

شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان حول بدن دلفین در سیال ویسکوز

محمدحسین نهاوندیان^{۱*}، احمد ایزدی^۲^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ nahavandian@aut.ac.ir^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ a_izadi@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

بررسی بیومیمتیک^۱ و هیدرودینامیکی آبزیان به دلیل پیچیدگی موجود در هندسه بدن و نوع حرکت آبزیان، یکی از چالشی‌ترین مباحث دینامیک سیالات محاسباتی در پژوهش‌های اخیر در این زمینه بوده است. حرکت بدن آبزی و بالاخص بخش دم از یک سو و حرکت سیال حول بدن آبزی از سوی دیگر، موجب ایجاد جریان ناپایا شده و تحلیل را پیچیده‌تر کرده و نیازمند درک عمیقی از برهم‌کنش سیال و بدن آبزی است. به همین منظور هدف این پژوهش، با استفاده از یک هندسه دوبعدی دقیق از بدن دلفین، شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان اطراف بدن آبزی با در نظر داشتن شنای آبزی بوده و به طور خاص بر روی تغییرات ضرایب درگ و لیفت، نحوه حرکت بدن و اثر آن بر میدان سرعت و فشار و نحوه تشکیل گردابه‌ها در بلافاصله نزدیک بدن دلفین انجام شده است. که نتایج حاکی از تاثیر قابل توجه فرکانس حرکت دلفین و طول متحرک دم دلفین بر پارامترهای ذکر شده می‌باشد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی عددی؛

میدان سرعت و فشار؛

ضرایب درگ و لیفت؛

دینامیک سیالات محاسباتی؛

مش متحرک.

Numerical Simulation of Flow Hydrodynamic Around Dolphin Body in Viscous Fluid

Mohammad-Hosein Nahavandian^{1*}, Ahmad Izadi²¹ PhD Candidate of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology; nahavandian@aut.ac.ir² PhD Candidate of Marine Engineering, Amirkabir University of Technology; a_izadi@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 15 Mar. 2018

Accepted: 13 Aug. 2019

Keywords:

Numerical Simulation;
Velocity and Pressure field;
Drag and Lift Coefficients;
Computational Fluid Dynamics;
Moving Mesh;

ABSTRACT

The biomimetic and hydrodynamic study of aquatic animals is one of the most challenging computational fluid dynamics topics in recent studies due to the complexity of body geometry and the type of flow field. The movement of the aquatic body, and particularly the tail section and the corresponding movement of fluid around the body, causes an unsteady flow and requires a comprehensive study of the interaction of fluid and aquatic body which makes the analysis more complicated. In this research, the main purpose is to investigate the numerical simulation of hydrodynamic flow around the aquatic body regarding dolphin swimming condition. Specifically, considering the precise 2D geometry of a dolphin body, the studied parameters include the drag and lift coefficients, body movement and its effect on vorticity, pressure and velocity fields immediately around the body. According to the results it can be claimed that the body movement frequency and the length of tail motion highly affect the mentioned parameters.

۱ - مقدمه

پیش‌راندن جاندار در آب است. در این بین میزان سرعت شنای جاندار رابطه مستقیم با مقدار انرژی مصرفی دارد. عمدتاً آبزیان هنگام تغذیه و مهاجرت سرعت پایینی در حرکت دارند [۱]. حرکت دلفین با سرعت ثابت، با توجه به قانون بقای ممنتوم موجب ایجاد تعادل

برای مدت طولانی حرکت و شنای آبزیان مورد توجه انسان بوده است تا بتواند پیچیدگی‌های حرکت آبزیان در آب را درک نماید. فرآیند شنا آبزیان شامل انتقال انرژی جنبشی و ممنتوم از طریق حرکت و

از جمله کاربردهای مطالعه عددی شنای دلفین می‌توان به دستیابی به مدل واقعی مناسب با قدرت مانور بالا جهت انجام فعالیت در اعماق دریا (در فشار و دمای بالا) که حضور انسان در آن میسر نیست مناسب بوده و همینطور در ساخت میکروروبات‌ها برای انتقال دارو از طریق جریان خون در بدن انسان اشاره نمود [۱۰].

به منظور بالا بردن دقت در ساخت ربات دلفینی، لازم است تا با شبیه‌سازی هیدرودینامیکی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پیش‌بینی مناسبی از رفتار آن در آب داشته و در زمان و هزینه ساخت صرفه جویی به عمل آید. شبیه‌سازی سی.اف.دی^۴ به عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها جهت فهم پدیده‌های پیچیده مانند آشفتگی جریان، انتقال حرارت، پایداری جریان با استفاده از حلگرهای پیشرفته است. برای مثال از پژوهش‌های شاخص انجام یافته در این زمینه می‌توان به مقاله محمدشاهی و همکاران [۱۱] اشاره نمود که بهینه‌سازی و تعیین نیروهای وارد بر ربات ماهی‌شکل را بر اساس نتایج حاصل از سی.اف.دی در دو حالت بدن ساکن و با زاویه نسبت به افق برای ثبت ضرایب درگ، لیفت و ممنتوم در نرم افزار فلونت انجام دادند؛ اما در این پژوهش اشاره ای به نوع جریان از نظر آرام یا درهم بودن و همچنین تابع تغییر شکل بدن دلفین نشده است. در پژوهشی دیگر، ژوو و همکاران [۱۲] روش محاسباتی برای مطالعه هیدرودینامیک شنای ماهی الهام گرفته شده از طبیعت از طریق دینامیک سیالات محاسباتی ارائه نمودند که عمده تمرکز آن بر بررسی تغییرات زمانی و مکانی فشار در نزدیکی بدن دلفین بوده و نتایج گزارش شده حاکی از تاثیر بسزای روش و الگوریتم حل بر تعیین خواص میدان جریان در اطراف بدن بوده است و پژوهشگر پیشنهاد نموده است تا بررسی جریان ناپایا حول بدن دلفین به دلیل تشابه ماهیت آن به واقعیت در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد. لی و جیاچن شبیه‌سازی هیدرودینامیک حرکت باله دم دلفین را به منظور بررسی مشخصات نیروی پیشران و ایجاد ورتکس به دلیل تناوب دم انجام دادند. همچنین به دلیل سازگاری مدل آر.ان.جی - کی.ایسپلن برای هندسه‌های پیچیده از این مدل استفاده شد [۱۳]. از نتایج گزارش شده در این پژوهش می‌توان به تاثیر مثبت در نظر گرفتن دم معطف نسبت به هندسه صلب بر نیروی پیشران اشاره نمود اما تاثیر تغییر طول متحرک دم بر میزان پیشران دلفین مورد بررسی قرار نگرفت.

هدف این پژوهش ارائه تحلیل هیدرودینامیکی برای حرکت ربات دلفینی شناور در آب است. به عبارت دیگر میدان جریان در نزدیکی بدنه روبات از اهمیت ویژه ای برخوردار است چرا که تشخیص نیروهای موثر بر الگوی حرکت دلفین از طریق اطلاعات بدست آمده از میدان جریان در این ناحیه میسر است. همچنین لازم به ذکر است که عمده پژوهش‌های انجام شده در گذشته معطوف به بررسی ربات ماهی بوده و مطالعه عددی هیدرودینامیک ربات دلفینی کماکان

بین نیروها و گشتاورهای وارده بر بدن جاندار می‌شود. نیروی پیش - رانش خالص ایجاد شده توسط حرکت دم دلفین در تقابل با نیروهای مقاوم موجود موجب حرکت روبه جلو می‌شود [۲]. آنچه که مسلم است قدرت مانور بالای دلفین به علت نوع شنا، ایجاد لایه مرزی آشفتگی اطراف بدن و یا جنس پوست این جاندار است [۳]. بسیاری از تحقیقات عددی و آزمایشگاهی انجام یافته از مدلی صلب برای شبیه‌سازی شنای دلفین در آب استفاده کرده و تراست ایجاد شده توسط دلفین را برابر با نیروی درگ ناشی از سرخوردن دلفین در آب فرض نموده اند [۴]. دلفین‌ها و ماهیان به دلیل بازدهی حرکتی و سرعت شنای بالا همواره کانون توجه پژوهشگران زیستی و بیومکانیکی بوده‌اند. برای نمونه یو و همکاران [۵] روش حلقه بسته جهت کنترل زاویه پیچ را برای ایجاد درک درست از مانورهای آکروباتی دلفین ارائه نمودند. شن و همکاران [۶] روش کنترل فازی برای تشخیص عمق شنای دلفین تعبیه کردند. در پژوهشی که وانگ و همکاران [۷] انجام دادند، رباتی با الهام‌گیری از بدن دلفین با الگوی حرکتی خاص و استفاده از هوش مصنوعی ساختند.

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه شناخت تجربی شنای آبزیان انجام یافته است. به طور کلی این پژوهش‌ها شامل معرفی مکانیزم ساخت نمونه ربات آبزی و تعریف سیستم کنترلی برای شنا بوده‌اند. در مدلسازی و ساخت اینگونه ربات‌ها هدف اصلی مانورپذیری بهتر و دوام بیشتر سازه ربات آبزی است [۸]. برای نمونه ناکاشیما و همکاران [۹] پژوهشی را در زمینه بهینه‌سازی باله‌های ربات دلفینی برای افزایش قدرت مانور انجام دادند. در پژوهشی دیگر نیز بهبود مانور پیچ^۲ و یاو^۳ با توسعه یک ربات چندلینکی توسط لی و همکارانش [۱۰] بررسی شد.

اغلب پژوهش‌های پیشین در زمینه تجربی و با رویکرد کنترل مکاترونیکی بوده اند و خلغ غیرقابل انکاری در مطالعات عددی و جنبه‌های دینامیک سیالات محاسباتی آن وجود دارد. لازم به ذکر است اندک مطالعات عددی پیشین نیز، با در نظر گرفتن هندسه‌های مشابه ایرفویل به عنوان بدن دوبعدی دلفین، بیشتر به بررسی جریان حول بدن دلفین در شرایط سکون بدن دلفین پرداخته‌اند و در معدود موارد متحرک بودن مرز بدن تابع تغییر شکل معین نشده و الگوی جریان اطراف بدن آبزی (از نظر آرام یا آشفته بودن) مشخص نبوده و همچنین وابستگی به زمان در تحلیلهای مذکور کمتر مورد تاکید بوده است. در حالی که در این پژوهش تمرکز اصلی بر بررسی جریان ناپایا به همراه در نظر داشتن حرکت دینامیکی مرز بدن دلفین بوده و تاثیر فرکانس حرکت بدن دلفین و همچنین تغییر طول بخش متحرک دم دلفین تحلیل شده و تاثیر هر یک به طور جداگانه بر میدان جریان و پارامترهای پیشران در جریان آشفته اطراف بدن دلفین متحرک مورد بحث قرار است.

آشفته از این روش استفاده شده است [۱۴]. در روابط (۵) و (۶) معادلات انرژی جنبشی - نرخ اضمحلال آشفته (k-ε) معرفی می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

در معادلات فوق ε بیانگر نرخ اضمحلال آشفته بوده و k انرژی جنبشی آشفته را معرفی میکند. همینطور σ_k عدد پرانتل آشفته انرژی جنبشی و σ_ε عدد پرانتل آشفته برای نرخ اضمحلال است. عبارتهای G_k و C_{2ε}ρ ε²/k به ترتیب بیانگر فرآیندهای تولید برشی و حذف آن ناشی از اضمحلال ویسکوز می باشند. ضرایب تجربی C_{1ε}، C_{2ε}، σ_k و σ_ε با توجه به گزارش های پژوهش های تجربی (...) به ترتیب ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱/۳ و ۱ فرض می شوند. پارامتر G_k که به واسطه گرادیان سرعت متوسط تولید می شود و عبارت ویسکوزیته آشفته μ_t توسط روابط زیر مدل می شود:

$$G_k = -\rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

در رابطه ویسکوزیته آشفته ثابت C_μ برابر با ۰/۰۹ قرار داده می شود.

۳- هندسه و شرایط مرزی مساله

پس از معرفی معادلات لازم جهت حل میدان جریان، لازم است هندسه، دامنه حل، نوع شبکه بندی و شرایط مرزی و اولیه نیز تعیین گردند. با توجه به اینکه شنای دلفین به واسطه حرکت باله دم در راستای بالا و پایین بوده و حرکت عرضی بدن دلفین نقش کمتری در ایجاد نیروی پیشران و درگ ایفا می کند. همچنین با توجه به پژوهش لی و همکاران حدود ۹۰ درصد از نیروی تراست ایجاد شده در حرکت دلفین به دلیل حرکت تناوبی بالا به پایین بدن است. لذا شبیه سازی سه بعدی هندسه تفاوت چشمگیری در نتایج مربوط به عوامل موثر بر پیشران نداشته و موجب افزایش حجم و زمان محاسبات می شود. به همین جهت در این مقاله هندسه دوبعدی دلفین مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰].

