

Numerical Study of Energy Harvesting of Vortex Induced Vibration Phenomenon of Circular Cylinder with Various Sectors at Low Reynolds Number

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rafati Zarkak M.¹ MSc,
Barati E.*¹ PhD,
Abolfazli Esfahani J.² PhD

How to cite this article

Rafati Zarkak M, Barati E, Abolfazli Esfahani J. Numerical Study of Energy Harvesting of Vortex Induced Vibration Phenomenon of Circular Cylinder with Various Sectors at Low Reynolds Number. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1687-1695.

ABSTRACT

In this study, the geometrical effect of circular cylinder with different sectors on energy harvesting of vortex induced vibration is investigated numerically. According to Von Karman vortex shedding phenomenon, the flow passes over a bluff body and as the results create vibration, can use this phenomenon with energy extraction and converting it into desired energy. In this paper, the focus was on discovering a cylinder geometry with more vibration than the base cylinder (circular cylinder); for this purpose, circular cylinder with different sectors, including L/D ratio of 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1 in two direction of arches frontal (AF) incoming flow and flat frontal (FF) incoming flow have been studied at Reynolds numbers of 100 and 200. Investigations have been carried out in the fluid and vibration field. In the fluid field, the aerodynamics forces are obtained on the cylinder with the help of computational fluid dynamics (CFD) and in the vibration field, by writing program in the Maple software, the displacement of the cylinder and, finally, recoverable potential power of the fluid were calculated. The results show that, at Reynolds numbers of 100 and 200, respectively, circular cylinder with L/D=0.5 and L/D=0.6 sectors in the placement direction of FF get the maximum extraction power of fluid and compared to the circular cylinder at Reynolds numbers of 100 and 200, respectively, 3.5 and 5.3 more times power harvesting. Also, in the same sectors cylinder, the cylinder with FF placement direction always has more power generation than the cylinder with AF placement direction.

Keywords Vortex Induced Vibration; Energy Harvesting; Vortex Shedding; Sectors Circular Cylinder

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Khayyam University, Mashhad, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Khayyam University, Mashhad, Iran.
Phone: +98 (51) 35156150
Fax: +98 (51) 35251999
e.barati@khayyam.ac.ir

Article History

Received: April 19, 2018
Accepted: January 05, 2019
ePublished: July 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Numerical simulation of vortex-induced vibration of a square cylinder at a low Reynolds number [2] Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections [3] Vortex induced vibration response and energy harvesting of a marine riser attached by a free-to-rotate impeller [4] Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement [5] A miniature pneumatic energy generator using Kármán vortex street [6] Experimental study of galloping-based energy harvesting system using piezoelectric materials [7] CFD analysis of energy harvesting from flow induced vibration of a circular cylinder with an attached free-to-rotate pentagram impeller [8] Fluid-structure interactions: Cross-flow-induced instabilities [9] Bluff-Body Wakes, Dynamics and Instabilities: IUTAM Symposium, Göttingen, Germany September 7–11, 1992 [10] A new implicit algorithm with multigrid for unsteady incompressible flow calculations [11] Numerical investigations of lift suppression by feedback rotary oscillation of circular cylinder at low Reynolds number [12] Vortex penalization method for bluff body flows [13] Unsteady forced convection heat transfer over a semicircular cylinder at low Reynolds numbers [14] Vortex-induced vibrations

بررسی عددی استحصال انرژی از پدیده ارتعاشات القایی گردابه در سیلندر دایروی با قطاع‌های متفاوت در اعداد رینولدز پایین

مهدی رفعتی زکک MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خيام، مشهد، ایران

ابراهیم براتی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خيام، مشهد، ایران

جواد ابوالفضل اصفهانی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

در این پژوهش، اثر هندسی سیلندر دایروی با قطاع‌های متفاوت روی ارتعاشات القایی گردابه با هدف استحصال انرژی از آن به روش عددی بررسی شده است. با توجه به پدیده ریزش گردابه‌ای فون کارمن، هنگام عبور جریان از روی اجسام بلافاصله و در نتیجه ایجاد ارتعاش در جسم، می‌توان با دریافت این انرژی و تبدیل آن به انرژی مطلوب از این پدیده استفاده نمود. در این پژوهش تمرکز روی یافتن یک هندسه سیلندر با ارتعاشات بیشتر نسبت به سیلندر مبنا (سیلندر دایروی) بوده که برای این منظور سیلندر دایروی با قطاع‌های مختلف شامل نسبت L/D های ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ در دو جهت قرارگیری پیشانی قوس‌دار (AF) و پیشانی تخت (FF) رو به جریان و در رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها در دو حوزه سیالاتی و ارتعاشی انجام شده و در قسمت سیالاتی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی نیروی‌های آیرودینامیکی وارد به سیلندر محاسبه شده است. در قسمت ارتعاشی، با نوشتن برنامه در نرم‌افزار میپل، جابه‌جایی سیلندر و در نهایت توان بالقوه قابل استحصال از سیال محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب سیلندر دایروی با نسبت قطاع ۰/۵ و ۰/۶ در جهت قرارگیری FF دارای بیشترین توان دریافتی از سیال است و نسبت به سیلندر دایروی در رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب ۳/۵ و ۵/۳ برابر افزایش توان را دارا است. همچنین در سیلندر با قطاع یکسان همواره سیلندر با جهت قرارگیری FF توان بیشتری نسبت به سیلندر در جهت AF تولید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ارتعاشات القایی گردابه، استحصال انرژی، ریزش گردابه، سیلندر دایروی قطاع‌دار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۵

*نویسنده مسئول: e.barati@khayyam.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر پژوهشگران همواره به دنبال راهکارهایی برای استحصال انرژی از منابع تجدیدپذیر بوده‌اند، یکی از این منابع در دسترس، انرژی ناشی از حرکت سیالاتی مانند جریان باد، جریان‌های آبی و غیره است. با قراردادن یک جسم بلافاصله در مسیر عبور این جریان‌ها گردابه‌هایی تحت عنوان خیابان گردابه‌ای فون کارمن به وجود می‌آید، که چنانچه جسم آزادی حرکت داشته باشد ارتعاشاتی موسوم به ارتعاشات القایی گردابه پدید می‌آورد. جسم بلافاصله تحت تاثیر ارتعاشات القایی گردابه دارای حرکت و در نتیجه انرژی جنبشی است که می‌توان این انرژی را توسط یک مبدل مطلوب استحصال کرد. ارتعاشات القایی گردابه از دسته مسایل اندرکنش سیال و سازه است که در دو زمینه سیالاتی و ارتعاشی قابل بحث است. با توجه به این موضوع که در سازه، ارتعاش همواره از نظر مهندسان مطلوب نبوده است پژوهشگران همواره به دنبال راه‌هایی برای سرکوب این پدیده بوده‌اند و پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه استفاده این پدیده به منظور استحصال انرژی از آن به نسبت اندک بوده است. در اندک

پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با استحصال انرژی از این پدیده اکثر آنها در حوزه‌های ارتعاشاتی مانند اثرات تغییر مشخصه‌هایی نظیر سختی فنر، میرایی سیستم، جرم سیلندر و غیره بوده است و مطالعات اندکی روی تغییر مشخصات تاثیرگذار روی جریان حول سیلندر و ریزش گردابه‌ای صورت گرفته است. این مولفات خود به دو دسته سازکار فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌ها برای افزایش توان قابل استحصال از سیال تغییر هندسه سیلندر (سازکار غیرفعال) است تا با تحت تاثیر قراردادن سیال اطراف خود بهره‌وری سیستم را افزایش دهد. در ادامه به چند نمونه از پژوهش‌هایی که در این راستا انجام شده، اشاره می‌شود.

