



حل عددی ارتعاشات القایی ناشی از رهايش گردابه حول استوانه با تکیه‌گاه الاستیک در مجاورت سطح آزاد سیال

سید مصطفی حسینعلی‌پور^{*}، نوید حاجی غفوری بوکانی

دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ آبان ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۴ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه
حل عددی
سطح آزاد سیال
ناحیه‌ی قفل‌شدگی

چکیده: در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی ارتعاشات ناشی از رهايش گردابه از سطح استوانه‌ی دایره‌ای دو درجه آزادی، تحت تکیه‌گاه الاستیک در مجاورت سطح آزاد سیال انجام شده است. جریان اطراف استوانه، آرام و در محدوده‌ی اعداد رینولدز ۶۰ الی ۱۳۰ در نظر گرفته شده است. تغییر شکل سطح آزاد ناچیز بوده و برای عدد فرود ۰/۲ همچون یک دیواره‌ی صلب بدون لغزش عمل می‌کند. اثر سطح آزاد با در نظرگیری دو نسبت فاصله از آن بررسی می‌شود. فرکانس طبیعی سیستم جرم-فنر در هر نسبت فاصله، به گونه‌ای انتخاب شده که با عدد استروهل جریان در رینولدز ۱۰۰ حول استوانه‌ی ساکن برابر باشد. گسسته‌سازی معادلات جریان بر مبنای روش حجم محدود در کد تجاری فلوئنت انجام شده است. برای کوپلینگ حرکت استوانه با میدان جریان از روش شبکه‌ی متحرک با یک کد اضافه شده به نرم افزار استفاده شده و برای شبیه‌سازی سطح آزاد، روش حجم سیال به کار گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های ارتعاشات ناشی از جریان و سطح آزاد سیال بطور جداگانه تطابق خوبی با نتایج موجود نشان می‌دهند. تأثیر سطح آزاد بر ناحیه‌ی قفل‌شدگی با استفاده از مقایسه‌ی نمودارهای جابه‌جایی عرضی و ضرایب آیرودینامیکی در دو نسبت فاصله بررسی می‌شود که نتایج با نزدیک شدن استوانه به سطح آزاد، حاکی از کاهش ناحیه‌ی قفل‌شدگی، کاهش دامنه‌ی نوسانات و تغییر ضرایب آیرودینامیکی بسته به شاخه‌ی قرارگیری عدد رینولدز جریان هستند.

۱- مقدمه

پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه^۱ زمانی رخ می‌دهد که سازه در اثر نیروهای نوسانی ناشی از گردابه‌های جدا شده از سطح جسم^۲، مجبور به ارتعاش شود (شکل ۱). اگر سازه کاملاً صلب و مهار شده باشد، فرکانس تولید گردابه‌ها به صورت تابعی از عدد بی‌بعد استروهل قابل پیش‌بینی است. آزمایشات نشان می‌دهند که در دامنه‌ی نسبتاً گسترده‌ای از اعداد رینولدز، عدد استروهل تقریباً ثابت و نزدیک به ۰/۲ است [۱]. اما در مورد سازه‌هایی که امکان نوسان دارند (انعطاف پذیر یا با تکیه‌گاه‌های غیر صلب)، پدیده‌ای به نام همزمانی^۳ یا قفل‌شدگی در محدوده‌هایی از پارامترهای معینی مشاهده می‌شود. در سرعت‌های پایین جریان، فرکانس رهايش گردابه‌ها مشابه سازه‌ی صلب و مهار شده است و توسط عدد بی‌بعد استروهل کنترل می‌شود [۲]. با افزایش سرعت جریان، فرکانس تولید گردابه‌ها به فرکانس نوسانات سازه نزدیک شده و دیگر ارتباطی با عدد استروهل ندارد، بلکه با فرکانس نوسانات سازه، خود را هماهنگ کرده و در آن قفل می‌شود. با نزدیکی این فرکانس مشترک به فرکانس طبیعی سازه، پدیده‌ی رزونانس^۴ رخ می‌دهد که در آن، دامنه‌ی نوسانی بسیار زیاد سازه، سبب تخریب و وارد شدن لطمات

بسیاری به آن می‌شود. فروپاشی برج‌های خنک‌کن فری‌بریج^۵ در سال ۱۹۶۵ نمونه‌ی مشهوری از پدیده‌ی ارتعاشات خود تحریک ناشی از جدایش گردابه بر سازه‌های مهندسی است که در شکل ۲ نشان داده شده است، لذا مطالعه‌ی ارتعاشات ناشی از جریان، بیشتر در شناسایی ناحیه قفل‌شدگی، همچنین در بررسی نحوه‌ی تغییر فرکانس نوسانات نیروهای وارده بر استوانه در ابتدا و انتها و درون ناحیه‌ی مذکور و تغییر فازهای بین نوسانات نیرو و استوانه، اهمیت پیدا می‌کند، بنابراین آنچه به عنوان ارتعاشات ناشی از جریان یا جدایش گردابه مطرح می‌شود، ارتعاشات در این ناحیه است. یک جسم توپي شکل^۶ در معرض جریان، تنها زمانی دچار ارتعاش می‌شود که بخش پس‌بدنه^۷ قابل توجهی داشته باشد. منظور از پس‌بدنه، بخشی از جسم است که پس از مقطع جدایش جریان از روی سطح قرار دارد. اندازه و شکل پس‌بدنه می‌تواند به شدت بر ویژگی‌های ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ها و پاسخ دینامیکی جسم تأثیرگذار باشد.

در محدوده‌ی قفل‌شدگی، با افزایش سرعت جریان، فرکانس تولید گردابه‌ها افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در فرکانس طبیعی سازه قفل می‌شود، با افزایش بیشتر سرعت جریان، ارتعاشات سازه از محدوده‌ی قفل‌شدگی خارج شده و فرکانس تولید گردابه‌ها و نیروهای هیدرودینامیکی یک جهش ناگهانی را تجربه می‌کنند، که پس از این وضعیت، متناسب با افزایش سرعت جریان،

- 1 Vortex-Induced Vibration (VIV)
- 2 Von Karman Vortex Street
- 3 Synchronization Or Lock-in
- 4 Resonance

- 5 Ferry bridge power stations
- 6 Bluff Body
- 7 After body

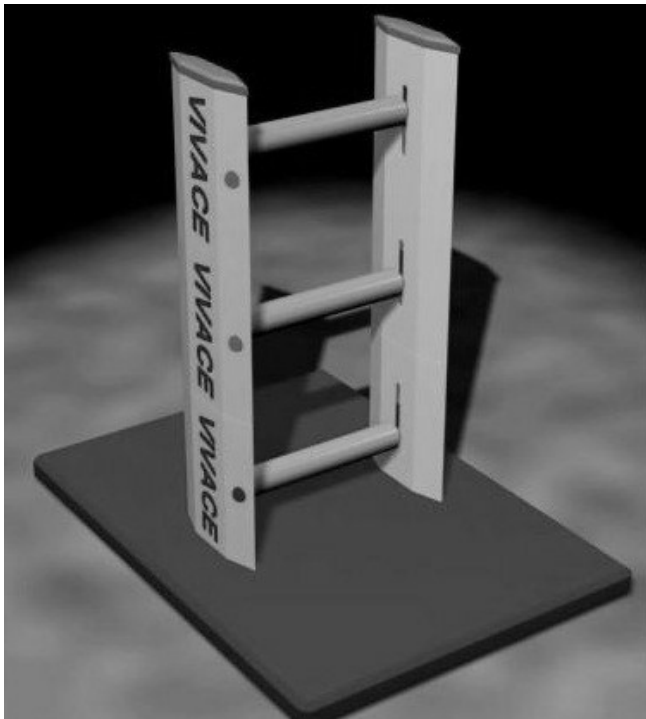


Fig. 3. Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy (VIVACE)
شکل ۳: تولید انرژی پاک آبی از ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه [۳]

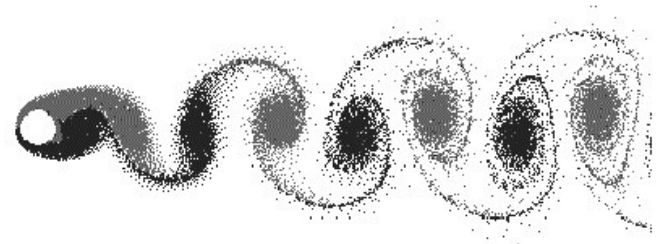


Fig. 1. Von Karman Vortex Street

شکل ۱: خیابان گردابه در جریان عرضی حول استوانه

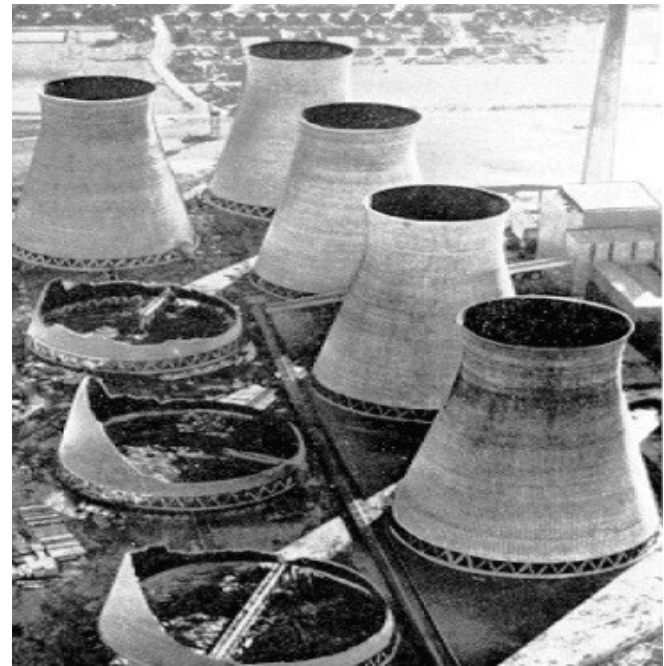


Fig. 2. Ferry bridge power stations

شکل ۲: برج‌های خنک‌کن فیری بریج

وجود مرز مشترک بین دو سیال مختلف و یا دو فاز مختلف از یک ماده، مانند سطح آزاد سیال، سبب وارد شدن دشاری‌های بسیاری در مطالعه و بررسی مسئله می‌شود. از جمله جریان‌های سطح آزاد می‌توان به جریان آب درون کانالی با بستر مسطح یا ناهموار، انتشار امواج در نواحی ساحلی، جریان آب حول پایه‌های یک پل یا اسکله، حرکت زیردریایی‌ها و سایر اجسام شناور زیر سطح آب، خطوط انتقال نفت و گاز از اعماق اقیانوس به سکوها دریایی و تجهیزات مولد انرژی اشاره کرد.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

