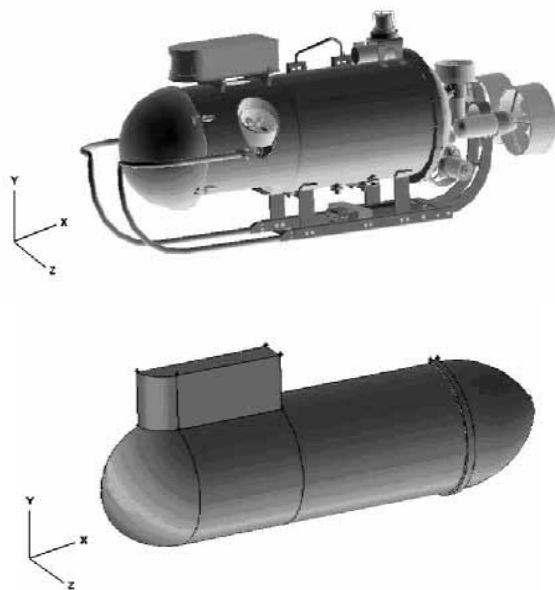
| مدل اغتشاشی                 | Exp. (N) | Num. (N) | درصد<br>خطا |
|-----------------------------|----------|----------|-------------|
| $k - \varepsilon$ استاندارد | ۸۲/۱     | ۸۹/۱۱    | ۸/۵۴        |
| $RNG k - \varepsilon$       | ۸۲/۱     | ۸۹/۱۳    | ۸/۵۶        |
| $k - \omega$                | ۸۲/۱     | ۸۹/۱۶    | ۸/۶         |

برای تحلیل عددی جریان اطراف شناور زیر آبی سی اسکات سه مدل اغتشاشی مختلف در نظر گرفته شد و نیروی وارد به شناور در سرعت  $2.5 (m/s)$  با استفاده از هر یک از مدل‌های  $k - \varepsilon$  استاندارد،  $RNG k - \varepsilon$  و  $k - \omega$  جداگانه محاسبه شده است. در حل عددی هر سه مدل اغتشاشی برای توصیف رفتار دیوار از تابع دیوار استاندارد استفاده شده است. جریان بصورت دائم در اطراف شناور و با در نظر گرفتن معیار همگرایی  $10^{-5}$  تحلیل شده است.

در جدول ۱ نیروی حاصل از آزمایش شناور و نیروی عددی محاسبه شده در کار حاضر گزارش شده است. نیروی بدست آمده از سه مدل اغتشاشی مورد استفاده بسیار به هم نزدیک است. جوابهای بدست آمده تقریباً ۹٪ با نیروی واقعی وارد به شناور سی اسکات اختلاف دارند. عدم اطلاع دقیق از برخی کمیت‌های فیزیکی مساله نظیر زبری سطح وغیره می‌تواند از عوامل این اختلاف باشد.

#### ۴- اعتبار سنجی

با توجه به اینکه نتایج تجربی نیروهای هیدرودینامیکی وارد به شناور زیر آبی کاوش در دست نیست، در کار حاضر برای بررسی صحت نتایج عددی بدست آمده، در ابتدا مساله مشابهی را بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. اوانس و ناهن [۱۳] برای شناور زیر آبی سی اسکات با آزمایش مدل واقعی از شناور در تانک آب نیروی وارد به شناور را برای سرعت‌های افقی تا  $2.5 (m/s)$  محاسبه کرده‌اند. آنها نتایج خود را با نتایج حاصل از آزمایش مدل واقعی از شناور در تانک آب ارائه نموده‌اند. در کار حاضر جریان اطراف شناور زیر آبی سی اسکات بصورت عددی تحلیل شده است. در این تحلیل هندسه کامل شناور بدون هیچگونه ساده سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طول این شناور  $2.7(m)$  و قطر آن بدون در نظر گرفتن باله‌ها  $0.29(m)$  است. چهار باله مشابه در انتهای شناور با زاویه  $90^\circ$  درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند. هندسه هر باله با استفاده از پروفیل ایرفویل متقارن  $NACA0012$  تولید شده است. در انتهای شناور سی اسکات هم تراستر قرار دارد. شبکه تولید شده برای این مساله شبکه ای بی سازمان شامل  $400/000$  سلول چهار وجهی است. در شکل ۱ شبکه تولید شده روی شناور و یک مقطع عرضی میدان حل نشان داده شده است.

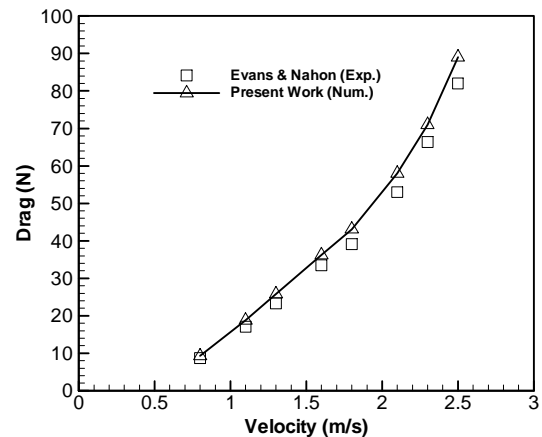


شکل ۳: هندسه اصلی و ساده شده شناور.

جدول ۲: مشخصات هندسی شناور.

|                |       |
|----------------|-------|
| $A_x (m^2)$    | ۰/۳۴۲ |
| $A_y (m^2)$    | ۰/۸۷۲ |
| $\nabla (m^3)$ | ۰/۲۰۶ |
| طول (mm)       | ۱۹۳۹  |
| ارتفاع (mm)    | ۷۴۸   |
| عرض (mm)       | ۶۰۶   |

شکل ۳- (بالا) هندسه اصلی شناور زیر آبی کاوش را نشان می‌دهد. از آنجا که هندسه اصلی شناور بسیار پیچیده و شامل متعلقات بسیاری از جمله چراغ، اسکید، سونار، بازو و کابل است، بمنظور ساده سازی با حذف تعدادی از این متعلقات و اعمال تقارن، هندسه بصورتیکه در شکل ۳ (پایین) مشاهده می‌شود، درآمد. جدول ۲ ابعاد هندسی شناور را نشان می‌دهد.  $A_x$  و  $A_y$  در این جدول به ترتیب سطح تصویر شده شناور در راستای  $x$  و  $y$  و  $\nabla$  حجم شناور هستند.



شکل ۲: مقایسه نیروهای محاسبه شده با نیروهای بدست آمده از آزمایش مدل واقعی شناور.

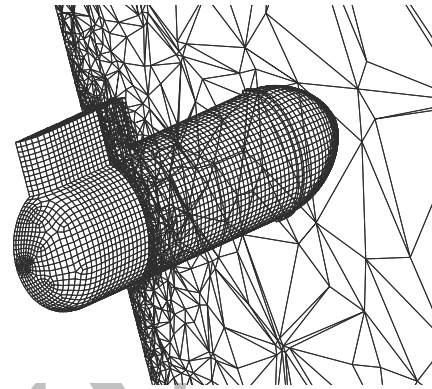
در شکل ۲ نیروهای بدست آمده در کار حاضر با نیروهای بدست آمده از آزمایش مدل واقعی شناور در سرعت‌های مختلف توسط اوانس و ناهن مقایسه شده است. نیروهای محاسبه از مقادیر حاصل از آزمایش شناور بزرگتر هستند و بیشترین اختلاف حدود ۱۰٪ است. با توجه به نتایج به نظر میرسد استفاده از نرم افزار فلونت در محاسبه نیروهای وارد به شناور زیر آبی کاوش مناسب است.

