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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

کلمات کلیدی:
شبیه سازی عددی؛
میدان سرعت و فشار؛
ضرایب درگ و لیفت؛
دینامیک سیالات محاسباتی؛
مش متحرک.

چکیده

بررسی بیومیمتیکی[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 دُم 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، شبیه سازی عددی هیدرودینامیک جریان اطراف بدن آبزی با درنظر داشتن شنای آبزی بوده و به طور خاص برر سی تغییرات ضرایب درگ و لیفت، نحوه حرکت بدن و اثر آن بر میدان سرعت و فشار و نحوه تشکیل گردابه ها در بلافاصله نزدیک بدن دلفین انجام شده است. که نتایج حاکی از تاثیر قابل توجه فرکانس حرکت دلفین و طول متحرک دُم دلفین بر پارامترهای ذکر شده می‌باشد.

Numerical Simulation of Flow Hydrodynamic Around Dolphin Body in Viscous Fluid

Mohammad-Hosein Nahavandian[1*], Ahmad Izadi[2]

[1] PhD Candidate of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology; nahavandian@aut.ac.ir
[2] 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

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 پیش‌راندن جاندار در آب است. در این بین میزان سرعت شنای جاندار رابطه مستقیم با مقدار انرژی مصرفی دارد. عمدتا 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

بین نیروها و گشتاورهای وارده بر بدن جاندار می‌شود. نیروی پیش-رانش خالص ایجاد شده توسط حرکت دُم 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 شبیه سازی 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 حلقهٔ بسته جهت کنترل زاویه پیچ را برای ایجاد درک درست از مانورهای آکروباتی دلفین ارائه نمودند. شِن و همکاران[۶] روش کنترل فازی برای تشخیص عمق شنای دلفین تعبیه کردند. در پژوهشی که وانگ و همکاران[۷] انجام دادند، رباتی با الهام گیری 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 ربات ها هدف اصلی مانورپذیری بهتر و دوام بیشتر سازه ربات آبزی است[۸]. برای نمونه ناکاشیما و همکاران[۹] پژوهشی را در زمینه بهینه‌سازی باله های 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 پژوهش های پیشین در زمینه تجربی و با رویکرد کنترل مکاترونیکی بوده اند و خلع غیرقابل انکاری در مطالعات عددی و جنبه های 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 دَم دلفین تحلیل شده و تاثیر هریک به طور جداگانه بر میدان جریان و پارامترهای پیشرانش در جریان آشفته اطراف بدن دلفین متحرک مورد بحث قرار است.

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 میکروربات ها برای انتقال دارو از طریق جریان خون در بدن انسان اشاره نمود[۱۰].

به منظور بالابردن 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. شبیه سازی سی.اِف.دی[۴] به عنوان یکی از کارامدترین ابزارها جهت فهم پدیده‌های پیچیده مانند آشفتگی جریان، انتقال حرارت، پایداری جریان با استفاده از حلگرهای پیشرفته است. برای مثال از پژوهش های شاخص انجام یافته در این زمینه می توان به مقاله محمدشاهی و همکاران [۱۱] اشاره نمود که بهینه‌سازی و تعیین نیروهای وارد بر ربات ماهی‌شکل را بر اساس نتایج حاصل از سی.اِف.دی در دو حالت بدن ساکن و با زاویه نسبت به افق برای ثبت ضرایب درگ، لیفت و ممنتوم در نرم افزار فلوئنت 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 پژوهش های آینده مورد بررسی قرار گیرد. لی و جیاجُن شبیه سازی هیدرودینامیک حرکت باله دُم دلفین را به منظور بررسی مشخصات نیروی پیشرانش و ایجاد ورتکس به دلیل تناوب دُم انجام دادند. همچنین به دلیل سازگاری مدل آر.ان.جی- کِی.اِپسیلن برای هندسه های پیچیده از این مدل استفاده شد[۱۳]. از نتایج گزارش شده در این پژوهش می توان به تاثیر مثبت در نظر گرفتن دَم منعطف نسبت به هندسه صلب بر نیروی پیشرانش اشاره نمود اما تاثیر تغییر طول متحرک دَم بر میزان پیشرانش 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 پژوهش های انجام شده در گذشته معطوف به بررسی ربات ماهی بوده و مطالعه عددی هیدرودینامیک ربات دلفینی کماکان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

زمینه‌ای بکر می باشد. به همین منظور در حل عددی پیش رو، اثر هندسه بدن دلفین و همینطور نحوه حرکت آن بر شنای آبزی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای رسیدن به این هدف از نرم افزار آنسیس فلوئِنت نسخه ۱۵[۵] استفاده شده است. ایجاد حرکت در بدن دلفین از تعریف توابع یو.دی.اِف[۶] و استفاده از امکان مش متحرک[۷] انجام می‌پذیرد. در ادامه میدان فشار و جریان اطراف بدن دلفین و همچنین اثر فرکانس تناوب پیکره آبزی بر الگوی تغییرات ضرایب درگ، لیفت و ایجاد گردابه بررسی شده است. آشفتگی جریان آب اطراف بدن دلفین از طریق بررسی انرژی جنبشی آشفتگی 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 آبزی، 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla.(\rho \mathbf{u})=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_x)+\nabla.(\rho u_x \mathbf{u})=\nabla.\left(\mu \nabla(u_x)\right)-\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_x \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_y)+\nabla.(\rho u_y \mathbf{u})=\nabla.\left(\mu \nabla(u_y)\right)-\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_y \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_z)+\nabla.(\rho u_z \mathbf{u})=\nabla.\left(\mu \nabla(u_z)\right)-\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_z \qquad (۴)$$

در معادلات (۱) تا (۴)، $\mathbf{u}=u_x\hat{i}+u_y\hat{j}+u_z\hat{k}$ بوده و u_x، 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) می‌توان از گرانش در راستای محور x و z صرف‌نظر 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 می‌توان در دوبعد فرض نمود، جریان دوبعدی در صفحه (x,y) فرض شده است.

باتوجه به اینکه جریان سیال در ورودی به صورت کاملا توسعه یافته فرض شده و حل رژیم جریان آشفته در اطراف بدن دلفین مد نظر است مدل $(\mathrm{k}-\varepsilon)$ برای جریان آشفته در اطراف هندسه های پیچیده پیشنهاد شده است. همچنین با وجود فرض ایزوتروپیک بودن ویسکوزیته آشفتگی (μ_t) در این روش، به دلیل کاهش هزینه محاسبات در این مدل و پاسخگویی برای بازه وسیعی از جریان‌های آشفته از این روش استفاده شده است[۱۴]. در روابط (۵ و ۶) معادلات انرژی جنبشی – نرخ اضمحلال آشفتگی $(\mathrm{k}-\varepsilon)$ معرفی می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{C_{1\varepsilon}\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۶)$$

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

$$G_k=-\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \qquad (۷)$$

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۸)$$

در رابطه ویسکوزیته آشفتگی ثابت C_μ برابر با ۰/۰۹ قرار داده می‌شود.

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 پیشرانش و درگ ایفا می‌کند. 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 پیشرانش 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

شرط حرکت با توجه به مکانیزم مورد نظر اعمال گردد. توابع متنوعی برای بیان حرکت بدن دلفین معرفی شده اند. شرط اساسی مقید بودن مرز بدن دلفین به خط مرکزی بدن است، به عبارت دیگر با حرکت خط مرکزی بدن با دامنه ای مشخص، دو مرز بالا و پایین بدن نیز متناسب با آن به حرکت درآیند. با تعریف حرکت مرز بدن دلفین می بایست 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[۱۰] باید در محدوده مشخصی تعریف شده و فرایند حل عددی به درستی همگرا شوند. هندسه شبکه بندی دامنه حل به صورت غیر ساختار یافته[11] 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 می بایست از ماژول شبکه متحرک نرم افزار انسیس فلوئنت 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 فلوئنت 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:

جدول ۱- ماکروهای فلوئنت

ماکرو	وظیفه
DEFINE_CG_MOTION	حرکت مرکز ثقل
DEFINE_GRID_MOTION	حرکت شبکه‌بندی
DEFINE_GEOM	تغییر شکل هندسه

۴- معادلات حرکت مرز بدن دلفین

برای ایجاد حرکت بهینه در ربات می‌بایست حرکت موجی شکل بدن را به گونه ای تعریف نمود تا مانورپذیری و سرعت پیشرانش حداکثر شوند. برای نمونه شاو وهمکاران رابطه ای چندجمله‌ای-مثلثاتی برای حرکت ربات ماهی پیشنهاد نمودند[۱۵]. همچنین رومانِنکو[۱۶] حرکت پریودیک خط مرکز بدن دلفین را توسط یک چند جمله‌ای خطی درجه هشت معرفی نمود:

$$h(x_n,\mathrm{t}) = h_T\, f(x_n)\sin(2\pi ft) \qquad (۹\text{-الف})$$

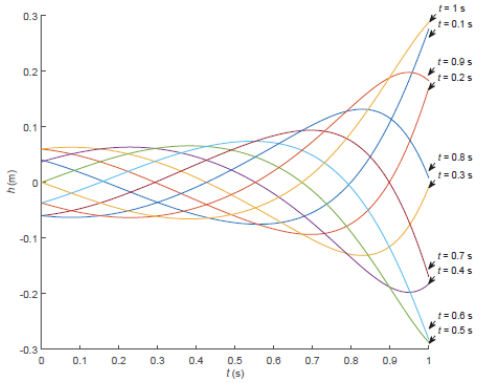
که تابع h_T حداکثر دامنه حرکت در راستای محور y است. به منظور ایجاد سادگی در محاسبات، طول بی بعد x_n معرفی شده است و نشان دهنده نسبت طول اندازه گیری شده از سر دلفین (مبدا مختصات) بر کل طول بدن دلفین است:

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

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

$$f(x_n) = 0.21 - 0.66x_n + 1.1x_n^2 + 0.35x_n^8 \qquad (۹\text{-ج})$$

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



شکل ۱- ایجاد حرکت موجی در بدن دلفین در زمان های 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 دُم 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 بازه های ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ تا انتهای بدن بوده است.

$$f(x_n) = (x_n - x_i)\sin(2\pi ft)$$
$$x_i = 0.5; 0.7; 0.9 \qquad (۱۰)$$

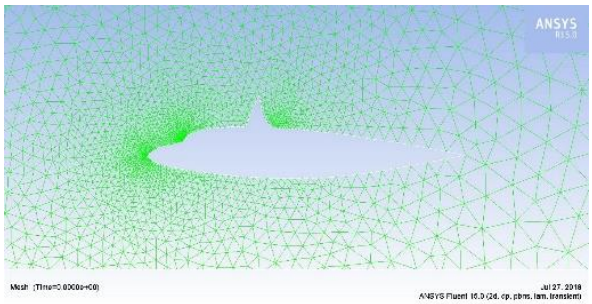
ابعاد هندسی دلفین در دوبعد در جدول ۲ ذکر شده است که با توجه به اطلاعات ارائه شده در مراجع [۲، ۱۰، ۱۷] به هندسه مساله اعمال شده است. همین‌طور هندسه اولیه و شبکه‌بندی‌شده در شکل ۲ قابل مشاهده است. به منظور تشریح بیشتر روند حل با استفاده از شبکه-بندی متحرک جدول ۳ مشخصات ورودی نرم‌افزار را بیان می‌کند.

