



Gonbad Kavous University  
Journal of New Approaches in  
Water Engineering and Environment  
Volume 2, Issue 1

## **Numerical Study on Vortices in Collision of Flow with Circular, Square, Triangular, and Pentagonal Barriers of Different Diameters**

**Saja Kanan<sup>1</sup>, Mohammad Heidarnejad<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Former M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. E-mail: kanansaja@gmail.com

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.  
Received:20.02.2023 ; Accepted:26.05.2023

### **Abstract**

Structures constructed on rivers induce downstream oscillating vortices. These vortices apply oscillating loads on the structure and harm its stability. This paper carried out numerical simulations in SOLIDWORKS to explore the effects of the barrier shape and size on the load applied by the vortex on structures constructed in water streams. It was found that a reduction in the barrier size diminished the vortices. The highest Strouhal number was calculated to be 5.2 at a Reynolds number of 5000 and a barrier diameter of 0.09. The maximum downstream vortices were induced by the triangular barrier, and the maximum Strouhal number occurred to be 7.8 at a velocity of 0.4 and a barrier diameter of 0.05. The maximum vortices induced by the square barrier occurred at a barrier diameter of 0.05 .

**Keywords:** Strouhal number, Reynolds number, Barrier, Physical model, Oscillation

---

\* Corresponding author, E-mail: mo\_he3197@yahoo.com



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست"

دوره دوم، شماره اول

<http://Nawee.gonbad.ac.ir>

## بررسی عددی پدیده ورتکس در برخورد جریان با موانع دایره، مربع، مثلث و پنج‌ظلعی با قطرهای مختلف

سجی کنعان<sup>۱</sup>، محمد حیدر نژاد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،

<sup>۲</sup>دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵

### چکیده:

در برخی رودخانه‌ها سازه‌هایی در مسیر حرکت آب ساخته می‌شوند که باعث ایجاد گردابه‌های نوسانی در پایین‌دست این سازه‌ها می‌گردند. گردابه‌های ایجاد شده نیروهای نوسانی به این سازه‌ها وارد کرده و پایداری آنها را دچار مشکل می‌نمایند. در همین راستا در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی با نرم افزار SolidWorks به بررسی شکل و ابعاد موانع بر میزان نیروی وارده از طرف گردابه بر سازه‌های آبی پرداخته شد. نتایج نشان داد که هر چه ابعاد مانع کوچک‌تر می‌شود مقدار گردابه ایجاد شده کمتر می‌گردد، بیشترین میزان  $St = 5/2$  در  $Re = 50000$  و برای مانع با قطر  $0/09$  صورت می‌گیرد. همچنین مانع مثلثی باعث ایجاد بیشترین گردابه در پایین دست خود شد و بیشترین مقدار عدد استروهمال  $St = 7/8$  در  $V = 0/4$  در مانعی با قطر  $D = 0/05$  رخ داد. همچنین در مانع مربعی بیشترین مقدار گردابه در  $D = 0/05$  به وقوع پیوست.

واژه‌های کلیدی: عدد استروهمال، عدد رینولدز، مانع، مدل فیزیکی، نوسان

\* نویسنده مسئول، [mo\\_he3197@yahoo.com](mailto:mo_he3197@yahoo.com)

### ۱. مقدمه

جهت انتقال آب برای مصارف شرب، کشاورزی، صنعت و غیره، نیاز به احداث سازه‌های آبی می‌باشد. برخی از این سازه‌ها خود مانعی در برابر جریان می‌شوند که با عبور جریان یکنواخت سیال از مجاورت این سازه‌ها، دیگر یک جریان یکنواخت و منظم نخواهد بود، بلکه شروع به تلاطم کرده و گردابه‌هایی با آرایش منظم در دو سوی سازه ایجاد می‌کند، این گردابه‌ها با آهنگی نوسانی در دو سوی سازه تولید می‌شوند، که نیروی برآ (لیفت) نوسانی بر سازه اعمال می‌کنند که باعث ناپایداری این سازه‌ها می‌شود (شکل ۱) (Chang et al., 2011).

اما در سال‌های اخیر از این نیروها جهت تولید انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این روش‌های دستگاه مبدل گردابه یا ویواک (VIVACE) می‌باشد (Vasel-Be- Hagh et al., 2015). مبدل گردابه با استفاده از ارتعاشات ناشی از گردابه بر اثر برخورد بین جریان سیال به سازه در پشت جسم جامد به وجود می‌آید (Bernitsas et al., 2008). زمانی که گردابه بطور متناوب در دو سمت مانع ایجاد می‌شود، نیروهای تناوبی روی جسم ایجاد شده، که

این نیروها متقابلاً از مانع به سیال وارد می‌گردد. گردابه‌ها زمانی رخ می‌دهد که عدد رینولدز (رابطه ۱) در دو بازه 40  $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$  قرار گیرد (Lee et al., 2011).

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

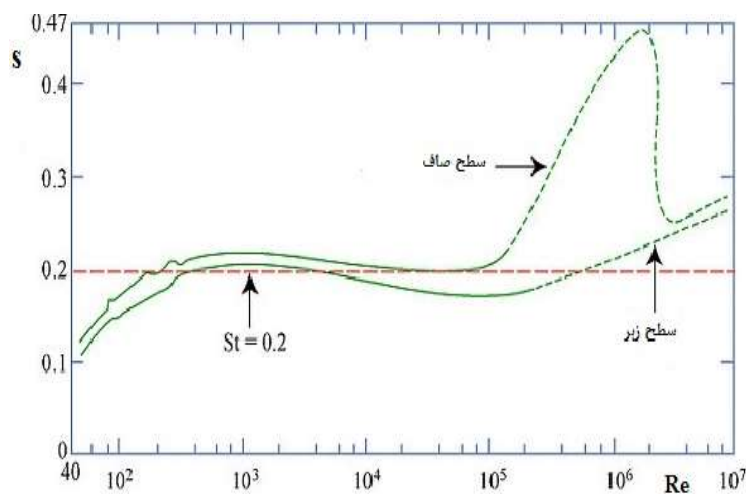
در رابطه (۱)، U سرعت جریان، D قطر موانع و  $\nu$  لزجت سینماتیک سیال می‌باشد (Lee et al., 2011). جهت محاسبه فرکانس گردابه‌ها در پایین دست استوانه از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Bovand et al., 2016).

$$f_s = \frac{StU}{D} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $f_s$  فرکانس گردابه، U سرعت جریان و St عدد استروهمال بوده که تابعی از عدد رینولدز می‌باشد (Bovand et al., 2016). جهت محاسبه عدد استروهمال لینهارد در سال ۱۹۶۶ نموداری با استفاده از عدد رینولدز برای گازها در جریان‌های با عدد ماخ کوچک ارائه کرده است (شکل ۲) که با استفاده از آن، برای محدوده بزرگی از اعداد رینولدز مقدار عدد استروهمال تقریباً ۰/۲ خواهد بود (Jafari et al., 2010).