## ۵- نتایج

در این بخش نیروهای هیدرودینامیکی وارد به شناور کاوش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحلیل عددی بجای شناور متحرک در سیال ساکن، جریان سیال حول شناور ساکن مورد بررسی قرار گرفته است. دانسیته و ضریب لزجت دینامیکی آب به ترتیب  $1000 (kg/m^3)$  و  $0.001003 (kg/m.s)$  در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز در سرعت  $1.0 (m/s)$  بر اساس طول شناور  $1.93 \times 10^6$  و بر اساس قطر شناور  $0.47 \times 10^6$  است. بنابراین رژیم جریان سیال اطراف شناور زیر آبی کاوش کاملاً مغشوش است.

اندازه‌های ناکافی است و مقدار ضریب نیروی وارد به شناور را به علت تعداد کم سلول روی بدنه شناور بسیار کمتر از انتظار پیش بینی می‌کند. از طرفی در شبکه ریز هم مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا حل همگرا شود در حالیکه ضرایب نیروی بدست آمده از این شبکه اختلاف ناچیزی با ضرایب بدست آمده از شبکه متوسط دارد. بنابراین شبکه متوسط که هم از لحاظ تعداد سلول قابل قبول به نظر

یک مدل هندسی ساده شده (که ابعاد و مشخصات آن در جدول ۲ و هندسه ساده شده در شکل ۳ نشان داده شده است) از شناور زیر آبی کاوش ساخته شده است (شکل ۴).

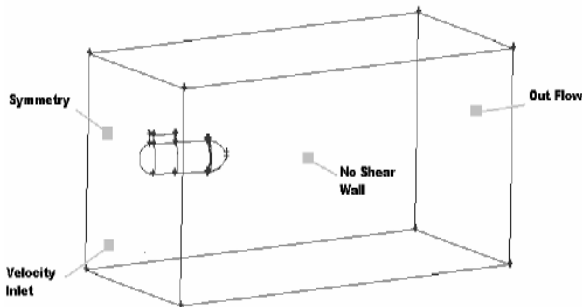


شکل ۴: شبکه ایجاد شده روی شناور و اطراف آن در مقطع عرضی میدان حل.

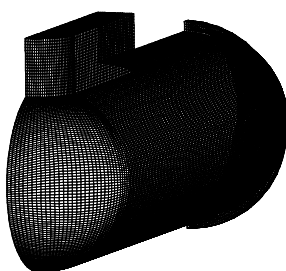
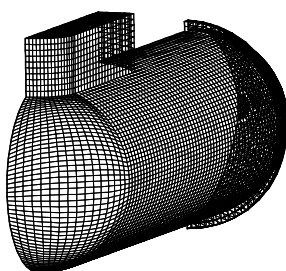
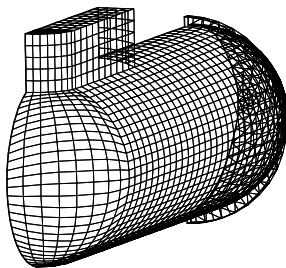
در این مدل هندسی تقارن موجود در مساله نیز در نظر گرفته شده و تنها نیمی از شناور و محیط اطراف آن مدل شده است. برای تولید شبکه از نرم افزار *GAMBIT 2.0.0* [۸] استفاده شده و در تولید شبکه سعی شده است تا المانها در نواحی اطراف بدنه شناور که گرادیانهای سرعت بزرگ هستند تا حد لازم ریز در نظر گرفته شوند. از آنجایی که با دور شدن از بدنه شناور گرادیان متغیرها کوچک می‌شود با دور شدن از بدنه، المانها تدریجا درشت می‌شوند.

در شکل ۵ شرایط مرزی استفاده شده برای میدان حل نشان داده شده است. در ورودی مقدر سرعت مشخص هستند. وگرادیان تمام متغیرها در راستای عمود بر سطح خروجی صفر است. روی سطح جسم شرط عدم لغزش و در صفحه تقارن مولفه عمودی سرعت و گرادیانهای عمودی تمام متغیرهای جریان صفر در نظر گرفته می‌شود

سه نوع شبکه ریز، متوسط و درشت برای بررسی استقلال نتایج تحلیل جریان از شبکه تولید شد. شکل ۶ شبکه تولید شده روی سطح شناور در هر یک از مورد فوق‌الذکر نشان داده شده است. ضرایب نیروی وارد به شناور در راستاهای  $x$  و  $y$  در حرکت شناور با سرعت  $1.0 (m/s)$  در راستای  $x$ ، که از تحلیل جریان در هر یک از این سه شبکه بدست آمده، در جدول ۳ با هم مقایسه شده است. شبکه درشت برای مساله‌ای با چنین ابعاد و



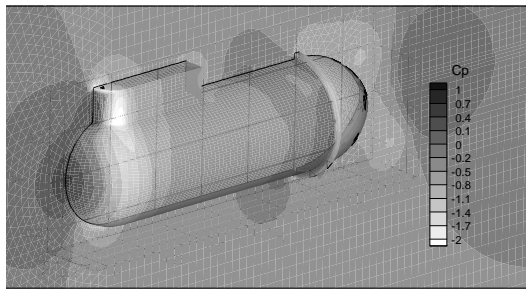
شکل ۵: میدان حل همراه با شرایط مرزی



شکل ۶: شبکه روی سطح شناور در سه شبکه درشت، متوسط و ریز.

می رسد و هم زمان نسبتاً منطقی را برای همگرا شدن نیاز دارد، انتخاب شد

جدول ۳: مقایسه ضرایب  $C_{xx}$  و  $C_{xy}$  بدست آمده از شبکه های مختلف در سرعت  $1.0(m/s)$ .



شکل ۷: کانتور ضریب فشار روی بدنه شناور و در صفحه تقارن را برای حرکت در راستای  $x$  با سرعت  $1.0(m/s)$ .

جدول ۵: ضرائب هیدرودینامیکی نیروهای وارد به شناور در حرکت در راستای  $x$ .

| $U_x (m/s)$ | $C_{xx}$ | $C_{xy}$ |
|-------------|----------|----------|
| ۰/۵         | ۰/۳۵۰۶   | ۰/۰۳۳۷   |
| ۱/۰         | ۰/۳۴۷۸   | ۰/۰۳۴۴   |
| ۱/۵         | ۰/۳۴۷۰   | ۰/۰۳۴۸   |
| ۲/۰         | ۰/۳۴۶۳   | ۰/۰۳۵۰   |
| ۲/۵         | ۰/۳۴۵۹   | ۰/۰۳۵۲   |
| ۳           | ۰/۳۴۵۶   | ۰/۰۳۵۳   |

پس از حل عددی میدان جریان، ضرایب هیدرو دینامیکی نیروهای وارد به شناور محاسبه و در جدول ۵ گزارش شده است. ضرائب هیدرودینامیکی محاسبه شده با روابط زیر بدون بعد شده‌اند.

$$C_{xx} = F_x / \left( \frac{1}{2} \rho U_x^2 A_x \right) \quad (۹)$$

$$C_{xy} = F_y / \left( \frac{1}{2} \rho U_x^2 A_x \right) \quad (۱۰)$$

جدول ۳: مقایسه ضرایب  $C_{xx}$  و  $C_{xy}$  بدست آمده از شبکه های مختلف در سرعت  $1.0(m/s)$ .

| $C_{xx}$ | $C_{xy}$ | تعداد سلول |          |
|----------|----------|------------|----------|
|          |          | نوع شبکه   | (میلیون) |
| ۰/۲۹۴    | ۰/۰۲۸۹   | درشت       | ۰/۴۲     |
| ۰/۳۴۷۸   | ۰/۰۳۴۴   | متوسط      | ۰/۵۸     |
| ۰/۳۵۰۵   | ۰/۰۳۴۸   | ریز        | ۱        |

جدول ۴: مقایسه ضرائب  $C_{xx}$  و  $C_{xy}$  بدست آمده از مدل های اغتشاشی مختلف در سرعت  $1.0(m/s)$ .

| مدل اغتشاشی              | $C_{xx}$ | $C_{xy}$ |
|--------------------------|----------|----------|
| $k - \epsilon$ استاندارد | ۰/۳۴۷۸   | ۰/۰۳۴۴   |
| $k - \epsilon$ (RNG)     | ۰/۳۵۰۶   | ۰/۰۳۴۵   |
| $k - \omega$             | ۰/۳۵۱۰   | ۰/۰۳۴۵   |

در جدول ۴ نتایج بدست آمده از سه مدل اغتشاشی  $k - \epsilon$  استاندارد،  $k - \epsilon$  RNG و  $k - \omega$  با هم مقایسه شده است. با توجه به اختلاف ناچیز ضرائب، از مدل اغتشاشی  $k - \epsilon$  استاندارد در ادامه استفاده شده است. نتایج عددی حل عددی جریان حول شناور در دو بخش بیان می شود.

