یادداشت فنی

اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مکانیکی جابجایی عرضی و مقایسه سرعت بهینه برای تولید انرژی برای استوانه‌های یکنواخت و مخروطی تحت ارتعاش ناشی از گردابه

حجت نادری اسرمی[۱]، شبنم بهرامی اصل[۲]، محمدرضا تابش‌پور[۳*]، محمدسعید سیف[۴]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، hnaderi@mech.sharif.edu
[۲] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، bahramiasl.shabnam@mech.sharif.edu
[۳*] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، tabeshpour@sharif.edu
[۴] استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۶

کلمات کلیدی:
ارتعاش ناشی از گردابه
تست تجربی
سرعت‌سنجی تصاویر ذرات
روش‌های جذب انرژی

چکیده

اندازه‌گیری‌های آزمایشـــگاهی ناپایداری‌های دینامیکی در محیطهای آبی به علت ماهیت نوســـانی و کوچک بودن دامنه حرکتی آنها همواره چالش برانگیز هســـتند. اکثر مطالعات فعلی با اســـتفاده از مدارهای الکتریکی به اندازه‌گیری آزمایشگاهی می‌پردازند. هدف این مقاله اندازه‌گیری آزمایشگاهی صرفا مکانیکی در پدیده ارتعاش ناشی از گردابه است. با بدســت آوردن دامنه حرکت ارتعاشــی میتوان مکانیزم‌های حرکتی و اســتحصــال انرژی مکانیکی طراحی کرد. در این مقاله از روش نوین سرعت‌سنجی تصاویر ذرات استفاده میشود. آزمایش بصورت حرکت یک استوانه در داخل کانال آب با سرعت‌های مختلف حرکت است. استوانه‌ها بصورت یکنواخت و مخروطی هستند. مطالعه استوانه مخروطی نیز کاری نو در این زمینه است. داده‌های استخراج شده بصورت نمودارهای بی‌بعد دامنه-سرعت هستند. از این آزمایش سرعت متناظر با دامنه حداکثر بدست میاید. دیده میشود که در سرعت بهینه، دامنه حرکت استوانه یکنواخت بیشتر است. این در حالیست که استوانه مخروطی برای استفاده در جریان با سرعت متغیر مناسب است.

Experimental and Mechanical Measurement of Transverse Deflection and Comparison of Optimal Velocity for Energy Harvesting in Uniform and Tapered Cylinders from Vortex-Induced-Vibrations

Hodjat Naderi-Asrami[1], Shabnam Bahrami Asl[2], Mohammadreza Tabeshpour[3*], Mohammad-Saeed Seif[4]

[1] PhD Candidate, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, hnaderi@mech.sharif.edu
[2] PhD Candidate, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Tech., bahramiasl.shabnam@mech.sharif.edu
[3] Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, tabeshpour@sharif.edu*
[4] Professor, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, seif@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 09 Mar. 2020
Accepted: 06 Aug. 2020

Keywords:
Vortex Induced Vibrations
Experimental Test
Particle Image Velocimetry
Energy Harvesting Methods

ABSTRACT

Experimental measurements of dynamic instabilities in water environments are challenging due to their fluctuation and small amplitude. Most of studies use electrical circuits, this paper aims to use only mechanical methods to measure vortex induced vibrations. Measuring the fluctuations amplitude can help designing mechanisms for movement and for mechanical energy harvesting. This paper uses the novel particle image velocimetry method. The test comprises of a cylinder moving in water with different velocities. Uniform and tapered cylinders are used. Study of tapered cylinder is unprecedented. Output data is in the form of dimensionless amplitude-velocity graphs. From this test velocity for producing largest amplitude is obtained. It is also seen that in the efficient velocity, amplitude of uniform cylinder is larger. While tapered cylinder is suitable for using in currents with variable velocities.

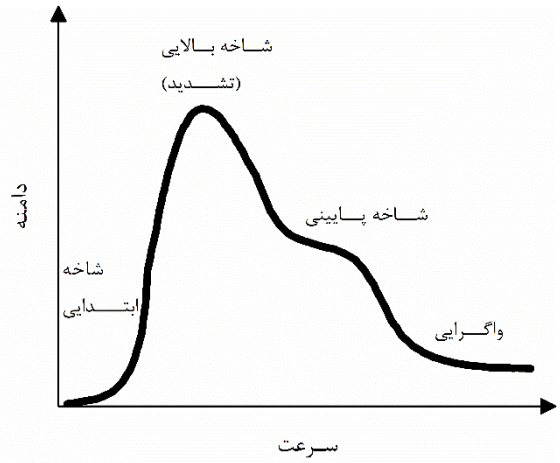
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

۱ - مقدمه

ناپایداری‌های آب‌پویایی‌شناسی[۱] و آئرودینامیکی به طور کلی به چهار صورت ارتعاشات ناشی از گردابه[۲]، تازلرزه[۳]، بااللرزه[۴] و سازه‌لرز[۵] هستند.

۱-۱ ناپایداری‌های دینامیکی و تولید انرژی

زمانی که یک جسم حجیم با جریان سیال یکنواخت برخورد میکند، جریان از سطح جسم جدا میشود و پسایه[۶] نامنظم تولید میکند. در این پسایه دو گردابه در دو طرف جسم بطور دوره‌ای به داخل جریان خالی میشوند. این ریزش گردابه دوره‌ای باعث ایجاد توزیع نامتقارن فشار حول جسم میشود که نیروهای دوره‌ای ایجاد می‌کند. پس یک ارتعاش با دامنه کوتاه به خاطر این نیروها در جسم ایجاد میشود. این پدیده «ارتعاش ناشی از گردابه» نام دارد. افزایش سرعت جریان از صفر باعث افزایش بسامد ریزش گردابه (بخاطر ثابت بودن عدد استروهال) است. نهایتا در یک سرعت جریان، بسامد ریزش گردابه نزدیک بسامد طبیعی جسم میشود که باعث نوسان جسم در ناحیه تشدید یا قفل‌شدگی[۷] میگردد (شاخه بالایی در شکل ۱).