شکل ۱ - پدیده تشکیل گردابه



شکل ۲- رابطه بین عدد استروهمال (S) و عدد رینولدز (Re)

عددی پدیده گردابه‌ها و بررسی تاثیر سرعت، شکل و ابعاد مانع میزان تولید گردابه‌ها پرداخته شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

به علت عدم شناخت کامل نیروهای گردابه، هدف این پژوهش آشکار سازی این پدیده برای مشخص نمودن جنبه‌های مجهول کار و بررسی روابط ریاضی حاکم بر آن است که از نتایج بدست می‌آیند. در این راستا با استفاده از نرم افزار Solid Work تاثیر پارامترهای سرعت جریان، شکل و ابعاد پایه‌های پل بر میزان نوسانات مانع متحرک نیاز بر میزان تولید گردابه شناخته خواهد شد، برای دست‌یابی به این هدف نیاز به طی مراحل زیر می‌باشد:

- ✓ طراحی مدل‌ها در نرم‌افزار Solid Work
- ✓ مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Solid Work
- ✓ تحلیل نتایج بدست آمده

### ۲-۱. تحلیل ابعادی

در انجام مدل سازی برای پدیده‌های فیزیکی ابتدا باید روابط حاکم بر پدیده مورد مطالعه و شناخت قرارگیرد، سپس با استفاده از تکنیک‌های تحلیل ابعادی بشکل مناسبی پارامترهای بدون بعد استخراج شوند. عمل شناسایی پارامترهای مهم در یک پدیده صرفاً بر مبنای اطلاعات، تجربه و تسلط محقق می‌باشد. به همین منظور در ادامه پس از معرفی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر گردابه‌های جریان، با استفاده از تئوری  $\Pi$  باکینگهام پارامترهای بدون بعد مؤثر استخراج خواهند شد. متغیرهای مؤثر هندسی، سینماتیکی و دینامیکی تاثیرگذار در جدول ۱ نشان داده شده است.

در رابطه ۷ پارامترهای مهم که بر روی گردابه تاثیر گذارند مشخص شده است.

$$F(U, D, f, v, \rho, Q, g, F) = 0 \quad (7)$$

با آنالیز ابعادی که صورت گرفت اعداد بدون بعد که در رابطه ۸ و ۹ نشان داده شده است بدست آمد:

$$\pi = \rho^a \cdot U^b \cdot D^c \quad (8)$$

$$F = \left( \frac{Q}{U \cdot D^2}, \frac{v}{UD}, \frac{fD}{U}, \frac{Dg}{U^2}, \frac{F}{\rho \cdot U^2 \cdot D^2} \right) \quad (9)$$

اما Fitz در سال ۱۹۷۳ ادعا کرد که در جریان گاز، برای اعداد رینولدز بین ۳۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰، در حالتی که یک استوانه وجود داشته باشد عدد استروهل برابر ۰/۲ و برای یک گروه از استوانه‌ها مقدار عدد استروهل به آرایش، قطر و فاصله قرارگیری استوانه‌ها از یکدیگر بستگی دارد (Fitz, 1973). این سازه‌ها به علت نیروهای وارده که شامل اثر گردابه و اثر سیال می‌باشد، دارای فرکانسی خواهند بود، که به فرکانس طبیعی سازه معروف است، هر چه فرکانس سازه به فرکانس ایجاد شده توسط سازه نزدیک‌تر شود نوسانات افزایش می‌یابد، تا زمانی که این دو فرکانس یکی شده که اصطلاحاً به آن قفل شدگی (Lock in) فرکانس می‌گویند، که این پدیده باعث تخریب و صدمه زدن به سازه‌ها می‌شود (Kang et al., 2013). در همین راستا تحقیقات فراوانی جهت محاسبه عدد استروهل صورت گرفته، از آن جمله می‌توان رابطه عزیزی و قمشی که آزمایشاتی جهت محاسبه عدد استروهل در جریان آب با مجموعه مانع استوانه ای ثابت انجام دادند. آنها روابط ۳ و ۴ را برای محاسبه عدد استروهل ارائه نمودند.

$$St = \frac{K}{\ln\left(\frac{T}{D}\right) \cdot \left(\frac{P}{D} \cdot N\right)^{1/2}}, \frac{P}{D} < 5 \quad (3)$$

$$St = C^3 \sqrt{\frac{P/D}{(T/D)^2 \cdot N}}, \frac{P}{D} > 5 \quad (4)$$

در این روابط K و C ضریب ثابت هستند، K برای آرایش زیگزاگی موانع برابر ۱/۴۸ و برای آرایش موازی موانع ۱/۲۱، C برای آرایش زیگزاگی موانع برابر ۰/۵۲ و برای آرایش ردیفی ۰/۴۳ می‌باشد. N تعداد استوانه‌ها در یک ردیف است (Azizi and Ghomeshi, 2010). همچنین

جعفری و همکاران روابط ۵ و ۶ را ارائه نمودند:

$$St = \frac{7.520(D/T)^{0.485}(D/P)^{0.177}}{Re^{0.151}N^{0.590}} \quad (5)$$

$$St = \frac{7.213(D/T)^{0.681}(D/P)^{0.328}}{Re^{0.161}N^{0.404}} \quad (6)$$

روابط ۵ و ۶ به ترتیب مربوط به آرایش‌های موازی و زیگزاگی موانع می‌باشد، در آزمایشاتی که آنها انجام دادند توانستند ده موج عرضی را مشاهده نمایند (Jafari et al., 2010). در تحقیقات این پژوهشگران، موانع به صورت ثابت بوده و موانع استوانه‌ای می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks اقدام به شبیه سازی

جدول ۱- پارامترهای تاثیرگذار

ردیف	علامت پارامتر	نام پارامتر
۱	U	سرعت جریان
۲	D	قطر موانع
۳	$\sigma$	کشش سطحی
۴	$\rho$	جرم واحد حجم آب
۵	$\mu$	لزجت دینامیکی
۶	g	شتاب ثقل
۷	f	فرکانس گردابه
۸	$\nu$	لزجت سینماتیک
۹	Q	دبی جریان
۱۰	F	نیروی وارده

توان بدون درگیری با محاسبات مورد نیاز نقشه‌کشی صنعتی، شکل خود را ساخت و با استفاده از محیط طراحی نما و نقشه، سه جهت شکل خود را استخراج کرد. نرم‌افزار SolidWorks امکانات و ابزارهای زیادی برای مدل‌سازی و عملیات ورقکاری، جوشکاری، ریخته‌گری، قالب‌سازی، تزریق پلاستیک، جوش دادن قطعات و همچنین تحلیل تنش و مدل‌سازی رفتار و مقاومت قطعه تحت بارگذاری‌های گوناگون دارا می‌باشد.