شرط مرزی شامل سرعت ثابت در ورودی به اندازه 10(m/s)، فشار نسبی صفر در خروجی، دیوار ثابت (ساکن) برای مرز فوقانی و تحتانی است. بر روی مرز بدن دلفین به دلیل متحرک بودن آن می بایست

زمینه ای بکر می باشد. به همین منظور در حل عددی پیش رو، اثر هندسه بدن دلفین و همینطور نحوه حرکت آن بر شنای آبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای رسیدن به این هدف از نرم افزار آنسیس فلونت نسخه ۱۵۵ استفاده شده است. ایجاد حرکت در بدن دلفین از تعریف توابع یودی اف^۶ و استفاده از امکان مش متحرک^۷ انجام می پذیرد. در ادامه میدان فشار و جریان اطراف بدن دلفین و همچنین اثر فرکانس تناوب پیکره آبی بر الگوی تغییرات ضرایب درگ، لیفت و ایجاد گردابه بررسی شده است. آشفته گی جریان آب اطراف بدن دلفین از طریق بررسی انرژی جنبشی آشفته گی و خواص دیگر مربوط به این رژیم جریان انجام شده است.

بخش های بعدی این مقاله به ترتیب شامل معرفی معادلات حاکم، روش حل عددی، هندسه و شرایط مرزی، گزارش نتایج و بحث و جمع بندی است.

۲- معادلات حاکم

با توجه به طبیعت جریان آب حول بدن آبی، جریان دو بعدی، غیرقابل تراکم، ویسکوز و هم دما بوده و سیال از نوع نیوتنی است. به همین دلیل معادلات بقا شامل پیوستگی^۸ و نویر-استوکس^۹ می باشند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_x) + \nabla \cdot (\rho u_x \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla (u_x)) - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_y) + \nabla \cdot (\rho u_y \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla (u_y)) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \quad (3)$$

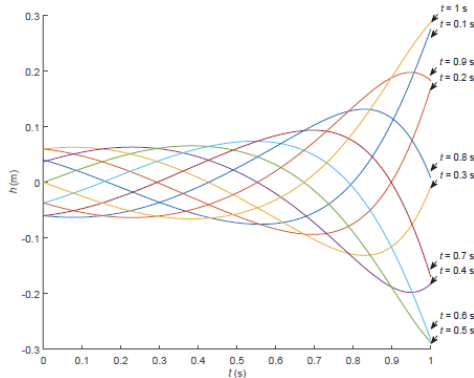
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_z) + \nabla \cdot (\rho u_z \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla (u_z)) - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \quad (4)$$

در معادلات (۱) تا (۴)، $\mathbf{u} = u_x \hat{i} + u_y \hat{j} + u_z \hat{k}$ بوده و u_x و u_y و u_z به ترتیب مولفه های سرعت جریان در راستای محورهای مختصات کارتزین است. ρ بیانگر چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی سیال و P فشار است. در معادلات (۱-۴) می توان از گرانش در راستای محور x و z صرف نظر نمود. به دلیل ناپایا بودن حل، ترم های وابسته به زمان t نیز در معادلات حضور دارند. همچنین به دلیل اینکه عمده تغییرات شکل بدن دلفین را می توان در دو بعد فرض نمود، جریان دوبعدی در صفحه (x, y) فرض شده است.

باتوجه به اینکه جریان سیال در ورودی به صورت کاملاً توسعه یافته فرض شده و حل رژیم جریان آشفته در اطراف بدن دلفین مد نظر است مدل (k-ε) برای جریان آشفته در اطراف هندسه های پیچیده پیشنهاد شده است. همچنین با وجود فرض ایزوتروپیک بودن ویسکوزیته آشفته گی (μ_t) در این روش، به دلیل کاهش هزینه محاسبات در این مدل و پاسخگویی برای بازه وسیعی از جریان های

$$f(x_n) = 0.21 - 0.66x_n + 1.1x_n^2 + 0.35x_n^8 \quad (ج-۹)$$

در عبارت مثلثاتی $\sin(2\pi ft)$ ، پارامترهای f, t به ترتیب زمان و فرکانس تناوب بدن دلفین است. در پژوهش لی و همکاران [۱۰] معادله معرفی شده روماننکو [۱۶] در زمان‌های مختلف بر حسب طول بی بعد بدن دلفین ترسیم شده است:



شکل ۱- ایجاد حرکت موجی در بدن دلفین در زمان‌های مختلف [۱۰]

معادله دیگری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است با این فرض بوده که نیمه ابتدایی بدن دلفین شامل سر دلفین حرکت در راستای محور افقی ساکن بوده و نیمه دوم بدن شامل دم دارای حرکت تناوبی است. تمرکز اصلی در بررسی این معادله معطوف به طول بازه شروع تناوب است. به عبارت دیگر طول بی بعد اعمال معادله، در بازه‌های $0/5, 0/7, 0/9$ تا انتهای بدن بوده است.

$$f(x_n) = (x_n - x_i) \sin(2\pi ft) \quad (۱۰)$$

$$x_i = 0.5; 0.7; 0.9$$

ابعاد هندسی دلفین در دو بعد در جدول ۲ ذکر شده است که با توجه به اطلاعات ارائه شده در مراجع [۲، ۱۰، ۱۷] به هندسه مساله اعمال شده است. همین‌طور هندسه اولیه و شبکه‌بندی شده در شکل ۲ قابل مشاهده است. به منظور تشریح بیشتر روند حل با استفاده از شبکه-بندی متحرک جدول ۳ مشخصات ورودی نرم‌افزار را بیان می‌کند.

طول حداکثر	1 (m)
حداکثر دامنه تناوب دم	0.25 (m)
طول دامنه حل (در راستای x)	32 (m)
عرض دامنه حل (در راستای y)	24 (m)

شرط حرکت با توجه به مکانیزم مورد نظر اعمال گردد. توابع متنوعی برای بیان حرکت بدن دلفین معرفی شده‌اند. شرط اساسی مقید بودن مرز بدن دلفین به خط مرکزی بدن است، به عبارت دیگر با حرکت خط مرکزی بدن با دامنه‌ای مشخص، دو مرز بالا و پایین بدن نیز متناسب با آن به حرکت درآیند. با تعریف حرکت مرز بدن دلفین می‌بایست شبکه بندی دامنه حل مساله به طوری تعریف گردد تا تناسب بین گام زمانی و مقیاس طولی حل برقرار شود. این بدین معنی است که عدد کورانت^{۱۱} باید در محدوده مشخصی تعریف شده و فرایند حل عددی به درستی همگرا شوند. هندسه شبکه بندی دامنه حل به صورت غیر ساختار یافته^{۱۱} انتخاب شده است چرا که در صورت انتخاب شبکه ساختاریافته^{۱۲}، و به دلیل متحرک بودن شبکه در اطراف بدن حل، نتایج حل واگرا می‌گردد. برای ایجاد شبکه متحرک در اطراف بدن دلفین می‌بایست از ماژول شبکه متحرک نرم افزار انسیس فلونت استفاده شود. حل مساله با استفاده از شبکه بندی متحرک نیازمند بازسازی شبکه و حرکت مرز در هر گام حل می‌باشد. برای ایجاد حرکت در مرز، ماکروهایی^{۱۳} در فلونت معرفی شده است که با توجه به نوع مساله از ماکرو DEFINE_GRID_MOTION استفاده شده است. لیست ماکروهای ذکر شده برای تعیین انواع تغییر شکل و حرکت مرز و شبکه حل در جدول ۱ معرفی شده است:

ماکرو	وظیفه
DEFINE_CG_MOTION	حرکت مرکز ثقل
DEFINE_GRID_MOTION	حرکت شبکه بندی
DEFINE_GEOM	تغییر شکل هندسه

۴- معادلات حرکت مرز بدن دلفین

برای ایجاد حرکت بهینه در ربات می‌بایست حرکت موجی شکل بدن را به گونه‌ای تعریف نمود تا مانورپذیری و سرعت پیشرانندگی حداکثر شوند. برای نمونه شاو و همکاران رابطه‌ای چندجمله‌ای-مثلثاتی برای حرکت ربات ماهی پیشنهاد نمودند [۱۵]. همچنین روماننکو [۱۶] حرکت پریودیک خط مرکز بدن دلفین را توسط یک چندجمله‌ای خطی درجه هشت معرفی نمود:

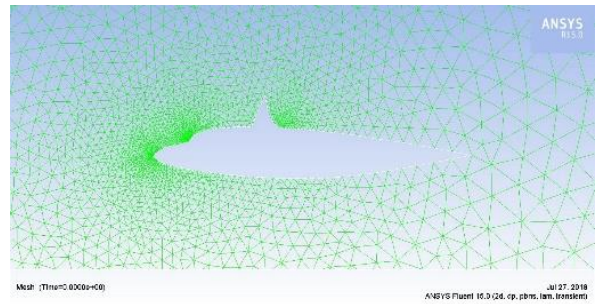
$$h(x_n, t) = h_T f(x_n) \sin(2\pi ft) \quad (الف-۹)$$

که تابع h_T حداکثر دامنه حرکت در راستای محور y است. به منظور ایجاد سادگی در محاسبات، طول بی بعد x_n معرفی شده است و نشان دهنده نسبت طول اندازه گیری شده از سر دلفین (مبدا مختصات) بر کل طول بدن دلفین است:

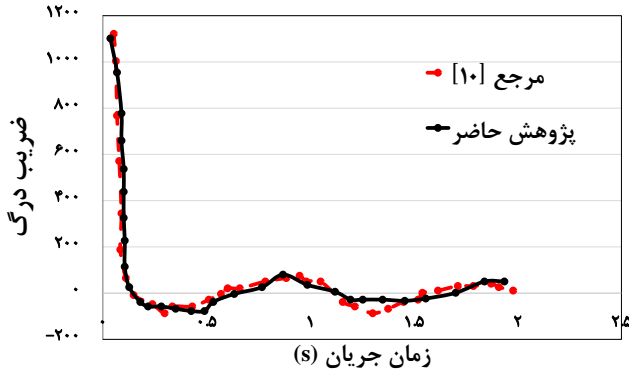
$$x_n = \frac{x}{L} ; \quad 0 < x_n < 1 \quad (ب-۹)$$

تابع $f(x_n)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

همراه باله فوقانی بدن دلفین برای شبیه سازی استفاده شده است؛ در حالی که در این پژوهش هندسه واقعی بدن دلفین در دوبعد به همراه اعوجاج های طبیعی موجود در ناحیه دماغه نیز لحاظ گردیده است.



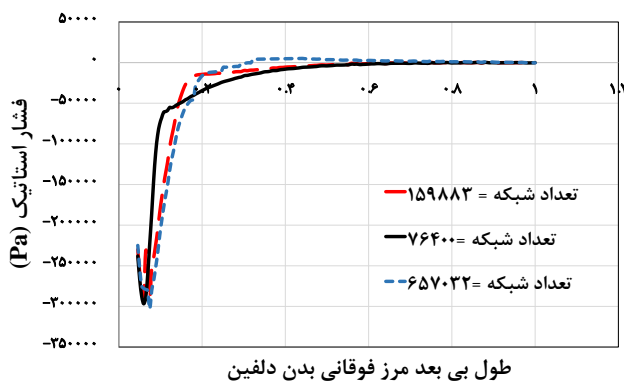
شکل ۲- هندسه دوبعدی شبکه بندی شده دلفین



شکل ۳- اعتبار سنجی ضریب درگ در فرکانس تناوب ۰.۵ هرتز با پژوهش عددی لی و همکاران [10]

۶- تحلیل حساسیت شبکه بندی

از آنجا که انتخاب بهینه‌ی تعداد سلول محاسباتی موجب کاهش زمان حل و حفظ دقت حل می‌گردد، آنالیز حساسیت شبکه بندی در فرآیند حل عددی یکی از ضروریات به شمار می‌رود. در این بخش از پژوهش برای بررسی عدم وابستگی نتایج مدل سازی به تعداد سلولهای محاسباتی، سه حالت تعداد شبکه محاسباتی در دوبعد مطرح می‌شود. این سه حالت برای نمودار فشار استاتیک بر روی مرز فوقانی بدن دلفین در فرکانس تناوب ۱،۲۵ هرتز و در حرکت رو به بالا بدست آمده است. تعداد سلول های محاسباتی به ترتیب ۷۶۴۰۰، ۱۵۹۸۸۳ و ۶۵۷۰۳۲ عدد استفاده شده است. محاسبات نشان داد که با افزایش تعداد سلول از ۱۵۹۸۸۳ تا ۶۵۷۰۳۲ به طور متوسط میزان دقت حل تا حدود ۳،۴٪ افزایش یافت در حالی که زمان لازم برای شبیه سازی تا حدود ۵ برابر افزایش یافت. لذا در محاسبات این پژوهش از تعداد سلول ۱۵۹۸۸۳ استفاده شده است.



