

تحلیل عددی نیروهای پسا و برا وارد بر بدنه‌ی زیر دریایی بدون سرنشین UUV

حمیدرضا شاهی فر^۱، حسن قاسمی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد
۲- استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

وقتی که جسمی در حالت کاملاً غوطه ور حرکت می‌کند نیرویی در مقابل حرکت بر جسم وارد می‌شود که به آن مقاومت ویسکوز می‌گویند و این نیروی مقاومت به دو مولفه مقاومت اصطکاکی و مقاومت فرم (ویسکوز فشاری) تقسیم می‌شود. اگر جسم در نزدیکی سطح باشد نیروی دیگری بنام نیروی مقاومت موج سازی نیز بر جسم وارد می‌شود. در این پروژه تحلیل و عملکرد هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی کاملاً غوطه ور در سرعت بالا ارائه شده است. در این مقاله ابتدا مدلی با حدود $1/000/000$ سلول ساخته و نیروهای لیفت و درگ را در سرعت‌های مختلف و زوایای حمله مختلف با استفاده از معادلات ناویر استوکس و معادلات شبیه سازی جریان آشفته $k-\epsilon$ حل نموده و نتایج محاسباتی بدست آمده توزیع فشار و نیروهای وارد بر کره و وسیله زیر سطحی UUV را با داده‌های تجربی مقایسه کرده‌ایم که این نتایج از دقت بالایی برخوردار است.

کلمات کلیدی: جریان ویسکوز، توزیع فشار، نیروهای پسا و برا

Numerical Analysis of Drag and Lift on UUV

Abstract

When the body is running at fully immersed condition in viscous fluid, there are two components of resistance, i.e. frictional resistance and form drag. When it is near the free surface, the additional drag encountered to the body which is wave-making drag. This paper presents the hydrodynamic performance of high-speed Unmanned Underwater Vehicle (UUV) in fully immersed condition.

We did 1000000 (cells) fluid mesh around the body using Navier Stokes (N-S) equations and appropriate boundary conditions. The calculations of drag and lift have been obtained at various speeds and attack angle. The $k-\epsilon$ model is used to solve the N-S equations. We firstly calculated for the sphere and the results of pressure distributions and drag are very good and satisfactory with the experimental data. The calculations are extended to the UUV and the pressure distributions and drag are shown in good agreement with data.

Keywords: Viscous Drag, Pressure distributions, Hydrodynamics forces (Lift and drag)

فهرست علائم و اختصارات

δ	ضخامت لایه مرزی	Re	عدد رینولدز
U	سرعت خارج از لایه مرزی	u	سرعت جسم (m/s)
V_∞	سرعت جریان آزاد	V	سرعت جسم (m/s)
\vec{V}	سرعت ذره در هر نقطه میدان	D	قطر جسم (m)

که همان مقاومت فشاری است تابعی از عدد فرود است. مقاومت فرم بدنه یک تابع ترکیبی است که هم به عدد فرود و هم به عدد رینولدز بستگی دارد ولی در جریان آشفته تقریباً مستقل از رینولدز است. [۱] مسائلی که بر اساس فرضیات فرود استوار است می‌توان با جریان پتانسیل سرعت حل نمود و روش المان‌های مرزی بر اساس پتانسیل (Boundary Elements Method Based on Potential) بر این اصول استوار است. این روش در حال حاضر یک ابزار محاسباتی مناسب و قدرتمند برای اینگونه مسائل کاربردهای زیادی دارد. طی دو دهه اخیر روشهای زیادی برای محاسبه مقاومت کل شناور زیر سطحی ارائه شده است. روشهای المان مرزی در حل انتگرالی قضیه گرین و روش FEM در حل معادلات ناویر استوکس (Navier-Stokes Equations)، که هر کدام از این روشها ویژگیهای خاص خود را داراست. روش استفاده از معادلات ناویر استوکس نیز توسط بعضی از محققان استفاده و انجام شده است. این مقاله برای دو جسم کره و وسیله زیرسطحی در سرعت بالا با استفاده از تولید مش سه بعدی تحلیل و محاسبات انجام شده است. این نتایج شامل توزیع فشار، نیروی پسا و برا در سرعتهای مختلف و زوایای حمله مختلف می‌باشد.