جدول ۲- مشخصات هندسی

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]



شکل ۲- هندسه دوبعدی شبکه‌بندی شده دلفین

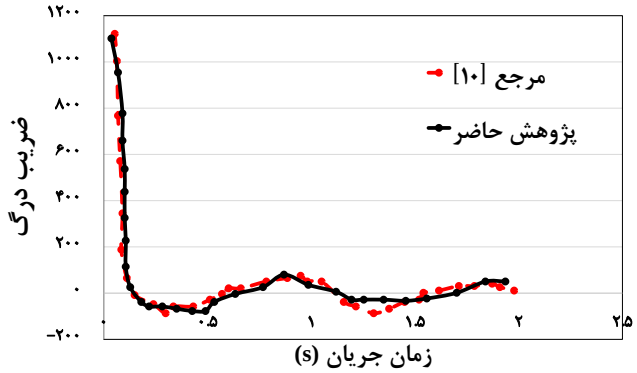
جدول ۳- مشخصات شبکه بندی متحرک

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

شایان ذکر است که در بیشتر پژوهش‌های پیشین برای شبیه سازی هیدرودینامیکی دلفین از هندسه ایرفویل با مقیاسهای مختلف درنظر 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 درنظر 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

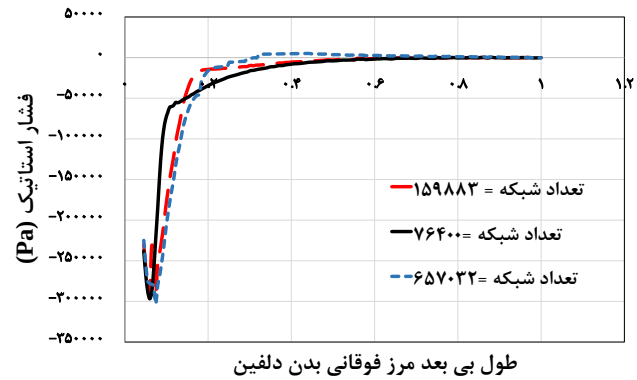
برای آنکه بتوان درک عمیق‌تری از قابلیت شبیه سازی انجام یافته به منظور مطالعه شنای ربات دلفینی در دوبعد داشت، می بایست در گام اولیه صحت نتایج بدست آمده را با مرجع تجربی یا عددی متناسب آن به اثبات رساند. در همین راستا با مدلسازی نتایج پژوهش لی و همکاران[۱۰] و مقایسه نتایج هندسه پژوهش حاضر برای فرکانس تناوب 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 همراه باله فوقانی بدن دلفین برای شبیه سازی استفاده شده است؛ درحالی که در این پژوهش هندسه واقعی بدن دلفین در دوبعد به همراه اعوجاج های طبیعی موجود در ناحیه دماغه نیز لحاظ گردیده است.



شکل۳- 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 شبکه‌بندی در فرآیند حل عددی یکی از ضروریات به شمار می رود. در این بخش از پژوهش برای بررسی عدم وابستگی نتایج مدلسازی 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، ۱۵۹۸۸۳و 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 درحالی که زمان لازم برای شبیه سازی تا حدود ۵ برابر افزایش یافت. لذا در محاسبات این پژوهش از تعداد سلول ۱۵۹۸۸۳ استفاده شده است.



شکل۴- بررسی استقلال از شبکه بندی برای نمودار فشار استاتیک در طول مرز فوقانی بدن دلفین در فرکانس تناوب ۱,۲۵ هرتز رو به بالا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

۶- گزارش نتایج

۱-۶- 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 گام های مختلف دچار تغییرات عمده‌ای شده است. همانطور که مشاهده می شود اندازه سرعت در پشت بدن رفته رفته کاهش پیدا کرده است. این کاهش سرعت در گام های 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 انتهای باله دمی نیز یک ناحیه دچار شتابگیری شده است که با رنگ قرمز (سرعت بین ۲۶ تا ۳۰ متر برثانیه) 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 می شود؛ 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 دُم 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 کیلوپاسکال در همه فرکانس‌ها در نوک دماغه و جلو باله فوقانی اتفاق می‌افتد اما نکته شایان ذکر ایجاد ناحیه پرفشار دیگری در بالای باله دُمی در فرکانس-های بالاتر است. درحرکت روبه پایین بدن دلفین نیز ناحیه با فشار کمینه در حال انتقال از پشت دُم 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 تناوب های مختلف گزارش شده است. با افزایش زمان جریان و به دنبال آن انحراف بیشتر دم از راستای محور، مشاهده می شود که ضرایب درگ و لیفت ابتدا کاهش شدید داشته و سپس با شیب ملایمی افزایش می یابند. 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 شکل های ۹و الف- ۳ در پیوست مشاهده می شود. با توجه به شکل ۹، ناحیه ویک پشت باله فوقانی باکاهش طول بخش متحرک دُم 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 کاملا 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 کیلوپاسکال) 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.

۲-۶- بررسی آشفتگی جریان

انرژی جنبشی آشفتگی

همانطور که در ابتدای بحث نیز اشاره شد، در فرآیند شبیه سازی 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 $k=0.5\left(\overline{u_x'^2}+\overline{u_y'^2}\right)$ که ناشی از ترم اغتشاشی سرعت در میدان جریان است، تغییرات این پارامتر در کانتورهای شکل الف-۴و 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 نرژی جنبشی آشفتگی در اثر ترم های اغتشاشی سرعت از یک ناحیه بزرگ در پشت دُم به نزدیکی باله فوقانی انتقال می یابد. همچنین هنگام

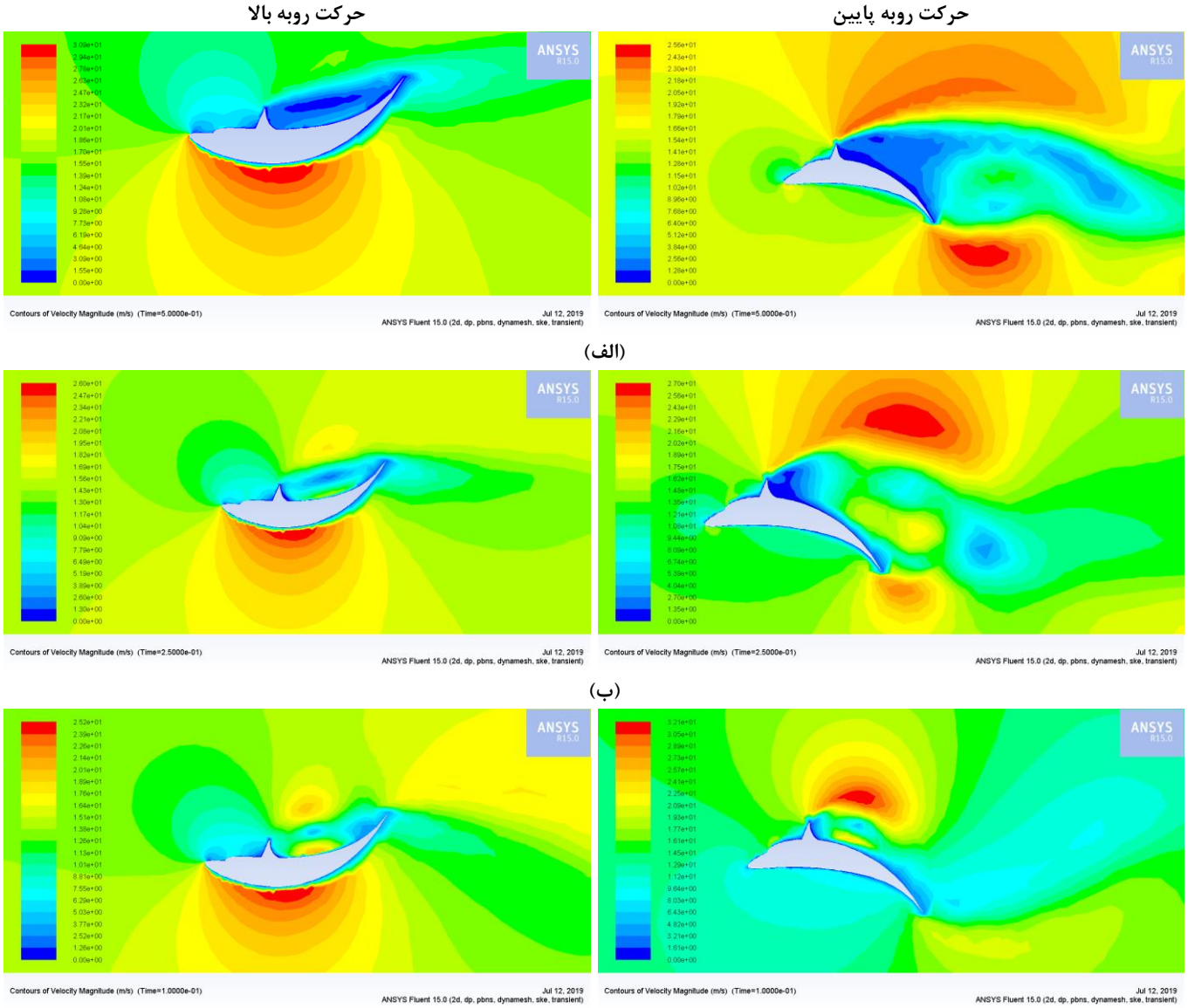
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

حرکت رو به بالای بدن دلفین با افزایش فرکانس تناوب، ناحیه ماکزیمم انرژی جنبشی آشفتگی کوچکتر می‌شود. 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 نمی‌دهد.

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 دَم مشاهده می گردد. نکته قابل توجه در نمودار الف-۶ افزایش قدرت گردابه های 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 دَم بوده است. در حالت دوم وبا اعمال معادله ۱۰ در نمودار الف- ۷ مشاهده شد که با کاهش طول بخش متحرک دَم قدرت گردابه های تشکیل یافته در انتهای دَم 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 دَم (در حرکت رو به پایین) با مقدار ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ است.