معمولاً حرکت ارتعاشی جسم، الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا این پدیده دارای ماهیتی غیرخطی و خودتحریک است. این امر باعث شده است که نه تنها خود جریان، بلکه اثرات متقابل سیال و سازه نیز مورد توجه محققان واقع شود. ژاوتیس و ویلیامسون [۴]، به صورت تجربی پاسخ دوبعدی یک استوانه تحت تکیه‌گاه الاستیک با جرم و میرایی کم در دو درجه‌ی آزادی را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که برای نسبت جرم‌های بزرگ‌تر از شش، دامنه‌ی پاسخ نوسانات طولی بسیار کوچک‌تر از دامنه نوسانات عرضی بوده و قابل چشم‌پوشی است. سینق و میتال [۵]، از طریق فرمولاسیون پایدار شده‌ی المان محدود، ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ها در جریان حول استوانه‌ی سبک دو درجه آزادی را در اعداد رینولدز پایین با میرایی سازه‌ای صفر، مدل‌سازی کرده و اثر سرعت کاهش یافته و عدد رینولدز را بر این پدیده مشاهده کردند.

ویلدن و گراهام [۶]، ارتعاشات عرضی یک استوانه را در اعداد رینولدز

فرکانس تشکیل گردابه‌ها نیز افزایش خواهد یافت. یافتن پاسخ ارتعاشات ناشی از جریان یک استوانه‌ی منفرد، یکی از مطالعات مورد علاقه‌ی پژوهشگران در طراحی رایزرها و سکوها دریایی، لوله‌های انتقال در بستر دریا، سیستم‌های خنک‌کننده در نیروگاه‌ها به خصوص نیروگاه‌های هسته‌ای، مبدل‌های حرارتی و پل‌های معلق است. دریافت انرژی در جریان‌های آرام اقیانوسی از گردابه‌های ناشی از اجسام استوانه‌ای شکل نیز طرحی است که در سال ۲۰۰۹ توسط محققان دانشگاه میشیگان بنا نهاده شد. در این طرح تحت عنوان انرژی پاک آبی^۲ با قرار دادن اجسام استوانه‌ای شکل در بستر دریاها، انرژی گردابه‌های تشکیل شده که به صورت حرکت‌های نوسانی استوانه ظاهر می‌شود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [۳]. شکل ۳ نمونه‌ای از قالب‌های دارای استوانه با تکیه‌گاه الاستیک را نشان می‌دهد که در بستر اقیانوس کار گذاشته شده و برای تولید انرژی الکتریکی به کار می‌روند.

- 1 Riser
- 2 Aquatic Clean Energy

وی^۱ مشاهده کردند. بوزکایا و همکاران [۲۰] ارتعاشات اجباری یک استوانه با رینولدز ۲۰۰ را در چند نسبت فرکانسی بی‌بعد بررسی کردند. بوزکایا و کوکابیک [۲۱] ارتعاشات اجباری یک استوانه نزدیک سطح آزاد را در یک نسبت فرکانسی بی‌بعد مشخص در فرود ۰/۴ و رینولدز ۲۰۰ تحلیل کردند. با بررسی تمام کارهای انجام شده، مشاهده می‌شود که مسئله‌ی ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه با تکیه‌گاه الاستیک در مجاورت سطح آزاد سیال موضوعی است که تاکنون مورد توجه پژوهشگران واقع نشده است، لذا به عنوان یک مسئله‌ی آکادمیک در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود، هدف این تحقیق، بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه و به خصوص ناحیه‌ی نامطلوب قفل‌شدگی است.

۳- شبیه‌سازی مسئله

شبیه‌سازی تحقیق شامل دو قسمت است: ۱- شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ی استوانه در یک سیال نامحدود؛ ۲- شبیه‌سازی جریان حول یک استوانه‌ی ثابت نزدیک سطح آزاد سیال؛ که تلفیق این دو شبیه‌سازی اعتبارسنجی شده، مسئله‌ی مد نظر را شبیه‌سازی می‌کند.

۳-۱- شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ی جریان حول استوانه در سیال نامحدود

برای شبیه‌سازی، لازم است شبکه‌بندی اطراف استوانه به گونه‌ای تغییر شکل دهد که شبکه‌ی تغییر شکل یافته همان دقت شبکه‌ی اولیه را دارا باشد لذا از روش جابه‌جایی شبکه^۲ در یک شبکه‌بندی دو بلوکه‌ی تولید شده در پیش‌پردازنده‌ی گمبیت^۳ بصورت شکل ۴ استفاده می‌شود. بلوک اطراف استوانه که به صورت صلب با استوانه حرکت می‌کند دارای شبکه‌بندی سازمان‌یافته و سایر نواحی دارای یک شبکه‌ی بی‌سازمان با توزیع پیوسته^۴ است که با حرکت استوانه دچار تغییر شکل^۵ می‌شود. شرایط مرزی مسئله در شکل ۴ مشخص شده است.

دو دسته معادله در مسئله‌ی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه حاکم هستند: معادلات جریان و معادلات حرکت استوانه. معادلات جریان تراکم‌ناپذیر دوبعدی به صورت معادلات (۱) و (۲) هستند.

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

ارتعاش استوانه‌ی صلب بر تکیه‌گاه‌های الاستیک با سفتی یکسان در دو

پایین مطالعه کردند و در نتایج خود سه ناحیه‌ی مجزای این پدیده را در پاسخ استوانه معرفی کردند. سن و همکاران [۷] به بررسی عددی ارتعاشات ناشی از جریان استوانه‌های مربعی و بیضوی پرداختند و همان سه شاخه را در پاسخ فرکانسی یافتند. با این تفاوت که شاخه اول برای استوانه‌ی مربعی به واسطه گوشه‌دار بودن آن، ناحیه‌ای باریک‌تر است. پارکینسون [۸]، به بررسی آزمایشگاهی ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه‌ای با مقطع مستطیلی پرداخت و اثر پس‌بدنه را با در نظرگیری نسبت هندسی‌های مختلف بررسی کرد، او همچنین اثرات گالوپینگ را در نسبت طول به ضخامت‌های مختلف مشاهده کرد. کورکیچکو و منقینی [۹]، پاسخ ارتعاشات ناشی از جریان حول یک استوانه در محدوده‌ی وسیعی از اعداد رینولدز را بررسی کردند و به تعمیم نتایج از اعداد رینولدز پایین به اعداد رینولدز بالا و وجود تفاوت اندک تنها در شاخه‌ی بالایی بین اعداد رینولدز مذکور اشاره داشتند. اخیراً هاشمی‌نژاد و جراحی [۱۰]، به بررسی پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از رهاش گردابه برای استوانه‌های بیضوی در یک سیال نامحدود با نسبت ابعاد ۰/۵ و ۱ و ۲ در زوایای قرارگیری صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جریان عرضی پرداخته و اثر قفل‌شدگی و مدهای رهاش گردابه را در ابعاد و زوایای مختلف بطور کامل مورد بررسی قرار دادند.

در مورد یک استوانه‌ی ثابت نزدیک سطح آزاد سیال، میاتا و همکاران [۱۱] به توزیع فشار نامتقارن جریان حول استوانه‌ی نزدیک سطح آزاد و نیروی برای منفی، توقف رهاش گردابه در نسبت فاصله‌های کوچک و تغییرات قابل توجه عدد استروهال و ضریب پسا در فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۳۵ از سطح آزاد سیال اشاره کردند. شریدان و همکاران [۱۲] به تفاوت ساختار گردابه‌ها در حالت وجود سطح آزاد سیال نسبت به قرارگیری در سیال نامحدود و بررسی تغییر شکل سطح آزاد سیال با عدد فرود به صورت آزمایشگاهی پرداختند که البته نتایج ایشان به صورت عددی توسط واربرتون [۱۳] تأیید شد. ریچل و همکاران [۱۴] و حسینعلی‌پور و حاجی‌غفوری بوکانی [۱۵]، جریان نزدیک سطح آزاد شریدان و همکاران [۱۲] را در نسبت فاصله‌ها و اعداد فرود گوناگون از دو منظر متفاوت به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. مطالعات جریان سیال نزدیک به یک مرز بدون لغزش نیز مرجع مفیدی را برای بررسی جریان نزدیک سطح آزاد سیال بیان می‌کند. روشکو و همکاران [۱۶] به بررسی تغییرات ضرایب برآ و پسا در جریان نزدیک یک دیواره‌ی بدون لغزش پرداخته و ضریب پسای حداکثر را در نسبت فاصله‌ی ۰/۵ مشاهده کردند. بیرمن و دراکویچ [۱۷] به بررسی پاسخ فرکانسی یک استوانه نزدیک به یک مرز بدون لغزش پرداخته و تغییر قابل توجه عدد استروهال را در نسبت فاصله‌ی ۰/۲۵ ملاحظه کردند.