شکل ۴- بررسی استقلال از شبکه بندی برای نمودار فشار استاتیک در طول مرز فوقانی بدن دلفین در فرکانس تناوب ۱،۲۵ هرتز رو به بالا

جدول ۳- مشخصات شبکه بندی متحرک

روش شبکه بندی	پارامترها
Smoothing	تنظیمات
	آیتم
	1 Spring Constant Factor
	0.001 Laplace node Relaxation
Smoothing	20 Convergence Tolerance
	20 Number of Iterations
	0.000525 Minimum length Scale (m)
Remeshing	0.168327 Maximum length Scale (m)
	0.643188 Maximum cell skewness
	0.7 Maximum face skewness
	5 Size remeshing interval
	3 Sizing function resolution
	138.6 Sizing function variation
	0.3 Sizing function rate

شایان ذکر است که در بیشتر پژوهش های پیشین برای شبیه سازی هیدرودینامیکی دلفین از هندسه ایرفویل با مقیاسهای مختلف در نظر گرفته شده است که در بعضی موارد اخیر نیز با افزودن یک باله فوقانی به پروفیل ایرفویل سعی بر ایجاد شباهت بیشتر به هندسه دلفین واقعی نموده اند [۱۰]. با این اوصاف و عدم در نظر گرفتن ظرافتهای هندسی بدن دلفین، افزایش خطا در نتایج گزارش شده اجتناب ناپذیر است؛ که پژوهش حاضر با توسعه هندسه مشابه بدن دلفین سعی بر افزایش دقت و صحت حل نموده است.

۵- اعتبار سنجی

برای آنکه بتوان درک عمیق تری از قابلیت شبیه سازی انجام یافته به منظور مطالعه شنای ربات دلفینی در دوبعد داشت، می بایست در گام اولیه صحت نتایج بدست آمده را با مرجع تجربی یا عددی متناسب آن به اثبات رساند. در همین راستا با مدل سازی نتایج پژوهش لی و همکاران [۱۰] و مقایسه نتایج هندسه پژوهش حاضر برای فرکانس تناوب 0.5 هرتز در بازه زمانی جریان بین ۰ تا ۱،۹۴ ثانیه نمودار زیر برای ضریب درگ گزارش شد. همانطور که مشاهده می شود نتایج شبیه سازی با حداکثر خطای ۴،۳۷٪ بیانگر صحت مدل هندسی و حل مساله این پژوهش است. لازم به یادآوری است که یکی از منابع خطا در این شبیه سازی به دلیل تفاوت در هندسه بوده چراکه در پژوهش لی و همکاران [۱۰] از هندسه ایرفویل به

۶- گزارش نتایج

۶-۱- میدان سرعت، فشار و ضرایب درگ و لیفت

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد، با توجه به استفاده از دو معادله (۹- الف) و (۱۰) که به ترتیب برای بررسی اثر فرکانس و طول شروع تناوب برای ایجاد حرکت در بدن دلفین می‌باشند، تغییرات میدان جریان اعم از میدان سرعت، فشار، نیروهای وارد از طرف سیال به جسم (مانند درگ و لیفت) و پارامترهای آشفتگی جریان بررسی شده اند. شکل الف-۱ در پیوست الف کانتور سرعت در حرکت روبه بالا و پایین دلفین با اعمال معادله (۹- الف) در فرکانس تناوبی ۰/۲۵ هرتز را نشان می‌دهد. کانتور سرعت در گام‌های مختلف دچار تغییرات عمده‌ای شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اندازه سرعت در پشت بدن رفته رفته کاهش پیدا کرده است. این کاهش سرعت در گام‌های نهایی با گستره وسیعی مشاهده می‌گردد (بازه تغییرات سرعت در کانتور الف-۱ بین ۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه). همچنین در حرکت به سمت پایین در ناحیه انتهایی باله دم نیز یک ناحیه دچار شتابگیری شده است که با رنگ قرمز (سرعت بین ۲۶ تا ۳۰ متر بر ثانیه) مشخص شده است. شکل الف-۲ در پیوست الف نیز تغییرات فشار را در اطراف بدن دلفین در فرکانس تناوبی ۰/۲۵ هرتز نشان می‌دهند. بیشترین میزان فشار در نوک دماغه دلفین و همچنین در جلو باله فوقانی با مقدار ۱۹۰ تا ۲۱۲ کیلو پاسکال مشاهده می‌شود؛ که این فشار بیشینه با افزایش تقعر بدن دلفین مقدار بیشتری به خود می‌گیرد. ناحیه فشار کمینه نیز در حرکت رو به پایین با افزایش زمان حل، از بالای بدن دلفین به سمت دم و پشت دلفین انتقال می‌یابد.

در شکل ۵ و ۶ تاثیر تغییرات فرکانس تناوب دم بر میدان سرعت و فشار در گام نهایی حل نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس تناوب، ناحیه با سرعت کم (رنگ آبی تیره و روشن با سرعت صفر)، کوچکتر شده و به عبارتی کانتور شکل یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد. در شکل ۶ نیز در حرکت روبه بالا، فشار بیشینه با مقدار ۱۸۷ تا ۲۰۴ کیلو پاسکال در همه فرکانس‌ها در نوک دماغه و جلو باله فوقانی اتفاق می‌افتد اما نکته شایان ذکر ایجاد ناحیه پرفشار دیگری در بالای باله دم در فرکانس‌های بالاتر است. در حرکت روبه پایین بدن دلفین نیز ناحیه با فشار کمینه در حال انتقال از پشت دم به روی مرز بالای بدن است همچنین ناحیه پرفشاری در فرکانس‌های بالاتر زیر بدن دلفین ایجاد می‌گردد.

در شکل ۷ و ۸ تغییرات نیروی درگ و لیفت بر حسب زمان جریان در فرکانس تناوب‌های مختلف گزارش شده است. با افزایش زمان جریان و به دنبال آن انحراف بیشتر دم از راستای محور، مشاهده می‌شود که ضرایب درگ و لیفت ابتدا کاهش شدید داشته و سپس با شیب ملایمی افزایش می‌یابند. همانطور که مشاهده می‌شود، با

افزایش فرکانس حل، ضریب درگ تغییرات کمتری پیدا کرده و به عبارتی افت و خیز نمودار محدودتر می‌گردد. تغییرات کلی ضریب لیفت نیز با افزایش فرکانس تناوب ملایم‌تر شده و به طور خاص این موضوع در حرکت روبه پایین دم دلفین محسوس‌تر است. در ادامه با اعمال معادله ۱۰ به خط مرکزی و بدن دلفین در طول‌های مختلف بدن دلفین تغییرات سرعت و فشار بررسی شده است که در شکل‌های ۹ و الف-۳ در پیوست مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۹، ناحیه ویک پشت باله فوقانی با کاهش طول بخش متحرک دم در حرکت رو به بالا دستخوش تغییر چندانی نشده و در حرکت رو به پایین کوچکتر می‌شود.

با توجه به نمودار الف-۳ در پیوست الف، به دلیل عدم تقارن هندسی در مرز بالا و پایین بدن دلفین، تغییرات الگوی فشار اطراف بدن دلفین کاملاً متفاوت است. در حرکت رو به بالا با کاهش طول متحرک نیمه پشتی بدن دلفین ناحیه پرفشار (ناحیه قرمز رنگ با مقدار ۲۳۰ تا ۲۴۰ کیلو پاسکال) گستره کمتری می‌یابد در حالی که در حرکت رو به پایین ناحیه با فشار حداقلی (آبی رنگ) کوچکتر می‌شود.

در شکل ۱۰ و ۱۱ تغییرات نیروی درگ و لیفت بر حسب زمان جریان در طول‌های مختلف تناوب حرکت دم دلفین گزارش شده است. همانطور که راجع به شکل ۹ و الف-۳ در پیوست الف اشاره شد، به علت نامتقارن بودن هندسی در بدن دلفین الگوی تغییرات ضرایب درگ و لیفت در حرکت با لا و پایین باهم تفاوت دارند. میزان تغییرات ضریب درگ در حرکت روبه پایین نسبت به حرکت روبه بالا محسوس‌تر است (شکل ۱۰). همین موضوع در شکل ۱۱ برای ضریب لیفت نیز صادق است.

۶-۲- بررسی آشفتگی جریان

انرژی جنبشی آشفتگی

همانطور که در ابتدای بحث نیز اشاره شد، در فرآیند شبیه‌سازی مساله معادلات آشفتگی و پارامترهای مربوط به آن در نظر گرفته شده اند. در همین راستا بررسی تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی برای دو حالت اعمال معادله با تغییر فرکانس حرکت (معادله ۹- الف) و معادله با تغییر طول بخش متحرک بدن دلفین انجام شده است. با توجه به تعریف انرژی جنبشی آشفتگی $k = 0.5(u_x'^2 + u_y'^2)$ که ناشی از ترم اغتشاشی سرعت در میدان جریان است، تغییرات این پارامتر در کانتورهای شکل الف-۴ و الف-۵ پیوست نمایش داده شده است. در شکل الف-۴ مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس موج اعمالی به بدن دلفین در حرکت روبه پایین مقدار ماکزیمم انرژی جنبشی آشفتگی در اثر ترم‌های اغتشاشی سرعت از یک ناحیه بزرگ در پشت دم به نزدیکی باله فوقانی انتقال می‌یابد. همچنین هنگام

با افزایش فرکانس تناوب از ۰٫۲۵ تا ۱٫۲۵ هرتز بوده (بازه تغییرات بین ۰ تا ۱۰۰۰) و اینکه قدرت تشکیل ورتکسها در یک فرکانس مشخص در حرکت رو به پایین بیش از حرکت رو به بالای دم بوده است. در حالت دوم وبا اعمال معادله ۱۰ در نمودار الف-۷ مشاهده شد که با کاهش طول بخش متحرک دم قدرت گردابه های تشکیل یافته در انتهای دم بیشتر و همچنین به علت ساکن بودن بخش سر و باله فوقانی، تغییر خاصی در الگوی تشکیل ناحیه گردابه ای در زیر دماغه و بالای باله فوقانی ایجاد نمی شود. در هر دو نمودار الف-۶ و الف-۷ بیشترین قدرت گردابه ها مربوط به سه ناحیه بالای باله فوقانی، دماغه و انتهای دم (در حرکت رو به پایین) با مقدار ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ است.

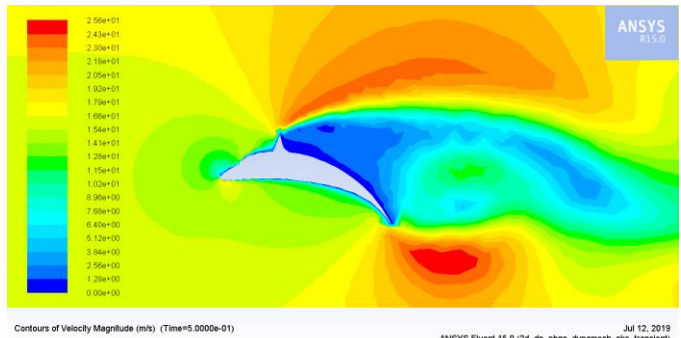
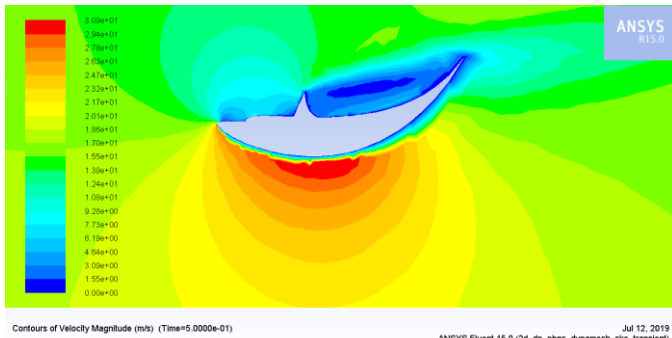
حرکت رو به بالای بدن دلفین با افزایش فرکانس تناوب، ناحیه ماکزیمم انرژی جنبشی آشفتگی کوچکتر می شود. با اعمال معادله ۱۰ شکل الف-۵ نشان می دهد که در حالت حرکت رو به پایین دم بیشترین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در بیشترین طول بی بعد متحرک رخ داده در حالی که تغییرات چشمگیری در انرژی جنبشی آشفتگی در حرکت رو به بالا رخ نمی دهد.