(الف)

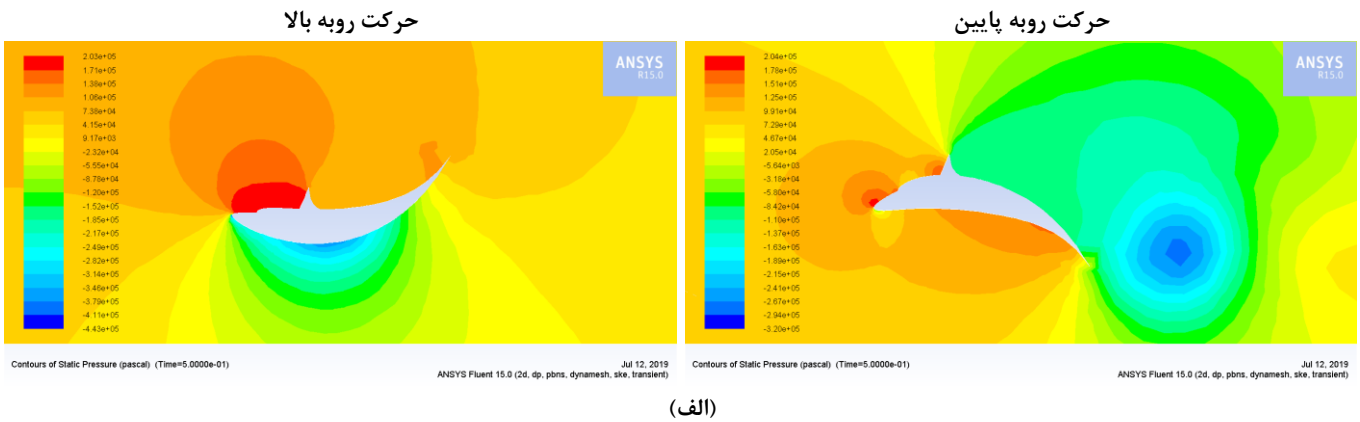
(ب)

(ج)

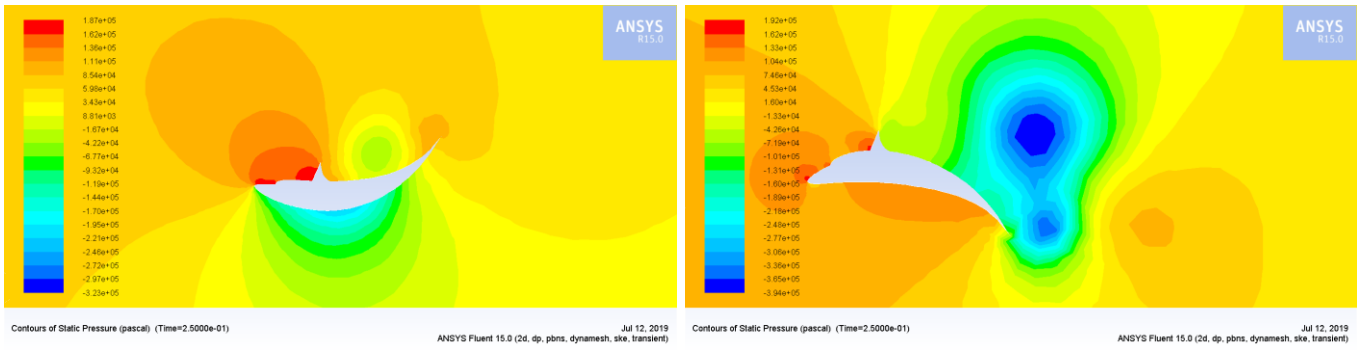
شکل ۵- تغییرات کانتور سرعت در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

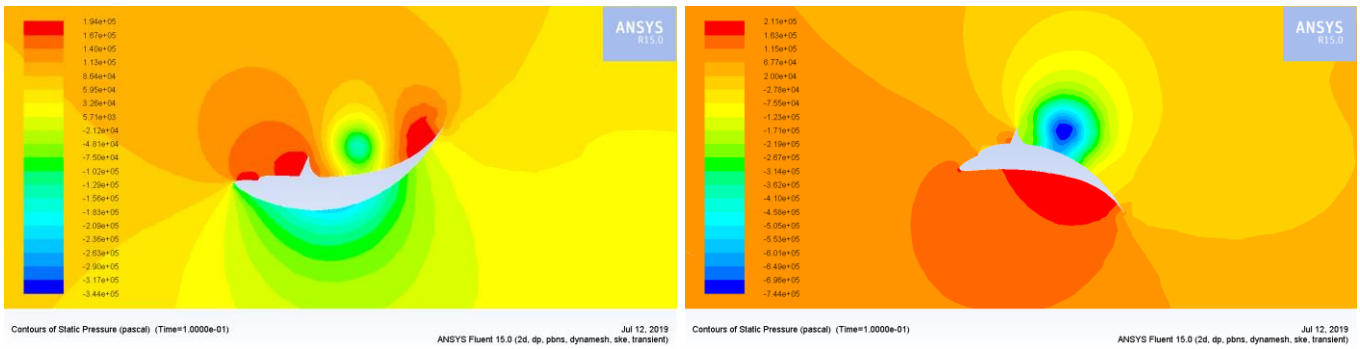
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]



(الف)

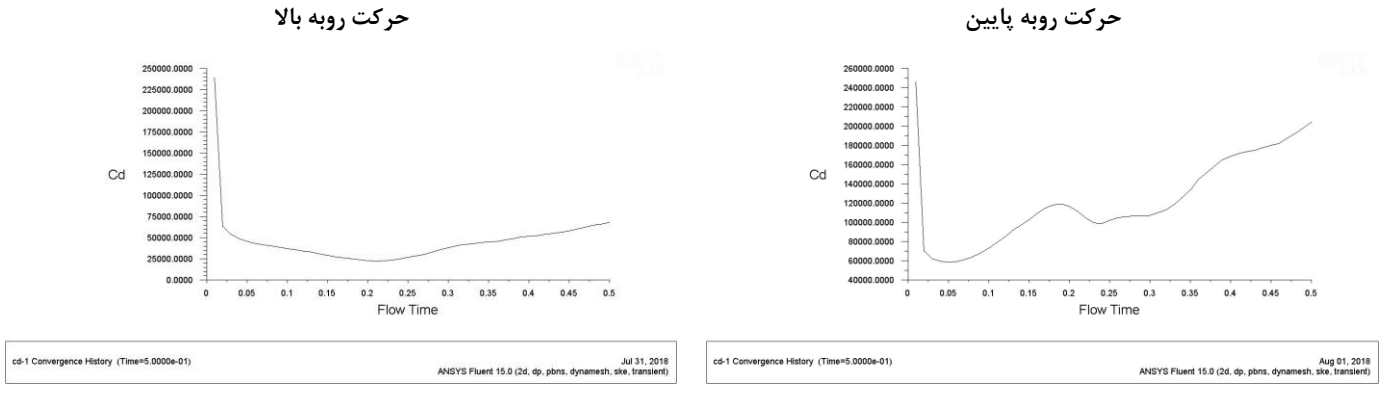


(ب)



(ج)

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

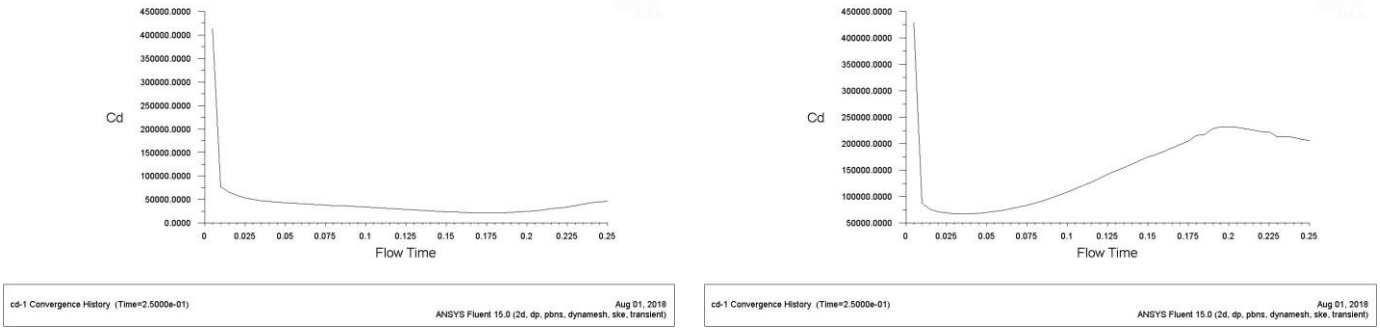


(الف)

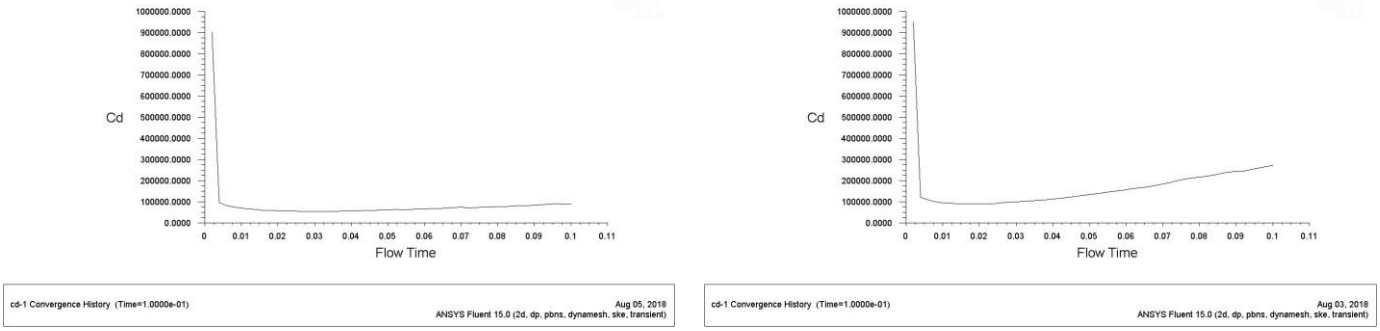
شکل ۷- نمودار تغییرات نیروی درگ در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

