

بررسی ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه با تکیه‌گاه الاستیک در مجاورت سطح آزاد سیال: بسامد و مدهای رهایش گردابه

سید مصطفی حسینعلی پور* و نوید حاجی غفوری بوکانی

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴

بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۰/۰۴

کلمات کلیدی:

ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه

مدهای رهایش

سطح آزاد سیال

ناحیه قفل‌شدگی

خلاصه: در این مقاله، شبیه‌سازی عددی ارتعاشات القایی ناشی از جدایش گردابه از سطح استوانه‌ای دایره‌ای دو درجه آزادی با 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. اثر سطح آزاد با عدد فرود ۰,۲ با در نظرگیری دو نسبت فاصله‌ی ۲,۵ و ۵,۵ از آن بررسی می‌شود. فرکانس طبیعی سیستم جرم-فنر در هر نسبت فاصله بگونه‌ای انتخاب شده که با عدد استروهمال جریان در رینولدز ۱۰۰ حول استوانه‌ی ساکن برابر باشد. شبیه‌سازی‌های ارتعاشات ناشی از جریان و سطح آزاد سیال بطور جداگانه تطابق خوبی با نتایج قبلی نشان داده‌اند. این مقاله بخش دوم تحقیق درباره تأثیر سطح آزاد سیال بر پدیده‌ی ارتعاشات القایی ناشی از رهایش گردابه است که در آن، تأثیر سطح آزاد سیال بر ناحیه‌ی قفل‌شدگی با استفاده از مقایسه‌ی مدهای رهایش گردابه و نمودارهای تطابق فرکانسی در دو نسبت فاصله بررسی می‌شود. نتایج با نزدیک شدن استوانه به سطح آزاد، حاکی از تغییر نوع مدهای رهایش گردابه، کاهش محدوده‌ی قفل‌شدگی و افزایش عدد استروهمال و نسبت فرکانسی بی‌بعد جریان هستند.

۱- مقدمه

بسامد رهایش گردابه‌ها مشابه سازه صلب و مهار شده است و توسط عدد بی‌بعد استروهمال کنترل می‌شود (موسوم به شاخه اولیه) [۲]. با افزایش رینولدز، بسامد تولید گردابه‌ها به بسامد نوسانات سازه نزدیک شده و دیگر ارتباطی با عدد استروهمال ندارد، بلکه با بسامد نوسانات سازه، خود را هماهنگ کرده و در آن قفل می‌شود (پدیده همزمانی^۴ یا قفل‌شدگی در شاخه بالایی)؛ با نزدیکی این بسامد مشترک به بسامد طبیعی سازه، امکان پدیده تشدید^۵ وجود دارد که در آن، دامنه نوسانی بسیار زیاد سازه، سبب تخریب آن می‌گردد. در محدوده قفل‌شدگی، با افزایش سرعت جریان، بسامد تولید گردابه‌ها افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در بسامد طبیعی سازه قفل می‌شود، آنچه به عنوان ارتعاشات ناشی از جریان یا جدایش گردابه مطرح می‌شود، اغلب منظور ارتعاشات در این ناحیه است. با افزایش بیشتر سرعت جریان، ارتعاشات سازه از

ارتعاشات القایی ناشی از رهایش گردابه^۱ یک پدیده بنیادی است که در بسیاری از کاربردهای عملی مهندسی و علوم فیزیکی زمانی که یک جریان خارجی به طور دینامیکی با یک سازه انعطاف‌پذیر یا سازه صلب قرار گرفته بر تکیه‌گاهی الاستیک در تعامل است، وجود دارد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که سازه در اثر نیروهای نوسانی ناشی از گردابه‌های رها شده از سطح جسم^۲، مجبور به ارتعاش شود. مدل‌سازی گردابه‌های رها شده از استوانه برای اولین بار به فون کارمن و راباچ^۳ برمی‌گردد [۱]. اگر سازه کاملاً صلب و مهار شده باشد، بسامد تولید گردابه‌ها به صورت تابعی از عدد بی‌بعد استروهمال تعیین می‌شود، اما در مورد سازه‌هایی که امکان ارتعاش دارند، در رینولدزهای پایین جریان،

- 1 Vortex-Induced Vibration (VIV)
- 2 Von Karman vortex street
- 3 Rubach

4 Synchronization or lock-in

5 Resonance

* نویسنده‌دار مکاتبات: alipour@iust.ac.ir

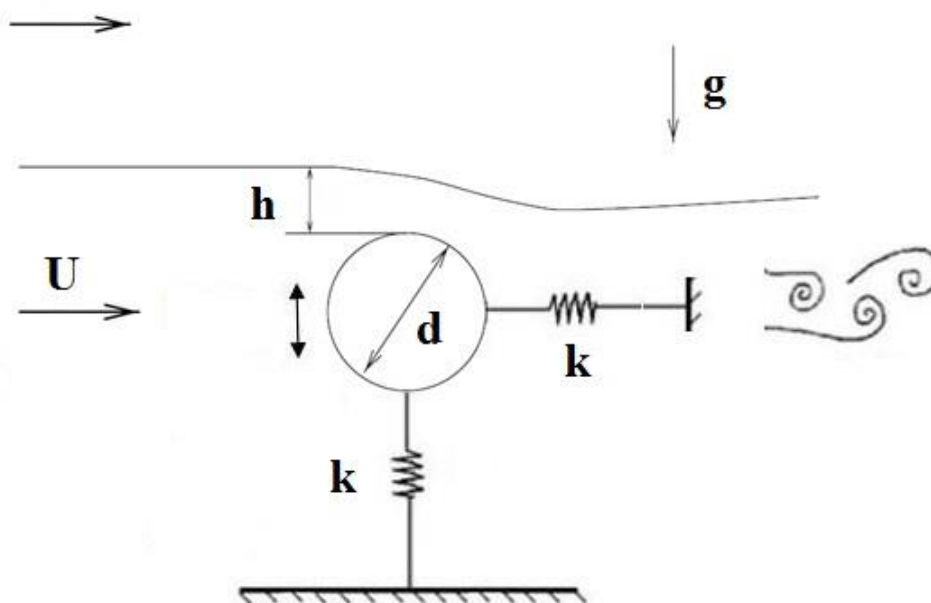


به واسطه گوشه‌دار بودن آن، ناحیه‌ای باریکتر است. هاشمی‌نژاد و جراحی [۹] به بررسی پدیده ارتعاشات ناشی از رهایش گردابه برای استوانه‌های بیضوی در یک سیال نامحدود با نسبت ابعاد $0/5$ ، 1 و 2 در زوایای قرارگیری 0 ، 45 و 90 درجه نسبت به جریان عرضی پرداخته و اثر قفل‌شدگی و مدهای رهایش گردابه را در ابعاد و زوایای مختلف مورد بررسی قرار دادند. حسینعلی‌پور و حاجی‌غفوری بوکانی [۱۰] به بررسی پدیده ارتعاشات ناشی از رهایش گردابه نزدیک سطح آزاد سیال در دو نسبت فاصله $2/5$ و $1/5$ پرداختند، آنها تأثیر سطح آزاد را با بررسی نوسانات و ضرایب آیرودینامیکی (پسا و برآ) مطالعه کردند، مقاله حاضر در ادامه تحقیق [۱۰] به مطالعه تأثیر سطح آزاد سیال بر ارتعاشات ناشی از رهایش گردابه با بررسی بسامدها و مدهای رهایش گردابه می‌پردازد. مهمترین کارهای انجام شده اخیر در مورد ارتعاشات ناشی از جریان در جریان های آرام می‌توان به تحقیق‌های هان و همکاران [۱۲،۱۱] و هی و همکاران [۱۵،۱۳] اشاره نمود که روش‌های عددی متنوعی را بدون در نظرگیری اثرات توربولانس ارتعاشات ناشی از جریان بر استوانه‌ها بکار گرفته‌اند. بررسی پدیده ارتعاشات ناشی از جریان در اعداد رینولدز بالاتر و دامنه نوسانات بزرگتر را می‌توان در تحقیقات وندرلی و همکاران [۱۶]، پان و همکاران [۱۷] و الجمال و دالتون [۱۸] ملاحظه نمود.

در مورد یک استوانه ثابت نزدیک سطح آزاد سیال، میاتا و همکاران [۱۹] به توزیع فشار نامتقارن جریان حول استوانه نزدیک سطح آزاد و نیروی برآی منفی، توقف رهایش گردابه در نسبت فاصله‌های کوچک و تغییرات قابل توجه عدد استروهال و ضریب پسا در فاصله بی‌بعد $0/35$ از سطح آزاد سیال اشاره کردند. شریدان و همکاران [۲۰] 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. ریچل و همکاران [۲۱] و حسینعلی‌پور و حاجی‌غفوری بوکانی [۲۲]، جریان نزدیک سطح آزاد شریدان و همکاران [۲۰] را در نسبت فاصله‌ها و اعداد فرود گوناگون به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. کاربری و همکاران [۲۳] رهایش گردابه یک استوانه با ارتعاشات اجباری زیر سطح آزاد سیال را بررسی کرده و تغییرات نیروهای وارده بر استوانه و ساختار گردابه را بر حسب بسامد نوسانات و عمق استغراق بدست آوردند. لین و راکول [۲۴]

محدوده قفل‌شدگی خارج شده و بسامد تولید گردابه‌ها و نیروهای هیدرودینامیکی یک جهش ناگهانی را تجربه می‌کنند که پس از این وضعیت، متناسب با افزایش سرعت جریان، بسامد تشکیل گردابه‌ها نیز افزایش خواهد یافت (شاخه پایینی) [۲]. معمولاً حرکت ارتعاشی جسم، الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها را نیز 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 برای طراحی رایزرها و سکوه‌های دریایی، لوله‌های انتقال در بستر دریا، سامانه‌های خنک‌کننده در نیروگاه‌ها به خصوص نیروگاه‌های هسته‌ای، مبدل‌های حرارتی و پل‌های معلق مورد توجه محققان واقع شود.