۲- معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر

اگر فرض شود که سیال مورد نظر غیر قابل تراکم بوده و چگالی ثابت دارد در آن صورت $div \vec{V}$ از معادله پیوستگی حذف شده و ضریب μ از معادله حذف می‌گردد. با ثابت در نظر گرفتن μ خیلی از ترم‌های دیگر حذف شده و معادله ناویر استوکس برای سیال غیر قابل تراکم با ویسکوزیته ثابت بدست می‌آید. سه قانون اساسی بقای جرم، ممنتوم و انرژی در صورتی که جریان آشفته مدل نگردد برای استفاده در حرکت سیال داده شده که بترتیب عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

μ	لزجت دینامیکی سیال
h	آنتالپی
k	ضریب هدایت حرارتی
τ_{ij}	مختصات تانسور تنش کلی سیال
λ	ضریب لزجت حجمی
T	دمای مطلق
δ_{ij}	دلتای کرونکر
p	فشار
A_r	مساحت سطح ترشده
α	زاویه حمله می باشد
A_b	مساحت سطح مقطع انتهای دم، اگر شکل بدنه در انتها به یک نقطه برسد $A_b = 0$
C_D	ضریب نیروی پسا
C_L	ضریب نیروی برا
C_{Dn}	ضریب درگ سطح عمود بر جریان
A_p	مساحت شکل صفحه ای (planform Area)
$C_{D\alpha}$	ضریب پسای محوری در زاویه حمله صفر

۱- مقدمه

وقتی که جسمی در حالت کاملاً غوطه‌ور حرکت می‌کند نیرویی در مقابل حرکت بر جسم وارد می‌شود که به آن مقاومت ویسکوز می‌گویند و این نیروی مقاومت به دو مولفه مقاومت اصطکاکی و مقاومت فرم (ویسکوز فشاری) تقسیم می‌شود، برای شناورهای سطحی و شناورهای زیرسطحی (نزدیک سطح آزاد سیال) این مقاومت‌ها اصطلاحاً به مقاومت لزجی و مقاومت موج سازی معروف می‌باشند. این بدین منظور است که هر جسمی که بر روی و یا نزدیکی سطح سیال حرکت می‌کند موجی را روی سطح تشکیل می‌دهد که سبب افزایش مقاومت شناور می‌گردد. در واقع، این مولفه ناشی از اختلاف فشاری که روی بدنه ایجاد می‌شود مربوط است. تجربه نشان می‌دهد که مولفه مقاومت موج سازی با توان $n-1$ ام سرعت شناور ارتباط مستقیم دارد و مقدار n برای بدنه‌های مختلف متفاوت است. بطور عملی می‌توان گفت که مقاومت لزجی شامل دو ترم مقاومت اصطکاکی (تابعی از عدد رینولدز) و مقاومت فرم بدنه است و مقاومت موج سازی

تا به امروز حل کلی برای معادلات ناویراستوکس در حالت لزجت بسیار زیاد و لزجت بسیار کم مورد مطالعه قرار گرفته است. حتی در دو محدوده لزجت کم و لزجت زیاد مشکلات ریاضی بسیار زیاد است و حل های عددی عمدتاً برای حالات ساده هستند. در حالت های بسیار ساده و شرایط خاص می توان بعضی از این معادلات را بطور دقیق بصورت حل ریاضی بدست آورد (مثلاً جریان آرام در لوله و بین دو صفحه موازی). با روش انتگرال گیری عددی بعضی از حالات مشکل تر را نیز می توان بطور تقریب حل کرد ولی آنالیز عددی بوسیله کامپیوتر در بعضی از موارد نتایج خوبی نداشته و نمی تواند مدل قابل قبول برای جریان فیزیکی باشد، چون تمام جزئیات ساختار جریان و تغییرات هندسی غیر یکنواخت و غیردائمی و یا الگوی غیر مشخص جسم و جریان مغشوش و شرایط مرزی و اولیه غیر مشخص و بالاخره محدودیت های ذخیره ماشین های کامپیوتر اجازه بررسی کامل و دقیق را در خیلی از موارد نمی دهد و حتی در حالت هایی پیدا کردن حل در بررسی نتایج با توجه به شرایط اولیه و مرزی فرضی در نظر گرفته شده باید بوسیله آزمایش و تجربه در عمل تایید شود تا قابل استفاده عملی باشد. لذا در این مسائل لازم است که آزمایش انجام دهیم.