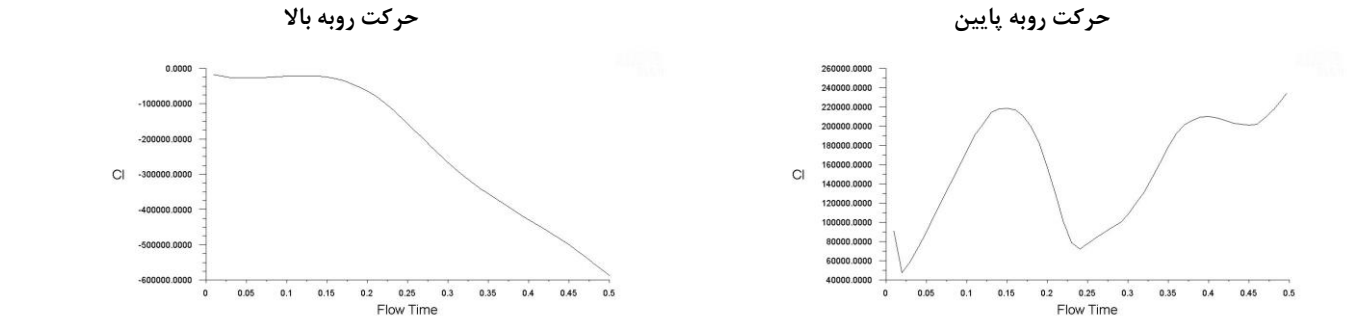


(ب)

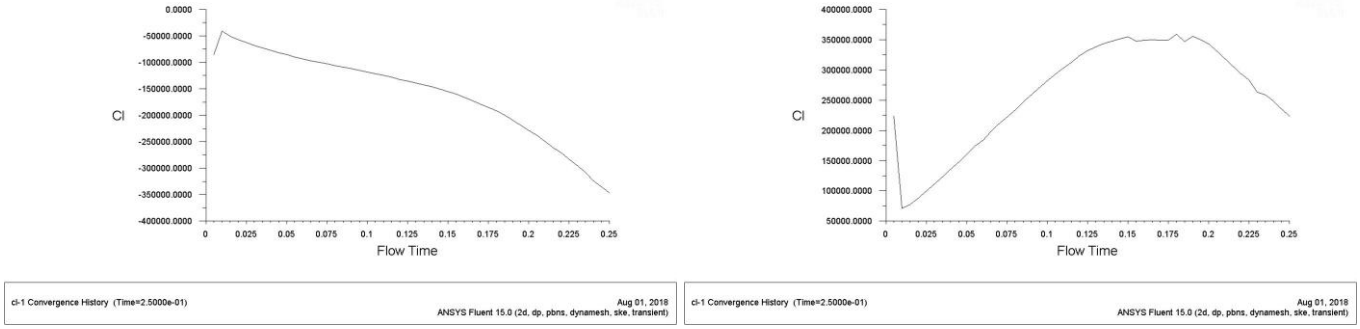


(ج)

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



(الف)

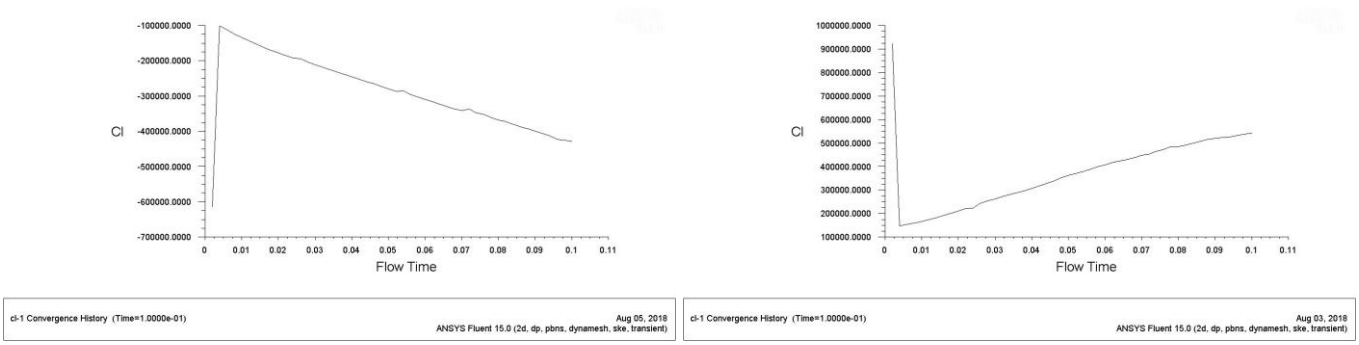


(ب)

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

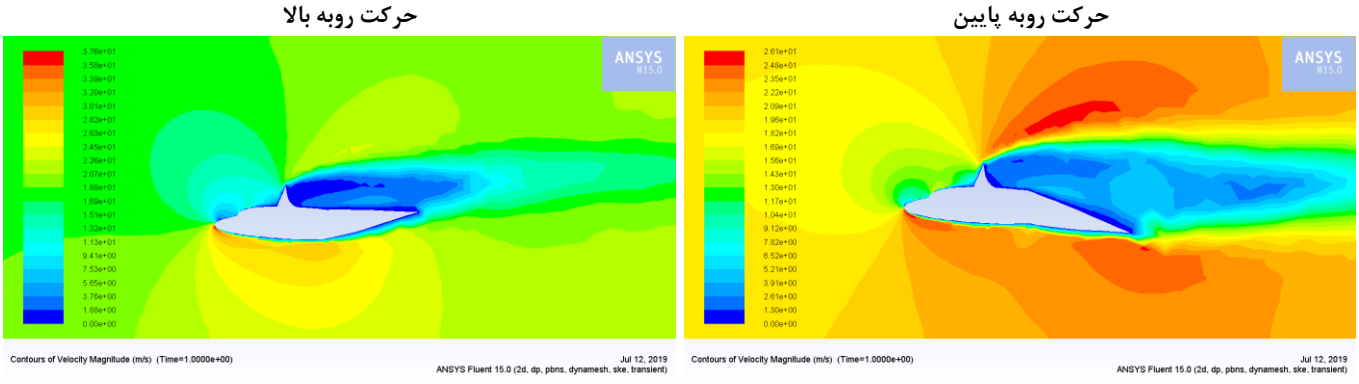
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

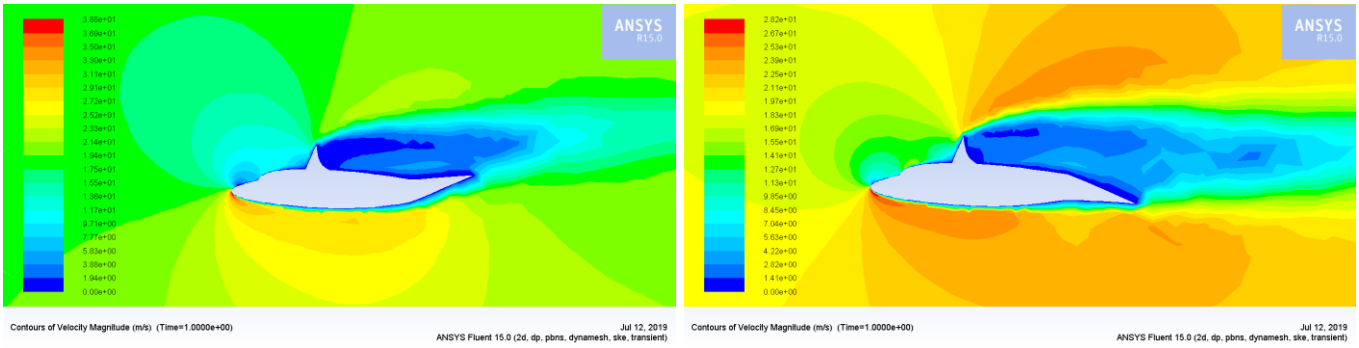


(ج)

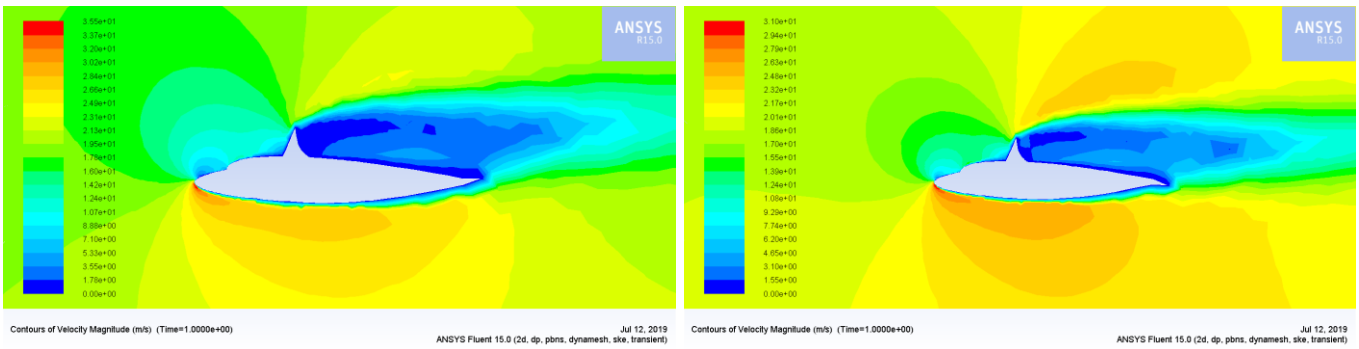
شکل ۸(ادامه)- نمودار تغییرات نیروی لیفت در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز



(الف)



(ب)



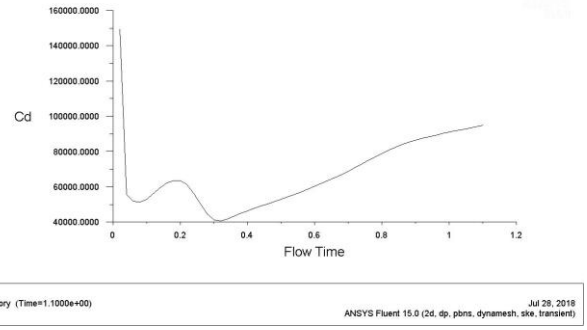
(ج)

شکل ۹- نمودار تغییرات کانتور سرعت 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

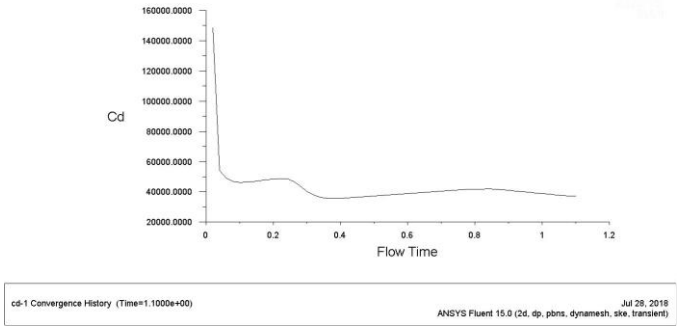
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

