



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

تحلیل انرژی اگزرژی سیستم مولد توان با استفاده از ارتعاشات ناشی از گردابه

نگارنده: علیرضا حیدری

استاد راهنما:
دکتر علی سررشته‌داری

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۲۳-۲۵۰-۲
 تاریخ: ۱۹-۹-۹۵
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علیرضا حیدری ولیسی به شماره دانشجویی ۹۲۰۵۶۴۴ رشته مکانیک گرایش سیستم های انرژی تحت عنوان تحلیل انرژی اگزرژی سیستم مولد توان با استفاده از ارتعاشات ناشی از گردابه که در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: خوب امتیاز ۱۷/۵۵) دفاع مجدد مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

۱- عالی (۲۰-۱۹)
 ۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)
 ۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)
 ۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر علی سررشته داری	۱- استاد راهنمای اول
—	—	—	۲- استاد راهنمای دوم
—	—	—	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر علی خالقی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر علی عباس نژاد	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر پوریا اکبرزاده	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



شاه مردال



تقدیم‌نامه

تقدیم به آنان که

عشق و محبت

سایه‌ی پر مهر

و حمایت‌های بی دریغشان

در این مسیر دشوار آرامبخش وجودم بود

تشکر و قدردانی

با تشکر از زحمات و حمایت‌های استاد عزیز جناب آقای دکتر سررشته‌داری که در این مسیر دشوار،
صبورانه یار و مشوق من بوده است.

تعهد نامه

اینجانب **علیرضا حیدری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تحلیل انرژی** **اگرژی سیستم مولد توان با استفاده از ارتعاشات ناشی از گردابه تحت راهنمایی دکتر علی سررشته‌داری** متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، به حرکت اجسامی اطلاق می‌شود که با عبور جریان خارجی از روی آن‌ها به وجود آمده باشند. در این حالت نیرویی برآ به صورت نوسانی به جسم اعمال می‌شود. اگر جسم مقید شده باشد، فرکانس ریزش گردابه‌ها در پشت سیلندر از قانون استروهل پیروی می‌کند، ولی اگر روی بستر الاستیک نصب شده باشد همراه با نیروی برآی وارد شده شروع به نوسان می‌کند. این پدیده غالباً به عنوان یک پدیده مخرب شناخته می‌شده اما در سال‌های اخیر به عنوان یک منبع جدید از انرژی تجدیدپذیر معرفی شده است. تحقیقات صورت گرفته پیرامون این موضوع پیش‌تر عمدتاً به منظور ایجاد پایداری در سازه‌ها و با رویکرد کاهش دامنه‌ی نوسان و یافتن بازه‌هایی امن برای طراحی سازه‌ها صورت گرفته است. این درحالی‌است که تحقیقات پیرامون استحصال انرژی از این پدیده در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه میشیگان توسط برنیتس‌اس آغاز شده است و موضوعاتی نظیر تاثیر پذیری از عدد رینولدز و بررسی سیستم‌های فربندی و میرایی و همچنین بررسی استحصال انرژی توسط سیال هوا بررسی شده است. در مطالعه‌ی حاضر با شبیه‌سازی جریان در نرم‌افزار این فوم و استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار نظیر نیروی برآ و استفاده از آن در محاسبات استحصال انرژی میزان انرژی خروجی را برای سیستمی فرضی بدست آمده و اقتصادی بودن پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شده که با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۱۰ یک جهش ناگهانی در میزان نوسانات سیلندر اتفاق می‌افتد که این جهش تا حوالی رینولدز ۱۲۰ ادامه دارد که محدوده‌ی ایده‌آل برای استحصال انرژی می‌باشد. همچنین در رینولدزهای بین ۱۰۰ الی ۳۰۰ و در نسبت فرکانسی بین $0/8$ تا $1/2$ به دلیل ایجاد پدیده تشدید، حداکثر میزان نوسانات مشاهده شد. در مقایسه بین سیلندر با مقطع‌های دایره، لوزی و مربعی، حداکثر نوسانات برای مقطع دایره‌ای روی می‌دهد بنابراین این هندسه برای استحصال انرژی گزینه‌ی مناسب-تری می‌باشد، درحالی‌که مقطع لوزوی به دلیل حداقل نوسانات برای استفاده در سازه‌ها، به منظور پایداری بیشتر مناسب می‌باشد.

واژگان کلیدی: ارتعاشات ناشی از گردابه، استحصال انرژی، آگرژی، OpenFOAM

مقالات

مقالات استخراج شده از رساله‌ی حاضر به شرح زیر می‌باشند:

- 1) حیدری ع، محبوبی دوست آ، سررشته‌داری ع، ۱۳۹۴، "شبیه‌سازی عددی اثر هندسه‌های مختلف بر ناحیه قفل‌شوندگی تحت نوسانات اجباری استوانه" ششمین همایش بین‌المللی صنایع فراساحل.

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه‌ای بر ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
فصل ۲ مروری بر ادبیات تحقیق.....	۱۱
۱-۲- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- انرژی‌های تجدیدپذیر.....	۱۲
۳-۲- انرژی باد.....	۱۴
مکانیزم پیدایش باد و انواع کاربردهای انرژی بادی -----	۱۴
۴-۲- انرژی آبی.....	۱۶
۵-۲- استحصال انرژی از اقیانوس.....	۱۶
پلامیس -----	۱۹
شناور ا. پی. تی -----	۱۹
مبدل انرژی تک -----	۲۰
مبدل گردابه -----	۲۱
۶-۲- استحصال انرژی پاک از آب به کمک ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها.....	۲۲
طراحی، کاربرد و صحت‌گذاری -----	۲۶
۷-۲- تاریخچه مطالعات.....	۲۸
فصل ۳ روش اجرای تحقیق و مدلسازی.....	۳۵
۱-۳- مقدمه.....	۳۶
۲-۳- تنظیمات حلگر.....	۳۶
فصل ۴ محاسبات و نتایج.....	۶۱
۱-۴- بررسی نتایج و محاسبات انرژی.....	۶۲
۲-۴- طراحی اصلاح شده.....	۶۸
انتخاب جنس سیلندر -----	۶۹
۳-۴- مفهوم انرژی و کاربردهای انرژی در تحلیل سیستم.....	۷۱
۴-۴- مبدل VIVACE.....	۷۵
زمینه های استفاده -----	۷۶

۷۷	.....	۴-۵- تبدیل انرژی
۷۸	.....	سیستم سیم پیچ
۷۸	.....	هسته‌ی آهنی
۷۸	.....	آهنربا و یاتاقان‌ها
۷۸	.....	فنرها
۷۹	.....	محافظ داخلی
۷۹	.....	محافظ خارجی
۸۱	.....	۴-۶- توان خروجی مدل
۸۲	.....	۴-۷- بررسی اقتصادی طرح بر اساس مدل
۸۷	.....	فصل ۵ بحث و نتیجه گیری
۸۸	.....	۵-۱- تعیین ناحیه قفل شوندگی
۸۸	.....	۵-۲- تاثیر هندسه‌ی مقطع سیلندر بر ناحیه قفل شوندگی
۸۸	.....	۵-۳- بررسی میزان نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر سیلندر (A) در محدوده‌ی عدد رینولدز ۱۰۰ الی ۱۴۰
۸۹	.....	۵-۴- تاثیر هندسه مقطع سیلندر بر میزان نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر در محدوده‌ی رینولدز ۱۰۰ الی ۱۴۰
۸۹	.....	۵-۵- محاسبات انرژی- انرژی و بررسی اقتصادی
۹۰	.....	۵-۶- محدودیت‌ها
۹۰	.....	۵-۷- پیشنهادها
۹۱	.....	۵-۸- منابع
۹۹	.....	پیوست
۱۰۵	.....	Abstract

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمای از گردابه‌های تشکیل شده به وسیله ابرها..... ۲
- شکل ۱-۲ چگونگی نوسان سیلندر توسط گردابه‌ها..... ۳
- شکل ۱-۳ عکس از تخریب پل تاکوما در ۱۹۴۰ توسط ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها..... ۴
- شکل ۱-۴ تخریب برج خنک کن‌های فری بریج توسط ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها..... ۴
- شکل ۱-۵ خیابان گردابه‌ای فون کارمن..... ۵
- شکل ۱-۶ شکل جریان پشت سیلندر در عدد رینولدزهای مختلف..... ۶
- شکل ۲-۱ مکانیزم پیدایش باد [65]..... ۱۴
- شکل ۲-۲ نقشه‌ی پتانسیل بادی در ایران..... ۱۵
- شکل ۲-۳ مبدل پلامیس ۱۹
- شکل ۲-۴ شناور OPT ۲۰
- شکل ۲-۵ مبدل انرژی انرژتیک ۲۱
- شکل ۲-۶ نمای کلی از طریقه استحصال انرژی از گردابه‌ها ۲۲
- شکل ۲-۷ نمای شماتیک از دستگاه ۲۳
- شکل ۲-۸ مجموعه‌ی سیلندرها ۲۶
- شکل ۲-۹ مقایسه هزینه سوخت‌های قدیم و جدید و مبدل گردابه ۲۸
- شکل ۲-۱۰ نسبت دامنه‌ی بی‌بعد به سرعت بی‌بعد در سیال هوا (فنگ) و سیال آب (خلک و ویلیامسون) ۳۱
- شکل ۲-۱۱ الگوهای شکل‌گیری گردابه‌ها ۳۲
- شکل ۲-۱۲ مبدل تولید توان از ارتعاشات ناشی از گردابه در دانشگاه میشیگان ۳۳
- شکل ۳-۱ نمایش شبکه بندی در نرم افزار پاراویو (نمای نزدیک سیلندر)..... ۳۹
- شکل ۳-۲ نمایش شبکه بندی در نرم افزار پاراویو (هندسه ی کلی)..... ۳۹
- شکل ۳-۳ شکل ریزش گردابه‌ها پشت سیلندر ثابت با عدد رینولدز ۱۰۰..... ۴۱
- شکل ۳-۴ مقایسه‌ی مقادیر ضریب پسا در پژوهش حاضر و کار عددی پلازک..... ۴۲
- شکل ۳-۵ مقایسه‌ی مقادیر ضریب برآ در پژوهش حاضر و کار عددی پلازک..... ۴۲

- شکل ۳-۶ عدد استروهاال در محدوده ی اعداد رینولدز ۵۰ تا ۱۵۰..... ۴۴
- شکل ۳-۷ مقایسه ضرایب برآ با کار عددی آنانگناستوپولوس..... ۴۵
- شکل ۳-۸ نمودارهای ضریب لیفت در نسبت فرکانسی (F) و نسبت دامنه های مختلف (A)..... ۴۷
- شکل ۳-۹ نمودار ضریب برآ در نسبت فرکانس های مختلف برای استوانه با مقطع دایره در
 $A/d=0.17$ ۴۷
- شکل ۳-۱۰ نمودار ضریب برآ برای مقطع مربعی در $A/d=0.5$ و $F=0.9$ ۴۹
- شکل ۳-۱۱ نمودار ضریب برآ برای مقطع مربعی در $A/d=0.5$ و $F=1.3$ ۴۹
- شکل ۳-۱۲ ضریب برآ بیشینه..... ۵۰
- شکل ۳-۱۳ بررسی نمودار ضریب برآ با تغییر نسبت فرکانسی در ۴ نسبت A/d مختلف..... ۵۱
- شکل ۳-۱۴ مقایسه نمودار ناحیه قفل شونددگی برای استوانه دایره ای با نتایج عددی دیگر..... ۵۲
- شکل ۳-۱۵ شبکه بندی هندسه های مختلف..... ۵۲
- شکل ۳-۱۶ مقایسه نمودار ناحیه قفل شونددگی برای استوانه با مقاطع مختلف..... ۵۳
- شکل ۳-۱۷ اجزای سیلندر در مدل 6dof..... ۵۴
- شکل ۳-۱۸ نتایج حاصل از شبیه سازی جابجایی آزاد سیلندر در محدوده ی عدد رینولدز ۹۵ تا
 ۱۴۰..... ۵۵
- شکل ۳-۱۹ مقایسه نسبت دامنه به جرم بی بعد در میرایی..... ۵۶
- شکل ۳-۲۰ مقایسه نسبت دامنه در سختی های متفاوت فنر..... ۵۸
- شکل ۳-۲۱ نسبت دامنه ی نوسان به قطر در رینولدز های بین ۱۰۰ تا ۱۴۰ برای مقاطع مختلف..... ۵۹
- شکل ۴-۱ زمان در مقابل ولتاژ..... ۶۸
- شکل ۴-۲ نمونه سه بعدی مبدل VIVACE..... ۷۷
- شکل ۴-۳ تعرفه خرید برق..... ۸۳

فهرست جدول‌ها

۲۷	جدول ۱-۲ مشخصات طراحی برای نیروگاه‌های گردابه‌ای
۴۰	جدول ۱-۳ مقایسه شبکه‌های مختلف برای حل مستقل از شبکه
۴۷	جدول ۲-۳ میزان مقادیر مختلف نسبت‌فرکانسی (F) و نسبت‌دامنه‌های مختلف (A)
۷۰	جدول ۱-۴ فرض‌ها و اعداد مورد بحث
۷۶	جدول ۲-۴ ماژول‌های انرژی استحصالی توسط گردابه
۸۰	جدول ۳-۴ قیمت تجهیزات مورد نیاز برای مدل
۸۲	جدول ۴-۴ نتایج آزمایشگاهی
۸۴	جدول ۴-۵ پلکان‌های قیمت برق مصرفی در سال‌های ۹۳ و ۹۴

فهرست نشانه‌ها

A	نسبت جابجایی سیلندر به قطر.....
A_c	مساحت مقطع عرضی سیلندر.....
a_{max}	حداکثر نوسانات سیلندر.....
B	شدت میدان مغناطیسی.....
C_d	ضریب پسا.....
C_l	ضریب برآ.....
D	قطر سیلندر.....
D_H	قطر هیدرولیکی.....
E	انرژی.....
F	نسبت فرکانس سیلندر به فرکانس استروهاال.....
F_d	نیروی پسا.....
F_l	نیروی برآ.....
f_n	فرکانس ریزش گردابه‌ها (فرکانس استروهاال).....
f_v	فرکانس نوسانات سیلندر.....
K	ضریب سختی فنر.....
L	طول سیلندر.....
m	جرم سیلندر.....
m^*	نسبت جرم سیلندر به جرم مساوی از سیال.....
m_{sys}	جرم قسمت متحرک سیلندر.....

P توان

P_{act} توان واقعی

P_{input} توان ورودی

P_{output} توان خروجی

P_{total} توان کلی

R مقاومت

Re عدد رینولدز

St عدد استروهمال

t زمان

U سرعت

U^* سرعت بی‌بعد

V ولتاژ

فهرست نشانه‌ها یونانی

γ ویسکوزیته دینامیکی

ϵ نیروی الکتروموتیو

ξ ضریب میرایی

η راندمان

ρ چگالی

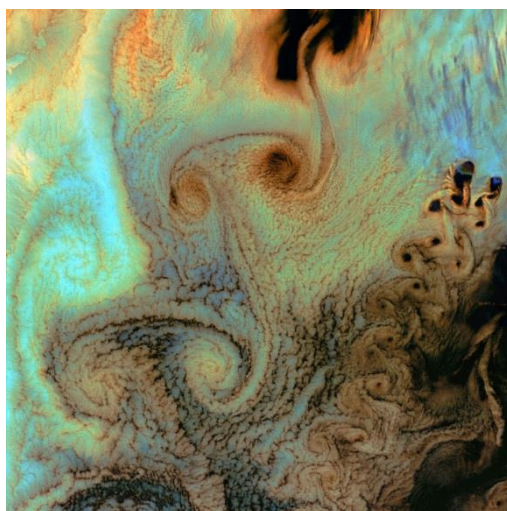
ν ویسکوزیته جنبشی

ω سرعت زاویه‌ای سیلندر

فصل ۱ مقدمه ای بر ارتعاشات ناشی از گردابه ها

۱-۱- مقدمه

اصولاً به حرکت ارتعاشی اجسامی که به طور عمودی در برابر جریان یک سیال قرار گرفته باشند، ارتعاشات خودمحرک ناشی از گردابه گفته می‌شود. به راحتی می‌توان با قراردادن انتهای لوله‌ای درون یک استخر و حرکت آن در جهت عمود بر محور استوانه این پدیده را تجربه کرد. علت بروز آن نیز به وجود آمدن گردابه‌هایی در بالا و پایین استوانه و جداسدن آنها است. این گردابه‌ها، که دسته گردابه های فون کارمن^۱ نامیده می‌شوند، معمولاً از جریان سیال روی استوانه هایی با ابعاد چند میلی متر تا جریان‌های شدید باد روی کوه‌ها قابل مشاهده‌اند.

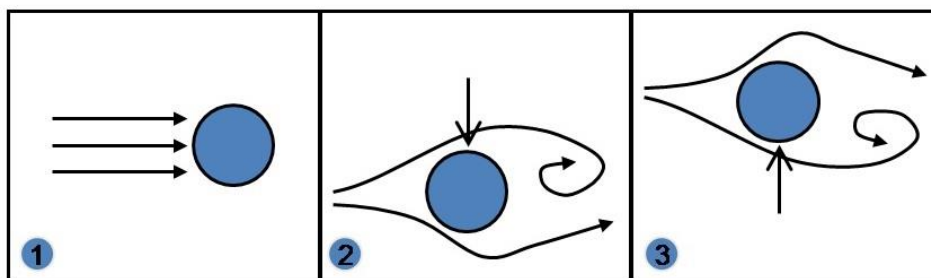


شکل ۱-۱- نمایی از گردابه‌های تشکیل شده به وسیله ابرها [63]

وجود گردابه به معنای به وجود آمدن ناحیه‌ای کم‌فشار است و این معادل وارد شدن یک نیروی برآ روی سیلندر می‌باشد. این حرکات ارتعاشی برای اجسام الاستیک^۲، که در معرض جریان‌های یکنواختی قرار گرفته‌اند، می‌تواند بسیار پر دامنه باشد.

^۱ Theodore von Kármán

^۲ Elastic



- 1 Water flow direction
- 2 VIV moves cylinder downward
- 3 VIV moves cylinder upward

شکل ۱-۲ چگونگی نوسان سیلندر توسط گردابه‌ها [26]

اگر فرکانس ایجاد گردابه در پشت سازه به یکی از فرکانس‌های طبیعی خود سازه نزدیک شود، حرکت گردابه‌ها با ارتعاشات سازه، کوپل و باعث ایجاد یک نیروی نوسانی قوی روی سازه خواهد شد. این پدیده در بسیاری از سازه‌های مهندسی هم‌چون بال هواپیماها، پره‌ی توربین‌ها، لوله‌ی مبدل‌های حرارتی، خطوط انتقال نیرو، پل‌ها، آسمان‌خراش‌ها، خطوط لوله، دودکش‌ها، رایزرها و کابل‌های زیر آب مشهود است [1]. فروپاشی پل تاکوما^۱، در سال 1940 میلادی، و برج‌های خنک‌کن فری‌بریج^۲، در سال 1965 میلادی، نمونه‌های مشهوری از اثر ارتعاشات خودمحرک ناشی از جریان گردابه‌ها بر سازه‌های مهندسی است.

^۱ Tacoma Bridge

^۲ Freebridge



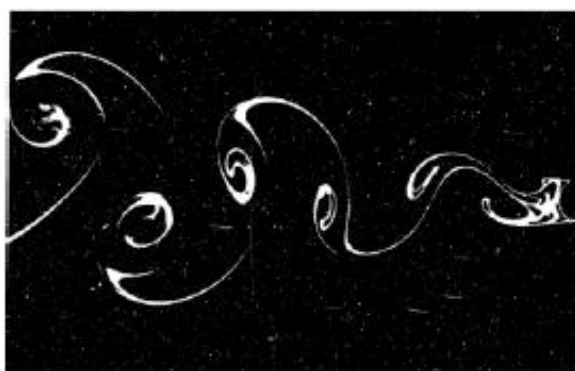
شکل ۱-۳ عکس از تخریب پل تاکوما در ۱۹۴۰ توسط ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها [64]



شکل ۱-۴ تخریب برج خنک کن‌های فری بریج توسط ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها [64]

معمولا حرکت ارتعاشی جسم، الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که این پدیده دارای ماهیتی غیرخطی است. این امر باعث شده است که نه تنها خود جریان، بلکه اثر متقابل سیال و سازه نیز مورد توجه محققان قرار گیرد.

هنگامی که سیال از پیرامون یک جسم غیر خط جریانی عبور می‌نماید، میدان فشار در جریان نیز دست‌خوش تغییر می‌گردد. گرادیان^۱ فشار در نزدیکی لبه پایین‌دست جسم به‌گونه‌ای است که لایه مرزی از سطح جسم جدا می‌گردد. با حرکت این لایه‌ی برشی در دنباله جسم، ذرات داخلی لایه سیال آرام تر از ذرات بیرونی حرکت نموده و سبب پیچ خوردن لایه‌ی برشی و تشکیل گردابه‌ها می‌گردند. با جدا شدن متناوب این گردابه‌ها از دو طرف یک جسم مانند یک استوانه، خیابان گردابه‌ای آشنای کارمن تشکیل می‌گردد. (شکل ۱-۵)



شکل ۱-۵ خیابان گردابه ای فون کارمن [12]

بسیاری از سازه‌ها هم‌چون ساختمان‌ها، خطوط لوله، کابل‌ها، پل‌ها و دودکش‌ها از شکل آیرودینامیکی^۲ مناسبی برخوردار نیستند. همین امر سبب ایجاد پدیده‌ی جدایش، به هنگام اعمال جریان سیال روی آن‌ها می‌شود. اصطلاحا به چنین سازه‌هایی اجسام بلاف^۳ گفته می‌شود (بلاف اصطلاحا به شکل‌هایی هندسی گفته می‌شود که خاصیت آیرودینامیکی ضعیفی دارند و جریان در پشت آنها به راحتی دچار

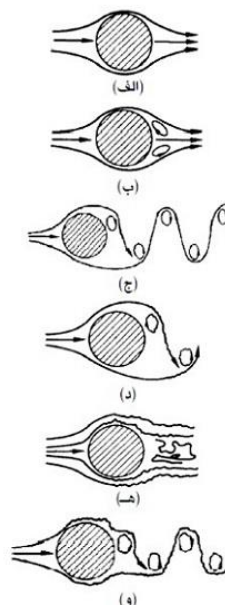
^۱ Gradient

^۲ Airodynamic

^۳ Bluff

جدایش می شود). هنگامی که اجسام بلافاصله در معرض جریان های عرضی قرار می گیرند، گردابه های تشکیل شده در پشت آن ها یکنواخت نمی شود، اما دارای الگوی مشخصی می باشند که در شکل ۱-۶ نمایش داده شده است.

وضعیت جریان	محدوده ی عدد رینولدز	قسمت
رژیم جریان بدون جدایش	$Re < 5$	قسمت الف
وجود یک جفت گردابه ثابت	$5 < Re < 40$	قسمت ب
دو رژیم که در آن ها جریان گردابه ها آرام است	$40 < Re < 90$ $90 < Re < 150$	قسمت ج
گذار از جریان گردابه های آرام به جریان گردابه های درهم جریان گردابه ها کاملاً درهم است	$150 < Re < 300$ $300 < Re < 3 \times 10^5$	قسمت د
جریان لایه مرزی از حالت آرام به درهم تبدیل شده، جریان گردابه ها باریک تر شده و درهم ریخته می شود	$3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$	قسمت ه
شکل گیری مجدد جریان درهم گردابه	$3 \times 10^6 < Re$	قسمت و



شکل ۱-۶ شکل جریان پشت سیلندر در عدد رینولدز های مختلف [12]

همان طور که در این شکل مشاهده می شود، الگوی شکل گیری گردابه ها به عدد رینولدز بستگی دارد. جزئیات مربوط به تغییرات رژیم جریان در گستره ی وسیعی از رینولدز در شکل ۱-۶ ذکر شده است [2]. ناگفته نماند که در برخی از منابع رژیم جریان با دقت بیشتری شناسایی شده است، به طوری که در بعضی از آن ها شاهد بیش از 15 نوع رژیم گوناگون جریان می باشیم [3 و 4].

یکی از معروف ترین مثال ها در این زمینه خرابی پل دره تاکوما در نیویورک می باشد. این پل به دلیل طراحی بسیار سبک خود نسبت به جریان های باد شدید بسیار حساس گردیده بود و به جای مقاومت در برابر نیروی باد شروع به تاب خوردن و نوسان می نمود. سرانجام این پل در تاریخ ۷ نوامبر ۱۹۴۰ بر اثر

یک باد با سرعت ۶۴ کیلومتر بر ساعت تخریب گردید (شکل ۱-۳). آگاهی از علل وقوع این فجایع به منظور جلوگیری از پیش آمدهای مشابه در آینده بسیار مهم می باشد. برای این منظور دو روش مکمل تحلیل ریسک و مطالعات دانشگاهی پیش روی قرار دارد. اولین روش به بررسی خطرات خرابی یا آسیب های احتمالی در سیستم های موجود و نیز نتایج این خرابی ها می پردازد. روش دوم به افزایش دانش ما در مورد این پدیده فیزیکی و تشخیص علل پدید آورنده آن می پردازد.

در مهندسی، شکل اجسام از اهمیت خاصی برخوردار می باشد و محاسبات نادرست یا کمبود اطلاعات در این زمینه می تواند منجر به فجایع بزرگی گردد. در این راستا دو سوال مطرح می باشد: به چه علت می بایست پدیده تولید گردابه را مورد بررسی قرار داد؟ علاوه بر این واقعیت که این پدیده بسیار جالب و پیچیده می باشد، می تواند یکی از پدیده های فیزیکی باشد که سرانجام سبب خرابی در سازه های مهندسی گردد. در حقیقت کارمن که پدیده خرابی پل تاکوما را مورد بررسی قرارداد اولین کسی بود که این خرابی را ناشی از تناوب تولید گردابه ها و تطابق فرکانس تولید گردابه^۱ با فرکانس طبیعی^۲ پل دانست.

بر اساس تعریف زاوکویچ^۳ [5] اعضای با هندسه ی غیر آیرودینامیک می توانند دارای لبه های تیز در محیط پیرامونی باشند مانند صفحات تخت یا منشورهای مثلثی، مستطیلی یا چندضلعی. همچنین اعضا غیرخط جریانی می توانند دارای محیط خمیده مانند استوانه های دایره ای یا بیضوی باشند. یکی از مشکلات بررسی جریان در اطراف اعضا با محیط منحنی، عدم ثابت بودن نقاط جدایی جریان و جابجایی آنها در ساختارهای متفاوت جریان می باشد (که البته این مساله در مورد اعضا با لبه های تیز نیز معمولاً وجود دارد). امروزه بر اساس مطالعات نظری، آزمایش ها و شبیه سازی های عددی، رفتار جریان در اطراف استوانه ها و پدیده تولید گردابه تا حدود زیادی شناخته شده است. در عوض مطالعات انجام شده بر روی سایر انواع استوانه ها مانند استوانه هایی با مقاطع غیر دایره ای علی رغم مطالعات انجام شده بر روی سایر

^۱ Vortex shedding frequency

^۲ Natural frequency

^۳ Zdravkovich

انواع استوانه‌ها مانند استوانه‌های مخروطی یا استوانه‌های پله‌ای علی‌رغم استفاده‌های آشکار صنعتی از آن‌ها مانند استفاده در پایه‌های سکوه‌های فراساحل و یا دودکش کارخانه‌ها، به صورت باور نکردنی کم می‌باشد.

ارتعاشات ناشی از گردابه خود زیر مجموعه ای از ارتعاشات ناشی از جریان می‌باشد. ارتعاشات ناشی از جریان به چهار دسته تقسیم بندی می‌گردند.

(۱) گالوپینگ^۱ یا تاخت یک پدیده‌ی خودتحریک^۲ شده ناشی از اندرکنش سازه و جریان^۳ می‌باشد که به وسیله ارتعاشات با دامنه بزرگ و فرکانس کم مشخص می‌گردد. این نوع ناپایداری سازه ای معمولاً در جهت عمود بر جریان به وجود می‌آید و با افزایش سرعت جریان، دامنه نوسانات افزایش خواهد یافت. این پدیده اولین بار در خطوط انتقال نیروی یخ‌زده که در معرض بادهای شدید قرار گرفته بود مشاهده گردید.

(۲) بال زدن^۴: پدیده بال زدن علی‌رغم شباهت بسیار با پدیده گالوپینگ، ترکیبی از حالت‌های ارتعاشی بوده و بنابراین بر خلاف پدیده گالوپینگ، لزوماً یک بعدی نخواهد بود. قابل توجه است که تمام مقاطع غیردایروی در معرض ناپایداری‌های بال‌زدن و گالوپینگ قرار دارند.

(۳) بافتینگ^۵: نوعی تحریک ایجاد شده توسط آشفتگی موجود در جریان می‌باشد. به عنوان نمونه این پدیده در ارتعاشات ایجاد شده توسط باد در پل‌ها و ساختمان‌ها قابل رویت است.

(۴) ارتعاشات ناشی از گردابه: در واژه ارتعاشات ناشی از جریان دو موضوع ارتعاش جریان نهفته است که این خود بیان‌کننده دو محیط فیزیکی مختلف، یعنی محیط سازه انعطاف پذیر که ارتعاش در آن ایجاد شده و محیط سیال که جریان در آن برقرار است، می‌باشد. بنابراین به

^۱ galloping

^۲ Self-induced

^۳ FSI (Fluid structure interaction)

^۴ fluttering

^۵ Buffeting

سادگی ادراک خواهد شد که ارتعاشات ناشی از جریان خود زیرمجموعه ای از مبحث کلی تر محیط های فیزیکی چندگانه، و در اینجا به طور خاص تر دو محیط فیزیکی سازه و سیال، می باشد. به منظور مطالعه ارتعاشات ناشی از گردابه سه رویکرد کلی وجود دارد: بررسی های نظری یا نیمه تجربی، مطالعات عددی و مطالعات آزمایشگاهی.

تا پیش از این تخمین اندرکنش های هیدرو الاستیک^۱ (اندرکنش سازه و آب) و ارتعاشات ناشی از گردابه عموماً بر اساس روش های نیمه تجربی انجام می گرفت. اما به دلیل پیچیدگی مساله اندرکنش سازه و سیال، مدل های نیمه تجربی و سایر مدل های نظری ناقص و در مواردی در حد یک مساله خاص باقی مانده اند. عموماً مدل های ساده شده، به نیروهای وارده مانند ضرایب جرم افزوده و پارامترهای اصلاح هندسه وابسته می باشند. بنابراین استفاده از روش های آزمایشگاهی و عددی اهمیت بیشتری پیدا نموده اند. انجام تحقیقات آزمایشگاهی یک روش وقت گیر و بسیار پرهزینه بوده و علاوه بر آن در بسیاری از موارد با محدودیت های شبیه سازی روبرو می باشد. همین مساله اهمیت استفاده از روش های عددی در شبیه سازی ارتعاشات ناشی از گردابه را بیش از پیش نمایان می سازد. اخیراً با گسترش دینامیک سیالات محاسباتی و دینامیک سازه محاسباتی، شبیه سازی عددی به صورت یک ابزار کارآمد و با دقت بالا در مطالعه ارتعاشات ناشی از گردابه بروز نموده است.