ژاوتیس و ویلیامسون [۳]، به صورت تجربی پاسخ دوبعدی یک استوانه تحت تکیه‌گاه الاستیک با جرم و میرایی کم در دو درجه آزادی را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که برای نسبت اجرام بزرگتر از شش، دامنه پاسخ نوسانات طولی بسیار کوچک‌تر از دامنه نوسانات عرضی بوده و قابل چشم‌پوشی است. سینق و میتال [۴] از طریق فرمولاسیون پایدار شده اجزا محدود، ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ها در جریان حول استوانه سبک دو درجه آزادی را در اعداد رینولدز پایین با میرایی سازه‌ای صفر مدل‌سازی کرده و اثر سرعت کاهش‌یافته و عدد رینولدز را بر این پدیده مشاهده کردند. ویلدن و گراهام [۵]، ارتعاشات عرضی یک استوانه را در اعداد رینولدز پایین مطالعه کردند و در نتایج خود سه ناحیه مجزای این پدیده (شاخه‌های اولیه، بالایی و پایینی) را در پاسخ استوانه معرفی کردند. پارکینسون [۶] به بررسی آزمایشگاهی ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه‌ای با سطح مقطع مستطیلی پرداخت و اثر پس بدنه را با در نظرگیری نسبت هندسی‌های مختلف بررسی کرد. کورکیچکو و منقینی [۷] پاسخ ارتعاشات ناشی از جریان حول یک استوانه در محدوده 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 شاخه بالایی بین اعداد رینولدز مذکور اشاره داشتند، لذا در اکثر تحقیقات مهم در این زمینه برای سادگی مسأله، رژیم جریان، آرام در نظر گرفته می‌شود. سن و همکاران [۸] 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 استوانه مربعی



شکل ۱: شماتیک شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در مجاورت سطح آزاد سیال

Fig. 1: Schematic of the flow induced vibration of a cylinder near a Free Surface

ناشی از جدایش گردابه استوانه در یک سیال نامحدود ۲- شبیه‌سازی جریان حول یک استوانه ثابت نزدیک سطح آزاد سیال، که از تلفیق این دو، مسأله مدّ نظر شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۱، شماتیک مسأله را نشان می‌دهد. برای اطمینان از صحتّ حل مسأله، ابتدا این دو قسمت، جداگانه اعتبارسنجی می‌شوند.

۲-۱- شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه جریان حول استوانه در سیال نامحدود

برای شبیه‌سازی این بخش مطابق تحقیق حسینعلی پور و حاجی‌غفوری بوکانی [۱۰]، با استفاده از پیش‌پردازنده گمبیت^۲ یک شبکه دو بلوکه مطابق شکل ۲ براساس روش جابه‌جایی شبکه^۳ در اطراف استوانه در نظر گرفته می‌شود، بلوک اطراف استوانه با شبکه‌بندی با سازمان به صورت صلب با استوانه حرکت می‌کند، در حالیکه سایر نواحی با شبکه‌بندی بی‌سازمان به صورت توزیع پیو^۴ با حرکت استوانه دچار تغییر شکل می‌شوند.

معادلات حاکم بر مسأله، از جمله معادلات جریان و معادلات

الگوهای تشکیل گردابه از یک استوانه با ارتعاشات اجباری در نسبت فاصله‌های مختلف را با بکارگیری روش پی‌آی‌وی^۱ مشاهده کردند. بوزکایا و همکاران [۲۵] ارتعاشات اجباری یک استوانه با رینولدز ۲۰۰ را در چند نسبت فرکانسی بی‌بعد بررسی کردند. بوزکایا و کوبابیک [۲۶] ارتعاشات اجباری یک استوانه نزدیک سطح آزاد را در یک نسبت فرکانسی بی‌بعد مشخص در عدد فرود ۰/۴ و عدد رینولدز ۲۰۰ تحلیل کردند.

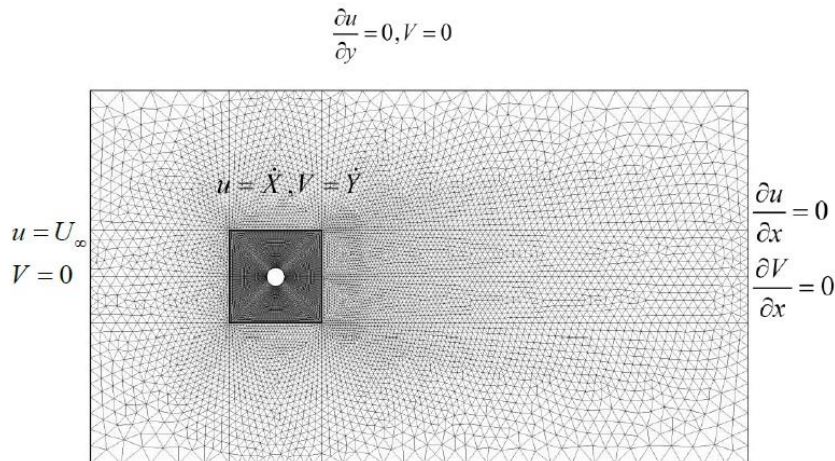
با بررسی تمامی کارهای انجام شده، مشاهده می‌شود که مسأله ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه با تکیه‌گاه الاستیک در مجاورت سطح آزاد سیال موضوعی است که تاکنون مورد توجه پژوهشگران واقع نشده است، لذا به‌عنوان یک مسأله آکادمیک در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود، هدف این تحقیق، بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر پدیده ارتعاشات ناشی از رهائش گردابه و بخصوص ناحیه نامطلوب قفل‌شدگی با مطالعه بسامدها و مُدهای رهائش گردابه است که همانطور که اشاره شد در ادامه تحقیق [۱۰] می‌باشد.

۲- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مسأله

شبیه‌سازی تحقیق شامل دو قسمت است: ۱- شبیه‌سازی ارتعاشات

2 Gambit
3 Dynamic Mesh
4 Pave

1 PIV (Particle Image Velocimetry)



شکل ۲: شبکه بندی و شرایط مرزی برای شبیه سازی ارتعاشات ناشی از جریان حول استوانه

Fig. 2: Grid topology for Vortex induced vibration simulation and its Boundary condition

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

در حین حل گذرا، نیروهای پسا و برآ بر استوانه با روش حجم محدود^۱ بدست می آیند. این مقادیر توسط کد نوشته شده^۲ با زبان سی پلاس پلاس^۳ برای نرم افزار انسیس فلونت^۴ ۱۴٫۰ فرخوانی می شود، با استفاده از آن، مقدار برآیند نیروی اعمالی از طرف فنر و دمپر و جریان بر استوانه حاصل می شود، سپس مقدار شتاب استوانه و سرعت حرکت در گام زمانی حل بدست می آید، با توجه به اینکه سرعت در گام زمانی جدید برابر صفر نیست، نرم افزار شرط مرزی سرعت را روی سلول های سطح استوانه به روز رسانی می کند و میدان جریان با شرایط مرزی جدید و موقعیت جدید استوانه، در شبکه تغییر شکل یافته برای آن گام زمانی حل می شود. این الگوریتم که برگرفته از تحقیق هاشمی نژاد و جراحی [۹] است، به صورت فلوجارت شکل ۳ نمایش داده می شود.

نمودار حداکثر دامنه نوسانات بر حسب عدد رینولدز مطابق شکل ۴ در تطابق خوبی با کار تجربی بیرم [۲۸] می باشد. در این مدل سازی که از روش عددی هاشمی نژاد و جراحی [۹]، استفاده شده است، عدد رینولدز در محدوده ۹۰ تا ۱۵۰ متغیر است و دامنه و بسامد نوسانات استوانه و بسامد جدایش گردابه ها به صورت تجربی اندازه گیری شده است. سفتی فنرها ۶۹/۴۸ نیوتن بر متر و جرم استوانه ۳۵/۷۵ گرم

حرکت استوانه به صورت ذیل ارائه می شوند.

معادلات جریان:

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

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

ارتعاش استوانه صلب بر تکیه گاه های الاستیک با سفتی یکسان در دو راستا توسط معادلات خطی جرم - فنر با نیروی تحریک وارده از طرف سیال بصورت معادلات (۳) و (۴) بیان می شود.

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

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

معادلات فوق از طریق \mathbf{f}_D و \mathbf{f}_L با معرفی پارامترهای بی بعد زیر با معادلات جریان کوپل می شوند.

$$m^* = \frac{4M}{\pi \rho D^2 L}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{k(m+m_A)}}, \quad F_N = \frac{f_n D}{U}, \quad Re = \frac{UD}{\nu}, \quad Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}},$$

$$Gap_Ratio = \frac{h}{D}$$

در نتیجه معادلات غیر خطی شبیه سازی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در دو راستا به صورت معادلات (۵) و (۶) نوشته می شوند [۲۷].

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

- 1 Finite Volume Method (FVM)
- 2 User Defined Function (UDF)
- 3 C++
- 4 Ansys Fluent 14.00

و نسبت میرایی ۰/۰۰۱۲ برای سامانه نوسانگر در نظر گرفته شد. ویسکوزیته دینامیکی سیال بگونه‌ای انتخاب شده است که بسامد جدایش گردابه‌ها در عدد رینولدز ۱۱۵ برابر با بسامد طبیعی بی بعد سامانه باشد.

۲-۲- شبیه‌سازی جریان حول استوانه ثابت نزدیک سطح آزاد سیال

برای شبیه‌سازی این بخش مطابق با تحقیق حسینعلی‌پور و حاجی‌غفوری بوکانی [۲۲]، برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال^۱ [۲۹] استفاده می‌شود تا موقعیت سطح آزاد ردیابی شود. از آنجا که برای ذخیره پارامترهای مشخصه 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 به صورت معادلات (۷) و (۸) هستند.

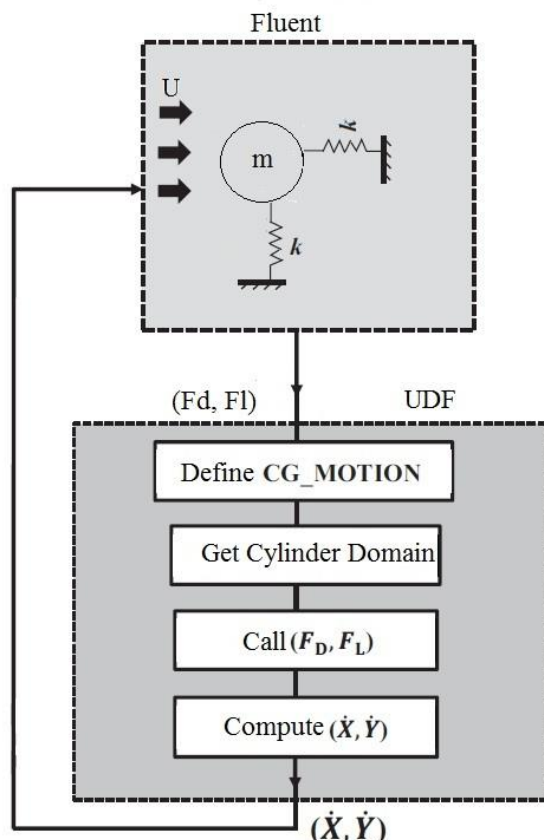
$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

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

معادله (۷) برای ردیابی فصل مشترک بین فازها، با حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی هر فاز بدست آمده است. با تعریف نسبت فاصله^۲ بصورت نسبت فاصله استوانه از سطح آزاد به قطر استوانه یا $Gap - Ratio = h/d$ ، جزئیات بیشتر در ارتباط با روش عددی و نحوه اعتبارسنجی این بخش از شبیه‌سازی در تحقیق حسینعلی‌پور و حاجی‌غفوری بوکانی [۲۲] موجود است.