ورتیسیته

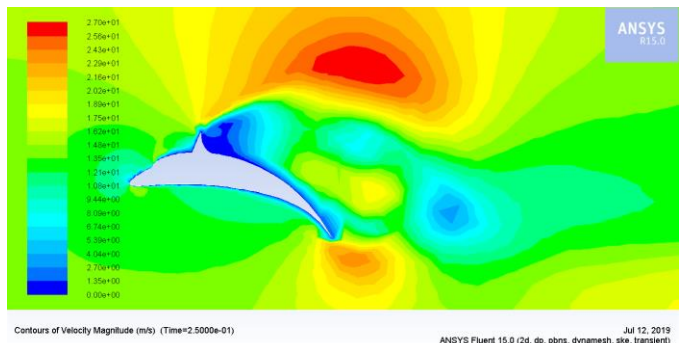
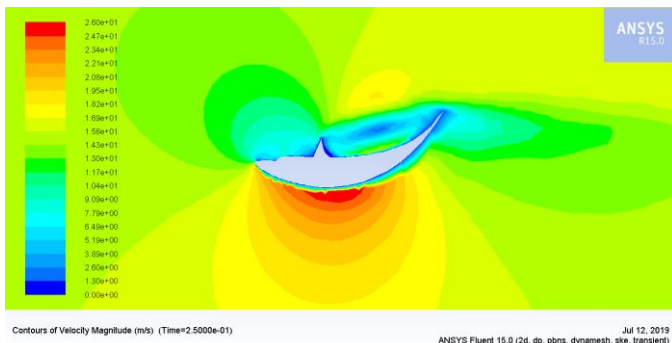
در دو نمودار الف-۶ و الف-۷ در پیوست الف تشکیل گردابه ها در اطراف بدن دلفین در گام نهایی حل برای دو حالت اعمال فرکانس تناوب های مختلف و تغییر طول بخش متحرک دم مشاهده می گردد. نکته قابل توجه در نمودار الف-۶ افزایش قدرت گردابه های

حرکت روبه بالا

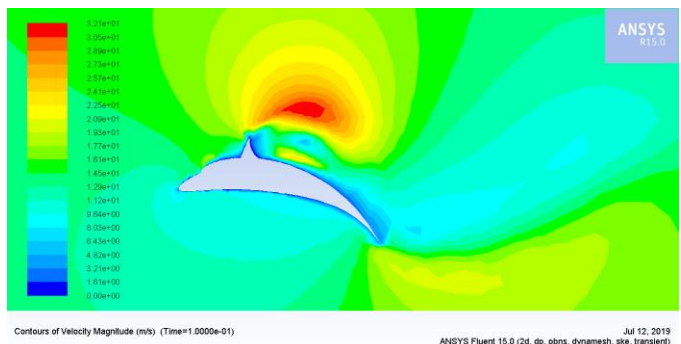
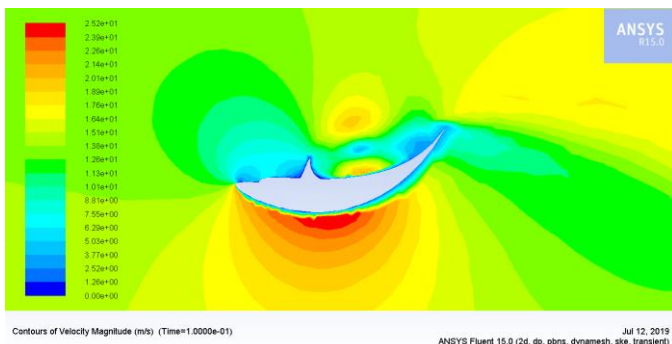
حرکت روبه پایین



(الف)



(ب)

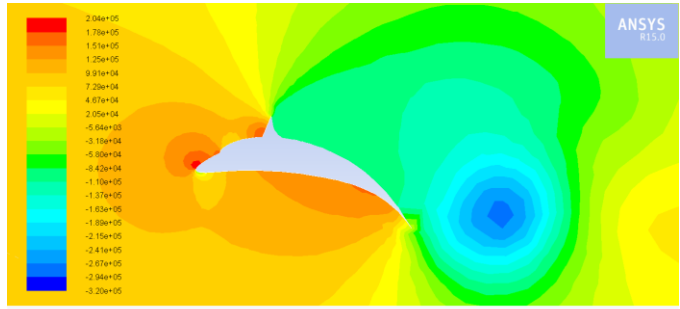
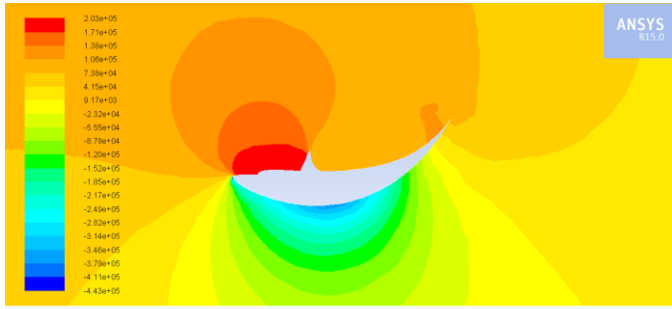


(ج)

شکل ۵- تغییرات کانتور سرعت در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل در فرکانسهای (الف): ۰٫۲۵، (ب): ۰٫۵، (ج): ۱٫۲۵ هرتز

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین



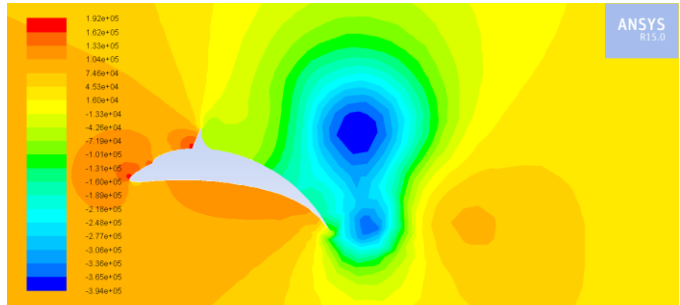
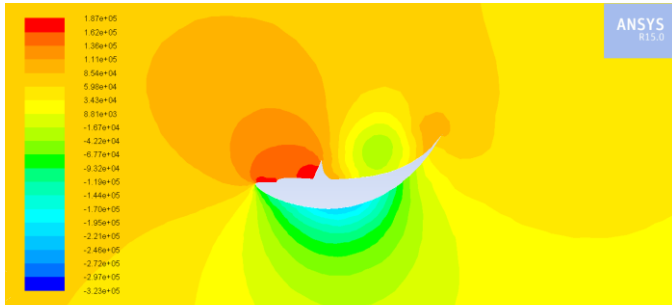
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=5.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=5.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(الف)



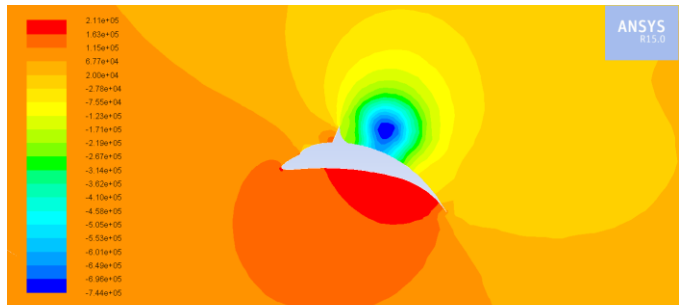
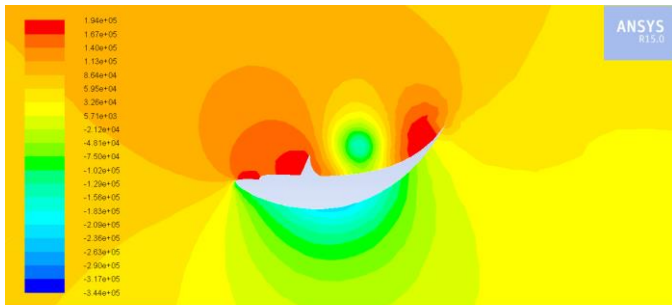
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.5000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=2.5000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ب)



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0000e-01)

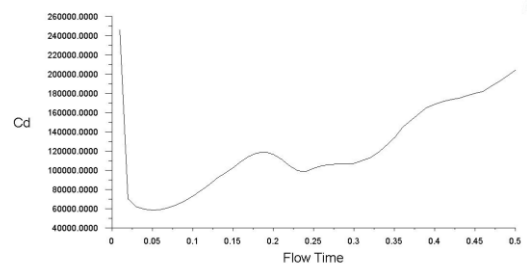
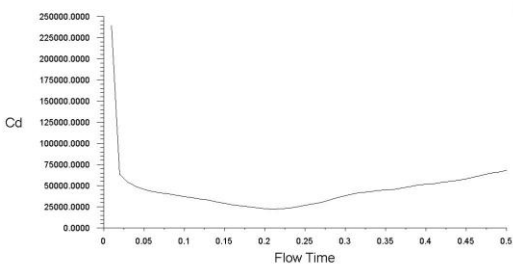
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ج)

شکل ۶- تغییرات کانتور فشار در حرکت روبه پایین و بالا در گام نهایی حل در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین



cd-1 Convergence History (Time=5.0000e-01)

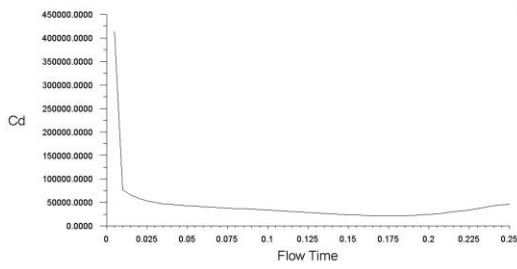
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

cd-1 Convergence History (Time=5.0000e-01)

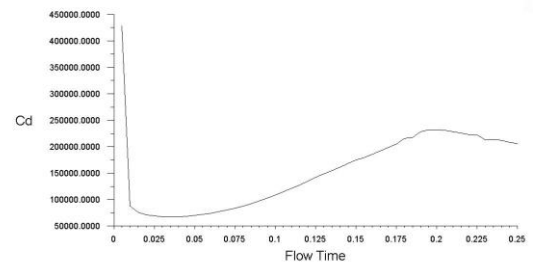
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(الف)

شکل ۷- نمودار تغییرات نیروی درگ در حرکت روبه پایین و بالا بر حسب زمان جریان در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

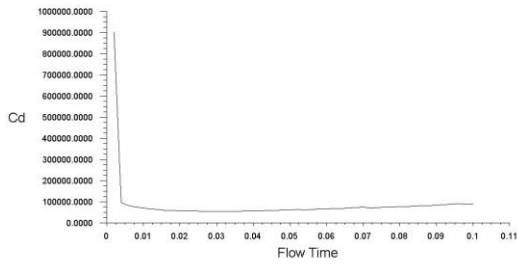


cd-1 Convergence History (Time=2.5000e-01) Aug 01, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

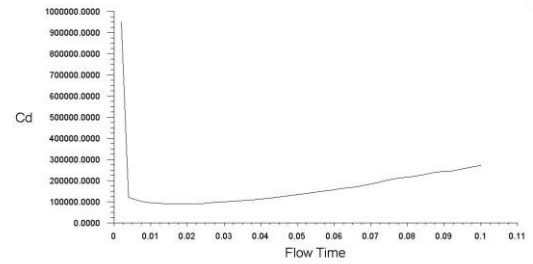


cd-1 Convergence History (Time=2.5000e-01) Aug 01, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ب)



cd-1 Convergence History (Time=1.0000e-01) Aug 05, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

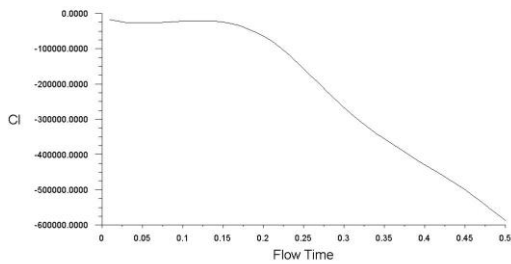


cd-1 Convergence History (Time=1.0000e-01) Aug 03, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

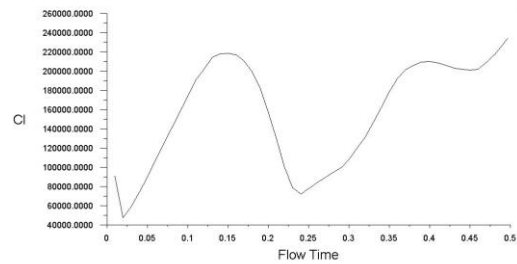
(ج)

شکل ۷ (ادامه) - نمودار تغییرات نیروی درگ در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

حرکت روبه بالا



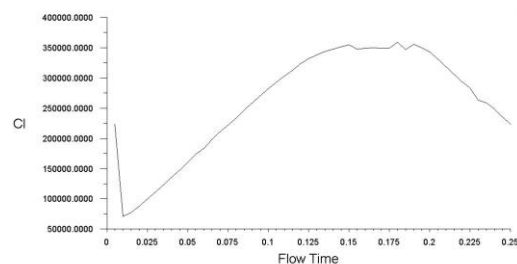
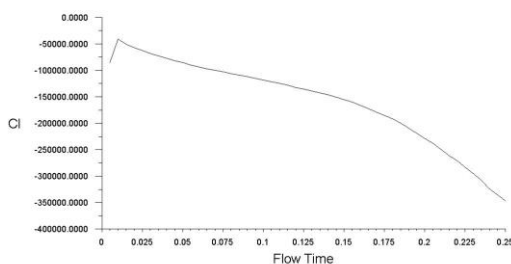
حرکت روبه پایین



cd-1 Convergence History (Time=5.0000e-01) Jul 31, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(الف)

cd-1 Convergence History (Time=5.0000e-01) Aug 01, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

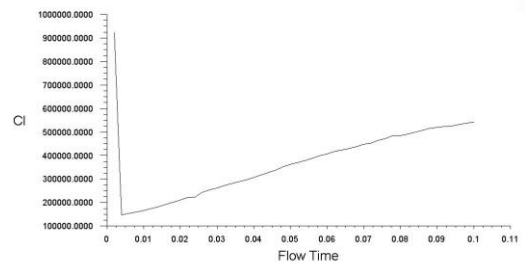
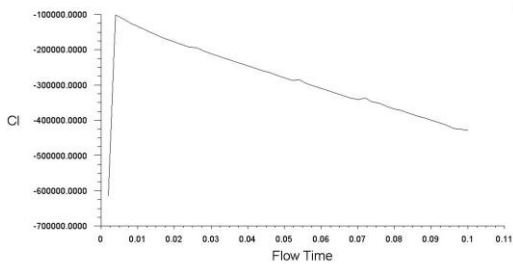


cd-1 Convergence History (Time=2.5000e-01) Aug 01, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ب)

cd-1 Convergence History (Time=2.5000e-01) Aug 01, 2018
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