ژائو و همکاران^[1] در یک پژوهش به بررسی عددی هندسه مربعی در زوایای حمله صفر، ۲۲/۵ و ۴۵ درجه در عدد رینولدز ۱۰۰ و نسبت جرمی پایین پرداختند. آنها دریافتند زاویه حمله سیلندر تاثیر چشمگیر روی دامنه ارتعاشات و فرکانس قفل‌شدگی داشته و افزایش آن باعث افزایش نیروهای آیرودینامیکی و در نتیجه افزایش توان قابل استحصال از سیال می‌شود.

دینگ و همکاران^[2] با انتخاب چهار هندسه سیلندر متفاوت به بررسی بیشینه توان قابل استحصال از سیال در بازه اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰۰ پرداختند. هندسه‌های انتخاب شده شامل دایروی، مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی است. طبق بررسی‌های انجام شده مشاهده شد سیلندر دایروی و دوزنقه‌ای به ترتیب با بهره‌وری ۴۵/۷٪ و ۳۷/۹٪ بیشترین مقدار توان قابل استحصال از سیال را دارند.

ژو و همکاران^[3] در یک پژوهش نوآورانه به بررسی یک سیلندر دایروی با سه پره منحنی شکل متصل به آن که دارای آزادی حرکت زاویه‌ای و آزادی حرکت در جهت عمود بر جریان سیال است در بازه اعداد رینولدز ۳۰۰۰ تا ۴۸۸۰۰۰ پرداختند. طبق این نتایج چرخش پروانه سبب قفل‌شدگی در رینولدزهای بالاتری می‌شود. همچنین موجب افزایش بهره‌وری نسبت به سیلندر دایروی بدون پروانه شده و در دامنه ارتعاشات پایین‌تر توان بیشتری تولید می‌کند.

در مطالعه‌ای که توسط ژانگ و همکاران^[4] انجام شد پنج هندسه متفاوت با آرایش چیدمان پشت سر هم برای بررسی استحصال انرژی از آنها مورد بررسی قرار گرفت که شامل سیلندر با مقاطع مثلثی، مربعی، پنج‌ضلعی، دایروی و سیلندری با مقطع دایروی-مثلثی با نسبت جرمی ثابت ۰/۹۳ در فواصل ۲D تا ۵۰D نسبت به یکدیگر بوده‌اند. نتایج این بررسی نشان داد که ارتعاش سیلندر بالادست هنگامی که فاصله آن با سیلندر پایین‌دست کمتر از ۵D باشد سرکوب می‌شود. همچنین سیلندر پایین‌دست چنانچه دارای فاصله بیشتر از ۳۵D باشد تحت تاثیر سیلندر بالادست قرار نمی‌گیرد. در نهایت سیلندر با مقطع دایروی-مثلثی دارای بیشترین مقدار بهره‌وری از انرژی سیال به میزان ۲۶/۵٪ و سیلندر با مقطع مربع کمترین توان قابل استحصال از سیال را دارد.

در پژوهشی دیگر توسط نویین و همکاران^[5] دو سیلندر با مقطع مثلثی در آرایش پشت سر هم در یک کانال آب بررسی شد. در این آزمایش از یک پرده دیافراگمی برای تبدیل انرژی فشاری رهایی گردابه به کرنش و انتقال آن به مبدل پیزوالکتریک استفاده شده است. مشاهده شد در حالت دو سیلندر پشت سر هم توان بیشتری نسبت به حالت تک سیلندر استحصال می‌شود.

در مطالعه‌ای که توسط سبحانی‌راد و همکاران^[6] انجام شد به بررسی سه هندسه بلافاصله شامل مربعی، نیم‌دایروی و مثلثی با مبدل پیزوالکتریک پرداخته و مشخص شد که جسم بلافاصله با سطح مقطع مثلثی توان الکتریکی بیشتری تولید می‌کند.

ژئو و همکاران^[7] با متصل کردن یک پروانه پنج‌پر قابل چرخش به

قرار گرفته است معادلات حاکم در هر حوزه به‌طور جداگانه شرح داده می‌شود:

۱-۲- معادلات سیالاتی

معادلات حاکم در حالت دوبعدی، تراکم‌ناپذیر، سیال نیوتونی به‌صورت زیر خواهد بود:

معادله پیوستگی:

(۱)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

معادله مومنوم:

(۲)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x$$

(۳)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y$$

که در معادلات فوق u و v به‌ترتیب سرعت سیال در جهت x و y ، P فشار سیال و F_x و F_y به‌ترتیب نیروی حجمی وارده از سیال به جسم نامیده می‌شود. در این معادله Re عدد رینولدز نامیده شده و از معادله زیر حاصل می‌شود:

(۴)

$$\text{Re} = \frac{\rho D U_{\infty}}{\mu}$$

در این معادله ρ چگالی سیال، D قطر سیلندر، U_{∞} سرعت جریان آزاد و μ لزجت دینامیکی سیال است.

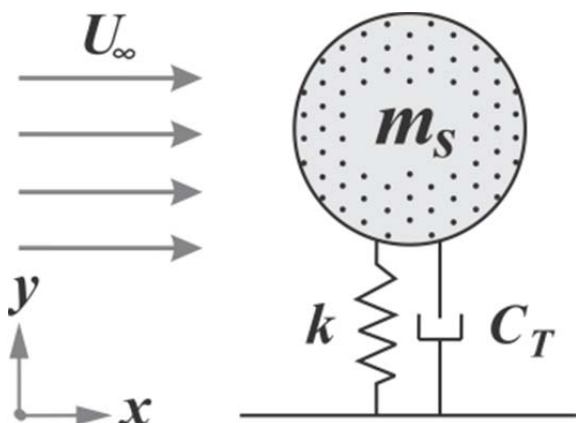
متغیرهای بدون بعد عبارت است از:

$$u = \frac{\bar{u}}{U_{\infty}}, \quad v = \frac{\bar{v}}{U_{\infty}}, \quad x = \frac{X}{D}, \quad y = \frac{Y}{D}, \quad p = \frac{\bar{p}}{\rho U_{\infty}^2},$$

$$t = \frac{\bar{t} U_{\infty}}{D},$$

۲-۲- معادلات ارتعاشی

برای نوشتن معادلات ارتعاشی سیستم متشکل از جرم- فنر- میراگر مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود:



شکل (۱) سیستم ارتعاشی شبیه‌سازی شده

سیلندر دایروی به بررسی دامنه ارتعاش سیلندر، توان قابل استحصال از سیال و تاثیر ضریب اصطکاک سطحی و میرایی سیستم پرداختند. نصب پروانه روی سیلندر سبب دریافت انرژی چرخشی سیال علاوه بر انرژی حاصل از ارتعاشات می‌شود. آنها دریافتند که پروانه سبب قفل‌شدگی در سرعت‌های کاهیده بالاتر می‌شود و همچنین دامنه نوسان را نسبت به سیلندر دایروی کاهش می‌دهد.