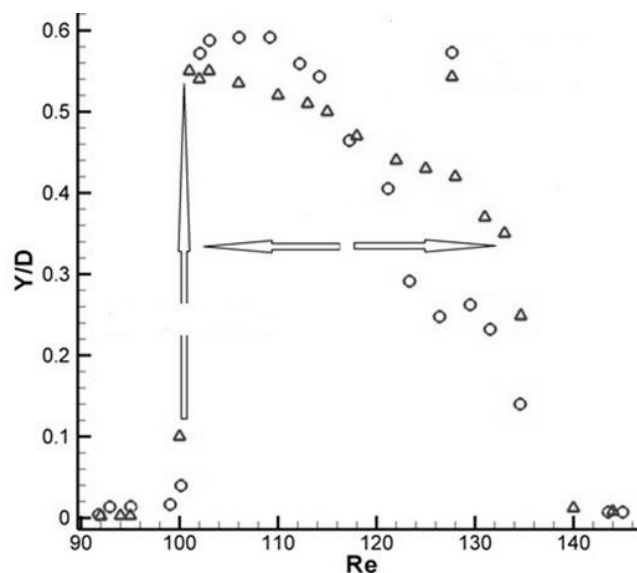
برای پوشش‌دهی شبکه‌بندی شبیه‌سازی اول برای شبیه‌سازی سطح آزاد سیال، از شبکه‌بندی شکل ۵ استفاده می‌شود، بدین ترتیب که در محل تقریبی سطح آزاد سیال، تراکم شبکه‌ها ریزتر انتخاب می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده در این شبیه‌سازی، مطابق شبیه‌سازی بخش اول برای دو سیال آب و هوا است.

با توجه به عدم وجود کار آزمایشگاهی یا عددی مشابه با شبیه‌سازی نهایی، اعتبارسنجی دو بخش شبیه‌سازی مهر تأییدی^۳ بر صحت نتایج نهایی می‌گذارد. مسأله مورد نظر این مسأله با تلفیقی



شکل ۳: فلوچارت شبیه‌سازی عددی ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه [۹]

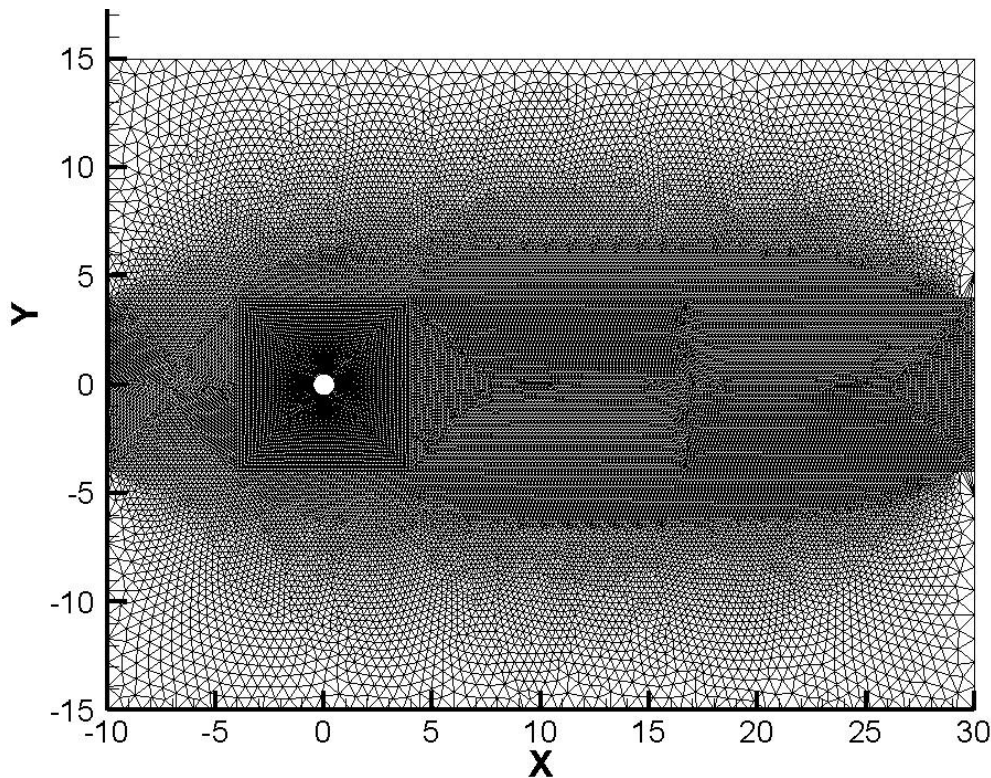
Fig. 3: General algorithm of computations [9]



شکل ۴: اعتبارسنجی مسأله ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با کار بیرمن [۲۸] و مشابه نتایج هاشمی‌نژاد و جراحی [۹]

Fig. 4: Comparison of the measured and experimental maximum normalized transverse displacement response amplitudes [28] & [9]

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



شکل ۵: شبکه‌بندی برای شبیه‌سازی سطح آزاد سیال (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 5: Grid topology for free surface simulation [m]

گردابه استوانه ثابت در رینولدز ۱۰۰، سفتی فنر در نسبت فاصله‌ی ۲/۵ برابر ۱۱۱/۲۰ نیوتون بر متر و در نسبت فاصله ۱/۵ برابر ۱۱۸/۳۷ نیوتون بر متر و میرایی نیز به پیروی از تحقیق [۴] برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. برای رسیدن به حالت پایایی نتایج برای هر اجرا، با در نظرگیری دقت حل باقیمانده‌ها از مرتبه 10^{-5} با استفاده از آبرایانه‌ای با ۱۶ پردازنده و ۱۶ گیگابایت حافظه دسترسی تصادفی حدوداً ۱۳ روز زمان لازم است.

۲-۳- بررسی استقلال از شبکه و گام زمانی

جدول ۱، شبکه‌های مختلف مورد استفاده برای یک استوانه 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 شبکه ۳ و ۶ انتخاب می‌شوند که از بین آنها شبکه شماره ۶ به علت تعداد شبکه‌های بیشتر بلوک مرکزی به عنوان شبکه مناسب برای شبیه‌سازی ارتعاشات ناشی از جریان انتخاب می‌شود. برای بررسی تأثیر تغییر تعداد شبکه بر شبیه‌سازی سطح آزاد

از معادلات سطح آزاد سیال در ارتعاشات ناشی از رهايش گردابه شبیه‌سازی می‌شود. در نرم‌افزار فلوئنت، برای حل کویلینگ سرعت- فشار از روش پیزو^۱ جزء روش‌های خانواده سیمپل، برای گسسته‌سازی گرادیان فشار از روش پرستو^۲، برای گسسته‌سازی مومنتم از روش کوئیک^۳ و برای گسسته‌سازی معادله کسر حجمی از روش هر یک اصلاح شده^۴ استفاده می‌شود. گسسته‌سازی زمانی فرمولاسیون ناپایا به‌علت استفاده از روش شبکه متحرک از مرتبه اول است.

برای بررسی تأثیر سطح آزاد سیال از دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ و محدوده اعداد رینولدز ۶۰ الی ۱۳۰ و عدد فرود ۰/۲ استفاده می‌شود. جرم بی‌بعد استوانه ۱۲۷/۳۲، طول مشخصه جریان برابر قطر استوانه (یک متر) و چگالی سیال سنگین‌تر ۱ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. بسامد طبیعی سامانه جرم- فنر در هر نسبت فاصله بگونه‌ای انتخاب شده که با عدد استروهل جریان در رینولدز ۱۰۰ حول استوانه ساکن برابر باشد. با توجه به بسامد بی‌بعد رهايش

- 1 Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)
- 2 PREssure STaggering Options (PRESTO)
- 3 QUICK
- 4 Modified High Resolution Interface Capturing (HRIC)

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

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

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 استروهال	آر.ام.اس ضریب پسا	آر.ام.اس ضریب برآ	آر.ام.اس ضریب فشار مبنا
۰/۰۲۵	۰/۱۸۸۶	۰/۲۱۶۸	۰/۵۱۶۱	-۰/۳۹۳۶
۰/۰۱۲۵	۰/۱۹۱۶	۰/۲۱۰۳	۰/۵۲۷۲	-۰/۴۱۴۷

بلوک مرکزی اطراف استوانه اختصاص داده شود، استفاده می‌شود. از آنجا که معادلات به صورت تابعی از زمان بوده و پاسخ سامانه 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، اثر اندازه بازه زمانی در جدول ۳ نشان داده می‌شود. در هر مورد، عدد استروهال جریان حول استوانه ثابت در سیال نامحدود و رینولدز ۱۰۰ به دست آمده است که مشاهده می‌شود مقدار بازه زمانی تأثیر مستقیمی در عدد استروهال محاسبه شده دارد، در حالیکه بر مقادیر ضرایب پسا و برآ اثر ناچیزی می‌گذارد. با این مقادیر و با استفاده از رابطه تجربی روشکو [۳۰] برای عدد استروهال، اندازه بازه زمانی مناسب انتخاب می‌شود. بر اساس رابطه روشکو، عدد استروهال جریان در رینولدز ۱۰۰، به صورت تجربی برابر ۰/۱۶۴۴ است. بر این اساس، گام زمانی ۰/۰۵ برای این شبیه‌سازی مناسب است.