شکل ۸ - نمودار تغییرات نیروی لیفت در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز



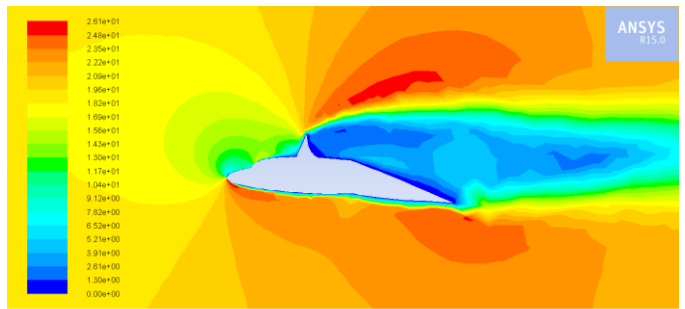
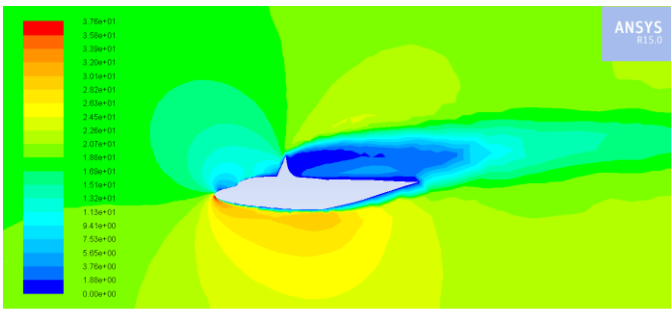
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 05, 2018
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 03, 2018

(ج)

شکل ۸ (ادامه) - نمودار تغییرات نیروی لیفت در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

حرکت روبه بالا

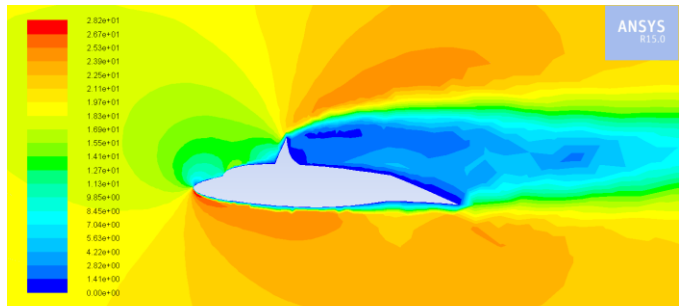
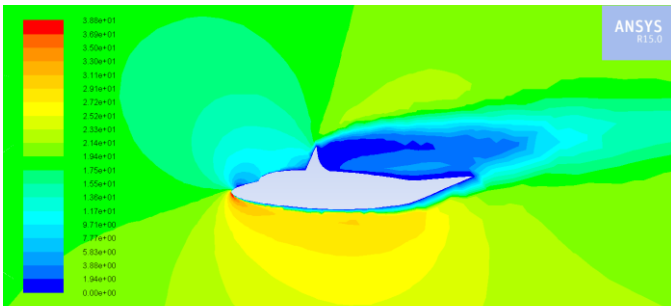
حرکت روبه پایین



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+00) Jul 12, 2019
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+00) Jul 12, 2019
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

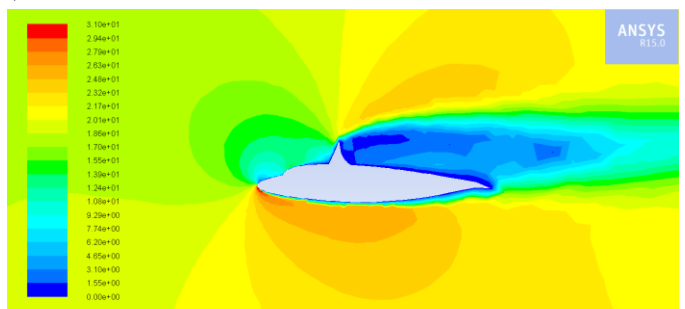
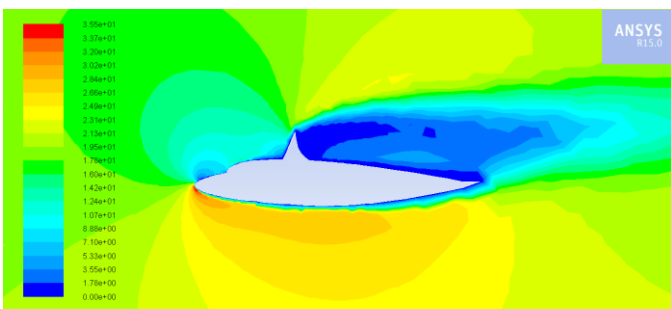
(الف)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+00) Jul 12, 2019
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+00) Jul 12, 2019
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ب)



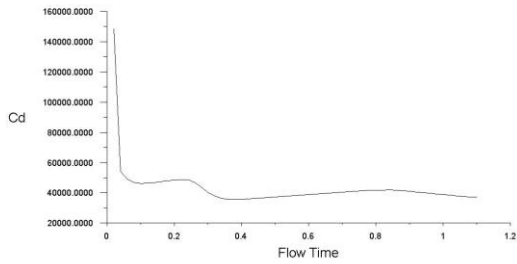
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+00) Jul 12, 2019
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e+00) Jul 12, 2019
 ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

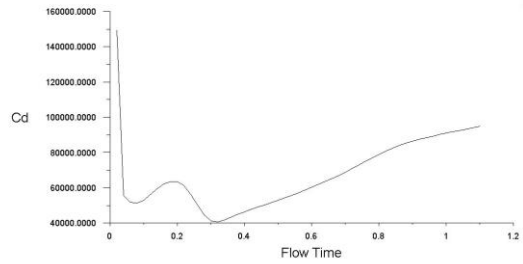
(ج)

شکل ۹ - نمودار تغییرات کانتور سرعت در حرکت رو به پایین و بالا در گام‌نهایی حل و در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹

حرکت روبه بالا

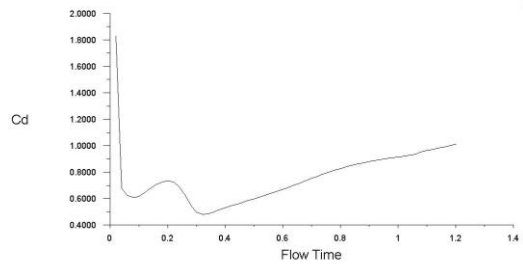
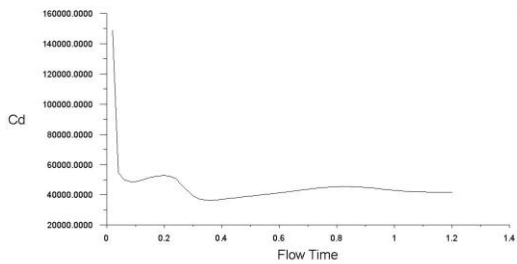


حرکت روبه پایین



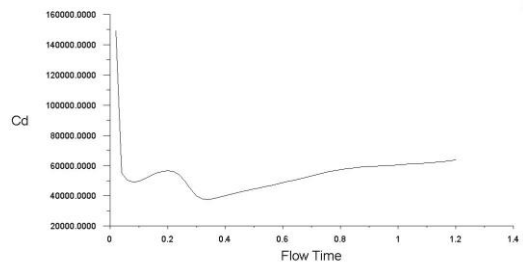
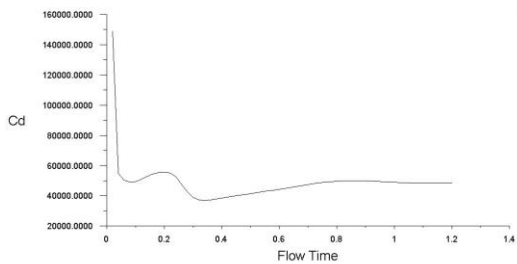
cd-1 Convergence History (Time=1.1000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Jul 28, 2018

(الف)



cd-1 Convergence History (Time=1.2000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 01, 2018

(ب)

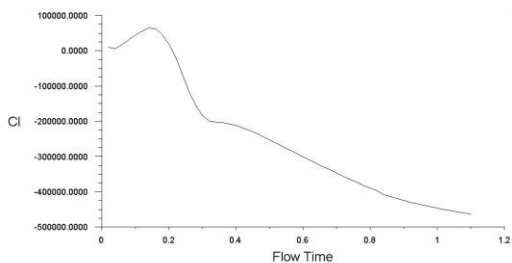


cd-1 Convergence History (Time=1.2000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 01, 2018

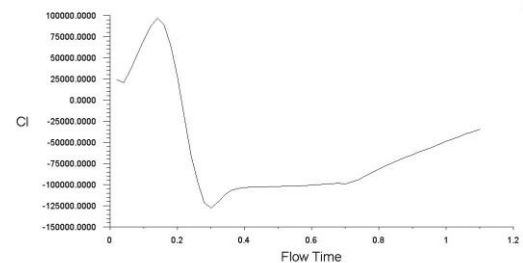
(ج)

شکل ۱۰- نمودار تغییرات ضریب درگ در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹

حرکت روبه بالا



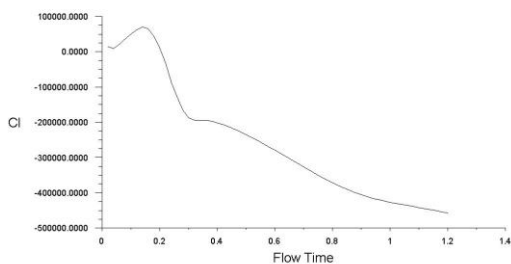
حرکت روبه پایین



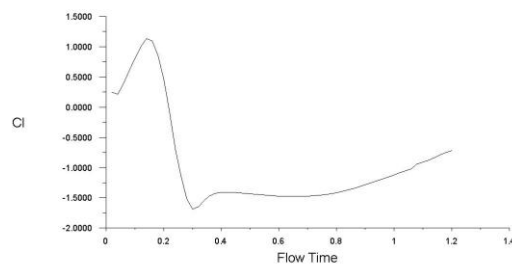
cl Convergence History (Time=1.1000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Jul 28, 2018

(الف)

شکل ۱۱- نمودار تغییرات ضریب لیفت در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹

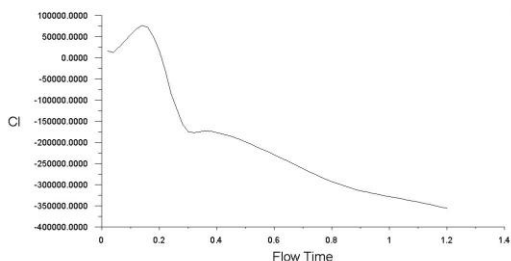


ci-1 Convergence History (Time=1.2000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 01, 2018

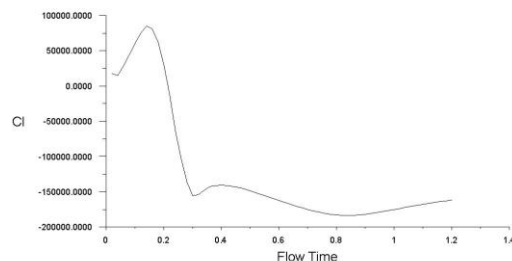


ci-1 Convergence History (Time=1.2000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 01, 2018

(ب)



ci-1 Convergence History (Time=1.2000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 01, 2018



ci-1 Convergence History (Time=1.2000e+00) ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient) Aug 02, 2018

(ج)

شکل ۱۱ (ادامه) - نمودار تغییرات ضریب لیفت در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹.

۷- نتیجه گیری

- با افزایش زمان جریان و انحراف بیشتر دم، ضرایب درگ و لیفت ابتدا کاهش شدید و سپس با شیب ملایمی افزایش می یابند و با افزایش فرکانس، ضریب درگ تغییرات کمتری پیدا کرده و افت و خیز نمودار محدودتر می گردد.
- با افزایش فرکانس تغییرات کلی ضریب لیفت نیز با افزایش فرکانس تناوب ملایم‌تر شده و به طور خاص این موضوع در حرکت روبه پایین دم دلفین محسوس‌تر است.
- با ثابت نگه داشتن بخشی از بدن دلفین و اعمال حرکت به قسمت دم در طول‌های متفاوت مشاهده شد که به علت نامتقارن بودن هندسه، تغییر ضرایب درگ و لیفت در حرکت رو به بالا و پایین باهم تفاوت دارند که تغییرات ضریب درگ در حرکت روبه پایین نسبت به حرکت رو به بالا محسوس‌تر است.
- با افزایش فرکانس موج اعمالی به بدن دلفین در حرکت روبه پایین مقدار ماکزیمم انرژی جنبشی آشفتگی از ناحیه‌ای در پشت دم به نزدیکی باله فوقانی انتقال می یابد. همچنین هنگام حرکت رو به بالای بدن دلفین با افزایش فرکانس تناوب، ناحیه ماکزیمم انرژی جنبشی آشفتگی کوچکتر می شود. با ثابت نگه داشتن بخشی از بدن دلفین و اعمال حرکت به قسمت دم در طول‌های متفاوت مشاهده شد که در حالت حرکت رو به پایین بیشترین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در بیشترین اندازه طول متحرک رخ داده در حالی که تغییرات چشمگیری در انرژی جنبشی آشفتگی در حرکت رو به بالا رخ نمی دهد.