۲-۲- حالت لزجت بسیار کم (رینولدز بسیار بالا)

در این حالت ترم های اصطکاک (طرف راست معادله انتقال چرخشی (Vorticity Transport) در مقایسه با ترم اینرسی (ترم چپ) بسیار کوچک است. اما ساده کردن رابطه در این حالت باید با توجه و مواظبت خاصی انجام گیرد.

در جریان یک سیال تراکم پذیر چنانچه سرعت سیال کمتر از 0.3 سرعت صوت در آن سیال باشد می توان با تقریب خوبی جریان را تراکم ناپذیر فرض نمود. در جریان اطراف اجسام اگر عدد رینولدز کم باشد. ناحیه ای که کل حوزه جریان چرخش وجود دارد و ورتیسیتی (Vorticity) نفوذ می نماید. ولی اگر در اعداد رینولدز بالا قرار داشته باشیم این قشر نازک می گردد و در حقیقت در قسمت ناچیزی جریان چرخشی ولی در بخش بزرگی جریان غیر چرخشی

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} - \nabla p \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{DP}{Dt} + k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

که برای یک سیال (نیوتنی) تنش های لزجی برابرند با:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \delta_{ij} \lambda \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right] - p \delta_{ij} \quad (4)$$

و یا

$$\tau_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \delta_{ij} \lambda \left[\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - p \delta_{ij}$$

معادلات بالا شامل هفت متغیر است که در ابتدا V و p و T معلوم فرض می شود. چهار متغیر باقیمانده از روابط کمکی و داده های زیر بدست می آیند.

$$h = h(p, T) \quad (5)$$

$$\mu = \mu(p, T) \quad (6)$$

$$\rho = \rho(p, T) \quad (7)$$

$$k = k(p, T) \quad (8)$$

در صورتی که سیال غیر قابل تراکم فرض شود می توان مقادیر h, μ, ρ, k را ثابت و معلوم فرض نمود و از طرفی معادله ۳ با توجه به غیر قابل تراکم و دائم بودن جریان قابل چشم پوشی می باشد، در نتیجه تنها دو معادله و دو مجهول خواهیم داشت، که عبارتند از روابط ۱ و ۲ که برای هر بعد از مختصات قائم باید برقرار شود

ولی در صورت ورود معادلات جریان متوسط برای مدل سازی جریان آشفته دو معادله فوق قدری پیچیده می گردند که برای حل و مدل سازی آنها استفاده از نرم افزارهای تحلیل جریان سیال سودمند خواهد بود.

۲-۱- خصوصیات عمومی رابطه ناویراستوکس

بهتر است قبل از حل بعضی از حالات معادلات ناویراستوکس بعضی خواص این معادلات را بحث کنیم.

بطوریکه از $y^+ = 2000$ تا مرحله $y^+ = 1400$ نتایج خروجی اختلاف بسیار ناچیزی داشتند و با قابلیت اطمینان بالایی می‌شود ادامه حل را مستقل از شبکه در نظر گرفت و اما در مرزهای ورودی، تنها سرعت سیال داده شده و در هنگام بررسی زاویه حمله سرعت ثابت در نظر گرفته شده و با توجه به مقدار زاویه به دو مولفه افقی و عمودی تجزیه گردیده است.

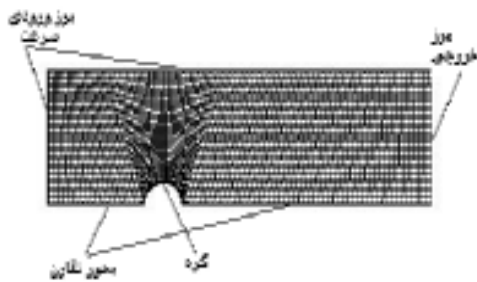
۲-۳- تحلیل جریان کره با رینولدز بالا

در این پروژه با توجه به اینکه مساله مورد نظر یک جسم لاغر با سرعت بالا می‌باشد. در ابتدا سعی گردید که نحوه حل با توجه به مقارن بودن جسم بررسی گردد در واقع می‌بایست مطمئن شویم که آیا نرم افزار فلونت قادر به شبیه سازی اثر تخفیف سه بعدی برای مسائل جریان روی سطوح، با رینولدز بالا در حالت دو بعدی می‌باشد یا خیر؟ [۳]

بدین منظور با توجه به اینکه مقادیر ضریب پسای کره (کره یک جسم چاق است) برای سیالات هوا و آب در اکثر کتابهای مرجع موجود بود و این مقادیر می‌توانست به عنوان مبنای صحت نتایج تجربی با عددی حاصل از نرم افزار استفاده گردد [۹]، [۱۰].