کاربری و همکاران [۱۸] رهاش گردابه‌ی یک استوانه با ارتعاشات اجباری زیر سطح آزاد سیال را بررسی کرده و تغییرات نیروهای وارده بر استوانه و ساختار گردابه را بر حسب فرکانس نوسانات و عمق استغراق به دست آوردند. لین و راکول [۱۹] الگوهای تشکیل گردابه از یک استوانه با ارتعاشات اجباری در نسبت فاصله‌های مختلف را با به کارگیری روش پی‌آی.

- 1 PIV (Particle image Velocimetry)
- 2 Dynamic Mesh
- 3 Gambit
- 4 Pave
- 5 Deformation

توجه به اینکه سرعت در گام زمانی جدید برابر صفر نیست، نرم‌افزار شرط مرزی سرعت را روی سلول‌های سطح استوانه به روز رسانی می‌کند و میدان جریان با شرایط مرزی جدید و موقعیت جدید استوانه، در شبکه‌ی تغییر شکل یافته برای آن گام زمانی حل می‌شود. این الگوریتم که برگرفته از تحقیق هاشمی نژاد و جراحی [۱۰] است، بصورت فلوجارت شکل ۵ نمایش داده شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, V = 0$$

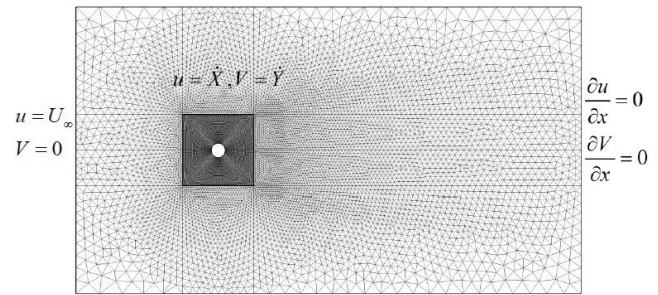


Fig. 4. Grid topology for Vortex induced vibration simulation and its Boundary condition

شکل ۴: شبکه‌بندی و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه

راستا توسط معادلات خطی جرم - فنر با نیروی تحریک وارد شده از طرف سیال به صورت معادلات (۳) و (۴) تعریف می‌شود.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_D(t) \quad (3)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f_L(t) \quad (4)$$

معادلات فوق از طریق f_D و f_L با معرفی پارامترهای بی‌بعد زیر با معادلات جریان کوپل می‌شوند.

$$m^* = \frac{4M}{\pi\rho D^2 L}, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{k(m+m^*)}}, F_N = \frac{f_n D}{U}$$

$$Re = \frac{UD}{\nu}, Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}}, Gap_Ratio = \frac{h}{D}$$

بنابراین معادلات غیر خطی شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در دو راستا بصورت معادلات (۵) و (۶) نوشته می‌شوند [۲۲].

$$\ddot{X} + 4\pi F_N \zeta \dot{X} + (2\pi F_N)^2 X = \frac{2C_D}{\pi m^*} \quad (5)$$

$$\ddot{Y} + 4\pi F_N \zeta \dot{Y} + (2\pi F_N)^2 Y = \frac{2C_L}{\pi m^*} \quad (6)$$

در حین حل گذرا، نیروهای پسا و برآ بر استوانه با روش حجم محدود^۱ به دست می‌آیند. این مقادیر توسط کد نوشته شده^۲ با زبان برنامه‌نویسی سی پلاس پلاس^۳ برای نرم‌افزار آنسیس فلونت^۴ با استفاده از کامپایلر میکروسافت ویژوال استدیو^۵ فراخوانی می‌شود، با استفاده از آن، مقدار برآیند نیروی اعمالی از طرف فنر و دمپر و جریان بر استوانه حاصل می‌شود، سپس مقدار شتاب استوانه و سرعت حرکت در گام زمانی حل به دست می‌آید، با

- 1 Finite Volume Method
- 2 User Defined Function (UDF)
- 3 C++
- 4 Ansys Fluent 14.00
- 5 Microsoft Visual Studio (Professional) 2010

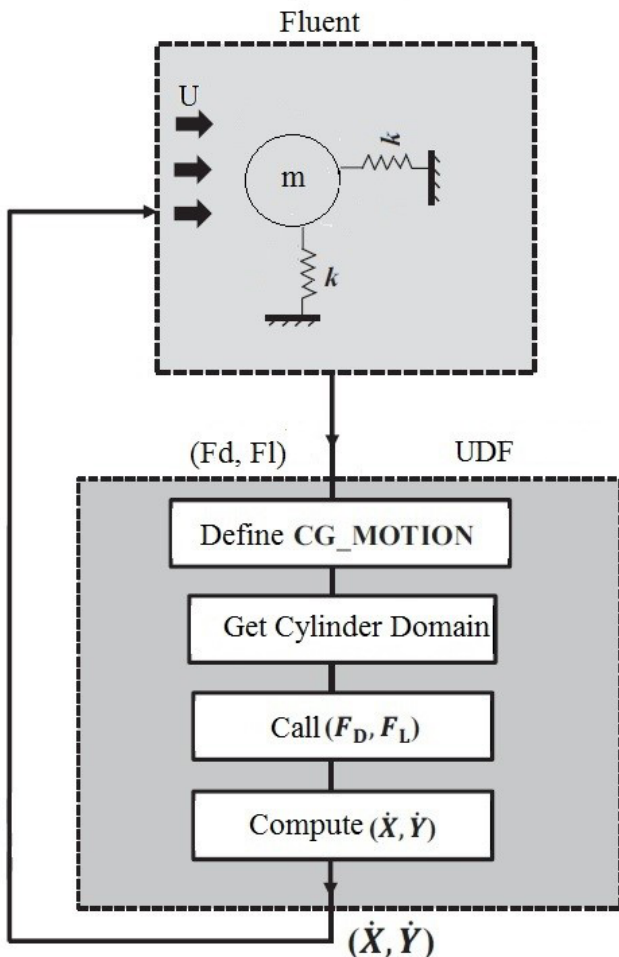


Fig. 5. General algorithm of computations [10]

شکل ۵: فلوجارت شبیه‌سازی عددی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه [۱۰]

برای حل کوپلینگ سرعت-فشار از روش پیروز^۶ جزء روش‌های خانواده‌ی سیمپل^۷، برای گسسته‌سازی گرادیان فشار از روش پرستو^۸ و برای گسسته‌سازی مومنتم از روش کوئیک^۹ استفاده می‌شود. سیال عامل، هوا انتخاب شده است و گسسته‌سازی زمانی فرمولاسیون ناپایا به علت استفاده از روش شبکه‌ی متحرک از مرتبه‌ی اول است.

نمودار حداکثر دامنه‌ی نوسانات بر حسب عدد رینولدز که به وضوح

- 6 PISO
- 7 SIMPLE
- 8 PRESTO!
- 9 QUICK

برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال [۲۵] استفاده می‌شود تا موقعیت سطح آزاد ردگیری شود. از آنجا که برای ذخیره‌ی پارامترهای مشخصه‌ی سیال مثل فشار یا سرعت در هر سلول تنها یک مقدار ذخیره می‌شود، در این روش برای وجود یا عدم وجود مایع از متغیر کسر حجمی α_q برای فاز q برابر یک (وجود مایع) و برابر صفر (عدم وجود مایع) استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این شبیه‌سازی بصورت معادلات (۷) و (۸) هستند.

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (8)$$

معادله (۷) برای ردیابی فصل مشترک بین فازها، با حل معادله‌ی پیوستگی برای کسر حجمی هر فاز به دست آمده است [۲۵]. هر خاصیت نوعی سیال در هر سلول با در نظرگیری دو فاز p و q در مسئله به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S = \alpha_q S_q + (1 - \alpha_q) S_p \quad (9)$$

با تعریف نسبت فاصله^۲ به صورت نسبت فاصله‌ی استوانه از سطح آزاد به قطر استوانه، جزئیات بیشتر در ارتباط با روش عددی و نحوه‌ی اعتبارسنجی این بخش از شبیه‌سازی در تحقیق حسینعلی پور و حاجی غفوری بوکانی [۱۵] مطرح شده است و از ذکر مجدد آن خودداری می‌شود.

برای پوشش‌دهی شبکه‌بندی شبیه‌سازی اول برای شبیه‌سازی سطح آزاد سیال، از شبکه‌بندی شکل ۸ استفاده می‌شود. بدین ترتیب که در محل تقریبی سطح آزاد سیال، تراکم شبکه‌ها ریزتر انتخاب می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده در این شبیه‌سازی، مطابق شبیه‌سازی بخش اول برای دو سیال آب و هوا است.

با توجه به عدم وجود کار آزمایشگاهی یا عددی مشابه با شبیه‌سازی نهایی، اعتبارسنجی دو بخش شبیه‌سازی مهر تاییدی^۳ بر صحت نتایج نهایی قرار می‌دهد. قبل از انجام شبیه‌سازی نهایی، لازم است یک عدد فرود مناسب انتخاب شود. برای این امر از تحقیق ریچل [۲۶] استفاده می‌شود. با مطالعه‌ی این رساله که به بررسی نیروی برای وارده بر یک استوانه‌ی ثابت نزدیک سطح آزاد سیال می‌پردازد، مشخص شد که هر چه عدد فرود کوچک‌تر باشد، وضعیت هارمونیک ره‌ایش گردابه برای جریان نزدیک سطح آزاد سیال تا نسبت فاصله‌های کوچک‌تری ادامه خواهد داشت، لذا عدد فرود ۰/۲ برای انجام شبیه‌سازی نهایی انتخاب شد. لازم به ذکر است که با توجه به پایین بودن عدد فرود، نیروی گرانش به نیروی اینرسی غالب بوده و میزان تغییر شکل سطح آزاد ناچیز است، لذا سطح آزاد سیال مثل یک دیواره‌ی بدون لغزش رفتار می‌کند [۱۵].