۵-۱- جریان با سرعت ثابت (حرکت شناور با سرعت ثابت)

شناور زیرآبی کاوش قابلیت حرکت تا سرعت حدوداً  $3 (m/s)$  را در راستای  $x$  دارد. بنابراین در این بخش جریان سیال حول شناور در سرعت های  $0.5$ ،  $1.0$ ،  $1.5$ ،  $2.0$ ،  $2.5$  و  $3.0$  متر بر ثانیه بررسی شده است. شکل ۷ کانتور ضریب بدون بعد فشار روی بدنه



شکل ۹ تغییرات نیروها و ضرائب هیدرودینامیکی فشاری، اصطکاکی و مجموع فشاری و اصطکاکی وارد به شناور در راستای  $x$  را بر حسب سرعت شناور نشان می‌دهد. از مقایسه نیروهای فشاری و اصطکاکی در سرعت‌های مساوی مشخص می‌شود که مکانیزم غالب ایجاد کننده نیروی درگ، درگ فشاری است. اما در سرعت‌های کم اهمیت درگ اصطکاکی نسبت به سرعت‌های بالا بیشتر است. عامل موثر در درگ فشاری جدایی جریان بر روی سطح جسم است.

افزایش سرعت باعث بزرگتر شدن ناحیه جدایش و بدنبال آن افزایش نیروی درگ فشاری می‌گردد. از مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی فشاری و اصطکاکی در حرکت در راستای  $x$  نتیجه می‌شود ضریب هیدرودینامیکی نیروهای فشاری با افزایش سرعت رشد کمی دارد و می‌توان آنرا تقریباً ثابت در نظر گرفت در حالیکه ضریب هیدرودینامیکی نیروهای اصطکاکی با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به منشاء تولید نیروی اصطکاکی رشد این نیرو کمتر از رشد فشار دینامیکی ( $\frac{1}{2}\rho U_x^2$ ) است که با آن بدون بعد شده است، بنابراین این ضریب نیروی اصطکاکی با افزایش سرعت کاهش می‌شود.

برای بدست آوردن نیروهای وارد به شناور زیرآبی کاوش هنگامیکه این وسیله به سمت بالا و پایین حرکت می‌کند، ابتدا جریان با سرعت‌های ثابت 0.5، 1.0 و 1.5 ( $m/s$ ) در جهت مثبت  $y$  (حرکت وسیله به سمت پایین) و سپس همین مقادیر سرعت در جهت منفی  $y$  (حرکت وسیله به سمت بالا) بررسی شده است.

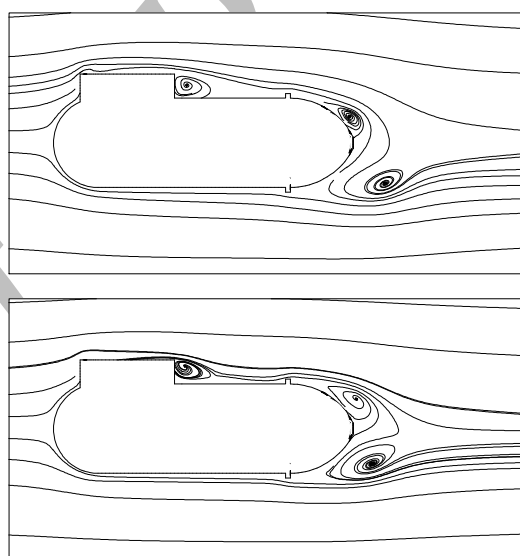
ضرائب هیدرودینامیکی نیروهای وارد به شناور در حرکت وسیله با سرعت ثابت در جهت  $y$  در جدول ۶ آورده شده است. ضرائب هیدرودینامیکی محاسبه شده بر اساس سطح مقطع  $A_y$  بدون بعد شده‌اند

$$C_{yy} = F_y / \left( \frac{1}{2} \rho U_y^2 A_y \right) \quad (11)$$

$$C_{yx} = F_x / \left( \frac{1}{2} \rho U_y^2 A_y \right) \quad (12)$$

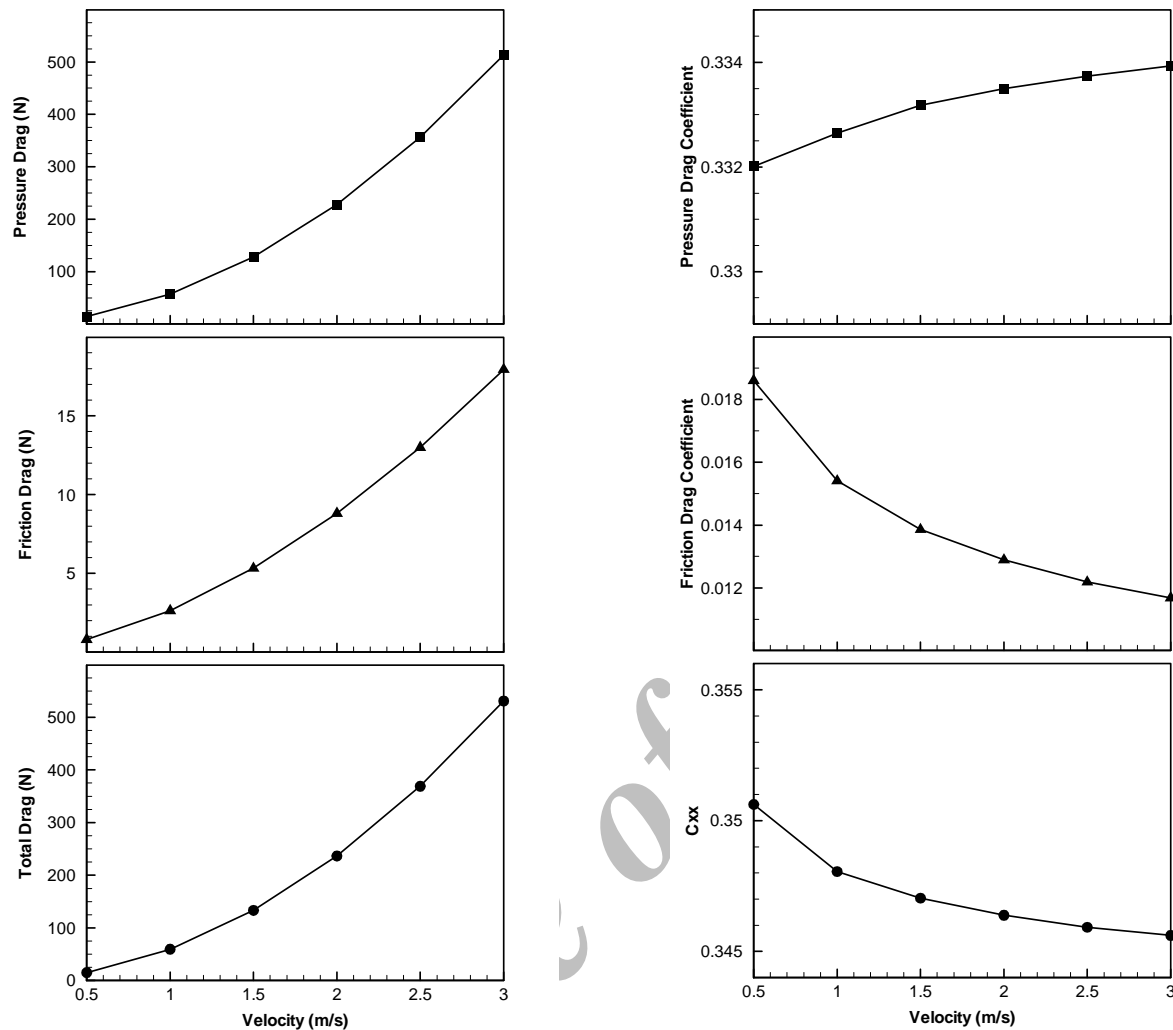
با توجه به مقادیر ضریب نیروی وارد به شناور در راستای  $y$  بخاطر حرکت شناور در راستای  $y$  ( $C_{yy}$ ) در جدول فوق، مشخص می‌شود در محدوده سرعت 0.5 تا 1.5 ( $m/s$ )