برای بررسی تأثیر اندازه گام زمانی در شبیه‌سازی جریان حول

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

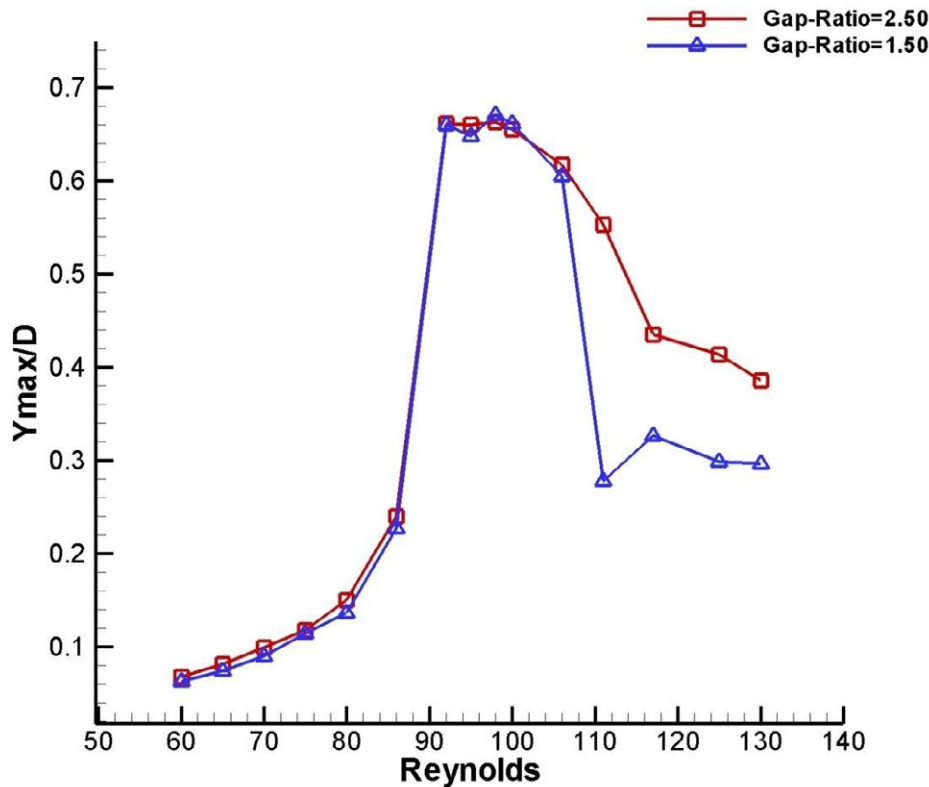
تعداد شبکه	عدد استروهال	ضریب پسا	آر.ام.اس ^۱ ضریب پسا	ضریب برآ	آر.ام.اس ضریب برآ
۵۲۹۶۰	۰/۱۹۶۹	۱/۶۲۲۵	۰/۱۵۲۶	-۰/۳۲۴۵	۰/۵۳۶۶
۸۸۶۷۰	۰/۱۹۷۲	۱/۶۲۰۹	۰/۱۵۰۷	-۰/۳۲۶۸	۰/۵۲۲۹

جدول ۳: اثر گام زمانی در شبکه استوانه 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 استروهال در رینولدز ۱۰۰	درصد خطا با رابطه تجربی
۰/۶۲۵	۰/۱۵۹	-۳/۲۸
۰/۰۵	۰/۱۶۱۳	-۹۱/۸۸
۰/۰۱	۰/۱۶۴۱۴	-۰/۱۵۸
۰/۰۰۵	۰/۱۶۶۱	-۱/۰۳۴

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. 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



شکل ۶: جابه‌جایی عرضی حداکثر بی بعد استوانه بر حسب عدد رینولدز در دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵

Fig. 6: Variations of the maximum normalized transverse displacement response amplitudes at Gap-Ratio=2.50 , 1.50

رینولدزهای مختلف روی نمودار جابه‌جایی عرضی حداکثر به ترتیب برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ نشان می‌دهند. شاخه‌های مختلف پاسخ استوانه، دارای مُدهای مختلف جدایش گردابه هستند، مُدهای تشکیل شده برای دو نسبت فاصله تا حدّ زیادی مشابه هم هستند، با این تفاوت که در نسبت فاصله ۱/۵ به علت نزدیکتر شدن سطح آزاد سیال که همچون یک دیواره بدون لغزش عمل می‌کند، گردابه‌های ایجاد شده، کشیده و بی‌نظم شده و به سطح آزاد تمایل پیدا می‌کنند، به عنوان مثال، شکل ۹، رهائش گردابه را در رینولدز ۱۰۶ برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ مقایسه می‌کند.

در محدوده اعداد رینولدز ۶۰ تا ۸۶ یا شاخه اولیه، مُد رهائش گردابه ۲ S است که این موضوع به سبب یکسان بودن عدد استروهمال جریان حول استوانه ثابت و متحرک در شاخه اولیه است، به عنوان نمونه برای نسبت فاصله ۱/۵ در رینولدز ۸۰ الگوهای رهائش گردابه مطابق شکل ۱۰ در حالت ساکن و وجود ارتعاشات ناشی از جریان با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مشخص است که مُدهای رهائش گردابه برای دو وضعیت، کاملاً

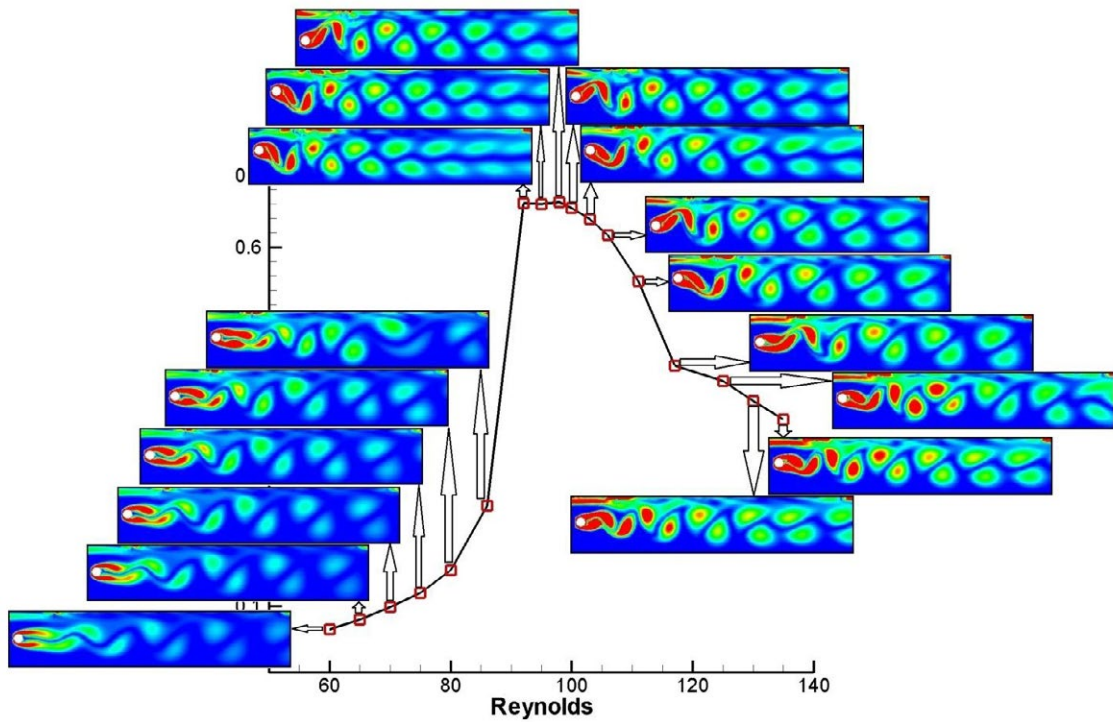
استوانه نزدیک سطح آزاد سیال، مطابق جدول ۴ از دو گام زمانی در عدد فرود ۰/۳ و نسبت فاصله ۰/۴ استفاده شد. بنا بر جدول ۴، گام زمانی ۰/۲۵ که با ضریب پسا و برای تجربی ۰/۳ و ضریب فشار تجربی ۰/۵/۴ اختلاف دارد، برای این شبیه‌سازی مناسب است. با توجه به بررسی گام زمانی در دو شبیه‌سازی، گام زمانی کوچکتر یعنی ۰/۲۵ برای شبیه‌سازی نهایی انتخاب می‌شود.

۳- نتایج و تحلیل آنها

در این قسمت به بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر پدیده ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه در سه بخش پرداخته می‌شود.

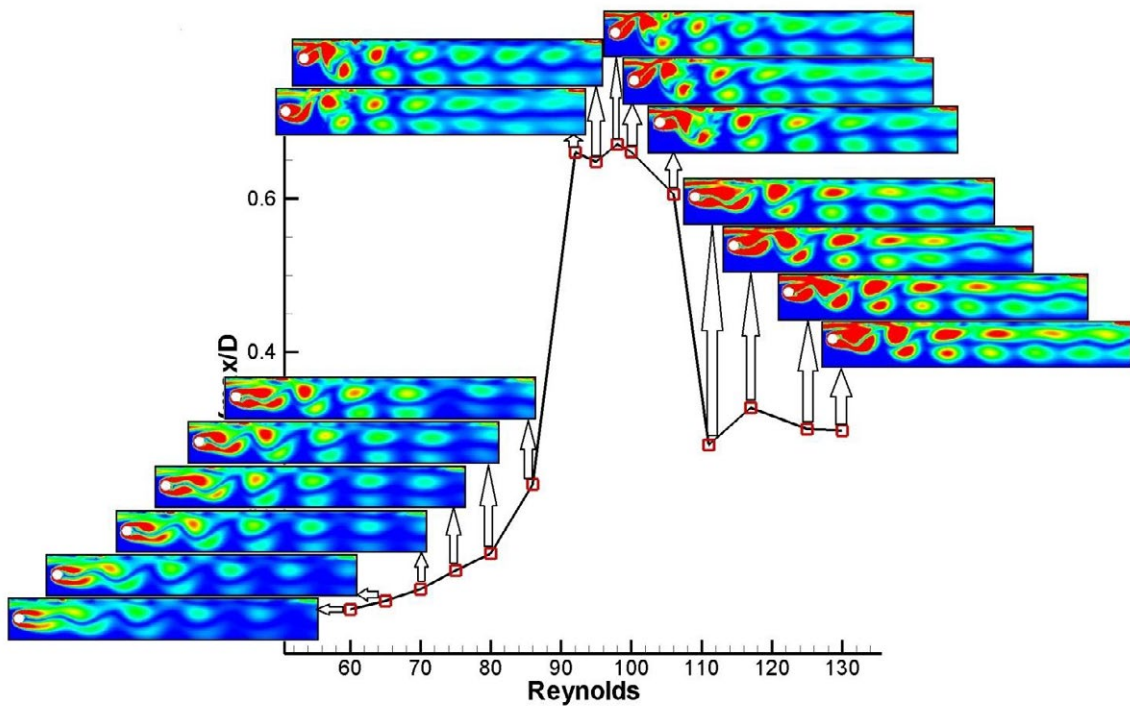
۳-۱- بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با استفاده از مُدهای جدایش