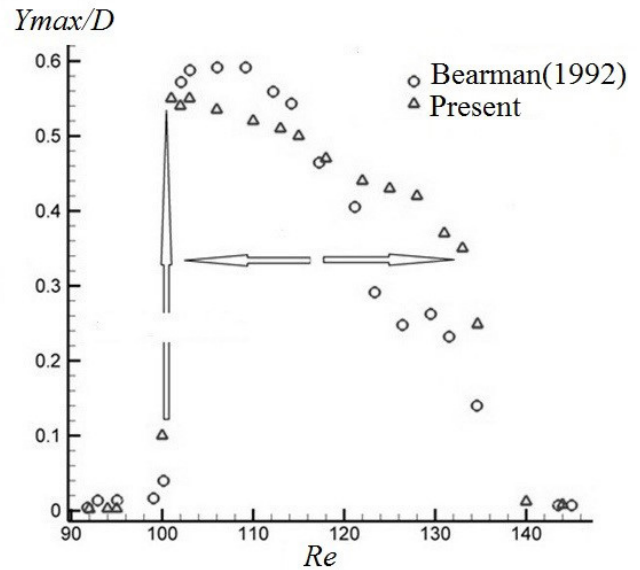


Fig. 6. Comparison of the measured and experimental maximum normalized transverse displacement response amplitudes [23]

شکل ۶: اعتبارسنجی مسئله‌ی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با کار بیرمن [۲۳] و مشابه نتایج هاشمی‌نژاد و جراحی [۱۰]

نمایشگر محدوده‌ی قفل‌شدگی نواحی مشخص شده در شکل ۶ است که در تطابق خوبی با کار تجربی آن‌گ و بیرمن [۲۳] می‌باشد. در این مدل‌سازی که از روش عددی هاشمی‌نژاد و جراحی [۱۰] استفاده شده است، عدد رینولدز در محدوده ۹۰ تا ۱۵۰ متغیر است و دامنه و فرکانس نوسانات استوانه و فرکانس جدایش گردابه‌ها به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. آزمایشات در تونل آبی با عمق ۷۰ سانتی‌متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر انجام گرفت. سفتی فرها ۶۹/۴۸ نیوتن بر متر و جرم استوانه ۳۵/۷۵ گرم و نسبت میرایی ۰/۰۰۱۲ برای سیستم نوسانگر در نظر گرفته شد. ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال به گونه‌ای انتخاب شده است که فرکانس جدایش گردابه‌ها در عدد رینولدز ۱۱۵ برابر با فرکانس طبیعی بی بعد سیستم باشد.

۳-۲- شبیه‌سازی جریان حول استوانه‌ی ثابت نزدیک سطح آزاد سیال
شکل ۷، طرح‌واره‌ای از شبیه‌سازی جریان سطح آزاد سیال را نشان می‌دهد.

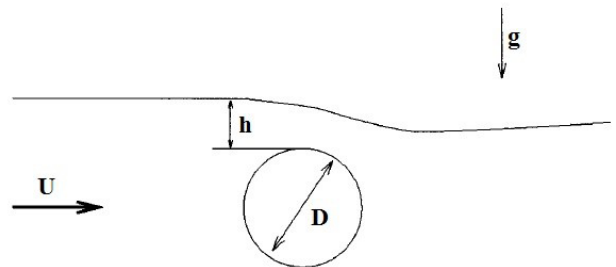


Fig. 7. Schematic of the flow arrangement for a submerged cylinder
شکل ۷: شماتیک مسئله‌ی جریان حول استوانه‌ی ثابت نزدیک سطح آزاد سیال

- 1 Volume Of Fluid (VOF)
- 2 Gap Ratio
- 3 Verification

۳-۳- بررسی استقلال از شبکه و گام زمانی

جدول ۱، شبکه‌های مختلف مورد استفاده برای یک استوانه‌ی ثابت در سیالی نامحدود در جریان با رینولدز ۱۰۰ را نشان می‌دهد (ابعاد شبکه و گام زمانی در تمامی موارد یکسان است). با توجه به نتایج و اینکه حین شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جریان، شبکه‌بندی تغییر می‌کند لذا دو شبکه‌ی ۳ و ۶ انتخاب می‌شوند که از بین آنها شبکه‌ی شماره‌ی ۶ به علت تعداد شبکه‌های بیشتر بلوک مرکزی به عنوان شبکه‌ی مناسب برای شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جریان انتخاب می‌شود.

جدول ۱: اثر دقت شبکه در شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش جریان

Table 1. Numerical results for grid independence study of the freely oscillating cylinders at $Re=100$

$C_{l,max}$	$C_{d,rms}$	تعداد شبکه‌های بلوک مرکزی	تعداد کل شبکه	شماره‌ی شبکه
۰/۳۱۵	۱/۶۴	۵۲۰	۳۵۴۰	۱
۰/۵۰۲۳	۱/۸۱۱۳	۲۰۰۰	۱۴۱۷۸	۲
۰/۵۴۴	۱/۸۴	۵۶۰۰	۲۲۰۹۲	۳
۰/۵۴۹	۱/۸۴	۱۱۲۰۰	۲۷۶۹۲	۴
۰/۵۵	۱/۸۲	۳۸۴۰۰	۹۵۰۶۲	۵
۰/۵۴۸	۱/۸۴	۷۰۰۰	۲۴۱۲۲	۶
۰/۵۳۵	۱/۸۲	۷۰۰۰	۲۰۱۷۸	۷

برای بررسی تأثیر تغییر تعداد شبکه بر شبیه‌سازی سطح آزاد سیال، از دو شبکه‌بندی مختلف مطابق جدول ۲ در عدد فرود ۰/۴ استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ۶۶٪ تعداد شبکه‌های ردیف اول تأثیر ۱٪ بر نتایج اندازه‌گیری شده دارد.

جدول ۲: اثر دقت شبکه بر جریان حول استوانه نزدیک سطح آزاد سیال

Table 2. Numerical results for grid independence study of the cylinder near a Free Surface

تعداد شبکه	عدد استروهاال	ضریب پس‌ا	آر.ام.اس ^۱ ضریب پس‌ا	ضریب برآ	آر.ام.اس ^۱ ضریب برآ
۵۲۹۶۰	۰/۱۹۶۹	۱/۶۲۲۵	۰/۱۵۲۶	۰/۳۲۴۵	۰/۵۳۶۶
۸۸۶۷۰	۰/۱۹۷۲	۱/۶۲۰۹	۰/۱۵۰۷	۰/۳۲۶۸	۰/۵۲۲۹

با توجه به بررسی استقلال از شبکه در دو شبیه‌سازی از شبکه‌بندی با تعداد شبکه‌های ۵۲۹۶۰ که تعداد حداقل ۷۰۰۰ شبکه از آن باید برای بلوک مرکزی اطراف استوانه اختصاص داده شود، استفاده می‌شود.

از آن‌جا که معادلات به صورت تابعی از زمان بوده و پاسخ سیستم نیز در طول زمان مورد توجه است، لذا لازم است از استقلال نتایج از گام زمانی اطمینان حاصل شود. در شبکه‌های در نظر گرفته شده برای هر استوانه،

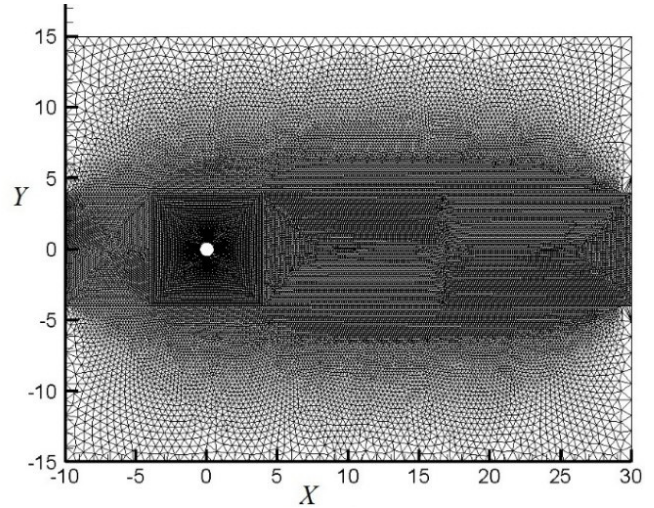


Fig. 8. Grid topology for free surface simulation

شکل ۸: شبکه‌بندی شبیه‌سازی سطح آزاد سیال

برای بررسی تأثیر سطح آزاد سیال از دو نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و ۱/۵ و محدوده‌ی اعداد رینولدز ۶۰ الی ۱۳۰ استفاده می‌شود. جرم بی‌بعد استوانه ۱۲۷/۳۲، طول مشخصه‌ی جریان برابر قطر استوانه (یک متر) و چگالی سیال سنگین‌تر ۱ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فرکانس رهاش گردابه‌ی استوانه‌ی ثابت در رینولدز ۱۰۰، سفتی فنر در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ برابر ۱۱۱/۲۰ نیوتون بر متر و در نسبت فاصله‌ی ۱/۵ برابر ۱۱۸/۳۷ نیوتون بر متر و میرایی نیز به پیروی از تحقیق سینق و میتال [۵] برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. برای رسیدن به حالت پایای نتایج برای هر ران، با در نظرگیری دقت حل باقی‌مانده‌ها از مرتبه‌ی 10^{-5} برای تمامی معادلات با استفاده از آپراریانه‌ای با ۱۶ پردازنده و ۱۶ گیگابایت حافظه‌ی دسترسی تصادفی حدوداً ۱۳ روز زمان لازم است. شکل ۹، طرح‌واره‌ای از شبیه‌سازی نهایی را نشان می‌دهد که از ترکیب دو شبیه‌سازی مذکور حاصل می‌شود.