شکل ۱: نمودار دامنه-سرعت برای VIV [1]

اگر خصوصیات مکانیکی و جرم جسم کم باشند، در این ناحیه نوسانات شدیدی رخ خواهد داد. نمونه ارتعاشات VIV در مهندسی دریا در خطوط مهار سازه‌های فراساحلی و خطوط لوله زیر آب دیده میشود. توجه شود که این ارتعاشات شامل دو گروه موازی و عمود بر جریان میشوند. پاسخ حالت موازی جریان در تعداد زیادی از مطالعات نادیده گرفته میشود چرا که دامنه پاسخ عمود بر جریان به مراتب بزرگتر است. مطالعه این مقاله نیز در زمینه ارتعاش عمود بر جریان می‌باشد.

اگر جسمی الاستیک در سیالی ساکن به نوسان درآید، بخاطر میرایی سازه‌ای و لزجت سیال اطراف انرژی حرکت از بین میرود و نوسانات میرا می‌شود. اگر همین جسم در یک سیال متحرک قرار گیرد، نیروهای سیال باعث میشوند که دامنه نوسانات افزایش یابد و حرکت از تعادل خارج شود. این ناپایداری «تازلرزه» نام دارد و ناپایداری متداول سازه‌ها با سطح مقطع غیردایروی، غیرمتقارن و منشوری است. نوسانات در صفحه‌ای عمود بر جریان ورودی رخ میدهد. با افزایش سرعت امکان وقوع تازلرزه نیز بیشتر میشود. در این ناپایداری، افزایش میرایی باعث بیشتر شدن سرعت آغازین میشود و هر چه میرایی کمتر باشد، سرعت شروع ارتعاش کمتر خواهد بود. تازلرزه به عنوان یک ارتعاش تشدیدی شناخته نمیشود.

عبارت «بااللرزه» در روزهای آغازین هوانوردی زمانی که ناپایداری‌های مخرب در سیستم‌های کنترل و بالهای هواپیما اثر داشتند، ایجاد شد. اگرچه بااللرزه به پدیده آئروکشسانی سازه‌های هوایی اطلاق میشود ولی لرزش یک برگ روی درخت، ارتعاش آنتن خودرو و ارتعاش کرکره‌ی پنجره در باد نیز نمونه‌هایی از این پدیده هستند. مطالعه این پدیده در ابتدا برای حفظ تعادل آئرودینامیکی ایرفویل‌ها در حرکت همزمان گام[۸] و خیزافت[۹] آغاز شد. در بااللرزه قسمت غیرلزج سیال باعث ناپایداری است چرا که نیروهای غیرلزج باعث نوسانهای با دامنه کوچک میشوند.

عموما پدیده «سازه‌لرز» به پاسخ سازه به تحریک آب‌پویایی‌شناسی و آئرودینامیکی که به خاطر لزجت ایجاد شده، اطلاق میشود. این تحریک بخاطر تغییرات فشار در سطح جسم بوجود میاید و به همین جهت در جریان در هر قسمتی در کنار جسم میتواند رخ دهد. سازه‌لرز در هواپیماها، موشکها و مراحل توربوماشینها دیده میشود. با افزایش سرعت جریان، دامنه سازه‌لرز بطور آهسته ولی نامنظم افزایش میابد. پس سازه‌لرز در تمامی سرعت‌های جریان رخ میدهد ولی دامنه‌اش میتواند بسیار کوچک شود بطوریکه قابل مشاهده نباشد. به بیان دیگر، سازه‌لرز سرعت بحرانی آغازین ندارد و همینطور حد نهایی بالایی نیز ندارد. سازه‌لرز بعنوان ارتعاش گذرا شناخته میشود و به همین جهت در دسته ارتعاشات تصادفی قرار می‌گیرد [1].

فشاربرق[۱۰] به الکتریسیته ماحصل از فشار گفته میشود، جریان الکتریسته‌ای که از مواد جامد خاصی در پاسخ به کرنش مکانیکی گرفته میشود. وقتی بعضی از این مواد به اندازه یک هزارم ابعاد اصلیشان تغییر کنند، مقدار قابل محاسبه‌ای از فشاربرق تولید می‌کنند. این فرآیند برگشت پذیر می‌باشد. میتوان از ناپایداری‌های دینامیکی ذکر شده به کمک مواد فشاربرق انرژی الکتریکی تولید کرد.

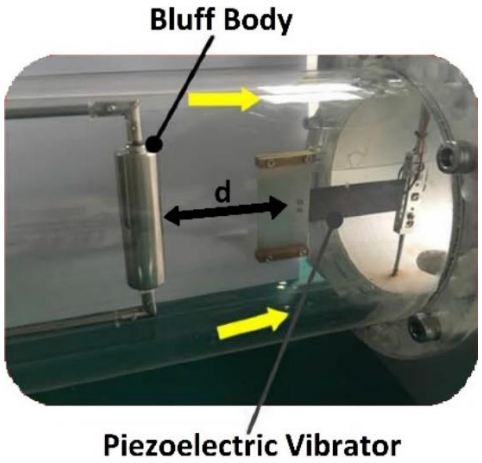
سرعت لازم برای عملکرد پدیده‌های بااللرزه و سازه‌لرز به نسبت زیاد هستند و دامنه‌های آنها با افزایش سرعت بطور قابل توجهی زیاد میشوند. پس استحصال انرژی از آنها به صورت یکنواخت در محیطی با سرعت جریان متغیر، دشوار است. از طرف دیگر، ارتعاش‌های ناشی از گردابه در سرعت‌های کمتری آغاز میشوند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