تغییر مکان های قابل توجه سازه های در معرض جریان از پیوند کامل سازه و سیال در مساله ارتعاشات ناشی از گردابه حکایت داشته و از این رو تحلیل کاملاً اندرکنش سازه و سیال را طلب می نماید.

از طرف دیگر موقعیت های بسیاری وجود دارد که در آن ها ستوانه های در یک آرایش خاصی کنار یکدیگر قرار می گیرند و در این حالت دیگر رفتاری مشابه استوانه های تکی نخواهد داشت. به عنوان مثال می توان به آرایش استوانه های در مبدل های حرارتی اشاره نمود. یکی از این آرایش ها حالتی است

^۱ Hydroelastic

که دو استوانه درست در پشت یکدیگر قرار می گیرند. بوکایان^۱ و گولا^۲ [7] و هوور^۳ ترانتافیلو^۴ [8] با بررسی استوانه های پشت هم به این نتیجه رسیدند که بر اساس سرعت کاهش یافته^۵، پاسخ های بدست آمده می تواند از نوع ارتعاشات ناشی از گردابه بوده و یا در سرعت های کاهش یافته بیشتر می تواند مشابه پدیده تاخت باشد. اثر ترکیبی اندر کنش گردابه ها به علت اثر نیروی عرضی میانگین که به صورت سختی اضافی عمل می نماید، منجر به ارتعاش استوانه پایین دست در فرکانسی بالاتر از فرکانس طبیعی استوانه می گردد و آسی^۶ و همکاران [9] و بیرمن^۷ این پدیده را ارتعاشات ناشی از سایه^۸ نامیدند. [10] بنابه نظر اکثر پژوهشگران بررسی اثر گروهی استوانه ها بر یکدیگر هنوز نیاز به مطالعات گسترده تری در این زمینه دارد. همچنین از آنجایی که پدیده ارتعاشات ناشی از گردابه پدیده ای کاملاً درگیر با هیدرودینامیک^۹ سیال می باشد، بخشی از توجهات می بایستی به این مساله معطوف گردد.

^۱ Bokaian

^۲ Geola

^۳ Hover

^۴ Triantafyllou

^۵ Reduced velocity

^۶ Assi

^۷ Bearman

^۸ Shadow vibration

^۹ Hydrodynamic

فصل ۲ مروری بر ادبیات تحقیق

۲-۱- مقدمه

تاریخچه ارتعاشات ناشی از گردابه به دوران باستان باز می‌گردد، زمانی که برای اولین بار متوجه شدند که با عبور بادها از رشته‌های آلات موسیقی، این رشته شروع به نوسان کرده و نوای خوش آهنگی از خود منتشر می‌نمایند [11]. مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده در مورد این پدیده بسیار گسترده است. به منظور اطلاعات بیشتر در این زمینه به مقالات مروری مانند بیرمن [12]، پارکینسون^۱ و ویلیامسون^۲ [13]، خلک^۳ و ویلیامسون [14] و ویلیامسون و گواردهان^۴ [15] ارجاع داد می‌شود. برای بررسی انرژی تولیدی توسط ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها در ابتدا لازم است انرژی‌های نو و انواع آن را بهتر شناخت.

۲-۲- انرژی‌های تجدیدپذیر

انرژی تجدیدپذیر که انرژی برگشت‌پذیر نیز نامیده می‌شود، به انواعی از انرژی می‌گویند که منبع تولید آن نوع انرژی، بر خلاف انرژی‌های تجدیدناپذیر (فسیلی)، قابلیت آن را دارد که توسط طبیعت در یک بازه زمانی کوتاه مجدداً به وجود آمده یا به عبارتی تجدید شود.

در سال‌های اخیر با توجه به این که منابع انرژی تجدیدناپذیر رو به اتمام هستند این منابع مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۰۶ حدود ۱۸٪ از انرژی مصرفی جهانی از راه انرژی‌های تجدیدپذیر بدست آمد. سهم زیست‌توده به‌طور سنتی حدود ۱۳٪، که بیشتر جهت حرارت دهی و ۳٪ انرژی آبی بود. ۴/۲٪ باقی‌مانده شامل نیروگاه‌های آبی کوچک، زیست توده مدرن، انرژی بادی، انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی و سوخته‌های زیستی می‌باشد که به سرعت در حال گسترش هستند.

^۱ Parkinso

^۲ Williamson

^۳ Khalak

^۴ Govardhan

استفاده از انرژی بادی با رشدی سالانه حدود ۳۰٪ با ظرفیت نصب شده ۱۵۷۹۰۰ مگاوات در سال ۲۰۰۹، به صورت وسیعی در اروپا، آسیا و ایالات متحده به چشم می‌خورد. در پایان سال ۲۰۰۹ میلادی مجموع انرژی تولیدی به وسیله فتوولتاییک به بیش از ۲۱۰۰۰ مگاوات رسید. ایستگاه‌های انرژی گرما-خورشیدی در آمریکا و اسپانیا مشغول به کار می‌باشند که بزرگترین آنها با ظرفیت ۳۵۴ مگاوات در بیابان موهاوی در حال کار است [16].

بزرگترین نیروگاه زمین گرمایی دنیا در کالیفرنیا با نام نیروگاه گیسرز با ظرفیت ۷۵۰ مگاوات در حال فعالیت می‌باشد. برزیل یکی از کشورهایی است که پروژه‌های بزرگی برای استفاده از انرژی‌های نو (انرژی‌های تجدیدپذیر) انجام می‌دهد. ۱۸٪ از کل مصرف سوخت اتوموبیل‌های برزیل از طریق سوخت اتانولی که از ساقه‌ی نیشکر به دست می‌آید تأمین می‌شود. سوخت اتانولی به صورت گسترده در ایالات متحده مورد استفاده قرار می‌گیرد [19].

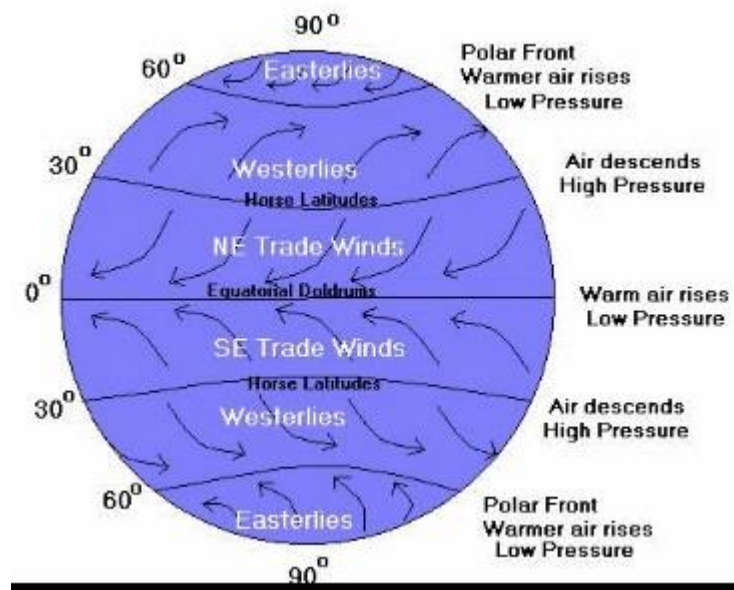
بیشترین پروژه‌ها و محصولات انرژی‌های نو در مقیاس بزرگ موجود می‌باشند، ولی انرژی‌های نو را می‌توان در مقیاس‌های کوچک (نیروگاه کوچک خارج مدار یا نیروگاه کوچک مدار بسته) هم استفاده کرد. به این دلیل که منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در تمام نقاط کره‌ی زمین در دسترس می‌باشند، در حواشی و در جاهای دور افتاده، نقش انرژی‌های نو به خوبی نمایان می‌شود، در حالی که منابع سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز، و زغال سنگ) فقط در کشورهای خاصی یافت می‌شود. کنیا دارای بالاترین نرخ سالانه فروش سیستم‌های کوچک خورشیدی (۲۰-۱۰۰ وات) به میزان ۳۰۰۰۰ سیستم در سال می‌باشد.

نگرانی درباره‌ی تغییرات زیست محیطی در کنار افزایش قیمت روزافزان نفت و اوج تولید نفت و حمایت دولت‌ها، باعث رشد روزافزون وضع قوانینی می‌شود که بهره‌برداری و تجاری سازی این منابع سرشار تجدیدپذیر را تشویق می‌کنند.

۲-۳- انرژی باد

مکانیزم پیدایش باد و انواع کاربردهای انرژی بادی

تشعشعات دریافتی خورشید توسط زمین، موجب گرم شدن هوای اتمسفر شده و به همین دلیل هوا به سمت بالا حرکت می‌کند. شدت این گرمایش در استوا؛ جایی که خورشید عمود می‌تابد؛ بیشتر از هوای اطراف قطبین؛ جایی که زاویه تابش خورشید تند می‌باشد؛ خواهد بود و هوای اطراف قطبین نسبت به هوای استوا کمتر گرم می‌گردد. چگالی هوا با افزایش دما کاهش پیدا کرده و بنابراین هوای سبکتر استوا به سمت بالا حرکت کرده و در اطراف پخش می‌گردد. این عمل موجب افت فشار در این ناحیه گردیده و موجب می‌گردد هوای سرد از قطبین به سمت استوا جذب گردند.

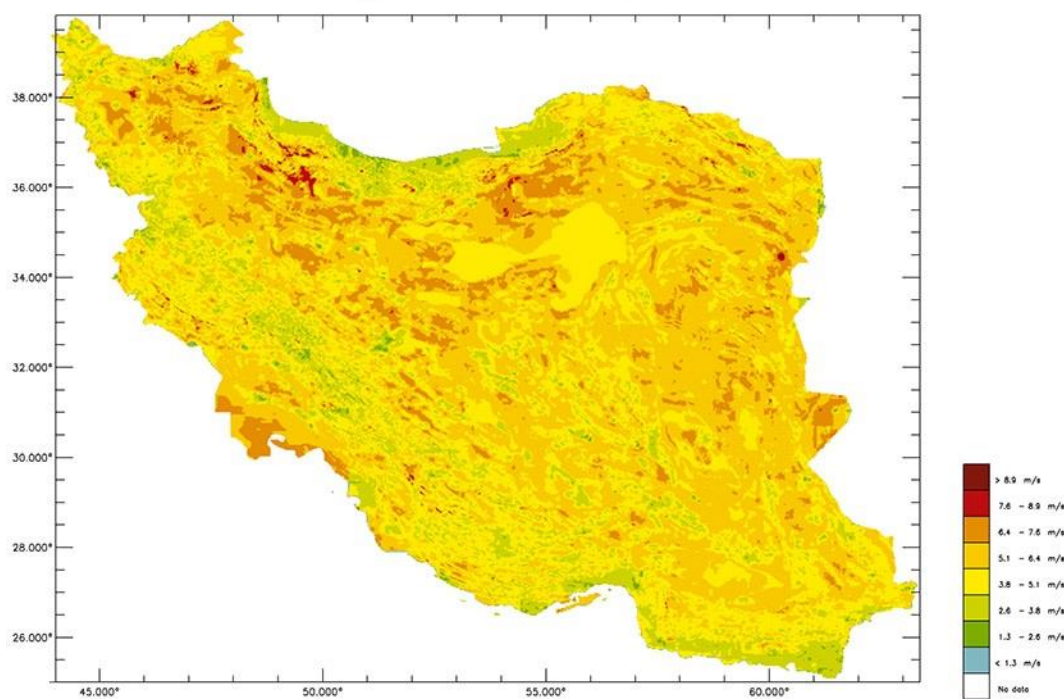


شکل ۲-۱ مکانیزم پیدایش باد [65]

همچنین وقتی خورشید در طول روز می‌تابد، هوای روی سرزمین‌های خشک سریع‌تر از هوای روی دریاها و آب‌ها گرم می‌شود. هوای گرم روی خشکی بالا رفته و هوای خنک‌تر و سنگین‌تر روی آب جای آن را می‌گیرد که این فرآیند بادهای محلی را می‌سازد این به آن معناست که روز از سمت دریا به سمت ساحل باد می‌وزد. در شب، از آنجا که هوا روی خشکی سریع‌تر از هوای روی آب خنک می‌شود، جهت

باد برعکس می‌شود. بنابراین باد به علت گرادیان فشار به وجود آمده از تابش غیر یکنواخت خورشید به سطح زمین به وجود می‌آید.

مروزه از انرژی بادی جهت تولید الکتریسیته، پمپاژ آب از چاه‌ها و رودخانه‌ها، آرد کردن غلات، کوبیدن گندم، گرمایش خانه و مواردی نظیر این‌ها می‌توان استفاده نمود. استفاده رایج از انرژی بادی در توربین‌های بادی و به منظور تولید الکتریسته به کار گرفته می‌شوند.



شکل ۲-۲ نقشه‌ی پتانسیل بادی در ایران [65]

۲-۴- انرژی آبی

انرژی آبی^۱ یا انرژی هیدرولیک، انرژی یا نیرویی است که از حرکت آبی بدست می‌آید که ممکن است برای اهداف مفید مهار شود. انرژی آب مانند انرژی خورشید از منابع طبیعی انرژی می‌باشد این انرژی به دلیل حرکت و سرعت آن می‌باشد که با ایجاد سد در مقابل رودخانه‌ها می‌توان انرژی جنبشی را به انرژی پتانسیل ذخیره کرد حتی آبشارها نیز به خاطر ارتفاع زیادی که از سطح زمین دارند و به خاطر وزش باد دارای منبع عظیمی از انرژی آب می‌باشند.

نیروهای گرانشی مابین ماه و خورشید و زمین سبب بالا و پایین رفتن منظم آب اقیانوس‌ها در سراسر جهان گردیده که نتیجه آن امواج جزر و مدی می‌باشد. ماه نیرویی بیش از دو برابر نیرویی که خورشید بر امواج جزر و مد وارد می‌نماید اعمال می‌کند در نتیجه جزر و مد به وضوح تابعی است از گردش ماه به دور زمین ایجاد موج در روز و سیکل جزر در سطح هر جزئی از اقیانوس وجود دارد با وجود کم بودن دامنه ارتفاع موج جزر و مد در اقیانوس‌های آزاد به علت آشفتگی بالا دارای جابه جایی نسبتاً قابل توجهی می‌باشند.

۲-۵- استحصال انرژی از اقیانوس

اصولاً هر وسیله ای که با هدف استحصال انرژی از اقیانوس یا هر منبع آبی دیگر ساخته می‌شود، باید دارای چند ویژگی باشد؛ مثلاً باید:

۱. چگالی انرژی بالایی داشته باشد.
۲. محیط زیست را تهدید نکند.
۳. تعمیر و نگهداری آن مشکل نباشد.

^۱ Hydropower

۴. عمر مفید خوبی داشته باشد.

امروزه اقیانوس‌ها یکی از منابع نامحدود انرژی به شمار می‌روند. این منابع انرژی، پاک و تجدیدپذیراند. از انواع انرژی‌های اقیانوسی می‌توان به انرژی حاصل از موج‌ها، جریان‌ها، جزو مد، گرادیان دما و شوری آب اشاره کرد [16,17].

امروزه به دلیل نیاز روز افزون بشر به انرژی و خطر پایان یافتن منابع تجدیدناپذیر، بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر، همچون انرژی موجود در اقیانوس‌ها، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. از این رو سازمان‌های مربوطه (همچون کمیسیون انرژی کالیفرنیا^۱ و وزارت انرژی آمریکا^۲) ویژگی‌هایی را مشخص کرده‌اند تا به وسیله‌ی آن بتوان منابع انرژی اقیانوسی را، که قابلیت استفاده تجاری دارند، شناخت. این ویژگی‌ها عبارتند از:

- ۱- داشتن چگالی انرژی بالا
- ۲- عدم ایجاد محدودیت برای دریانوردی
- ۳- عدم تخریب نواحی با ارزش ساحلی
- ۴- دوستدار محیط زیست و زندگی آبزیان
- ۵- حداقل نیاز به تعمیر و نگهداری
- ۶- استحکام و قدرت بالای سازه
- ۷- داشتن حداقل ده تا بیست سال عمر مفید کاری

در ادامه به چند نمونه از ارضانشدن پاره‌ای از شرایط توسط این دستگاه‌ها (مبدل‌های انرژی) اشاره می‌شود.

^۱ CEC

^۲ EMU

الف: مبدل‌هایی که براساس نوسانات سطحی یا امواج کار می‌کنند (مانند ستون‌های آب^۱، شناورها^۲، فلپ‌ها^۳ یا پاندول‌ها^۴) خروجی انرژی بالایی دارند اما فقط در یک محدوده‌ی فرکانسی خاص. نامنظم بودن روند شکل‌گیری امواج باعث شده است تا این دستگاه‌ها شانس کمی برای نشان دادن بازدهی بالای خود داشته باشند.

ب: مبدل‌هایی که با جریان (مثل جریان جزرومد) کار میکنند (مانند توربین‌ها یا آسیاب‌های آبی)، انرژی را متناسب با سطح مقطعشان با بازده^۵ ۱۵ تا ۳۰ درصد استخراج میکنند، اما فقط برای جریانهای سریع‌تر از ۲ متر بر ثانیه. در جریانهای ضعیف‌تر بازدهی آنها بسیار افت می‌کند.

ج: مبدل‌های جزرومدی حداقل به ۵ متر ارتفاع ستون آب^۵ نیاز دارند و به بزرگی سدها هستند. همچنین برای ساخت، به ۵ تا ۷ سال زمان نیاز دارند و هزینه‌ی ساخت آنها بسیار زیاد است. بیشتر این مبدل‌ها روی سطح فعالیت می‌کنند و باعث اشغال فضای با ارزش موجود در ساحل میشوند.

د: مبدل‌هایی چون توربین‌های آبی یا سدهای جزرومد زندگی موجودات آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

برای بررسی بهتر در این بخش از دو روش متفاوت استفاده شده است. در ابتدا مبدل گردابه با منابع انرژی قدیمی و منابع انرژی جایگزین براساس اطلاعات موجود در منبع [18] مقایسه شده است.

اما روش دوم، براساس مقایسه‌ی مبدل گردابه با دیگر روش‌های مطرح استحصال انرژی از امواج است. این روش به‌دلیل نبود اطلاعات کافی مشکل می‌باشد. مبدل‌های انتخاب شده برای

^۱ Water column

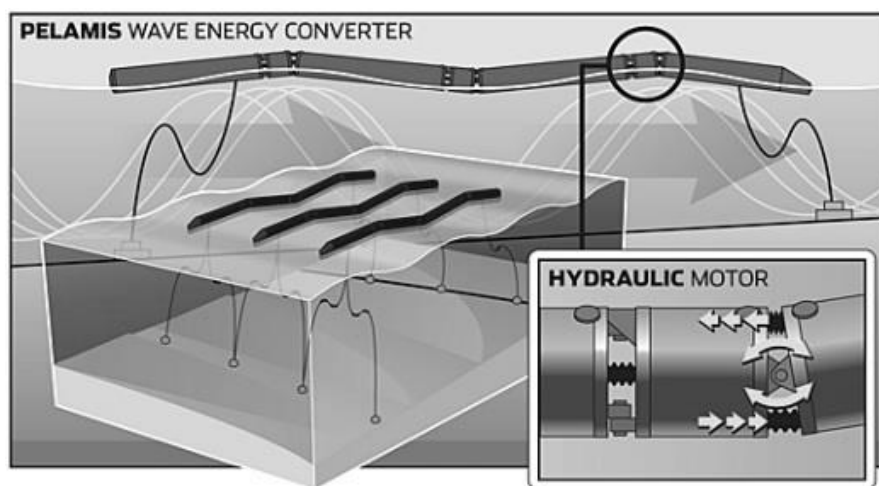
^۲ Floater

^۳ Flaps

^۴ Pendulum

^۵ Head

مقایسه، پلامیس^۱ [۲۰ و ۲۱] شناور ا. پی. تی^۲ [۲۲ و ۲۳] و انرژیتک^۲ [۲۰ و ۲۴ و ۲۵] میباشند. در ادامه به توضیح مختصری درباره هر یک از روشهای استحصال انرژی اقیانوس می پردازیم. **پلامیس:** از جمله مبدل های انرژی اقیانوسی است که روی سطح اقیانوس نصب میشود و به گونه ای طراحی شده است که میتواند به صورت یک مجموعه کنار هم قرار بگیرد [۲۰ و ۲۱ و ۲۲]. این وسیله شبیه به یک سیلندر بلند است که به چهار قسمت تقسیم شده و توسط سه لولا به یکدیگر متصل شده است. وجود لولاها باعث میشود تا در پی تغییر پروفیل سطح آب به وسیله امواج، استوانه ها به شکل سطح درآیند. لولاها به تلمبه های هیدرولیک مجهزند که می توانند انرژی حرکت نسبی استوانه ها را استخراج کرده، به کمک ژنراتورهایی به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. این وسیله در سال ۱۹۹۸ میلادی طراحی شده است. این وسیله در مکانی با عمق ۵۰ تا ۶۰ متر و با فاصله ۵۰ تا ۱۰ کیلومتری از ساحل لنگر انداخته و نصب می شود.



شکل ۲-۳ مبدل پلامیس [21]

شناور ا. پی. تی: از جمله مبدل های شناور انرژی اقیانوسی است که به بستر دریا متصل می شود و به یک شناور مجهز است که روی سطح قرار گرفته و با سطح آب بالا و پایین می رود. در این

^۱ Pelamis

^۲ OPT

شناور، یک ژنراتور انرژی مکانیکی نوسانات شناور را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این وسیله به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند به صورت یک مجموعه‌ی تولید انرژی به کار رود. [۲۳] جریان الکتریکی تولیدشده در این شناور به وسیله‌ی کابلی از کف دریا به خشکی منتقل می‌شود. این وسیله در سال ۱۹۹۴ م طراحی و برای نخستین بار، در سال ۱۹۹۷ میلادی، در نیوجرسی^۱ آمریکا آزمایش شده است. همچنین یک نیروگاه ۵۰ کیلوواتی از آن در هاوایی^۲ نصب شده است و شرکت بهره‌بردار آن قصد دارد نیروگاهی ۱۰ مگاواتی از آن را نیز در انگلستان نصب کند.

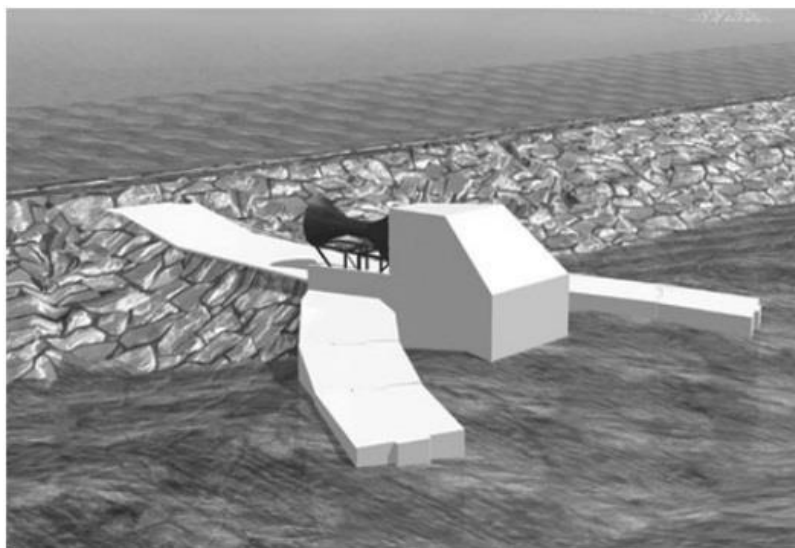


شکل ۲-۴ شناور OPT [23]

مبدل انرژی بیک: ایده اولیه‌ی این وسیله در سال ۱۹۹۲ میلادی در استرالیا مطرح و ساخت نخستین مدل و آزمایش روی آن در سال ۱۹۹۷ م انجام شد. اولین نمونه‌ی آن با ابعاد واقعی در لنگرگاه بندر کمبلا^۳ نصب شده و هم اکنون مشغول به کار است. این دستگاه معمولاً روی بستر دریا یا در عمق‌های کم نصب می‌شود. امواج دریا باعث دمیدن هوا در یک توربین شده و توربین یک ژنراتور را به حرکت درمی‌آورد.

^۱ Newjersy

^۲ Hawaie

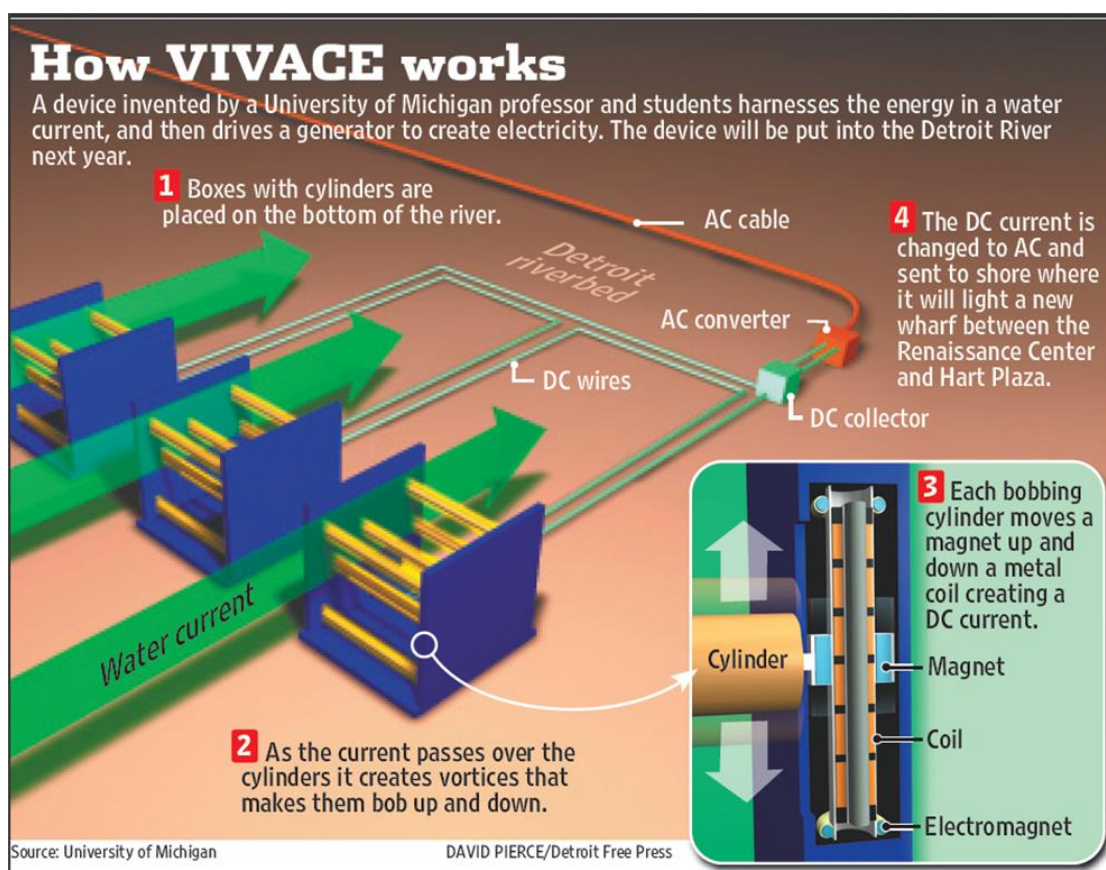


شکل ۲-۵ مدل انرژی‌تیک [20]

مدل گردابه: در این مقاله با این وسیله آشنا می‌شویم ایده‌ی اولیه‌ی این مدل در سال ۲۰۰۳ میلادی مطرح شد و سه مدل گوناگون از آن در آزمایشگاه هیدرودینامیک دریایی دانشگاه میشیگان^۱ در سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ میلادی آزمایش شد. چون چگالی انرژی به اندازه نیروگاه و جزئیات طراحی وابسته است یکی از طراحی‌های قابل قیاس از جدول ۲-۱ برای مقایسه‌ی این روش‌ها انتخاب شده است. توان این مولد ۱۰۰ کیلووات است که میتوان از آن به‌عنوان یک نیروگاه کوچک استفاده کرد. همچنین یکی از واحدهای نیروگاه چند مگاواتی نیز برای مقایسه به عنوان یک واحد مولد گردابه با توان ۷/۶ کیلووات انتخاب شده است. درصد دسترسی^۲ (درصد زمانی که نیروگاه قادر است توان طراحی شده را تولید کند) برای مولد گردابه ۹۰٪ است. کاهش ۱۰ درصدی نیز به دلیل وجود زمان‌هایی برای تعمیر و نگهداری و نیز زمان تغییر جهت جریان است.

^۱ Michigan University

^۲ Avalibility



شکل ۲-۶ نمای کلی از طریقه استحصال انرژی از گردابه‌ها [26]

۲-۶- استحصال انرژی پاک از آب به کمک ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها

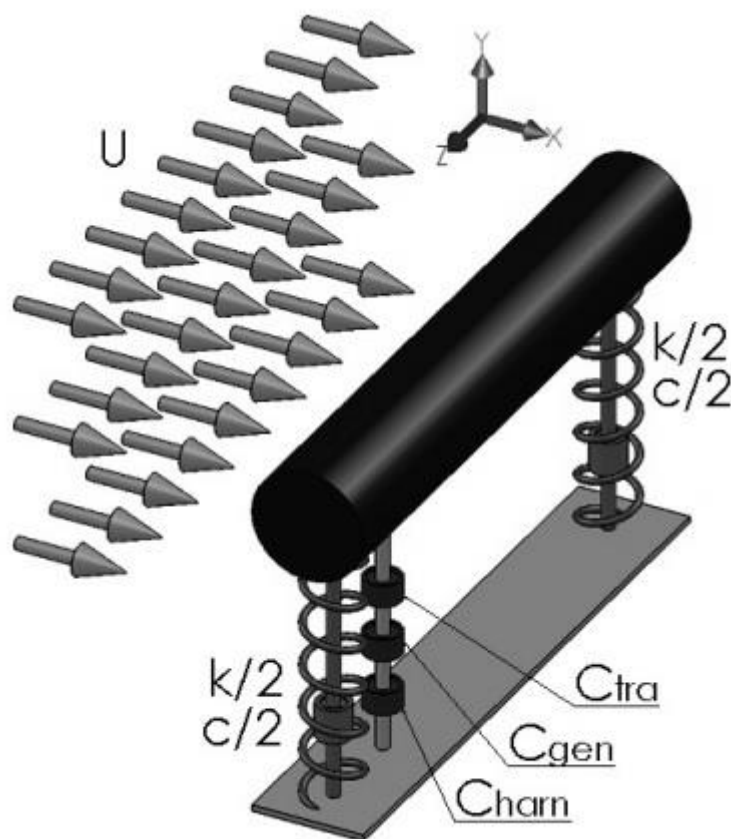
ایده‌ی اصلی این روش، تقویت و استفاده از گردابه‌های تشکیل شده در پشت اجسام استوانه‌ای است، نه میرا کردن آنها. این روش با تمام روش‌های ثبت شده و مورد استفاده برای تولید انرژی متفاوت است.