#### ویژگی‌های اصلی SolidWorks:

- ✓ امکان معادله‌نویسی بین پارامترها و اندازه‌های مختلف در مدل
- ✓ امکان استفاده از جداول طراحی به منظور برقراری ارتباط بین اندازه‌ها و معادلات در محیط Excel
- ✓ کاربرد آسان در طراحی نقشه و طرح‌های پیچیده.
- ✓ امکان ایجاد نماهای انفجاری و تهیه فیلم و انیمیشن از مدل انفجاری در طی مونتاژ یا دموونتاژ شدن مدل به همین دلیل در این پژوهش از این نرم‌افزار برای بررسی پدیده گردابه مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه نحوه انجام مدل‌سازی را نشان می‌دهیم.

در روابط ۷ الی ۹ پارامترهای بدون بعد معروف عدد رینولدز، عدد فرود و عدد استروهل می‌باشد (رابطه ۱۰).

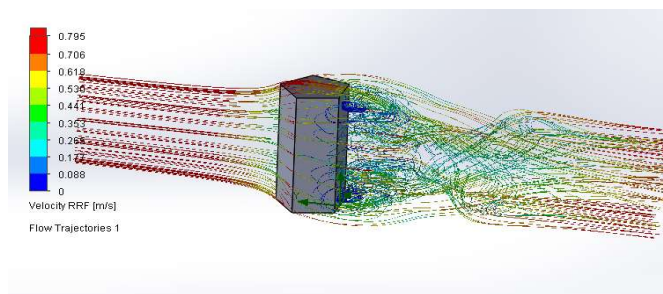
$$Re = \frac{UD}{\nu}, Fr = \frac{U}{(gD)^{1/2}}, St = \frac{fD}{U} \quad (10)$$

از آنجای که عدد استروهل برای بررسی اثر گردابه اهمیت دارد در ادامه به بررسی این عدد می‌پردازیم.

#### ۲-۲. معرفی نرم افزار solid work

سالیید ورک (SolidWorks) یک نرم‌افزار مهندسی طراحی به کمک رایانه است که بر روی ویندوز اجرا می‌شود و توسط شرکت فرانسوی داسو سیستمز ساخته و توسعه داده می‌شود. این نرم‌افزار دارای سه محیط به نام‌های پارت (part)، اسمبل (assembl) و دراوینگ (drawing) می‌باشد. محیط اول برای رسم قطعه، محیط دوم قطعات یک مکانیسم بر روی هم سوار شده و در محیط آخر از آنها نقشه مهندسی (معمولاً برای نسخه چاپی) تهیه می‌شود (شکل ۳).

SolidWorks برنامه‌ی جهت سه‌بعدی کردن قطعات صنعتی و جامدات هست و برای این کار احجام را بصورت پارامتریک یا واحدهای از پیش ساخته کنار هم قرار می‌دهد. به کمک این نرم افزار به راحتی می‌توان نقشه‌های دو بعدی (2D) از اجسام ترسیم و مدل کرد. در واقع می‌-

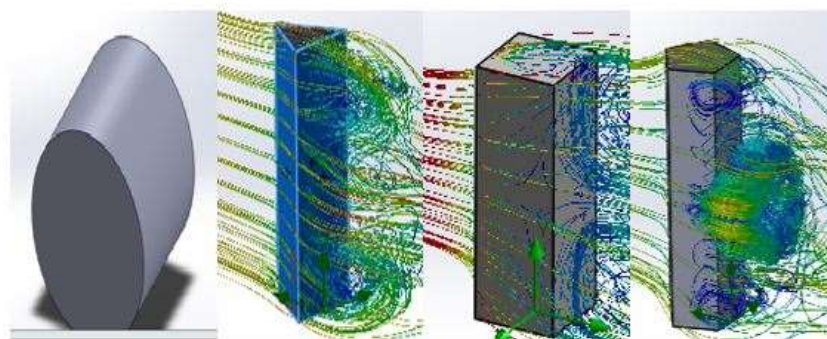


شکل ۳- نمونه ای در نرم افزار Solid Work

۲-۳. مشخصات مدل‌ها و نحوه انجام آزمایشات  
 در این پژوهش به بررسی تاثیر شکل، ابعاد و سرعت جریان بر میزان نوسانات گردابه پرداخته شد، در همین راستا با توجه به پیشینه تحقیق مدل‌های در نظر گرفته شد که در جدول ۲ مشخصات این آزمایشات نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات آزمایشات

شکل مانع	D(m)	U(m/s)	شکل مانع	D(m)	U(m/s)
مربع	۰/۰۵	۰/۴	دایره	۰/۰۵	۰/۴
		۰/۱۶			۰/۱۶
		۰/۱۸			۰/۱۸
		۰/۱۴			۰/۱۴
		۰/۱۶			۰/۱۶
		۰/۱۸			۰/۱۸
	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۶
		۰/۱۶			۰/۱۶
		۰/۱۸			۰/۱۸
		۰/۱۴			۰/۱۴
		۰/۱۶			۰/۱۶
		۰/۱۸			۰/۱۸
۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۶	
	۰/۱۶			۰/۱۶	
	۰/۱۸			۰/۱۸	
	۰/۱۴			۰/۱۴	
	۰/۱۶			۰/۱۶	
	۰/۱۸			۰/۱۸	
پنج ضلعی	۰/۰۵	۰/۴	مربعی	۰/۰۵	۰/۴
		۰/۱۶			۰/۱۶
		۰/۱۸			۰/۱۸
		۰/۱۴			۰/۱۴
		۰/۱۶			۰/۱۶
		۰/۱۸			۰/۱۸
۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۶	
	۰/۱۸			۰/۱۸	
	۰/۱۴			۰/۱۴	
	۰/۱۶			۰/۱۶	
	۰/۱۸			۰/۱۸	
	۰/۱۴			۰/۱۴	
۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۶	
	۰/۱۸			۰/۱۸	
	۰/۱۴			۰/۱۴	
	۰/۱۶			۰/۱۶	
	۰/۱۸			۰/۱۸	
	۰/۱۴			۰/۱۴	



شکل ۴- تصاویر مدل‌های مورد استفاده

در شکل ۴ مدل پایه‌های پل نشان داده شده است.