- هدف این پژوهش، انجام تحلیل دینامیک سیالاتی دقیقتر نسبت به مطالعات پیشین (با استفاده از هندسه واقعی بدن دلفین)، بررسی اثر فرکانس حرکت موجی شکل بدن دلفین و اثر طول شروع تناوب دم دلفین بر میدان جریان است. با توجه به موارد ذکر شده می توان نتایج را برای دو معادله (۹-الف) و (۱۰) به منظور ایجاد حرکت در مرز بدن دلفین طبقه بندی نمود:
- با افزایش فرکانس ناحیه با سرعت کمینه در پشت بدن دلفین کوچکتر شده و میدان جریان از نظر اندازه سرعت همگن تر می شود.
- با افزایش فرکانس تناوبی ناحیه با فشار حداقلی در پشت و روی مرز فوقانی بدن دلفین کوچکتر شده و میدان جریان از نظر توزیع فشار همگن تر می شود.
- با افزایش طول بخش متحرک دم، ناحیه ویک پشت باله فوقانی با کاهش طول بخش متحرک دم در حرکت رو به بالا دستخوش تغییر چندانی نشده و در حرکت رو به پایین کوچکتر می شود.
- به دلیل عدم تقارن هندسی در مرز بالا و پایین بدن دلفین، تغییرات الگوی فشار اطراف بدن دلفین در حرکت رو به بالا با کاهش طول متحرک دم، ناحیه پرفشار گستره کمتری می یابد در حالی که در حرکت رو به پایین ناحیه با فشار کمینه کوچکتر می شود.

for robotic dolphin, Acta Automation Sinica, Vol. 40, pp.1933-1941.

8- Wu, Z., Yu, J., Yuan, J. and Tan, M. (2019), *Towards a Gliding Robotic Dolphin: Design, Modeling, and Experiments*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.

9- Nakashima, M., Tsubaki, T. and Ono, K., (2006), *Three-dimensional movement in water of the dolphin robot-control between two positions by roll and pitch combination*, Journal of robotics and mechatronics, Vol. 18, P. 347.

10- Li, K., Yu, J., Wu, Z. and Tan, M., (2016), *Hydrodynamic analysis of a gliding robotic dolphin based on Computational Fluid Dynamics*, In Control Conference (CCC).35.2016 Chinese, P.6008-6013.

11- Mohammadshahi, D., Yousefi-Koma, A., Bahmanyar, S. and Maleki, H., (2008), *Design, fabrication and hydrodynamic analysis of a biomimetic robot fish*, In WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering.

12- Zhou, H., Hu, T., Low, K.H., Shen, L., Ma, Z., Wang, G. et al., (2015), *Bio-inspired flow sensing and prediction for fish-like undulating locomotion: A CFD-aided approach*, Journal of Bionic Engineering, Vol. 12, P.406-417.

13- Li, R., Chen, J., Huang, Y., Liu, L. and Wang, X., (2018), *Numerical Simulation of Hydrodynamic Performance of Dolphin Fluke Motion*, In ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, P.V07BT06A029-V07BT06A029.

14- Adkins, D., and Yan, Y., (2006), *CFD simulation of fish-like body moving in viscous liquid*, Journal of Bionic Engineering, Vol.3, P.147-153.

15- Shao, J., Wang, L. and Yu, J., (2008), *Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperative transportation*, Control Engineering Practice, Vol. 16, P. 569-584.

16- Romanenko, E.V.E., (2002), *Fish and dolphin swimming*: Pensoft Publishers.

17- Riedeberger, D., and Rist, U., (2012), *Numerical simulation of laminar-turbulent transition on a dolphin using the γ -Re θ model*, In High Performance Computing in Science and Engineering, Vol.11, P. 379-391.

- با افزایش فرکانس قدرت گردابه های تشکیل شده در بالا و پشت بدن دلفین بیشتر شده و همچنین با کاهش طول ناحیه متحرک دم، قدرت گردابه های تشکیل شده در ناحیه دم اندکی افزایش می یابد.

کلید واژگان

- 1- Biomimetic
- 2- Pitch
- 3- Yaw
- 4- CFD
- 5- ANSYS FLUENT 15.0
- 6- UDF (User Defined Function)
- 7- Dynamic Mesh
- 8- Continuity
- 9- Navier-Stokes
- 10- Courant Number
- 11- Structured Mesh
- 12- Unstructured Mesh
- 13- Macros

۸- مراجع

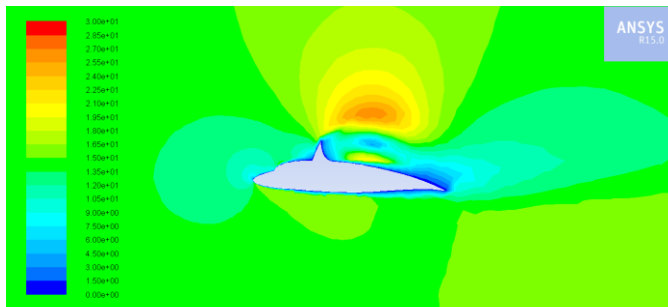
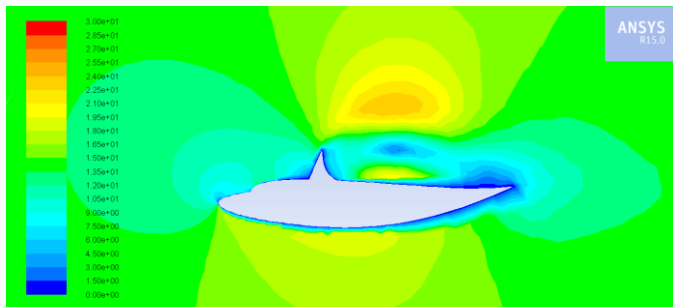
- 1- Lang, T., (1975), *Speed, power, and drag measurements of dolphins and porpoises*, in Swimming and flying in nature, p 552-573
- 2- Fish, F.E. and Rohr, J., (1999), Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance, *Space and naval warfare systems command San Diego CA*.
- 3- Fish, F.E., (1993), *Power output and propulsive efficiency of swimming bottlenose dolphins Tursiops truncatus*, Journal of Experimental Biology, vol. 185, p. 179-193.
- 4- Fish, F.E., Legac.P., Williams, T.M. and Wei, T., (2014), *Measurement of hydrodynamic force generation by swimming dolphins using bubble DPIV*, Journal of Experimental Biology, Vol. 217, P. 252-260.
- 5- Yu, J. Su, Z. Wang, M. Tan, M. and Zhang, J., (2012), *Control of yaw and pitch maneuvers of a multilink dolphin robot*, IEEE Transactions on robotics, Vol. 28, P. 318-329.
- 6- Shen, F., Cao, Z., Zhou, C., Xu, D. and Gu, N. (2013) *Depth control for robotic dolphin based on fuzzy PID control*, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 23.
- 7- Wang, M., Yu, J., Tan, M., Wang, H. and Li, C. (2014), *CPG-based multi-modal swimming control*

پیوست الف

در این پیوست شکل‌های الف-۱ تا الف-۷ که در متن اصلی به آنها اشاره شده است به ترتیب ذکر گردیده است.

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین



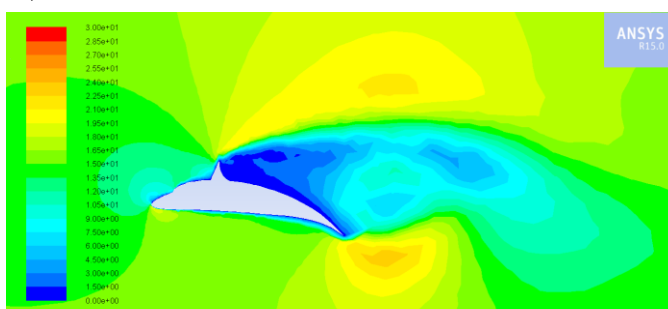
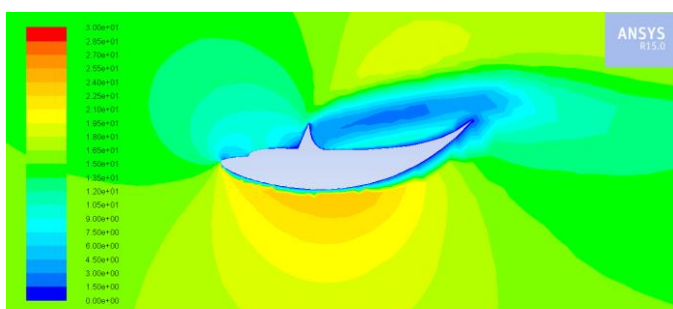
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(الف)



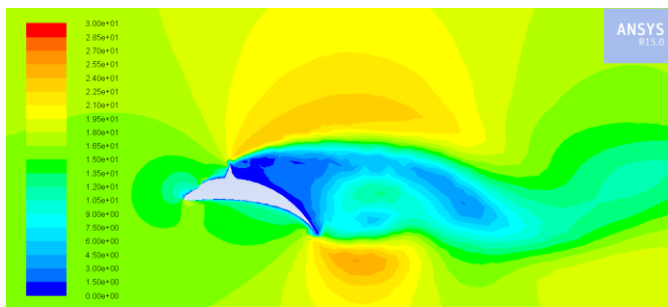
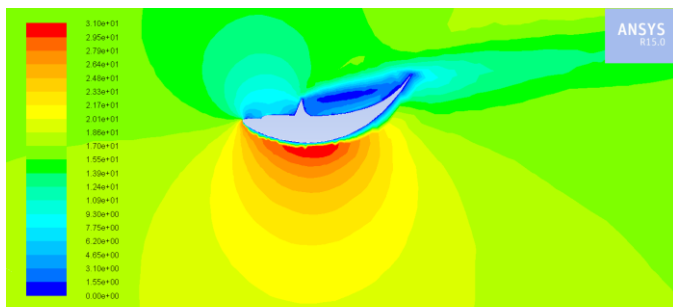
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ب)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.0000e-01)

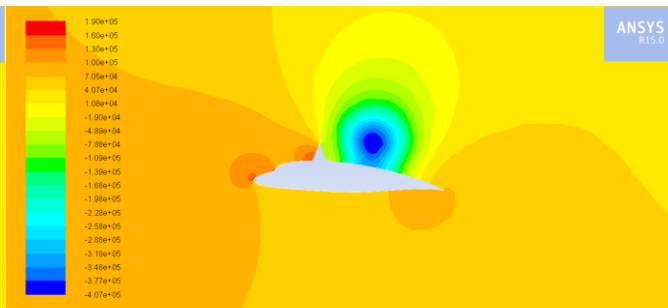
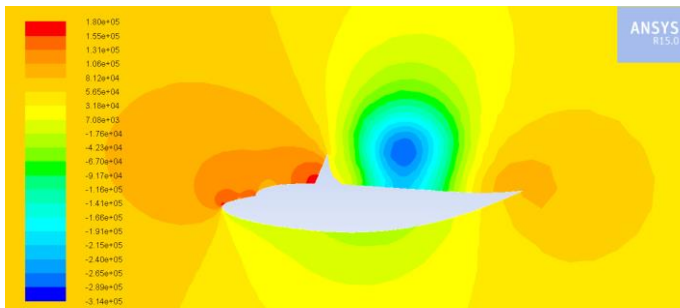
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ج)

شکل الف-۱ - تغییرات کانتور سرعت در حرکت روبه پایین و بالا در گام های (الف: دهم، (ب: سی‌ام، (ج: پنجاهام

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین



Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0000e-01)

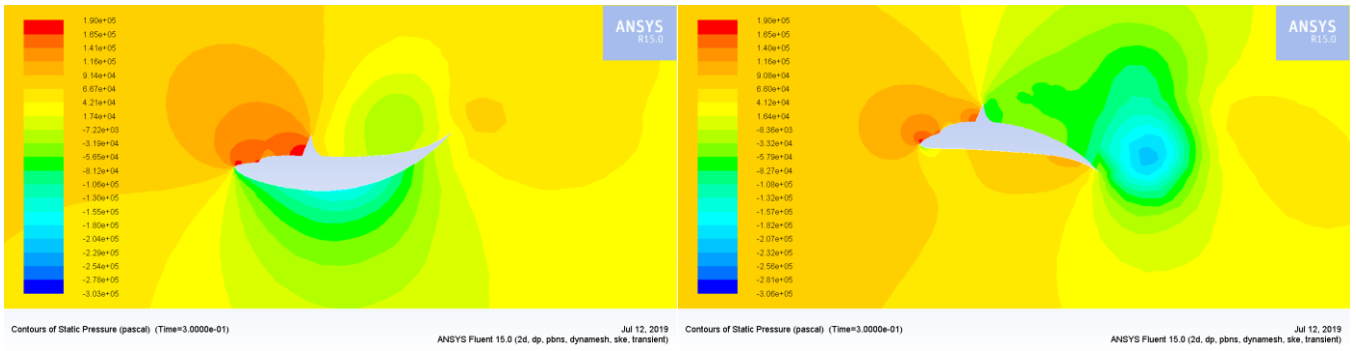
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Static Pressure (pascal) (Time=1.0000e-01)