نخستین بار پروفسور مایکل برنیتساس^۱، در سال ۲۰۰۵ چنین ایده‌ای را مطرح کرد. از آن زمان تاکنون نیز دانشگاه میشیگان^۲ مرکز اصلی تحقیقات روی این موضوع بوده است. نخستین مقاله علمی در این زمینه توسط برنیتساس، در سال ۲۰۰۸ [26] منتشر و بازدهی این دستگاه محاسبه شده است. مبدل گردابه از یک جسم صلب تشکیل شده است که به صورت الاستیک روی پایه‌ای نصب

^۱ Bernitsas

^۲ Michigan University

می‌شود و در معرض جریان سیال قرار می‌گیرد. انرژی مکانیکی حاصل از ارتعاشات استوانه نیز توسط یک سیستم انتقال قدرت به یک ژنراتور منتقل می‌شود. در شکل ۲-۸ نمایی شماتیک از این دستگاه نمایش داده شده است.



شکل ۲-۷ نمایی شماتیک از دستگاه [26]

به طوری که در این شکل U سرعت جریان، K ضریب سختی فنر ها، C ضریب میرایی است. در ادامه به بررسی چهار اصل اساسی عملکرد این دستگاه می‌پردازیم.

ارتعاشات ناشی از گردابه یک سیلندر صلب که به صورت الاستیک روی پایه نصب شده است:

بیش از یک‌صد سال از مطالعه‌ی پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌گذرد. جدا شدن متوالی گردابه‌ها باعث به وجود آمدن نیروی نوسانی متقارن می‌شود. استوانه‌ی قرار گرفته در این وضعیت

در جهت عمود بر محور خود و جریان شروع به نوسان می‌کند و از سیال انرژی می‌گیرد. این پدیده کاربردهای بسیاری دارد که از جمله:

۱- کاربردهای دریایی (مثل لوله‌ها، رایزرهای زیرآب، کابل‌ها و پایه‌ی سکوه‌های حفاری و استخراج)

۲- کاربردهای هسته‌ای (مثل میله‌های کنترل موجود در راکتورها)

۳- کاربردهای مکانیکی (مثل مبدل‌های حرارتی)

۴. کاربردهای عمرانی (مثل پل‌ها، برج‌ها و پایه‌ی پرچم‌ها)

در همه‌ی این موارد تلاش شده است تا این ارتعاشات میرا شوند، اما مبدل گردابه سعی می‌کند تا، با وجود میرایی بالا، این حرکات ارتعاشی را برای استخراج انرژی بیشتر در بالاترین سطح ممکن حفظ کند.

رزونانس^۱ (تشدید) غیرخطی: این پدیده یکی از مشخصات ذاتی ارتعاشات ناشی از گردابه‌هاست. در بازه‌ی وسیعی از فرکانس در همسایگی فرکانس طبیعی، فرکانس تشکیل گردابه‌ها با فرکانس حرکت سیلندر یکسان شده، اصطلاحاً روی هم قفل می‌شوند. در این حالت دیگر فرکانس تشکیل گردابه‌ها از قانون استروهل پیروی نمی‌کند. اصطلاحاً به پدیده‌ی هماهنگی بین نوسانات سازه و گردابه‌های تشکیل شده همگام‌سازی^۲ گفته می‌شود. گستره‌ی همگام‌سازی به نسبت وزن سیستم بستگی دارد و در بازه‌ی وسیعی اتفاق می‌افتد. به علاوه دامنه‌ی ارتعاشات خاصیت خودمحدودکننده^۳ دارد. با علم به این موارد می‌توان پی‌برد که این پدیده خاصیت خودمحرک دارد. بنابراین کاملاً مشخص است که با یک پدیده‌ی کاملاً غیرخطی سروکار داریم. تجهیزات استحصال انرژی از اقیانوس که به وسیله‌ی قطعات متحرکی همچون شناورها و فلپ‌ها^۴ کار

^۱ Resonance

^۲ Synchronization

^۳ Selflimited

^۴ Flaps

می‌کنند. با رسیدن به رزونانس خطی بیشترین دامنه را از خود بروز می‌دهند. این امر باعث می‌شود که تنها در دامنه‌ی فرکانسی محدودی بیشترین کارایی را داشته باشند چون اساس کار مبدل گردابه را رزونانس غیرخطی تشکیل میدهد، در بازه‌ی فرکانسی بسیار وسیع‌تری بازده‌ی بالا دارد.

طول هم‌بستگی: در ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، طول هم‌بستگی برای جریان روی استوانه بدین شکل تعریف می‌شود: بیشترین طول استوانه، به طوری که گردابه‌های تولیدشده هم‌فاز بمانند. هرچه طول هم‌بستگی بیشتر باشد، نیروهای روی سیلندر بزرگتر خواهد بود. این طول در تئوری بینهایت است، اما در عمل نسبت طول به قطر سیلندر نباید بیشتر از ۲۰ باشد.

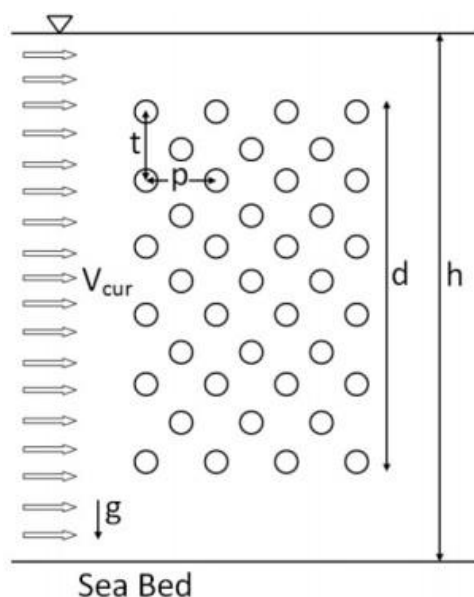
تبدیل انرژی: انرژی مکانیکی سیلندر می‌تواند توسط تسمه‌تایم یا هر سیستم انتقال قدرت دیگری^۱ به ژنراتور منتقل شود. حتی میتوان انرژی را به شکل مکانیکی با پمپاژ آب از سیستم خارج کرد. انرژی خارج شده، به هر شکل که باشد، برای سیستم حکم یک میراکننده‌ی مکانیکی دارد. اعمال میرایی بیش از حد (بالا بردن بیش از حد توان خروجی) باعث از بین رفتن ارتعاشات و از کار افتادن سیستم میشود. اعمال میرایی کم نیز باعث کاهش کارایی و اتلاف مقداری از انرژی توسط جریان می‌گردد. لذا انتخاب جرم، سختی و میرایی مناسب می‌تواند بازده‌ی مناسبی، در بازه‌ی همگام‌سازی گسترده، فراهم کند. با در نظر گرفتن این عوامل، طراحی‌های متعددی برای مبدل گردابه انجام شده است.

ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها برای هر جسم بلاف در معرض جریان اتفاق می‌افتد، سیستم انتقال قدرت و یاتاقان‌های خطی مبدل در زیر قابی پنهان شده تا احتمال وقوع ارتعاشات ناخواسته کم شود. البته علاوه بر پارامترهایی که برای یک مبدل گردابه تعریف کردیم، به

^۱ پیوست الف

چند پارامتر دیگر نیز نیازمندیم که وضعیت یک دسته از آنها را نسبت به یکدیگر و جریان مشخص می‌کند.

همانطور که در شکل زیر مشاهده میشود، h عمق آب، d ارتفاع مجموعه‌ی مبدل گردابه، t فاصله عمودی بین مرکز سیلندرها و در نهایت p فاصله افقی بین سیلندرهاست.



شکل ۲-۸ مجموعه‌ی سیلندرها [26]

طراحی، کاربرد و صحنه گذاری

در این بخش به نحوه‌ی طراحی مبدل گردابه و بررسی ویژگی‌های آن می‌پردازیم و آن را با دیگر منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مقایسه می‌کنیم.

طراحی: نیروگاه‌هایی که با مولدهای گردابه ساخته می‌شوند، سه ویژگی اساسی دارند. این نیروگاه‌ها انعطاف پذیر، مقیاس پذیر و مدولارند^۱. در ادامه به تشریح هر یک از این موارد می‌پردازیم. **مدولار:** معمولاً یک مجموعه‌ی مبدل گردابه از واحدهای کوچکتری تشکیل می‌شود. این واحدها می‌توانند از یک واحد، با سیلندری به قطر ۲ و طول ۳۰ تا ۴۰ سانتیمتر، تا هزاران سیلندر به قطر ۱ و طول ۲۰ متر باشند.

^۱ modoular

انعطاف پذیر: مبدل گردابه انعطاف پذیر خوانده می‌شود. چون در طراحی آن می‌توان روی پارامترهای متعددی مانور داد. برای کاربرد در اقیانوس یا رودخانه، برای جریان با ویژگیهای مشخص و توان موردنظر می‌توان پارامترهای طراحی را بهینه در نظر گرفت. تعدادی از این پارامترها عبارت‌اند از: تعداد سیلندرها، تراکم سیلندرها در فضا، ابعاد سیلندرها، مشخصات سطح سیلندرها مثل زبری و وضعیت قرارگیری سیلندرها نسبت به هم، وضعیت قرارگیری سیلندرها نسبت به پروفیل سرعت درون جریان، وضعیت نصب مجموعه نسبت به مقطع جریان، نسبت وزن سیلندرها، سختی فنر، و میرایی ناشی از استحصال انرژی.

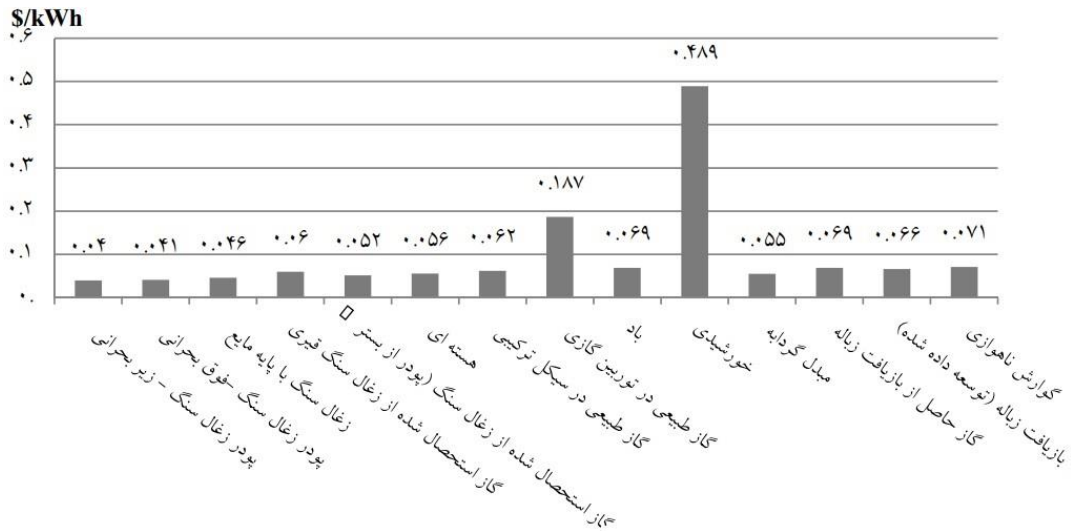
مقیاس پذیر: همانطور که قبلاً نیز بحث شد، ابعاد مبدل‌های گردابه می‌تواند متنوع باشد. این تنوع ناشی از شرایط طراحی برای توان خاص به‌وسیله‌ی جریانی با ویژگی‌های مشخص است. از جمله باید به مقدار عدد رینولدز در آن جریان توجه کرد.

کاربرد: مدولار بودن، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری باعث شده است که مبدل‌های گردابه برای گستره‌ی وسیعی از کاربردها مناسب باشند. در جدول ۱-۲ مشاهده می‌شود که، برحسب توان مورد نیاز مصرفی، پیشنهادهایی برای نیروگاه مولد گردابه داده شده است. این توان علاوه بر اینکه با ابعاد نیروگاه متناسب است، به اندازه‌ی سیلندرها و مکان قرارگیری آنها نسبت به هم نیز مرتبط می‌شود.

جدول ۱-۲ مشخصات طراحی برای نیروگاه‌های گردابه‌ای

مقیاس	توان	تعداد سیلندر	قطر (متر)	طول (متر)	ارتفاع (متر)	سطح (متر مربع)	وزن (کیلو تن)
گیگا	۱۰۰۰	۳۲۸۴۹	۲	۴۰	۶۰	۱۴۹۷۳۳۵	۱۷۷۵
مگا	۱۰۰	۶۵۷۰	۲	۲۰	۳۰	۲۵۸۹۹۸	۱۵۹
بزرگ	۱۰	۱۳۱۴	۱	۲۰	۱۵	۱۴۵۶۹	۱۱/۴
متوسط	۱	۵۲۶	۰/۵	۱۰	۱۵	۲۴۲۸	۱/۱
کوچک	۰/۱	۳۲۸	۰/۲	۴	۵	۹۲	۰/۱
میکرو	۰/۰۵	۶۵۷	۰/۱	۲	۵	۴۵	۰/۰۵

همچنین در شکل ۲-۱۰ مقایسه‌ی قیمت تمام شده‌ی انرژی تولیدی در این روش در قیاس با سایر روش‌های استحصال انرژی اعم از سوخت‌های فسیلی و منابع تجدید پذیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این روش استحصال انرژی نسبت به سایر رقبای خود، توان رقابتی بالایی دارد و می‌تواند یک روش نوین در تولید انرژی در جهان به حساب آید.



شکل ۲-۹ مقایسه هزینه سوخت‌های قدیم و جدید و میدل گردابه [26]

۲-۷- تاریخچه مطالعات

دستگاه میدل گردابه اساساً وسیله‌ای بر پایه‌ی پدیده ارتعاشات ناشی از جریان^۱ و بخصوص ارتعاشات ناشی از گردابه^۲ می‌باشد. از این جهت مروری بر پیشینه ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این بخش پیشینه‌ی تحقیق در مورد ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، برای نوسان آزاد و نوسان اجباری سیلندر مورد بررسی قرار داده شده است. مطالعات مرتبط زیادی در رابطه با این گونه از ارتعاشات برای سیلندر دایره‌ای گزارش شده است که به عنوان مثال می‌توان به (بیشاپ^۳ و حسان^۴ در ۱۹۶۴

^۱ Flow- Induced Vibration (FIV)

^۲ Vortex Induced Vibration (VIV)

^۳ Bishop

^۴ Hassan

[66]، فنگ^۱ در ۱۹۶۸ [67]، گودا^۲ و دشخولکارنی^۳ ۱۹۸۸ [68]، خلک^۴ و ویلیامسون^۵ ۱۹۹۹ [14]، گواردهان^۶ در ۲۰۰۰ [69]، ویلیامسون و گواردهان در ۲۰۰۴ [15]، هوئرا^۷ و بیرمن^۸ در ۲۰۰۹ [70] اشاره نمود. در مبدل گردابه‌ای، بطور کل نوسانات ناشی از جریان عرضی باعث تعیین مود^۹ پاسخ‌های سیلندر خواهد شد. جریان سیال هم راستا با محور طولی سیلندر بطور عمده باعث ایجاد نوساناتی کمتر از جریان سیال عمود بر همان راستا خواهد بود. در جریان سیال عمود بر راستای نوسان سیلندر، با افزایش سرعت جریان، فرکانس ریزش گردابه‌ها (f_v) به فرکانس طبیعی سیلندر (f_n) نزدیک شده و به یک فرکانس (فرکانس طبیعی سیستم) می‌رسند. این پدیده با نام‌های قفل‌شوندگی^{۱۰}، همسان‌سازی^{۱۱}، نوسانات خودبرانگیختگی^{۱۲} شناخته می‌شود [sarpakya1979]. در بسیاری از موارد برهم‌کنش بین جسم نوسان‌کننده و سیال، غیر خطی می‌باشد [Bishop and hassan 1964]. ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که در خلال قفل‌شوندگی، نوسانات جسم و نوسانات طبیعی سیستم در محدوده‌ی وسیعی از سرعت بی‌بعد^{۱۳} (U^*) که به صورت زیر تعریف می‌شود اتفاق می‌افتد.

$$U^* = \frac{U}{f_n D}$$

که در فرمول فوق U سرعت جریان سیال، f_n فرکانس طبیعی سیستم و D قطر سیلندر می‌باشد.

^۱ Feng

^۲ Gowda

^۳ Deshkhulkarni

^۴ Khalak

^۵ Williamson

^۶ Govardhan

^۷ Huera-Huarte

^۸ Bearman

^۹ mode

^{۱۰} Lock-in

^{۱۱} Synchronization

^{۱۲} Self-excited oscillation

^{۱۳} Reduced velocity

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار نسبت جرمی (m^*) می باشد که بصورت $\frac{m_{osc}}{m_d}$ تعریف می گردد که m_{osc} جرم کلی قسمت نوسان کننده و m_d جرم سیال هم حجم با سیلندر می باشد. در کنار نسبت جرمی، میرایی کل سیستم (ζ) یکی دیگر از پارامترهای مهم در بررسی ارتعاشات ناشی از گردابه ها می باشد. بر اساس ادعای خلک و ویلیامسون [14] محدوده ی قفل شونده ی بطور کلی توسط نسبت جرمی کنترل می شود (هنگامی که $m^*\zeta$ مقداری ثابت باشد). و میزان حداکثر نوسان در محدوده ی عدد رینولدز بین ۱۰۰۰۰-۳۵۰۰۰ بصورت عمده با حاصل ضرب نسبت جرمی و میرایی کل ($m^*\zeta$) کنترل می شود.

در محدوده ی قفل شونده ی برای سیال هوا به طور کل می توان فرکانس نوسان سیلندر را با فرکانس طبیعی سیستم یکی دانست [68]. اما برای سیستم هایی با نسبت جرمی پایین (مانند آب)، فرکانس نوسان جسم می تواند بطور محسوسی متفاوت (بیشتر) از فرکانس طبیعی سیستم باشد [15] این انحراف فرکانس نوسانات سیستم از فرکانس طبیعی به دلیل جرم افزوده^۱ (در اینجا جرم سیال هم حجم با سیلندر) خواهد بود [1]

یکی از مهمترین ویژگی های ارتعاشات ناشی از گردابه ها میزان دامنه ی نوسان (A) می باشد که برای سهولت مقایسه آن را بر طول قطر سیلندر تقسیم کرده (A/D) تا بصورت دامنه ی بی بعد درآید. میزان A/D تا حدودی وابسته به نسبت جرمی می باشد. فنگ [68] مشاهده کرد تنها دو دسته پاسخ (پاسخ های اولیه^۲ و دسته پایین^۳) برای سیلندر انعطاف پذیر در سیال عامل هوا (نسبت جرمی بالا) وجود خواهد داشت. این در حالیست که خلک و ویلیامسون [14] سه دسته پاسخ (اولیه، دسته پایین و دسته بالا^۴) و دامنه ی نوسان بالاتری برای سیلندر انعطاف پذیر در سیال آب (نسبت جرمی پایین)

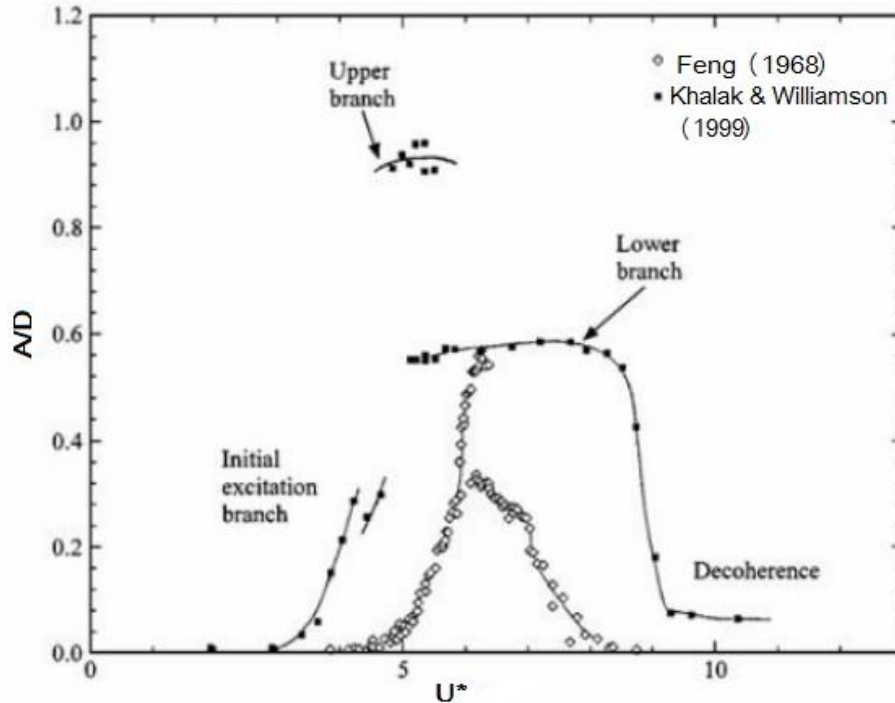
^۱ Added mass

^۲ initial

^۳ lower

^۴ upper

مشاهده و گزارش کردند. شکل ۲-۱۰ داده‌های فنگ [68] و خلک و ویلیامسون [14] را نمایش می‌دهد.



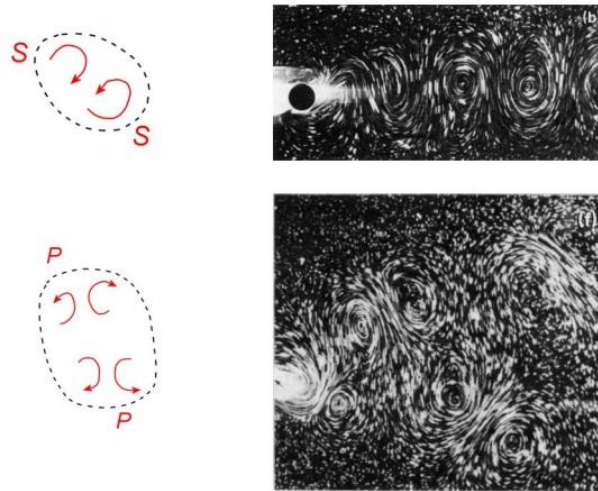
شکل ۲-۱۰ نسبت دامنه‌ی بی‌بعد به سرعت بی‌بعد در سیال هوا (فنگ) و سیال آب (خلک و ویلیامسون) [68,14] از طرفی میزان نسبت دامنه به قطر با الگوهای شکل‌گیری گردابه‌ها در پشت سیلندر رابطه دارد (رشکو^۱ و ویلیامسون [71]، گواردهان و ویلیامسون [15]، مورس^۲ و ویلیامسون [72]). الگوهای شکل‌گیری گردابه‌ها عموماً به این صورت دسته‌بندی می‌شود که $2S$ ، $2P$ ، $P+S$ که S^3 گردابه‌های تکی را گویند و $2S$ نشان‌دهنده‌ی یک جفت گردابه‌ی تکی در بالا و پایین و P^4 گردابه‌های دوتایی را گویند و $2P$ یک جفت گردابه دوتایی در بالا و پایین را گویند. در شکل ۲-۱۱ این الگو قابل مشاهده است.

^۱ Roshko

^۲ Morse

^۳ single

^۴ pair



شکل ۲-۱۱ الگوهای شکل‌گیری گردابه‌ها [69]

در بیشتر گزارشات میزان نسبت دامنه نوسان بی‌بعد بالای $1/13$ اعلام شده است [15]. درحالی‌که در مطالعات برای عدد رینولدزهای بسیار بالا (TrSL3 بر اساس طبقه‌بندی زادکویچ [5])، میزان دامنه‌ی نوسان بالاتر گزارش شده است [18,26].

ایده‌ی استفاده از ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها برای تولید انرژی مربوط به برنیتساس و همکاران [26] می‌باشد که توسط شیوه‌ی کاملاً جدید و امیدبخش با دستگاهی تحت عنوان اختصاری (VIVACE)^۱ یا به فارسی “دستگاه تولید توان از ارتعاشات گردابه‌ای” شکل کاملاً نوینی از شیوه‌ی استحصال انرژی را نشان داد که در شکل ۲-۱۲ نمونه‌ی آزمایشگاهی این سیستم نشان داده شده است.

^۱ Vortex Induced Vibration of Aquatic Clean Energy



شکل ۲-۱۲ مبدل تولید توان از ارتعاشات ناشی از گردابه در دانشگاه میشیگان [26]

برای بهبود این سیستم لی^۱ و همکاران [31] با ساخت سیستم مجازی فنر-میراکننده در بهبود راندمان این سیستم تلاش کردند. در ۲۰۱۱ راغوان و برنیتساس^۲ [32] با کار آزمایشگاهی در محدوده‌ی از رینولدز در جریان آشفته به تحلیل پارامترهای موثر در بهینه کردن استحصال انرژی از گردابه‌ها کردند. همچنین باررو-گیل^۳ و همکاران [33] و جونگ و لی^۴ [34] استحصال انرژی توسط گالوپینگ را تشریح کردند. نیشی^۵ در ۲۰۱۳ به بررسی سیستم استحصال انرژی از گردابه‌ها در یک سیستم با دو جرم پرداخت. [35] همچنین او به همراه یونو^۶ در ۲۰۱۴ تاثیرات استحصال انرژی از سیلندر متحرک در کنار سیلندر ثابت را بررسی کردند. [36] و به همراه میاموتو^۷ با کار آزمایشگاهی استحصال انرژی از هوا توسط ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها را تحقیق کرد. [37] در نهایت در ۲۰۱۶ دینگ^۸ و ژانگ^۹ به همراه برنیتساس حل عددی سیستم استحصال انرژی با کنترل کننده انفعالی را ارائه کردند [38].

^۱ Lee et al

^۲ Raghvan & Bernitsas

^۳ Barrero-Gil et al

^۴ Jung & Lee

^۵ Yoshiki Nishi

^۶ Ueno

^۷ Miyamoto

^۸ Lin Ding

^۹ Li Zhang

با توجه به مطالب ذکر شده و وزن سنگین تر تحقیقات انجام شده در مورد پدیده ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها نسبت به بخش استحصال انرژی از این پدیده و همچنین رویکرد ارتعاشاتی به این پدیده در کارهای انجام شده در قسمت استحصال انرژی جای کار فراوان در این حوزه کاملاً محسوس است. در این پژوهش به شبیه سازی عددی این فرایند برای نواسانات اجباری و نواسانات آزاد سیلندر در نرم افزار کدباز^۱ این فوم^۲ و مقایسه‌ی هندسه‌های مختلف پرداخته شده و همچنین توجیه پذیری اقتصادی طرح به عنوان رقیبی برای سایر انرژی‌های نو متداول در دستور کار قرار گرفته است.

^۱ Open source

^۲ OpenFOAM

فصل ۳ روش اجرای تحقیق و مدل سازی

۳-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا مدل شبیه‌سازی سیلندر ثابت در معرض جریان سیال قرار گرفته و با معرفی حلگر مناسب به اعتبارسنجی عددی پرداخته و سپس سلیندر در شرایط نوسان اجباری قرار گرفته و شبیه‌سازی انجام گرفته است. در ادامه سلیندر با نوسانات آزاد، شبیه‌سازی و نتایج دامنه‌ی نوسانات در رینولدزهای آرام مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در انتها نتایج و محاسبات انرژی تحلیل گردیده است.

لازم به ذکر است در قدم اول شبیه‌سازی یک سلیندر ثابت را در معرض جریان سیال قرار داده‌ایم با شرایط اولیه‌ای مشابه کار عددی انجام شده توسط پلازک^۱ [39] و منقینی^۲ [40] هندسه‌ی خود را توسط نرم افزار گمبیت^۳ تولید کرده و از نتایج بدست آمده در قدم‌های بعدی استفاده شده است.

۳-۲- تنظیمات حلگر

برای حل جریان اطراف سلیندر ثابت در نرم افزار اپن فوم^۴ از حلگر icoFoam استفاده می‌کنیم. و برای حل جریان اطراف سلیندر متحرک از حلگر pimpleDyMFoam استفاده شده است. در واقع این حلگر، مدل توسعه‌یافته‌تر حلگر قبل است که برای حل شبکه‌های^۵ متحرک کارایی دارد. برای شبیه‌سازی عددی، معادلات ناویر-استوکس برای جریان تراکم‌ناپذیر و آرام دو بعدی ناپایا توسط حلگر pimpleDyMFoam در اپن فوم حل می‌شود. معادلات به شرح زیر هستند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱-۳)$$

^۱ Pelazek

^۲ Meneghini

^۳ Gambit

^۴ OpenFOAM

^۵ Mesh

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (۲-۳)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (۳-۳)$$

برای معادله فشار حلگر Geometric Algebraic Multi Grid (GAMG) و برای معادلات سرعت

حلگر Preconditioned (bi-)conjugate gradient (PBiCG) استفاده شده است.

برای محاسبه‌ی ضرایب برآ و پسا از داده‌های کتابخانه‌ای اپن فوم استفاده می‌شود به این شکل که با وارد

کردن ورودی‌هایی نظیر سرعت جریان، قطر هیدرولیکی، سطح تماس و لزجت سینماتیکی طبق فرمول

زیر ضرایب برآ و پسا محاسبه می‌شود:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 d}, C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 d} \quad (۴-۳)$$

که در آن F_d و F_l بترتیب نیروی پسا و برآ، U_∞ سرعت جریان آزاد و d قطر هیدرولیکی می‌باشد.

معادلات فوق ابتدا یک بار برای استوانه ثابت در عدد رینولدز یکسان ۱۰۰ حل شده و نتایج حاصل از

حل (توزیع فشار و سرعت) متعاقباً به‌عنوان شرایط اولیه برای استوانه با جابجایی اجباری در نظر گرفته

می‌شود. برای نوسانات اجباری استوانه یک حرکت سینوسی بصورت $h = A \sin(2\pi f_e t)$ به آن داده

می‌شود که در آن f_e برابر فرکانس تحریک استوانه و A دامنه‌ی نوسان می‌باشد.

در پدیده‌ی ریزش گردابه‌ها دور سیلندر، بیشترین اهمیت در فضای محاسباتی، مربوط به سطح سیلندر

می‌باشد، برای این منظور اطراف سیلندر بیشترین تراکم در شبکه‌های تولیدی را خواهد داشت و نقطه‌ی

آغاز تصمیم‌گیری برای شبکه‌بندی تعداد نقاط دور سیلندر بوده است. بنا به مقایسه‌ی گزارشات

[39,40,41] و نتایج آن‌ها برای شروع تعداد ۳۰۰ نقطه دور سیلندر در نظر گرفته‌شد. و برای بهینه

کردن زمان محاسبات با دور شدن از سیلندر به سمت دیواره‌های دامنه، مساحت شبکه‌ها تدریجاً افزایش

یافته است. بطوریکه در دامنه‌ای به ابعاد $15d * 21d$ (قطر سیلندر d) طی شبیه‌سازی‌های انجام شده

مشخص شد که هرچه میزان d کوچکتر انتخاب شود حجم محاسباتی ما کمتر و دقت در نتایج بالا می‌رود. طراحی و محاسبات را برای عدد رینولدز از ۹۰ الی ۴۰۰ انجام داده شد. عدد رینولدز بصورت ضرب دو پارامتر سرعت U و قطر سیلندر d که تقسیم بر ν یا گرانروی سینماتیکی سیال بوده، در اینجا ویژگی‌های آب لحاظ شده است.

$$Rr = \frac{\rho U d}{\gamma} \quad (۵-۳)$$

ρ چگالی سیال

U سرعت متوسط جریان سیال

d قطر سیلندر

γ ضریب گرانروی سیال (ویسکوزیته‌ی دینامیکی)

با تقسیم ویسکوزیته‌ی دینامیکی به چگالی ویسکوزیته‌ی سینماتیکی بصورت زیر تعریف می‌شود.