### ۳. نتایج و بحث

در این پژوهش در مجموع ۶۰ مدل مطالعه شد، که به بررسی تاثیر سرعت، ابعاد و شکل موانع بر میزان فرکانس نوسانات پرداخته شد. در ادامه به بررسی این آزمایشات در سه گروه زیر می‌پردازیم.

(۱) بررسی تاثیر مقدار عدد رینولدز بر عدد استروهل

(۲) بررسی تاثیر مقدار Fr بر عدد استروهل

(۳) بررسی تاثیر مقدار سرعت کاهیده ( $U^*$ ) بر عدد

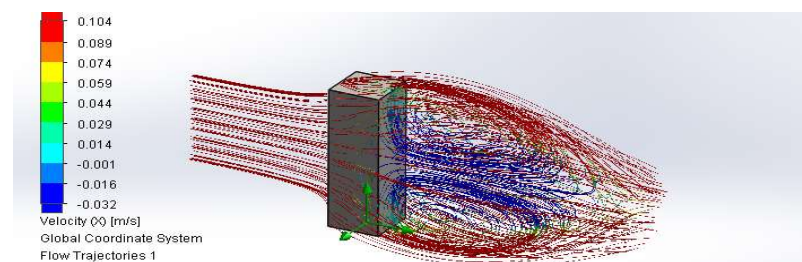
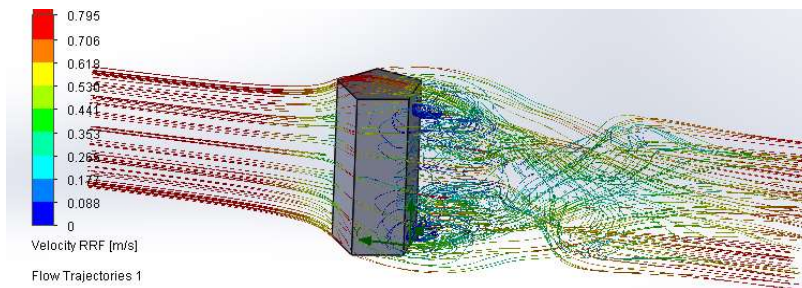
بدون بعد نسبت فرکانس ( $A^*$ )

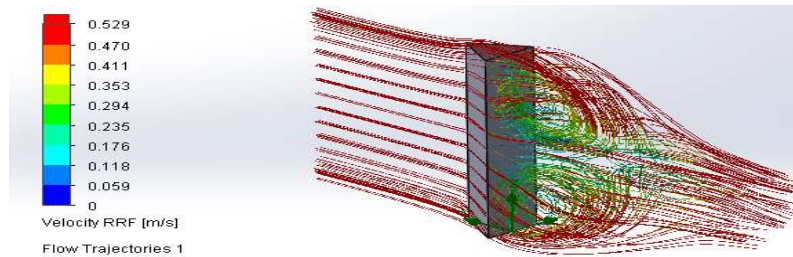
با بررسی بر روی پدیده گردابه و با آنالیز ابعادی صورت گرفته پارامترهای بدست آمده در سه گروه بالا جای گرفت، به همین دلیل به بررسی هر کدام به طور جدا پرداخته شده و با نتایج سایر محققین مقایسه گردید.

#### ۳-۱. تاثیر عدد رینولدز (Re) بر عدد استروهل (St)

زمانی که جریان یکنواخت سیالی از مجاورت یک سازه عبور می‌کند، همانند عبور جریان اطراف پایه‌های یک پل، دیگر یک جریان یکنواخت و منظم نخواهد بود، بلکه شروع به تلاطم کرده و گردابه‌هایی با آرایش منظم در دو سوی

سازه ایجاد می‌کند، این گردابه‌ها با آهنکی نوسانی در دو سوی سازه تولید می‌شوند، که نیروی برای نوسانی بر سازه اعمال می‌کنند. حال این گردابه‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که عدد رینولدز در دو بازه  $3 \times 10^5 < Re < 40$  یا  $3.5 \times 10^6 \leq Re$  قرار می‌گیرد (لی و همکاران، ۲۰۱۱). جهت محاسبه فرکانس گردابه‌ها در پائین دست استوانه از رابطه  $St = f \frac{D}{U}$  استفاده می‌شود که در این رابطه،  $f$  فرکانس گردابه،  $U$  سرعت جریان و  $St$  عدد استروهل بوده که تابعی از عدد رینولدز استوانه‌ها می‌باشد (Bavand et al. 2016). جهت محاسبه عدد استروهل لینهارد در سال ۱۹۶۶ نموداری با استفاده از عدد رینولدز برای گازها در جریان های با عدد ماخ کوچک ارائه کرده است که با استفاده از آن، برای محدوده بزرگی از اعداد رینولدز مقدار عدد استروهل تقریباً  $0.2$  خواهد بود، همچنین فیتزهو در سال ۱۹۷۳ ادعا کرد که در جریان گاز، برای اعداد رینولدز استوانه بین  $300$  تا  $300000$ ، در حالتی که یک استوانه وجود داشته باشد عدد استروهل برابر  $0.2$  می‌باشد در همین راستا در ادامه به بررسی تاثیر عدد رینولدز بر عدد بر عدد استروهل می‌پردازیم (شکل ۵).