نمودار جابه‌جایی عرضی حداکثر استوانه برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ بر حسب عدد رینولدز در شکل ۶ ارائه شده است. شکل‌های ۷ و ۸ مُدهای رهائش گردابه را در کانتورهای ورتیسیتته در



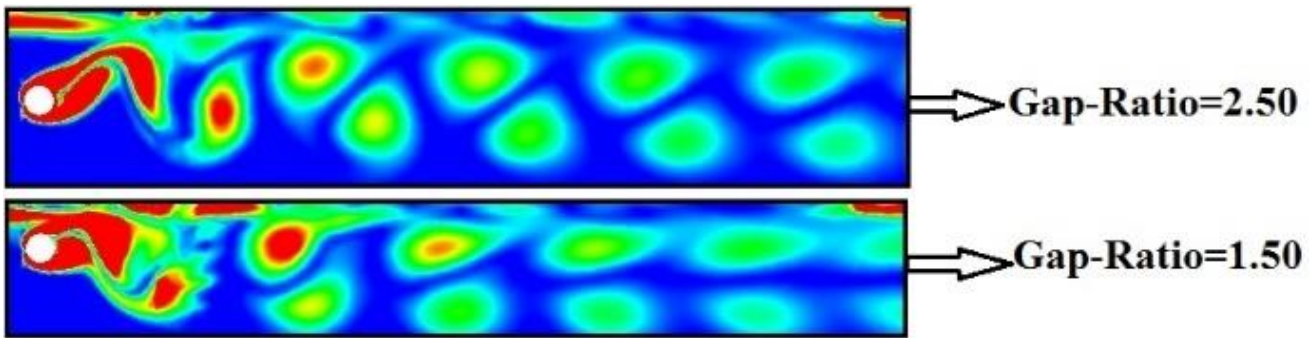
شکل ۷: دامنه نوسانات عرضی بی‌بعد استوانه و مدهای مختلف ره‌ایش گردابه برای نسبت فاصله ۲/۵

Fig. 7: Transverse displacement response amplitudes and its Modes at Gap-Ratio=2.5



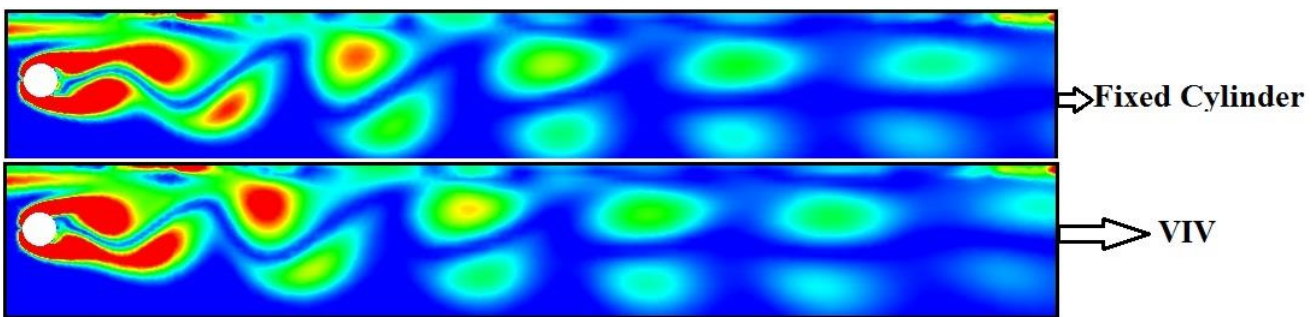
شکل ۸: دامنه نوسانات عرضی بی‌بعد استوانه و مدهای مختلف ره‌ایش گردابه برای نسبت فاصله ۱/۵

Fig. 8: Transverse displacement response amplitudes and its Modes at Gap-Ratio=1.5



شکل ۹: تأثیر سطح آزاد بر شکل رهايش گردابه در رینولدز ۱۰۶

Fig. 9: Effects of Free Surface on VIV at $Re=106$



شکل ۱۰: مقایسه الگوی رهايش گردابه برای استوانه ثابت و استوانه با در نظرگیری وی. آی. وی در خارج ناحیه قفل‌شدگی برای نسبت فاصله ۱/۵ و رینولدز ۸۰

Fig. 10: Comparison of Fixed Cylinder & VIV without Synchronization at $Gap-Ratio=1.5$ & $Re=80$

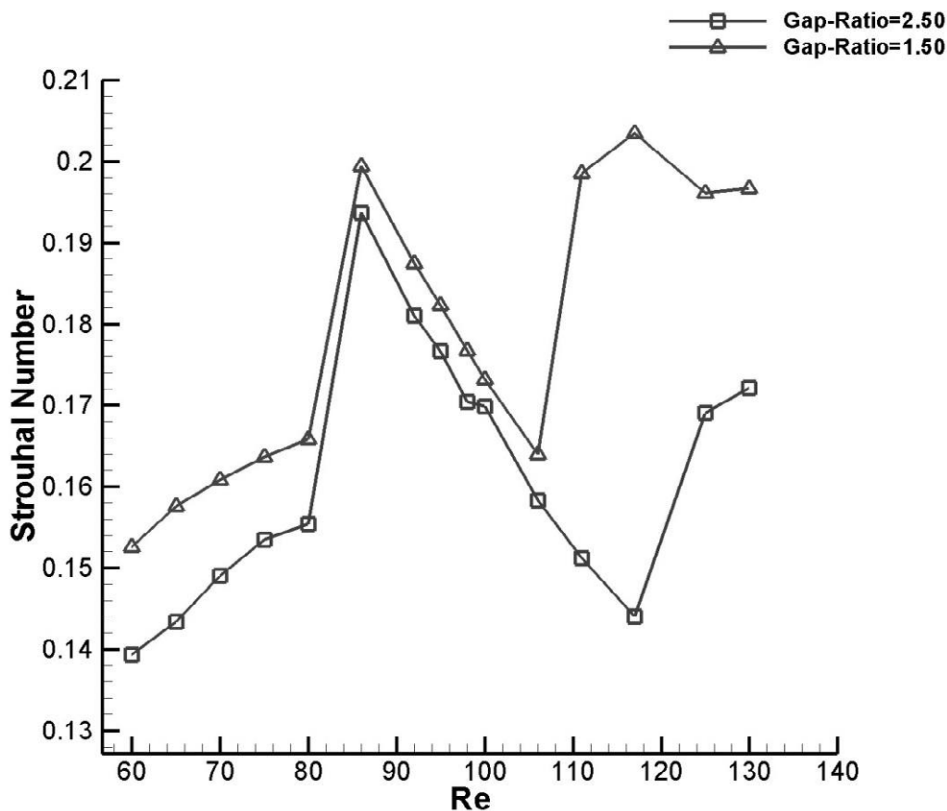
رینولدز ۹۵ برای هر دو نسبت فاصله مشاهده کرد. در این مُد، بسامد رهايش گردابه در بسامد طبیعی سامانه، قفل می‌شود. در شاخه بالایی با افزایش عدد رینولدز، فاصله طولی بین گردابه‌ها افزایش می‌یابد، حالیکه بسامد رهايش گردابه‌ها همچنان روی بسامد طبیعی سامانه قفل شده است، بطوریکه در رینولدز ۹۸ برای هر دو نسبت فاصله، پیوستگی گردابه‌ها تقریباً از بین رفته و اندازه گردابه‌ها در مقایسه با سایر نقاط نمودار بزرگتر می‌شود. به عبارتی آبری از گردابه‌های به هم پیوسته وجود دارد که با افزایش عدد رینولدز، فاصله این آبر از استوانه، دور می‌شود و در نهایت بواسطه افزایش فاصله طولی بین گردابه‌ها، بطور کامل از بین می‌رود. به تدریج با وارد شدن استوانه به انتهای ناحیه قفل‌شدگی و شاخه پایینی، مجدداً با الگوی $2S$ رهايش گردابه‌ها رخ می‌دهد.

مشابه اند. زمانیکه استوانه وارد دامنه‌های بزرگتر می‌شود، مُدهای جدایش گردابه نیز تغییر می‌کند. در نتایج مشاهده شده برای دو نسبت فاصله مشخص شده است که جهش در پاسخ استوانه با تغییر بسامد رهايش گردابه‌ها و در نتیجه مُد جدایش همراه است. در دامنه‌های بزرگتر در شاخه بالایی، با منطبق شدن عدد استروهمال جریان بر بسامد طبیعی بی‌بعد سامانه، گردابه‌ها در فاصله‌ای از استوانه، به هم پیوسته می‌شوند که آنرا مُد $C(2S)$ می‌نامند که البته به دلیل وجود سطح آزاد، این مُد رهايش را نمی‌توان بطور دقیق ملاحظه کرد. در شاخه اولیه، خیابان گردابه فون کارمن یا همان مُد $2S$ دیده می‌شود. در این مُد، یک گردابه منفرد از هر طرف استوانه بطور تناوبی جدا می‌شود. زمانیکه استوانه وارد ناحیه قفل‌شدگی می‌شود، گردابه‌های هم‌جهت در دنباله به یکدیگر می‌پیوندند. مُد $C(2S)$ را بعنوان مثال می‌توان در

گرفته است که در همین بازه، دامنه نوسانات جابه‌جایی عرضی و ضرایب آیرودینامیکی دچار افزایشی نسبی شده‌اند [۱۰]. این مسأله بیان‌کننده حالت خاص نوسانات استوانه در انتقال از شاخه بالایی به شاخه پایینی است. همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است، عدد استروهل جریانی که اثر سطح آزاد در آن بیشتر است، مقدار بزرگتری دارد، به عبارتی سطح آزاد سیال، صرف نظر از قرارگیری در کدام شاخه، موجب بالا بردن بسامد رهایش گردابه می‌شود که البته این موضوع برای استوانه ثابت نزدیک سطح آزاد تحقیق حسینعلی‌پور و حاجی غفوری بوکانی [۲۲] نیز ثابت شده بود و ظاهراً ارتعاش استوانه تأثیری بر این موضوع نمی‌گذارد. در شاخه بالایی، تفاوت بسامدها نسبت به دو شاخه دیگر کمتر است و نشان می‌دهد در ناحیه تطابق فرکانسی، سطح آزاد نمی‌تواند در بسامد رهایش، تأثیر قابل توجهی داشته باشد. از سوی دیگر همانطور که اشاره شد، سطح آزاد موجب کوتاه‌تر شدن ناحیه تطابق فرکانسی شده و باعث می‌شود جریان با افزایش رینولدز، زودتر از ناحیه قفل‌شدگی خارج شود که با توجه