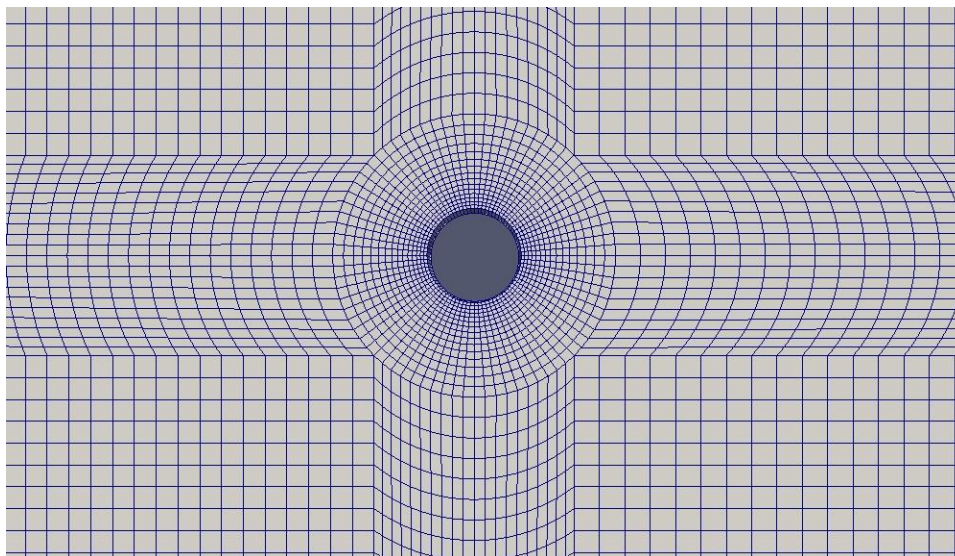
$$\nu = \frac{\gamma}{\rho} \quad (۶-۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق می‌توان رابطه‌ی عدد رینولدز را بصورت زیر باز تعریف کرد:

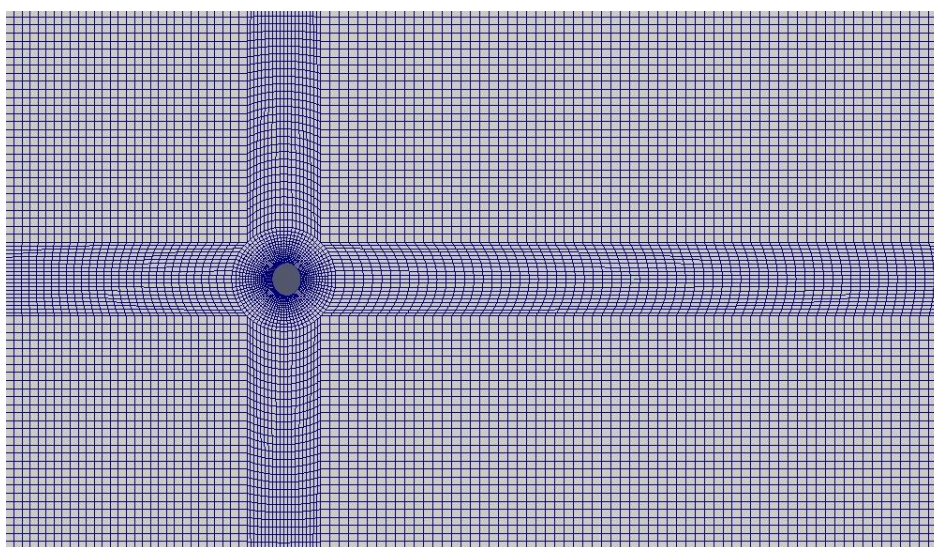
$$Re = \frac{U d}{\nu} \quad (7-۳)$$

شکل زیر نمایش شبکه‌بندی را در نرم افزار پاراوید^۱ نمایش می‌دهد.

^۱ Paraview



شکل ۳-۱ نمایش شبکه بندی در نرم افزار پاراویو (نمای نزدیک سیلندر)



شکل ۳-۲ نمایش شبکه بندی در نرم افزار پاراویو (هندسه کلی)

با توجه به قطر تعریف شده برای شبکه‌ی تولیدی در نرم افزار گمبیت و با توجه به قرار دادن ثابت‌های مربوط به سیال آب، با تغییر دادن سرعت ورودی میزان عدد رینولدز را تغییر داده خواهد شد. تعداد ۲۳۶۲۸ سلول در گام‌های زمانی بدون بعد برابر $Ut/d=0/005$ بکار گرفته شده اند. میزان عرض هندسه‌ی فوق برابر $12d$ و طول آن برابر $21d$ می‌باشد و شرایط مرزی آن به این شکل می‌باشد که

در ورود شرط velocity inlet، در خروج شرط pressure outlet، و در بالا و پایین شرط symmetry و خود سیلندر نیز به عنوان wall تعریف شده است. شکل ۱-۳ شبکه سلول‌های نزدیک سیلندر را نشان می‌دهد و شکل ۲-۳ شبکه‌ی سلول‌ها در کل هندسه‌ی مورد بحث را به نمایش می‌گذارد. به منظور در نظر گرفتن حل مستقل از شبکه، ۷ شبکه‌ی مختلف بررسی شد که در جدول ۱-۳ اطلاعات آن‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۱-۳ مقایسه شبکه‌های مختلف برای حل مستقل از شبکه

شماره شبکه	تعداد سلول‌ها	زمان محاسبات (دقیقه)	حداکثر ضریب برآ	درصد خطا
۱	۲۳۶۲۸	۱۶۷۲	۰/۳۶۴۷	۰/۰۴
۲	۱۵۲۶۰	۱۰۶۶	۰/۳۶۴۲	۰/۱۸
۳	۳۰۷۱۲	۲۴۵۵	۰/۳۶۳۵	۰/۳۸
۴	۱۲۸۷۲	۸۱۶	۰/۳۶۱۹	۰/۸۱
۵	۸۹۷۲	۵۳۳	۰/۳۶۱۲	۰/۹۹
۶	۵۸۲۲	۳۶۰	۰/۳۶۰۳	۱/۲۵

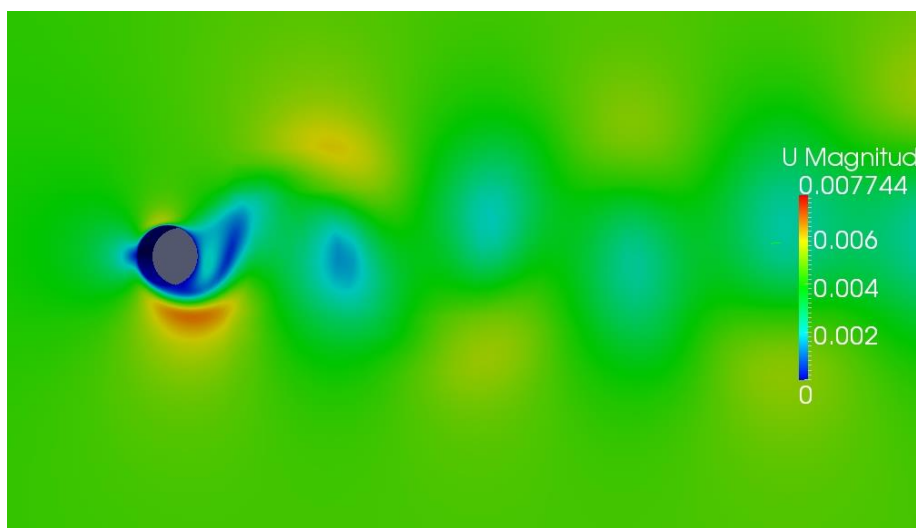
۷	۳۶۹۴	۲۱۳	۰/۳۳۷۸	۷/۴
---	------	-----	--------	-----

درصد خطای ذکر شده در جدول فوق از مقایسه با کار عددی پلازک [۳۹] برای استوانه متحرک استخراج شده که مقدار ضریب برآی بیشینه در آن برابر ۰/۳۶۴۹ می‌باشد. باید خاطر نشان کرد که زمان محاسبات با استفاده از شبکه بدون ساختار به مراتب می‌توانست کمتر از مقادیر گزارش شده باشد اما به دلیل حرکت داشتن سیلندر و به تبع آن شبکه‌ی متصل به آن، بنابراین از ابتدا از شبکه‌های مربعی ساختار یافته استفاده شده است.

۳-۳ اعتبارسنجی عددی

برای اعتبارسنجی ضرایب برآ و پسا در استوانه ثابت برای مقطع دایره‌ای از مرجع [۳۹] استفاده شده است.

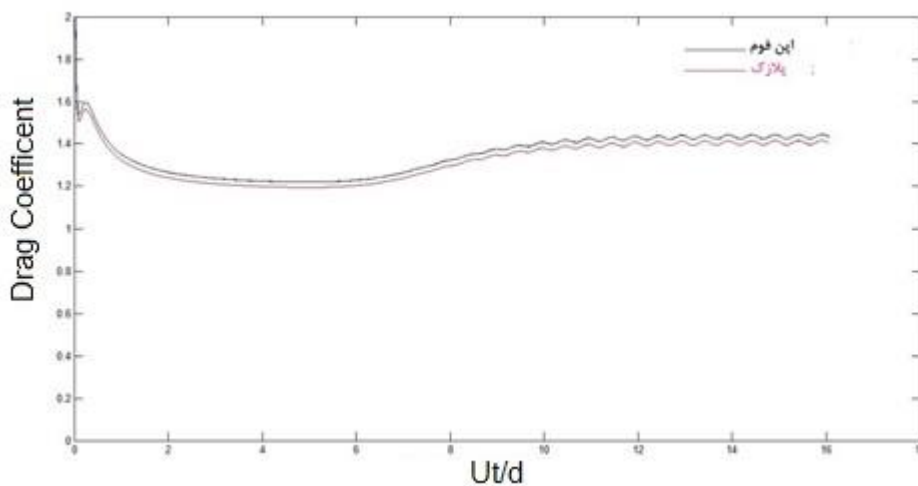
شکل زیر نمومه‌ای از شکل ریزش گردابه‌ها پشت سیلندر ثابت با عدد رینولدز ۱۰۰ را نشان می‌دهد.



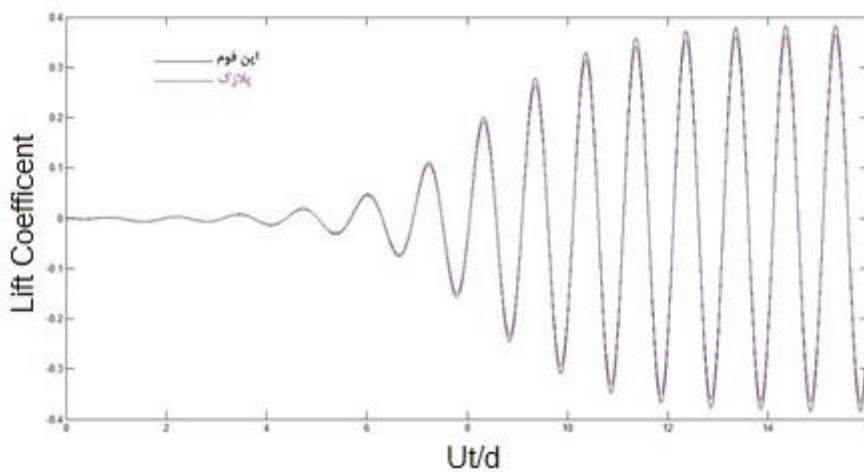
شکل ۳-۳ شکل ریزش گردابه‌ها پشت سیلندر ثابت با عدد رینولدز ۱۰۰

همانطور که انتظار می‌رفت سیال در فضای پشت سیلندر به دیواره‌ی سیلندر چسبیده است و خیابان گردابه‌ای فون کارمن در پایین دست جریان قابل مشاهده است.

همانطور که در شکل ۳-۴ و ۳-۵ دیده می‌شود، توافق خوبی بین نتایج بدست آمده و نتایج مورد انتظار وجود دارد و درصد خطا در این مورد تنها ۱٪ می‌باشد.



شکل ۳-۴ مقایسه‌ی مقادیر ضریب پسا در پژوهش حاضر و کار عددی پلازک



شکل ۳-۵ مقایسه‌ی مقادیر ضریب برآ در پژوهش حاضر و کار عددی پلازک

همانطور که در شکل فوق مشاهده شده میزان ضریب برآ محاسبه شده توسط نرم‌افزار OpenFOAM و سایر منابع گزارش شده به اندازه‌ی کافی مطابقت دارد (۱٪ خطا).

با حصول اطمینان از صحت نتایج برای سیلندر ثابت، می‌خواهیم از این همین شبکه‌بندی سلول‌ها برای اعمال جابجایی به سیلندر استفاده کنیم.

۳-۴- سیلندر با نوسان اجباری، شبیه‌سازی و نتایج و تعیین محدوده‌ی ناحیه قفل‌شوندگی

با اعمال تغییراتی در تنظیمات OpenFOAM می‌توان امکان جابجایی شبکه‌ی سلول‌ها را توسط نرم‌افزار فراهم کرد.

دامنه‌ی نمایش داده شده در شکل ۳-۳ برای سیلندری به قطر d اندازه‌ی دامنه‌ی شبیه‌سازی و محل قرارگیری سیلندر با توجه به کارهای انجام شده‌ی پلازک انتخاب شده‌اند. نتایج به شدت به اندازه‌ی دامنه حساس هستند. بخصوص برای رینولدزهای پایین.

در جابجایی اجباری سیلندر شرایط برنامه‌طوری تنظیم می‌شود که استوانه مستقل از سیال حرکت کند اما نیروهای ناشی از گردابه حرکت سیلندر را تحت تاثیر قرار می‌دهند. سیلندر طبق رابطه‌ی زیر نوسان می‌کند.

$$a(t) = a_{max} \sin(2\pi f_v t) \quad (۳-۸)$$

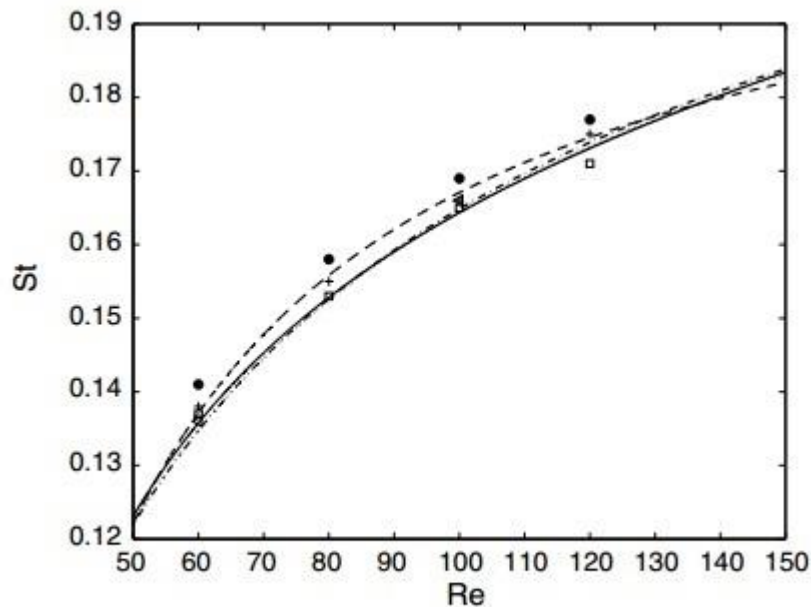
که f_v فرکانس نوسان سیلندر می‌باشد و a_{max} حداکثر نوسان سیلندر می‌باشد. هر دو پارامتری که در بالا تعریف شد به صورت ورودی‌های نرم افزار می‌باشند و هدف ما بررسی این مهم می‌باشد که در کدام فرکانس تحریک و دامنه‌ای از نوسان نیروی لیفت وارده به سیلندر بیشینه می‌باشد.

در کنار f_v که فرکانس نوسان سیلندر می‌باشد، f_n فرکانس طبیعی سیستم و برابر فرکانس عدد استروهال می‌باشد.

عدد استروهال بصورت $St = \frac{f_n l}{U}$ نمایش داده می شود

که f_n فرکانس نوسانات، l طول مشخصه و U سرعت جریان می باشد.

فرکانس طبیعی سیستم در واقع فرکانس ریزش گردابه ها پشت سیلندر ثابت می باشد که برای بدست آوردن فرکانس طبیعی سیستم یا فرکانس استروهال می بایست به نوسانات ضرایب لیفت و درگ در نمودار آن توجه کرد، با احتساب فاصله ی زمانی بین دو قله برابر t و در نظر گرفتن رابطه ی $f = 1/t$ می توان فرکانس طبیعی سیستم را بدست آورد. فرکانس طبیعی بدست آمده در تحقیق پیش رو و مقایسه آن با نتایج سایر مطالعات در شکل زیر آمده است.



عدد استروهال بدست آمده در مطالعه حاضر (●) کار عددی پلازک (◻) و منقینی (○)

شکل ۳-۶ عدد استروهال در محدوده ی اعداد رینولدز ۵۰ تا ۱۵۰

حال با شناختن کامل f_n به تعریف نسبت فرکانسی که نسبت فرکانس نوسانات سیلندر به فرکانس

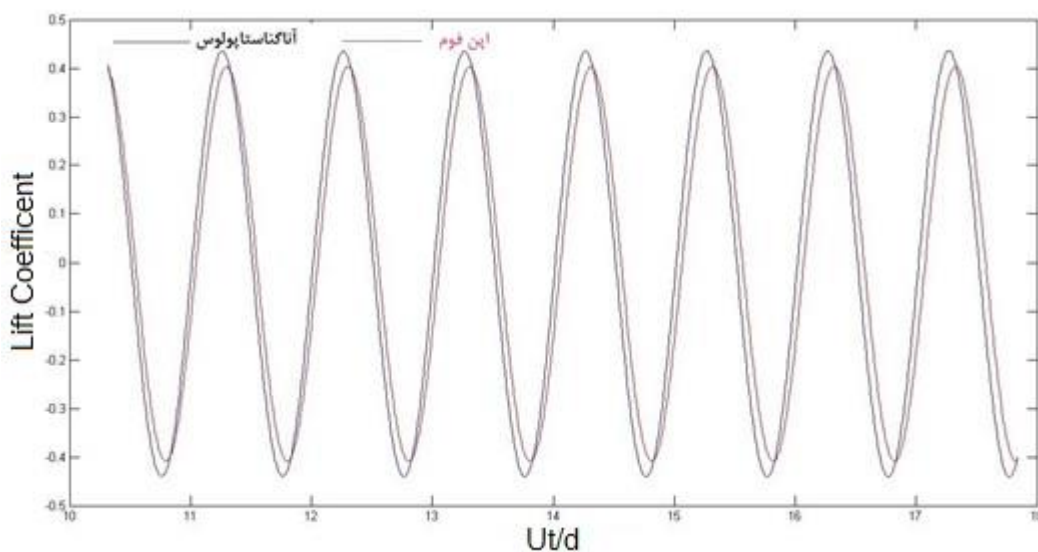
طبیعی سیستم را بصورت زیر تعریف می شود:

$$F = \frac{f_v}{f_n} \quad (۹-۳)$$

در صورتی که F برابر 1 باشد یعنی دوفرکانس باهم برابر شده و پدیده‌ی رزونانس یا تشدید پیش‌بینی می‌شود، ما با دانستن فرکانس طبیعی و با تغییر در فرکانس نوسان سیستم محدوده‌ی F را از بازه‌ی ۰/۵ الی ۱/۴ برای نسبت دامنه نوسان‌های مختلف به بررسی رفتار سیستم می‌پردازیم.

$$A = \frac{a_{max}}{d} \quad (۱۰-۳)$$

A نسبت حداکثر جابجایی به قطر سیلندر می‌باشد که با تغییر آن از 0/15 الی ۰/۵ و استفاده از نسبت فرکانسی‌های مختلف، میزان ضریب برآ بر روی سیلندر مقایسه می‌شود. مقادیر ضریب برآ در نسبت فرکانسی $F=0/8$ و $A=0/4$ با کار عددی آناگناستوپولوس^۱ [43] برای همین نسبت‌ها مقایسه شد و نتیجه آن در شکل ۳-۷ قابل مشاهده است.

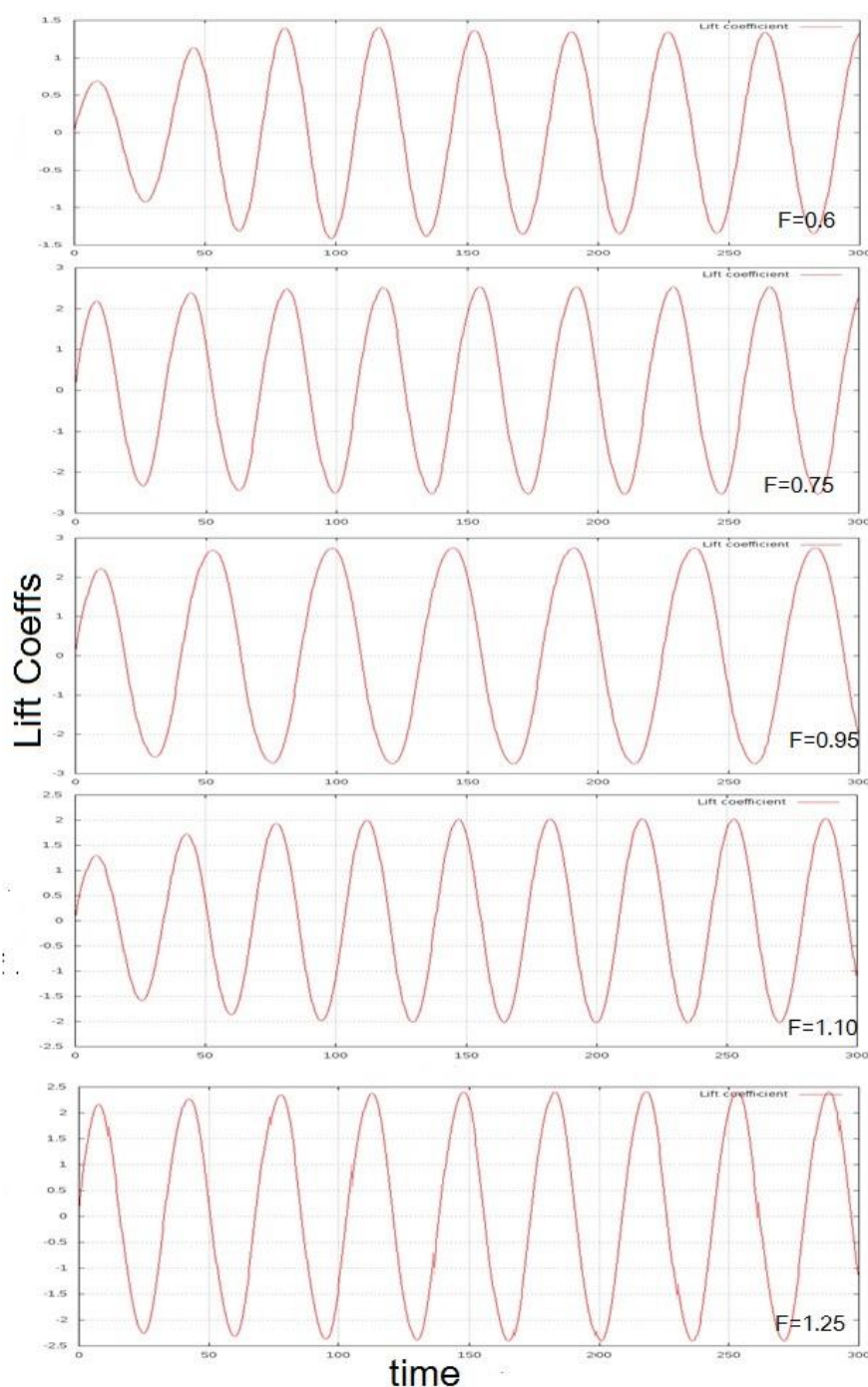


شکل ۳-۷ مقایسه ضرایب برآ با کار عددی آناگناستوپولوس

در مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده باید گفت که معمولا پس از گذشت یک مرحله شبه-سینوسی (شکل ۳-۱۰) مقادیر همگرا می‌شوند و حل‌ها به هم نزدیک می‌شوند.

^۱ Anagnostopoulos

نمودارهای شکل ۳-۸ زیر ضریب برآ در F و A های مختلف نمایش می‌دهند. همانطور که در این نمودارها مشهود است، با افزایش میزان F از 0.6 تا حدود 1 میزان ضریب برآ نیز به تدریج اضافه می‌شود و با گذر از این محدوده (F بین 0.95 تا 1.1) که پدیده‌ی رزونانس یا تشدید اتفاق می‌افتد، با افزایش میزان F ضریب برآ کاهش خواهد یافت، بطوریکه می‌توان ادعا نمود نمودار F نسبت به ضریب برآ همانند شکل ۳-۱۲ دارای یک قله می‌باشد.



شکل ۳-۸ نمودارهای ضریب لیفت در نسبت فرکانسی (F) و نسبت دامنه های مختلف (A)

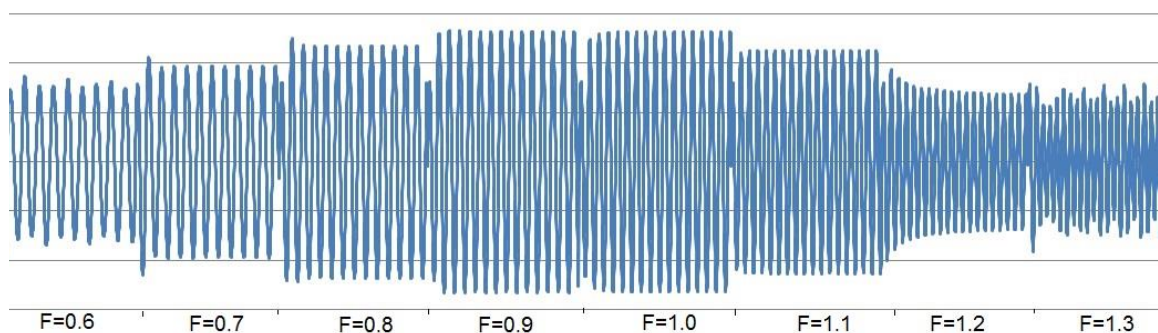
در جدول زیر میزان بیشینه ضریب لیفت $C_{l\ max}$ در نسبت فرکانسی و نسبت دامنه های مختلف گزارش شده است.

جدول ۳-۱ میزان مقادیر مختلف نسبت فرکانسی (F) و نسبت دامنه های مختلف (A)

	F=0/5	F=0/6	F=0/8	F=0/95	F=1/05	F=1/2
A=0/13	2/5	2/8	3	2/73	2/43	2/19
A=0/17	2/5	2/84	2/99	2/79	2/45	2/20
A=0/27	2/51	2/91	3	2/7	2/45	2/12
A=0/35	2/52	2/82	3	2/68	2/45	2/15
A=0/5	2/51	2/84	2/99	2/63	2/48	2/16

اعداد بالا در خانه ها هر یک نشانگر حداکثر ضریب برآ در میزان مشخصی از F و A می باشند.

برای درک بهتر جدول فوق برای A=0/5 نموداری از ضریب برآ بیشینه به شکل زیر رسم شد.



شکل ۳-۹ نمودار ضریب برآ در نسبت فرکانس های مختلف برای استوانه با مقطع دایره در

$$A/d = 0.17$$

همانطور که در شکل ۳-۹ مشخص می باشد برای ضریب برآ یک مقدار ماکزیمم بصورت قله در تمام

نسبت دامنه ها وجود دارد به این صورت که با نزدیک شدن نسبت فرکانسی به رزونانس (نسبت فرکانسی

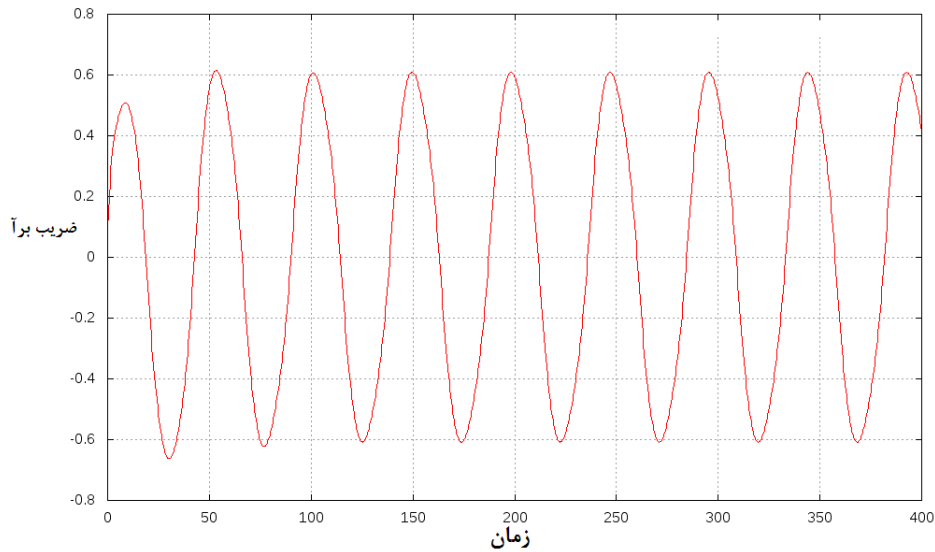
(۱) میزان ضریب برآ بیشتر شده سپس کاهش میابد، به این ناحیه اصطلاحاً ناحیه قفل‌شوندگی^۱ گویند. بررسی‌های آزمایشگاهی کوپمان^۲ [42] و عددی آناگناستاپولوس [43] و پاتنایک^۳ [44] تأیید کننده‌ی این موضوع می‌باشد.

شاید بتوان گفت مهم‌ترین ابزار برای بررسی ناحیه قفل‌شوندگی در تحلیل عددی، بررسی ضریب برآ باشد که خود متأثر از دو کمیت فرکانس نوسان استوانه و دامنه نوسان می‌باشد. برای روشن شدن تأثیر این دو پارامتر در ابتدا دامنه‌ی نوسان را ثابت نگه داشته و فرکانس را تغییر می‌دهیم. تا هنگامی که نسبت فرکانس نوسان به فرکانس استروهاال ($F = f_o / f_s$) حدود کمتر از ۰/۵ می‌باشد نمودار ضریب برآ شبه‌سینوسی می‌باشد. با افزایش تدریجی نسبت فرکانس نمودار حالت سینوسی پیدا کرده (شکل ۳-۱۰) تا اینکه با افزایش F در نواحی نزدیک به $F = 1$ مقدار ضریب برآ دچار افزایش می‌شود. این نقطه را آغاز ناحیه قفل‌شوندگی می‌نامیم. همچنان با افزایش نسبت فرکانس جایی که این افزایش در میزان ضریب برآ فروکش می‌کند را نقطه‌ی خروج از ناحیه قفل‌شوندگی می‌نامیم. پس از خروج از ناحیه قفل‌شوندگی با افزایش تدریجی نسبت فرکانس خواهیم دید که نمودار ضریب برآ شکل سینوسی خود را از دست می‌دهد و مجدداً شکل شبه‌سینوسی به خود می‌گیرد (شکل ۳-۱۱). با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف این نتیجه به دست می‌آید که در نسبت‌های دامنه به قطر کوچک‌تر این پدیده یعنی گذار از حالت سینوسی به شبه‌سینوسی سریعتر اتفاق می‌افتد، به‌طوری‌که گاهی بلافاصله پس از خروج از ناحیه قفل‌شوندگی نمودار به حالت شبه‌سینوسی تغییر می‌یابد.