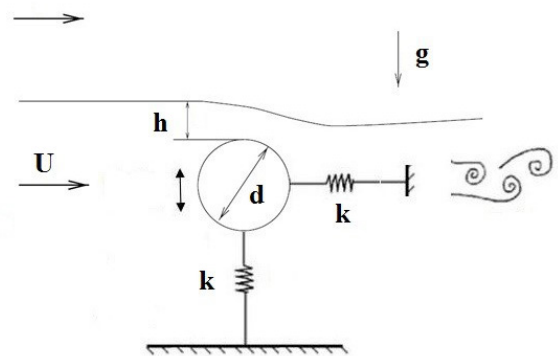


Fig. 9. Schematic of the flow induced vibration of a cylinder near a Free Surface

شکل ۹: طرح‌واره‌ای از شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در مجاورت سطح آزاد سیال

1 RMS (Root Mean Square)

۴-۱- بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با استفاده از نمودار جابه‌جایی استوانه

یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های بررسی ارتعاشات یک نوسانگر، دامنه‌ی نوسانات آن است. شکل ۱۰ تغییرات پاسخ عرضی حداکثر استوانه نسبت به حالت تعادل استاتیکی را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. در تفسیر پاسخ ارتعاشات ناشی از جریان، در حالت کلی همواره سه شاخه‌ی اولیه، بالایی و پایینی مشاهده می‌شود که با وجود سطح آزاد سیال نیز این شاخه‌ها قابل تفکیک‌اند. شاخه‌ی اولیه قبل از وقوع پدیده‌ی قفل‌شدگی است و از رینولدز ۶۰ شروع می‌شود و برای هر دو نسبت فاصله تا رینولدز ۸۶ ادامه دارد. ناحیه‌ای که دارای بیشترین دامنه‌ی نوسانات است، تحت عنوان شاخه‌ی بالایی شناخته می‌شود که برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵ تا رینولدز ۱۱۷ و برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵ تا رینولدز ۱۰۶ ادامه دارد. ناحیه‌ی پایینی هم دربرگیرنده‌ی کلیه‌ی اعداد رینولدز بزرگتر از این مقادیر است.

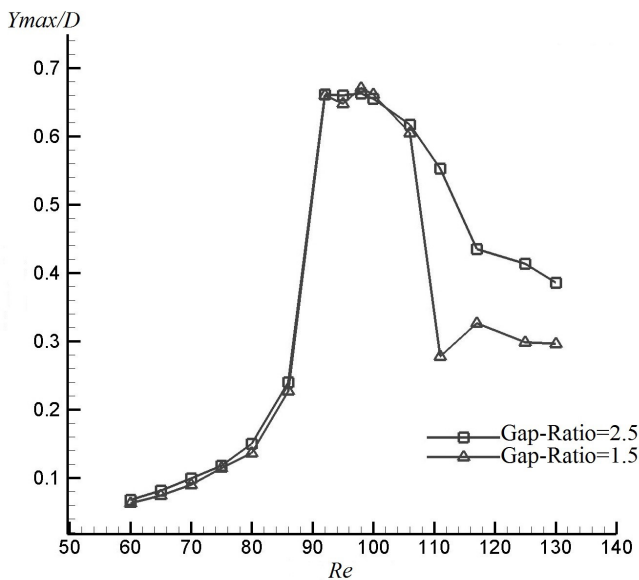


Fig. 10. Variations of the maximum normalized transverse displacement response amplitudes at Gap - Ratio = 2.50, 1.50

شکل ۱۰: جابه‌جایی عرضی حداکثر بی بعد استوانه بر حسب عدد رینولدز در دو نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و ۱/۵

یک نکته‌ی مهم در بررسی نمودار جابه‌جایی عرضی، شباهت کیفی نمودار برای دو نسبت فاصله است که نشان می‌دهد سطح آزاد سیال موجب تغییر اساسی در اصل پدیده نمی‌شود، فقط به طور کمی بر ارتعاشات ناشی از جریان اثرگذار است که با بررسی نمودارهای متعاقب این موضوع مجدداً تأیید می‌شود. بررسی شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز تا ۸۶ دامنه‌ی نوسانات به مقدار کوچکی نسبت به قطر در حال افزایش است. طبیعی است که در این وضعیت به علت جرم افزوده‌ی بالا، جسم در ازای نیروی تحریک یکسان، کمترین شتاب و در نتیجه کمترین دامنه‌ی حرکت را به خود می‌گیرد. به عنوان نمونه، شکل ۱۱ نوسانات حرکت استوانه و

جدول ۳: اثر گام زمانی در شبکه‌ی استوانه‌ی دایروی

Table 3. Effect of time step refinement on the computed Strouhal numbers of flow over the stationary cylinders at $Re=100$, and comparison with available experimental data

گام زمانی	عدد استروهل در رینولدز ۱۰۰	درصد خطا با رابطه‌ی تجربی
۰/۶۲۵	۰/۱۵۹	-۳/۲۸
۰/۱۰۵	۰/۱۶۱۳	-۹۱/۸۸
۰/۱۰۱	۰/۱۶۴۱۴	-۰/۱۵۸
۰/۰۰۵	۰/۱۶۶۱	-۱/۰۳۴

اثر اندازه‌ی بازه‌ی زمانی در جدول ۳ نشان داده می‌شود. در هر مورد، عدد استروهل جریان حول استوانه‌ی ثابت در سیال نامحدود و رینولدز ۱۰۰ به دست آمده است که مشاهده می‌شود مقدار بازه‌ی زمانی تأثیر مستقیمی در عدد استروهل محاسبه شده دارد، در حالی که بر مقادیر ضرایب پسا و برآ اثر ناچیزی می‌گذارد. با این مقادیر و با استفاده از رابطه‌ی تجربی روشکو [۲۷] برای عدد استروهل، اندازه‌ی بازه‌ی زمانی مناسب انتخاب می‌شود. بر اساس رابطه روشکو، عدد استروهل جریان در رینولدز ۱۰۰، بصورت تجربی برابر ۰/۱۶۴۴ است.

بر این اساس، گام زمانی ۰/۰۰۵ برای این شبیه‌سازی مناسب است. برای بررسی تأثیر اندازه‌ی گام زمانی در شبیه‌سازی جریان حول استوانه نزدیک سطح آزاد سیال، مطابق جدول ۴ از دو گام زمانی در عدد فرود ۰/۳ و نسبت فاصله‌ی ۰/۴ استفاده شد.

جدول ۴: تأثیر گام زمانی در شبیه‌سازی سطح آزاد سیال

Table 4. Effect of time step refinement on the computed Strouhal numbers and Lift & Drag coefficient of flow over the stationary cylinders near a free surface

گام زمانی	عدد استروهل	آر.ام.اس ضریب پسا	آر.ام.اس ضریب برآ	آر.ام.اس ضریب فشار مینا
۰/۰۲۵	۰/۱۸۸۶	۰/۲۱۶۸	۰/۵۱۶۱	-۰/۳۹۳۶
۰/۰۱۲۵	۰/۱۹۱۶	۰/۲۱۰۳	۰/۵۲۷۲	-۰/۴۱۴۷

بنا بر جدول ۴، گام زمانی ۰/۰۲۵، که با ضریب پسا و برآی تجربی ۳٪ و ضریب فشار تجربی ۵/۴٪ اختلاف دارد، برای این شبیه‌سازی مناسب است. با توجه به بررسی گام زمانی در دو شبیه‌سازی، گام زمانی کوچکتر یعنی ۰/۰۲۵ برای شبیه‌سازی نهایی انتخاب می‌شود.

۴- نتایج و تحلیل آنها

در این قسمت، به بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در دو بخش پرداخته می‌شود.

قطر استوانه در رینولدز ۸۰ به ۰/۲۲ قطر استوانه در رینولدز ۸۶ جهش پیدا می‌کند. در مرحله‌ی دوم، جهش به حداکثر مقدار دامنه یعنی ۰/۶۶ قطر استوانه برای هر دو نسبت فاصله دست می‌یابد که به وضوح نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی قفل‌شدگی است. در انتهای شاخه‌ی بالایی، یک تغییر ملموس در دامنه‌ی نوسانات به صورت یک کاهش نسبی قابل مشاهده است که علت آن، جدایش گردابه‌ها در فرکانس میانی و اختلاف فاز پاسخ استوانه با نیروی تحریک است و نشان‌دهنده‌ی انتقال از شاخه‌ی بالایی به شاخه‌ی پایینی است.

دامنه‌ی نوسانات استوانه در نسبت فاصله‌ی ۱/۵ در هر سه شاخه کوچکتر از مقدار مشابه آن در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ است، به عبارتی بهتر، سطح آزاد، دامنه‌ی ارتعاشات استوانه را کاهش می‌دهد، لذا انتظار می‌رود در نسبت فاصله‌های کوچکتر، کاهش دامنه بیشتر هم باشد که علت آن فشرده شدن خطوط جریان در بالای استوانه و ممانعت استوانه از آزادی عمل بیشتر توسط سطح آزادی است که اکنون به واسطه‌ی عدد فرود پایین آن همچون یک دیواره‌ی بدون لغزش عمل می‌کند [۱۵]. این موضوع در شاخه‌ی ابتدایی و به خصوص انتهای ناحیه‌ی قفل‌شدگی نسبت به محدوده‌ی میانی این ناحیه شدت بیشتری دارد. به عبارت دیگر در ناحیه‌ی قفل‌شدگی اساساً سطح آزاد تأثیر چندانی بر نوسانات نداشته و حداکثر دامنه‌ی نوسانات عرضی برای هر دو نسبت فاصله مقادیر حدوداً یکسانی دارند. با توجه به این نکته که استوانه در هر دو نسبت فاصله، پارامتر جرم بی‌بعد یکسانی دارد، ملاحظه می‌شود که تغییر نسبت فاصله تغییری در زمان رخ دادن ناحیه‌ی قفل‌شدگی به صورت قابل توجه ندارد، اما به وضوح دیده می‌شود که سطح آزاد موجب کاهش محدوده‌ی قفل‌شدگی می‌شود، به گونه‌ای که نوسانات عرضی برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵ زودتر به شاخه‌ی پایینی منتقل می‌شود. با توجه به اینکه در جریان نامحدود حول استوانه‌ی [۵] در شاخه‌ی پایینی یک افزایش نسبی جزئی در دامنه‌ی نوسانات عرضی مشاهده می‌شود، در این‌جا نیز برای هر دو نسبت فاصله تا حدودی این پدیده مشاهده می‌شود، با این تفاوت که سطح آزاد باعث زودتر رخ دادن آن شده است.