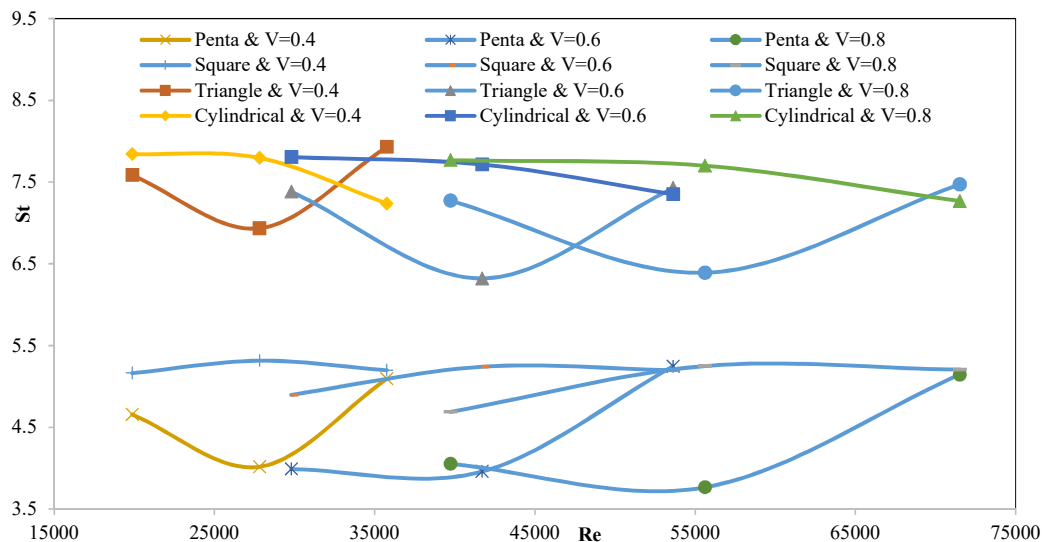


D=0.07 & V=0.8

شکل ۵- تصاویر موانع در نرم افزار Solid work

پخش خطوط جریان به اطراف می شود، در شکل مثلثی و دایره به علت اینکه خطوط جریان به آرامی به اطراف منتقل می شود باعث می شود جریان گردابه ایجاد شده در پایین دست منظم تر و بیشتر ایجاد شود. در شکل ۶ نتایج تاثیر عدد رینولدز (Re) بر عدد استروهال (St) نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۵ مشخص است، هر چه سرعت جریان بیشتر می شود تراکم خطوط در پشت موانع و اختشاش جریان هم افزایش می یابد، اما نحوه تولید گردابه و شکل خطوط در پایین دست موانع در هر شکل متفاوت است به گونه ای که در پنج ضلعی و مربع به علت اینکه یک صفحه در جلوی جریان قرار می گیرد باعث شکست و



شکل ۶- رابطه St با Re در تمام موانع

۲-۳. تغییرات میزان نسبت فرکانس (Frequency)  $A^*$  (ratio): نحوه پاسخ مانع به پدیده قفل شدگی با مفهوم سرعت کاهیده ( $U^*$ ) و نسبت فرکانس ( $A^*$ ) بررسی می شود (Cagney and Balabani, 2016). در این بخش به بررسی تاثیر عدد بی بعد  $U^*$  بر میزان نسبت فرکانس ( $A^*$ ) پرداخته می شود. جهت محاسبه سرعت کاهیده ( $U^*$ ) از رابطه ۱۱ و نسبت فرکانس ( $A^*$ ) از رابطه ۱۴ استفاده می گردد (Govardhan and Williamson, 2000)

همانطور که در شکل ۶ مشخص است بیشترین مقادیر عدد استروهال مربوط به دایره و مثلث و کمترین حالت مربوط به موانع پنج ضلعی و مربعی است، پس می توان گفت زمانی که هدف افزایش گردابه است بهترین موانع دایره و مثلث و کاهش گردابه مربع و پنج ضلعی بهترین شکل موانع هستند. همچنین در سه مانع مثلثی، مربعی و پنج ضلعی با افزایش عدد رینولدز مقدار گردابه افزایش می یابد ولی در مانع مربعی به صورت کاهشی است.



می‌باشد)  $K$  ضریب سختی فنر (که مربوط به میزان افت انرژی در سیستم انتقال می‌باشد که در اینجا ۱ می‌باشد)،  $L$  طول مانع (۰/۳ متر) و  $C_A$  ضریبی است که برابر ۱ فرض می‌شود (Govardhan and Williamson, 2003; 2004). در واقع  $U^*$  نماینگر سرعت و قطر موانع بر فرکانس طبیعی و  $A^*$  نماینگر فرکانس رخ داده با فرکانس پتانسیل است، که در ادامه به بررسی این دو عدد می‌پردازیم (شکل ۷).

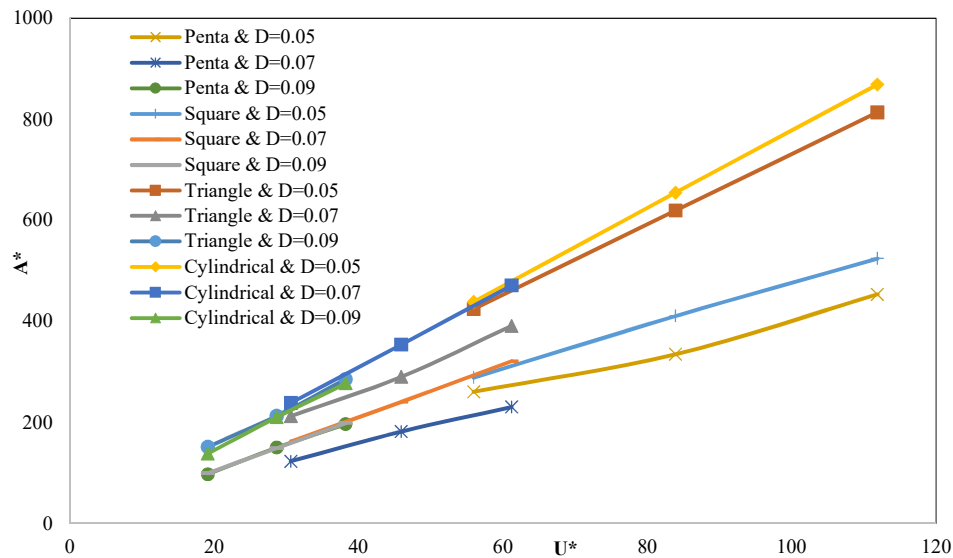
$$U^* = \frac{U}{f_n D} \quad (11)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_a}} \quad (12)$$

$$m_a = C_A \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \frac{L}{4} \quad (13)$$

$$A^* = \frac{f}{f_n} \quad (14)$$

در روابط فوق،  $f$  فرکانس ارتعاشات مانع،  $f_n$  فرکانس طبیعی سازه،  $m$  جرم موانع (وزن همه موانع ۰/۲۱۲ کیلوگرم در نظر گرفته شد)،  $\rho$  چگالی آب (برابر با ۹۹۷/۱