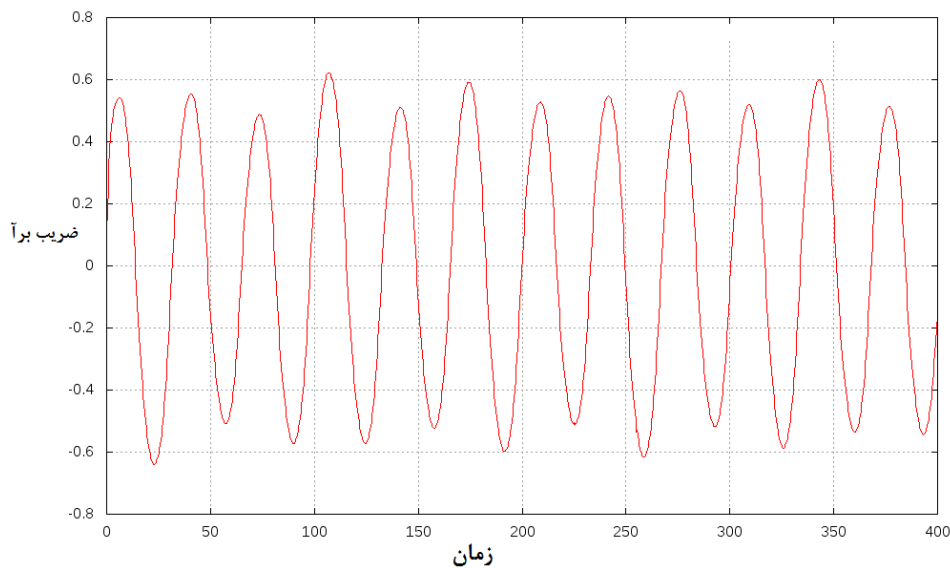
^۱ Lock-in Region

^۲ Koopmann

^۳ Patnaik

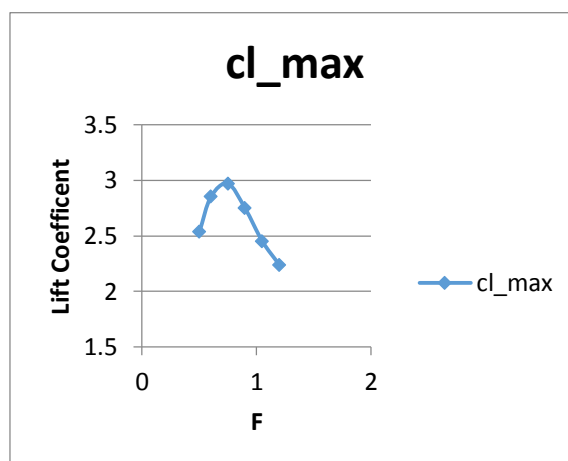


شکل ۳-۱۰ نمودار ضریب برآ برای مقطع مربعی در $F=0.9$ و $A/d=0.5$



شکل ۳-۱۱ نمودار ضریب برآ برای مقطع مربعی در $F=1.3$ و $A/d=0.5$

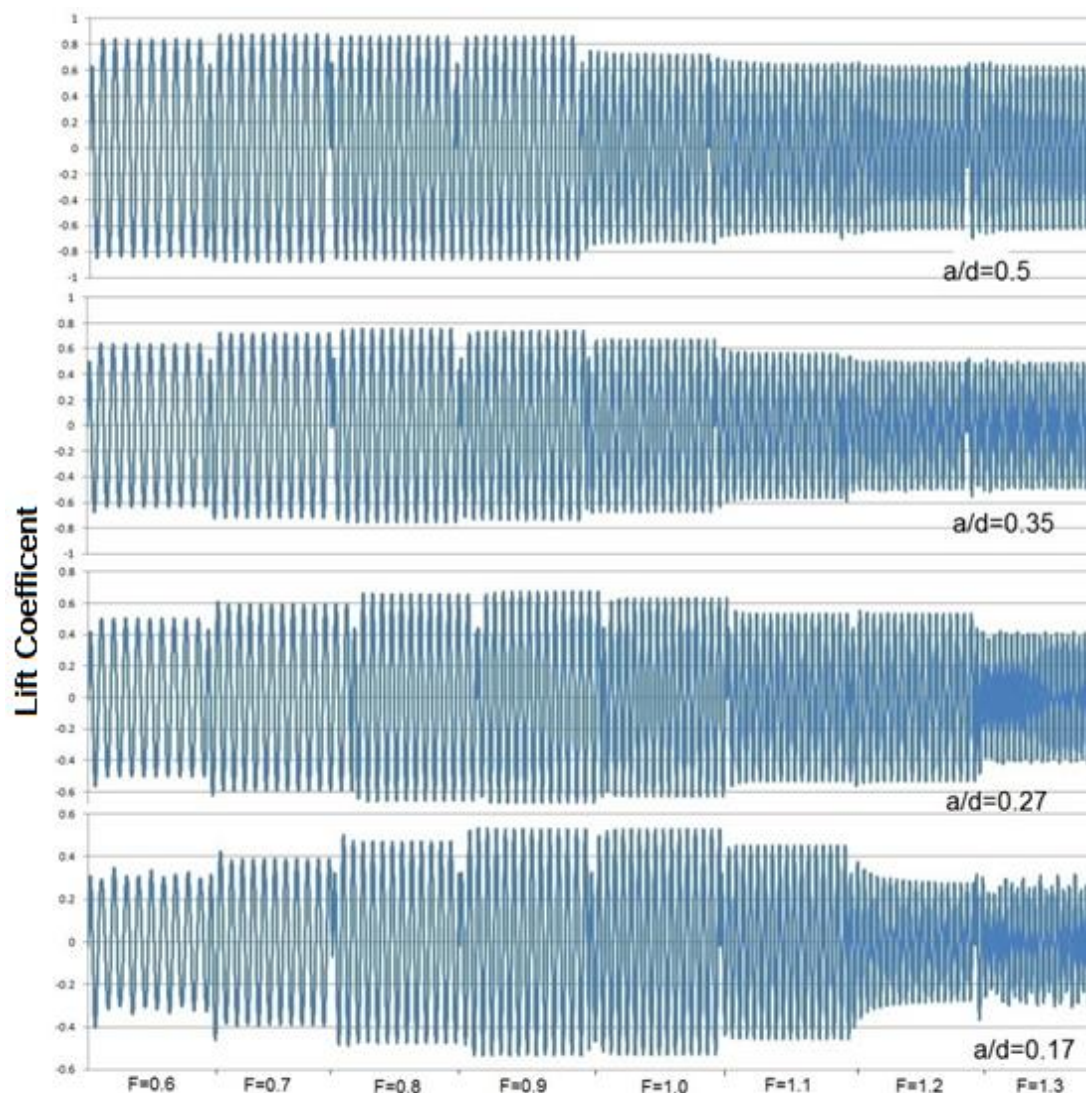
رویه فوق بطور مجزا برای هر نسبت دامنه تکرار شده و برای هر کدام از آنها با توجه به تفسیر نمودار ضریب برآ، یک نقطه‌ی ورود به ناحیه قفل‌شوندگی و یک نقطه‌ی خروج از آن در نظر گرفته می‌شود. برای نمونه شکل ۳-۹ تغییرات ضریب برآ را در نسبت‌های فرکانسی مختلف برای یک نسبت دامنه بی‌بعد نشان می‌دهد. این نمودار از به هم چسباندن چند نمودار با نسبت فرکانسی ثابت تولید شده است.



شکل ۳-۱۲ ضریب برآ بیشینه

شکل ۳-۱۱ تایید کننده‌ی مطالب گفته شده‌ی قبل می‌باشد از این جهت که در $F=0.6$ و $F=0.7$ نمودار ضریب برآ حالت شبه‌سینوسی دارد. در $F=0.8$ نمودار سینوسی شده و همچنین میزان ضریب برآ افزایش یافته که این افزایش در $F=0.9$ و $F=1$ به حداکثر خود رسیده سپس در $F=1.1$ نزول می‌کند. در $F=1.2$ این نزول کاملاً مشهود است و به بیشترین حد خود می‌رسد و در نهایت در $F=1.3$ مجدداً حالت شبه‌سینوسی مشاهده می‌شود. بنابراین آغاز ناحیه قفل‌شوندگی باید جایی بین $F=0.8$ و $F=0.9$ و خروج از آن بین $F=1.1$ و $F=1.2$ باشد. برای افزایش دقت ضریب برآ بین این نقاط هم بررسی می‌شود تا محدوده‌ی مورد نظر با دقت بیشتری بدست آید.

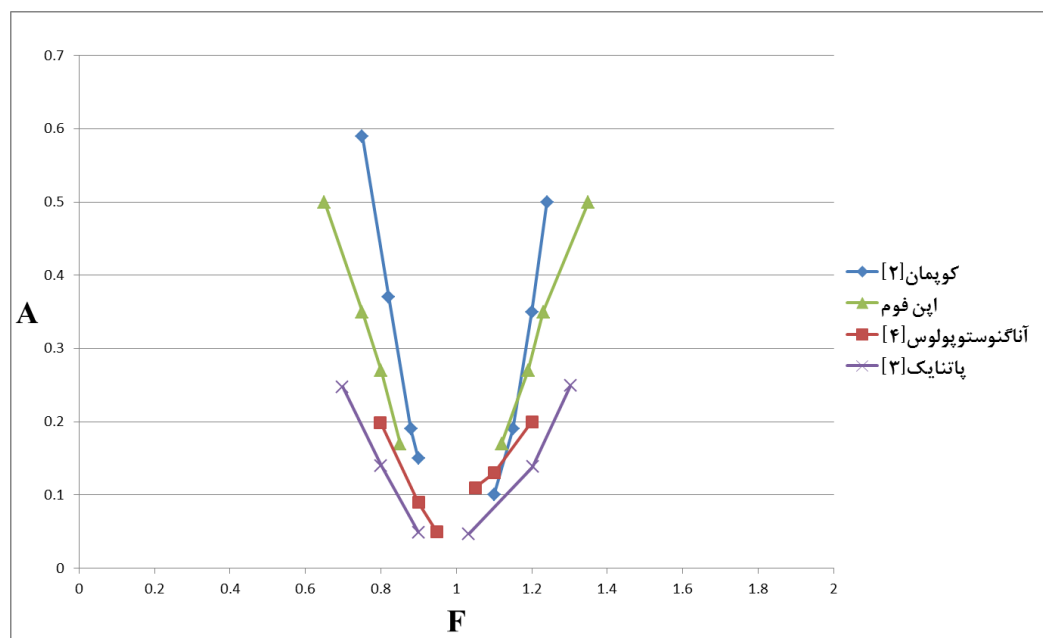
شکل ۳-۱۳ تغییرات ضریب برآ در نسبت‌های فرکانسی مختلف در ۴ نسبت A/d مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در نسبت دامنه‌ی کوچکتر بازه‌ای که نیروی برآ در آن بیشینه است محدودتر بوده و با افزایش نسبت دامنه این بازه وسعت بیشتری پیدا می‌کند، همانطور که در نمودار ناحیه قفل‌شوندگی کوپمان [42] و سایر محققین نیز دیده شد.



شکل ۳-۱۳ بررسی نمودار ضریب برآ با تغییر نسبت فرکانسی در ۴ نسبت A/d مختلف

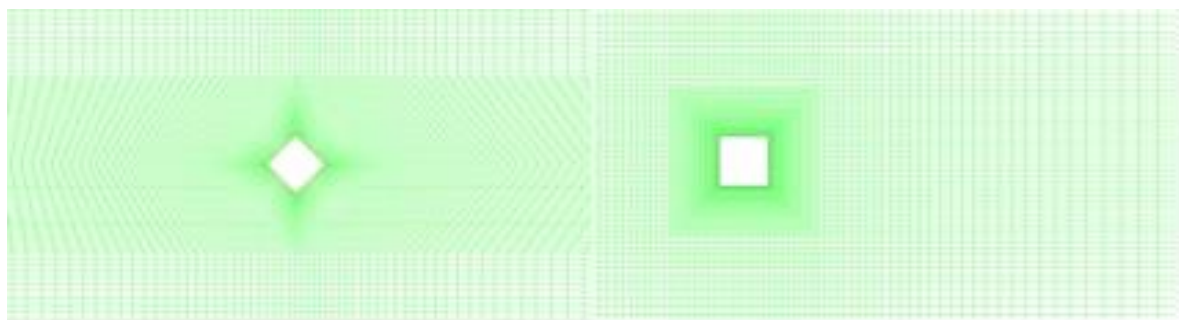
ناحیه قفل شوندگی بصورت محدوده‌ای که در آن فرکانس ریزش گردابه از مقدار مورد انتظار در عدد رینولدز در نظر گرفته شده واگرا می‌شود و فرکانس نوسانات اجباری قفل می‌شود تعریف شده است: این منطقه در نمودار (A, F) در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. ناحیه قفل شوندگی منطقه بین دو محدوده تقریباً متقارن نسبت به محور $F=1$ را در بر می‌گیرد. به منظور برجسته کردن رژیم‌های پاسخ مختلف استوانه، دامنه را در یک سطح معین ثابت نگه داشته و F در محدوده گسترده‌ای تغییر می‌کند به طوری که ناحیه قفل شوندگی باید قطع شود. شکل ۳-۱۴ مقایسه نمودار ناحیه قفل شوندگی برای

استوانه دایره‌ای با دیگر نتایج عددی را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است نتایج حاضر توافق خوبی با داده‌های عددی کوپمان دارد.



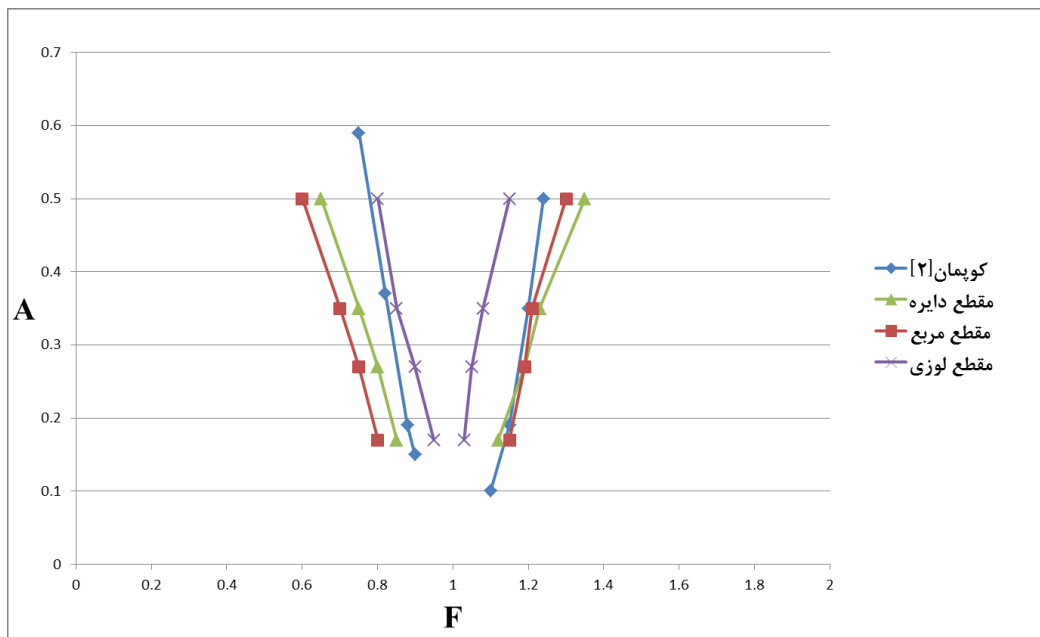
شکل ۳-۱۴ مقایسه نمودار ناحیه قفل‌شوندگی برای استوانه دایره‌ای با نتایج عددی دیگر

برای بررسی هندسه‌های مختلف در ناحیه قفل‌شوندگی، علاوه بر سیلندر استوانه‌ای، سیلندر با مقطع مربع و لوزی (مربع با چرخش ۴۵ درجه) نیز بررسی شد که شکل شبکه بندی‌های این مقاطع در شکل ۳-۱۵ مشخص است.



شکل ۳-۱۵ شبکه بندی هندسه‌های مختلف

شکل ۳-۱۶ نشان می‌دهد که بازه‌ی ناحیه قفل‌شوندگی برای سیلندر با مقطع دایره‌ای و مربعی تقریباً یکسان می‌باشد اما این بازه برای سیلندر با مقطع مربعی که تحت زاویه ۴۵ درجه مقابل جریان سیال قرار دارد بسیار کوچکتر است. در بسیاری از کاربردهای مهندسی هدف کاهش ارتعاشات برای سازه می‌باشد که در میان موارد فوق سیلندر مربعی با زاویه ۴۵ درجه در مقابل جریان برای این هدف مناسب می‌باشد.

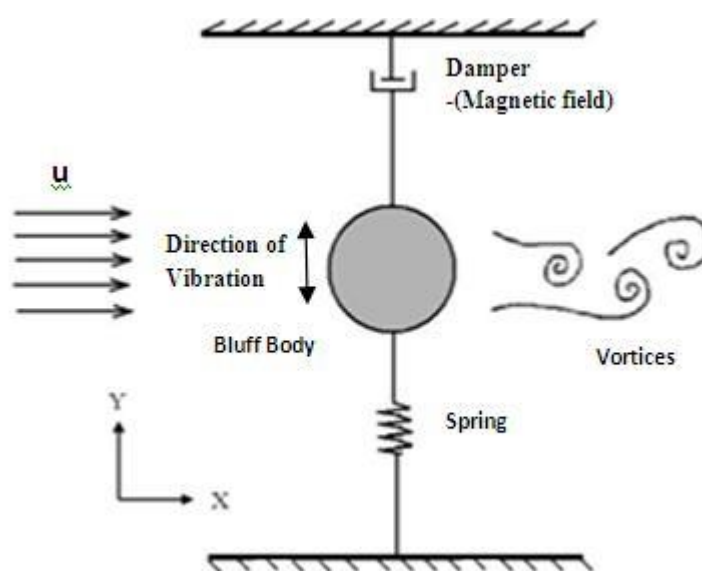


شکل ۳-۱۶ مقایسه نمودار ناحیه قفل‌شوندگی برای استوانه با مقاطع مختلف

۳-۵ سیلندر با نوسانات آزاد، شبیه‌سازی و نتایج، دامنه‌ی نوسانات در رینولدزهای آرام

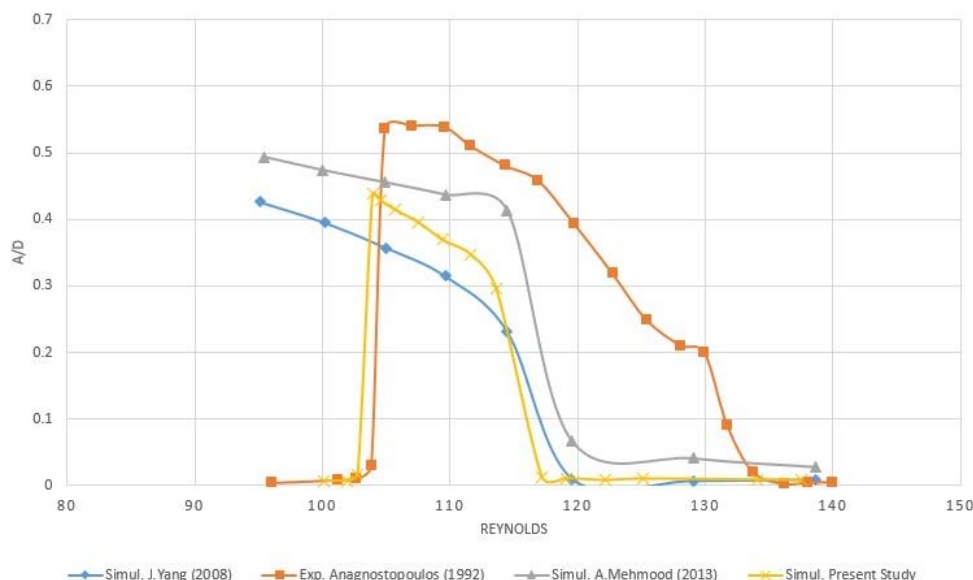
در این نوع حرکت تمامی تنظیمات نسبت به قبل تغییرات قابل ملاحظه‌ای خواهد کرد. در این حلگر که با تابع کتابخانه‌ای 6dof معرفی می‌شود، سیستم کلی جرم و فنر است که در راستای عمود بر مسیر سیال در حال نوسان می‌باشد (شکل ۳-۱۷). لازم به ذکر است که در این تابع کتابخانه‌ای ۶ درجه آزادی بصورت پیش‌فرض برای جسم نوسانگر در نظر گرفته شده است که در جهت هریک از این درجات آزادی یک فنر و میرا کننده در نظر گرفته شده، اما از آنجا که در مدل مورد بحث، تنها یک درجه آزادی مورد

نیاز می‌باشد، میزان سختی فنر در سایر جهات با سعی و خطا میزان بسیار زیادی قرار داده شد تا تنها حرکت در یک راستا و آن هم در راستای عمود بر جریان سیال مطابق شکل ۳-۱۷ انجام گیرد. مقادیر سختی فنر و میرایی با مقادیر منطقی که از کار پلازک [39] و آناگناستاپولوس [43] استخراج شده، انجام شده است و در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۷ اجزای سیلندر در مدل 6dof

طبق معمول برای اطمینان از درستی حل میزان ضریب برآ را با نمونه‌ی مشابه مقایسه می‌کنیم. شکل زیر نتایج حاصل از شبیه‌سازی جابجایی آزاد سیلندر را در محدوده‌ی عدد رینولدز ۹۵ تا ۱۴۰ نشان می‌دهد و نسبت جابجایی به قطر را بررسی می‌کند.



شکل ۳-۱۸ نتایج حاصل از شبیه سازی جابجایی آزاد سیلندر در محدوده ی عدد رینولدز ۹۵ تا ۱۴۰

کار فوق با نتایج کار آزمایشگاهی آنانگناستاپولوس و کارهای عددی محمود^۱ [50] و یانگ^۲ [51] مقایسه شده که همانطور که مشاهده می شود تطابق منطقی با کارهای گذشته دارد.

۳-۶ بررسی تاثیر جرم و سختی فنر در شبیه سازی

در بررسی نوسانات سیلندر تحت جابجایی آزاد، به مشخصه هایی نظیر جرم نوسان گر (m_{system}) ضریب میرایی (ζ) و ضریب سختی فنر (k) در ورودی های مربوط به نرم افزار نیاز است و میزان این اعداد در ابتدا با فرض های منطقی منطبق با کارهای عددی گذشته جایگذاری شده و سپس پس از حصول اطمینان از صحت نتیجه با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها تاثیر تک تک این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است.

برای نزدیک شدن به این موضوع بهتر است پارامترها را بی بعد ساخت. به همین منظور نسبت جرمی به صورت زیر تعریف می شود:

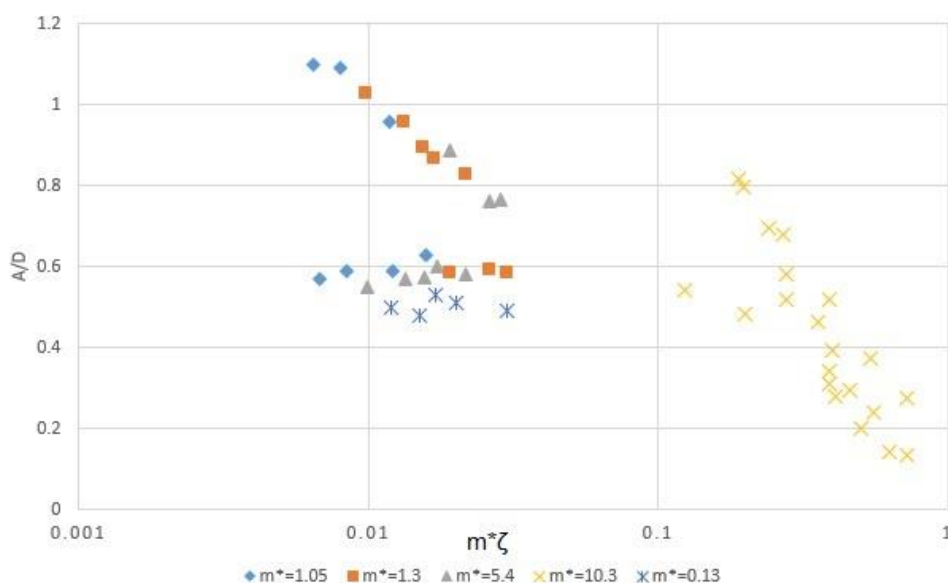
^۱ A. Mehmood

^۲ J-Yang

$$m^* = \frac{m}{\frac{\pi \rho D^2 L}{4}} \quad (۱۱-۳)$$

که m جرم سیلندر در صورت و میزان جرم آب هم حجم با سیلندر در مخرج کسر می‌باشد.

میزان m^* در عبارت بالا برابر 0/13 می‌باشد و با در نظر گرفتن ξ برابر 0/1 مقدار $m^* \xi$ برابر 0/013 خواهد بود.



شکل ۳-۱۹ مقایسه نسبت دامنه به جرم بی‌بعد در میرایی

در نمودار فوق میزان نسبت دامنه نوسان به قطر برای $m^*=0/13$ در کنار سایر مقادیر m^* که از داده‌های بدست آمده از کار گریفین^۱ [45] گزارش شده، نشان داده شده است.

برای بررسی تغییرات دامنه‌ی نوسان نسبت به سختی فنر مدل شده در ابتدا لازم است سرعت بی‌بعد شده تعریف می‌شود:

$$U^* = \frac{U}{f_v D} \quad (۱۲-۳)$$

^۱ Griffin

که در رابطه‌ی فوق U سرعت جریان آزاد D قطر سیلندر و f_v فرکانس سیلندر می‌باشد که برای فرکانس سیلندر رابطه‌ی زیر را خواهیم داشت.

$$\omega = 2\pi f \quad (13-3)$$

در رابطه بالا ω سرعت زاویه‌ای سیلندر است که خود با میزان جرم سیلندر و سختی فنر بصورت زیر مرتبط می‌باشد.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14-3)$$

بنابر دو رابطه‌ی اخیر خواهیم داشت:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi} \quad (15-3)$$

سپس برای سرعت بی‌بعد شده‌ی U^* خواهیم داشت:

$$U^* = \frac{2\pi U}{\sqrt{\frac{k}{m}} D} \quad (16-3)$$

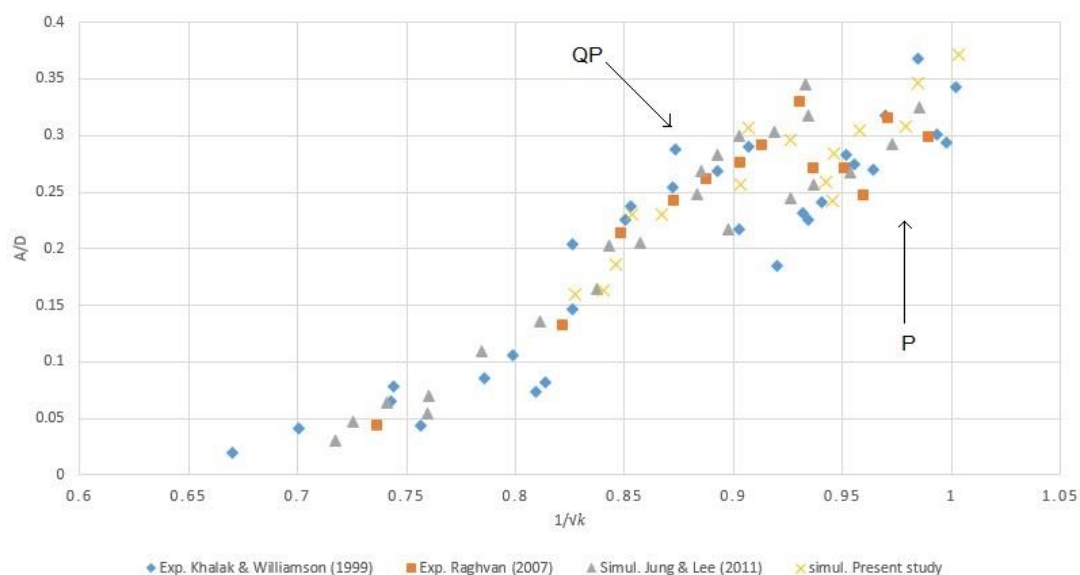
در رابطه‌ی فوق با ثابت نگاه داشتن تمامی پارامترها به جز سختی فنر خواهیم داشت که سرعت بی‌بعد شده با معکوس جذر سختی فنر مرتبط است.

$$U^* \propto \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (17-3)$$

طبق ثابت‌های در نظر گرفته شده برای مقادیر مربوطه خواهیم داشت:

$$U^* = \frac{4/71}{\sqrt{k}} \quad (18-3)$$

با مربوط ساختن سرعت بی‌بعد شده به سختی فنر و با تغییرات در سختی فنر می‌توان نتیجه را مطابق نمودار زیر که محور افقی آن $\frac{1}{\sqrt{K}}$ و محور عمودی آن دامنه‌ی بی‌بعد شده $\left(\frac{A}{d}\right)$ می‌باشد را با کارهای عددی و آزمایشگاهی سایرین مقایسه کرد.



شکل ۳-۲۰ مقایسه نسبت دامنه در سختی‌های متفاوت فنر

همانطور که در شکل ۳-۲۰ مشاهده می‌شود نقاط در دو دسته‌ی نوسانی (P) و شبه‌نوسانی (QP) تقسیم‌بندی می‌شوند.