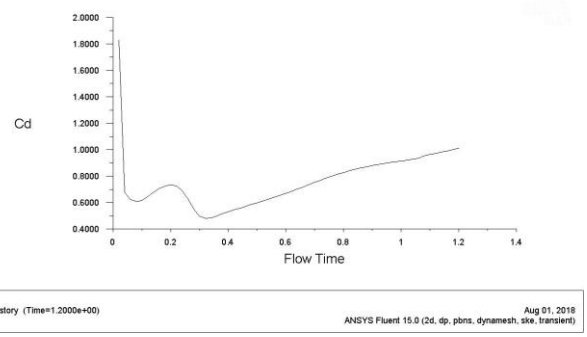
حرکت روبه پایین

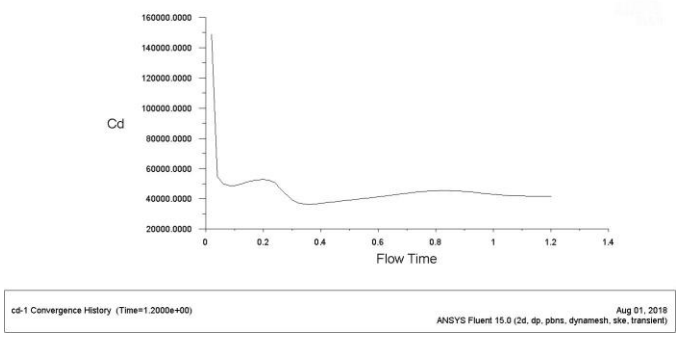


حرکت روبه بالا

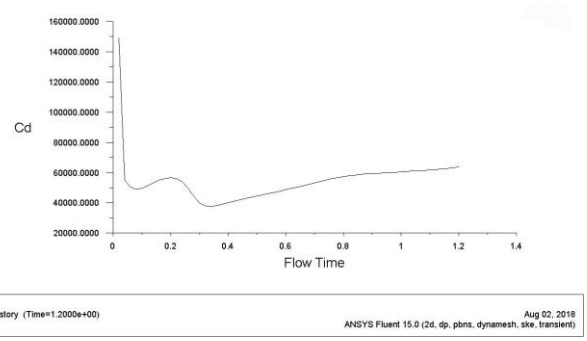


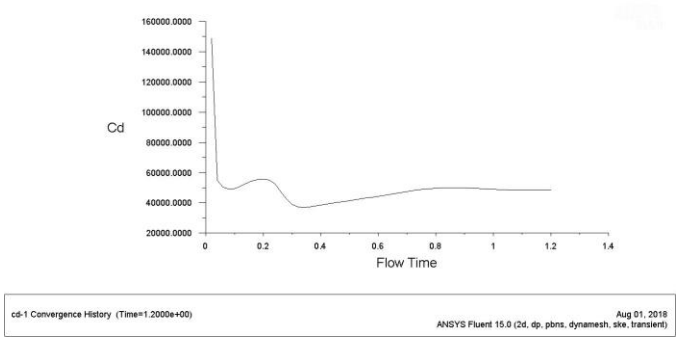
(الف)





(ب)

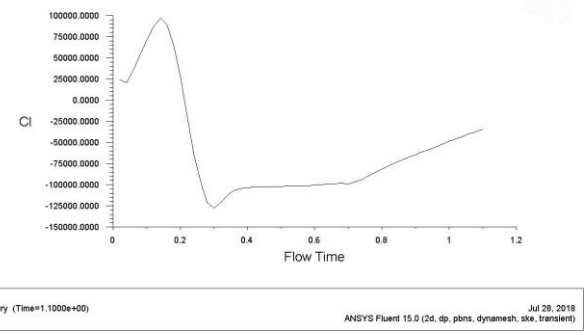




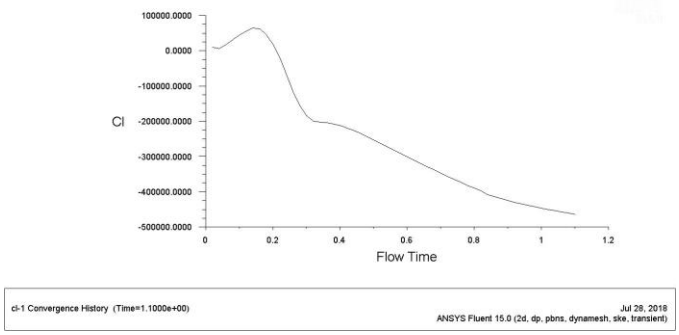
(ج)

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 پایین



حرکت روبه بالا

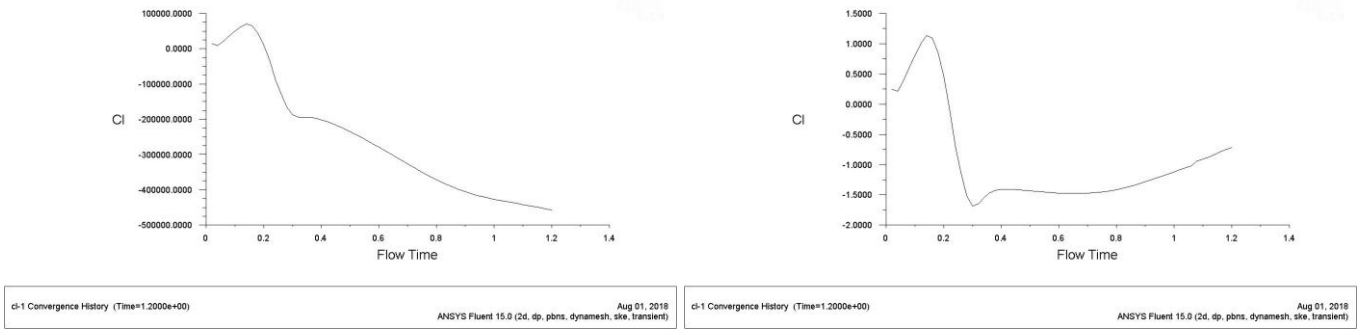


(الف)

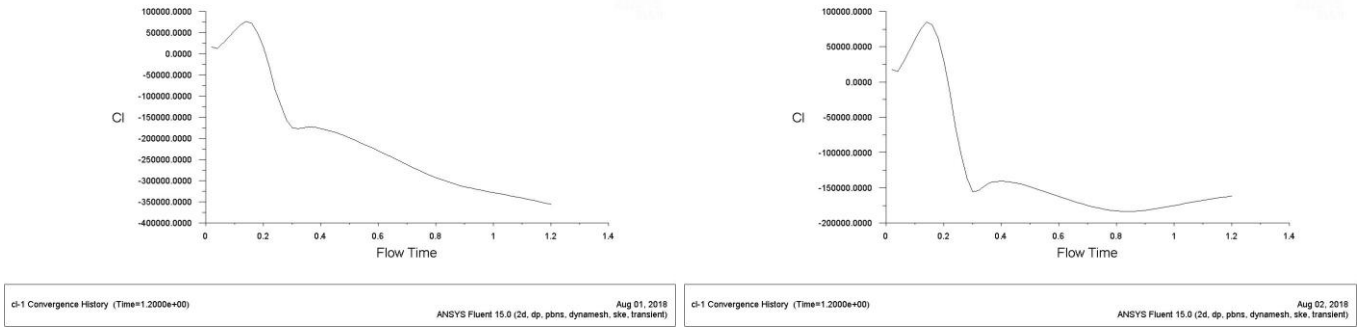
شکل۱۱- نمودار تغییرات ضریب لیفت در حرکت رو به پایین و بالا بر حسب زمان جریان در طول¬های بی بعد (الف): ۰/۵، (ب): ۰/۷، (ج): ۰/۹

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]



(ب)



(ج)

شکل۱۱ (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

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 دُم 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 همگن‌تر 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 همگن‌تر می‌شود.
- با افزایش طول بخش متحرک دُم، ناحیه ویک پشت باله فوقانی باکاهش طول بخش متحرک دُم در حرکت رو به بالا دستخوش تغییر چندانی نشده و در حرکت رو به پایین کوچکتر می‌شود.
- 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 دُم، ناحیه پرفشار گستره کمتری می‌یابد در حالی که در حرکت رو به پایین ناحیه با فشار کمینه کوچکتر می‌شود.
- با افزایش زمان جریان و انحراف بیشتر دُم، 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 می‌گردد.
- 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 دارندکه تغییرات ضریب درگ در حرکت روبه پایین نسبت به حرکت روبه بالا محسوس‌تر است.
- با افزایش فرکانس موج اعمالی به بدن دلفین در حرکت روبه پایین مقدار ماکزیمم انرژی جنبشی آشفتگی از ناحیه‌ای در پشت دُم 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 می‌شود. با ثابت نگه داشتن بخشی از بدن دلفین و اعمال حرکت به قسمت دُم 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 نمی‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

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

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 commandSan 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 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.