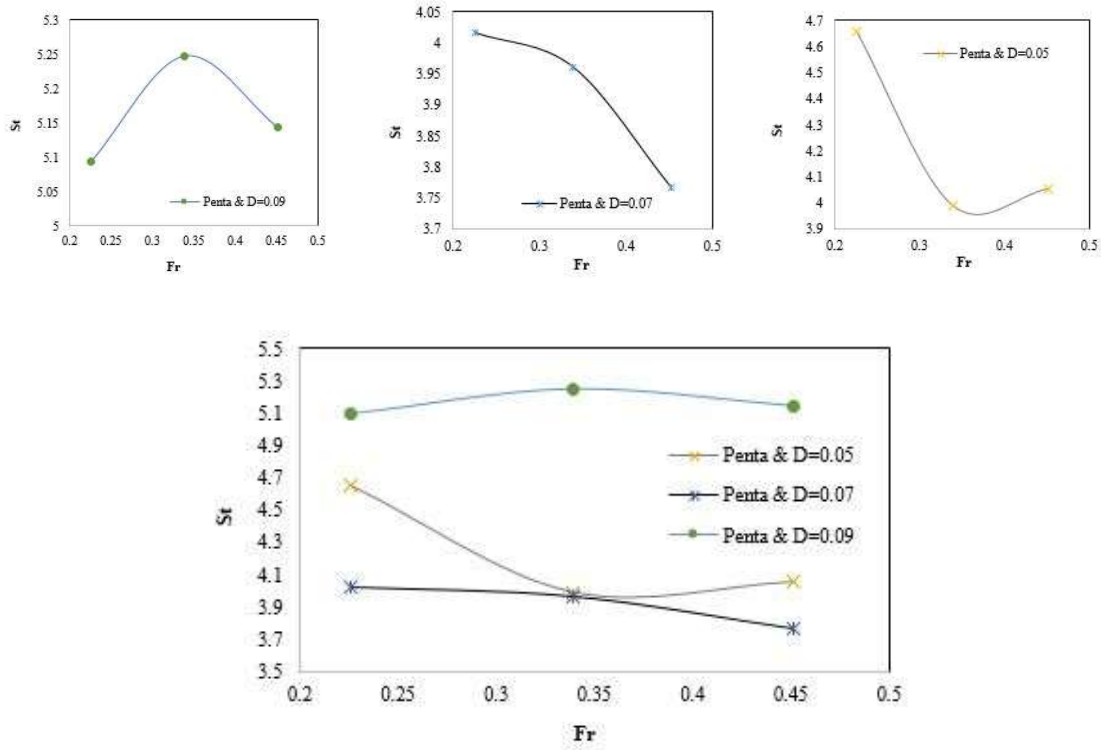


شکل ۷- تاثیر  $U^*$  بر  $A^*$  در تمام موانع

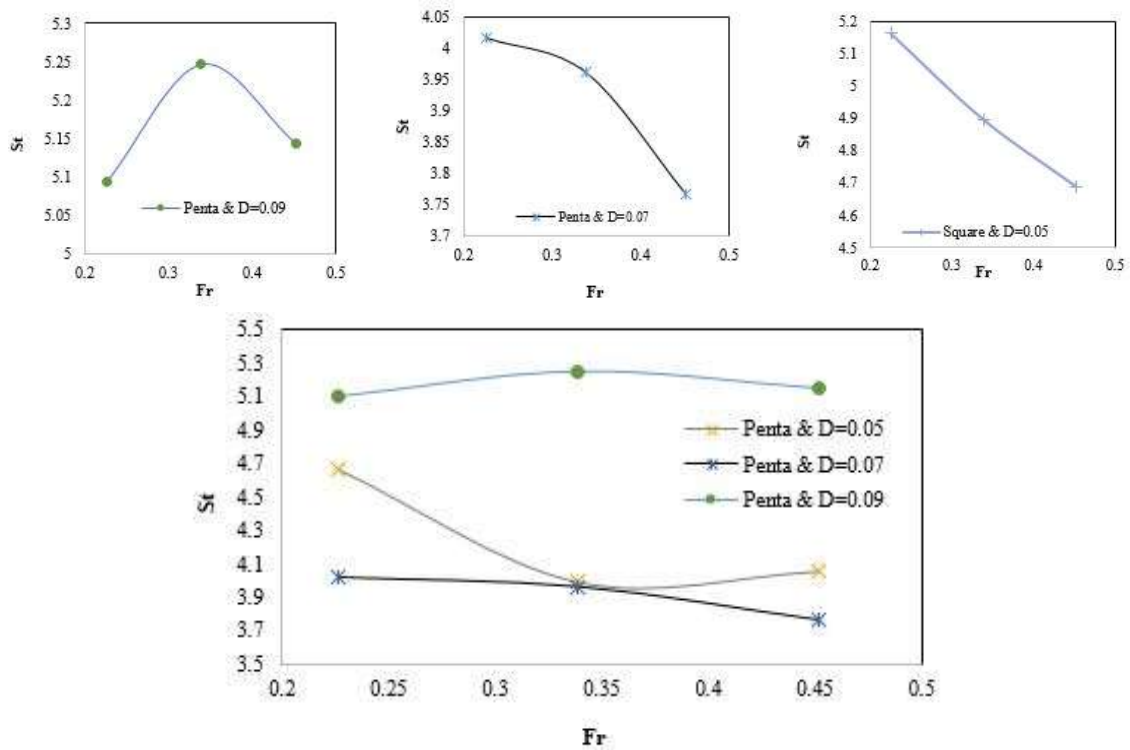
### ۳-۳. بررسی تاثیر عدد Fr بر St

در این بخش تاثیر عدد فرود (سرعت) بر عدد استورهال می‌پردازیم که دریا بیم سرعت جریان بر گردابه ایجاد شده در موانع چه تاثیر می‌گذارد. ابتدا نتایج تصویر تمام آزمایشات نشان داده می‌شود سپس نمودارهای مربوطه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