۳-۷ تاثیر هندسه مقطع بر جابجایی آزاد سیلندر

در بررسی جابجایی آزاد سیلندر، این بار علاوه بر سیلندر با مقطع دایره‌ای، سیلندر با مقطع مربعی و لوزی (مربع با ۴۵ درجه چرخش) نیز بررسی شده و مقدار نسبت دامنه نوسان به قطر (A) مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که منظور از قطر برای مقطع مربعی و لوزی همان قطر هیدرولیکی می‌باشد که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

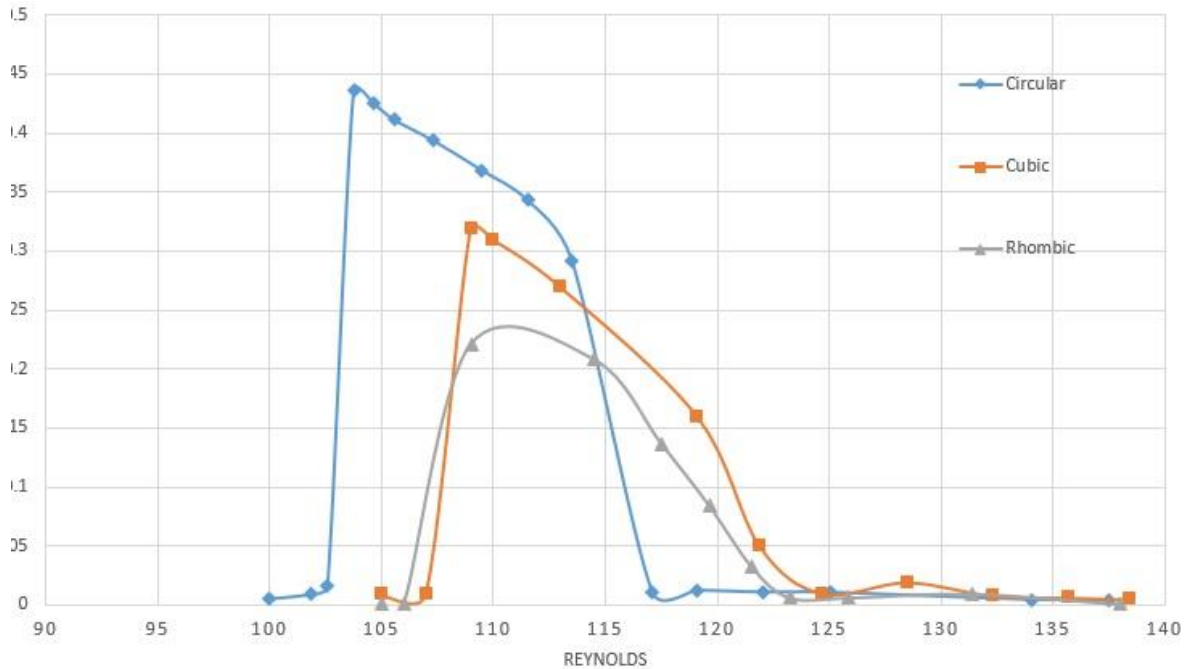
$$D_H = \frac{4A_c}{P} \quad (19-3)$$

که D_H قطر هیدرولیکی، A_c مساحت و P محیط مقطع مورد نظر می باشد که برای مقطع مربعی به ضلع a این مقدار برابر خواهد بود با:

$$D_H = \frac{4a^2}{4a} = a \quad (20-3)$$

بنابراین قطر هیدرولیکی برای مقطع مربعی برابر طول ضلع مربع می باشد.

با اعمال شرایط یکسان شبیه سازی بین این دو مقطع و مقطع دایره ای، نظیر جرم، سختی فنر و میرایی میزان جابجایی سیلندر در رینولدزهای مختلف تحقیق شد که نتایج آن در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۱ نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر در رینولدز های بین ۱۰۰ تا ۱۴۰ برای مقاطع مختلف

همانطور که در شکل ۳-۲۱ مشخص است میزان جابجایی در سیلندر های مربعی و لوزوی کمتر از سیلندر دایره‌ای (شکل ۳-۲۰) می‌باشد و نقطه‌ی آغازین نوسان هم در رینولدزهای بالاتری نسبت به سیلندر دایره‌ای بدست می‌آید.

برای حصول انرژی از گردابه‌ها شرایط بهینه عبارت است از بیشترین میزان جابجایی سیلندر (بیشترین شار القایی) و در کنار آن بیشتر بودن محدوده‌ی عدد رینولدز که باعث می‌شود کارایی دستگاه مبدل گردابه افزایش یابد و دستگاه در رینولدزهای مختلف کارایی داشته باشد. برای این منظور بهترین مقیاس برای مقایسه‌ی کارایی سیلندرهای سطح زیر نمودار هر منحنی می‌باشد. همانطور که در شکل ۳-۲۱ مشخص است سطح زیر نمودار سیلندر دایره‌ای به مراتب بیشتر از دو سیلندر دیگر می‌باشد. نمودار فوق همچنین در طراحی‌هایی که به منظور پایداری سازه‌ها در مقابل اثرات مخرب پدیده ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌شود اهمیت به سزایی می‌تواند داشته باشد. در این نوع طراحی‌ها برخلاف انتظار ما هدف به حداقل رساندن جابجایی و اثرات ناشی از آن می‌شود. در این صورت سیلندر با مقطع لوزی در مقابل جریان سیال مناسب‌ترین گزینه می‌باشد.

فصل ۴ محاسبات و نتایج

۴-۱- بررسی نتایج و محاسبات انرژی

در این قسمت، با استفاده از یک سری از نتایج بدست آمده در بخش‌های فوق، داده‌های آزمایشگاهی و پاره‌ای از ساده سازی‌ها و فرض‌های منطقی، به نتایجی در مورد انرژی حاصله از این سیستم مولد توان برای سیال عامل آب و هوا و می‌رسیم.

برای نمونه ارائه شده به عنوان طرح^۱ نمونه محاسبات به شکل زیر است:

اندازه‌های مورد نیاز برای این محاسبات از روی منابع معتبر گزارش شده و یا از روی نمونه آزمایشگاهی این طرح گزارش شده و مورد تایید قرار گرفته است. [46]

سطح مقطع عرضی سیلندر (A_c) عبارت است از قطر سیلندر در طول آن:

$$A_c = l * d = 76.6 \text{ cm}^2$$

L=طول سیلندر

D=قطر سیلندر

m=جرم سیلندر

جنس متریال نوعی PVC با نسبت جرم به طول برابر ۱/۱ کیلوگرم در متر .

$$m_c = l * \frac{w}{l} = 0/14 \text{ kg}$$

$$l=12/7 \text{ cm}$$

$$\frac{w}{l}=0/011 \text{ kg/cm}$$

میزان نیروی پسا (درگ) توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_D = A_{cyl} * \frac{\rho}{2} * U^2 * C_d \quad (۱-۴)$$

U سرعت متغییر جریان

$$A_{cyl} = \text{مقطع عرضی سیلندر برابر } 76/6 \text{ cm}^2$$

^۱ Prototype

$\rho =$ چگالی سیال (برای هوا ۱/۲۲۵ و برای آب ۱۰۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب)

ضریب پسا یا درگ $C_d =$

که این ضریب برای سیال آب از مدل سازی با نرم افزار به دست آمده و برای سیال هوا وابسته به هندسه‌ی مساله و عدد رینولدز جریان می‌باشد.

میزان نیروی پسا برای مدل با سیال هوا در جریان با سرعت تقریبی ۴/۵ متر بر ثانیه حدود ۰/۰۶ نیوتون می‌باشد.

$$F(4.5 \text{ m/s})=0/06 \text{ N}$$

عدد رینولدز طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Re}(v)=\frac{U*d}{\nu} \quad (۲-۴)$$

که U سرعت متغیر سیال، d قطر سیلندر و ν ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال که برای هوا برابر $15*10^{-6} \frac{m^2}{s}$ و برای آب برابر $10^{-6} \frac{m^2}{s}$ می‌باشد.

در جریان با سیال هوا سرعت ورودی به مبدل برابر 4/5 m/s در نظر گرفته شده و در نتیجه با توجه به هندسه مسئله به رینولدز برابر ۱۸۰۰۰ رسیدیم، در جریان با سیال آب مطلوب ما بررسی عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۲۰۰ می‌باشد.

عدد استروهال (St): عدد استروهال که خود تابعی از عدد رینولدز نیز می‌باشد طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود.

$$\text{St}(v)=\frac{fl}{U} \quad (۳-۴)$$

که f فرکانس نوسانات، l طول مشخصه و U سرعت جریان می‌باشد. عدد استروهال را می‌توان به صورت تابعی از عدد رینولدز به صورت زیر به دست آورد:

$$\text{St}(v)= -0/0065*\ln(\text{Re}(U))+0/21 \quad (۴-۴)$$

از طرفی عدد استروهال را نیز می‌توان از روی نمودار های بدست آمده از شبیه‌سازی برای ضرایب برآ و پسا به این شکل بدست آورد که فاصله‌ی بین دو قله در نمودار برابر زمان یک پریود یا T_c در نظر گرفت و میزان f (فرکانس) برابر $f_n = \frac{1}{T_c}$ بدست می‌آید و با داشتن f میتوان عدد استروهال را با دقت بالا محاسبه کرد.

برای سیال هوا با سرعت ۴/۵ عدد استروهال برابر 0/146 در نظر گرفته می‌شود و برای سیال آب در محدوده‌ی رینولدز ۱۰۰ عدد استروهال حدود 0/168 در نظر گرفته می‌شود. عدد استروهال برای بدست آوردن فرکانس ریزش گردابه‌ها در پشت سیلندر (فرمول زیر) مورد نیاز است.

$$f_n = St(U) * \frac{U}{d} \quad (۴-۵)$$

که f_n فرکانس ریزش گردابه‌ها U سرعت متغییر جریان و d قطر سیلندر و $St(U)$ عدد استروهال در سرعت مورد نظر می‌باشد.

این مقدار برای جریان هوا با سرعت ۴/۵ برابر حدود ۱۱ سیکل در ثانیه به دست آمده است و برای سیال آب در محاسبات اولیه برابر ۰/۲ سیکل در ثانیه می‌باشد که در طراحی اصلاح شده که در ادامه به آن خواهیم پرداخت این عدد به ۱/۶ سیکل در ثانیه خواهد رسید.

عدد فرکانس در واقع نشان گر تعداد نواسانات سیلندر در واحد زمان می‌باشد. برای حصول به این نواسانات نیازمند حرکت هارمونیک سیستم می‌باشد. رابطه‌ی زیر بیانگر فرکانس طبیعی سیستم با توجه به ضریب سختی فنر می‌باشد.

$$f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۴-۶)$$

k برابر ثابت سختی فنر و m جرم سیلندر می‌باشد. طبق رابطه‌ی فوق برای بدست آوردن میزان k خواهیم داشت:

$$k(v) = m * f_n^2 \quad (۴-۷)$$

برای بازه‌ی مورد نظر از سرعت باد ۴/۵ الی ۶/۵ متر بر ثانیه خواهیم داشت:

$$k(4/5 \text{ m/s})=16/4 \text{ kg/s}^2$$

$$k(6/5 \text{ m/s})=35/7 \text{ kg/s}^2$$

این مقادیر را با مقادیر حاصل از معادله‌ی ذیل مقایسه می‌کنیم:

$$k = \frac{F_{max}}{l_{max} - l_{min}} \quad (۸-۴)$$

که در آن F_{max} برابر حداکثر نیروی وارده به فنر بدون آنکه تغییر شکل بدهد. و l_{max} حداکثر طول فنر در حال کشش و l_{min} طول فنر در حالت عادی می‌باشد. که این مقادیر به این صورت گزارش شده‌اند: $F=2/09 \text{ N}$ و $l_{min}=3/8 \text{ cm}$ و $l_{max}=16 \text{ cm}$ بنابراین خواهیم داشت: $k=17/2 \text{ kg/s}^2$ از آنجاییکه هدف ما نزدیک بودن فرکانس‌ها به محدوده‌ی رزونانس می‌باشد بنابراین باید از فنی با ثابت k که در محدوده‌ی تعریف شده در معادلات ۷-۴ و ۸-۴ قرار گیرد استفاده کرد، خواهیم دید که عدد بدست آمده در معادله ۸-۴ برابر ۱۷/۲ نزدیک به عدد محاسبه شده در معادله ۷-۴ برای سرعت $4/5 \text{ m/s}$ (۱۶/۴) می‌باشد. با قرار دادن مقدار اخیر به عنوان سختی فنر، فرکانس طبیعی مورد انتظار برابر خواهد شد با:

$$f_n \left(k = 17/2 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right) = 11/1 \frac{\text{cycle}}{\text{s}}$$

میزان نیروی کل وارده به سیلندر برابر مجموع نیروی لیفت و نیروی فنر می‌باشد. میزان نیروی برآ از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$f_l = \frac{1}{2} * \rho * U^2 * A_{cyl} * C_l \quad (۹-۴)$$

که مقدار ρ چگالی سیال، U سرعت سیال، A سطح مقطع سیلندر و C_l ضریب برآ می‌باشد که بر حسب عدد رینولدز و هندسه جریان متغیر است و در اینجا از داده‌های شبیه‌سازی بدست آمده است. برای جریان باد با سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه میزان نیروی لیفت برابر $0/09 \text{ N}$ گزارش شده است این درحالی- است که برای جریان آب با سرعت ۲ متر بر ثانیه و عدد رینولدز ۱۰۰ میزان $C_l = 0/3$ بدست آمده و بنابراین نیروی لیفت برابر $15/24 \text{ N}$ می‌باشد.

میزان نیروی برآ بدست آمده در بالا حداکثر نیروی اعمالی از جریان سیال به سیلندر می‌باشد، این نیرو با توجه به فرکانس نوسان سیلندر تغییر جهت می‌دهد که در واقع تابعی از سرعت جریان می‌باشد. میزان دقیق نیروی برآ با توجه به سرعت و زمان طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$f_l(t, u) = f_l(u) * \sin(2 * \pi * f(u) * t) \quad (10-4)$$

که f_l نیروی لیفت، u سرعت جریان سیال، f فرکانس ریزش گردابه‌ها در پشت سیلندر و t زمان می‌باشد. این معادله از نیروی برآ حداکثری به عنوان دامنه‌ی حرکت سینوسی فرکانس استفاده می‌کند. دامنه‌ی نوسان برای محاسبه‌ی فاصله‌ی آهنربا از سیم‌پیچ‌ها مورد نیاز می‌باشد که از ترکیب فرمول‌های زیر بدست می‌آید:

$$f_l = m_c * a_{max} \quad (11-4)$$

$$a_{max} = (2 * \pi * f(u))^2 * A \quad (12-4)$$

در رابطه‌ی فوق A دامنه‌ی نوسان می‌باشد که طبق دو رابطه‌ی فوق به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A(v) = \frac{f_l}{m_c * (2 * \pi * f(u))^2} \quad (13-4)$$

که f_l نیروی لیفت، m_c جرم سیلندر، $f(u)$ فرکانس نوسان و u سرعت جریان می‌باشد.

برای دامنه جریان باد با سرعت $4/5$ متر بر ثانیه دامنه نوسان برابر $0/014$ cm خواهد بود.

تغییرات در میدان مغناطیسی یک سیم‌پیچ باعث القای جریان الکتروسیسته در آن می‌شود. تغییر در میدان مغناطیسی با اضافه کردن یا حذف میدان مغناطیسی حول سیم‌پیچ اتفاق می‌افتد. رابطه‌ی بین ولتاژ تولیدی و تغییرات میدان مغناطیسی طبق قانون لنز-فارادی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (14-4)$$

که ε برابر نیروی الکتروموتیو و واحد آن ولت می‌باشد

N = تعداد سیم‌پیچ‌ها، (برابر ۱۰۰)

$\Delta \Phi = (A * B)$ تغییرات شار مغناطیسی

$B =$ میدان مغناطیسی (بسته به ظرفیت آهنربا) در اینجا $0 \cdot 1/48 T$

اندازه‌ی میدان مغناطیسی بسته به نوسان سیلندر از 0 تا حداکثر ظرفیت آهنربا متغیر می‌باشد. هنگامی که آهنربا درون سیم‌پیچ باشد این میزان بیشینه و هنگامی که آهنربا کاملاً بیرون از سیم‌پیچ باشد این میزان برابر صفر می‌باشد که موجب شار مغناطیسی و نهایتاً ولتاژ می‌شود.

$$A = \text{cross sectional area of the coil} = \pi * r^2$$

$$r = 0/95 \text{ cm}$$

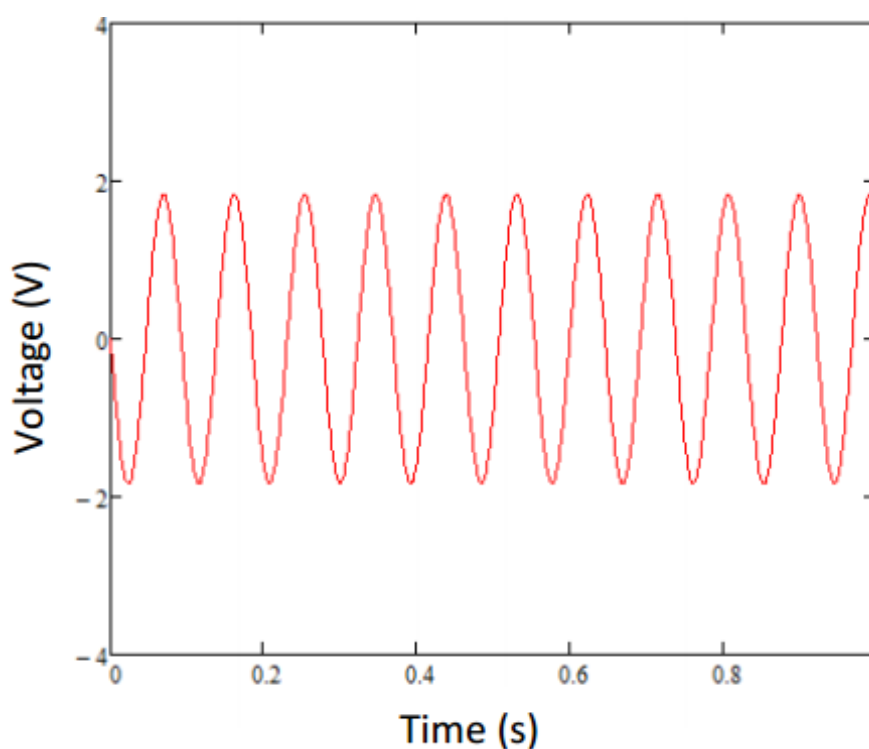
مساحت مقطع عرضی سیم‌پیچ، مساحتی از سیم‌پیچ است که عمود بر حرکت آهنربا می‌باشد، برای سیم‌پیچ مورد استفاده‌ی ما این مساحت دایره‌ای است که سیم‌های سیم‌پیچ می‌سازند.

$$\Delta t = \frac{1}{f(u) * 4}$$

Δt یا بازه‌ی زمانی، مقدار زمان لازم برای رسیدن به حداکثر دامنه از حالت تعادل توسط سیلندر می‌باشد که معادل یک چهارم زمان هر سیکل می‌باشد. این میزان در واقع مقدار زمان لازم برای ورود کامل آهنربا به سیم‌پیچ و یا خروج از آن می‌باشد.

با بکارگیری معادلات فوق مبدل‌های گردابه‌ای می‌توانند با دور و نزدیک کردن آهنربا و سیم‌پیچ به یکدیگر و تغییر در شار مغناطیسی انرژی مکانیکی سیال را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. در طراحی اولیه برای مبدل با سیال هوا میزان ولتاژ خروجی را برابر $V = 1/8$ نشان داده است. که در ادامه با اصلاحاتی در طراحی برای سیال هوا به همراه آب میزان این ولتاژ ارتقا خواهد یافت. با میزان ولتاژ خروجی با توجه به نوسانی بودن حرکت سیلندر، سینوسی می‌باشد و در واقع جریان خروجی متناوب (AC) می‌باشد. رابطه و نمودار ولتاژ خروجی برای مدل ارائه شده بصورت زیر می‌باشد.

$$V(t,u) = \varepsilon(u) * \sin(f(u) * 2 * \pi * t) \quad (15-4)$$



شکل ۴-۱ زمان در مقابل ولتاژ

قطر سیم پیچ‌ها و همچنین قدرت میدان مغناطیسی (قدرت آهنربا) از جمله محدودیت‌های طرح از نظر وزن، حجم و هزینه می‌باشد که راجع به هزینه و صرفه اقتصادی طرح به تفصیل بحث خواهد شد. تعداد دورهای سیم پیچ رابطه مستقیم با میزان ولتاژ القایی داشته که در تغییر در طراحی این میزان افزایش خواهد یافت.

۴-۲- طراحی اصلاح شده

با توجه به محاسبات انجام شده در قسمت قبلی و بررسی گلوگاه‌هایی در طرح و مدل که با اصلاح آن میتوان میزان انرژی استحصال را افزایش داد. لازم به ذکر است که طرح‌های مبنای کار دو سیستم مولد توان گردابه‌ای در مقیاس کوچک که یکی با سیال هوا و دیگری با سیال آب کار می‌کند می‌باشد. [46,47]

انتخاب جنس سیلندر

جنس سیلندر و متعاقب آن وزن آن به طور مستقیم بر بازدهی سیستم تاثیرگذار می‌باشد. مهم‌ترین المان‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب جنس سیلندر عبارتند از: چگالی و استحکام سیلندر، سطح آن، در دسترس بودن متریال و هزینه‌ی آن می‌باشد. با انتخاب سیلندر از جنس پلاستیک قالب‌گیری شده و متحرک‌سازی آهن‌ریا به جای سیم‌پیچ جرم سیستم برابر خواهد شد با:

$$m_{sys} = 0/074 \text{ kg}$$

m_{sys} در واقع جرم قسمت متحرک سیستم می‌باشد (مجموع جرم سیلندر و آهن‌ریا)

$B=0/28T$ همانطور که مشاهده می‌کنید میزان میدان مغناطیسی سیستم کاهش داده شده و این امر بخاطر نیاز به کاهش وزن قسمت متحرک سیستم اتفاق افتاده است. در جدول زیر اعداد مربوط به طراحی بهینه برای سیستم مبدل گردابه‌ای با دو سیال عامل هوا و آب آورده شده است. در طراحی برای سیال هوا از گزارش نتایج عددی [46] و برای سیال آب از نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار اپن‌فوم و همچنین گزارش تست‌های انجام شده در دانشگاه میشیگان [47] استفاده شده است.

جدول ۴ - ۱ فرض ها و اعداد مورد بحث

			واحد	آب	هوا
۱	طول سیلندر	l_c	m	0/127	0/127
۲	قطر سیلندر	d	m	0/2	0/06
۳	جرم قسمت متحرک	m_{sys}	Kg	0/386+0/14=0/526	0/074
۴	قدرت میدان مغناطیسی	B	T	1/32	0/28
۵	عدد رینولدز جریان	Re	-	100	$1/35 * 10^5$
۶	عدد استروهل	St	-	0/168	0/148
۷	فرکانس نوسان	f_n	1/s	2/6	14/7
۸	ثابت فنر	K	N/m	1/35	16/3
۹	نیروی برآ	F_l	N	15/2	0/07
۱۰	دامنه‌ی نوسان	A	Cm	10	0/011
۱۱	نیروی بدست آمده	ε	V	۲/۹	0/46

همانطور که مشاهده می‌شود در اعداد به‌دست آمده در جدول فوق دامنه‌ی نوسان برای سیلندر نوسانگر در آب 10cm گزارش شده که با توجه به قطر سیلندر که برابر 20cm می‌باشد میزان $\frac{a_{max}}{d}$ (نسبت دامنه به قطر سیلندر) برابر ۰/۵ می‌شود که با نتایج شبیه سازی جابجایی آزاد سیلندر مطابقت دارد. میزان ولتاژ بدست آمده در دو سیستم برای آب و هوا به ترتیب 9/2 V و 0/46 V می‌باشد.

۴-۳- مفهوم انرژی و کاربردهای انرژی در تحلیل سیستم

زمانی که قانون اول ترمودینامیک به‌عنوان اصل بقای انرژی بیان می‌شود، با کمیت اشکال مختلف انرژی سروکار داریم. از دیدگاه مهندسی یک کمیت انرژی دارای کیفیت است. در مجموع کیفیت به معنی درجه مفید بودن می‌باشد. تغییرات در سیستم‌ها به‌وسیله عکس‌العمل‌های کار و گرما به‌وجود می‌آیند. مشاهدات قبلی نشان می‌دهند که عکس‌العمل کار بسیار مهم‌تر از عکس‌العمل گرما در تغییر حالت سیستم می‌باشد. از آنجایی که عکس‌العمل‌های کار درجه مفید بودن بالایی دارند گفته می‌شود که کیفیت بالاتری نسبت به عکس‌العمل‌های گرما دارند. حتی قانون دوم ترمودینامیک استاندارد بالاتری برای کار، نسبت به گرما، قائل می‌شود. کار به‌طور کامل به گرما تبدیل می‌شود اما تبدیل گرما به کار توسط دستگاهی که در یک سیکل ترمودینامیکی کار می‌کند، بسیار محدود است. بنابراین کار مفیدتر از گرماست و به‌دست آوردن آن در برخی مواقع بسیار مشکل است.

میزان مفید بودن انرژی ممکن است در مورد اشکال مختلف انرژی و تبدلات آن در حالت معین به کار برده شود. ظرفیت مقدار انرژی داده شده برای تولید کار به‌عنوان میزان کیفیت گرما پذیرفته شده است [۱]. به‌طور کلی:

کیفیت انرژی، پتانسیل انرژی برای تولید کار مفید است.

کار مفید مربوط به کیفیت انرژی، پتانسیل کار انرژی خوانده می‌شود که به یک مبنا اندازه‌گیری احتیاج دارد. این مبنا معمولاً محیط در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه:

پتانسیل کار یک مقدار معین از انرژی به صورت ماکزیمم کار مفید ممکن تعریف می‌شود که می‌تواند از آن انرژی در محیط معینی به دست آید.

هرگاه پتانسیل یک مقدار معین از انرژی در طول فرآیند کاهش یابد گفته می‌شود که انرژی کاهش درجه داده است. پس قانون اول و دوم به قانون بقا و کاهش درجه انرژی تبدیل می‌شوند و به شکل ذیل درمی‌آیند [48]:

مقدار کل انرژی ثابت است (قانون اول).

پتانسیل تولید کار مفید همواره کاهش می‌یابد (قانون دوم).

بنابراین انرژی در طول مدت انتقال یا تغییر شکل، باقی می‌ماند اما کاهش درجه می‌دهد. این پتانسیل که کار مفید تولید می‌کند، کیفیت انرژی را مشخص می‌کند. بقای انرژی به مفهوم کاهش استفاده از انرژی است. بنابراین کم کردن کاهش درجه انرژی در زمان استفاده از آن اهمیت زیادی دارد.

باید توجه شود که قانون اول و دوم به عمد در ترم‌های انرژی بیان شده‌اند. اگر بخواهیم مقدار پتانسیل یک سیستم در حالت معین یا تغییر در پتانسیل کار فرآیندی را داشته باشیم باید هر دو قانون را هم‌زمان به کار گیریم. این روش با بسیاری از بحث‌های مقدماتی ترمودینامیک تفاوت دارد. در آن بحث‌ها هر یک از قوانین به‌طور جداگانه بررسی می‌شدند. با ترکیب دو قانون یک معادله کلی برای محاسبه عکس‌العمل کار در حضور بازگشت‌ناپذیری‌ها به دست می‌آید که با این معادله می‌توانیم به پتانسیل کار سیستم‌ها مقداری نسبت دهیم. دلیل ترکیب این دو قانون این است که قانون اول شامل ترم کار است اما ترم مربوط به بازگشت‌ناپذیری‌ها (تولید انتروپی) در آن وجود ندارد و هیچ ترم دیگری به جای آن نوشته نشده است. پس برای بیان ارتباط مستقیم با تولید انتروپی (یا بازگشت‌ناپذیری) باید قانون دوم با قانون اول ترکیب شود.

قانون اول و دوم ترمودینامیک به شکل زیر نوشته می‌شود [49]:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=0}^n \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}h^{\circ} - \sum_{out} \dot{m}h^{\circ} \quad (۴-۱۶)$$

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS}{dt} - \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}}{T_i} - \sum_{in} \dot{m}s + \sum_{out} \dot{m}s \geq 0 \quad (17-4)$$

که با توجه به مساله‌ی ما که در آن تنها ترم مورد تغییر سرعت جریان در خروج نسبت به سرعت اولیه می‌باشد ترم‌های مربوط به دما از معادلات حذف می‌گردد و با توجه به اینکه آنتالپی (h°)، برابر است

$$h + \frac{V^2}{2} + gz$$

با فرض ثابت بودن ارتفاع در ورود و خروج برای معادله (۱) خواهیم داشت:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m}}{2} (v_{in}^2 - v_{out}^2) \quad (18-4)$$

در زیر نمونه محاسبات برای مورد شبیه سازی شده را با فرض‌های منطقی نشان خواهیم داد.

برای بدست آوردن جرم سیال مورد نظر با توجه به حجم در نظر گرفته و چگالی سیال خواهیم داشت:

$$V = 1 * A = 0/127 * 0/102 = 0/013$$

$$\dot{m} = V * \frac{\rho}{t} = 34/24 \frac{Kg}{s}$$

در محاسبات بالا حجم‌ها را از هندسه‌ی شبیه سازی و زمان لازم برای ریزش یک گردابه را به عنوان زمان مرجع در نظر گرفتیم.

حال باید سرعت‌ها را در ورود خروج باهم مقایسه کنیم:

سرعت ورودی ۲ متر برثانیه در نظر گرفته شد و برای محاسبه سرعت خروجی میزان سرعت میانگین

سلول‌ها در حجم کوچکی از انتهای دامنه در نظر گرفته شده است که برابر ۱/۸۱ متر بر ثانیه می‌باشد.

بنابراین حدود ۱۰٪ از سرعت کاسته شده که ازین میزان بخشی به نیرو و بخشی از انرژی مستقیم الخط

آب با چرخشی شدن جریان مضمحل می‌شود. بنابراین برای فرمول فوق خواهیم داشت:

$$\frac{dE}{dt} = 12/5w$$

عدد فوق میزان حداکثر توان قابل برداشت توسط سیستم شبیه سازی شده می‌باشد، این درحالیست که حداکثر نیروی برآ برای این سیستم برابر ۱۵/۲ که در واقع یک نیروی سینوسی بوده و از صفر تا این عدد در دامنه‌ی بدست آمده‌ی ۰/۱ متر جابجا می‌شود میزان توان برداشت شده از سیستم برابر:

$$P = \frac{Fla_{max}}{t} = 5/25w \quad (۱۹-۴)$$

از میزان ۱۲/۵ وات انرژی قابل حصول میزان ۷/۵ وات انرژی بدست آمده بنابراین میزان راندمان انرژی برای نمونه‌ی مورد نظر برابر خواهد بود با:

$$\Psi = \frac{P_{act}}{P_{total}} = \frac{5.25}{12.5} * 100 = 42/5 \% \quad (۲۰-۴)$$

میزان راندمان انرژی برای مورد شبیه سازی شده برابر ۴۲/۵٪ بدست آمده است.