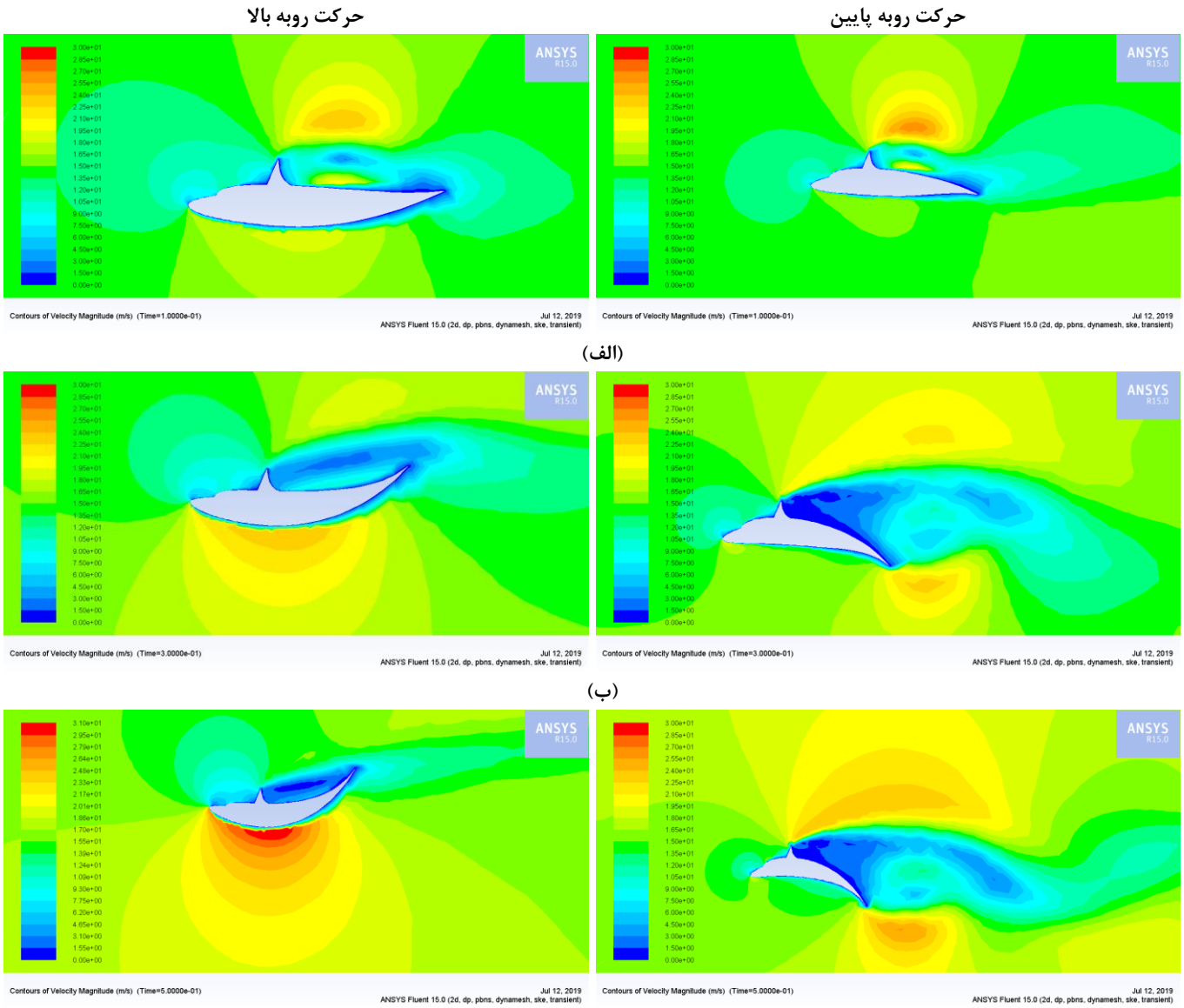
17- Riedeberger, D., and Rist, U., (2012), *Numerical simulation of laminar-turbulent transition on a dolphin using the γ-Re θ model*, In High Performance Computing in Science and Engineering, Vol.11, P. 379-391.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

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.

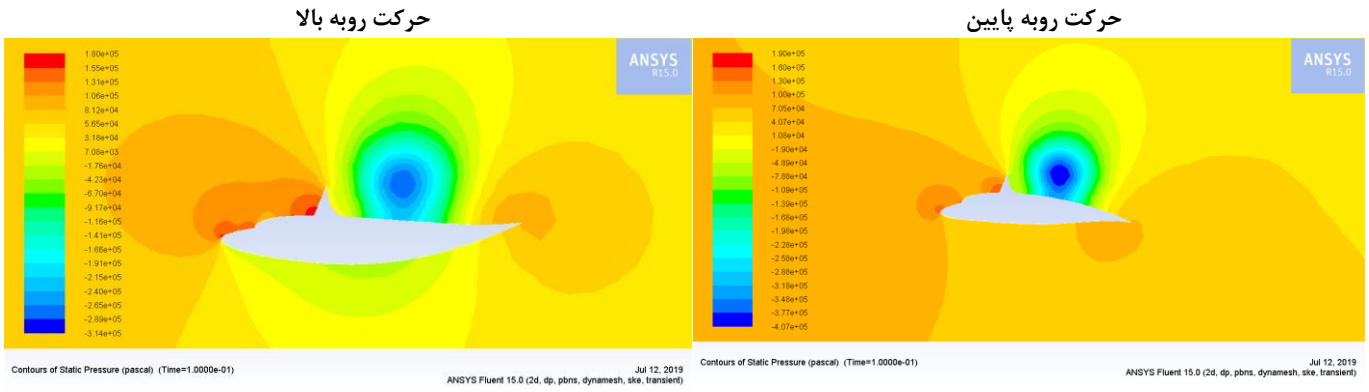


(الف)

(ب)

(ج)

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

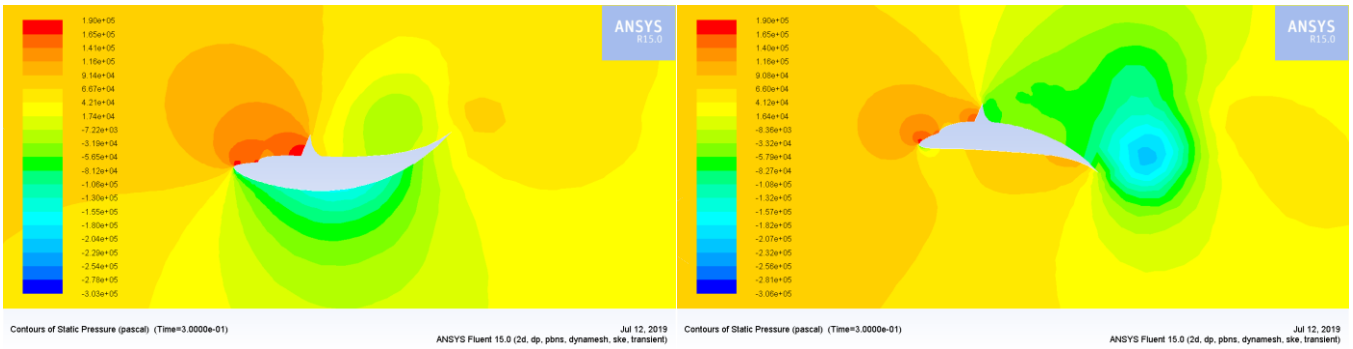


(الف)

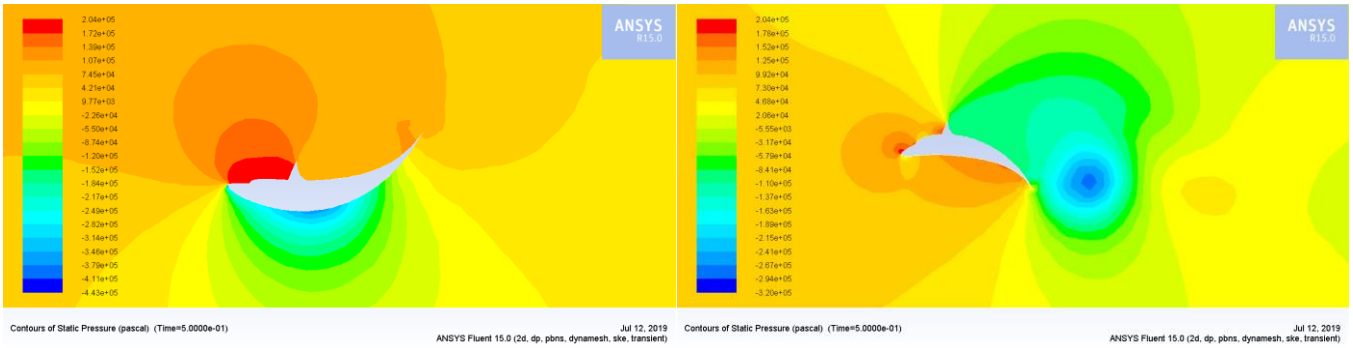
شکل الف-۲- تغییرات کانتور فشار در حرکت رو به پایین و بالا در گام های (الف): دهم، (ب): سی‌ام، (ج): پنجاه‌ام

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

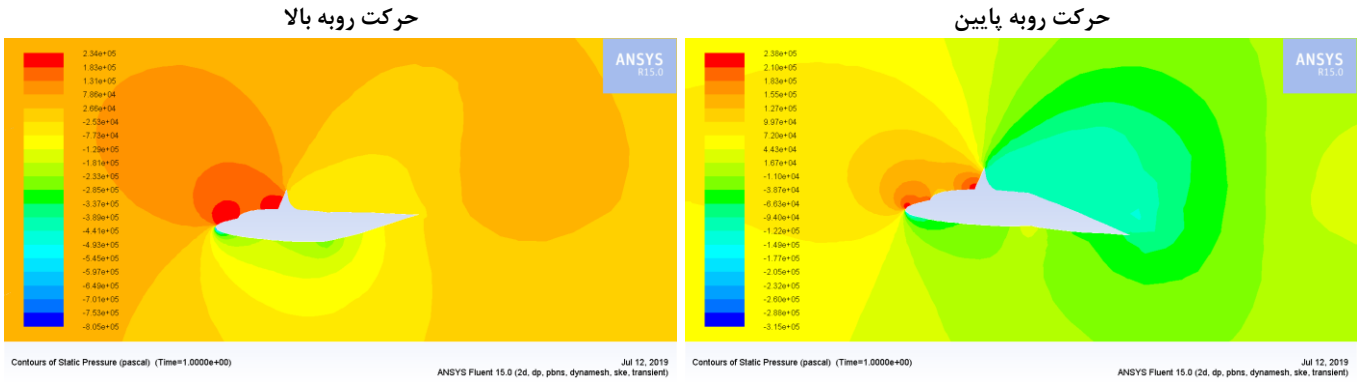


(ب)

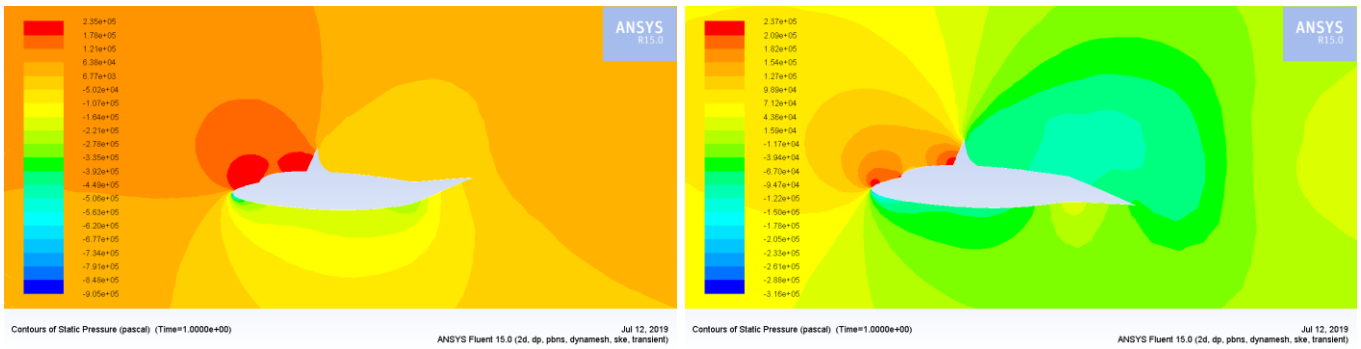


(ج)

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



(الف)