همینطور در این پدیده تشدید در بازه‌ی بسیار کوچکی از سرعت‌های جریان رخ میدهد و خارج از این محدوده، دامنه آن به نسبت کوچک است. پس سیستم استحصال انرژی از VIV باید بهینه شود. تازلرزه در سرعت‌های به نسبت کمتری از VIV رخ میدهد و همینطور بازه سرعت‌های وسیعتری را پوشش میدهد که دارای دامنه‌های به نسبت قابل قبولی هستند. پس برای تولید انرژی باید بین این دو مقایسه صورت گیرد و باتوجه به شرایط گزینه اصلح انتخاب گردد. انرژی خروجی جاذب‌های انرژی فشاربرق عموما ولتاژ زیاد (در حدود ۳۰ ولت) و جریان کم ایجاد میکند. این جریان کم و ولتاژ زیاد در سیستم‌های الکتریکی کوچک، حسگرها و باتریهای قابل تعویض کوچک استفاده میشوند [1].

۲-۱ سابقه پژوهش‌های تجربی

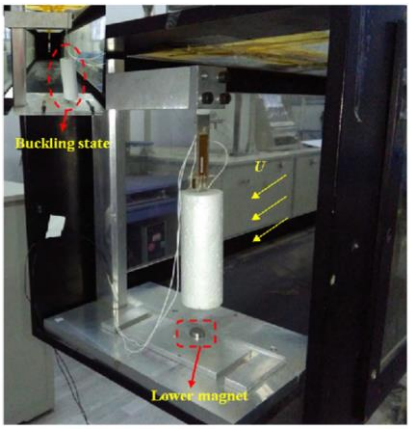
مطالعات تجربی و شاخص انجام شده توسط دیگران بدین شرح است. تعیین محل بهینه قرارگیری ماده فشاربرق که در پشت یک جسم حجیم قرار میگیرد، هدف آزمایش *هیو و همکاران* [2] است. سیستم آزمایش آنها در شکل ۲ موجود است. این سیستم داخل یک لوله آب است که بر روی یک میز بنا شده است. هدف تعیین فاصله d در شکل ۲ می‌باشد. جسم حجیم باعث ایجاد گردابه در پشت خود میشود و این گردابه نیرویی ایجاد میکند که ورقه و سپس فشاربرق را تکان میدهد. با تغییر فاصله d و اندازه‌گیری ولتاژ خروجی میتوان این محل بهینه را یافت.



شکل ۲: سیستم آزمایش جاذب انرژی پیزوالکتریکی (PEH) [2]

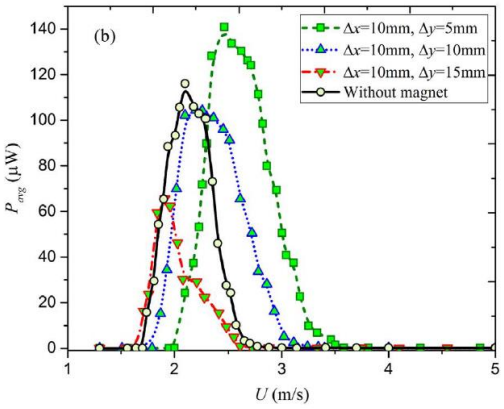
در بخش تئوری نیروی هماهنگ[11] بین سازه و سیال از طریق رابطه برنولی و مدل ورتکس لامب-اسین بدست میاید. اختلاف فشار از رابطه برنولی و نیرو از انتگرالگیری از اختلاف فشار بدست میاید. در مرحله بعدی، تیر به صورت یک تیر اویلر-برنولی مدل میشود و نیروی بدست آمده بعنوان تحریک بدان اعمال میشود. در معادله تیر ولتاژ پیزوالکتریک نیز از یک مدار مناسب و از جنس نیرو تخمین زده و وارد معادله میشود. بدین ترتیب با مدلسازی یک درجه آزادی تیر میتوان معادله حرکت ارتعاشی و در نهایت ولتاژ خروجی را بدست آورد [2].

برای بهبود انرژی خروجی از سیستم‌های VIV میتوان بطور کاربردی از آهنربا بهره جست. دو آهنربای کوچک با نیروی دفعی به تکیه‌گاه زیرین و کف سیلندر دایره‌ای متصل می‌شوند. در کار *ژانگ و همکاران* [3] این سیستم تحت اثر باد قرار میگیرد. آزمایشات نشان میدهند که با تغییر فاصله نسبی دو آهنربا، بسامد طبیعی استحصالگر انرژی بطور قابل توجهی تغییر می‌کند و به همین جهت ناحیه قفل‌شدگی جابجا میشود. همینطور میتوان به افزایش انرژی خروجی حدود ۳۰ درصد رسید. شکل ۳ نمایانگر سیستم آزمایش موجود در کار *ژانگ و همکاران* [3] است. دیده میشود که یک استوانه در تونل باد به صورت عرضی جابجا می‌شود و در ماده فشاربرق ولتاژ ایجاد میکند.



شکل ۳: تست VIV در تونل باد [3]

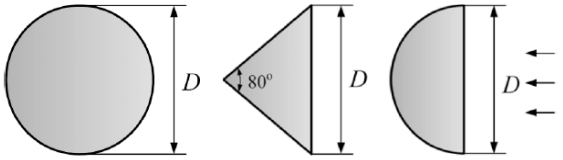
طبق شکل ۴ میتوان دید که با تغییر محل آهنرباها (هر منحنی نشانگر یک موقعیت است)، توان خروجی آن تغییر میکند. با تغییر پارامترهای موجود میتوان یک سیستم استحصالگر انرژی بهینه طراحی نمود.