برای بدست آوردن راندمان انرژی یا راندمان قانون اول میزان نرخ کار مفید به توان جریان سیال ورودی را طبق رابطه‌ی زیر بدست می‌آوریم

$$\eta = \frac{W_{out}}{P} \quad (۲۱-۴)$$

که در عبارت فوق W_{out} کار خروجی توسط سیلندر می‌باشد و P توان جریان سیال بوده که طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (۲۲-۴)$$

بنابراین برای سیستم مورد نظر راندمان قانون اول برابر خواهد بود با:

$$\eta = \frac{5/25}{68/48} = 7/6\%$$

در راندمان انرژی میزان انرژی بدست آمده به کل انرژی ورودی محاسبه شده است درحالی که در راندمان انرژی میزان انرژی استحصال شده نسبت به اختلاف میان انرژی ورودی و خروجی محاسبه شده است. این تفاوت انرژی در ورود و خروج بخشی صرف جابجایی سیلندر شده (کار مفید) و بقیه تحت عنوان تخریب انرژی به صورت تبدیل جریان مستقیم الخط سیال به جریان چرخشی (گردابه) شده است.

۴-۴- مبدل VIVACE^۱

در این بخش، مبدلی VIVACE مورد بررسی قرار گرفته و این مبدل کاربردهای متنوعی از دستگاه های کوچک گرفته تا نیروگاه های برق گیگا واتی. یک مبدل VIVACE که از جریان های اقیانوسی و رودخانه انرژی قابل استفاده تولید می کند، ماژولار، منعطف و قابل مقیاس بندی است. بنابراین می توان آن را طراحی، تولید کرده و استقرار داد تا برای کاربردهای مختلف برق تولید کند. ماژولار بودن بدین معنی است که VIVACE از مونتاژ ماژول های VIVACE تشکیل می شود که می تواند شامل یک ماژول تکی با اندازه قطر ۲ سانتی متر و طول ۳۰-۴۰ سانتیمتر باشد یا می تواند شامل هزاران ماژول با سیلندرهای با قطر یک متر و طول ۲۰ متر باشند. منعطف بودن بدان معنی است که VIVACE می تواند مورد طراحی قرار گرفته و برای خروجی های مختلف طراحی گردد. قابل مقیاس بندی بودن بدان معناست که می تواند VIVACE را در اندازه های مختلف که در بالا ذکر شد طراحی و تولید کرد و بسته به نوع مصرف مورد استفاده قرار داد.

زمینه های استفاده

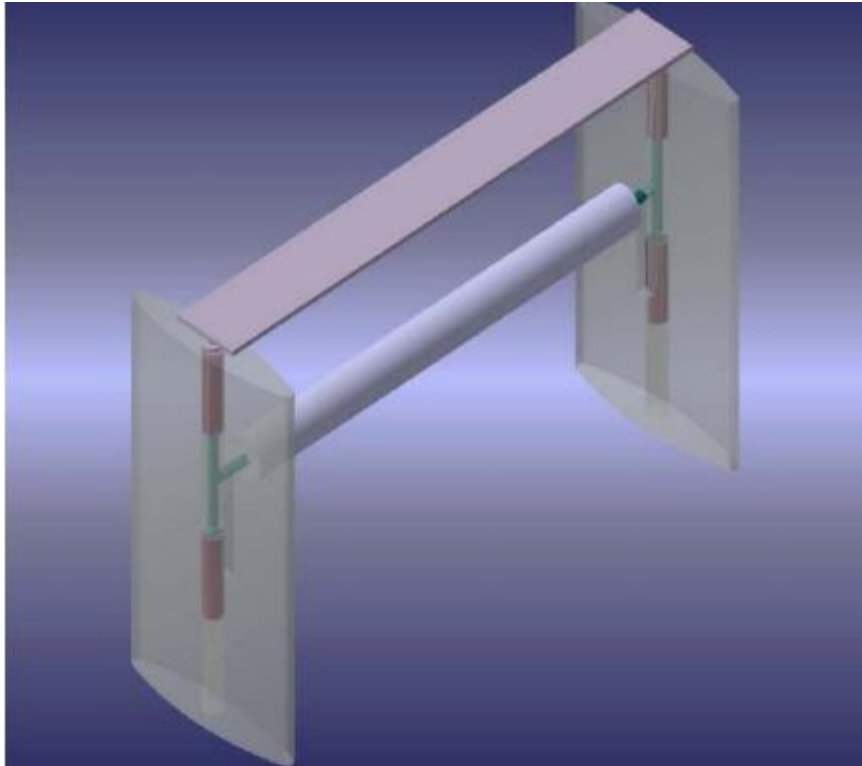
ماژولار بودن، انعطاف پذیری و قابلیت مقیاس بندی مبدل VIVACE آن را برای انواع مختلف استفاده مناسب کرده است.

جدول ۴-۲ ماژول های انرژی استحصالی توسط گردابه

Scale	Power $P_{VIVACE-Har}$ (MW)	Number of Cylinders	D (m)	L (m)	h (m)	S (m ²)	W (ktons)
Giga	1000	32,849	2	40	60	1,497,335	1,775
Mega	100	6,570	2	20	30	258,998	159.0
Large	10	1,314	1	20	15	14,569	11.4
Medium	1	526	0.5	10	15	2,428	1.1
Small	0.1	328	0.2	4	5	92	0.10
Micro	0.05	657	0.1	2	5	45	0.05

به منظور شناخت بهتر و همچنین فراهم آوردن پیش نیازهای لازم برای انجام تحلیل اقتصادی، مبدل باید مورد بررسی قرار گرفته و اجزای آن شناسایی شود. المان های یک مبدل VIVACE عبارتند از: یک سیلندر صلب دایره ای، دو فنر خطی پشتیبان، یک ژنراتور یا بیشتر و یک مکانیزم انتقال قدرت^۱. یک نمونه ی اولیه از مبدل VIVACE در دانشگاه میشیگان ساخته شده است که در جریان با آشفستگی پایین و کانال با سطح آزاد مشغول به کار می باشد. شکل زیر تصویر سه بعدی از نمونه ی اولیه را نشان می دهد.

^۱ پیوست دارد



شکل ۴-۲ نمونه سه بعدی مبدل VIVACE

برای تبدیل انرژی هیدروسینتیک^۱ به انرژی الکتریکی قابل استفاده، نیاز به یک سیستم استحصال انرژی می‌باشد. این سیستم وابسته به پارامترهایی از قبیل توان خروجی بهینه، راندمان، چگالی انرژی و هزینه می‌باشد که برای گسترش این فناوری ضروری می‌باشد.

۴-۵- تبدیل انرژی

وظیفه‌ی این قسمت دریافت انرژی حرکتی خطی سیلندر و تبدیل انرژی سینتیک آن به انرژی الکتریکی می‌باشد. ایده‌ی کلی برای حصول این هدف حرکت خطی آهنربایی محیط بر سیم‌پیچ‌های متعدد می‌باشد که باعث القای الکتریسیته در سیم‌پیچ می‌شود.

^۱ Hydrokinetic

سیستم سیم‌پیچ

به علت تغییرات در نواسانات سیلندر معمولاً از چند سیم‌پیچ مقطع به طور سری استفاده می‌شود. به این دلیل که سیم‌پیچ تنها هنگامی جریان الکتریسیته تولید می‌کند که سیم‌پیچ به طور کامل وارد میدان مغناطیسی شده و از آن خارج شود، طراحی یک سیم‌پیچ بلندتر این خطر را به همراه دارد که در صورت کمتر شدن دامنه‌ی نوسان سیلندر هیچ انرژی الکتریکی در سیم‌پیچ القا نگردد بنابراین استفاده از چند سیم‌پیچ کوتاه‌تر باعث کمتر شدن ریسک کار می‌شود، مقطع بودن سیم‌پیچ باعث می‌شود که هرکدام از آن‌ها حداکثر توان را تولید کنند.

هسته‌ی آهنی

برای افزایش نفوذ پذیری مغناطیسی، یک هسته‌ی آهنی در مرکز هر سیم‌پیچ قرار داده شده است. با وجود اینکه افزایش حجم مانع افزایش دوره‌های سیم‌پیچ می‌شود، افزایش نفوذپذیری وابسته‌ی باعث جبران این کاهش دور سیم‌پیچ می‌شود.

آهنربا و یاتاقان‌ها

برای این کار نیاز به آهنربایی با بیشترین سطح مغناطیسی و قطر داخلی مناسب برای همخوانی با سایر اجزا نیاز می‌باشد. آهنربایی از جنس نئودیمیم دارای قدرت بالا نسبت به حجم خود می‌باشد بنابراین انتخاب مناسبی می‌باشد همچنین نیاز به سیستمی برای پوشش دهی آهنربا می‌باشد که از آن در برابر خوردگی محافظت نماید. استفاده از یاتاقان برای محافظت از آهنربا همچنین سهولت در جابجایی سیلندر بسیار موثر می‌باشد.

فنرها

فنرها نقش محافظ حرکت را در سیستم ایفا می‌کنند، به این شکل که ضرایب سختی مختلف فنر برای روان کردن حرکت سیلندر یا سخت‌تر کردن آن موثر می‌باشد. جنس فنر برای مقاومت در برابر خوردگی و عمر بالا از اهمیت بالا برخوردار می‌باشد.

محافظ داخلی

تمامی سیم‌پیچ‌ها در محفظه‌ای لوله‌ای و غیر قابل نفوذ توسط آب قرار خواهند گرفت، برای ارضای همزمان دو شرط نازک بودن محفظه و مقاومت در برابر فشار بالای آب در اعماق، محفظه‌ی لوله‌ای باید از جنس PVC باشد. همچنین سیم‌ها از درون محافظ داخلی به سمت قسمت فوقانی مبدل رفته و از آنجا به سمت یکسو کننده که جریان متناوب AC را به جریان مستقیم DC تبدیل می‌کند خواهد رفت.

محافظ خارجی

محافظ خارجی برای نگهداری آهنربا و یاتاقان‌ها، و اتصال آن‌ها به سیلندر می‌باشد. قطر داخلی این محافظ برابر قطر خارجی آهنربا و یاتاقان‌ها می‌باشد. سیستم دارای دو یاتاقان در هر سمت (یکی بالای آهنربا و دیگری پایین آن) می‌باشد. آهنربا توسط چسب به جداره محافظ چسبیده میشود و همراه آن نوسان می‌کند. نهایتاً در قسمت بیرونی محافظ خارجی، توسط میله شناور که خود با پیچ و مهره به سیلندر متصل است احاطه شده است. میله‌ی شناور و سیلندر از جنس آلومینیوم بوده و به همراه محافظ خارجی، آهنربا و یاتاقان بر روی محافظ داخلی که سیم‌پیچ‌ها را در بر میگیرد نوسان میکنند.

جدول ۴-۳ قیمت تجهیزات مورد نیاز برای مدل

نام قطعه	تعداد	منبع قیمت	کد قطعه	فی قیمت	جنس	جمع
آهنربای نئودیموم	1	kjmagnetics.com	RZ0Y0X0	95\$	نئودیموم	95\$
یاتاقان خطی خود تنظیم	2	igus.com	RJI-01-32	71\$	پلاستیک آلومینیوم	142\$
محافظ داخلی	90cm	mcmaster.com	53945k223	21\$	PVC	21\$
محافظ خارجی	30cm	mcmaster.com	8749k25	25\$	PVC	25\$
هسته آهنی	1	kjmagnetics	-	20\$	آهن	20\$
سیم برای سیم پیچ	۳ حلقه	mcmaster.com	7588k85	25\$	مس	75\$
سیلندر آلومینیوم م و قاب	۱	mcmaster.com	-	15\$	آلومینیوم	15\$
چسب آب بندی	۱	solutions.3m.com	60980042885	10\$	polyurethane	10\$
قیمت مجموع						403\$

لازم به ذکر می‌باشد در انتخاب قطعات، در بین قطعات مشابه، با کیفیت ترین قطعات برای طول عمر بالاتر (طول عمر حداقل ۲۰ سال) مد نظر قرار گرفته است. همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود ساخت مدل کوچک از این مبدل هزینه‌ای حدود ۴۰۳ دلار حدوداً معادل ۱,۳۱۰,۰۰۰ تومان (نرخ دلار برابر ۳۲۵۰ تومان) خواهد داشت.

۴-۶- توان خروجی مدل

نتایج زیر، حاصل تست مدل با مشخصات فوق در آزمایشگاه دانشگاه میشیگان می‌باشد [۱] که در آن بررسی توان خروجی و راندمان از اهمیت بالا برخوردار می‌باشند. ایده‌ی کلی تست مدل، نوسان آهنربا حول سیم‌پیچ و اندازه‌گیری ولتاژ القایی و محاسبه‌ی توان آن می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که مدل دارای تنها یک سیلندر می‌باشد درحالی‌که در مدل‌های اقتصادی بیش از یک سیلندر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نیروی وارده از سیال به سیستم توسط نیرو سنج محاسبه شده و توان ورودی طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{input} = F \cdot x \cdot t \quad (۲۱-۴)$$

برای محاسبه‌ی توان خروجی ابتدا باید توسط یک مولتی‌متر مقاومت سیم‌پیچ را محاسبه کرده، و متعاقباً با حرکت آهنربا حول سیم‌پیچ، ولت‌متر میزان ولتاژ القایی را محاسبه کند تا توسط رابطه‌ی زیر میزان توان خروجی بدست آید:

$$P_{output} = \frac{V^2}{R} \quad (۲۲-۴)$$

در نهایت داده‌های زیر توسط تست‌های فوق بدست آمده است:

جدول ۴-۴ نتایج آزمایشگاهی

داده های ورودی				داده های خروجی		
مسیر طی شده (m)	نیروی اعمالی (N)	زمان نیروی اعمالی (s)	توان ورودی (W)	ولتاژ (V)	مقاومت (ohms)	توان خروجی (W)
۰/۱۰۵	۴/۴۵	۰/۱۶۷	۰/۰۷۸	۸	۱۶۰۰	۰/۰۴
راندمان = ۰/۵۱						

داشتن راندمان مدل به ما این امکان را می دهد که با شبیه سازی های کامپیوتری در ابعاد مدل و بدست آوردن توان ورودی بتوانیم توان خروجی را به راحتی محاسبه نماییم.

۴-۷- بررسی اقتصادی طرح بر اساس مدل

در این بخش به بررسی اقتصادی طرح می پردازیم. با توجه به آنکه تولید برق به این روش تولید پاک می باشد، حمایت هایی اقتصادی از طرف دولت انجام می گیرد که در تصمیم گیری های مدیریتی می تواند نقش داشته باشد. قیمت خرید برق طرح مورد نظر در سال های ۹۳ و ۹۴ به شرح شکل زیر است.

ردیف	انواع نیروگاه	نرخ پایه خرید تضمینی برق (ریال بر کیلووات ساعت)
۱	لندفیل	۲۷۰۰
	هضم بی هوازی زائدات دامی و کشاورزی و فاضلاب	۳۵۰۰
	زیانه سوز و گازی سازی زیانه	۳۷۰۰
۲	با ظرفیت بیش از ۵۰ مگاوات*	۳۴۰۰
	با ظرفیت ۵۰ مگاوات و کمتر	۴۲۰۰
۳	با ظرفیت بیش از ۳۰ مگاوات*	۳۲۰۰
	با ظرفیت ۳۰ مگاوات و کمتر	۴۰۰۰
	با ظرفیت ۱۰ مگاوات و کمتر	۴۹۰۰
۴	زمین گرمایی (شامل حفاری و تجهیزات)	۴۹۰۰
۵	تولید برق از بازیافت تلفات حرارتی در فرآیند های صنعتی	۲۹۰۰
۶	آبی کوچک (به ظرفیت ۱۰ مگاوات و کمتر)	۲۱۰۰
	بر رودخانه ها و تجهیزات جانبی سدها بر خطوط لوله انتقال آب	۱۵۰۰

شکل ۴-۳ تعرفه خرید برق

در قدم اول برای محاسبه‌ی هزینه‌ی هر کیلو وات ساعت برق تولیدی توسط مدل به محاسبه‌ی مجموع انرژی تولیدی توسط آن در طول عمر متوسط که در آب حداقل ۲۰ سال تخمین زده شده (و در هوا قاعدتا بسیار بیشتر خواهد بود) خواهیم پرداخت.

$$0/04 \times 3600 \times 24 \times 365 \times 20 \times 0/001 = 25229 \text{ kwh}$$

بنابراین مدل مذکور در طول دوره‌ی بهره برداری خود ۲۵/۲۲۹ کیلووات ساعت برق تولید می‌کند. با توجه به هزینه ۴۰۳ دلاری طرح و با احتساب حدود ۲۰٪ هزینه‌ی تعمیر و نگهداری حدود ۴۸۴ دلار هزینه‌ی طرح در طول دوره می‌باشد. بنابراین هزینه‌ی هر کیلو وات ساعت برق تولیدی در این روش برابر خواهد بود با:

$$460/25229 = 0/02 \text{ \$/kwh}$$

این در حالیست که هزینه‌ی برق تولیدی توسط سایر انرژی های نو بسیار بیشتر از این مقدار می‌باشد برای مثال برق تولیدی توسط انرژی باد حدود ۰/۰۷ \$/kwh، برق خورشیدی حدود ۰/۵ \$/kwh و برق هسته‌ای برابر ۰/۰۴ \$/kwh می‌باشد.

برای محاسبه‌ی دوره‌ی بازگشت سرمایه طرح نیز روش های متفاوتی وجود دارد علت آن هم به دلیل پلکانی بودن تعرفه براساس میزان مصرف و همچنین متفاوت بودن قیمت در ساعات اوج مصرف و سایر

ساعات شبانه‌روز می‌باشد. یکی از این روش‌ها استفاده از سیستم مبدل به عنوان سیستم کمکی در ساعات اوج مصرف می‌باشد. به این صورت که در بقیه ساعات شبانه روز توان تولیدی ذخیره و در زمان مورد نیاز به دست مصرف کننده برسد. روش دیگر استفاده‌ی این سیستم در پلکان های بالای مصرف می‌باشد. در جدول زیر پلکان‌های قیمت برق مصرفی را در سال های ۹۳ و ۹۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵ پلکان های قیمت برق مصرفی در سال های ۹۳ و ۹۴

متوسط مصرفی (kwh در ماه)	انرژی ماهان	قیمت پایه سال ۹۳ به ازای هر kwh (ریال)	قیمت پایه سال ۹۴ به ازای هر kwh (ریال)
۰ تا ۱۰۰		۳۷۲	۴۰۹
۱۰۰ تا ۲۰۰		۴۳۴	۴۷۷
۲۰۰ تا ۳۰۰		۹۳۰	۱۰۲۳
۳۰۰ تا ۴۰۰		۱۶۷۴	۱۸۴۱
۴۰۰ تا ۵۰۰		۱۹۲۲	۲۱۱۴
۵۰۰ تا ۶۰۰		۲۴۱۸	۲۶۶۰
مازاد بر ۶۰۰		۲۶۶۶	۲۹۳۳

باتوجه با ارقام بالا با در نظر گرفتن مصرف بالای ۳۰۰ کیلووات ساعت در ماه به عنوان مشترک پرمصرف، قیمت میانگین برق از ۳۰۰ کیلووات ساعت تا بیشتر از ۶۰۰ کیلووات ساعت برابر ۲۳۸۷ ریال خواهد بود.

با در نظر گرفتن این عدد به عنوان قیمت متوسط برق مشترکین پرمصرف دوره بازگشت سرمایه طبق محاسبات زیر برابر خواهد بود با:

$$0/04 \times 3/6 \times 24 \times 365 \times 238/7 = 301000T$$

رابطه‌ی فوق میزان قیمت انرژی تولیدی توسط مدل آزمایشگاهی در طول سال را نشان می‌دهد. حال با تقسیم قیمت هزینه سرمایه گذاری طرح بر میزان تولید سالیانه‌ی مبدل دوره‌ی بازگشت سرمایه به سال بدست خواهد آمد. (قیمت دلار ۳۳۰۰ تومان در نظر گرفته شده است)

$$\frac{383 \times 3300}{301000} = 4/2 \text{ year}$$

بنابراین هزینه‌ی سرمایه گذاری این طرح در مدت زمان کمتر از ۴ سال و ۳ ماه باز خواهد گشت و تا سال بیستم طرح تنها ۲۰٪ هزینه سرمایه گذاری به عنوان هزینه‌های طرح می‌باشد که آن هم به طور تدریجی از سال دهم تا بیستم اجرا خواهد شد.

با توجه به افزایش قیمت سالیانه برق و همچنین نرخ تورم، فرض بر این است که افزایش قیمت انرژی برابر نرخ تورم بوده بنابراین در محاسبات فوق تمامی نرخ‌ها برای سال پایه در نظر گرفته شده است. با این روش میزان سود خالص طرح با کسر هزینه‌ی تعمیر و نگهداری برابر خواهد شد با:

$$(20-4/2) \times 0/04 \times 3/6 \times 24 \times 365 \times 238/7-0/2 \times 383 \times 3300 = 4500000$$

بنابراین معادل چهار و نیم میلیون تومان میزان سود خالص طرح در طول دوره می‌باشد. این نکته‌ی کلیدی حائز اهمیت است که این میزان سرمایه‌گذاری و درآمد از یک نمونه‌ی کوچک آزمایشگاهی بوده و برای اقتصادی بودن پروژه با بزرگتر شدن ابعاد سیستم و تقسیم هزینه سرمایه‌گذاری بین چندین ماژول از سیلندر میزان بهره‌وری سیستم به مراتب بالاتر خواهد بود.

فصل ۵ بحث و نتیجه گیری

۵-۱- تعیین ناحیه قفل شوندگی

برای بدست آوردن ناحیه‌ی قفل شوندگی در سیلندر با جابجایی اجباری با تغییر نسبت فرکانس‌های مختلف (F) از محدوده‌ی ۰/۵ الی ۱/۵ برای هر نسبت دامنه به قطر (A) میزان ضریب برآ را بدست آورده و با مقایسه‌ی میزان بیشینه‌ی ضریب برآ برای هر نسبت فرکانس نقطه‌ی ورود و خروج از ناحیه‌ی قفل شوندگی بدست می‌آید. برای نسبت دامنه به قطر برابر ۰/۵ نقطه‌ی ورود به ناحیه‌ی قفل شوندگی در نسبت فرکانسی ۰/۷ و نقطه‌ی خروج از آن در نسبت فرکانسی ۱/۴ اتفاق می‌افتد. با کاهش نسبت دامنه به قطر طول بازه‌ی ناحیه قفل شوندگی کاهش یافته به طوری که در نسبت دامنه به قطر برابر ۰/۱۷ نقطه‌ی ورود به ناحیه‌ی قفل شوندگی برابر ۰/۸۵ و نقطه‌ی خروج از آن برابر ۱/۱ می‌باشد. وسیع‌تر بودن ناحیه قفل شوندگی باعث ایجاد انعطاف پذیری بیشتر در سیستم استحصال انرژی خواهد بود به این شکل که با تغییرات ناخواسته در رژیم جریان و به تبع آن تغییر در فرکانس نوسان سیلندر، میزان نیروی برآ دستخوش تغییر چندانی نخواهد شد.

۵-۲- تاثیر هندسه‌ی مقطع سیلندر بر ناحیه قفل شوندگی

در مقاطع لوزوی و مربعی رفتار کیفی مشابهی با مقطع دایره‌ای مشاهده شد. به این ترتیب که در نسبت دامنه به قطر بالاتر میزان بازه‌ی قفل شوندگی وسیع‌تر و با کاهش این نسبت دامنه‌ی قفل شوندگی کاهش یافته است. محدوده‌ی ناحیه‌ی قفل شوندگی در سیلندر با مقطع دایره و مربع بسیار نزدیک می‌باشد، با این تفاوت که آغاز ناحیه قفل شوندگی برای مقطع مربعی با اختلاف ناچیزی نسبت به مقطع دایره‌ای آغاز شده است. اما برای مقطع لوزی این محدوده با تفاوت محسوسی کمتر می‌باشد به طوری که در نسبت دامنه به قطر برابر ۰/۵ مقدار ابتدا و انتهای بازه به ترتیب برابر ۰/۸ و ۱/۲ می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رود میزان دامنه‌ی وسیع‌تر برای ناحیه‌ی قفل شوندگی به دلیل داشتن میزان بالاتر نیروی برآ در محدوده‌ی وسیع‌تری از نسبت فرکانسی برای طراحی سیستم استحصال انرژی کاربرد خواهد داشت، درحالی که میزان محدود ناحیه‌ی قفل شوندگی (برای مقطع لوزی) به معنی کمتر بودن نیروی برآ در نسبت فرکانسی‌های مختلف و در نتیجه برای استفاده در سازه‌هایی که در مقابل جریان سیال قرار دارند مناسب می‌باشد.

۵-۳- بررسی میزان نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر سیلندر (A) در محدوده‌ی عدد رینولدز

۱۰۰ الی ۱۴۰

در این محدوده از اعداد رینولدز، با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۰۳ یک جهش در نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر مشاهده شده است و میزان نسبت دامنه نوسان به قطر از نزدیک صفر به مقدار ۰/۴۴ می‌رسد. این میزان تا عدد رینولدز ۱۱۴ به طور ملایم کاهش یافته تا به نسبت دامنه‌ی ۰/۳ می‌رسد.

سپس این میزان با شیب تندی افت خواهد کرد به طوری که در عدد رینولدز ۱۱۸ میزان نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر مجدداً برابر صفر خواهد بود.

۵-۴- تاثیر هندسه مقطع سیلندر بر میزان نسبت دامنه‌ی نوسان به قطر در محدوده‌ی رینولدز ۱۰۰ الی ۱۴۰

در مقایسه‌ی دو هندسه‌ی مقطع، مربع و لوزی با مقطع دایره‌ای میزان جهش اولیه برای هر دو هندسه همانند مقطع دایره‌ای مشاهده شد. با این تفاوت که این جهش در عدد رینولدز ۱۰۶ و ۱۰۷ (به ترتیب برای مقطع لوزی و مربع) اتفاق می‌افتد. و به میزان نسبت دامنه‌ی حداکثری ۰/۳۲ برای مقطع مربع و ۰/۲۴ برای مقطع لوزی می‌رسد.

همانطور که آغاز افزایش در نسبت دامنه نوسان به قطر برای دو مقطع لوزی و مربع نسبت به مقطع دایره‌ای در عدد رینولدز بالاتری اتفاق افتاده است، کاهش این نسبت نیز در اعداد رینولدز بالاتری اتفاق افتاده است. به طوری که در مقطع دایره‌ای در عدد رینولدز برابر ۱۱۸ این نسبت به صفر نزدیک شده است در حالی که برای دو هندسه‌ی دیگر در عدد رینولدز حدوداً ۱۲۵ این اتفاق افتاده است. در بررسی جذب انرژی از ارتعاشات ناشی از گردابه، نیازمند داشتن دامنه‌ی نوسان به قطر بالاتر در محدوده‌ی بیشتری از عدد رینولدز می‌باشیم. بنابراین به جای توجه مطلق به میزان نسبت جابجایی به قطر، سطح زیر این نمودارها از اهمیت بیشتری برخوردار است. همانطور که مشاهده شد سطح زیر نمودار برای مقطع دایره‌ای به مراتب بیشتر از دو مقطع دیگر، و سطح زیر نمودار مقطع مربعی بیشتر از سطح زیر نمودار مقطع لوزی می‌باشد.

۵-۵- محاسبات انرژی - انرژی و بررسی اقتصادی

با بدست آمدن نیروی برآ و میزان دامنه‌ی نوسان از خروجی نرم افزار اپن فوم و با فرض استفاده از سیستم سیم پیچ و آهنربا برای تبدیل انرژی مکانیکی میتوان میزان انرژی الکتریکی بدست آمده را محاسبه کرد. در محاسبات انجام شده میزان ولتاژ خروجی برای دو سیستم فرضی یکی با سیال آب و دیگری با سیال هوا به ترتیب برابر ۹/۲ ولت و ۰/۴۲ ولت به دست آمده است. و همچنین میزان راندمان انرژی سیستم با سیال آب برابر ۴۲/۵٪ به دست آمده است.

برای بررسی اقتصادی طرح برای در نظر گرفتن ضریب اطمینان بیشتر، به جای استفاده از میزان ولتاژ تولیدی توسط سیستم پیشنهادی با سیال آب با ولتاژ خروجی ۹/۲ ولت، از داده‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه میشیگان [37] که ولتاژ خروجی ۸ ولت را گزارش داده بود استفاده شد.

هزینه‌ی ساخت نمونه فوق و در نظر گرفتن ۲۰٪ هزینه‌ی تعمیر و نگهداری در طول عمر طرح برابر ۴۸۴ دلار محاسبه شد که با توجه به قیمت برق مصرفی برای مصرف کننده‌ی خانگی در ایران میزان

دوره‌ی بازگشت سرمایه ۴/۲ سال به دست آمده. گرچه لازم به ذکر است مزیت اصلی این نوع سیستم استحصال انرژی برای استفاده در مناطق دوردست کوهستانی که امکان اتصال به شبکه‌ی سراسری برق مشکل است اقتصادی تر می‌باشد.

۵-۶- محدودیت‌ها

پیچیدگی‌های شبیه سازی بخصوص در جابجایی آزاد و وابستگی شرایط به تعداد زیادی از عوامل و حساسیت بالای این نوع سیستم یکی از دشواری‌های کار در مورد ارتعاشات ناشی از گردابه‌هاست که خوشبختانه به دلیل کد باز بودن نرم افزار اپن فوم و دسترسی آزاد به کدها تا حد زیادی بر این مشکل غلبه شده است. شاید بتوان گفت جدی ترین محدودیت در این بحث جدید بودن این نوع سیستم و نیاز به حجم وسیعی از اطلاعات برای طراحی‌های بهینه‌ی اینگونه مبدل‌ها و شناسایی رفتارهای این نوع سیستم‌هاست.

۵-۷- پیشنهادها

استحصال انرژی از گردابه‌ها شامل مباحث مختلف پایه‌ای از جمله علم مکانیک سیالات، ارتعاشات، اقتصاد و همچنین دانش مربوط به سیستم های نوین انتقال توان مکانیکی به الکتریکی می‌باشد که هر یک از این شاخه‌ها می‌تواند خود بصورت مجزا زمینه‌ی تحقیقاتی شود. بطور مثال در بخش سیالات تاثیر پذیری این ارتعاشات از عدد رینولدز در رینولدزهای آشفته و سرعت‌های بالا، بررسی زبری سطوح همچنین چینش سلیندرها و تاثیرات احتمالی آن‌ها بر یکدیگر (به دلیل کاربرد در دستگاه مبدل با چندین سلیندر)، در زمینه ارتعاشاتی بررسی سلیندرهای چند درجه آزادی با قیدهای کمتر، و بررسی تاثیرات میرایی سیستمی و یا بررسی سلیندرهای ارتجاعی می‌باشد. همچنین یکی از گلوگاه‌های مهم پروژه سیستم انتقال توان می‌باشد که همانطور در پیوست آمده است تغییراتی در بالابردن راندمان سیستم انتقال توان می‌تواند بسیار موثر و راه‌گشا باشد.