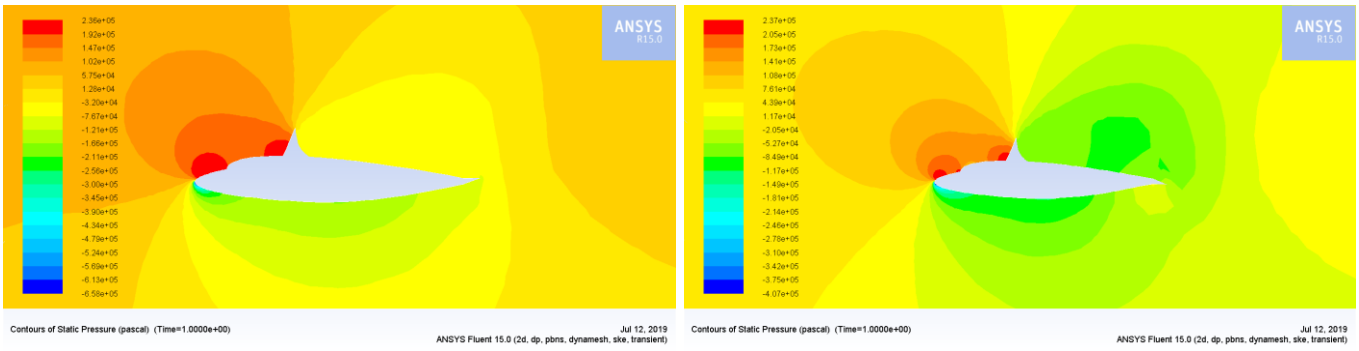


(ب)

شکل الف-۳- 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

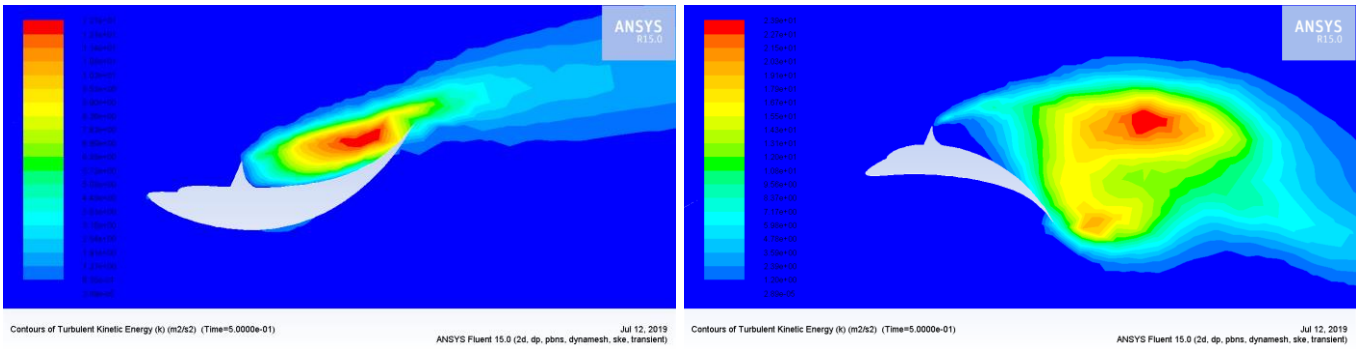
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]



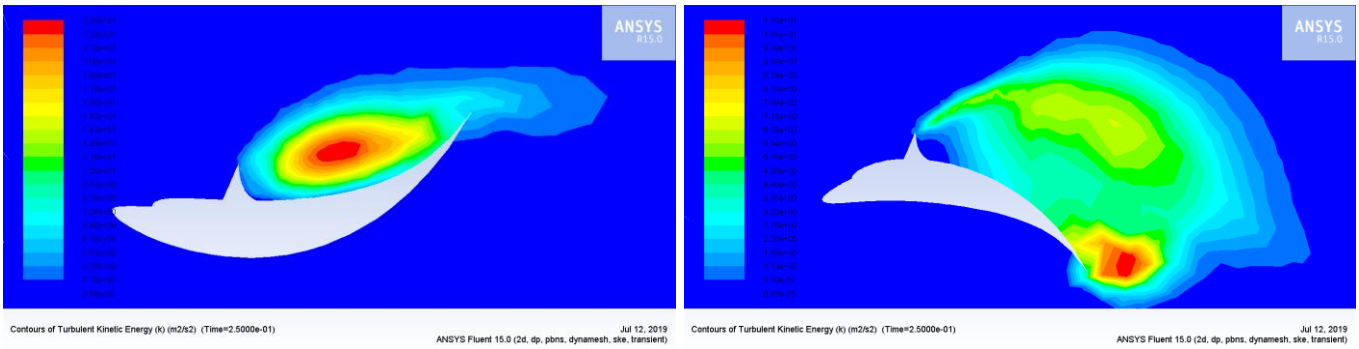
(ج)

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

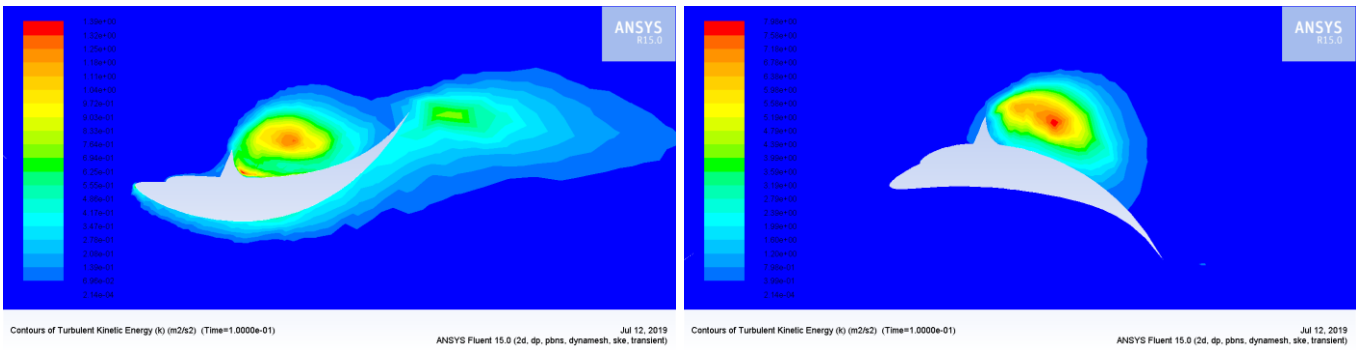
حرکت روبه پایین **حرکت روبه بالا**



(الف)



(ب)



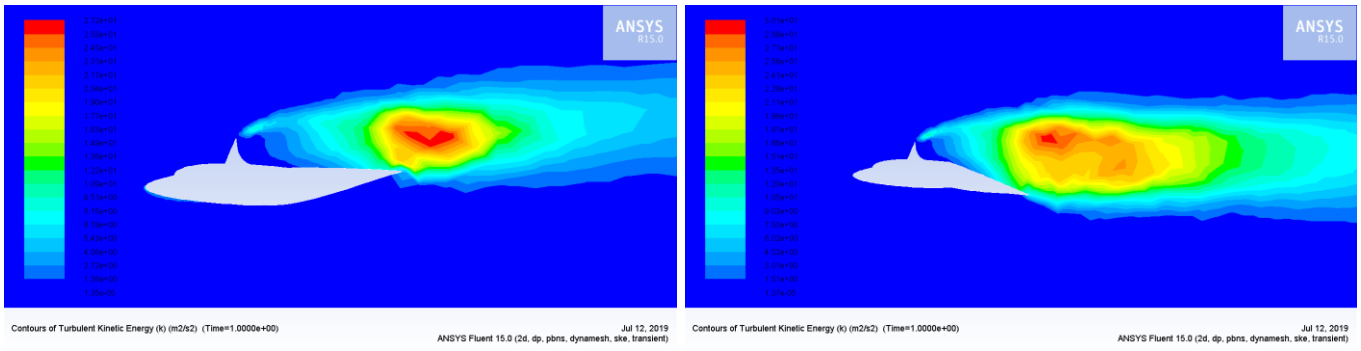
(ج)

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 هرتز

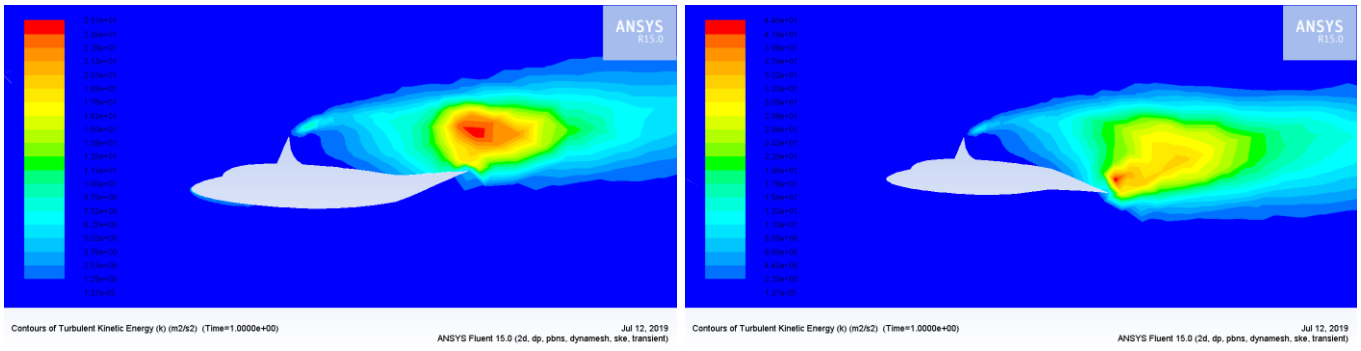
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]

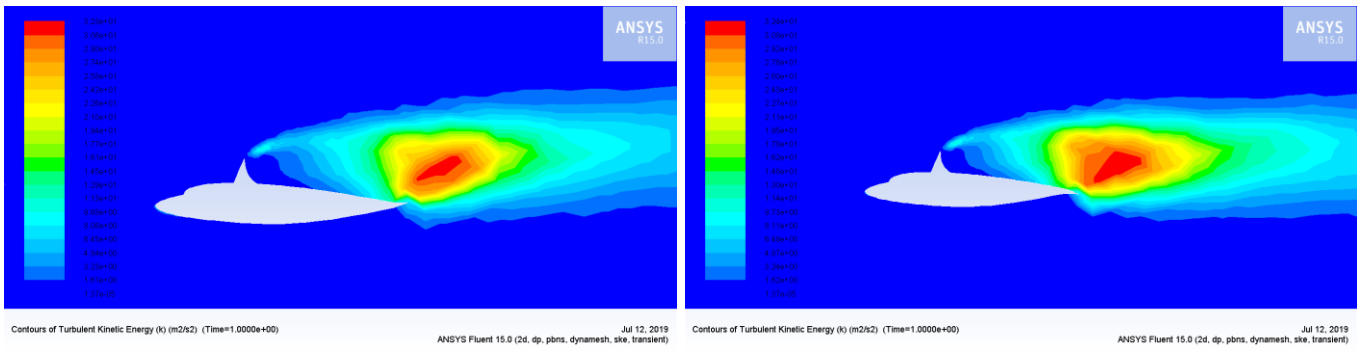
حرکت روبه پایین | حرکت روبه بالا



(الف)