مطابق نتایج ویلیامسون و گواردهان [۲۸]، در ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در جریان نامحدود حول یک استوانه، دامنه‌ی ارتعاشات عرضی بسیار بزرگ‌تر از دامنه‌ی ارتعاشات طولی است، در حالتی که سطح آزاد سیال به مسئله اضافه می‌شود، ارتعاشات غالب باز هم ارتعاشات در راستای عمود بر جریان است و ارتعاشات در راستای جریان اولاً دارای دامنه‌ی کمتری است و ثانیاً تأثیر آن‌چنانی بر میدان جریان ندارد. به طوری که حداکثر دامنه‌ی نوسانات عرضی ۰/۶۶ قطر استوانه است اما حداکثر دامنه‌ی نوسانات طولی ۰/۰۲ قطر استوانه است، در حالی که فرکانس نوسانات استوانه در هر دو جهت تقریباً یکسان است.

از بررسی شکل ۱۰ می‌توان دریافت که قابلیت ارتعاش استوانه در خارج از ناحیه‌ی قفل‌شدگی تقریباً تأثیری بر میدان جریان حول استوانه ندارد و ویژگی‌های عمده‌ی جریان مشابه حالت عبور جریان از روی یک استوانه‌ی

پاسخ تبدیل فوریه‌ی سریع^۱ آن را در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و رینولدز ۱۰۰ نشان می‌دهد که مقدار آن برای فرکانس ۰/۱۶۷۳ حداکثر است. با توجه به فرکانس طبیعی جرم-فنر و فرکانس حرکت استوانه و استفاده از رابطه‌ی (۱۰)، مقدار جرم افزوده در این حالت حدوداً ۰/۵ کیلوگرم حاصل می‌شود.

$$m_A + m_{Cyl} = \frac{k}{\omega_{cyl}^2} \quad (10)$$

درحالی‌که در همین نسبت فاصله در رینولدز ۸۶ مطابق شکل ۱۲ محاسباتی مشابه، مقدار جرم افزوده حدوداً ۳ کیلوگرم بدست می‌آید. مطابق نمودار تبدیل فوریه‌ی سریع، فرکانس غالب در این حالت ۰/۱۶۵۹ است.

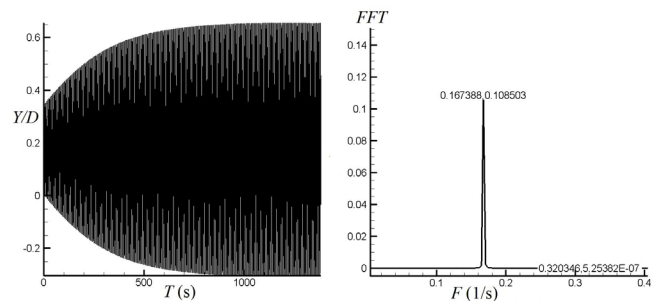


Fig. 11. transverse displacement response amplitudes and its FFT
Gap - Ratio = 2.5, Re = 100

شکل ۱۱: پاسخ عرضی و اف.اف.تی آن در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و رینولدز ۱۰۰

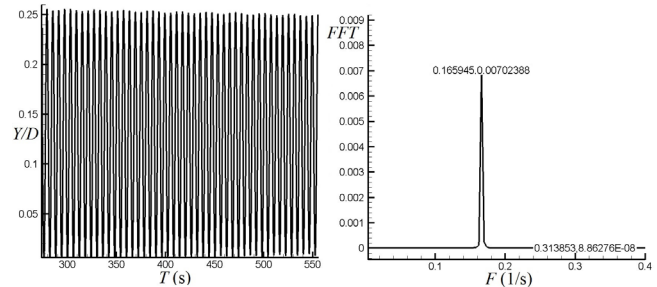


Fig. 12. transverse displacement response amplitudes and its FFT
Gap - Ratio = 2.5, Re = 86

شکل ۱۲: پاسخ عرضی و اف.اف.تی آن در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و رینولدز ۸۶

این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که جرم افزوده در رینولدزهایی که در ابتدای ناحیه‌ی قفل‌شدگی قرار دارند، دارای حداقل مقدار ممکن است. به عبارت دیگر سیال اطراف استوانه هم‌فرکانس با سازه نوسان می‌کند و کمترین تأثیر را بر حرکت آن می‌گذارد.

در ابتدای ناحیه‌ی تطابق فرکانسی، جهش در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله‌ی اول، پدیده‌ی ضربان در پاسخ استوانه مشاهده می‌شود، به طوری که در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ دامنه از ۰/۱۵ قطر استوانه در رینولدز ۸۰ به ۰/۲۴ قطر استوانه در رینولدز ۸۶ و در نسبت فاصله‌ی ۱/۵، دامنه از مقدار ۰/۱۳

1 Fast Fourier Transform (FFT)

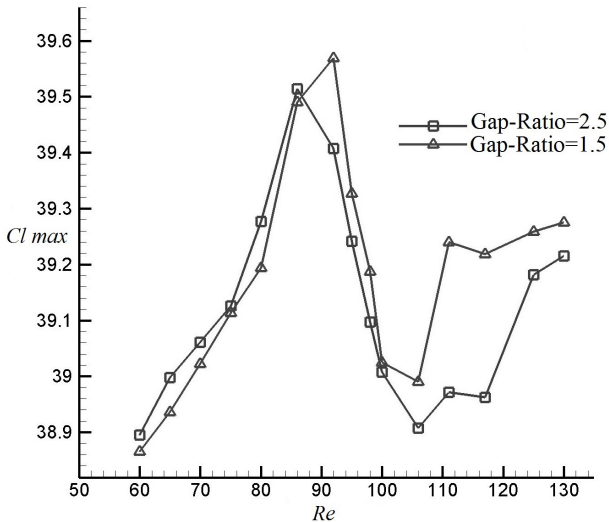


Fig. 13. Variations of the maximum Lift coefficient amplitudes

شکل ۱۳: دامنه‌ی حداکثر نوسانات ضریب برای استوانه برای دو نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و ۱/۵

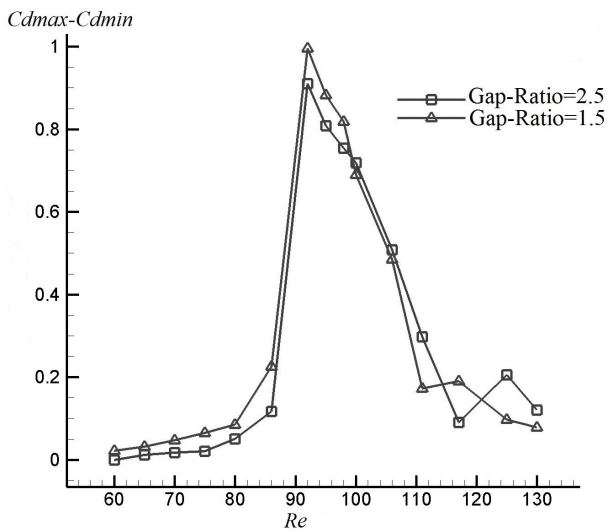


Fig. 14. Variations of the maximum difference of Drag coefficient amplitudes

شکل ۱۴: دامنه‌ی حداکثر اختلاف نوسانات ضریب پسای استوانه برای دو نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و ۱/۵

موضوع تأیید می‌شود. در رینولدز ۹۲ برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵ هم‌فاز و هم‌فرکانس بودن ارتعاش استوانه در راستای عرضی با نیروی برای اعمالی در ابتدای ناحیه‌ی تطابق فرکانسی مشهود است که در شکل ۱۸ هم می‌توان آن را ملاحظه کرد.

مطابق با نمودار شکل ۱۳، ملاحظه می‌شود که تا قبل از ورود به ناحیه‌ی قفل‌شدگی، دامنه‌ی نوسانات ضریب برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵ بیشتر از نسبت فاصله‌ی ۱/۵ است، در حالی که به محض ورود به این ناحیه و تا انتهای آن، عکس این موضوع اتفاق می‌افتد. به عبارتی وجود سطح آزاد، موجب تقویت نیروی تحریکی شده که غیر هم‌فاز با دامنه‌ی نوسانات است. حال آن‌که در شاخه‌ی اولیه سطح آزاد موجب تضعیف نیروی تحریکی

ساکن نزدیک سطح آزاد سیال است. این نتیجه با توجیهی مشابه، در مورد استوانه با ارتعاشات اجباری نزدیک سطح آزاد توسط کاربری و همکاران [۱۸] نیز مطرح شده است.