در ابتدا مساله برای یک کره با مقادیر رینولدز متفاوت با دو مدل زیر حل گردید. (برای تعیین عدد رینولدز قطر کره یک متر و جریان سیال آب با خواص فیزیکی ذکر شده و سرعتهای متفاوت که در جدول ۱ ذکر شده استفاده گردیده است.)

۱- مدل دو بعدی با در نظر گرفتن محور تقارن Axisymmetric جهت حل (شکل ۱) با شبکه بندی چهار ضلعی



شکل ۱- شبکه بندی ایجاد شده برای کره در حالت دوبعدی

است. حالا در این قشر نازک اثرات لزجت را باید در نظر گرفت، که به این قشر اصطلاحاً قشر مرزی می‌گوییم. در این موارد جریان اطراف اجسام را به دو دسته طبقه بندی می‌نماییم. جریان اطراف اجسام لاغر که طول جسم در مقایسه با قطر آن بزرگ است و جریان اجسام چاق که عکس جسم لاغر می‌باشد.

برای اجسام لاغر

$$R_e = \frac{uL}{\nu} \quad (9)$$

و برای اجسام چاق

$$R_e = \frac{uD}{\nu} \quad (10)$$

۳- مدل‌های حل شده در این پروژه

در این پروژه ابتدا سه مدل مجزا به شرح زیر بررسی گردیده است:

- ۱- مدل بررسی ضریب پسا برای کره در حالت دو بعدی و با در نظر گرفتن محور تقارن
- ۲- مدل بررسی ضریب پسا برای کره در حالت سه بعدی
- ۳- مدل بررسی ضرایب پسا و برآ برای وسیله زیر سطحی مورد نظر

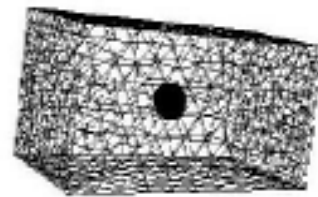
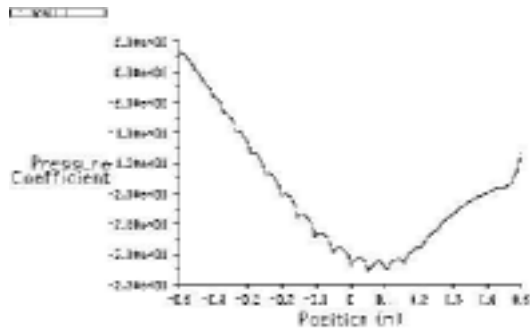
سیال برای هر سه مدل سیال آب در نظر گرفته شده و خواص فیزیکی آن بدین شرح می‌باشد:

$$\rho = 1025 [kg/m^3] \text{ و } \nu = 1.15 \times 10^{-6} [m^2/sec]$$

۱-۳- شبکه بندی و شرایط مرزی

در این پروژه با توجه به اینکه برای مدل سازی آشفتگی جریان از مدل $k-\epsilon$ استفاده گردیده، شبکه بندی در کنار دیواره تا حد امکان ریز انتخاب شده تا جوابگوی مقادیر y^+ که معیاری در اندازه سلولهای شبکه در کنار دیواره مدل‌های آشفتگی می‌باشد بوده و در این مورد برای مدل سازی کره در دو حالت دو بعدی و سه بعدی محدوده $30 < y^+ < 500$ رعایت گردید، اما در مورد وسیله زیر سطحی با توجه به محدودیت حافظه رایانه که حدود 3GB را اشغال نموده بود، مسئله تا جایی که مستقل از شبکه باشد ریز گردید

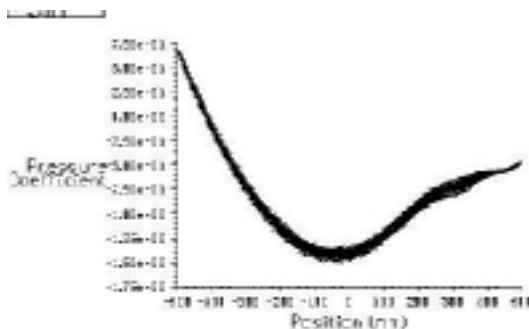
۲- مدل سه بعدی با شبکه چهار وجهی (شکل ۲)



شکل ۳- نحوه توزیع ضریب فشار بر روی کره در حالت دو بعدی

شکل ۲- میدان شبکه بندی ایجاد شده برای کره در حالت سه بعدی

نتایج محاسبات با حل با نتایج تجربی در جدول ۱ مقایسه شده است.