در پژوهش‌هایی که به مطالعه روی استحصال انرژی پرداخته شده است در تعدادی از این پژوهش‌ها مقدار نیروی آیرودینامیکی یا هیدرودینامیکی وارده از سیال به سیلندر و فرکانس‌های گردابه در یک بازه سرعت کاهیده (متناظر با عدد رینولدز) را ثابت فرض کرده‌اند، در صورتی که این مقدار عددی ثابتی نیست. بنابراین در این پژوهش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ابتدا نیروی وارده بر سیلندر و فرکانس ریزش گردابه را محاسبه کرده، سپس با جای‌گذاری در معادلات ارتعاش اجباری سیستم دامنه نوسان بررسی می‌شود و در انتها مقدار توان بالقوه قابل استحصال از سیال محاسبه می‌شود. همچنین در تعدادی از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده که از دینامیک سیالات محاسباتی به‌منظور محاسبه نیروی‌های آیرودینامیک و جابه‌جایی سیلندر استفاده‌شده، از مدل مش متحرک کمک گرفته شده است. مهم‌ترین ضعف این روش افزایش هزینه محاسبات است. همچنین با توجه به این که در این نوع شبیه‌سازی‌ها از یک کد برای نوسان سیلندر استفاده می‌شود و با توجه به این که در این کدها بازخورد لحظه‌ای اثر متقابل سیلندر به سیال و برعکس در نظر گرفته نمی‌شود در عمل مزیتی نسبت به شبیه‌سازی در حالت سیلندر ثابت نداشته و می‌توان با نوشتن معادله ارتعاش سیلندر جابه‌جایی سیلندر را با استفاده از مولفات سیلندر ساکن محاسبه نمود که مزایایی از جمله کاهش زمان و هزینه محاسبات خواهد داشت. کد مورد استفاده در این شبیه‌سازی برای محاسبه دامنه ارتعاش، از داده‌های آیرودینامیکی سیلندر صلب استفاده می‌کند و در نتیجه مقدار قابل توجهی از هزینه‌های محاسباتی کاهش می‌یابد.

در این تحقیق در ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی سیالاتی سیلندر ثابت، نیروی برا و فرکانس‌های گردابه محاسبه شده است سپس با درنظرگرفتن یک جرم سیلندر ثابت و این حقیقت که دامنه پیشینه در حالت قفل‌شدگی اتفاق می‌افتد [8] مقادیر خواص ارتعاشی سیلندر طوری تعیین می‌شود تا فرکانس طبیعی سیلندر و رهایی گردابه یکسان شود. مزیت این روش این است که با توجه به اینکه در واقعیت تغییر مشخصات سیال عبوری از روی سیلندر نظیر سرعت جریان، تحت اختیار قرار نداشته و عموماً در یک بازه ثابت قرار دارد و می‌بایست با تغییر مولفات ارتعاشی سیلندر، فرکانس طبیعی آن را برابر فرکانس‌های گردابه قرار داد. در صورتی که در سایر پژوهش‌ها با تغییر سرعت کاهیده درصد رسیدن به حالت قفل‌شدگی است. درنهایت با محاسبه دامنه ارتعاشات سیلندر توان قابل استحصال از سیلندر محاسبه می‌شود. در این مطالعه سیلندر دایروی با قطعاتی متفاوت به‌عنوان یک هندسه جدید در دو جهت قرارگیری نسبت به جریان سیال مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های به‌دست‌آمده با سیلندر دایروی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود ایجاد قطاع در سیلندر دایروی سبب افزایش ضریب برا، دامنه ارتعاش و در نتیجه افزایش توان قابل استحصال از سیال می‌شود.

۲- معادلات حاکم

با توجه به این بررسی در دو حوزه سیالاتی و ارتعاشی مورد بحث

۲-۳- محاسبه توان قابل استحصال از سیال

با به دست آوردن جابه‌جایی سیلندر می‌توان توان بالقوه قابل استحصال از سیال را با انتگرال‌گیری از حاصلضرب نیروی وارده از سیال به سیلندر (محاسبه‌شده در بخش سیالاتی) در مشتق جابه‌جایی سیلندر (محاسبه‌شده در بخش ارتعاشی) به دست آورد:

(۱۵)

$$\begin{aligned} P_{fluid} &= \frac{\int_0^T F_{fluid} \dot{y} dt}{T} \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [(m_s + m_a) \ddot{y} + C_T \dot{y} \\ &\quad + ky] \dot{y} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [4\pi(m_s + m_a) \xi_T \dot{y}^2 f_n] dt \end{aligned}$$

تغییرات جابه‌جایی و میرایی سیستم به‌صورت سینوسی فرض می‌شود:

$$y^* = y_{max}^* \sin(2\pi f_{fluid} t) \quad (17)$$

$$c_v(t) = C_v \sin(2\pi f_{fluid}t + \varphi) \quad (17)$$

با جای‌گذاری معادلات ۱۶ و ۱۷ در معادله ۱۵ مقدار توان بالقوه قابل استحصال از سیال در ناحیه قفل‌شدگی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_{fluid} = 8\pi^3(m_s + m_a)\xi_T A_{max}^2 f_n^3 \quad (18)$$

۳- تعریف مساله، شبکه‌بندی و روش حل

هندسه مورد بررسی سیلندر دایروی با قطع‌های متفاوت و با قطر عمود بر جریان ثابت D است. فرضیاتی به‌منظور حل مساله در نظر گرفته شده است که شامل دوبعدی‌بودن هندسه، جریان تراکم‌ناپذیر، لزجت ثابت هستند. در این پژوهش از نرم‌افزار گمبیت نسخه ۲.۴.۶ برای شبکه‌بندی حول سیلندر استفاده شده است. دامنه حل مطابق شکل ۲- الف به‌صورت دایروی بوده و همچنین شبکه از نوع سازمان‌یافته است (شکل ۲- ب). شرایط مرزی در این دامنه، برای مرز ورودی شرط سرعت ورودی، مرز خروجی شرط فشار خروجی و در نهایت برای سطح سیلندر شرط عدم لغزش تعیین شده است.

برای مطالعه جریان حول سیلندر از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۱۷/۱ استفاده شده است. معادلات ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر و لزج با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. الگوریتم مورد استفاده برای کوپل فشار و سرعت *SIMPLEC* است. با توجه به این که رژیم ناحیه ویک و لایه مرزی آرام^[۹] است از مدل آرام برای شبیه‌سازی حل استفاده شد.

مشخصات هندسی سیلندرهای قطاع خورده طبق شکل ۳ بوده و شش سیلندر با مقدار نسبت L/D به ترتیب برابر ۱، ۰/۹، ۰/۸، ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ در دو زاویه قرارگیری نسبت به جریان بررسی شده است.