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود در محدوده وسیعی از سرعت یعنی در محدوده سرعت 0.5 تا 3 ( $m/s$ )، ضریب نیروی وارد به شناور در راستای  $x$  بخاطر حرکت شناور در راستای  $x$  ( $C_{xx}$ ) تنها حدود ۱٪ تغییر می‌کند و ضریب نیروی وارد به شناور در راستای  $y$  بخاطر حرکت شناور در راستای  $x$  ( $C_{xy}$ ) حدود ۵٪ تغییر دارد. بنابراین می‌توان در تحلیل دینامیکی شناور در حرکت در راستای  $x$  ضرائب نیروی وارد به آن را با دقت خوبی ثابت در نظر گرفت.



شکل ۸: خطوط جریان اطراف شناور برای برای سرعت‌های 1.0 ( $m/s$ ) (شکل بالا) و 2.0 ( $m/s$ ) (شکل پایین) در راستای  $x$ .

در شکل ۸ خطوط جریان اطراف شناور در صفحه تقارن برای دو سرعت 1.0 ( $m/s$ ) و 2.0 ( $m/s$ ) در حرکت در راستای  $x$  نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود به علت وجود سونار روی شناور گردابه‌ای در بالای شناور و پشت سونار تشکیل شده است. تولید گردابه در بالای شناور و در نتیجه کاهش فشار در این ناحیه باعث می‌شود تا اختلاف فشار بالا و پایین شناور نیرویی در جهت  $y$  و به سمت بالا به آن وارد کند. با افزایش سرعت شناور مقدار این نیرو افزایش می‌یابد و در نتیجه شاهد افزایش ضریب این نیرو با افزایش سرعت هستیم (جدول ۵).



شکل ۹: مقادیر نیروها و ضرائب هیدرودینامیکی اصطکاکی، فشاری و کل وارد به شناور در راستای X.

وجود شناور در آن ناحیه مقدار  $C_{yx}$  برای این حالت (سرعت‌های مثبت) بیشتر از وقتی است که شناور به سمت بالا حرکت کند (سرعت‌های منفی). در حرکت شناور به سمت پایین مقدار نیرو در راستای x حدود ۸٪ نیروی عمودی (در راستای y) است.

شکل ۱۰ مقادیر نیروها و ضرائب هیدرودینامیکی اصطکاکی، فشاری و مجموع اصطکاکی و فشاری وارد به شناور در راستای y را نشان می‌دهد. هر دو نمودار افزایش نیروهای وارد به شناور در جهت y بخاطر حرکت وسیله در راستای y را با افزایش سرعت نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در حالیکه ضریب نیروی فشاری مقدار تقریباً ثابتی دارد ضریب نیروی اصطکاک با افزایش سرعت شناور کاهش می‌یابد. مشابه همین روند را

مقدار این ضریب در حرکت شناور به سمت پایین حدود ۲٪ و در حرکت به سمت بالا حدود ۳٪ تغییر می‌کند. بنابراین مقدار  $C_{yy}$  تغییرات ناچیزی دارد. در حرکت شناور در راستای y یعنی حرکت شناور به سمت بالا و پایین وجود شناور باعث می‌شود هنگامیکه شناور به سمت بالا حرکت می‌کند نیروی بیشتری در راستای y نسبت به وقتیکه به سمت پایین حرکت می‌کند به آن وارد شود. در جدول ۶ ضریب نیروی وارد به شناور در راستای x بخاطر حرکت آن در راستای y است. عدم تقارن و وجود شناور باعث بوجود آمدن این نیروست. در حرکت رو به پایین شناور (ویا وقتی که سرعت سیال به سمت بالا و یا مثبت است) گردابه‌ای در بالای آن تشکیل می‌شود. به علت

**حالت (۱): حرکت شتابدار در راستای x**

وضعیتی که جریان از حال سکون با شتاب ثابت  $0.5 (m/s^2)$  در راستای x شروع به حرکت کرده و با رسیدن به سرعت  $1 (m/s)$  شتاب صفر می گردد مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه (۱۳) تابع سرعت و شکل ۱۲ توزیع سرعت و نیروی وارده به شناور را در این حالت نشان می دهند.

$$\begin{cases} 0 < t < 2 & U_x = 0.5t \quad (m/s) \\ t > 2 & U_x = 1 \quad (m/s) \end{cases} \quad (13)$$

در این حالت بعد از زمان  $t = 2(sec)$  شتاب جریان صفر است لذا نیروی بدست آمده از حل عددی بخش مجازی ندارد و از رابطه (۵) می توان  $C_{xx}$  را محاسبه نمود که برابر  $0.348$  است. با قرار دادن مقدار  $C_{xx}$  در معادله موریسون برای زمانهای  $0 < t < 2$  با توجه به معلوم بودن مقدار نیرو در هر لحظه  $C'_{xx}$  محاسبه می شود. مقدار  $C'_{xx}$  برای حرکت شناور با شتاب ثابت  $0.5 (m/s^2)$ ،  $1/554$  محاسبه شده است. با قرار دادن این مقدار در معادله موریسون، رابطه ای بصورت  $F = 59.47U^2 + 310.8U$  حاصل می شود. این رابطه یک برازش از نیروی بدست آمده بصورت عددی است بنابراین با اطلاع از سرعت شناور در هر لحظه می توان نیروی وارد به آن را از این رابطه بطور تقریبی محاسبه نمود. در شکل ۱۱ نیروی برازش شده توسط معادله موریسون با نیروی واقعی مقایسه شده است که نشان می دهد معادله موریسون توانسته است بجز در لحظات اولیه حرکت، نسبتاً نیرو را بخوبی پیش بینی کند. لازم به توضیح است برای جریانهای شتابدار با سرعت اولیه صفر در سرعتهای کم که هنوز جریان آرام است، استفاده از مدل جریان مغشوش در تمام لحظات قاعداً خطایی در بر خواهد داشت. این مساله می تواند یکی از عوامل اختلاف زیاد نیروی عددی محاسبه شده با مقدار برازش شده آن توسط معادله موریسون در ابتدای حرکت باشد. علت دیگر اختلاف نیروی محاسبه شده توسط معادله موریسون و نیروی حاصل از حل عددی، فرض ثابت بودن ضرایب  $C_{xx}$  و  $C'_{xx}$  در کل حرکت جسم یا سیال است.

برای حرکت شناور در راستای x اتفاق افتاد که نشان می دهد رشد نیروهای اصطکاکی کمتر از رشد فشار دینامیکی  $(\frac{1}{2}\rho U_y^2)$  است. بنابراین با افزایش سرعت شناور ضریب نیروی اصطکاکی کاهش می یابد.