جدول ۱- مقایسه شبکه دو و سه بعدی در نتایج ضریب پسا برای کره

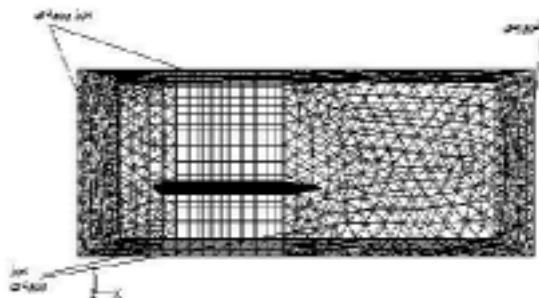
شکل ۴- نحوه توزیع ضریب فشار بر روی کره در حالت سه بعدی

رینولدز	شبکه دوبعدی	مقادیر تجربی	شبکه سه بعدی	سرعت (m/s)
۱۰۸۶	۰/۱۱۳	۰/۱۱	۰/۱۴	۱
۱۰۸۷	۰/۰۷۱	۰/۱۸	۰/۱۵	۱۰
۵×۱۰۸۷	۰/۰۸۴	۰/۱۸	۰/۱۲۵	۵۰

۳-۳- مدل بررسی ضرایب نیروی پسا و برا وارد بر وسیله زیرسطحی

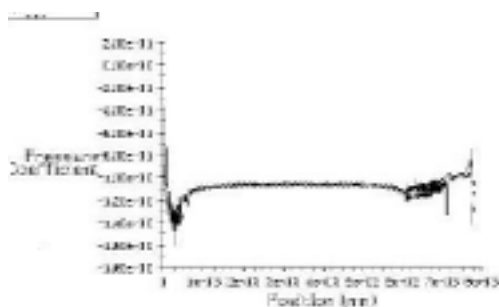
با توجه به نتایجی که از حل عددی کره حاصل شد اقدام به شبیه‌سازی بدنه متقارن محوری وسیله زیر سطحی مورد نظر گردید. در ابتدا نیاز به منحنی سطح بدنه بود که با دقتی بیش از 0.001mm اقدام به اندازه‌گیری سطح پوسته گردید که ۳۶۰ نقطه بدست آمده به نرم افزار گمبیت انتقال یافته و شبیه‌سازی انجام گردید.

همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود در حالت حل دوبعدی (شکل ۳) ضریب فشار در انتهای کره ناگهان افزایش می‌یابد و این امر باعث می‌گردد تا ضریب پسای فشاری کمتر از مقدار واقعی گردد، در حالی که در حل عددی سه بعدی (شکل ۴) توزیع ضریب فشار با در نظر گرفتن اثرات ویک ناشی از جدایی بدست آمده و با حالت واقعی مطابقت بیشتری دارد.



شکل ۵- میدان در نظر گرفته شده جهت وسیله زیرسطحی

این وسیله دارای طول ۸ متر و قطر ۵۲۰ میلیمتر بوده که نسبت طول به قطر آن ۱۵/۳ است. در زاویه صفر درجه تنها به ضرایب پسا که نقش مهمی در انرژی مصرفی در هنگام حرکت دارد در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌ایم. بدین منظور جسم مورد نظر که یک جسم لاغر با دماغه ترانکیت بود را در فضای سه بعدی شبکه‌سازی نموده (شکل‌های (۵) و (۶) و (۷)) و ابتدا با توجه به اینکه مقادیر ضریب پسی تجربی این نمونه برای سرعت‌های مختلف در اختیار بود و از طرفی با استفاده از روابط هیدرودینامیکی در خصوص پروانه شناورهای دریایی و انرژی الکتریکی مصرفی موتور وسیله مورد نظر در سرعت‌های ۲۵ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ گره دریائی در زاویه حمله صفر درجه حل گردید که نتایج حل در (جدول ۲) آورده شده است و با نتایج تجربی نیز مقایسه شده است که رضایت‌بخش و مطلوب است.