در این پژوهش شش سیلندر با قطعه‌های مختلف در دو حالت قرارگیری پیشانی قوس‌دار به جریان (AF) و پیشانی صاف به جریان (FF) مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار این قطعه‌ها نسبت به سیلندر ماقبل خود ۱۰٪ افزایش می‌یابد، بدین ترتیب نام‌گذاری سیلندرها طبق شکل ۴- الف از چپ به راست به‌ترتیب شامل ۱AF، ۱/۹AF، ۱/۸AF، ۰/۷AF، ۰/۶AF، ۰/۵AF و مطابق شکل ۴- ب از چپ به راست شامل FF، ۰/۹FF، ۰/۸FF، ۰/۷FF، ۰/۶FF و ۰/۵FF است.

$$(m_S + m_A)\ddot{y} + 2\xi(m_S + m_A)(2\pi f_n)\dot{y} + (m_S + m_A)(2\pi f_n)^2 y = F_{fluid}(t)$$

که در این معادله m_s جرم سیلندر، y جابه‌جایی سیلندر در جهت عمودی، ξ میرایی سیستم، f_n فرکانس طبیعی سیستم است. همچنین در معادله ۴ مقادیر m_A و $F(t)$ برابر است با:

(۶)

$$m_A = \frac{\rho \pi D^2}{4} \quad (\text{Y})$$

$$F_{fluid}(t) = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 D C_L \sin \left(2\pi \cdot st \frac{U_{\infty}}{D} t \right)$$

که به ترتیب جرم سیال جابه‌جاشده و نیروی آیرودینامیکی وارده از سیال به سیلندر هستند. همچنین با محاسبه C_L و St به وسیله حل عددی در قسمت سیالاتی مقادیر مولفه $F_{fluid}(t)$ حاصل می‌شود. در معادله ۷، C_L ضریب برا و St عدد استروهال است که مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\text{St} = \frac{f_{fluid} D}{U_{\infty}}$$

که در این معادله f_{fluid} فرکانس ریزش گردابه در پشت سیلندر است.

با جای‌گذاری معادلات ۶ و ۷ در معادله ۵ و حل آن معادله حرکت سیلندر به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

(۹)

$$\frac{y(t)}{D} = \frac{1}{2\pi^3} \times \frac{C_L U r^2}{(1+m^*) \left[(1-Ur^2 \text{St}^2)^2 + 4\xi^2 U r^2 \text{St}^2 \right]^{1/2}} \sin \left(2\pi \text{St} \frac{U_\infty}{D} + \varphi \right)$$

در معادله ۹، Ur ، φ و m^* به ترتیب برابر سرعت کاهیده، اختلاف فاز و نسبت جرمی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$Ur = \frac{U_{\infty}}{f_p D} \quad (10)$$

$$\tan \varphi = \frac{2\xi \text{St} Ur}{1 - \text{St}^2 Ur^2} \quad (11)$$

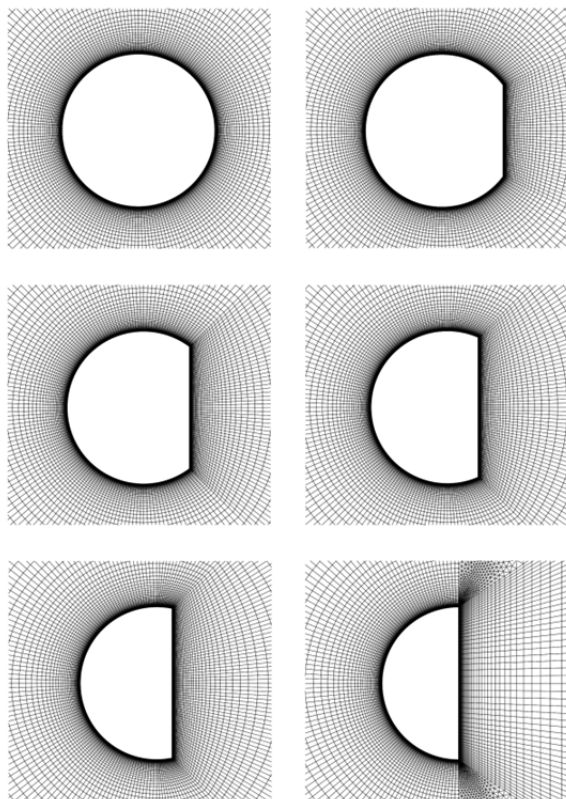
$$m^* = \frac{m_s}{m_A} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن این فرض که دامنه بیشینه همواره در ناحیه $St\ Ur=1$ است [8]. با مرتب‌سازی معادله ۹ دامنه بیشینه در هر لحظه برابر است با:

$$\frac{A_{max}}{D} = \frac{C_L}{4\pi^3 St^2(m^*\xi)} = \frac{C_L}{2 SG} \quad (13)$$

در معادله ۱۳، SG عدد اسکاپ-گریفن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{SG} = 2\pi^3 \text{St}^2 (m^* \xi) \quad (14)$$



شکل ۵) نمایی نزدیک از شبکه بندی اطراف سیلندرهای قطاع دار

۴- اعتبار سنجی

۴-۱- استقلال از شبکه

برای بررسی عدم وابستگی حل به تعداد سلول، از سه شبکه بندی با تعداد سلول های مختلف استفاده شده است. به طوری که تعداد گره ها در هر وجه شبکه نسبت به وجه شبکه قبل دوبرابر شده است. مشخصه های مورد بررسی ضریب برا، ضریب پسا و عدد استروهال در عدد رینولدز ۲۰۰ برای سیلندر دایروی بوده است.

با توجه به جدول ۱ مشخص می شود با افزایش تعداد گره ها ضریب پسا افزایش می یابد و ضریب برا و عدد استروهال کاهش می یابد. همچنین در شبکه M2 تغییرات ضرایب نیرو و عدد استروهال نسبت به شبکه ریزتر بسیار ناچیز است، بنابراین از شبکه M2 در این پژوهش استفاده شده است.

جدول ۱) اثر چگالی شبکه روی مشخصه های جریان برای سیلندر دایروی در عدد رینولدز ۲۰۰

شبکه	المان	گره	C_L	C_D	St
M1	۱۱۵۵۲	۱۱۹۶۲	± 0.691	۱/۲۸۴	۰/۱۹۶
M2	۲۰۰۰۰	۲۰۸۰۸	± 0.662	۱/۳۱۰	۰/۱۹۲
M3	۳۱۷۵۲	۳۲۷۶۸	± 0.654	۱/۳۱۲	۰/۱۹۱

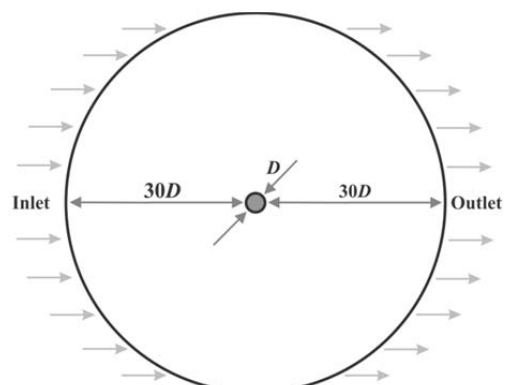
۴-۲- استقلال از گام زمانی

با انتخاب شبکه M2 به عنوان شبکه مورد بررسی، به بررسی گام زمانی مورد استفاده در پژوهش پرداخته می شود. بدین منظور از پنج گام زمانی مختلف استفاده شد و مشخصه های ضرایب نیرو و عدد استروهال در عدد رینولدز ۲۰۰ برای سیلندر دایروی مورد بررسی قرار گرفت.

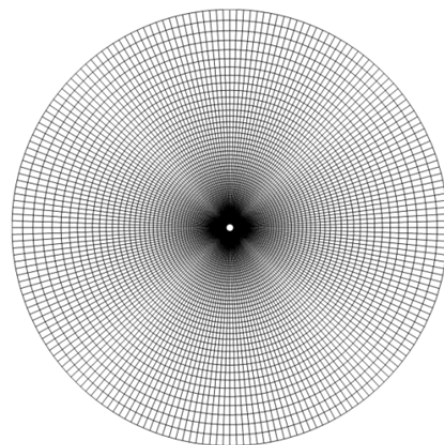
با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود که در گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه تغییرات ضرایب نیرو و عدد استروهال نسبت به گام زمانی

هستند. در سیلندرهای قطاع خورده طول قطر عمود بر جریان در هر قطاع برابر D است.