شکل ۴: نمودار توان تولیدی-سرعت [3]

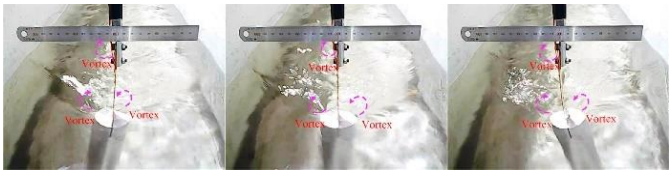
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

سان و همکاران [4] استحصال انرژی فشاربرق از جریان با سرعت کم را توسط VIV و تازلرزه بررسی و مقایسه کرده‌اند. این تحقیق جزء معدود تحقیقاتی در زمینه تازلرزه است که در کانال آب انجام میشود. در این مطالعه بررسی تازلرزه بر روی استوانه‌ای با مقطع نیم‌دایره و مقطع مثلث و بررسی VIV بر روی استوانه‌ای با مقطع دایره صورت میگیرد (شکل ۵).



شکل ۵: مقاطع استوانه‌های تست شده [4]

کانال استفاده شده در آزمایش آنها منحنی است ولی دلیلی برای آن ذکر نمیشود. در این کانال به کمک یک استوانه این پدیده ایجاد و به کمک دوربینی ارتعاشات آن ضبط میشود (شکل ۶). البته در این تحقیق نیز همچون [2] و [3] داده‌برداری به کمک سیستم ولتاژسنجی صورت می‌پذیرد.



شکل ۶: تصاویر دوربین از VIV یک استوانه دایروی [4]

در بخش تحلیلی برای بدست آوردن معادله حرکت از اصل *همیلتون* در رابطه (۱) استفاده میشود. در این رابطه به کمک عامل همیلتون از عبارات انرژی جنبشی و الاستیک و کار ناپایستار در یک بازه زمانی انتگرال گرفته میشود.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta V + \delta W_{nc})\, dt = 0 \qquad (۱)$$

برای کار آب‌پویایی موجود در عبارت کار ناپایستار باید مقادیر نیروهای VIV و تازلرزه جایگزین شود. مدل *ون-در-پل* برای شبیه‌سازی نیروی VIV و مدل تلاطمی[۱۲] پیچک[۱۳]های بزرگ برای شبیه‌سازی میدان سیالات استفاده میشود. با تحلیل ویژهمقدار[۱۴] معادله حرکت میتوان بسامد ارتعاش و پاسخ ارتعاشی را بدست آورد. نهایتا دیده میشود که انرژی ناشی از تازلرزه به انرژی ناشی از VIV ارجحیت دارد [4]. مدل تحلیلی این مقاله دارای دقت بسیار خوبی است.

۳-۱ اهداف و نوآوری‌ها و روند مقاله

ارتعاش ناشی از گردابه شدیدا نیاز به بهینه شدن دارد تا با بازده حداکثری بتواند استفاده کاربردی از خود را توجیه کند. هدف این مقاله تعیین سرعت کاری بهینه ارتعاش ناشی از گردابه است. سرعت بهینه از مهمترین پارامترهای قابل تغییر در این مسئله است و به همین جهت، بهبود آن میتواند تاثیر به سزایی در تولید انرژی داشته باشد. سرعت بهینه بصورتی تعیین میشود که در آن دامنه حداکثری رخ میدهد. این برعکس حالتی است که برای جلوگیری از اثرات ناخواسته پدیده ارتعاش ناشی از گردابه، دامنه کمتر و کوچکتر مطلوب باشد.

جابجایی حداکثر عرضی میتواند بطور مستقیم و یا به کمک مبدل‌ها بصورت انرژی مورد استفاده قرار گیرد. الزاما توان الکتریکی تولیدی بیشتر به معنی انرژی تولیدی بیشتر نیست. چرا که ممکن است سایر انواع انرژی زمانی بهینه شوند که توان الکتریکی بهینه نیست. یا اینکه اگر مکانیزمی حرکتی طراحی شود که در آن نیاز به داشتن اطلاعاتی دقیق از بازه حرکت عرضی در اثر ارتعاش ناشی از گردابه باشد. با توجه به سابقه پژوهش ارائه شده، اکثر مطالعات به بهینه‌سازی توان الکتریکی خروجی پرداخته‌اند. این مقاله برای پاسخ به این سوال بوجود آمد که چگونه میتوان از دیدگاه فقط مکانیکی این پدیده را بررسی کرد.

دو راه برای اندازه‌گیری مکانیکی حرکت استوانه میسر است. راه اول استفاده از کرنش‌سنج است. با توجه به این که باید برای بدست آوردن جابجایی باید با استفاده از روابط چندین بار کرنش‌های اندازه‌گیری شده در جهات مختلف بهم تبدیل شوند، امکان معرفی خطا در پاسخ بوجود خواهد آمد. همینطور بخاطر کوچک بودن اعداد اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها در مقیاس این مسئله، نیاز به کرنش‌سنج‌هایی بسیار دقیق میباشد. که با توجه به گرانی آنها، استفاده از کرنش‌سنج عملا توجیه خود را از دست میدهد.

راه‌حل دیگری که برای اندازه‌گیری مکانیکی وجود دارد، استفاده از روش موسوم به سرعت‌سنجی تصاویر ذرات[۱۵] میباشد. در این روش با فیلمبرداری و سپس تحلیل تصاویر گرفته شده میتوان جابجایی جسم را اندازه گرفت. استفاده از این روش در این مبحث جدید میباشد. فقط در مقاله [4] تصویربرداری صورت گرفته و تحلیلی روی آن انجام نشده است و دوباره همان روش تکراری ولتاژگیری مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از نوآوری‌های مقاله حاضر استفاده از روش سرعت‌سنجی تصاویر ذرات در این زمینه می‌باشد.