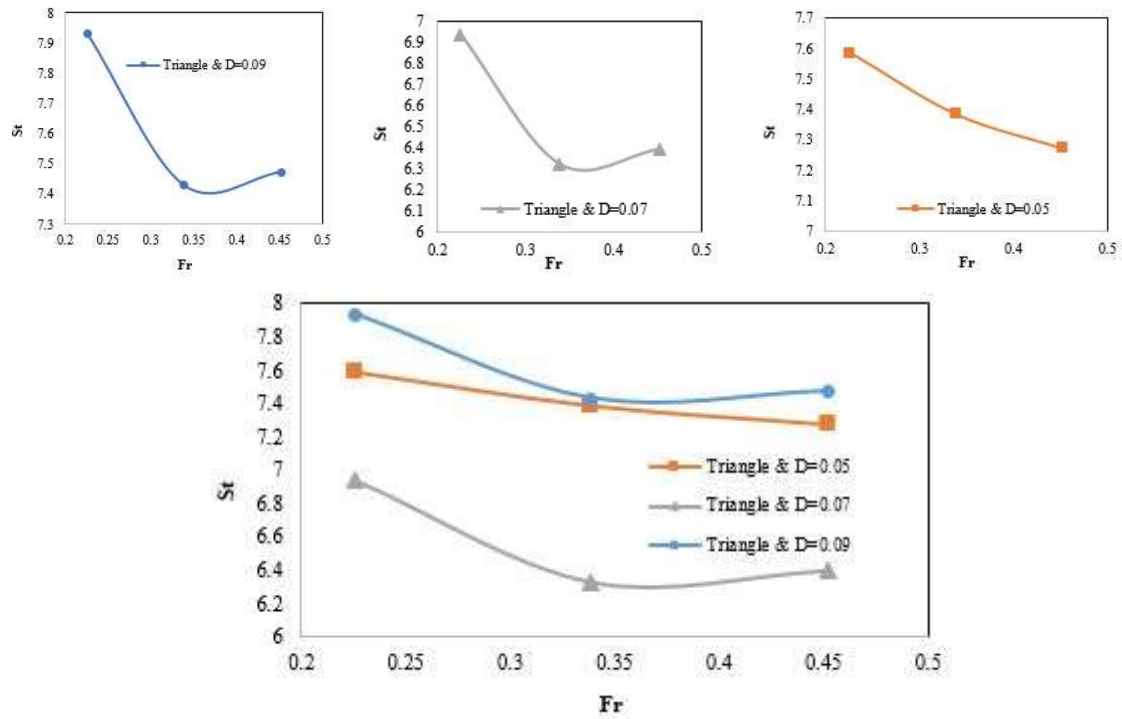
همانطور که در شکل ۷ مشاهده شد با افزایش سرعت کاهیده ( $U^*$ ) میزان نسبت فرکانس ( $A^*$ ) نیز افزایش می‌گردد و مقایسه‌ای که با تحقیقات قبلی مانند لی و برنیتاس در سال ۲۰۱۱ و گوردن و ویلیامسون در سال ۲۰۰۰، ۲۰۰۲، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ صورت گرفت نتایج حاصل تشابه نسبتاً خوبی مشاهده گردید (Lee and Bernitsas, 2011; Govardhan and Williamson, 2000, 2002, 2003, 2006).



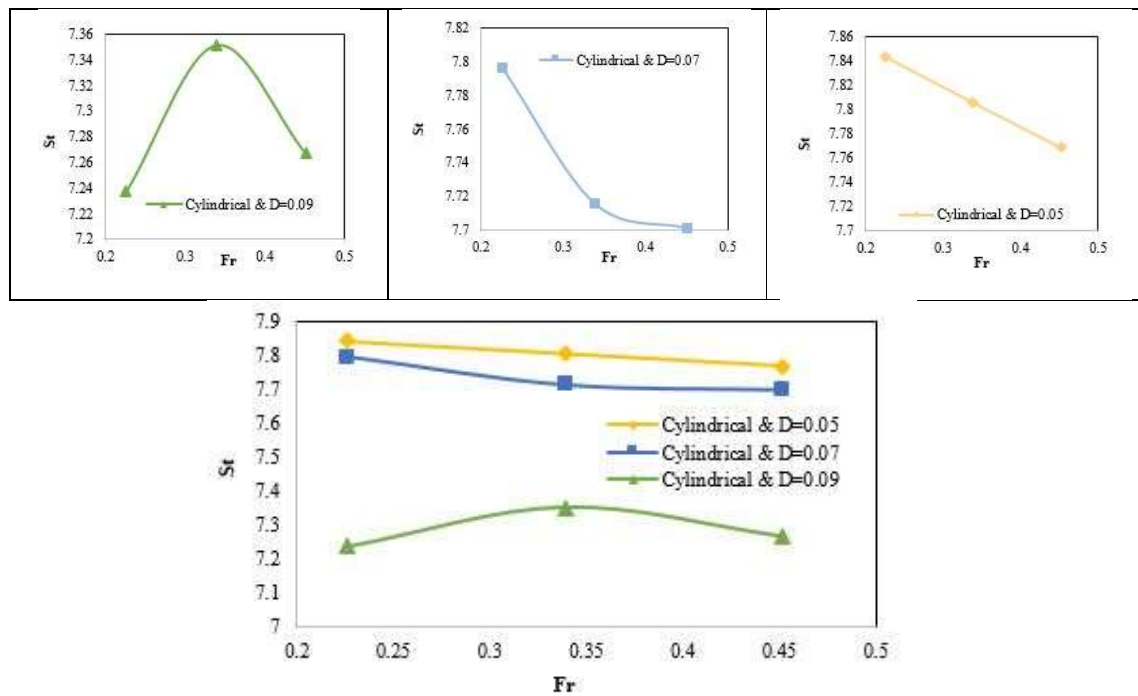
شکل ۸- اثر  $Fr$  بر  $St$  در مانع پنج ضلعی



شکل ۹- اثر  $Fr$  بر  $St$  در مانع مربعی



شکل ۱۰- اثر  $Fr$  بر  $St$  در مانع مثلثی



شکل ۱۱- اثر  $Fr$  بر  $St$  در مانع دایره‌ای

پایه پل که باعث کمترین نیروی وارده به پایه می‌شود شکل‌های مربعی و پنج ضلعی است.

برای یک عدد استروهاال ثابت، هر چه موانع بزرگتر می‌شود به طبع آن عدد رینولدز آن هم بزرگتر می‌شود و جریان به سمت آشفتگی بیشتر میل می‌کند. اما در موانع دایره‌ای با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد استروهاال کاهش می‌یابد.