در شکل ۵ نمایی نزدیک از شبکه بندی اطراف سیلندرهای قطاع خورده مشاهده می شود.

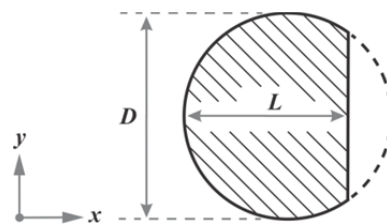


(الف)

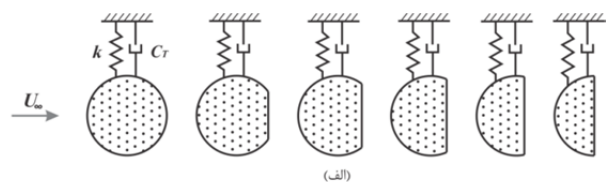


(ب)

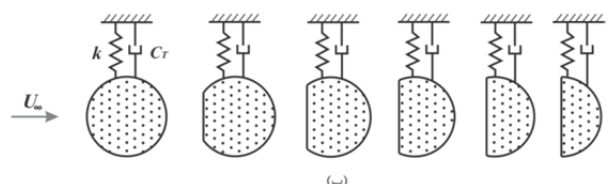
شکل ۲) (الف) شماتیک از دامنه حل محاسباتی (ب) نمایی از شبکه تولید شده



شکل ۳) مشخصات هندسی سیلندر قطاع دار



(الف)



(ب)

شکل ۴) شماتیک سیلندرهای قطاع دار به ترتیب از چپ به راست با مقدار L/D : ۰/۹، ۰/۸، ۰/۷، ۰/۶، ۰/۵ و ۰/۴ در دو جهت قرارگیری (الف) طرف خمیده روبه جریان (AF) و (ب) طرف صاف رو به جریان (FF)

کوچک‌تر تقریباً ناچیز است، بنابراین از گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه در ادامه استفاده می‌شود.

جدول ۲) استقلال از گام زمانی برای سیلندر دایروی در عدد رینولدز ۲۰۰

گام زمانی	C_L	C_D	St
۰/۰۰۲۵۰	$\pm 0/625$	۱/۲۹۲	۰/۱۸۷
۰/۰۰۱۰۰	$\pm 0/662$	۱/۳۱۰	۰/۱۹۲
۰/۰۰۰۷۵	$\pm 0/662$	۱/۳۱۲	۰/۱۹۲

۳-۴- اعتبارسنجی حل

برای بررسی اعتبار روش حل انتخاب شده، نتایج به دست آمده با دیگر نتایج مشابه مقایسه شده است. راستی‌آزمایی در حوزه سیالاتی و ارتعاشی برای اطمینان از روش حل انجام شده است. در شبیه‌سازی سیالاتی مشخصه‌های مورد بررسی شامل ضریب برا، ضریب پسا و عدد استروهال در دو سیلندر با مقطع دایروی و نیم‌دایره به ترتیب در اعداد رینولدز ۲۰۰ و ۱۰۰ است (جدول ۳).

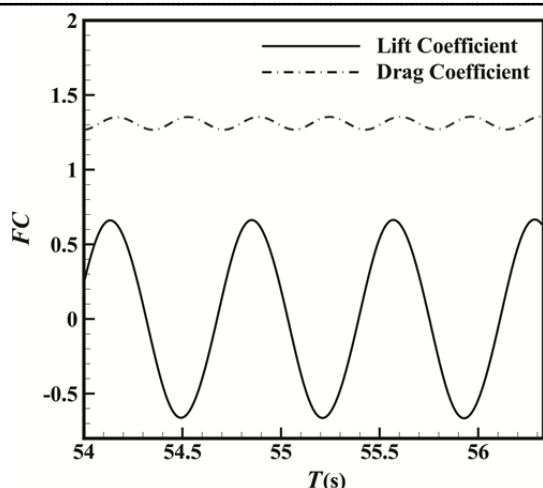
جدول ۳) اعتبارسنجی حل برای جریان حول سیلندر دایروی در عدد رینولدز ۲۰۰ و سیلندر نیم‌دایروی در عدد رینولدز ۱۰۰ در مقایسه با پژوهش‌های پیشین

سیلندر	Re	منابع	C_L	C_D	St
دایروی	۲۰۰	بیلاو و همکاران ^[10]	$\pm 0/64$	۱/۱۹	۰/۱۹۳
		لو و همکاران ^[11]	$\pm 0/69$	-	۰/۱۹۶
		مینیا و همکاران ^[12]	$\pm 0/75$	۱/۴۴	۰/۲۰۰
		پژوهش حاضر	$\pm 0/66$	۱/۳۱	۰/۱۹۲
نیم‌دایره	۱۰۰	چاترچی و همکاران ^[13]	$\pm 0/43$	۱/۷۵	۰/۱۹۸
		پژوهش حاضر	$\pm 0/39$	۱/۷۰	۰/۱۸۶

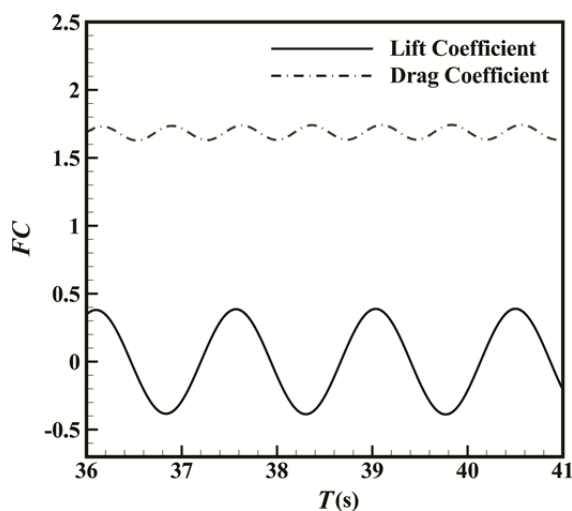
مطابق جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیالاتی تطابق خوبی با دیگر نتایج دارد. توجه شود مقادیر C_D و C_L ارائه شده در جداول ۱، ۲ و ۳ به صورت سینوسی نسبت به زمان تغییر می‌کند، بنابراین مقدار C_L بر حسب rms و مقدار C_D بر حسب متوسط قله به دره اندازه‌گیری شده است. در نمودارهای ۱ و ۲ تغییرات ضرایب نیرو بر حسب زمان به ترتیب برای سیلندر دایروی و نیم‌دایره به ترتیب در اعداد رینولدز ۲۰۰ و ۱۰۰ نمایش داده شده است.