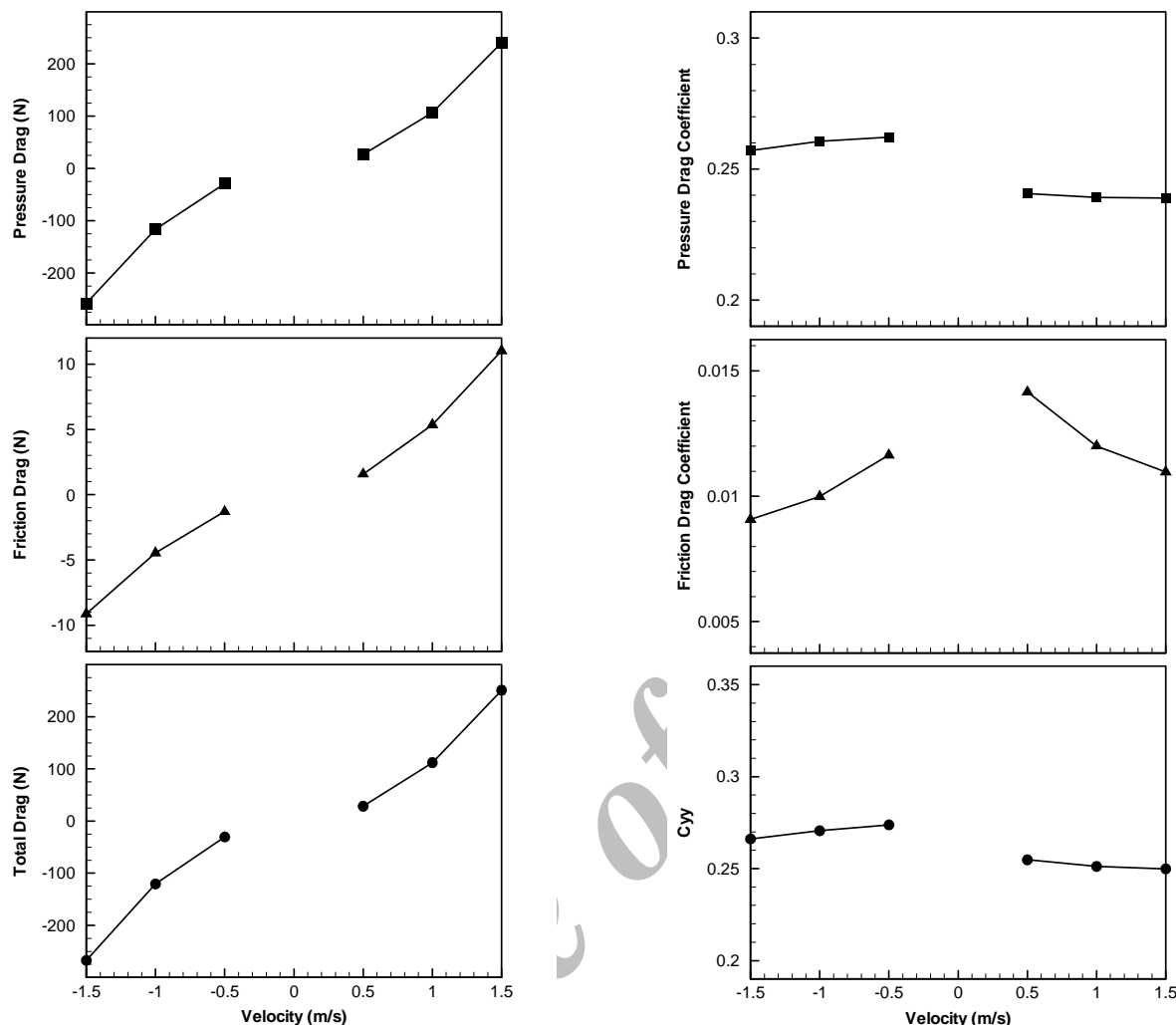
**۵-۲- جریان شتابدار (حرکت شتابدار شناور)**

در این بخش برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی نیروهای مجازی وارد به شناور در راستای x و y سه نوع حرکت شتابدار در راستای x و دو نوع حرکت شتابدار در راستای y تعریف شده است. برای هر نوع حرکت نیروهای وارد به شناور در راستای x و y بر حسب زمان به کمک حل عددی معادلات حاکم بر میدان جریان محاسبه می شود. برای شبیه سازی حرکتهای شتابدار شناور، توابع سرعت بر حسب زمان بجای شرط ورودی سرعت قرار می گیرند.

در تحلیل جریان شتابدار گام زمانی  $0.05 (s)$  و  $0.1 (s)$  است و برای ارضا معیار همگرایی  $10^{-5}$  مانده ها در هر گام زمانی  $100$  تکرار در نظر گرفته شده است. در پایان هر اجرای غیر دائم نیروی وارد به شناور بر حسب زمان بدست می آید. این نیرو شامل دو جمله حقیقی و مجازی (ناشی از شتاب) است که توسط معادله موریسون (۷) قابل تفکیک هستند. ضرایب هیدرودینامیکی نیروی های حقیقی و مجازی وارد به شناور در راستای x ( $C_{xx}$  و  $C'_{xx}$ ) و در راستای y ( $C_{yy}$  و  $C'_{yy}$ ) برای حرکتهای تعریف شده در هر راستا محاسبه و با هم مقایسه می شوند.

**جدول ۶:** ضرایب هیدرودینامیکی نیروهای وارد به شناور در حرکت در راستای y.

| $U_y (m/s)$ | $C_{yy}$ | $C_{yx}$ |
|-------------|----------|----------|
| -۱/۵        | ۰/۲۶۶۱   | ۰/۰۰۸۹   |
| -۱/۰        | ۰/۲۷۰۵   | ۰/۰۰۷۱   |
| -۰/۵        | ۰/۲۷۳۷   | ۰/۰۰۶۰   |
| ۰/۵         | ۰/۲۵۴۸   | ۰/۰۲۰۰۰  |
| ۱/۰         | ۰/۲۵۱۱   | ۰/۰۲۰۰۷  |
| ۱/۵         | ۰/۲۴۹۸   | ۰/۰۲۰۱۱  |



شکل ۱۰: مقادیر نیروها و ضرائب هیدرودینامیکی اصطکاکی، فشاری و کل وارد به شناور در راستای Y در اثر حرکت در راستای Y.

محاسبه نمود که برابر ۰/۳۴۸ است. با جایگذاری مقدار  $C_{xx}$  در معادله موریسون برای زمانهای  $0 < t < 2$ ، مقدار ۱/۵۵۷ برای  $C'_{xx}$  بدست می آید. مشابه حالت اول با قرار دادن مقدار  $C'_{xx}$  در معادله موریسون، رابطه ای بصورت  $F = 59.47U^2 + 311.4\dot{U}$  که نشان دهنده نیروی تابع زمان وارد به شناور در هر لحظه است، حاصل می شود. شکل ۱۲ نشان می دهد نیروی برآزش شده توسط معادله موریسون بجز در لحظات اولیه حرکت، اختلاف ناچیزی با نیروی محاسبه شده حاصل از حل عددی دارد.