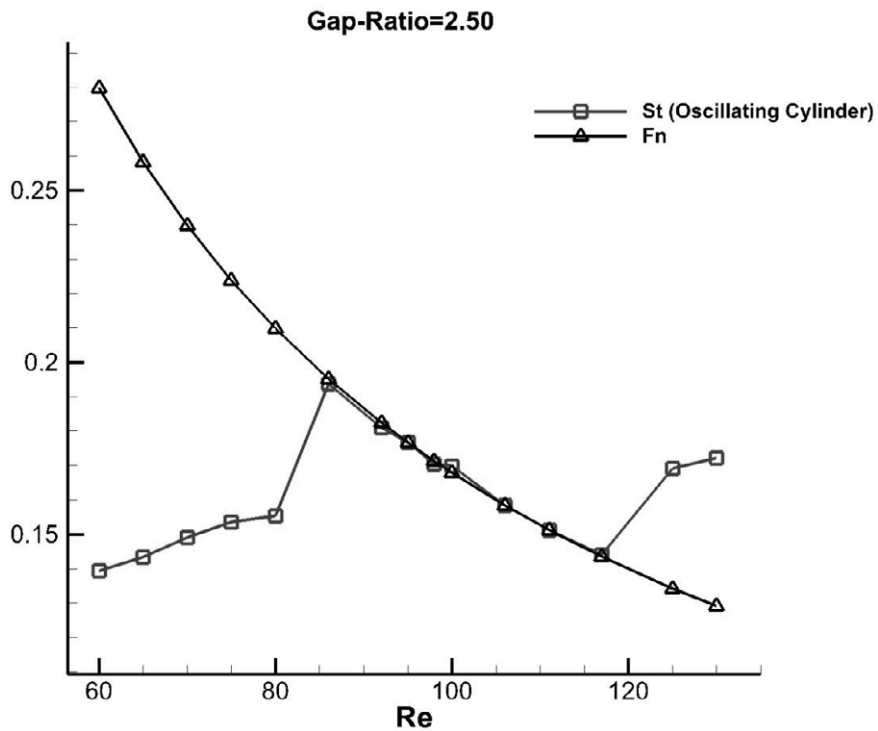
۳-۲- بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با استفاده از نمودار تطابق فرکانسی

شکل ۱۱، تغییرات بسامد بی‌بعد رهایش گردابه‌ها یا عدد استروهل جریان را برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. در شاخه اولیه، از رینولدز ۶۰ تا ۸۰ برای هر دو نسبت فاصله، بسامد رهایش گردابه از استوانه ثابت و نوسانی یکسان است. در رینولدز ۸۰ پرش ناگهانی در عدد استروهل جریان به سمت بسامد طبیعی سامانه رخ می‌دهد، این جهش همان جهش برای تطابق فرکانسی است. همانطور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، برای نسبت فاصله ۲/۵، این تطابق فرکانسی تا رینولدز ۱۱۷ و برای نسبت فاصله ۱/۵ تا رینولدز ۱۰۶ ادامه داشته و در این رینولدزها بطور ناگهانی عدد استروهل جریان از مقدار بسامد طبیعی سامانه برای هر دو نسبت فاصله خارج می‌شود. رهایش گردابه‌ها برای نسبت فاصله ۲/۵، از رینولدز ۱۱۷ تا ۱۲۵ و برای نسبت فاصله ۱/۵ از رینولدز ۱۰۶ تا ۱۱۱ در بسامد میانی شکل



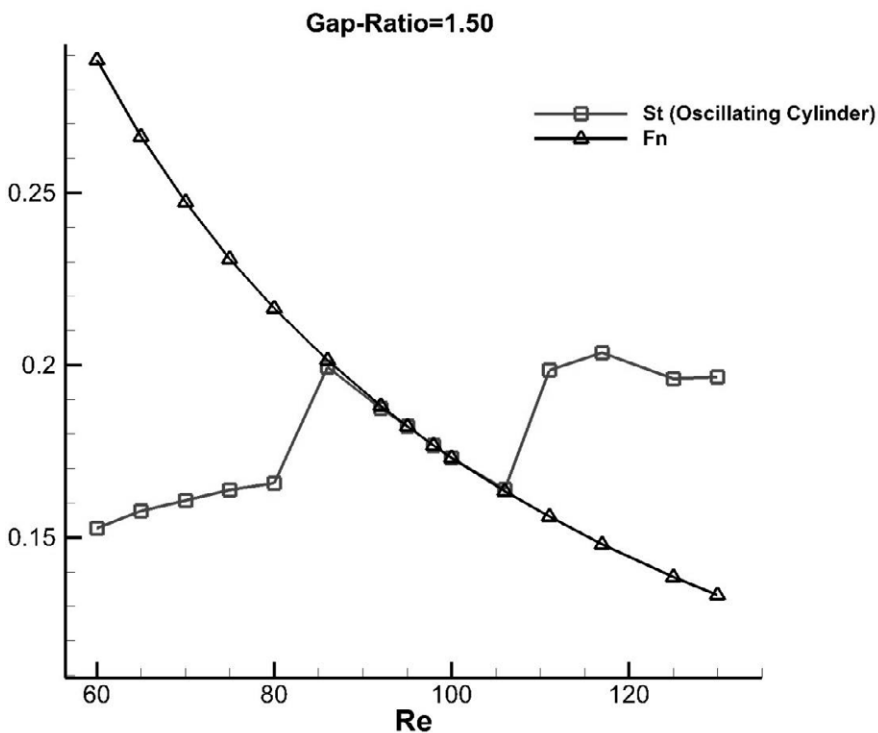
شکل ۱۱: تغییرات عدد استروهل جریان حول استوانه با در نظر گیری وی. آی. وی برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ بر حسب عدد رینولدز

Fig. 11: Strouhal-Reynolds Diagram



شکل ۱۲: تغییرات عدد استروهال جریان و بسامد طبیعی سامانه حول استوانه مرتعش برای نسبت فاصله ۲/۵ بر حسب عدد رینولدز. (منظور از F_n ، عدد استروهال با بسامد طبیعی است.)

Fig. 12: Strouhal-Natural Frequency (Strouhal) diagram at Gap-Ratio=2.5



شکل ۱۳: تغییرات عدد استروهال جریان و بسامد طبیعی سامانه حول استوانه مرتعش برای نسبت فاصله ۱/۵ بر حسب عدد رینولدز. (منظور از F_n ، عدد استروهال با بسامد طبیعی است.)

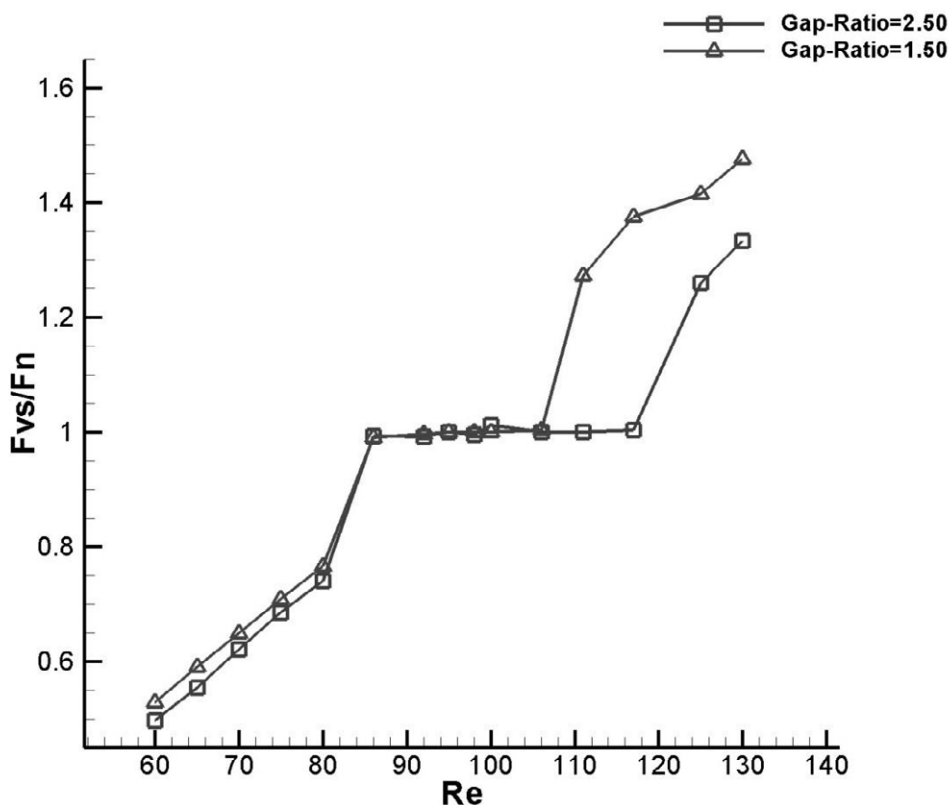
Fig. 13: Strouhal-Natural Frequency (Strouhal) diagram at Gap-Ratio=1.5

می‌شود، انتقال ثانویه نیز از شاخه بالایی به پایینی است. برای هر دو نسبت فاصله، مقدار نسبت بسامد رهایش گردابه به بسامد طبیعی سامانه در رینولدز ۹۵ دقیقاً برابر با یک است که تقریباً در میانه شاخه بالایی قرار دارد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که علاوه بر عدد استروهل جریان، نسبت فرکانسی بی‌بعد نیز برای نسبت فاصله ۱/۵ همواره بیشتر از نسبت فاصله ۲/۵ است.