یکی از اشکال هندسی متداول استوانه‌ای با سطح مقطع دایره است که دایره سطح فوقانی آن کوچکتر از دایره سطح پایینی است. این استوانه که استوانه مخروطی[۱۶] یا غیریکنواخت نام دارد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

بخاطر جرم کمتر و تعادل بهتر نسبت به استوانه یکنواخت، یکی از هندسه‌های پر استفاده در مهندسی مکانیک است. همینطور طبق سابقه پژوهش دیده شد که مطالعه این نوع هندسه صورت نگرفته است. پس هدف دوم این مقاله بررسی این نوع هندسه و مقایسه آن با حالت یکنواخت قرار گرفت.

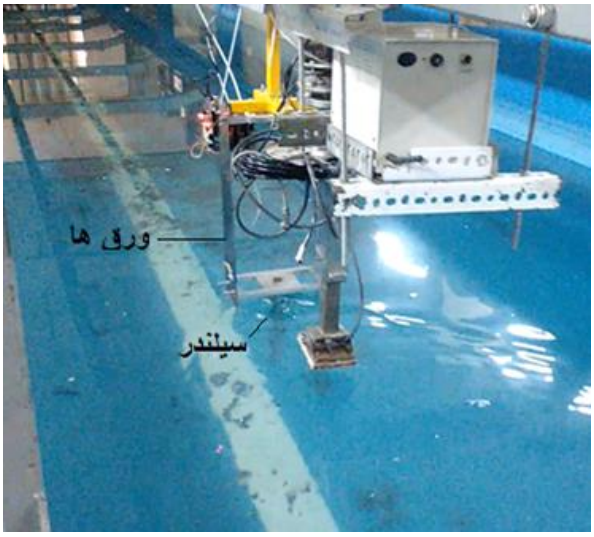
کوچک بودن مقادیر جابجایی در آب نسبت به هوا یکی دیگر از دلایلی است که تعدادی از مقالات استفاده از کانال‌های باد را برای آزمایش خود انتخاب کرده‌اند. سابقه پژوهش ارائه شده نشانگر این موضوع است. این در حالی است که انرژی تولیدی در آب بزرگتر از انرژی تولیدی در هوا است. استفاده از محیط هوا برای پیش‌بینی رفتار در محیط آبی دقیق نیست. به همین جهت هدف سوم این مقاله بررسی این پدیده در آب در نظر گرفته شد. یکی از دستاوردهای این مقاله استفاده از این روش اندازه‌گیری در این ابعاد در محیط آب است.

برای عمومی شدن و قابل استفاده بودن داده‌های استخراجی مقاله، باید داده‌ها در قالبی ارائه شوند که نسبت به ابعاد مسئله مستقل باشند. به همین جهت با تعریف پارامترهای بی‌بعد مناسب و استفاده از آنها در ارائه داده‌های استخراجی این ضرورت مرتفع گردید.

در این مقاله ابتدا توضیحی در مورد انواع ناپایداری‌های دینامیکی و تولید انرژی از آنها میشود. بین آنها مقایسه صورت میگیرد و کاربردی بودن هر یک آنها تعیین میشود. سپس تحقیقات آزمایشگاهی پیشین در مورد ارتعاشات ناشی از گردابه ارائه میشود. این تحقیقات جزء مطالعات مهم در این زمینه هستند. در قسمت بعدی سیستم آزمایش این تحقیق تشریح میشود. نهایتا در قسمت نتایج نمودارهای دامنه-سرعت برای استوانه‌های آزمایش ارائه و تحلیل میشوند. داده‌برداری به کمک روش سرعت‌سنجی تصاویر ذرات و بررسی استوانه با سطح مقطع متغیر (استوانه مخروطی) از دست‌آوردهای مهم این مطالعه هستند.

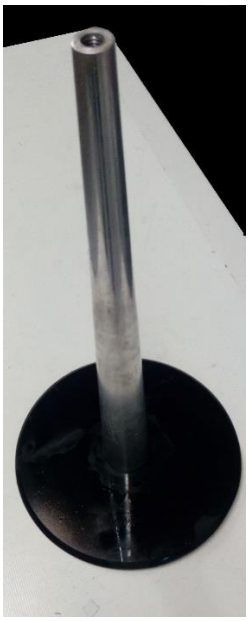
۲- نحوه آزمایش

هدف از انجام آزمایش بدست آوردن جابجایی استوانه در معرض جریان یکنواخت است. چیدمان و سیستم آزمایش به این صورت میباشد که استوانه‌ای با ابعاد هندسی مشخص و سختی تعیین شده به کالسکه[۱۷] متصل شده و در حوضچه کشش توسط کالسکه با سرعت‌های متفاوت کشیده می‌شود. در این آزمایش این سیستم معادل حالتی است که یک استوانه در معرض جریان مستقیم باشد. گرچه در اکثر مطالعات انجام شده استوانه ثابت و جریان متحرک است ولی با توجه به شرایط آزمایشگاه فعلی، عکس این حالت قابل بهره‌برداری است. در محاسبات دامنه حرکت تفاوتی بین این دو حالت وجود ندارد. برای لحاظ نمودن سختی در اتصال استوانه به کالسکه نیز از دو ورق فلزی با ضخامت مشخص استفاده شده است. در این سیستم ارتعاشی، میرایی در آب رخ میدهد. تصویر ۷ چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مجموعه سیلندر به همراه ورق‌ها در حال تست در حوضچه

در این آزمایش دو استوانه مستقلا تست شدند. این استوانه‌ها به صورت یکنواخت و همینطور به صورت قطر متفاوت در بالا و پایین (استوانه مخروطی) ساخته میشوند. هدف از این کار مقایسه استوانه‌ها بخاطر تفاوت قطر است. استوانه مخروطی مورد آزمایش در شکل ۸ دیده میشود.