با توجه به نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود مقدار فرکانس ضریب پسا در هر دو حالت سیلندر دایروی و نیم‌دایره دوبرابر فرکانس ضریب برا است. این مساله به این علت اتفاق می‌افتد که در هر دوره ضریب برا، می‌بایست دو گردابه از ناحیه و یک جدا شوند تا ضریب برا بتواند یک دوره نوسان کامل نماید و در طرف مقابل در هربار جداسدن گردابه ضریب پسا یک دوره نوسان کامل را طی می‌کند بنابراین فرکانس ضریب پسا دو برابر ضریب برا است. همچنین مشاهده می‌شود همواره مقادیر دامنه نوسانات ضریب پسا مقدار قابل توجهی از ضریب برا کمتر است. در قسمت شبیه‌سازی ارتعاشی دامنه بیشینه ارتعاش با داده‌های تجربی ویلیامسون و همکاران^[14] در عدد رینولدز ۱۰۰ مقایسه شده است (نمودار ۳):

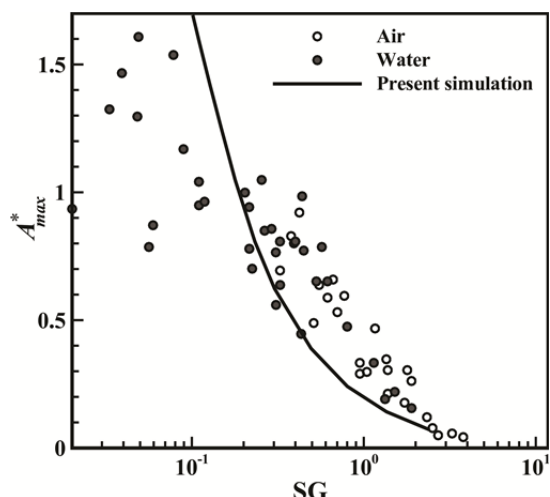
با توجه به نمودار ۳ مشاهده می‌شود نتایج با داده‌های تجربی تطابق خوبی دارد همچنین با کاهش عدد اسکاپ-گرفتن مشاهده می‌شود دامنه ارتعاش از مقدار واقعی منحرف شده و به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، بنابراین در این پژوهش مجاز به استفاده از اعداد اسکاپ-گرفتن کمتر از ۰/۲ در شبیه‌سازی ارتعاشی نخواهیم بود.



نمودار ۱) تغییرات ضرایب برا و پسا بر حسب زمان برای سیلندر دایروی در عدد رینولدز ۲۰۰

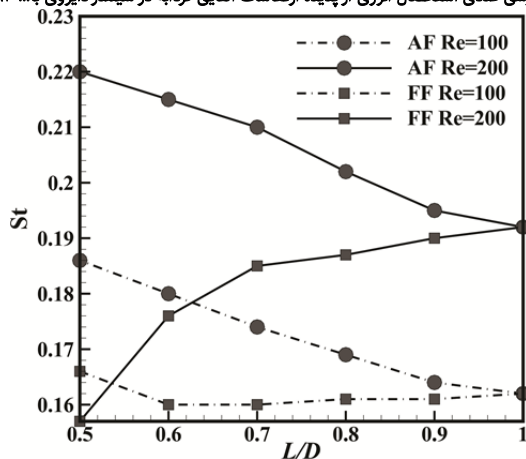


نمودار ۲) تغییرات ضرایب نیرو بر حسب زمان برای سیلندر نیم‌دایروی در عدد رینولدز ۱۰۰

نمودار ۳) مقایسه بیشینه دامنه ارتعاشات در رینولدز ۱۰۰ و در اسکاپ-گرفتن‌های مختلف با داده‌های تجربی ویلیامسون و همکاران^[14]

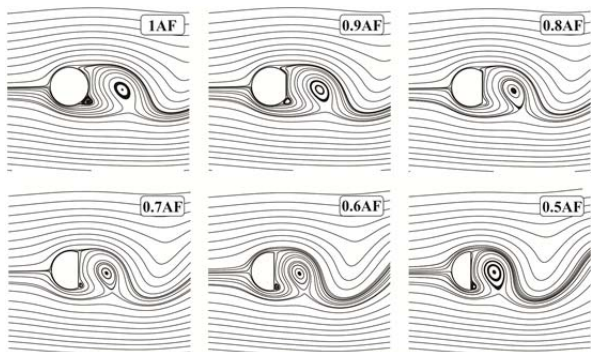
۵- نتایج و بحث

در این قسمت هدف محاسبه مقدار توان بالقوه قابل استحصال از

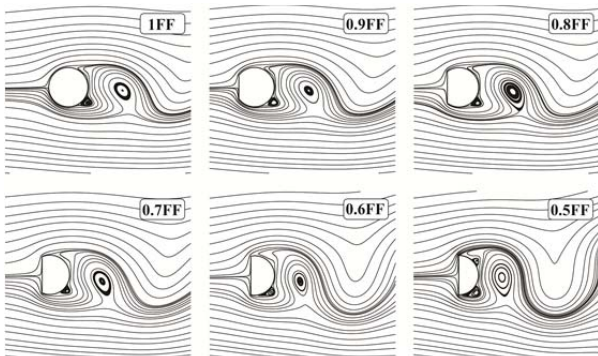


نمودار ۵) تغییرات عدد استروهاال بر حسب مقدار L/D برای جهت قرارگیری AF و FF در عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰

دلیل افزایش عدد استروهاال در سیلندرهاى AF نسبت به سیلندرهاى FF با کاهش مقدار L/D را می‌توان به علت کاهش سطح سیلندر در ناحیه ویک دانست. به عبارت دیگر در سیلندرهاى AF چسبندگی گردابه‌ها به پشت سیلندر مقدار کمتری نسبت به حالت FF در هر قطاع دارد، که این مساله سبب تسریع در جدا شدن گردابه‌ها شده و در نتیجه با افزایش فرکانس ریزش گردابه عدد استروهاال را افزایش می‌دهد. همچنین این عامل یکی از علل کاهش مقدار ضریب برا در حالت AF نسبت به حالت FF در هر مقطع ثابت است. در واقع با افزایش فرکانس ریزش گردابه زمان کمتری برای شکل‌گیری گردابه در پشت سیلندر اختصاص می‌یابد که در نتیجه باعث کاهش مقدار ضریب برا می‌شود. در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب خطوط جریان حول سیلندر با قطاع‌های مختلف در جهت AF و FF در عدد رینولدز ۲۰۰ نمایش داده شده است.



شکل ۶) خطوط جریان حول سیلندر با قطاع‌های مختلف در جهت AF و در عدد رینولدز ۲۰۰



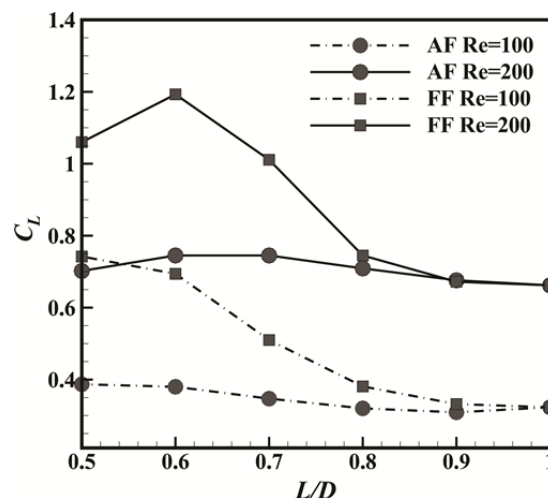
شکل ۷) خطوط جریان حول سیلندر با قطاع‌های مختلف در جهت FF و در عدد رینولدز ۲۰۰

سیال در رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ برای سیلندر دایروی و شش سیلندر دایروی قطاع‌خورده در دو جهت قرارگیری AF و FF و مقایسه آن با سیلندر مینا (سیلندر دایروی) است. بدین‌منظور ابتدا نیروی برا وارده بر سیلندر از طرف سیال و سپس فرکانس رهایی گردابه توسط دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه شده است. سپس در قسمت ارتعاشی با استفاده از داده‌های سیالاتی جابه‌جایی سیلندر در جهت عمود بر جریان سیال توسط کد نوشته‌شده در نرم‌افزار میپل محاسبه می‌شود. در انتها با در نظر گرفتن این واقعیت که دامنه بیشینه در ناحیه قفل‌شدگی اتفاق می‌افتد توان قابل استحصال از سیال محاسبه می‌شود.