۴-۲- بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با استفاده از نمودار ضرایب آئرودینامیکی استوانه

نحوه‌ی تغییرات ضرایب برآ و پسای استوانه به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. جهش در ابتدا و انتهای شاخه‌ی بالایی برای هر دو نسبت فاصله در ضرایب برآ و پسای قابل مشاهده است. برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵ دامنه‌ی ضریب برآ تا رینولدز ۸۶ و برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵ تا رینولدز ۹۲ با شیب تند در حال افزایش است. تا این رینولدز، دامنه‌ی نوسانات به واسطه‌ی هم‌فاز بودن با نیروهای وارده افزایش می‌یابد. هم‌فاز بودن جابه‌جایی عرضی با نیروی تحریک، برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵ تا رینولدز ۸۶ و برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵ تا رینولدز ۹۲ ادامه دارد و بیانگر دریافت انرژی جنبشی از جریان توسط استوانه است (ملاحظه می‌شود سطح آزاد موجب به تعویق افتادن ناحیه‌ی غیر هم‌فازی شده است). به همین دلیل افزایش نیروی تحریک تا قبل از این بازه موجب افزایش دامنه‌ی نوسانات عرضی استوانه می‌شود. پس از این رینولدز اثر سیال بر استوانه کاهش می‌یابد که این کاهش در مقدار جرم افزوده نیز قابل مشاهده است. در نمودار ضریب برآ برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵، در محدوده‌ی شاخه‌ی بالایی، از رینولدز ۸۶ تا ۱۰۶ و برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵، از رینولدز ۹۵ تا ۱۰۶ افتی ناگهانی مشاهده می‌شود.

مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶، برای هر دو نسبت فاصله در این بازه، با وجود کاهش شدیدی که در ضریب برآ اتفاق افتاده است، دامنه‌ی نوسانات عرضی همچنان افزایش می‌یابد. از طرفی با شروع افزایش مجدد دامنه‌ی نوسانات ضریب برآ، دامنه‌ی نوسانات جابه‌جایی عرضی کاهش می‌یابد، این رفتار بیانگر اختلاف فاز ۱۸۰ درجه بین جابه‌جایی و نیروی تحریک در محدوده‌های مذکور برای دو نسبت فاصله است و تا انتهای شاخه‌ی بالایی برای هر دو نسبت فاصله ادامه دارد که علت این رفتار، معکوس شدن جهت تبادل انرژی است. بنابراین کاهش دامنه‌ی نوسانات عرضی برای دو نسبت فاصله از رینولدز ۱۰۶ به بعد به واسطه‌ی از دست دادن انرژی و عدم هم‌فاز بودن با نیروی تحریکی است که در حال افزایش است. به عبارتی از این رینولدز به بعد برای هر دو نسبت فاصله، سیال اطراف استوانه نقش میراگر را برای سیستم بازی می‌کند. با این میزان اختلاف فاز، جریان با افزایش عدد رینولدز انرژی جنبشی بیشتری دریافت می‌کند که آن هم موجب یک افزایش نسبی در ضریب برآ می‌شود. برای بهتر نشان دادن این موضوع شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمودار جابه‌جایی و ضریب برای استوانه را بصورت موردی نشان می‌دهند.

به عنوان نمونه برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵ در رینولدز ۱۰۰ مطابق شکل ۱۵، اختلاف فاز مذکور باید به خوبی نشان داده شود که در شکل ۱۷ این

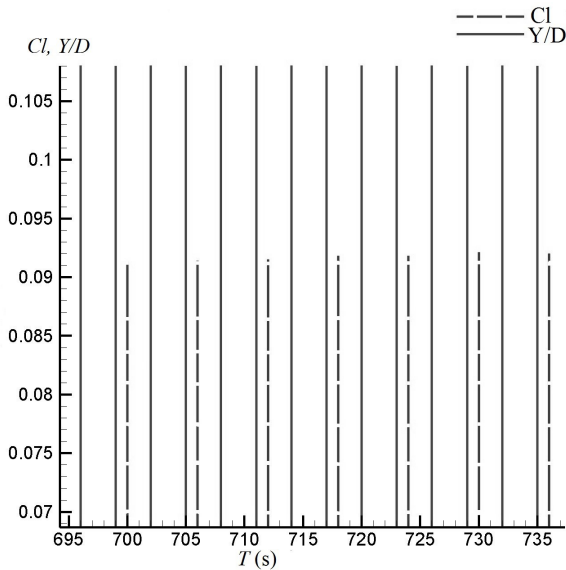


Fig. 17. Comparison of Lift coefficient and transverse displacement response amplitudes at $Gap - Ratio = 2.50$, $Re = 100$

شکل ۱۷: جابه‌جایی عرضی و ضریب برآ منهای شناوری در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ و رینولدز ۱۰۰

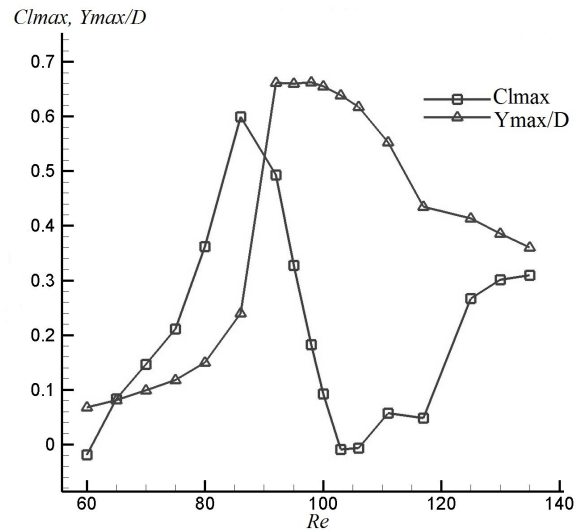


Fig. 15. Comparison of the maximum Lift coefficient and maximum normalized transverse displacement response amplitudes at $Gap - Ratio = 2.5$

شکل ۱۵: مقایسه‌ی روند تغییر در دامنه‌ی جابه‌جایی عرضی با دامنه‌ی ضریب برآ (منهای نیروی شناوری بی‌بعد) برای نسبت فاصله‌ی ۲/۵

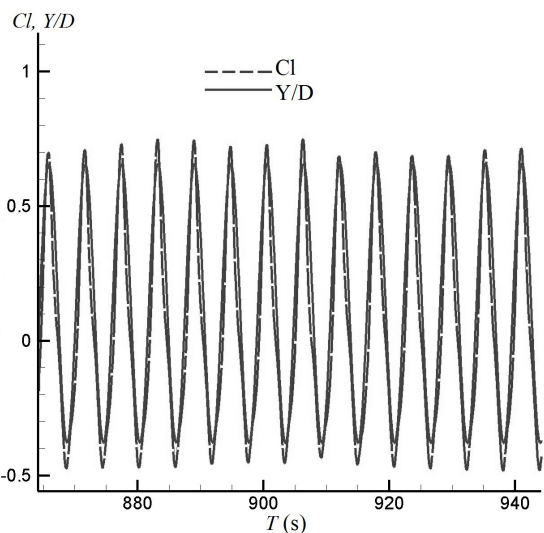


Fig. 18. Comparison of Lift coefficient and transverse displacement response amplitudes at $Gap - Ratio = 1.50$, $Re = 92$

شکل ۱۸: جابه‌جایی عرضی و ضریب برآ منهای شناوری در نسبت فاصله‌ی ۱/۵ و رینولدز ۹۲

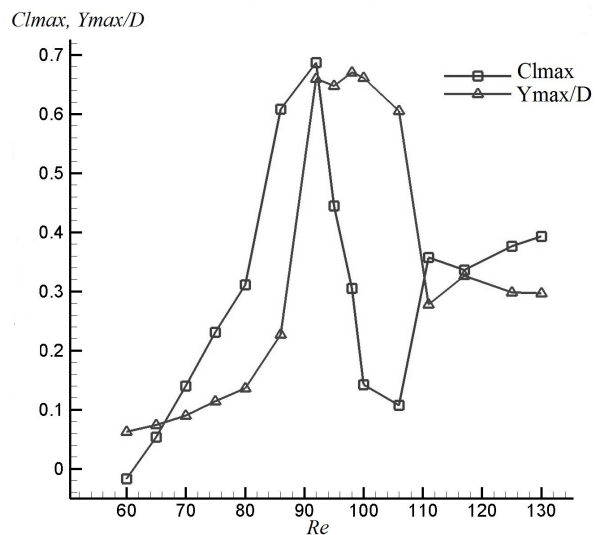


Fig. 16. Comparison of the maximum Lift coefficient and maximum normalized transverse displacement response amplitudes at $Gap - Ratio = 1.5$

شکل ۱۶: مقایسه‌ی روند تغییر در دامنه‌ی جابه‌جایی عرضی با دامنه‌ی ضریب برآ (منهای نیروی شناوری بی‌بعد) برای نسبت فاصله‌ی ۱/۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ی جریان حول استوانه در نزدیکی سطح آزاد سیال مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که می‌توان ناحیه‌ی نامطلوب قفل‌شدگی را با اضافه کردن یک سطح آزاد معین تا حد مطلوبی کنترل کرد. به طور خلاصه می‌توان اثرات سطح آزاد سیال بر این‌گونه ارتعاشات را به صورت زیر بیان نمود:

همواره دامنه‌ی نوسانات عرضی بسیار بزرگ‌تر از دامنه‌ی نوسانات طولی است و می‌توان از نوسانات طولی در مقایسه با نوسانات عرضی صرف نظر

می‌شود که با دامنه‌ی نوسانات هم‌فاز است. لذا می‌توان نتیجه گرفت سطح آزاد موجب تضعیف نیروی تحریک هم‌فاز با دامنه‌ی نوسانات و تقویت نیروی تحریک غیر هم‌فاز با دامنه‌ی نوسانات می‌شود.

با ملاحظه‌ی نمودار ضریب پسا در شکل ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که اساساً سطح آزاد، موجب افزایش نیروی پسای وارده بر استوانه می‌شود. دامنه‌ی نوسانات ضریب پسا در نسبت فاصله‌ی ۱/۵ همواره بیشتر از مقدار مشابه آن در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ است. در حالی که در انتهای ناحیه‌ی قفل‌شدگی تغییراتی هر چند ناچیز روی این موضوع اتفاق افتاده است.