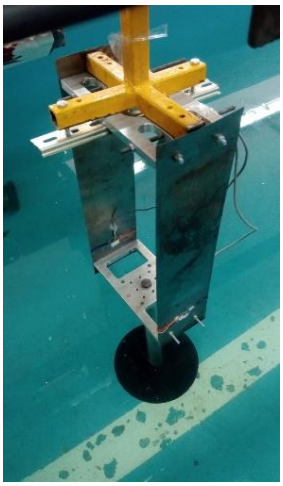
شکل ۸: استوانه مخروطی مورد آزمایش

همانطور که در شکل ۸ ملاحظه میشود، صفحه زیرین برای از بین بردن اثرات سه بعدی جریان تعبیه شده است. سیلندرها دارای ارتفاع ۳۶ سانتیمتر هستند. سیلندر مخروطی دارای قطرهای ۲۱ و ۳۵ سانتیمتری است. قطر سیلندر یکنواخت برابر ۲۸ سانتیمتر میباشد. سرعت های تست شده از ۰.۲ تا ۰.۳۸ متر بر ثانیه با فواصل ۰.۰۲ متر بر ثانیه هستند. کانال استفاده شده برای این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

آزمایش مربوط به *آزمایشگاه دریا دانشکده مهندسی مکانیک در* دانشگاه *صنعتی شریف* می‌باشد.

همانطور که ذکر شد این استوانه به صورت مستقل دارای سختی نیست، به همین علت دو صفحه به آن متصل میشود که بجای سختی عمل میکنند و اثر ضریب فنریت را دارند. این سیستم ساخته شده در شکل ۹ وجود دارد.



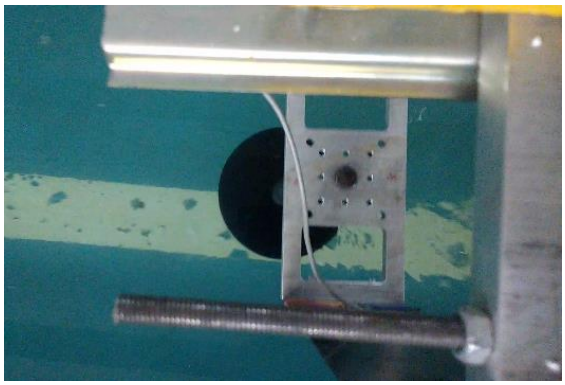
شکل ۹: سیستم ایجاد و ضبط VIV

در محل ورق‌ها میتوان کرنش‌سنج نصب کرد تا تغییرات عرضی استوانه بدست آید ولی به خاطر کوچک بودن این اعداد، استفاده از کرنش سنج با خطای زیاد و غیرقابل قبول همراه میشود. برای حل این مشکل میتوان کرنش‌سنج‌های دقیقتر بکار برد که بخاطر قیمت زیاد در محدوده عملیاتی این مقاله نیست. بجای استفاده از کرنش‌سنج همانطور که در شکل ۱۰ در قسمت فلش زده دیده میشود از دوربینی برای ضبط حرکات عرضی سیلندر استفاده میگردد.



شکل ۱۰: محل قرارگیری دوربین (فلش قرمز)

به منظور اندازه‌گیری جابجایی استوانه از روش سرعت‌سنجی تصاویر ذرات استفاده شد. به این ترتیب که یک دوربین با دقت و سرعت بالا از زاویه بالا از استوانه فیلم گرفته و این فیلم به گونه‌ای پردازش شد که در زمانی که استوانه بیشترین فاصله از مکان اولیه‌اش را دارد تصویر می‌دهد. یک تصویر از فیلمی که ضبط شده است به عنوان نمونه در شکل ۱۱ دیده میشود.



شکل ۱۱: یک تصویر نمونه از فیلم ضبط شده

در ادامه این تصاویر به کمک روش سرعت‌سنجی تصاویر ذرات تحلیل شده و کالیبراسیون برای مقادیر بدست آمده انجام شده است و در نهایت میزان جابجایی سیلندر بدست آمده است. این روش نمودارهای دامنه-سرعت را نتیجه میدهد که در قسمت نتایج آورده شده‌اند.

۳-نتایج

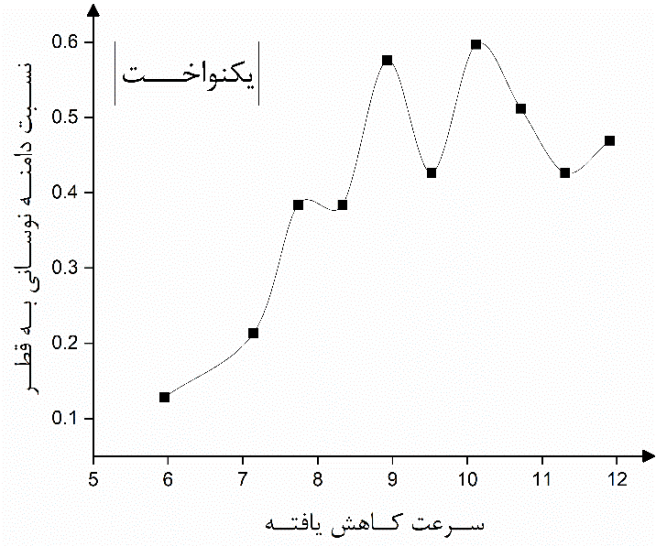
برای اینکه نمودارها قابل استفاده عمومی باشند، باید به صورت بدون بعد تهیه شوند. به همین جهت سرعت کاهش یافته از پارامترهای سرعت و فرکانس طبیعی و قطر میانگین با رابطه (۲) تعریف میشود:

$$U_{reduced} = \frac{U}{f_n D_{mean}} \qquad (۲)$$

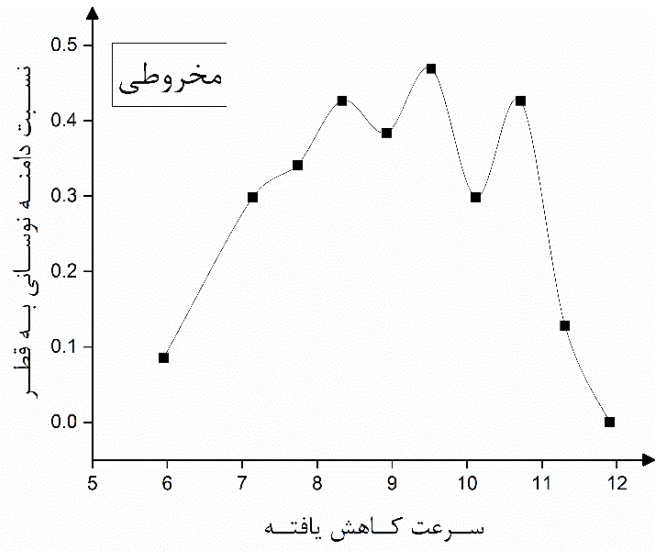
قطر میانگین ۲۸ سانتیمتر و فرکانس طبیعی ۱.۲ هرتز محاسبه میشود. توجه شود که فرکانس طبیعی از تست ارتعاش آزاد در آب بدست میاید.

نمودارهای بدست آمده برای حللت یکنواخت و مخروطی به ترتیب در اشکال ۱۲ و ۱۳ دیده میشوند. محور عمودی دامنه نوسان بی‌بعد و محور افقی سرعت کاهش‌یافته است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

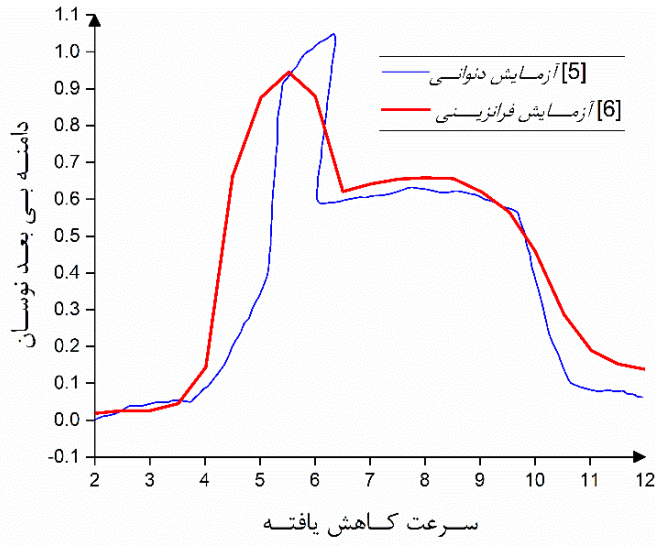


شکل ۱۲: نمودار دامنه نوسانی ایجاد شده بی‌بعد بر حسب سرعت کاهش‌یافته برای آزمایش استوانه یکنواخت



شکل ۱۳: نمودار دامنه نوسانی ایجاد شده بی‌بعد بر حسب سرعت کاهش‌یافته برای آزمایش استوانه مخروطی

همانطور که در اشکال ۱۲ و ۱۳ دیده میشود منحنی استوانه یکنواخت نسبت به استوانه مخروطی نوسان بیشتری دارد. هر دو نمودار روندی مشابه دارند به این ترتیب که ابتدا زیاد میشوند و به قله میرسند و سپس کم میشوند. با توجه به بدون بعد بودن نمودارها میتوان نتیجه موجود را با سایر کارها مقایسه کرد. بطور نمونه کار *دنوانی و همکاران* [5] و کار *فرانزینی و بانزل* [6] در شکل ۱۴ برای استوانه یکنواخت آورده شده‌اند. با توجه به متفاوت بودن ابعاد و اندازه‌های مورد استفاده در آزمایشها، صرفا مقایسه ماهیت نمودارها میسر است.



شکل ۱۴: نمودار بی‌بعد دامنه-سرعت

محورهای افقی و عمودی در تمامی نمودارهای ۱۲، ۱۳ و ۱۴ یکسان است. با مقایسه کار فعلی با سایرین دیده میشود که روند موجود در منحنی‌ها یکسان است و همینطور دامنه نوسانی بی بعد نیز از نظر مقدار نزدیک یکدیگر هستند.

بطور کلی با برابری بسامد سیستم با بسامد گردابه تشدید رخ میدهد. برای استحصال انرژی حداکثری باید فرکانس سیستم نزدیک این فرکانس قرار بگیرد تا ماکزیمم جابجایی رخ دهد. فرکانس گردابه از عدد *استروهال* منتج میشود و عدد *استروهال* نیز در *رینولدزهای* متداول چیزی حدود ۰.۲ است.

۴ - نتیجه گیری و جمع‌بندی

برای تغذیه حسگرها و مدارهای الکتریکی کوچک میتوان از ناپایداری‌های دینامیکی موجود در محیط استفاده کرد. بطور کلی از بین چهار ناپایداری دینامیکی معرفی شده در این مقاله، فقط دو ناپایداری VIV و تازلرزه استفاده کاربردی دارند. تازلرزه در سرعت‌های جریان کمتری نسبت به VIV رخ میدهد. دامنه ارتعاشی VIV عموما در ناحیه قفل‌شدگی قابل توجه است ولی تازلرزه دارای دامنه ارتعاشی کافی در رنج متنوعی از سرعت‌ها است. به همین دلایل در شرایط برابر برای انتخاب بین VIV و تازلرزه باید بررسی انجام داد.