۵-۱- شبیه‌سازی سیالاتی

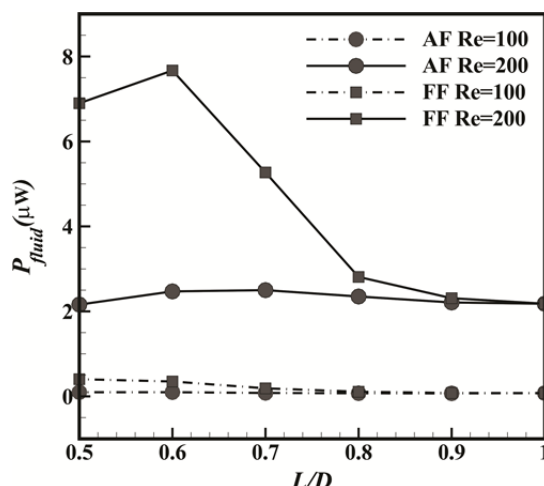
مقادیر ضریب برا و عدد استروهاال برای شش هندسه سیلندر در دو جهت قرارگیری AF و FF و در رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب در نمودارهای ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نمودار ۴ قابل مشاهده است روند تغییرات ضریب برا نسبت به تغییر قطاع در سیلندرها با جهت قرارگیری یکسان در هر دو عدد رینولدز مشابه یکدیگر است و در هر دو جهت قرارگیری AF و FF با کاهش مقدار L/D (تمایل هندسه مقطع سیلندر به سمت نیم‌دایره) مقدار ضریب برا افزایش می‌یابد. همچنین در یک رینولدز ثابت سیلندر با جهت قرارگیری FF نسبت به سیلندر با جهت قرارگیری AF در تمام قطاع‌ها مقدار ضریب برا بیشتری تولید می‌کند. با افزایش عدد رینولدز در یک قطاع ثابت مقدار ضریب برا افزایش می‌یابد و این افزایش با کاهش مقدار L/D به طرز محسوسی افزایش می‌یابد. افزایش ضریب برا در سیلندرهاى قطاع‌دار نسبت به سیلندر دایروی را می‌توان به دلیل کاهش زاویه جدایش و در نتیجه تسریع در رهایی گردابه دانست. در نتیجه باعث ایجاد گردابه‌های بزرگتر می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که در عدد رینولدز ۱۰۰، سیلندر $0.5FF$ و در عدد رینولدز ۲۰۰، سیلندر $0.6FF$ بیشترین مقادیر ضریب برا را دارند (نمودار ۴).

تغییرات عدد استروهاال بر حسب مقدار L/D در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ در نمودار ۵ ذکر شده است. در سیلندرهاى AF کاهش مقدار L/D سبب افزایش عدد استروهاال می‌شود ولی در جهت قرارگیری FF عکس این قضیه اتفاق افتاده و با کاهش مقدار L/D عدد استروهاال کاهش یافته است (به جز در سیلندر $0.5FF$ در رینولدز ۱۰۰؛ نمودار ۵).



نمودار ۴) تغییرات ضریب برا بر حسب مقدار L/D برای جهت قرارگیری AF و FF در عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰

پیدا کرده و در نتیجه توان قابل استحصال کاهش یافته است.



نمودار ۷) تغییرات توان بیشینه قابل استحصال از سیال برای سیلندر با قطع‌های متفاوت در عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به مطالعه عددی استحصال انرژی از پدیده ارتعاشات القایی ناشی از ریزش گردابه‌ای پشت اجسام بلافاصله پرداخت. چنانچه جسم بلافاصله حرکت داشته باشد ریزش گردابه سبب ایجاد ارتعاش در جسم خواهد شد و می‌توان با نصب استحصالگر مناسب انرژی جنبشی ناشی از ارتعاش را به انرژی مطلوب مورد نیاز تبدیل نمود.

در پژوهش حاضر اثر قطع‌دارکردن سیلندر دایروی با هدف افزایش توان قابل استحصال از پدیده ارتعاشات القایی گردابه در سیلندر دایروی مورد بررسی قرار گرفت. ایجاد قطع در سیلندر در راستای عمود بر جریان و با شش اندازه مختلف (از دایره کامل به سمت نیم‌دایره‌شدن سیلندر) و در دو جهت رو به جریان و پشت به جریان صورت گرفته است.

برای این منظور از شش سیلندر دایروی با مقدار نسبت قطع (L/D) برابر ۱، ۰/۹، ۰/۸، ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ در دو جهت قرارگیری AF (قطع پشت به جریان) و FF (قطع رو به جریان) استفاده شده است. در این راستا ابتدا ضریب برا و فرکانس ریزش گردابه توسط دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه شد، سپس با در نظر گرفتن این که دامنه بیشینه سیلندر در حالت قفل‌شدگی رخ می‌دهد مشخصات ارتعاشی سیلندر مشخص شده است و سپس دامنه ارتعاشات بیشینه توسط کد نوشته‌شده محاسبه و در انتها توان بالقوه قابل استحصال از سیال محاسبه شد.

نتایج این پژوهش به‌طور خلاصه بیان می‌دارد:

۱) در یک رینولدز ثابت با کاهش مقدار L/D (تمایل هندسه به نیم‌دایروی شدن) ضریب برا افزایش یافته تا به نقطه بیشینه خود برسد، این نقطه برای هر دو جهت AF و FF در رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب در قطع‌های ۰/۵ و ۰/۶ رخ می‌دهد.

۲) در یک L/D ثابت مقدار ضریب برا در سیلندره‌های FF همواره بیشتر از سیلندره‌های AF است.

۳) مقدار ضریب برا بیشینه در اعداد رینولدزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب در سیلندر ۰/۵FF و ۰/۶FF رخ می‌دهد.

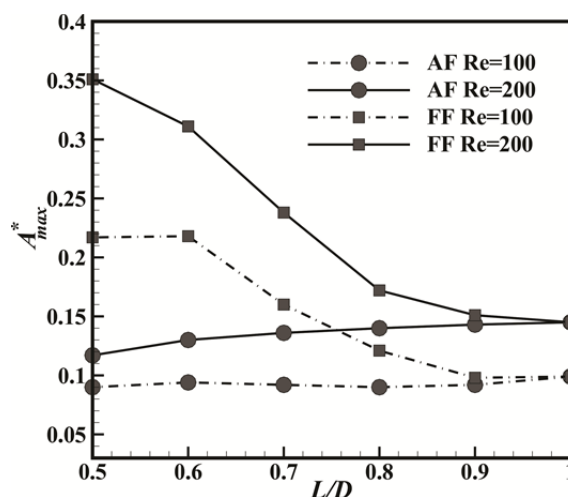
۴) فرکانس ریزش گردابه در سیلندره‌های AF همواره صعودی و در سیلندره‌های FF روندی نزولی را طی می‌کند و مقدار فرکانس ریزش

مشاهده می‌شود ریزش گردابه‌ها به‌صورت متناوب صورت می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود در یک قطاع ثابت در حالت FF نسبت به حالت AF گردابه‌ها بزرگتر است. علت این امر کاهش زاویه جدایش جریان و کاهش فرکانس ریزش گردابه در حالت FF است که در نتیجه باعث ایجاد گردابه‌هایی قوی‌تر و وسیع‌تر می‌شود.