حالت (۲): حرکت با شتاب اولیه سینوسی در راستای x

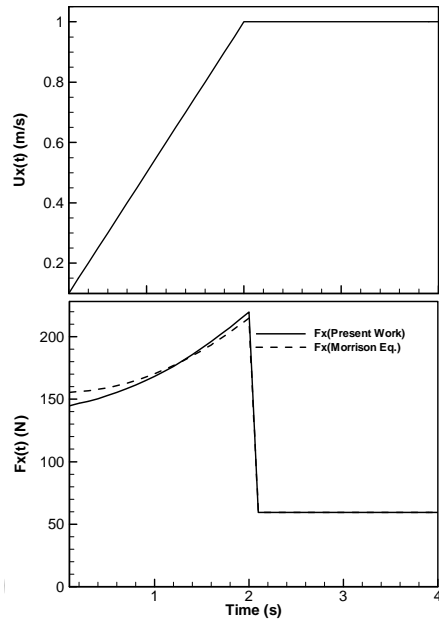
در این حالت شتاب گرفتن جریان در راستای x از حالت سکون با پیروی از تابع سرعت سینوسی تا رسیدن به سرعت  $1 (m/s)$  و ادامه حرکت با سرعت ثابت  $1 (m/s)$  مدل شده است. رابطه (۱۴) تابع سرعت شناور را نشان می دهد.

$$\begin{cases} 0 < t < 2 & U_x = \sin(\pi t/4) \quad (m/s) \\ t > 2 & U_x = 1 \quad (m/s) \end{cases} \quad (14)$$

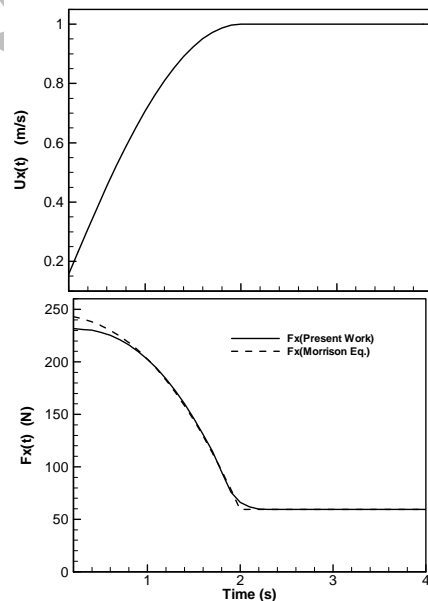
در این حالت هم مشابه حالت اول بعد از زمان  $t = 2(sec)$  شتاب جریان صفر است و از رابطه (۵) می توان  $C_{xx}$  را

دوره این تابع سرعت نوسانی ۲ ثانیه است. برای استخراج ضرایب  $C_{xx}$  و  $C'_{xx}$  این نوع حرکت نیاز به نیروی تابع زمان تنها برای یک دوره از نوسان است. اما به علت اینکه در ابتدای حرکت جریان هنوز به حالت نهایی خود نرسیده است، نیروی تابع زمان وارد به شناور تا ۱۰ ثانیه (مدت زمان ۵ دوره) از ابتدای حرکت محاسبه شده و از دوره آخر برای محاسبه  $C_{xx}$  و  $C'_{xx}$  استفاده شده است. تحلیل عددی جریان با سرعت نوسانی سینوسی در راستای  $x$  از شبکه ای با ۵۸۰ هزار سلول استفاده شده که با یک کامپیوتر  $2.4\text{ GHz}$  حدود ۱۰۸ ساعت زمان نیاز دارد. یکی از روشهای بدست آوردن ضرائب این است که با توجه به معادله موریسون نیروی وارده به شناور در لحظاتی که شتاب صفر است بطور خالص نیروی حقیقی فرض شود. براین اساس ضریب نیروی  $C_{xx}$  از رابطه (۷) برابر  $0.372$  محاسبه می‌شود. با فرض ثابت بودن  $C_{xx}$  در تمام لحظات می‌توان با استفاده از معادله موریسون بخش مجازی نیرو را در هر لحظه (برای مثال لحظاتی که شتاب ماکزیمم است) استخراج و ضریب نیروی مجازی ( $C'_{xx}$ ) وارد به شناور در راستای  $x$  را محاسبه نمود. مقدار  $C'_{xx}$  محاسبه شده برای این پروفیل سرعت،  $1/474$  بدست می‌آید. در صورتیکه از روش کمترین مربعات که روشی ارجح برای برازش و پیدا کردن ضرائب در معادله موریسون استفاده شود، ضرائب نیروی حقیقی و مجازی به ترتیب  $0.331$  و  $1/472$  بدست می‌آیند. پس از محاسبه ضرائب، معادله موریسون رابطه ای بصورت  $F = 56.62U^2 + 303.7U$  با اختلاف بسیار کم از نیروی واقعی، ارائه می‌کند. در شکل ۱۳ نیروی برازش شده از معادله موریسون با نیروی حاصل از حل عددی مقایسه شده است.

در جدول ۷ ضرائب هیدرودینامیکی حقیقی و مجازی برای حرکت در راستای  $x$  در سه حالت فوق الذکر آورده شده است. ضرائب هیدرودینامیکی نیروهای مجازی وارد به شناور در راستای  $x$  در حالت‌های (۱) و (۲) اختلاف ناچیزی با هم دارند و تنها اختلاف کمی در ضرائب حالت (۳) نسبت به دو حالت قبل وجود دارد. در حالت‌های اول و دوم مقدار محاسبه شده  $C_{xx}$  ناحیه شتاب صفر نمودار نیروی حاصل از حل عددی محاسبه شده است. با توجه به اختلاف کم در ضرائب هیدرودینامیکی محاسبه شده در حرکت‌های گوناگون



شکل ۱۱: تابع سرعت و نیروی حالت اول.



شکل ۱۲: تابع سرعت و نیروی حالت دوم

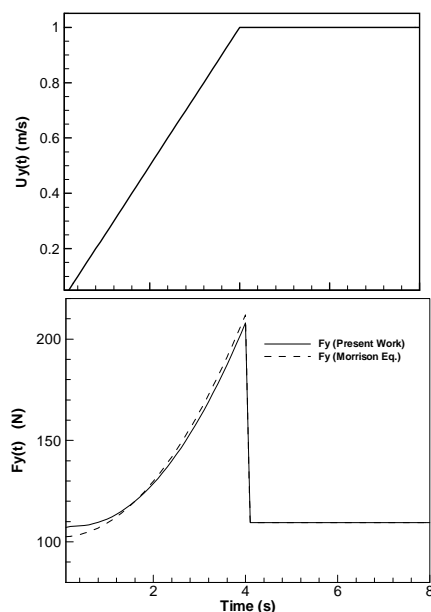
### حالت (۳): سرعت سینوسی در راستای $x$

در این حالت حرکت در راستای  $x$  با پیروی از پروفیل سرعت سینوسی مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه (۱۵) تابع سرعت جریان را بیان می‌کند.

$$U_x = 1 + 0.2 \times \sin(\pi t) \quad (m/s) \quad (15)$$

در این حالت نیز مشابه حالت اول بعد از زمان  $t = 4$  شتاب جریان صفر است لذا نیروی بدست آمده از حل عددی بخش مجازی ندارد و مقدار  $C_{yy}$  از رابطه (۵)  $0.2512$  محاسبه می شود. با قرار دادن مقدار  $C_{yy}$  در معادله موریسون برای زمانهای  $0 < t < 4$  در هر لحظه  $C'_{yy}$  محاسبه می شود. مقدار  $C'_{yy}$  محاسبه شده در این حالت  $2/0.50$  است. با جایگذاری  $C'_{yy}$  در معادله موریسون، رابطه ای بصورت  $F = 109.48U^2 + 400U$  برای محاسبه نیروی وارد به شناور در حرکت عمودی با شتاب ثابت  $0.25 (m/s^2)$  بدست می آید.

در شکل ۱۴ نیروی برآزش شده از معادله موریسون با نیروی حاصل از حل عددی مقایسه شده است که بجز لحظات اولیه حرکت معادله موریسون نیروی وارد به شناور را بخوبی پیش بینی می کند.

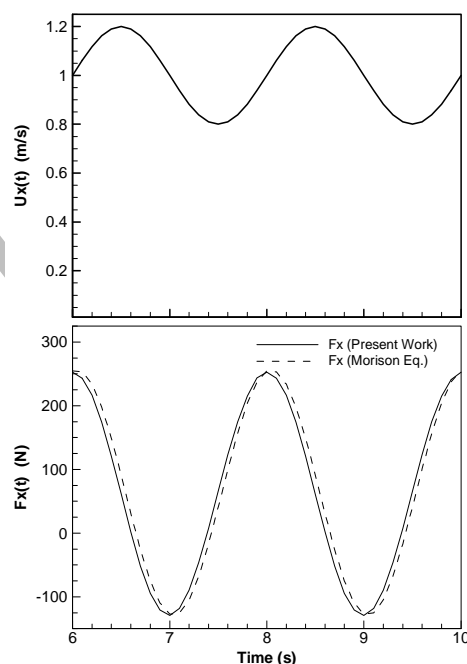


شکل ۱۴: تابع سرعت و نیروی حالت چهارم.