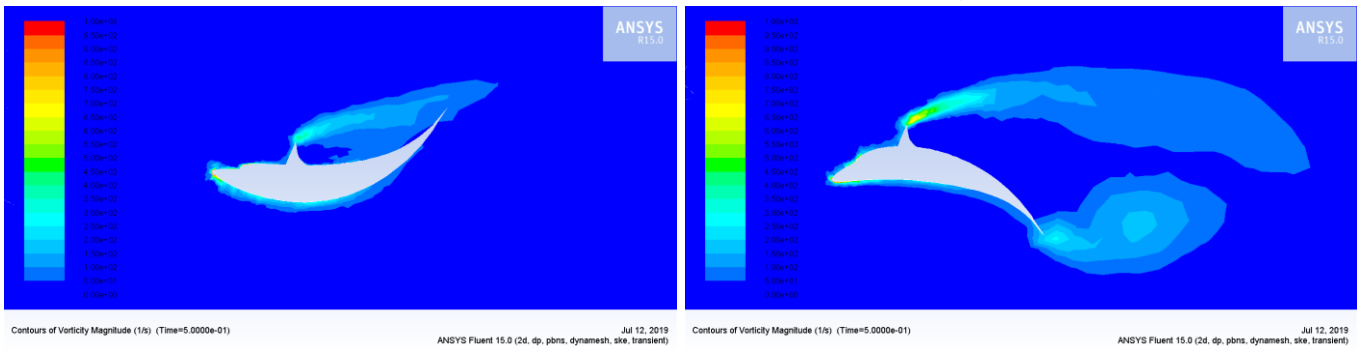
(ب)



(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 پایین | حرکت روبه بالا

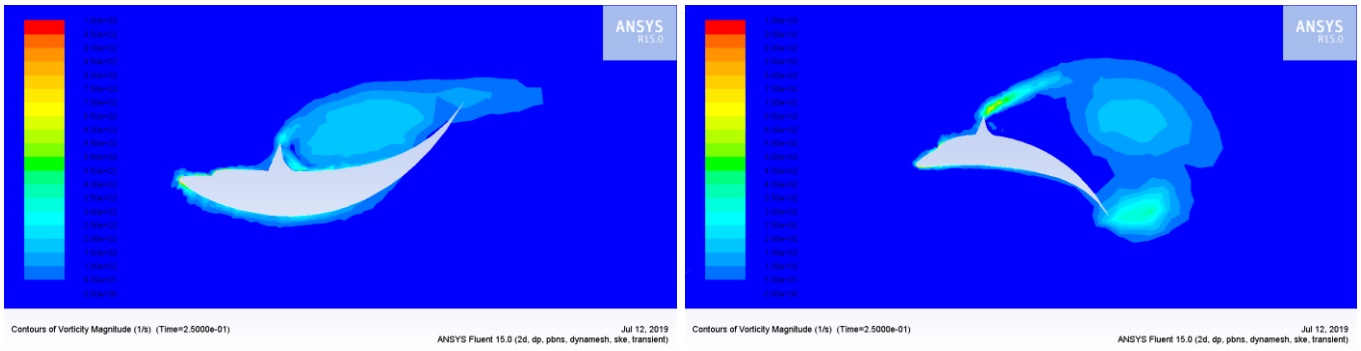


(الف)

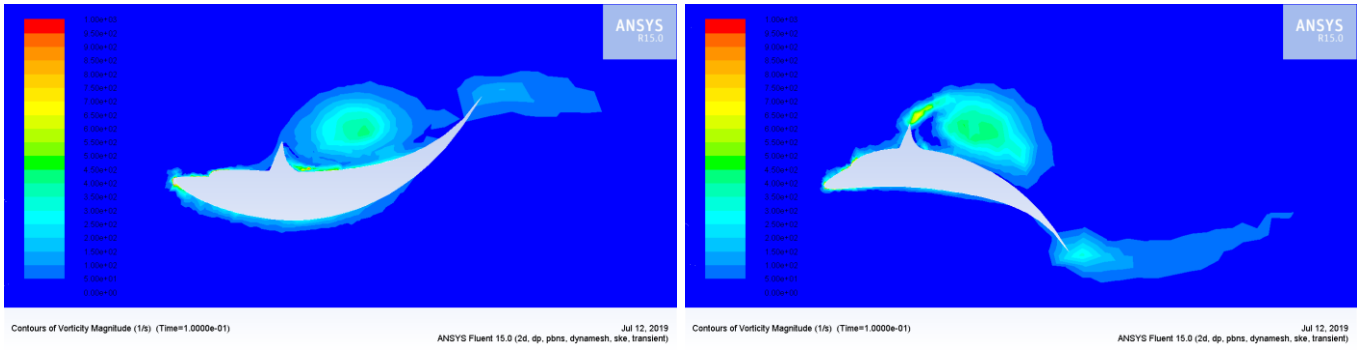
شکل الف-۶- نمودار تغییر ورتیسیته جریان اطراف بدن دلفین در حرکت رو به پایین و بالا در گام نهایی حل در فرکانسهای (الف): ۰/۲۵، (ب): ۰/۵، (ج): ۱/۲۵ هرتز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]



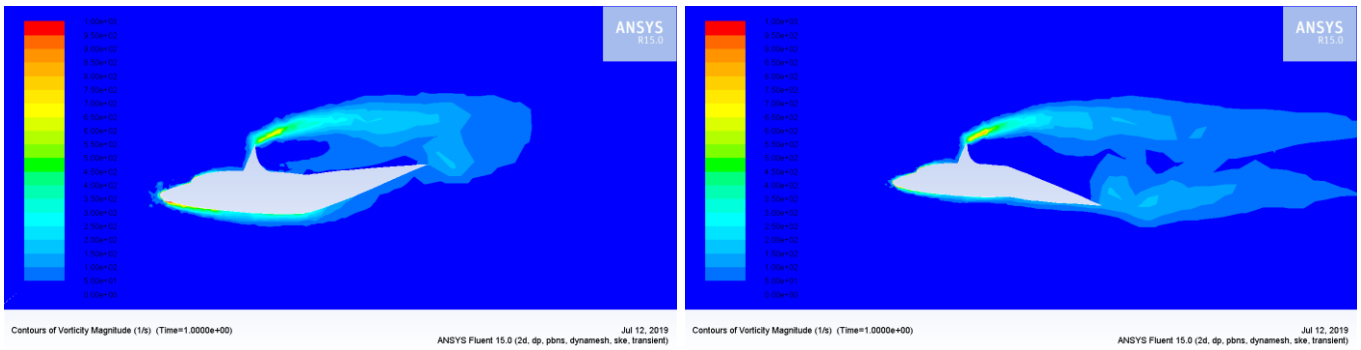
(ب)



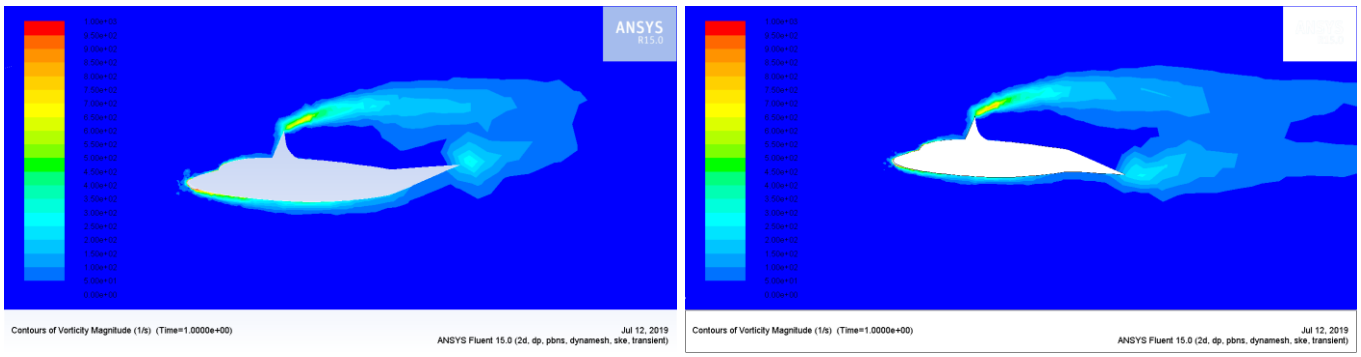
(ج)

شکل الف-۶ (ادامه)- نمودار تغییر ورتیسیته 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 پایین　　حرکت روبه بالا



(الف)

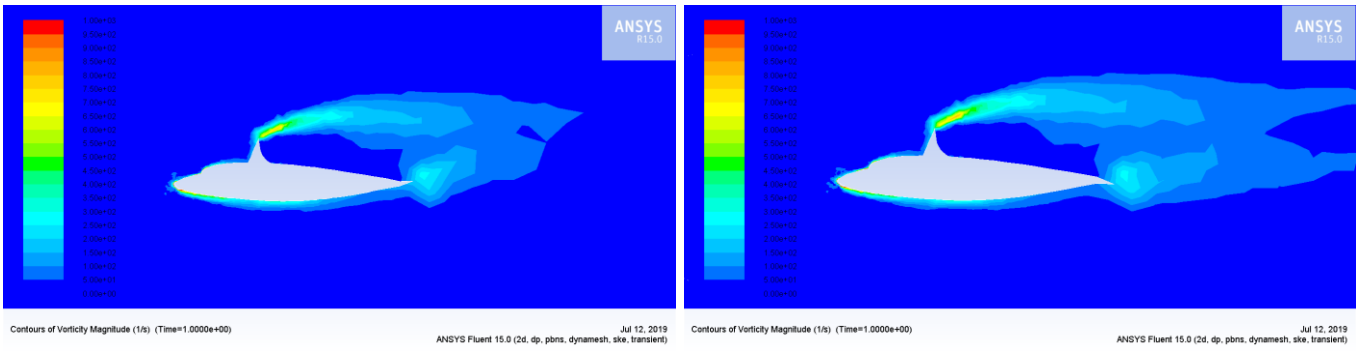


(ب)

شکل الف-۷- نمودار تغییر ورتیسیته 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]



(ج)

شکل الف-۷ (ادامه)- نمودار تغییر ورتیسیته 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.12.0]