۲-۵- شبیه‌سازی ارتعاشی

در این بخش با استفاده از ضریب برا و فرکانس ریزش گردابه محاسبه شده در بخش قبل و با فرض مقدار $m^*\xi = 1$ مشخصات ارتعاشی سیستم شامل سختی فنر و میرایی سیستم در فرکانس قفل‌شدگی محاسبه می‌شود و سپس عدد اسکاپ-گرفتن در هر رینولدز محاسبه شده و با استفاده از رابطه ۱۳ دامنه بیشینه بی‌بعد محاسبه می‌شود. نمودار ۶ مقدار تغییرات دامنه بیشینه نوسانات برای سیلندر با قطع‌های مختلف در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ نشان داده شده است.

مطابق نمودار ۶ مشاهده می‌شود در سیلندرها با جهت AF با کاهش L/D مقادیر دامنه نوسانات کاهش اندکی می‌یابد و در سیلندرها با جهت FF با کاهش L/D مقدار دامنه نوسان افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود بیشترین مقدار دامنه بی‌بعد در رینولدز ۱۰۰ در سیلندر ۰/۶FF و در رینولدز ۲۰۰ در سیلندر ۰/۵FF اتفاق می‌افتد.



نمودار ۸) تغییرات دامنه نوسان بیشینه برای سیلندر با قطع‌های متفاوت در عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ و $m^*\xi = 1$

۳-۵- توان قابل استحصال از سیال

با محاسبه دامنه جابه‌جایی سیلندر و محاسبه فرکانس نوسان آن در ناحیه قفل‌شدگی با استفاده از رابطه ۱۸ توان بالقوه قابل استحصال از سیال محاسبه شده و در نمودار ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بیشینه توان قابل استحصال در رینولدز ۱۰۰ در سیلندر ۰/۵FF و در رینولدز ۲۰۰ در سیلندر ۰/۶FF اتفاق می‌افتد.

همان‌طور که در نمودار ۶ مشاهده می‌شود در عدد رینولدز ۲۰۰ و جهت ۰/۵FF انتظار می‌رفت با توجه به اینکه دامنه نوسان سیلندر نسبت به ۰/۶FF بیشتر است، توان قابل استحصال از سیلندر بیشتر باشد اما همان‌طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود آن طور نیست. دلیل این امر را می‌توان تاثیر مقدار فرکانس نوسانات سیلندر دانست. در واقع با توجه به نمودار ۵ در سیلندر ۰/۵FF مقدار فرکانس ریزش گردابه به مقدار قابل توجهی از سیلندر ۰/۶FF کمتر است و مقدار این کاهش به افزایش دامنه نوسان سیلندر برتری

بالانویس‌ها

*	بی‌بعد
act	واقعی
fluid	سیال
max	مقدار پیشینه
∞	جریان آزاد

منابع

- 1- Zhao M, Cheng L, Zhou T. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a square cylinder at a low Reynolds number. *Physics of Fluids*. 2013;25(2):023603.
- 2- Ding L, Zhang L, Wu C, Mao X, Jiang D. Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections. *Energy Conversion and Management*. 2015;91:416-426.
- 3- Zhu H, Gao Y. Vortex induced vibration response and energy harvesting of a marine riser attached by a free-to-rotate impeller. *Energy*. 2017;134:532-544.
- 4- Zhang B, Song B, Mao Z, Tian W, Li B. Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement. *Energy*. 2017;133:723-736.
- 5- Tam Nguyen HD, Pham HT, Wang DA. A miniature pneumatic energy generator using Kármán vortex street. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013;116:40-48.
- 6- Sobhanirad S, Afsharfard A. Experimental study of galloping-based energy harvesting system using piezoelectric materials. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(10):233-241. [Persian]
- 7- Zhu H, Zhao Y, Zhou T. CFD analysis of energy harvesting from flow induced vibration of a circular cylinder with an attached free-to-rotate pentagram impeller. *Applied Energy*. 2018;212:304-321.
- 8- Païdoussis MP, Price SJ, de Langre E. Fluid-structure interactions: Cross-flow-induced instabilities. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
- 9- Eckelmann H, Graham JM, Huerre P, Monkewitz PA, editors. Bluff-Body Wakes, Dynamics and Instabilities: IUTAM Symposium, Göttingen, Germany September 7–11, 1992. Heidelberg: Springer-Verlag; 1993.
- 10- Belov A, Martinelli L, Jameson A. A new implicit algorithm with multigrid for unsteady incompressible flow calculations. 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit January 9-12, 1995 / Reno, NV. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1995.
- 11- Lu L, Qin JM, Teng B, Li YC. Numerical investigations of lift suppression by feedback rotary oscillation of circular cylinder at low Reynolds number. *Physics of Fluids*. 2011;23(3):033601.
- 12- Mimeau C, Gallizio F, Cottet GH, Mortazavi I. Vortex penalization method for bluff body flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2015;79(2):55-83.
- 13- Chatterjee D, Mondal B, Halder P. Unsteady forced convection heat transfer over a semicircular cylinder at low Reynolds numbers. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2013;63(6):411-429.
- 14- Williamson CHK, Govardhan R. Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2004;36:413-455.

گردابه در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ برای سیلندر ۰/۵AF بیشترین مقدار را دارد.

(۵) دامنه نوسان در سیلندره‌های AF با کاهش L/D کاهش یافته و در سیلندره‌های FF افزایش می‌یابد.

(۶) در یک جهت قرارگیری ثابت با افزایش رینولدز دامنه نوسان افزایش می‌یابد و مقدار پیشینه این مقدار برای اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب در سیلندره‌های ۰/۶FF و ۰/۵FF رخ می‌دهد.

(۷) توان قابل استحصال از سیال برای اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب در سیلندره‌های ۰/۵FF و ۰/۶FF به بیشترین مقدار خود رسیده و این مقدار نسبت به سیلندر مبنا (سیلندر دایروی) به ترتیب ۳/۵ و ۵/۳ برابر افزایش یافته است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مهدی رفعتی زرک (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ ابراهیم براتی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)؛ جواد ابوالفضلی اصفهانی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

۷- پی‌نوشت

A	دامنه (متر)
C_D	ضریب پسا
C_L	ضریب برا
C_V	ضریب میرایی (kg s^{-1})
D	قطر (متر)
F	نیروی وارده به سیلندر (نیوتن)
FC	ضریب نیرو
f_{fluid}	فرکانس ریزش گردابه (هرتز)
f_n	فرکانس طبیعی سیلندر (هرتز)
k	سختی فنر (نیوتن بر متر)
m^*	نسبت جرمی
m^A	جرم سیال جابه‌جاشده (کیلوگرم بر متر)
m_s	جرم سیلندر (کیلوگرم بر متر)
P	توان قابل استحصال از سیال (وات)
Re	عدد رینولدز
SG	عدد اسکاپ-گریفن
St	عدد استروها
U	سرعت سیال (متر بر ثانیه)
U_r	سرعت کاهیده
u	سرعت در جهت x (متر بر ثانیه)
v	سرعت در جهت y (متر بر ثانیه)
x	مولفه مکان در جهت افقی
y	مولفه مکان در جهت عمودی
علایم یونانی	
μ	لزجت دینامیکی (کیلوگرم بر متر بر ثانیه)
ξ	میرایی
ρ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)