در مطالعات آزمایشگاهی دیگران متداول است که استوانه تحت VIV بطور ثابت در کانال یا لوله‌ای قرار بگیرد و جریان به آن برخورد کند. انجام این کار در آزمایشگاه مورد استفاده تحقیق حاضر دارای محدودیت بود به همین جهت از استوانه متحرک در سیال ثابت استفاده شد. اندازه‌گیری دامنه حرکت در هر دو حالت جریان یکسان است. برای مطالعه تازلرزه استفاده از استوانه‌هایی با مقاطع غیردایروی مرسوم است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]

روش‌های داده‌برداری عموما از طریق اندازه‌گیری ولتاژ خروجی سیستم صورت میگیرد. علت آن دقت مناسب ابزارهای اندازه‌گیری ولتاژ و عدم نیاز به تبدیل کمیت لندازه‌گیری شده (و وارد کردن خطاهای ناشی از تبدیل) می‌باشد. ولی این کار دارای محدودیت است و آن عدم اندازه‌گیری دامنه حرکت است. اندازه‌گیری دامنه حرکت در طراحی مکانیزم‌های حرکتی و تولید انرژی مکانیکی دارای اهمیت است.

در این تحقیق تست VIV بر روی دو استوانه با مقطع دایره صورت گرفت. یک استوانه دارای مقطع برابر در بالا و پایین و دیگری دارای مقاطع متفاوت است. در روشی تازه در این زمینه به کمک دوربینی تصاویر حرکت استوانه ضبط و سپس این تصاویر تحلیل میشوند تا دامنه نوسان استوانه بدست بیاید. از روی این داده‌ها نمودارهای دامنه-سرعت برای هر استوانه بدست میایند. به کمک این نمودارها سرعت بهینه برای تولید انرژی بدست میاید. این تحقیق نشان داد که روش سرعت‌سنجی تصاویر ذرات در این زمینه نتایج قابل‌قبولی میدهد. همینطور این روش حتی در محیط آبی نیز برای ارتعاش ناشی از گردابه نتایج دقیقی به همراه دارد.

سرعت‌های بهینه در نقاطی هستند که بیشترین دامنه حرکت و به تبع آن بیشترین انرژی ایجاد میشود. پارامتر سرعت بی‌بعد بهینه برای استوانه یکنواخت بیشتر از مخروطی است. به همین جهت سیستم‌های شامل استوانه مخروطی در جریان‌هایی با سرعت کمتر بهینه میشوند. با توجه به دامنه‌های ماکزیمم نوسان ایجاد شده دیده میشود که دامنه‌های ماکزیمم نوسان استوانه یکنواخت بیشتر است. به همین خاطر در سرعت بهینه از استوانه یکنواخت میتوان انرژی بیشتری تولید کرد. مزیت استوانه مخروطی این است که تغییرات کمتری در میزان دامنه‌های ایجاد شده دارد. پس در بازه وسیعی از سرعت‌ها دامنه نوسان قابل‌توجهی دارد. به همین جهت استفاده از آن در جریانی که دارای سرعت متغیر است، دارای بازده بیشتری است.

برای مطالعات آتی مطالعه نصب وارونه استوانه مخروطی، ایجاد زبری روی سطح استوانه‌ها و مقایسه نتایج داده‌برداری از طریق ولت‌متر و کرنش سنج با نتایج فعلی پیشنهاد میشود.

۵-کلید واژگان

1-Hydrodynamic
2-Vortex Induced Vibrations (VIV)
3-Galloping
4-Flutter
5-Buffeting
6-Wake
7-Lock-in
8-Pitch
9-Heave
10-Piezoelectricity
11-Harmonic
12-Turbulence
13-Eddy
14- Eigen-value
15-Particle Image Velocimetry (PIV)
16-Tapered
17-Carriage

۶-فهرست علائم

D_{mean}	قطر میانگین	T	انرژی جنبشی
U	سرعت افقی استوانه	$U_{reduced}$	سرعت کاهش‌یافته
V	انرژی الاستیک	W_{nc}	کار ناپایستار
f_n	بسامد طبیعی	t	زمان
δ	عامل همیلتون		

۷ - مراجع

1- Williams, R., (2015). *Energy Harvesting Technology, Methods and Applications*. Nova Science Publishers, Hauppauge New York, Chpt.4, p.83-111.

2- Hu, Y., Yang, B., Chen, X., Wang, X. and Liu, J., (2018), *Modeling and experimental study of a piezoelectric energy harvester from vortex shedding-induced vibration*, Energy Conversion and Management, Vol.162, p.145-158.

3- Zhang, L.B., Abdelkefi, A., Dai, H.L., Naseer, R. and Wang, L., (2017), *Design and experimental analysis of broadband energy harvesting from vortex-induced vibrations*, Journal of Sound and Vibration, Vol.408, p.210-219.

4- Sun, W., Zhao, D., Tan, T., Yan, Z., Guo, P. and Luo, X., (2019), *Low velocity water flow energy harvesting using vortex induced vibration and galloping*, Applied Energy, Vol.251 (113392).

5- Dhanwani, M.A., Sarkar, A. and Patnaik, B.S.V., (2013). *Lumped parameter models of vortex induced vibration with application to the design of aquatic energy harvester*, Journal of Fluids and Structures, Vol.43, p.302-324.

6- Franzini, G.R. and Bunzel, L.O., (2018). *A numerical investigation on piezoelectric energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations with one and two degrees of freedom*, Journal of Fluids and Structures, Vol.77, p.196-212.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.1.2]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.1]