- [1] Sarpkaya, T. (2004). A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 19(4), 389-447.
- [2] Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris' shock and vibration handbook*(Vol. 5). New York: McGraw-Hill.
- [3] Raghavan, K., & Bernitsas, M. M. (2011). Experimental investigation of Reynolds number effect on vortex induced vibration of rigid circular cylinder on elastic supports. *Ocean Engineering*, 38(5), 719-731.
- [4] M. M. Zdravkovich, *Flow around Circular Cylinders*, Oxford, Oxford University, 1997.
- [5] Zdravkovich, M. M. (1997). *Flow around circular cylinders. Fundamentals*, vol. 1.
- [6] Assi, G. R. S., Meneghini, J. R., Aranha, J. A. P., Bearman, P. W., & Casaprima, E. (2006). Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 22(6), 819-827.
- [7] Bokaian, A., & Geoola, F. (1984). Proximity-induced galloping of two interfering circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 146, 417-449.
- [8] Hover, F. S., & Triantafyllou, M. S. (2001). Galloping response of a cylinder with upstream wake interference. *Journal of fluids and structures*, 15(3), 503-512.
- [9] Assi, G. R. S., Bearman, P. W., Kitney, N., & Tognarelli, M. A. (2010). Suppression of wake-induced vibration of tandem cylinders with free-to-rotate control plates. *Journal of Fluids and Structures*, 26(7), 1045-1057.
- [10] Bearman, P. W. (2011). Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 27(5), 648-658.

- [11] Hatton, N., & Smith, D. (1995). Reflection in teacher education: Towards definition and implementation. *Teaching and teacher education*, 11(1), 33-49.
- [12] Bearman, P. W. (1984). Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual review of fluid mechanics*, 16(1), 195-222.
- [13] Reid, W. G. J., Broe, G. A., Hely, M. A., Morris, J. G. L., Williamson, P. M., O'sullivan, D. J., ... & Moss, N. G. (1989). The neuropsychology of de novo patients with idiopathic Parkinson's disease: the effects of age of onset. *International Journal of Neuroscience*, 48(3-4), 205-217.
- [14] Khalak, A., & Williamson, C. H. K. (1996). Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping. *Journal of Fluids and Structures*, 10(5), 455-472.
- [15] Williamson, C. H. K., & Govardhan, R. (2004). Vortex-induced vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 36, 413-455.
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy
- [17] Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. M. (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(4), 041101.
- [17] M. T. Pontes and A. Falcao, "Ocean Energies: Resources and Utilization," in 18th WEC Congress, Buenos Aires, 2001.
- [18] Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. M. H. (2008). VIVACE „Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy...: A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow. *Ann Arbor*, 1001, 48109-2145.
- [19] <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hydropower&oldid=384049588>
- [20] Wave Net. European Wave Energy Thematic Network, 2003, Online Available at: [http://www.waveenergy.net/Library/WaveNet%20Full%20Report\(11.1\).pdf](http://www.waveenergy.net/Library/WaveNet%20Full%20Report(11.1).pdf)

- [21] Pelamis Wave Power, Online Available at: <http://www.pelamiswave.com/>
- [22] Ocean Power Technology. Online Available at: www.oceanpowertechnologies.com
- [23] Lee, J. H., & Bernitsas, M. M. (2011). High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter. *Ocean Engineering*, 38(16), 1697-1712.
- [24] Oceanlinx. Online Available at: www.oceanlinx.com.
- [25] Energetics wave energy technology. Available: www.gizmag.com/go/3932/
- [26] Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. M. (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(4), 041101.
- [27] DNV. (Det Norske Veritas). Online Available at: <http://www.dnv.com/>
- [28] Sumer, B. M., Kozakiewicz, A., Fredsøe, J., & Deigaard, R. (1996). Velocity and concentration profiles in sheet-flow layer of movable bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(10), 549-558.
- [29] Wiemann, M. C., & Williamson, G. B. (1989). Wood specific gravity gradients in tropical dry and montane rain forest trees. *American Journal of Botany*, 924-928.
- [30] Bloor, M. S. (1964). The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 19(02), 290-304.
- [31] Jung, H. J., & Lee, S. W. (2011). The experimental validation of a new energy harvesting system based on the wake galloping phenomenon. *Smart Materials and Structures*, 20(5), 055022.
- [32] Raghavan, K., & Bernitsas, M. M. (2011). Experimental investigation of Reynolds number effect on vortex induced vibration of rigid circular cylinder on elastic supports. *Ocean Engineering*, 38(5), 719-731.

- [33] Barrero-Gil, A., Alonso, G., & Sanz-Andres, A. (2010). Energy harvesting from transverse galloping. *Journal of Sound and Vibration*, 329(14), 2873-2883.
- [34] Rho, J. B., Korobkin, A. A., Jung, J. J., Shin, H. S., & Lee, W. S. (2007, January). Coupled analysis of deepwater floating system including VIV in time domain. In *ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (pp. 639-649). American Society of Mechanical Engineers.
- [35] Nishi, Y. (2013). Power extraction from vortex-induced vibration of dual mass system. *Journal of Sound and Vibration*, 332(1), 199-212.
- [36] Nishi, Y., Ueno, Y., Nishio, M., Quadrante, L. A. R., & Kokubun, K. (2014). Power extraction using flow-induced vibration of a circular cylinder placed near another fixed cylinder. *Journal of Sound and Vibration*, 333(10), 2863-2880.
- [37] Nishi, Y., Ueno, Y., & Miyamoto, T. (2015). Energy harvesting using wake-induced vibration. In *International Society of Offshore and Polar Engineers*.
- [38] Ding, L., Zhang, L., Bernitsas, M. M., & Chang, C. C. (2016). Numerical simulation and experimental validation for energy harvesting of single-cylinder VIVACE converter with passive turbulence control. *Renewable Energy*, 85, 1246-1259.
- [39] Placzek, A., Sigrist, J. F., & Hamdouni, A. (2009). Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: forced and free oscillations. *Computers & Fluids*, 38(1), 80-100.
- [40] Meneghini, J. R., Saltara, F., Siqueira, C. L. R., & Ferrari, J. A. (2001). Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. *Journal of fluids and structures*, 15(2), 327-350.
- [41] Rajani, B. N., Kandasamy, A., & Majumdar, S. (2009). Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder. *Applied Mathematical Modelling*, 33(3), 1228-1247.

[42] Koopmann, G. H. (1967). The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 28(03), 501-512.

[43] Anagnostopoulos, P. (2000). Numerical study of the flow past a cylinder excited transversely to the incident stream. Part 2: Timing of vortex shedding, aperiodic phenomena and wake parameters. *Journal of fluids and structures*, 14(6), 853-882.

[44] Patnaik, B. V., Narayana, P. A., & Seetharamu, K. N. (1999). Numerical simulation of laminar flow past a transversely vibrating circular cylinder. *Journal of sound and vibration*, 228(3), 459-475.

[45] Lewis, C. H., & Griffin, M. J. (1980). Predicting the effects of vibration frequency and axis, and seating conditions on the reading of numeric displays. *Ergonomics*, 23(5), 485-499.

[46] Savilonis, Brian James, ME. "Wind Harvesting via Vortex Induced Vibration" online available at: https://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042914-113529/unrestricted/VIV_Wind_Harvesting_MQP_Final_Report.pdf

[47] Nguyen, Q., Wolf, K., & Zuo, Z. (2008). Final Report Design of a Power Take Off System for the VIVACE Generator.

[48] Wark, K. (1995). *Advanced thermodynamics for engineers* (p. 564). New York: McGraw-Hill.

[49] Bejan, A. (1988). Theory of heat transfer-irreversible power plants. *International Journal of Heat and mass transfer*, 31(6), 1211-1219.

[50] Mehmood, A., Abdelkefi, A., Hajj, M. R., Nayfeh, A. H., Akhtar, I., & Nuhait, A. O. (2013). Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder. *Journal of Sound and Vibration*, 332(19), 4656-4667.

[51] Yang, J., Preidikman, S., & Balaras, E. (2008). A strongly coupled, embedded-boundary method for fluid–structure interactions of elastically mounted rigid bodies. *Journal of Fluids and Structures*, 24(2), 167-182.

[52] FuturEnergy (UK) <http://www.futureenergy.co.uk/products.html>

[53] Bernitsas, M. M., Ben-Simon, Y., Raghavan, K., & Garcia, E. M. (2009). The VIVACE converter: model tests at high damping and Reynolds number around 105. *Journal of offshore mechanics and Arctic engineering*, 131(1), 011102.

[54] Southwest Windpower, Inc. Skystream
<http://skystreamenergy.com/skystream/>

[55] Henderson, R. (2006). Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable energy*, 31(2), 271-283.

[56] Nguyen, Q., Wolf, K., & Zuo, Z. (2008). Final Report Design of a Power Take Off System for the VIVACE Generator.

http://www.rare-earth-magnets.com/magnet_university/history_of_magnetism.htm

[57] Cohen, J. Y. "Electroactive Polymers." Polymers and Separations Research Laboratory (PolySep).

2003. UCLA. 21 Jan. 2008

[58] Nguyen, Q., Wolf, K., & Zuo, Z. (2008). Final Report Design of a Power Take Off System for the VIVACE Generator.

http://artificialmuscle.net/markets/energy_generation.html

[59] "Artificial Muscle Transducers." SRI International. 2007. 21 January 2008

<http://www.sri.com/esd/automation/actuators.html>

[60] Albrecht, T., Bühner, C., Fähnle, M., Maier, K., Platzek, D., & Reske, J. (1997). First observation of ferromagnetism and ferromagnetic domains in a liquid metal. *Applied Physics A*, 65(2), 215-220.

[61] Nguyen, Q., Wolf, K., & Zuo, Z. (2008). Final Report Design of a Power Take Off System for the VIVACE Generator.

[62] <http://www.amazingmagnets.com/index.asp?PageAction=VIEWPROD&ProdID=108>.

[63] https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street

[64] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_\(1940\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))

[65] <http://www.sun.org.ir/>

[66] Bishop, R. E. D., and A. Y. Hassan. "The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid." *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 277. No. 1368. The Royal Society, 1964.

[67] Feng, C. C. *The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and d-section cylinders*. Diss. University of British Columbia, 1968.

[68] Gowda, BH Lakshmana, and K. P. Deshkulkarni. "Interference effects on the flow-induced vibrations of a circular cylinder in side-by-side and staggered arrangement." *Journal of Sound and Vibration* 122.3 (1988): 465-478.

[69] Govardhan, R., and C. H. K. Williamson. "Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder." *Journal of Fluid Mechanics* 420 (2000): 85-130.

[70] Huera-Huarte, F. J., and P. W. Bearman. "Wake structures and vortex-induced vibrations of a long flexible cylinder—part 1: dynamic response." *Journal of Fluids and Structures* 25.6 (2009): 969-990.

[71] Williamson, C. H. K., and A. Roshko. "Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder." *Journal of fluids and structures* 2.4 (1988): 355-381.

[72] Morse, T. L., and C. H. K. Williamson. "Prediction of vortex-induced vibration response by employing controlled motion." *Journal of Fluid Mechanics* 634 (2009): 5-39.

پیوست الف

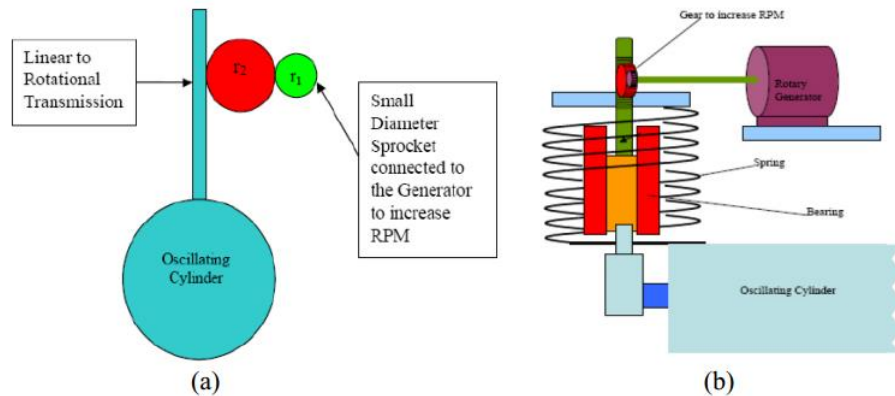
ایده‌های تبدیل انرژی

طی تحقیقات به عمل آمده ۵ نوع سیستم انتقال توان مجزا برای تبدیل انرژی سینتیکی سیلندر به انرژی الکتریکی وجود دارد: ۱- ژنراتورهای دوار (rotary generators) ۲- ژنراتورهای هیدرولیک (hydraulic generators) ۳- ژنراتورهای خطی (linear generators) ۴- بازوی مصنوعی پلیمر الکترواکتیو (Electroactive Polymer Artificial Muscle-EPAM) ۵- ژنراتور فروفلوئید (ferrofluid generator)

۱- ژنراتورهای دوار: یکی از سیستم‌های فعلی و در حال استفاده‌ی انتقال توان از سیستم مبدل گردابه‌ای می‌باشد. یک ژنراتور دوار، یک الکترومغناطیس چرخنده شامل روتور و استاتور می‌باشد. برای استفاده از ژنراتور دوار، می‌بایست حرکت مکانیکی خطی سیلندر مبدل گردابه‌ای به حرکت چرخشی شفت ژنراتور تبدیل گردد. معمولاً اکثر ژنراتورهای دوار نیاز به سرعت چرخش بالای شفت (دور بر دقیقه بالا) برای تولید توان مورد نیاز دارند (برای مثال سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه برای تولید ۱۰ ولت الکتریسیته [52]) درحالی‌که دستگاه مبدل گردابه‌ای معمولاً دارای سرعت نسبی پایین چرخش شفت (دور بر دقیقه پایین) (فرکانس نوسان سیلندر در حدود ۱ هرتز می‌باشد [53]). بنابراین نیاز به سیستم انتقال توان با دو چرخنده برای افزایش سرعت چرخش شفت می‌باشد (شکل ۶-۱). برای دلیل مشابه، یک ژنراتور با سرعت چرخش پایین مد نظر می‌باشد. در تست‌های اولیه با نمونه‌ی آزمایشگاهی مبدل گردابه‌ای حداکثر راندمان ۰/۳۰۸ و حداکثر توان استحصال شده ۱۰ وات گزارش شده است. بازدهی توان کلی (یکپارچه) برای نمونه‌ی تست شده‌ی دستگاه مبدل گردابه‌ای در جریان سیال با سرعت ۰/۸۴ متر بر ثانیه برابر ۰/۲۲ گزارش شده است.

ژنراتورهای دوار عموماً دارای قیمت مناسبی هستند و به راحتی در دسترس بازار قرار دارند [52,54]. دارای بازدهی بالا، به خصوص زمانی که اندازه‌ی دستگاه مبدل گردابه‌ای کوچک است (زمانی که تنها چند ماژول مبدل گردابه‌ای در سیستم به کار گرفته می‌شود). برخی از ژنراتورهای دوار برای استفاده در توربین‌های بادی طراحی شده‌اند، که می‌توانند گشتاور بیشتری را تحمل کنند و نیاز به سرعت بالای چرخش شفت نیز ندارند (RPM پایین) [26]. این محصولات اولین انتخاب برای سیستم استحصال انرژی از مبدل می‌باشد. برای ساختن این سیستم سازگار با محیط آبی، اگرچه فاکتورهای کاهش دهنده‌ای وجود دارد. برای مثال طراحی یک سیستم آب‌بندی مناسب که محیط خشک (ژنراتور دوار) و محیط تر (سیلندر نوسانگر) را از یک‌دیگر مجزا کند یکی از چالش‌های پیش‌رو می‌باشد. همچنین زمانی

که چند ماژول مبدل گردابه‌ای (چند سیلندر نوسانگر بر روی یک پایه) برای استحصال انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد (بنابراین چند خروجی AC هم مورد نیاز است)، ترکیب چند خروجی AC به یک توان خروجی منفرد کار ساده‌ای نیست و یکی دیگر از چالش‌ها می‌باشد.



شکل ۶-۱ نمای مقابل (a) و نمای جانبی (b) مکانیزم انتقال توان با دو چرخدنده

۲- ژنراتور هیدرولیکی: یک ژنراتور هیدرولیک انتخاب دیگری برای سیستم استحصال توان ما می‌باشد. راس هندرسون^{۱۰۷} یک سیستم استحصال انرژی از امواج را برای انرژی‌هایی از این دست طراحی کرده که به پلامیس^{۱۰۸} شناخته می‌شود. او سیستم استحصال انرژی پلامیس را مجموعه‌ای شامل سیلندرهای هیدرولیکی که سیال را پمپ می‌کند، با کنترل منیفولدها، به سمت انباشتگر^{۱۰۹} فشار بالا برای ذخیره انرژی کوتاه مدت. موتور هیدرولیکی با عرضه‌ی آرام مایع فشار بالا از انباشتگر به درایو متصل به شبکه تولید توان الکتریکی کار می‌کند. [55]. یک نمونه‌ی ساده شده از مدار سیستم ژنراتور هیدرولیکی در شکل زیر نشان داده شده است.

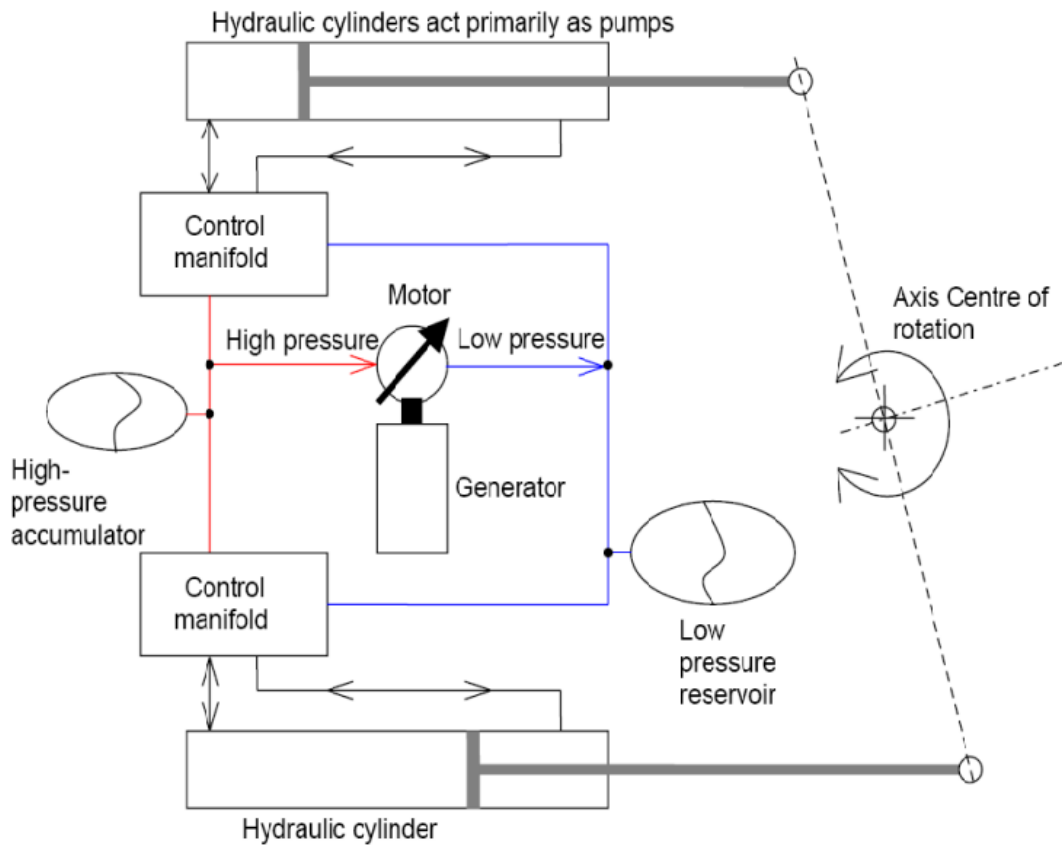
طراحی یک انباشتگر فشار بالا در سیستم استحصال انرژی آن را به مراتب نسبت به خروجی‌های چندگانه‌ی تولید توان ساده تر می‌باشد. بنابراین هنگامی که سیستم استحصال انرژی مبدل گردابه‌ای ما در ابعاد بزرگ باشد (برای مثال چند ماژول سیلندر نوسانگر) سیستم تولید توان هیدرولیکی بدون در نظر گرفتن بازده پایین آن ترجیح داده می‌شود. علاوه بر این، با توسعه و گسترش نسل جدید ماشین‌های جابجایی دیجیتال^{۱۱۰} [55]، پمپ‌های هیدرولیک نسل جدید، توانایی ارائه‌ی بازده‌ای به مراتب بالاتر از پمپ‌های معمولی را دارا می‌باشند [53].

^{۱۰۷} Ross Henderson

^{۱۰۸} Pelamis

^{۱۰۹} accumulator

^{۱۱۰} Digital Displacement machines

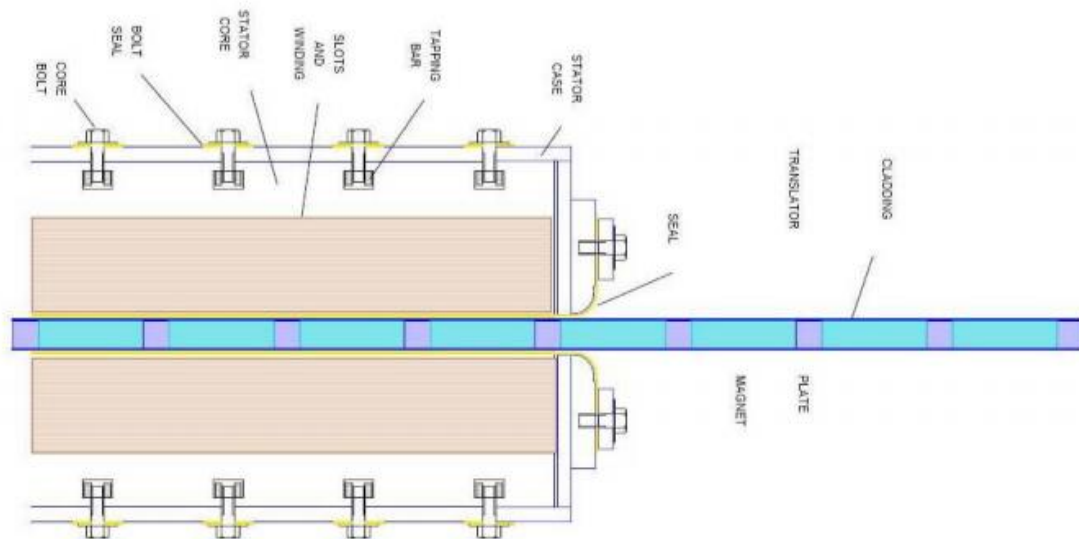


شکل ۶-۲ مدل مدار هیدرولیک سیستم تولید توان پلامیس

این سیستم نیازمند مکانیزم آب‌بندی مناسب و همچنین تعداد زیادی شیر برای استحصال انرژی می‌باشد که خود از چالش‌های پیش‌رو برای این طرح می‌باشد.

ژنراتورهای خطی: ژنراتور خطی راه دیگری برای استحصال انرژی می‌باشد. ژنراتور خطی به طور ساده ابزاری است که یک یا چند سیم‌پیچ را در میان میدان مغناطیسی به منظور تولید نیروی الکتریسیته یا ایجاد ولتاژ جابجا می‌کند. علت ایجاد این نیروی محرک الکتریکی پدیده‌ای به نام القای الکترومغناطیس می‌باشد [56]. این وسیله اجازه تولید الکتریسیته بصورتی بسیار ساده و با بازده بالا را می‌دهد. دارای اجزای متحرک به نسبت کمی می‌باشد بنابراین هزینه‌ی تعمیر و نگهداری نیز پایین می‌باشد. همچنین مناسب برای سرعت‌های پایین چرخش شفت (RPM پایین) و دارای راندمان بسیار بالا [26]. یکی از چالش‌های اصلی آب‌بندی مناسب قطعات درگیر با محیط تر و مجزا کردن آن با محیط خشک می‌باشد. برای این سیستم نیاز به نوعی آب‌بندی می‌باشد که در هنگام داخل و خارج شدن آهنربا به سیم‌پیچ (یا برعکس) از سیستم در برابر آب محافظت کند. از سویی گاه‌ها نیاز به نیرویی خارجی برای دائمی کردن حرکت سیلندر می‌باشد. برخی از سیم‌پیچ‌های فنری دارای عمر خستگی مناسبی

برای تعداد سیکل‌های بالا نمی‌باشند و ممکن است در دراز مدت از کار بیفتند. از سویی هزینه آهنربای آهن-بور نئودیم (یا معادل کمیاب خاکی) مورد نیاز در این طرح بسیار بالا و حدود ۱۰ برابر آهنربای فریت می‌باشد. [26]. در آخر بخاطر اینکه هر سیلندر در فرکانس مشخصی نوسان می‌کند و بنابراین ولتاژ خروجی متفاوتی را ارائه می‌دهد، بنابراین ثابت کردن تمام فرکانس‌های AC خروجی به یک DC یکسان یکی دیگر از مشکلات این سیستم استحصال انرژی می‌باشد [26].



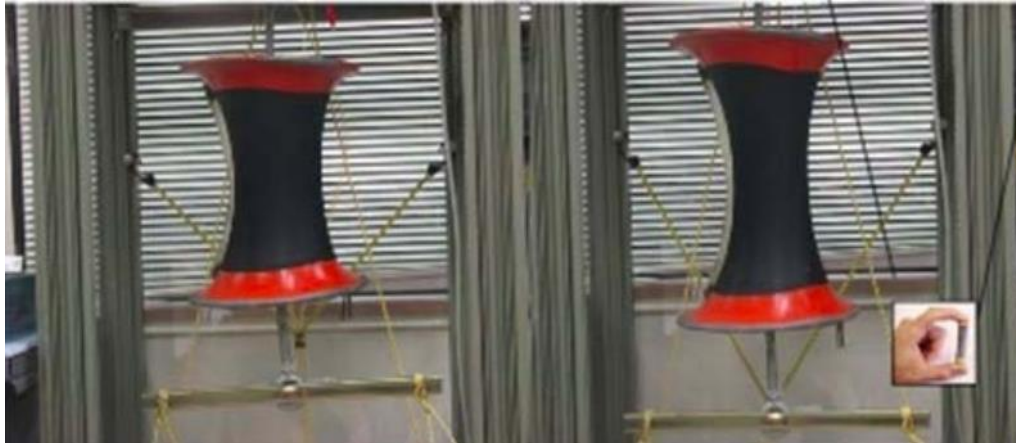
شکل ۳-۶ شمای فنی ژنراتور خطی

۴- ژنراتور EPAM: یکی دیگر از گزینه‌های موجود، یک تکنولوژی جدید به نام بازوی مصنوعی پلیمری الکترواکتیو^{۱۱۱} می‌باشد که توسط شرکت آرتیفیشال ماسل^{۱۱۲} عرضه شده است. پلیمر الکترواکتیو نوعی پلیمر رساناست [57] که هنگامی که یک میدان الکتریکی بطور عرضی بر آن وارد شود باعث ایجاد تغییر شکل در آن می‌شود. از این خاصیت میتوان به شکل معکوس نیز استفاده کرد، یعنی با تبدیل انرژی سینتیکی به الکتریسیته به عنوان ژنراتور از آن استفاده کرد. در این حالت می‌توان EPAM را به عنوان ابزاری با ظرفیت الکتریکی متغییر در نظر گرفت. هنگامی که فشار های مکانیکی به پلیمر وارد می‌شود و باعث کشیده شدن آن می‌شود، شار الکتریکی بر ماده قرار می‌گیرد (ظرفیت الکتریکی بالا) هنگامی که پلیمر منقبض می‌شود (ظرفیت الکتریکی پایین)، تنش الاستیک برخلاف فشار میدان الکتریکی عمل کرده و باعث افزایش انرژی الکتریکی میشود [58]. پلیمرها دارای راندمان اتصال بالا و همچنین چگالی انرژی بالایی می‌باشند [59] همچنین عملکرد

^{۱۱۱} Electroactive Polymer Artificial Muscle

^{۱۱۲} Artificial Muscle

مناسبی در حالت غوطه وری در آب از خود نشان داده اند [57]. به علاوه سیستم به غایت ساده و تنها دارای یک جز متحرک می باشد بنابراین تعمیر و نگهداری نیز از هزینه‌ای به مراتب پایین خواهد داشت. همچنین از آنجاییکه تمام اجزای متحرک می‌توانند در محیط مرطوب بمانند، آب‌بندی دیگر چالشی جدی تلقی نمی‌شود. با این حال عمر خستگی نامشخص و نیاز است تا توانایی تحمل ده‌ها میلیون سیکل را داشته باشد. در نهایت بزرگترین مشکل اجرای این تکنولوژی به نسبت جدید بودن آن بوده در حال حاضر از لحاظ تجاری مقدور نمی‌باشد.



شکل ۶-۴ ژنراتور EPAM

۵- ژنراتور فروفلوئید^{۱۱۳}: یک فروفلوئید از ذرات فرو-مغناطیس در ابعاد نانو تشکیل می‌شود که به حالت شناور و به صورت پایدار در یک سیال حامل قرار می‌گیرد. ایده‌ی کلی ژنراتور فروفلوئید، استفاده از ابزارهایی نظیر پمپ برای حرکت سیال مغناطیسی و عبور سیال از مجموعه‌ای از سیم‌پیچ‌های متراکم برای تولید جریان الکتریسیته می‌باشد. نکته‌ی حائز اهمیت درباره‌ی سیال فروفلوئید اینست که هرچند این سیال در حضور میدان مغناطیسی به شدت قطبی می‌شود، اما در عدم حضور میدان مغناطیسی، سیال مغناطیسی باقی نمی‌ماند. بنابراین در حال حاضر تولید سیالی که به طور دائم مغناطیسی بماند کار دشواریست [60]. همچنین قیمت سیال فروفلوئید به نسبت بالاست، (حدود ۱۳۰ دلار به ازای هر لیتر) [61].

^{۱۱۳} ferrofluid generator



شکل ۶-۵ مایع مغناطیسی فروفلوید

Abstract

Vortex Induced Vibration (VIV) is called to bluff bodies that interact with outer fluid flow upon them. In this circumstance a sinusoidal Lift force works on body. If it is tied, vortex shedding frequency follows Stohal's law, but if it based on elastic base, the body moves by the force lead that. This phenomena was known as a destructive phenomenon but in recent years it known as a new renewable sort of energy. The studies about this subject is usually about to structures desinging and with attitude to reduce the amplitude and find a safe region of designing structures. While the new studies about this phenomenon is about to extract clean an sustainable energy started by Bernitsas in 2005 and subjects like dependency to Reynolds number and spring systems and damping and even energy extraction of air are studied. In this thesis, by simulating this phenomenon in OpenFOAM CFD code and using the results of simulating like amplitude and lift force to calculate in order to understand how much energy can be extract by this prototype, and evaluating the technical and economical parameter in this type of energy harvesting. It have been seen that by increasing the Reynolds number from 100 to 110 a rapid jump happened and this jump continued until Reynolds 120 that is ideal region for extracting energy. Although in in Reynolds number between 100 and 300 in frequency ratio between $0/8$ and $1/2$ because of resonance phenomenon the maximum amplitude is seen. In comparsion of different cylinder sectional geometry(circular, cubic and rhombic) the maximum amplitude is for cylinder with circular section, then it is the best choice for harvesting energy issue while rhombic cylinder is better to be used in structural applicants.

Key words: Vortex Induced Vibration, Energy harvesting, Exergy, OpenFOAM



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering
**Energy and exergy analysis of power generator system using vortex
induced vibration**

By: Alireza Heidari

Supervisor:

Dr. Ali Sarreshtehdari

September 2016