مطابق نتایج ارائه شده در این تحقیق و تحقیق [۱۰]، می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر پارامترهای جرم بی‌بعد و بسامد طبیعی، سطح آزاد سیال نیز موجب کاهش یا افزایش وسعت ناحیه تطابق فرکانسی و حداکثر دامنه نوسانات می‌شود که علت آن هم بیشتر به بسامد طبیعی سامانه برمی‌گردد، چراکه با تغییر نسبت فاصله، بسامد طبیعی سامانه تغییر می‌کند. از سوی دیگر با بررسی همه نمودارها ملاحظه می‌شود که در شاخه بالایی، جابه‌جایی عرضی، ضرایب آیرودینامیکی و نسبت فرکانسی دو نسبت فاصله تقریباً بر هم منطبقند، لذا وقتی استوانه از شاخه ابتدایی وارد شاخه بالایی می‌شود،

به اینکه ناحیه تطابق فرکانسی، ناحیه‌ای نامطلوب از نظر طراحی است لذا باید این اثر را در طراحی‌های ارتعاشات ناشی از جریان مد نظر قرار داد. کاهش محدوده قفل‌شدگی در اثر سطح آزاد سیال را می‌توان در اثر در هم شکستن ترکیب گردابه‌هایی دانست که در ناحیه قفل‌شدگی، با هم هماهنگ و متحد شده، باعث افزایش دامنه نوسانات می‌شوند ولی اکنون سطح آزاد، این ترکیب را بر هم زده و انتقال به شاخه پایینی را زود هنگام کرده است.

شکل ۱۴، نمودار نسبت بسامد رهایش گردابه به بسامد طبیعی سامانه را برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد و به خوبی پدیده تطابق فرکانسی را برای دو نسبت فاصله به نمایش می‌گذارد. در شاخه اولیه، بسامد رهایش گردابه‌ها کمتر از بسامد طبیعی سامانه و در شاخه بالایی، بیشتر از بسامد طبیعی سامانه است. در انتهای شاخه بالایی، بسامد رهایش گردابه‌ها به مقدار خود در حالت استوانه ساکن جهش پیدا می‌کند. انتقال اول، از شاخه اولیه به بالایی است و به پرش در بسامد رهایش گردابه‌ها مربوط



شکل ۱۴: نسبت بسامد رهایش گردابه از استوانه مرتعش بر بسامد طبیعی سامانه جرم و فنر برای دو نسبت فاصله ۲/۵ و ۱/۵ بر حسب عدد رینولدز

Fig. 14: Oscillating cylinder Frequency to Natural Frequency-Reynolds Diagram

افزایش یا کاهش بسامد رهایش گردابه شود. افزایش بسامد رهایش گردابه با افزایش قدرت گردابه همراه است. وابستگی درونی ضریب پسای متوسط و دامنه نوسانات ضریب برآ به هندسه خیابان گردابه وابسته است که توسط بیرمن^۱ بیان شده است. هندسه خیابان گردابه با پارامترهای l و h بیان می‌شود که به ترتیب، فاصله جهت جریانی گردابه‌ها و فاصله عرضی گردابه‌ها تعریف می‌شوند. در شکل طبیعی خود، خیابان گردابه فون کارمن شامل دو ردیف موازی و نامتناهی از گردابه هاست که به اندازه‌ی h از یکدیگر فاصله دارند [۱].

در هر ردیف، گردابه‌های هم جهت با فاصله l از یکدیگر جدا هستند و آن‌هایی که در ردیف‌های بالا و پایین قرار دارند، دارای علامت‌های مختلفی می‌باشند. تحلیل پایداری ردیف گردابه‌ها طبق نظریه فون کارمن و رودی^۲ نشان داده است که نسبت فواصل طولی و عرضی به شکل رابطه زیر ثابت است [۱].

$$h = 0.281l \quad (9)$$

بریکهوف^۳ اشاره کرد که با جاری شدن خیابان گردابه به سمت پایین دست جریان، مومنتم سامانه که متناسب است با مومنتم ورتیسیتی، Γh باید ثابت باقی بماند. از آن جا که گردش هر گردابه Γ به واسطه ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند، لذا فاصله بین دو ردیف گردابه h افزایش می‌یابد. عدد استروهل بر مبنای فاصله طولی طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$St = \frac{f_{vs} D}{U} = \frac{D}{l} \left(1 - \frac{|U_V|}{U}\right) \quad (10)$$

که در آن U_V سرعت گردابه نسبت به جریان آزاد به سمت جسم بوده و به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$|U_V| = \frac{\Gamma}{2l} \tan\left(\frac{\pi h}{l}\right) \quad (11)$$

لذا سرعت گردابه نسبت به استوانه ساکن با $U - U_V = U_C$ و نسبت به استوانه متحرک با $U - U_V \pm u_{cyl} = U_C$ برابر است. بر مبنای مطالعات سالت^۴، دامنه ضریب برای گذرای مربوطه به صورت زیر بیان می‌شود [۱].

$$C_L = \frac{\Gamma}{2UD} \left[1 - \frac{3|U_V|}{U}\right] \quad (12)$$

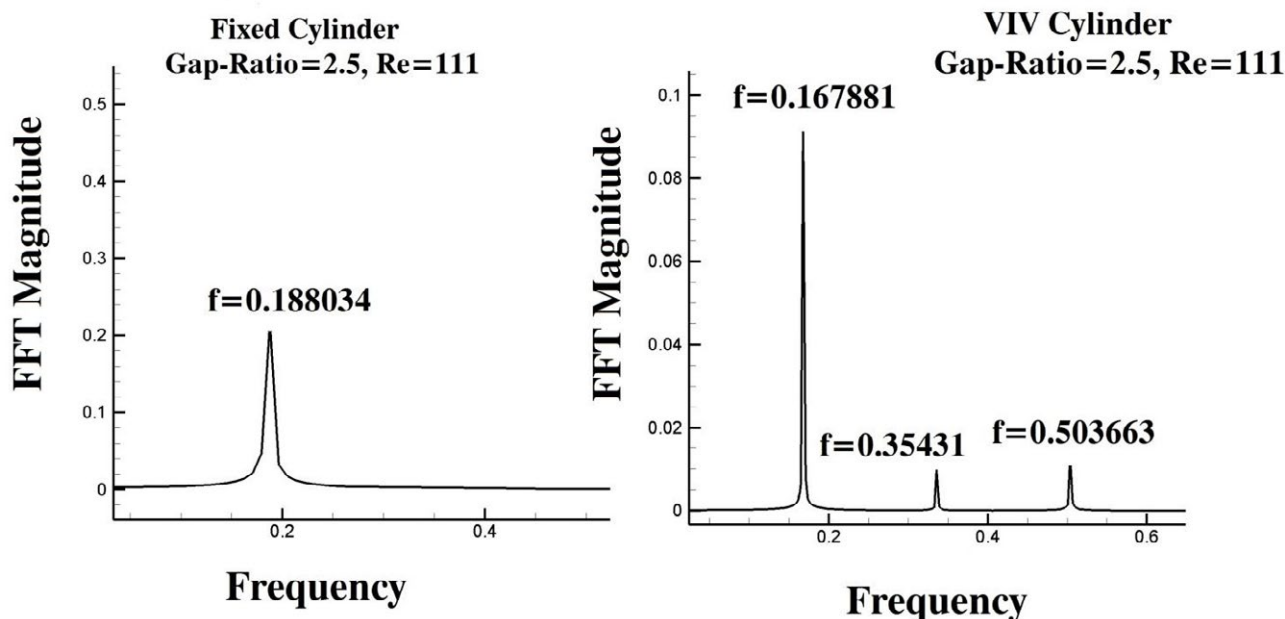
سطح آزاد تأثیری بر فیزیک مسأله به صورت قابل توجه نمی‌گذارد. به عنوان مثال در رینولدز ۹۸ نسبت فرکانسی دو نسبت فاصله با یکدیگر برابرند، این قضیه را می‌توان اینگونه توجیه کرد؛ می‌دانیم در ناحیه قفل‌شدگی، جرم افزوده حداقل مقدار ممکن و در سایر شاخه‌ها بسته به محل قرارگیری رینولدز، می‌توان بیشترین مقدار جرم افزوده را ملاحظه کرد، جرم افزوده همچون وزنه‌ای از جنس سیال است که به استوانه متصل شده و حرکت آنرا کند می‌کند، حال آنکه در ناحیه قفل‌شدگی به علت آنکه سیال اطراف استوانه با بسامد استوانه در حال نوسان است جرم این وزنه کمترین مقدار را دارد، اگر این وزنه را همچون آبری از سیال در نظر گرفت که در اطراف استوانه قرار دارد، در خارج ناحیه قفل‌شدگی به علت حجم بالای آبر سیال اطراف استوانه و برخورد این آبر به سطح دیواره بدون لغزش، حرکت استوانه کند شده، در خارج ناحیه قفل‌شدگی بیشترین تفاوت‌ها را می‌توان دید، در حالیکه در ناحیه قفل‌شدگی به علت حجم کوچک سیال افزوده و فاصله به اندازه کافی دور سطح آزاد نسبت به این آبر کوچک، وجود یا عدم وجود سطح آزاد تفاوتی را در حرکت استوانه ایجاد نخواهد کرد و ملاحظه می‌شود که در ناحیه قفل‌شدگی، تفاوت نمودارها حداقل می‌شود.

شایان ذکر است که با بررسی این دو نسبت فاصله، نمی‌توان هیچ رابطه کمی خاصی بین سطح آزاد سیال با ویژگی‌های ارتعاشات ناشی از جریان استوانه، قائل شد. تغییر رفتار ویژگی‌های ارتعاشات ناشی از جریان، با سطح آزاد سیال همانند جرم بی‌بعد - که در مراجع مختلف به غیر خطی بودن ارتعاشات ناشی از جریان نسبت به آن پرداخته شده است - با بررسی نمودارها مشخص می‌شود که به صورت خطی نیست.