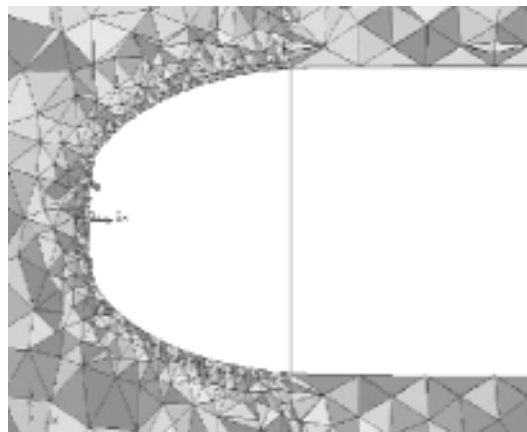


شکل ۸- نحوه توزیع ضریب فشار بر روی وسیله زیرسطحی در سرعت 20.57m/s (در راستای محور طولی)

جدول ۲- مقایسه نتایج نیروهای پسا در سرعت‌های مختلف در زاویه صفر درجه

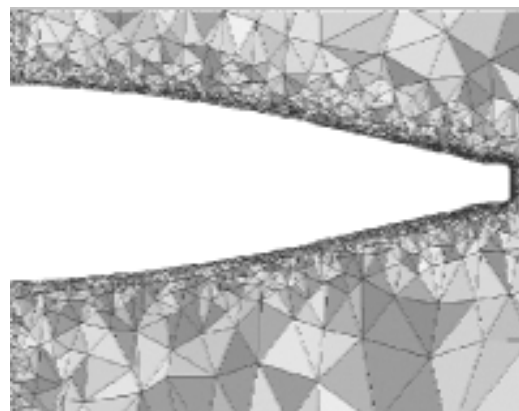
سرعت (m/s)	نیروی مقاوم محاسبه شده (N)	نیروی مقاوم واقعی (N)
۱۲/۸۴	۳۳۳۷	۳۲۵۰
۱۵/۴۳	۴۶۸۷	۴۵۹۰
۲۰/۵۷	۸۰۲۰	۸۰۱۳
۲۲/۶۳	۹۵۸۴	۹۵۲۰

با توجه به اینکه گرادیانهای شدید فشار در نوک و دم پوسته UUV پیش بینی می‌گردید، مش‌بندی در این نقاط با تراکم بالاتری انجام شد. شکل‌های ۶ و ۷ در مورد شرایط مرزی توضیحاتی در بخش ۱-۳- ارائه گردید و در مورد شرایط حالت دائم با توجه به اینکه سرعت وسیله ثابت می‌باشد سرعت در مرزهای ورودی ثابت در نظر گرفته شده است (شکل ۵).



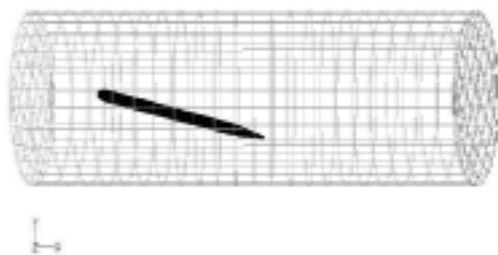
شکل ۶- شبکه بندی سطح دماغه وسیله زیر سطحی

در رابطه با ویک پشت و حتی دماغه وسیله، نرم افزار با توجه به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ خود اقدام به شبیه‌سازی ویک دنباله نموده است که اثرات ویک و دنباله جریان در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ نیز می‌توان مشاهده نمود که در انتهای وسیله ضریب فشار افزایش یافته و این افزایش نشان دهنده جدایی جریان در دنباله می‌باشد.

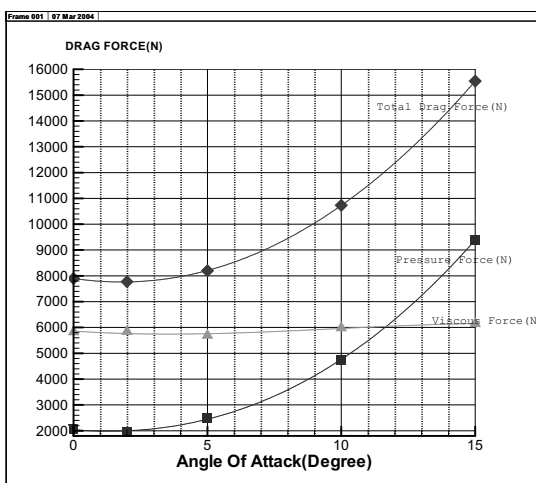


شکل ۷- شبکه بندی سطح دم وسیله زیر سطحی

توضیح است که در روابط یورگنس مقادیر بدست آمده برای ضرایب پسا و برا در راستای افق و قائم بوده در حالی که مقادیر حاصل از حل عددی در راستای محوری و عمود بر محور وسیله مورد نظر می‌باشد.