بیشترین مقدار عدد استروهاال  $St = \gamma/8$  در  $V = 0/4$  در موانع  $D = 0/05$  صورت گرفت. در موانع مربعی بیشترین مقدار گردابه در  $D = 0/05$  صورت می‌گیرد.

بیشترین مقادیر عدد استروهاال مربوط به دایره و مثلث و کمترین حالت مربوط به موانع پنج ضلعی و مربعی است.

در سه مانع مثلثی، مربعی و پنج ضلعی با افزایش عدد رینولدز مقدار گردابه افزایش می‌یابد ولی در موانع مربعی به صورت کاهشی است. با افزایش سرعت کاهیده ( $U^*$ ) میزان نسبت فرکانس ( $A^*$ ) نیز افزایش می‌یابد.

هر چه سرعت جریان بیشتر می‌شود تراکم خطوط در پشت موانع و اختشاش جریان هم افزایش می‌یابد، اما نحوه تولید گردابه و شکل خطوط در پایین دست موانع در هر شکل متفاوت است به گونه‌ای که در پنج ضلعی و مربع به علت اینکه یک صفحه در جلوی جریان قرار می‌گیرد باعث شکست و پخش خطوط جریان به اطراف می‌شود، در شکل مثلث و دایره به علت اینکه خطوط جریان به آرامی به اطراف منتقل می‌گردد باعث می‌شود جریان گردابه ایجاد شده در پایین دست منظم تر و بیشتر ایجاد شود.

همانطور که از شکل‌های ۸ الی ۱۱ مشخص است، در موانع  $0/05$  و  $0/07$  با افزایش عدد فرود مقدار عدد استروهاال کاهش می‌یابد ولی در مانع  $0/09$  اول افزایشی و بعد کاهشی می‌شود. علت این امر هم می‌تواند عدم فرصت برای ایجاد کامل گردابه در پایین دست موانع باشد.

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق در مجموع ۶۰ مدل‌سازی برای ۴ مانع مثلثی، مربعی، دایره‌ای و چند ضلعی با قطرهای  $0/05$ ،  $0/07$  و  $0/09$  متر در سه سرعت  $0/4$ ،  $0/6$  و  $0/8$  متر بر ثانیه صورت گرفت. نتایج حاصل از این آزمایشات را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

در مانع با قطر  $0/06$  هرچه میزان عدد رینولدز بیشتر شد مقدار عدد استروهاال هم بیشتر گردید تا عدد رینولدز  $24000$  که بعد از آن به صورت کاهشی می‌باشد. اما در مانع با قطر  $0/08$  رابطه عدد استروهاال با عدد رینولدز به صورت کاهشی می‌باشد به این علت که هر چه مانع بزرگتر فاصله مانع با دیواره کانال کمتر شده و باعث این پدیده می‌شود.

بیشترین مقادیر عدد استروهاال در مانع با قطر  $0/08$  صورت گرفت.

هر چه ابعاد مانع کوچک‌تر می‌شود مقدار گردابه ایجاد شده کمتر می‌شود.

مانع مثلثی بیشترین گردابه را در پایین دست خود ایجاد کرد.

هر چه سرعت جریان بیشتر می‌شود درهم تنیده شدن گردابه‌ها افزایش می‌یابد به نحوی که نمی‌توان شکل منظمی از گردابه‌ها را مشاهده نمود. بر این اساس بهترین

## منابع

- Azizi, R., Ghomeshi M. 2010. Relationship between frequency of transverse waves and characteristics of flow and obstacles in open channels. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 6(2), pp. 57-65.
- Bernitsas M.M., Raghavan K. 2008. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy from Fluid Flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 130, pp. 041101.
- Bovand M., Rashidi S., Esfahani J.A., Saha S.C., Guc Y.T., Dehesht M. 2016. Control of flow around a circular cylinder wrapped with a porous layer by magneto hydro dynamic. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 401, pp.1078–1087.
- Cagney N., Balabani S. 2016. Fluid forces acting on a cylinder undergoing streamwise vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*. 62, pp.147–155.
- Chang C.C., Kumar R. A., Bernitsas M.M. 2011. VIV and galloping of single circular cylinder with surface roughness at  $3.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ . *Ocean Engineering*. 38(16), pp.1713–1732.
- Ding L., Bernitsas M. Kim E.S. 2011. D Uran S vs. experiments of flow induced motions of two circular cylinders in tandem with passive turbulence control for  $30000 < Re < 105000$ . *Journal of Ocean Engineering*, 72, pp. 429–440.
- Fitz-hugh J.S. 1973. Flow induced vibration in heat exchangers. *proc. UKAEA/NPL International Symposium on vibration problems in industry*, Keswick, England, paper 427, pp. 1-17.
- Govardhan R. Williamson C.H.K. 2002. Resonance forever: existence of a critical mass and an infinite regime of resonance in vortex-induced vibration, *Journal of Fluid Mechanics* .vol. 473, pp. 147-166.
- Govardhan, r. and Williamson. C. h. k. 2003. Critical mass in vortex induced vibration of a cylinder. *European Journal of Mechanics*. 23, pp. 17-27.
- Govardhan R., Williamson C. H. K. 2000. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 420, pp. 85–130.
- Govardhan R.N., Williamson C.H.K., 2006. Defining the ‘modified griffin plot’ in vortex-induced vibration: revealing the effect of Reynolds number using controlled damping. *Journal of Fluid Mechanics* 561, pp. 147–180.
- Jafari A., Ghomeshi M., Bina M., Kashefipour S.M. 2010. Comparing of ten modes of oscillation occurring across the open channels, *Congress IAHR-APD The School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand*. pp. 21 – 24.
- Kim, E.S., Bernitsas, M.M and Kumar. R.A. 2011. Multi cylinder flow induced motions: enhancement by passive turbulence control at  $28 \cdot 000 < Re < 120 \cdot 000$ , In: *Proceedings of the OMAE*.19.
- Lee J.H., Bernitsas M.M. 2011. High-damping high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter. *Journal of Ocean Engineering*, 38, pp. 1697–1712.
- Vasel-Be-Hagh A.R., Carriveau R., Ting, D.S.K. 2015. A balloon bursting underwater. *Journal of Fluid Mechanics*, 769, pp.522-540.
- Kang Y.J., Yang S. 2013. Integrated microfluidic viscometer equipped with fluid temperature controller for measurement of viscosity in complex fluids