۳-۳- بررسی تأثیر سطح آزاد سیال بر ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه با استفاده از مقایسه پاسخ لحظه‌ای استوانه ثابت و مرتعش

همواره استوانه با فرکانسی برابر با بسامد غالب رهایش گردابه‌ها نوسان می‌کند. اما در مقایسه با استوانه ساکن، در رهایش گردابه‌ها بسامدهای دیگری همچون $2St$ یا $3St$ مشاهده می‌شود که در جریان حول استوانه ساکن وجود ندارند، لذا یکی از مهمترین تفاوت‌های جریان حول استوانه مرتعش و ساکن، در پاسخ تبدیل فوریه آنهاست که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. حرکت استوانه می‌تواند موجب

1 Bearman
2 Ruedy
3 Brikhoff
4 Sallet



شکل ۱۵: مقایسه تبدیل فوریه سریع نوسانات ضریب برآ در نسبت فاصله ۲/۵ و رینولدز ۱۱۱ در حالت وجود ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه و عدم حضور آن

Fig. 15: FFT of Lift coefficient diagram with and without VIV at Gap-Ratio=2.5, Re=111

پاسخ استوانه صرفاً در یک عدد رینولدز خاص و مشاهده تفاوت‌های آن با حالت ساکن بودن استوانه نیست. تحقیق روی رفتار ارتعاشات ناشی از جریان یک استوانه زمانی کامل می‌شود که در بازه‌ای از سرعت‌های مختلف جریان آزاد، تفاوت‌ها و ویژگی‌ها و پدیده‌های گوناگون حاصل از تغییر در شرایط محیطی جریان اطراف استوانه دیده شود و در این تحقیق نیز تا حدودی روی آن بحث شد. بطور خلاصه می‌توان اثرات سطح آزاد سیال بر ارتعاشات القایی ناشی از رهایش گردابه را به صورت زیر بیان نمود:

- افت و خیزهایی که در دامنه پاسخ استوانه‌ها با افزایش در عدد رینولدز رخ می‌دهد، سبب بروز سه شاخه متمایز می‌شود؛ شاخه اولیه، بالایی و پایینی، که ناحیه‌ای که در آن، بسامد رهایش گردابه به بسامد طبیعی سامانه جهش پیدا کرده و روی آن قفل می‌شود به شاخه بالایی یا تطابق فرکانسی معروف است، در این شاخه، دامنه نوسانات پاسخ‌های مختلف استوانه به حداکثر مقدار خود می‌رسند.
- در ناحیه قفل‌شدگی، سطح آزاد تأثیر زیادی را بر نمودار نسبت فرکانسی ندارد و تأثیر سطح آزاد بیشتر در دو شاخه دیگر مشخص است.
- اساساً سطح آزاد موجب تغییرات بنیادی در پدیده ارتعاشات

هدف از آوردن این روابط صرفاً بیان نحوه وابستگی نیروهای وارده ناشی از جدایش گردابه به هندسه خیابان گردابه می‌باشد و هیچ محاسبه کمی به وسیله آنها صورت نمی‌گیرد. با توجه به روابط فوق، مقدار سرعت کاهش یافته با افزایش قدرت گردابه افزایش می‌یابد و از طرفی موجب کاهش ضریب برآی بررسی شده در تحقیق [۱۰] می‌شود و یک عامل کاهش دهنده آن محسوب می‌شود. از سوی دیگر افزایش قدرت گردابه با افزایش ضریب برآ همراه است. بسته به اینکه کدام عامل در رینولدز مربوطه غالب باشد، مقدار دامنه نوسانات ضریب برآی اعمالی بر استوانه متحرک نسبت به استوانه ساکن می‌تواند بیشتر یا کمتر باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتعاشات القایی ناشی از رهایش گردابه جریان حول استوانه در نزدیکی سطح آزاد سیال از دیدگاه بسامدها و مُدهای رهایش گردابه مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در تکمیل مقاله قبلی نویسندگان نشان داد که می‌توان ناحیه نامطلوب قفل‌شدگی را با اضافه کردن یک سطح آزاد معین تا حد مطلوبی کنترل کرد. آنچه به عنوان مطالعه مبحث ارتعاشات ناشی از جریان مطرح است، بررسی

شتاب گرانش، ms^{-2}	g
نسبت فاصله از سطح آزاد سیال، h/d	$Gap - Ratio$
فاصله‌ی استوانه از سطح آزاد سیال، m	h
ثابت فنریت، Nm^{-1}	k
طول استوانه، m	L
جرم بی بعد، $\frac{m}{\rho D^2 L/4}$	m^*
فشار، $kgm^{-1}s^{-2}$	P
عدد رینولدز، $\frac{Ud}{\nu}$	Re
یکی از خواص سیال	S
عدد استروهال، همان بسامد بی بعد ولی با بسامد ارتعاش	St
زمان، s	t
میدان سرعت، ms^{-1}	$\vec{U}(u, v)$
سرعت کاهش یافته، $U/f_n D$	V_r
نوسانات در راستای طولی، m	X
نوسانات در راستای عرضی، m	Y
لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$	علائم یونانی
چگالی، kgm^{-3}	μ
کسر حجمی	ρ
بسامد، $s^{-1}rad$	α
ویسکوزیته سینماتیک، m^2s^{-1}	ω
نسبت میرایی، $\frac{1}{2\sqrt{k(m+m_A)}}$	ν
	ξ
بفرم بی بعد شده	یا لانیس‌ها
افزوده	\ddagger بر نویس‌ها
استوانه	A
نیروی پسا	Cyl
نیروی برآ	D
حداکثر	L
زیرنویس بسامد برای تمایز با نیرو	max
یکی از فازهای مسأله	n
	q

مراجع

- [1] W.K. Blake, Mechanics of flow-induced sound and vibration, Volume 1: General concepts and elementary sources, Academic press, 1986
- [2] T. Sarpkaya, A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations, Journal of fluids and structures, 19(4) (2004) 389-447.
- [3] 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.
- [4] S. Singh, S. Mittal, Vortex-induced oscillations at low Reynolds numbers: hysteresis and vortex-shedding

ناشی از جریان نمی‌شود، فقط تغییرات کمی را در شاخه‌های مختلف ایجاد می‌کند.

- با افزایش عدد رینولدز، سطح آزاد در نقطه شروع ناحیه قفل‌شدگی بی تأثیر است، اما موجب کاهش محدوده قفل‌شدگی و انتقال زودتر از شاخه بالایی به پایینی می‌شود.

- در محدوده قفل‌شدگی، تنها بسامد غالب نوسانات حرکت، بسامد طبیعی سامانه است در حالیکه در خارج از این ناحیه، بسامدهای غالب دیگری هم وجود دارد.

- مدهای رهایش گردابه در شاخه‌های مختلف پاسخ استوانه متفاوت است، در شاخه‌های اولیه و پایینی، شاهد مد S و در شاخه بالایی نیز تا حدودی شاهد مد $C(2S)$ هستیم، سطح آزاد نیز فقط موجب کشیده شدن گردابه‌های جدا شده از استوانه شده و در نوع مدهای رهایش بی تأثیر است.

- سطح آزاد موجب افزایش عدد استروهال جریان و افزایش نسبت فرکانسی بی‌بعد می‌شود.

نویسندگان این مقاله، تغییر سطح مقطع استوانه نزدیک سطح آزاد سیال را به بیضی و مقایسه آن با مسأله در یک سیال نامحدود و تغییر رژیم جریان از آرام به آشفته و ارائه نتایج مشابه برای مقایسه با این تحقیق را برای ادامه این کار به پژوهشگران پیشنهاد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

برای انجام برخی از محاسبات این تحقیق از سامانه‌های مرکز تحقیقات پردازش‌های فوق سریع^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) و آزمایشگاه تحقیقاتی انرژی، آب و محیط زیست و نیز دانشکده 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.

فهرست علائم

عدد فرود، U/\sqrt{gd}	Fr
بسامد طبیعی جسم، s^{-1}	f_n
بسامد بی‌بعد رهایش گردابه، $\frac{f_n D}{U}$	F

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

- incompressible flow past an oscillating cylinder, *International Journal of Computational Methods*, 12(02) (2015) 1550012.
- [15] T. He, On a partitioned strong coupling algorithm for modeling fluid–structure interaction, *International Journal of Applied Mechanics*, 7(02) (2015) 1550021.
- [16] J.B. Wanderley, G.H. Souza, S.H. Sphaier, C. Levi, Vortex-induced vibration of an elastically mounted circular cylinder using an upwind TVD two-dimensional numerical scheme, *Ocean Engineering*, 35(14-15) (2008) 1533-1544.
- [17] Z. Pan, W. Cui, Q. Miao, Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder at low mass-damping using RANS code, *Journal of Fluids and Structures*, 23(1) (2007) 23-37.
- [18] H. Al-Jamal, C. Dalton, Vortex induced vibrations using large eddy simulation at a moderate Reynolds number, *Journal of fluids and structures*, 19(1) (2004) 73-92.
- [19] 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.
- [20] J. Sheridan, J.-C. Lin, D. Rockwell, Flow past a cylinder close to a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 330 (1997) 1-30.
- [21] P. Reichl, K. Hourigan, M. Thompson, Flow past a cylinder close to a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 533 (2005) 269-296.
- [22] S.M. Hosseinalipoor, N. Hajighafoori 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.
- [23] J. Carberry, J. Sheridan, D. Rockwell, Cylinder oscillations beneath a free-surface, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 23(1) (2004) 81-88.
- [24] J.-C. Lin, D. Rockwell, Horizontal oscillations of a cylinder beneath a free surface: vortex formation modes, *Journal of Fluids and Structures*, 20(8) (2005) 1085-1104.
- [5] 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.
- [6] G. Parkinson, Phenomena and modelling of flow-induced vibrations of bluff bodies, *Progress in Aerospace Sciences*, 26(2) (1989) 169-224.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] S.M. Hosseinalipoor, N. Hajighafoori Boukani, Numerical Investigation of Vortex-Induced Vibrations of an Elastically-Mounted Circular Cylinder beneath a Free Surface, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(4) (2018) 727-740.
- [11] Z. Han, D. Zhou, J. Tu, C. Fang, T. He, Flow over two side-by-side square cylinders by CBS finite element scheme of Spalart–Allmaras model, *Ocean Engineering*, 87 (2014) 40-49.
- [12] Z. Han, D. Zhou, T. He, J. Tu, C. Li, K.C. Kwok, C. Fang, Flow-induced vibrations of four circular cylinders with square arrangement at low Reynolds numbers, *Ocean Engineering*, 96 (2015) 21-33.
- [13] T. He, Semi-implicit coupling of CS-FEM and FEM for the interaction between a geometrically nonlinear solid and an incompressible fluid, *International Journal of Computational Methods*, 12(05) (2015) 1550025.
- [14] T. He, A partitioned implicit coupling strategy for

- circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 594 (2008) 463-491.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] A. Roshko, On the development of turbulent wakes from vortex streets, (1954).
- and loading, *Journal of Fluid Mechanics*, 389 (1999) 1-26.
- [25] 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.
- [26] C. Bozkaya, S. Kocabiyik, Free surface wave interaction with an oscillating cylinder, *Applied Mathematics Letters*, 27 (2014) 79-84.
- [27] T. Prasanth, S. Mittal, Vortex-induced vibrations of a