شکل ۹- نمونه‌ای از مدل سازی بر اساس زاویه حمله



شکل ۱۰- نیروهای پسای (فشاری، لزجی) بر حسب زاویه حمله در سرعت $20.576m/s$

۴-۳- بررسی نیروهای پسا و برا برای وسیله زیرسطحی مورد نظر در زاویه حمله مختلف

یکی از فاکتورهای مهم طراحی شناور داشتن توانائی مانوردهی، حمله و یا گریز از خطر است که نیاز به حرکت زاویه گرفتن شناور در جهات مختلف می‌باشد. لذا با توجه به این شرایط، معمول و متعارف آنست که ضریب پسا و برا را محاسبه و نسبت به زاویه حمله مقایسه نمایند. در اینجا لازم است که در هر زاویه باید یک مدل از وسیله در نرم‌افزار گمبیت ساخته شد که نمونه‌ای از آن در شکل ۹ برای زاویه حمله ۱۵ درجه نشان داده شده است. برای همین مدل از وسیله در سرعت $20.576m/s$ ولی در زاویه‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه نیروهای پسای (مولفه‌های فشاری و لزجی) و نیروی برا، بترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

معیار صحت نتایج معادلات تجربی یورگنس (Jorgense) بوده است، این معادلات برای جسم متقارن محوری و لاغر ضرایب برا و پسا را چنین بیان می‌کند [۷].

$$(11)$$

$$C_L = \frac{A_b}{A_r} \sin 2\alpha \times \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{A_p}{A_r} C_{Dn} \sin^2 \alpha$$

$$C_D = C_{D_0} \cos^2 \alpha \quad (12)$$

که برای یک سیلندر نامحدود در نظر گرفته شده و اگر عدد رینولدز عمودی را چنین تعریف کنیم،

$$Re_n = U \frac{D}{\nu} \sin \alpha \quad (13)$$

برای C_{Dn} خواهیم داشت:

$$Re_n < 3 \times 10^5 \quad C_{Dn} = 1.2 \quad (14)$$

$$3 \times 10^5 < Re_n < 7 \times 10^5 \quad C_{Dn} = 0.3 \quad (15)$$

$$7 \times 10^5 < Re_n \quad C_{Dn} = 0.6 \quad (16)$$

با توجه به تعیین ضریب فشار در زاویه حمله صفر در این مسئله $C_{D_0} = 0.0031$ انتخاب گردیده که مبنای محاسبه ضریب پسا در زوایای حمله مختلف با استفاده از روابط تجربی یورگنس (Jorgense) می‌باشد. لازم به

۴- نتیجه گیری

این مقاله برای محاسبات و تحلیل نیروهای هیدرودینامیکی شناور غوطه‌ور ارائه شده و نتایج زیر حاصل شده است.

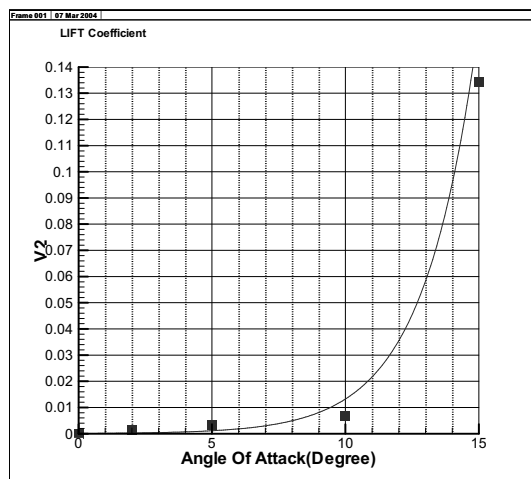
مدل سازی سه بعدی نسبت به مدل دو بعدی بهتر بوده و نتایج مطلوبتری برای جسم کره با شبکه مش سه بعدی بدست آمده است. در واقع در صورتی که در حل عددی برای مدل دو بعدی قادر به مدل سازی اثر تخفیف سه بعدی نباشیم، در نتایج خطا خواهیم داشت، این نکته در جریانات عبوری بر روی اجسام قابل توجه می‌باشد.