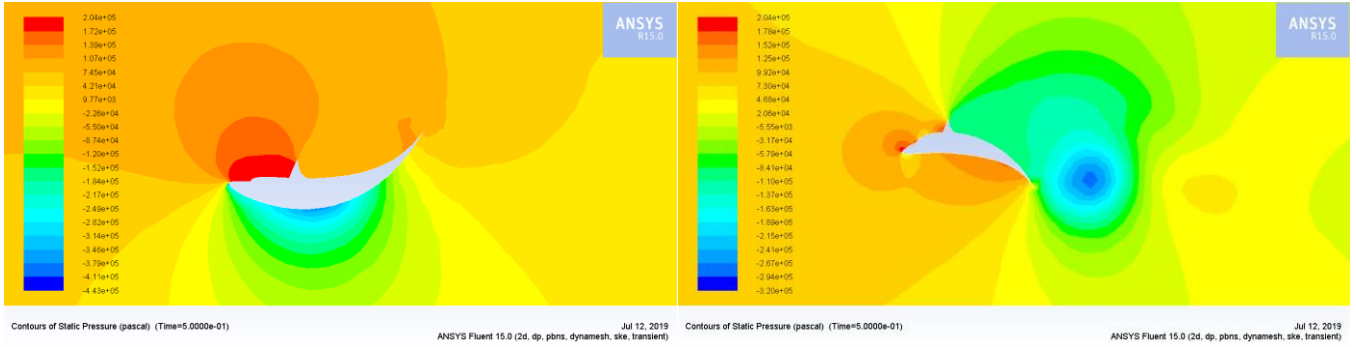
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(الف)

شکل الف-۲ - تغییرات کانتور فشار در حرکت روبه پایین و بالا در گام های (الف: دهم، (ب: سی‌ام، (ج: پنجاهام



(ب)

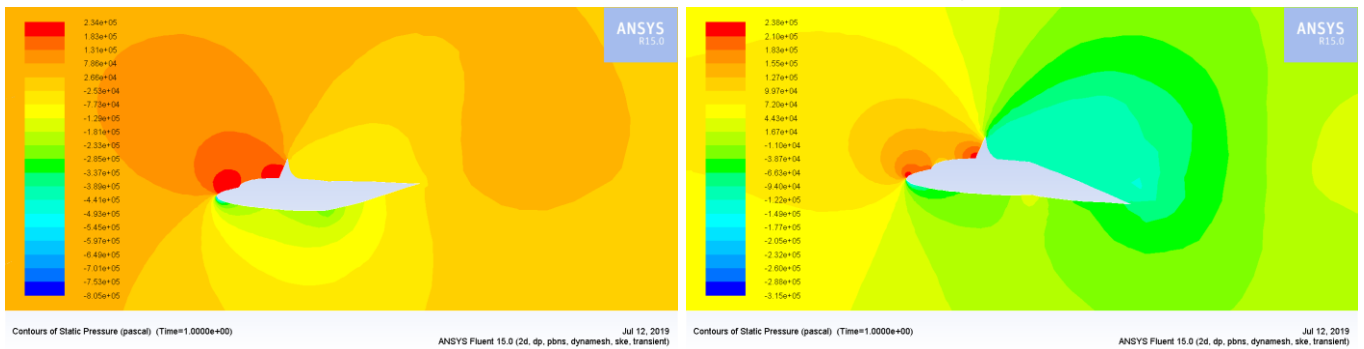


(ج)

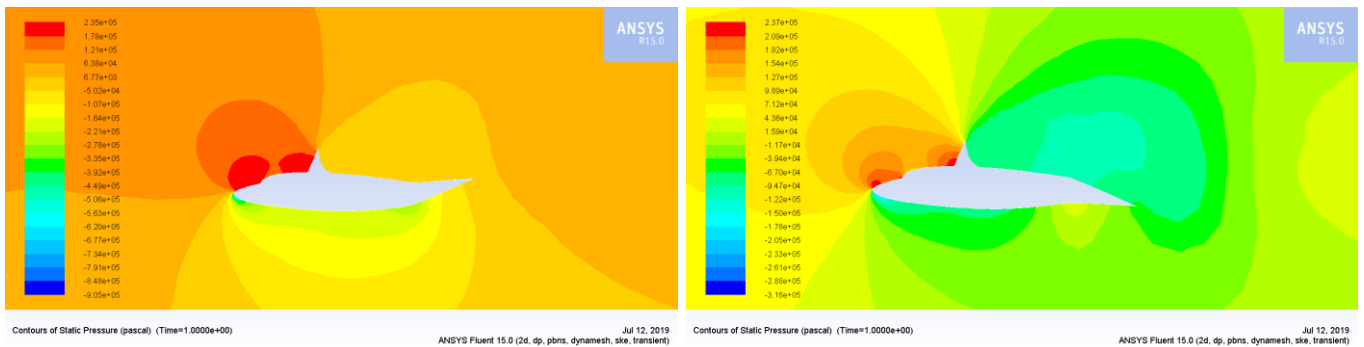
شکل الف-۲ (ادامه) - تغییرات کانتور فشار در حرکت رو به پایین و بالا در گام های (الف): دهم، (ب): سی ام، (ج): پنجاهم

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین

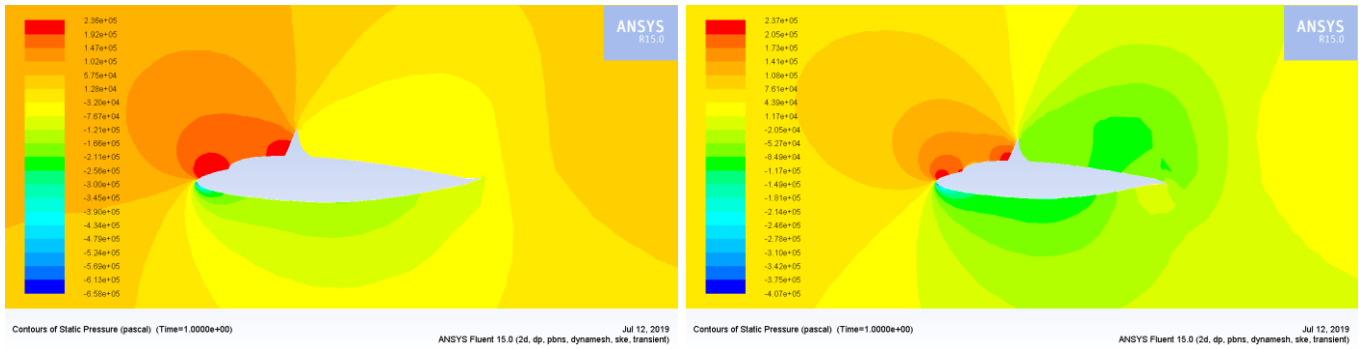


(الف)



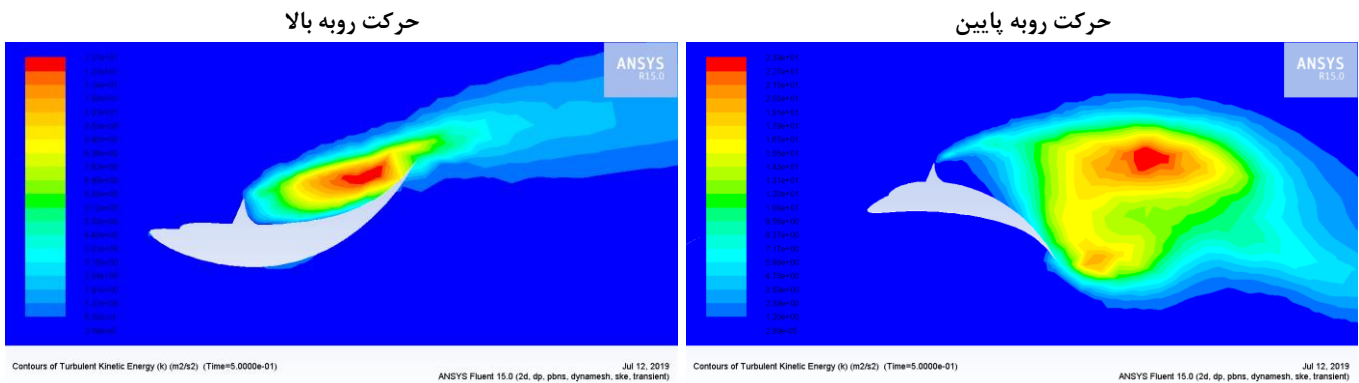
(ب)

شکل الف-۳ - نمودار تغییرات کانتور فشار در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل و در طول های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹

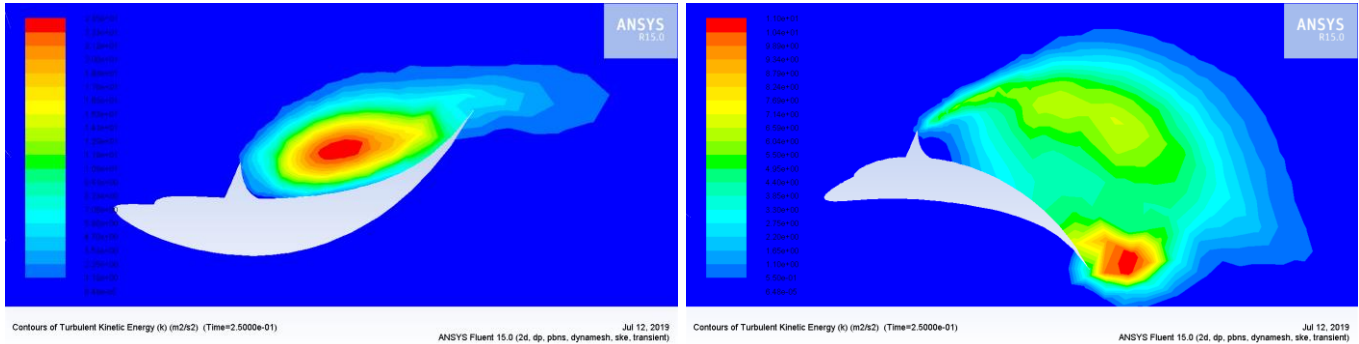


(ج)

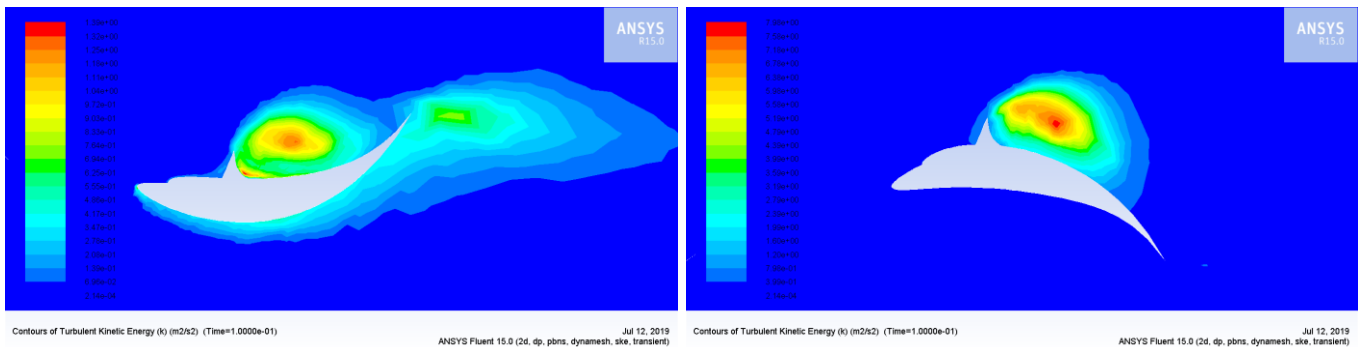
شکل الف-۳ (ادامه) - نمودار تغییرات کانتور فشار در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل و در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹.