فهرست علائم

عدد فرود	Fr
نیروهای نوسانی وابسته به زمان ناشی از رهايش گردابه‌ی وارده بر استوانه، N	f
فرکانس بی‌بعد رهايش گردابه، s^{-1}	F
شتاب گرانش، ms^{-2}	g
نسبت فاصله از سطح آزاد سیال	<i>Gap - Ratio</i>
فاصله‌ی استوانه از سطح آزاد سیال، m	h
ثابت فنریت، Nm^{-1}	k
طول استوانه، m	L
جرم، Kg	m
فشار، $kgm^{-1}s^{-2}$	P
عدد رینولدز	Re
یکی از خواص سیال	S
عدد استروهل	St
زمان، s	t
میدان سرعت، ms^{-1}	$\vec{U}(u,v)$
نوسانات در راستای طولی، m	X
نوسانات در راستای عرضی، m	Y
علامت یونانی	
لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$	μ
چگالی، kgm^{-3}	ρ
کسر حجمی	α
فرکانس، $s^{-1}rad$	ω
ویسکوزیته‌ی سینماتیکی آب، m^2s^{-1}	ν
نسبت میرایی	ζ
بالانویس	
فرم بی‌بعد شده	*
زیرنویس	
افزوده	A
استوانه	Cyl
نیروی پسا	D
نیروی برآ	L
حداکثر	max
زیرنویس فرکانس برای تمایز با نیرو	N
یکی از فازهای مسئله	q

کرد.

افت و خیزهایی که در دامنه‌ی پاسخ استوانه‌ها با افزایش در عدد رینولدز رخ می‌دهد، سبب بروز سه شاخه‌ی متمایز می‌شود؛ شاخه‌ی اولیه، بالایی و پایینی، که ناحیه‌ای که در آن، فرکانس رهايش گردابه به فرکانس طبیعی سیستم جهش پیدا کرده و روی آن قفل می‌شود به شاخه‌ی بالایی یا تطابق فرکانسی معروف است. در این شاخه دامنه‌ی نوسانات پاسخ‌های مختلف استوانه به حداکثر مقدار ممکن می‌رسد.

اساساً سطح آزاد موجب تغییرات بنیادی در پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از جریان نمی‌شود، فقط تغییرات کمی را در شاخه‌های مختلف ایجاد می‌کند. سطح آزاد موجب کاهش دامنه‌ی نوسانات طولی و عرضی می‌شود و علت آن می‌تواند فشرده‌تر شدن گردابه‌های جداشده از استوانه و ممانعت استوانه از آزادی عمل بیشتر توسط سطح آزادی باشد که در اعداد فرود پایین همچون یک دیواره‌ی صلب عمل می‌کند.

در ناحیه‌ی قفل‌شدگی، سطح آزاد تأثیر زیادی را بر هیچ یک از نمودارهای جابه‌جایی عرضی و ضرایب آیرودینامیکی ندارد و تأثیر سطح آزاد بیشتر در دو شاخه‌ی دیگر مشخص است.

با افزایش عدد رینولدز، سطح آزاد در نقطه‌ی شروع ناحیه‌ی قفل‌شدگی بی‌تأثیر است، اما موجب کاهش محدوده‌ی قفل‌شدگی و انتقال زودتر از شاخه‌ی بالایی به پایینی می‌شود.

در شاخه‌ی اولیه، به علت هم‌فاز بودن نیروی تحریک و دامنه‌ی نوسانات، روند تغییر این دو یکسان است، اما در شاخه‌ی بالایی و از یک رینولدز مشخص به بعد برای هر نسبت فاصله، به علت اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ی نیروی تحریک و دامنه‌ی نوسانات، روند تغییر آنها کاملاً متفاوت خواهد شد. مثلاً در ناحیه‌ای که دامنه‌ی نوسانات کاهش می‌یابد، سیال اطراف همچون یک میراگر عمل می‌کند، از طرفی سطح آزاد موجب به تعویق افتادن ناحیه‌ی غیر هم‌فاز می‌شود.

سطح آزاد موجب تضعیف نیروی تحریک هم‌فاز با دامنه‌ی نوسانات و تقویت نیروی تحریک غیر هم‌فاز با دامنه‌ی نوسانات می‌شود.

سطح آزاد موجب افزایش نیروی پسای وارده بر استوانه می‌شود.

تشکر و قدردانی

برای انجام برخی از محاسبات این تحقیق از سیستم‌های مرکز تحقیقات پردازش‌های فوق سریع^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) و آزمایشگاه تحقیقاتی انرژی، آب و محیط زیست و نیز دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شد. لذا نویسندگان این تحقیق نهایت تشکر و قدردانی خود را بابت بهره‌برداری از امکانات این مراکز تقدیم می‌دارند.

1 High Performance Computing Research Center (HP-CRC)- <http://hpcrc.aut.ac.ir>

- [14] P. Reichl, K. Hourigan, M. Thompson, Flow past a cylinder close to a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 533 (2005) 269-296.
- [15] S.M. Hosseinalipoor, N. Haji ghafoori boukani, Numerical Investigation of Flow past a Circular Cylinder beneath a Free Surface with Volume of Fluid Method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(1) (2017) 11-18.
- [16] A. Roshko, A. Steinolfson, V. Chattoorgoon, *Flow forces on a cylinder near a wall or near another cylinder*, CALIFORNIA INST OF TECH PASADENA, 1975.
- [17] P. Bearman, M. Zdravkovich, Flow around a circular cylinder near a plane boundary, *Journal of Fluid Mechanics*, 89(1) (1978) 33-47.
- [18] J. Carberry, J. Sheridan, D. Rockwell, Cylinder oscillations beneath a free-surface, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 23(1) (2004) 81-88.
- [19] J.-C. Lin, D. Rockwell, Horizontal oscillations of a cylinder beneath a free surface: vortex formation and loading, *Journal of Fluid Mechanics*, 389 (1999) 1-26.
- [20] C. Bozkaya, S. Kocabiyik, L. Mironova, O. Gubanov, Streamwise oscillations of a cylinder beneath a free surface: free surface effects on vortex formation modes, *Journal of computational and applied mathematics*, 235(16) (2011) 4780-4795.
- [21] C. Bozkaya, S. Kocabiyik, Free surface wave interaction with an oscillating cylinder, *Applied Mathematics Letters*, 27 (2014) 79-84.
- [22] T. Prasanth, S. Mittal, Vortex-induced vibrations of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 594 (2008) 463-491.
- [23] P. Anagnostopoulos, P. Bearman, Response characteristics of a vortex-excited cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluids and Structures*, 6(1) (1992) 39-50.
- [24] P. Reichl, K. Hourigan, M. Thompson, The unsteady wake of a circular cylinder near a free surface, *Flow, Turbulence and Combustion*, 71(1-4) (2003) 347.
- [25] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of computational physics*, 39(1) (1981) 201-225.
- [26] P. Reichl, *Flow past a cylinder close to a free surface*, Monash University, 2001.
- [27] A. Roshko, *On the development of turbulent wakes from vortex streets*, (1954).
- [1] T. Sarpkaya, A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations, *Journal of fluids and structures*, 19(4) (2004) 389-447.
- [2] J. Carberry, R. Govardhan, J. Sheridan, D. Rockwell, C. Williamson, Wake states and response branches of forced and freely oscillating cylinders, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 23(1) (2004) 89-97.
- [3] M.M. Bernitsas, K. Raghavan, *Fluid motion energy converter*, in, Google Patents, 2009.
- [4] N. Jauvtis, C. Williamson, Vortex-induced vibration of a cylinder with two degrees of freedom, *Journal of Fluids and Structures*, 17(7) (2003) 1035-1042.
- [5] S. Singh, S. Mittal, Vortex-induced oscillations at low Reynolds numbers: hysteresis and vortex-shedding modes, *Journal of Fluids and Structures*, 20(8) (2005) 1085-1104.
- [6] R. Willden, J. Graham, Three distinct response regimes for the transverse vortex-induced vibrations of circular cylinders at low Reynolds numbers, *Journal of Fluids and Structures*, 22(6-7) (2006) 885-895.
- [7] S. Sen, S. Mittal, G. Biswas, Flow past a square cylinder at low Reynolds numbers, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67(9) (2011) 1160-1174.
- [8] G. Parkinson, Phenomena and modelling of flow-induced vibrations of bluff bodies, *Progress in Aerospace Sciences*, 26(2) (1989) 169-224.
- [9] I. Korkischko, J.R. Meneghini, Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes, *Journal of Fluids and Structures*, 26(4) (2010) 611-625.
- [10] S.M. Hasheminejad, M. Jarrahi, Numerical simulation of two dimensional vortex-induced vibrations of an elliptic cylinder at low Reynolds numbers, *Computers & Fluids*, 107 (2015) 25-42.
- [11] H. Miyata, N. Shikazono, M. Kanai, Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free-surface, *Ocean engineering*, 17(1-2) (1990) 81-104.
- [12] J. Sheridan, J.-C. Lin, D. Rockwell, Flow past a cylinder close to a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 330 (1997) 1-30.
- [13] T. Warburton, G.E. Karniadakis, Spectral simulations of flow past a cylinder close to a free surface, *ASME Paper FEDSM97-3389*, (1997).

engineering and industrial Aerodynamics, 96(6-7)
(2008) 713-735.

[28] C. Williamson, R. Govardhan, A brief review of recent
results in vortex-induced vibrations, *Journal of Wind*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. M. Hosseinalipour, N. Hajighafoori Boukani, Numerical Investigation of Vortex-Induced Vibrations of an Elastically-Mounted Circular Cylinder beneath a Free Surface, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 727-740.
DOI: 10.22060/mej.2017.12138.5268