مشخص می شود اولاً معادله موریسون در پیش بینی نیروی وارد به شناور موفق بوده و ثانیاً نوع حرکت شناور تاثیر شدیدی در ضریب نیروی مجازی وارد به آن ندارد.

جدول ۷: ضرائب هیدرودینامیکی در راستای  $x$  در حالت‌های مختلف.

|          | $C_{xx}$ | $C'_{xx}$ |
|----------|----------|-----------|
| حالت (۱) | ۰/۳۴۸    | ۱/۵۵۴     |
| حالت (۲) | ۰/۳۴۸    | ۱/۵۵۷     |
| حالت (۳) | ۰/۳۳۱    | ۱/۴۷۲     |

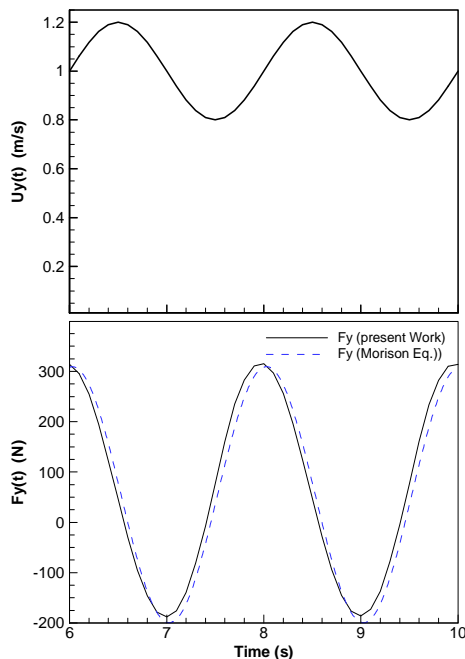


شکل ۱۳: تابع سرعت و نیروی حالت سوم.

حالت (۴): حرکت شتابدار خطی در راستای  $y$

در این حالت شناور از حال سکون با شتاب ثابت  $0.25 (m/s^2)$  در راستای منفی  $y$  (به سمت پایین) شروع به حرکت کرده و با رسیدن به سرعت  $1.0 (m/s)$  شتاب صفر می گردد، مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه (۱۶) تابع سرعت شناور در راستای  $y$  را در این حالت نشان می دهند.

$$\begin{cases} 0 < t < 4 & U_y = 0.25t & (m/s) \\ t > 4 & U_y = 1 & (m/s) \end{cases} \quad (16)$$



شکل ۱۵: تابع سرعت و نیروی حالت پنجم

جدول ۸: ضرائب هیدرودینامیکی در راستای  $y$  در حالت‌های مختلف.

|          | $C_{yy}$ | $C'_{yy}$ |
|----------|----------|-----------|
| حالت (۴) | ۰/۲۵۱۲   | ۲/۰۵۰     |
| حالت (۵) | ۰/۱۲۶    | ۱/۹۵۹     |

سیستم کنترل عمق شناور به گونه ای است که ارتفاع شناور را هر لحظه از سطح آب اندازه گیری می کند. تاخیر در پاسخ زمانی حسگر این سیستم باعث می شود شناور در راستای  $y$  حرکت نوسانی داشته باشد. این مسئله ضرورت داشتن اطلاعات هیدرودینامیکی برای چنین حرکتی را برای کنترل شناور نشان میدهد. در شبیه سازی این حرکات نوسانی، سه نوع حرکت با دامنه و فرکانس مختلف تحلیل شده است.

ابتدا حرکت نوسانی در راستای  $y$  حول سرعت  $1.0 (m/s)$  یک بار با دامنه  $0.2 (m/s)$  و با دیگر با دامنه  $0.4 (m/s)$  تحلیل شده است. در شکل ۱۶ نیروهای وارد به شناور در راستای  $y$  بر حسب زمان برای دو حرکت نوسانی ذکر شده رسم شده است. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود افزایش دامنه نوسان سرعت باعث افزایش

### حالت (۵): حرکت سینوسی در راستای $y$

در این حالت حرکت شناور در راستای مثبت  $y$  (به سمت بالا) با پیروی از پروفیل سرعت سینوسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل کردن مسئله مانند قبل دژستگاه مختصات بر روی شناور قرار میگیرد و جریان سیال حول آن بصورت عددی حل میشود. رابطه (۱۷) تابع سرعت جریان را بیان می کند.

$$U_y = 1.0 + 0.2 \times \sin(\pi t) \quad (m/s) \quad (17)$$

مشابه حالت سوم ضرائب معادله موريسون که ضرائب نیروی حقیقی و مجازی هستند با روش کمترین مربعات به ترتیب  $0/126$  و  $1/959$  بدست می آیند. پس از محاسبه ضرائب  $C_{yy}$  و  $C'_{yy}$  معادله موريسون یک رابطه بصورت  $F = 54.88U^2 + 403.48U$  برای نیروی وارد به شناور ارائه می کند. در شکل ۱۵ توزیع نیروی به دست آمده از معادله موريسون همراه با نیروی واقعی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود برازش معادله موريسون خطای زیادی را به همراه ندارد.

در جدول ۸ ضرائب هیدرودینامیکی مجازی برای حرکت در راستای  $y$  در دو حالت فوق الذکر آورده شده است. ضرائب هیدرودینامیکی نیروهای مجازی وارد به شناور در راستای  $y$  در حالت‌های (۴) و (۵) اختلاف ناچیزی با هم دارند و علت این اختلاف در ضریب  $C'_{yy}$  را می توان خطای موجود در محاسبه  $C_{yy}$  از روی نمودار نیرو بر حسب زمان در حالت پنجم دانست. توجه به این نکته هم لازم است که معادله موريسون ضرائب هیدرودینامیکی را در کل حرکت ثابت فرض می کند که فرض چندان دقیقی نیست. اختلاف بسیار کم ضریب  $C'_{yy}$  برای دو نوع حرکت شتابدار در راستای  $y$ ، ضمن توجیه استفاده از معادله موريسون، نشان می دهد نوع حرکت وسیله تاثیر شدیدی در ضریب نیروی مجازی وارد به آن ندارد هر چند در ضریب نیروی حقیقی آن موثر است.

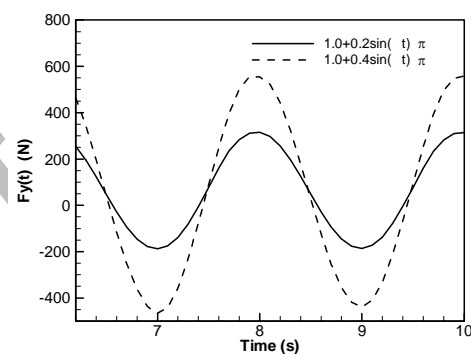
هیدرودینامیکی نیروهای مجازی ( $C'_{yy}$ ) وارد به شناور در راستای  $y$  برای حرکت نوسانی با فرکانس  $0.5 (Hz)$  و  $0.75 (Hz)$  به ترتیب  $1/959$  و  $1/966$  بدست می‌آید. همینطور ضریب هیدرودینامیکی نیروهای حقیقی ( $C_{yy}$ ) وارد به شناور در راستای  $y$  هم در این دو حالت به ترتیب  $0/126$  و  $0/11$  است. در حالیکه دامنه نوسان سرعت در هر دو فرکانس ثابت است، افزایش فرکانس،  $\dot{U}_{max}$  را افزایش داده و آن هم به معنی افزایش دامنه نیروی وارد به شناور است.