(الف)



(ب)

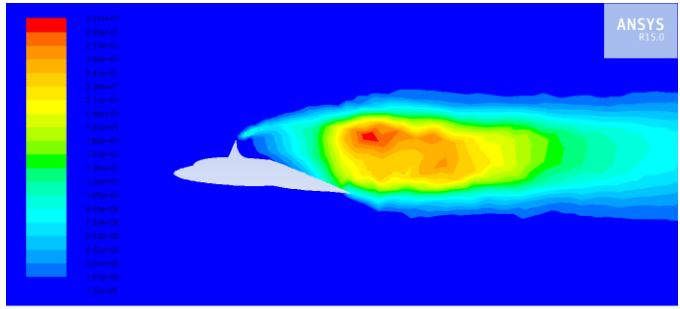
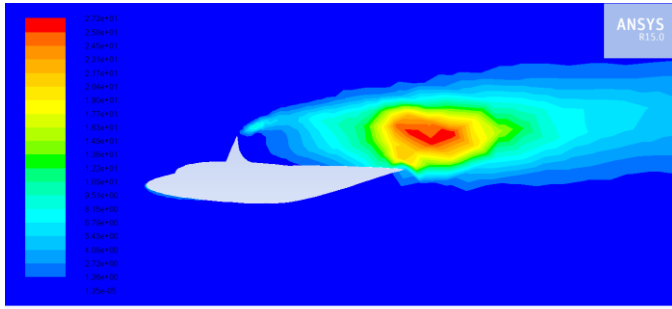


(ج)

شکل الف-۴ - نمودار تغییرانرژی جنبشی آشفتگی در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل و در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرگز

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین



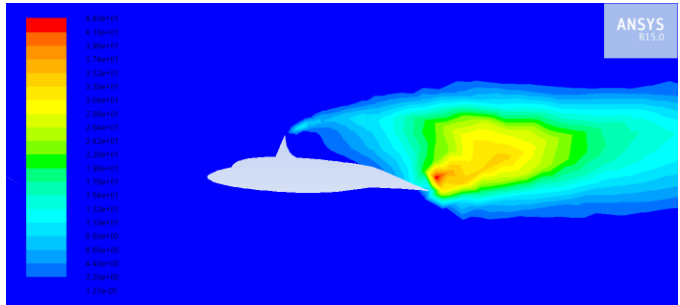
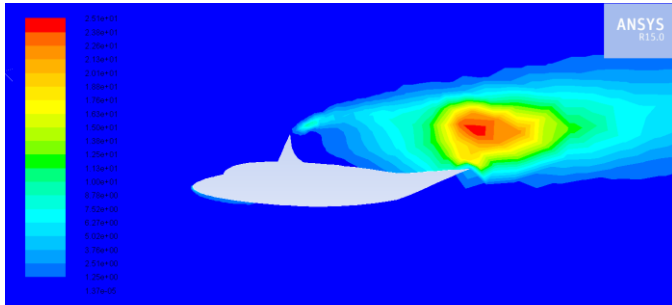
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=1.0000e+00)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=1.0000e+00)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(الف)



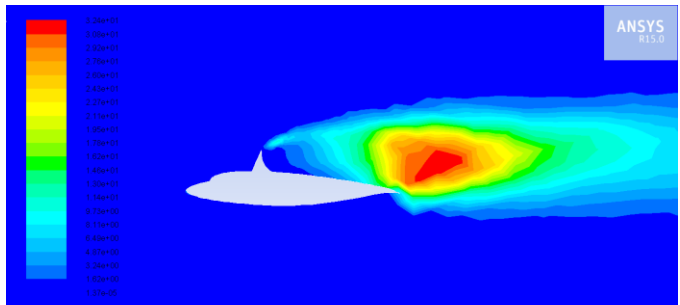
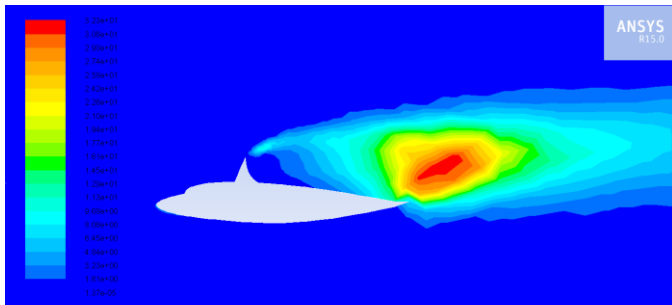
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=1.0000e+00)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=1.0000e+00)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

(ب)



Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=1.0000e+00)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=1.0000e+00)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

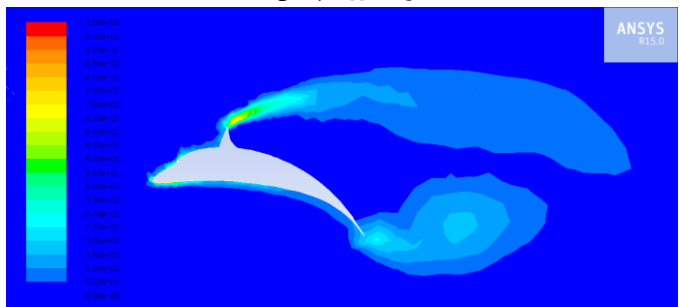
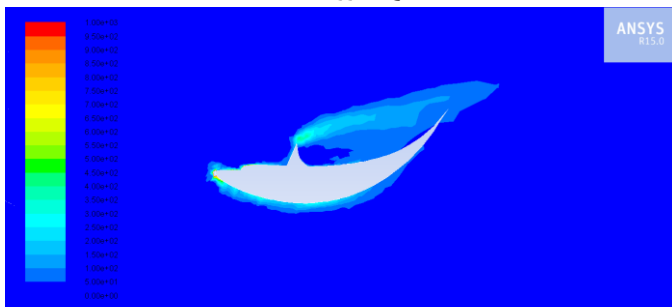
(ج)

شکل الف-۵- نمودار تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل و در طول‌های بی بعد (الف: ۰/۵، ب: ۰/۷، ج):

۰/۹

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=5.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

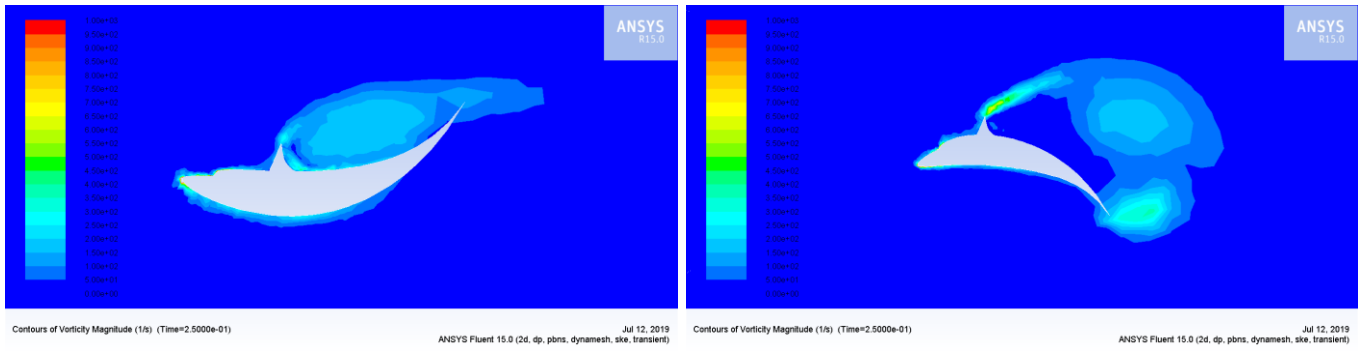
Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=5.0000e-01)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, dynamesh, ske, transient)

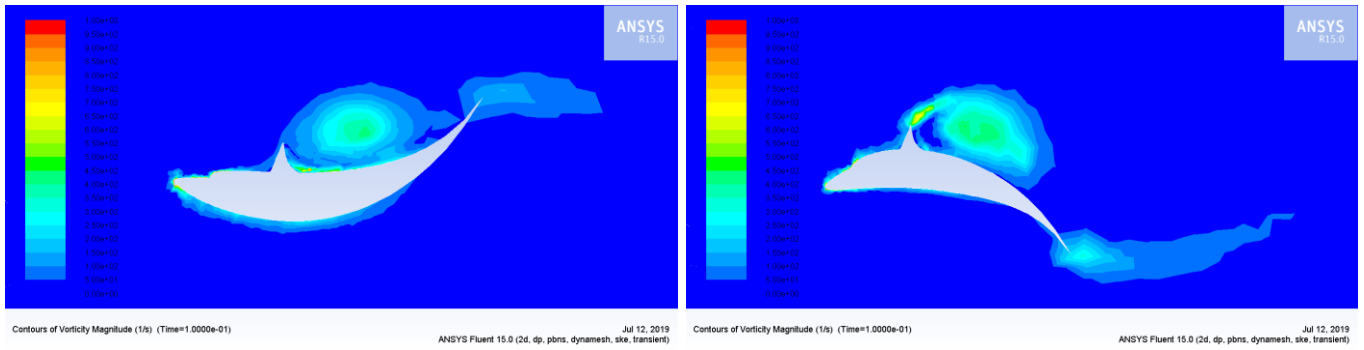
(الف)

شکل الف-۶- نمودار تغییر ورتیسیتته جریان اطراف بدن دلفین در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل در فرکانسهای (الف: ۰/۲۵، ب: ۰/۵، ج):

۱/۲۵ هرتز



(ب)

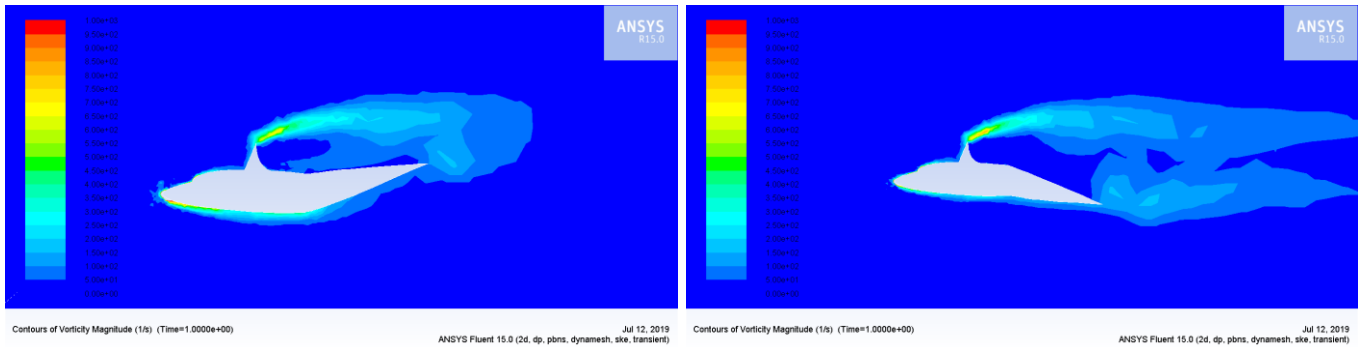


(ج)

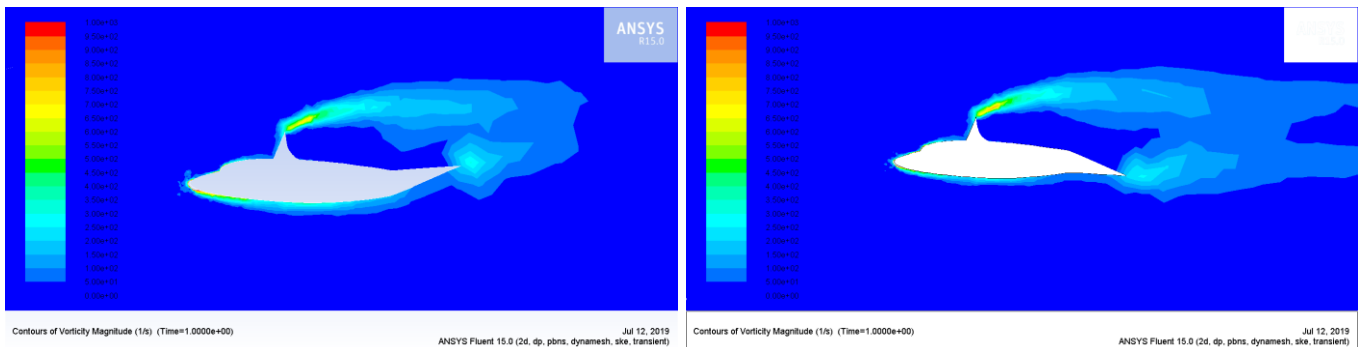
شکل الف-۶ (ادامه) - نمودار تغییر ورتیسیتته جریان اطراف بدن دلفین در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

حرکت روبه بالا

حرکت روبه پایین

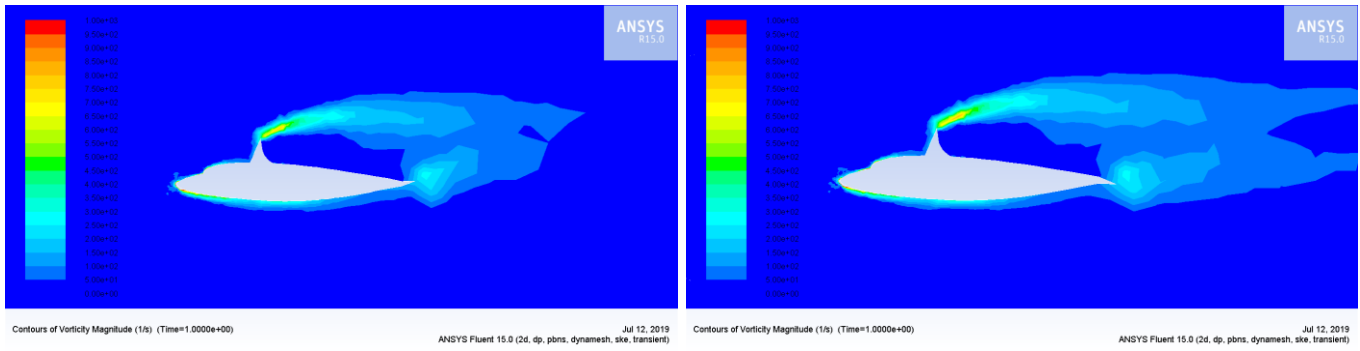


(الف)



(ب)

شکل الف-۷ - نمودار تغییر ورتیسیتته جریان اطراف بدن دلفین در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل و در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹



(ج)

شکل الف-۷ (ادامه) - نمودار تغییر ورتیسیتیته جریان اطراف بدن دلفین در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل و در طول‌های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