- در تحلیل هیدرودینامیکی یک جسم لاغر با استفاده از نرم افزار فلونت در صورتی که مدل سه بعدی بوده و رینولدز بالا باشد $R_e > 10^6$ نتایج قابل قبولی ارائه خواهد شد و در محاسبه نیروی پسا هرچه مقدار رینولدز افزایش می‌یابد دقت حل نیز افزایش یافته و خطای کمتری خواهیم داشت شاید دلیل آن کمتر شدن جریان چرخشی در معادلات حالت جسم مورد نظر باشد.

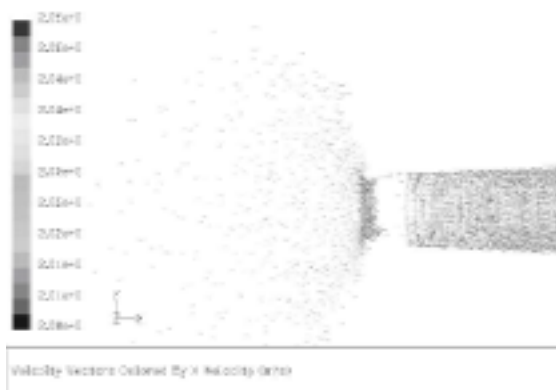
- همانگونه که از نمودار شکل ۱۰ استنباط می‌گردد بخوبی مشهود است که با افزایش زاویه حمله نیروی پسای فشاری افزایش می‌یابد و نیروی پسای لزجی تغییرات چشمگیری نخواهد داشت، شاید بتوان کاهش ضریب پسا در زوایای حمله اولیه (کمتر از ۴ درجه) را به علت فرم ترانزیت دماغه بر اثر زاویه حمله دانست که به نوعی اثرات آن کاهش می‌یابد و در نتیجه ضریب پسا کاهش یافته است.

- از شکل ۱۱ نیز بخوبی مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب برآ ناشی از بدنه وسیله زیر سطحی در زوایای حمله کم (حدود ۵ درجه) ناچیز است و این موضوع در طراحی سیستمهای کنترلی در تنظیم پارامترهای پایداری وسیله می‌تواند مطلوب باشد.

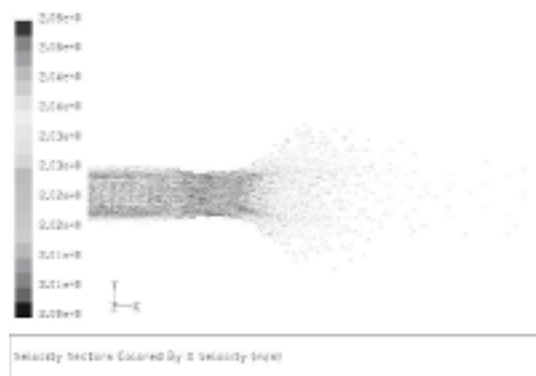
- در انتها از مقایسه نتایج برای کره و جسم لاغر به این نتیجه خواهیم رسید که با استفاده از این نرم افزار در تحلیل نیروهای فشاری خطای قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌گردد و در اجسامی که نیروهای لزجی غالب بر نیروهای فشاری هستند و به تعبیر دیگر اثر



شکل ۱۱- نیروی برآ بر حسب زاویه حمله بر حسب زاویه حمله در سرعت $20.576m/s$



شکل ۱۲- توزیع سرعت $20 \sim 20.05m/s$ اطراف دماغه



شکل ۱۳- توزیع سرعت $20 \sim 20.05m/s$ اطراف قسمت انتهایی وسیله

5-White Frank M.: Fluid Mechanics, McGRAW-HILL, 1986.

6-6-John D. Anderson, Jr., Fundamental of Aerodynamics, McGRAW-HILL, 1991.

7-Prof. Michael Triantafyllou, Lectures: Maneuvering and Control of Surface and Underwater Vehicles, MIT OpenCourseWare, Fall 2000.

8-James M. Simon and William B. Blake, Missile Datcom: High Angle Of Attack Capabilities, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.

9-Report from a Laboratory Experimental conducted, Determination of Drag Coefficient of a Sphere, March 13, 2002- Louisiana Tech. University.

14-Sighard F. Horner, Fluid dynamic Drag, Author 1958.

نیروهای فشاری در محاسبه نیروی مقاوم کل ناچیز باشد (همانند جسم لاغر) این روش مناسب خواهد بود. ولی در اجسام چاق مانند کره محاسبات دارای خطا می‌باشد.

۵- مراجع

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

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

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

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