**جدول ۹:** ضرائب هیدرودینامیکی نیروهای وارد به شناور در راستای  $y$  برای حرکت‌های نوسانی مختلف.

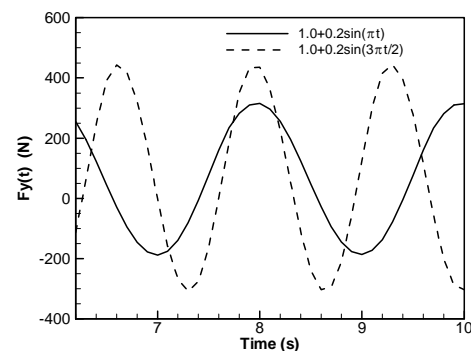
| $U_y$                             | $C_{yy}$ | $C'_{yy}$ |
|-----------------------------------|----------|-----------|
| $1.0 + 0.2 \times \sin(\pi t)$    | $0/126$  | $1/959$   |
| $1.0 + 0.2 \times \sin(3\pi t/2)$ | $0/11$   | $1/966$   |
| $1.0 + 0.4 \times \sin(\pi t)$    | $0/0824$ | $1/922$   |

در جدول ۹ ضرائب هیدرودینامیکی نیروی مجازی ( $C'_{yy}$ ) وارد به شناور در راستای  $y$  برای حرکت‌های نوسانی در جهت  $y$  برای حرکت‌های متفاوت گزارش شده است. این جدول اثر دامنه و فرکانس نوسان را روی ضریب هیدرودینامیکی نیروی مجازی وارد به شناور نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف بین  $C_{yy}$  های محاسبه شده حدود  $2/5\%$  است که به نظر می‌رسد در نظر گرفتن  $C'_{yy}$  حدود ۲ برای حرکت در راستای  $y$  مناسب باشد. لازم به ذکر است که با کمک جریان پتانسیل برای هندسه استوانه دایره ای ضریب نیروی مجازی برابر ۲ بدست می‌آید. در این تحلیل نیز همین عدد برای هندسه شناور که در جریان در راستای  $y$  به شکل استوانه ای با مقطع دایره ای است بدست آمده است. از نتایج دیگر این است که اگر چه تغییرات ضریب نیروی مجازی ناچیز است ولی با افزایش فرکانس و دامنه نوسانات سرعت ضریب درگ کاهش می‌یابد.

دامنه نوسان نیروی وارد به شناور خواهد شد در حالیکه فرکانس نوسان نیرو تغییر نمی‌کند. ضریب هیدرودینامیکی نیروهای مجازی ( $C'_{yy}$ ) وارد به شناور در راستای  $y$  برای حرکت نوسانی با دامنه  $0.2 (m/s)$  و  $0.4 (m/s)$  به ترتیب  $1/959$  و  $1/922$  است. همینطور ضریب هیدرودینامیکی نیروهای حقیقی ( $C_{yy}$ ) وارد به شناور در راستای  $y$  برای حرکت نوسانی با دامنه  $0.2 (m/s)$  و  $0.4 (m/s)$  به ترتیب  $0/126$  و  $0/0824$  است. معادله موریسون نیرو را بصورت  $F = \alpha U^2 + \beta \dot{U}$  ارائه می‌کند. با افزایش دامنه سرعت نوسانی  $\dot{U}_{max}$  افزایش و لذا دامنه نیرو هم افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۶: مقایسه جریانهای نوسانی با دامنه متفاوت.



شکل ۱۷: مقایسه جریانهای نوسانی با فرکانس متفاوت.

برای بررسی اثر فرکانس، حرکت نوسانی در راستای  $y$  حول سرعت  $1.0 (m/s)$  با دامنه  $0.2 (m/s)$  با فرکانسهای  $0.5 (Hz)$  و  $0.75 (Hz)$  تحلیل و مقایسه شده است. در شکل ۱۷ نیروهای وارد به شناور در راستای  $y$  بر حسب زمان برای دو حرکت نوسانی ذکر شده رسم شده است. از معادله موریسون مقادیر ضریب



4. Sayer, P. "Hydrodynamic Forces on ROV Near the Air-sea Interface", Int. J. Offshore and Polar Engineering, Vol. 6, No. 3, 1996.
5. Clouss, G.F. Hoog, S., Vannahme, M., Gerber, H., Gasparoni, F., and Calore, D. "MODUS: Space Shuttle for Deepwater Interventions", Offshore Technology Conference, Texas, U.S.A., 2002.
6. Ayub, A.M., Sohaib, M., Bilal, S., Zahir, S., and Khan, M.A. "Estimation of Hydrodynamic Coefficient of DARPA-2 and Their Geometry Dependence", National Engineering and Scientific Commission Magazine, No.43, Islamabad, 2005.
7. Morison, J.R., O'Brien, M.P., Jhonson, J.W., and Schaf, S.A., "The Force Exerted by Surface Wave on Piles", J. Petroleum Technology, Petroleum Transactions, AIME (American Institute of Mining Engineers) 189, pp. 149-154, 1950.
8. Gambit, Incorporated, "Gambit 2.0.0 User's Guide", Volume 1-4, Fluent Inc., 2001.
9. Holmes, E.P., "Prediction of Hydrodynamics Coefficient Utilizing Geometric Considerations", Master Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1995.
10. Fossen, T.I., "Guidance and Control of Ocean Vehicles", Chichester, John Wiley & Sons, 1995.
11. Launder, B.E. and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3,269, 1974.
12. FLUENT, Incorporated, "FLUENT 6 User's Guide", Volume 1-5, Fluent Inc., 2001.
13. Evans, J., Nahon, M., "Dynamic Modeling and Performance Evaluation of an Autonomous Underwater Vehicle", Ocean Engineering, Vol. 31, No's. 14-15, pp. 1835-1858, 2004.

## ۶- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از حل عددی جریان اطراف شناور زیر آبی کاوش را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

۱- در حرکت افقی شناور (حرکت در راستای  $x$ ) گردابه ای پشت سونار در بالای شناور تشکیل می شود. کاهش فشار در این ناحیه باعث می شود نیرویی عمودی در جهت مثبت  $y$  که مقدار آن حدود ۱۰٪ نیروی افقی است به شناور وارد می شود.

۲- ضریب هیدرودینامیکی نیروی وارد به شناور در راستای  $x$  در حرکت در جهت  $y$  ( $C_{yx}$ ) در حرکت به سمت پایین خیلی بیشتر از این مقدار برای حرکت به سمت بالا- در سرعت مساوی- است (مثلاً در سرعت  $1.0 (m/s)$  حدود سه برابر). بنابراین هنگامیکه شناور در حال پایین رفتن است نیرویی قابل توجه شناور را به عقب می راند.

۳- افزایش سرعت تغییر ناچیزی در ضرایب هیدرودینامیکی نیروی وارد به شناور در راستای  $x$  و  $y$  ایجاد می کند. بنابراین می توان در تحلیل دینامیکی و کنترل شناور در سرعتهای مختلف این ضریب را ثابت در نظر گرفت.

۴- در شبیه سازی حرکات نوسانی در راستای  $y$ ، سه نوع حرکت با دامنه و فرکانسهای مختلف تحلیل شد. مقایسه ضرایب نیروی مجازی وارد به شناور نشان می دهد که نوع حرکت (دامنه و فرکانس) تاثیر چندانی بر مقدار این ضریب ندارد.

## مراجع

1. Westwood, J. "What The Future Holds For ROVs and AUVs", Underwater Magazine, Article Reprint, Internet: [www.diveweb.com/rov/](http://www.diveweb.com/rov/), 2000.
2. Gotimer, E.H. and Lin, C.W., "Application of Computational Fluid Dynamics to Advanced Experimental Techniques", the Intl. Conf. on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Marine and Offshore Industries, Carderock, Maryland, 1992.
3. Nahon, M. "Determination of Undersea Vehicle Hydrodynamics Derivatives, Using the USAF Datcom", Engineering in Harmony with Ocean, Proceedings, Victoria, BC, Canada, pp. II-283- II-288, 1993.