

استحصال انرژی پاک و نامحدود از ارتعاشات خودمحرک ناشی از گردابه‌ها

انوشیروان فرشیدیان‌فر، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

farshid@ferdowsi.um.ac.ir

یوسف نارنجانی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

yousef.naranjani@stu-mail.um.ac.ir

چکیده

ارتعاشات خودمحرک ناشی از گردابه‌ها^۱ همواره به‌عنوان پدیده‌ای مضر شناخته می‌شده و تجربه‌های تلخ بسیاری را برای مهندسان به‌بار آورده است. متخصصان همیشه بر آن بوده‌اند ماهیت غیرخطی این پدیده را شناخته، به‌کمک انجام آزمایشات و ارائه مدل‌های گوناگون، سازه‌هایی ایمن و پایدار در برابر آن طراحی کنند، اما سؤال اینجاست که آیا می‌توان به‌کمک این پدیده ظاهراً مخرب انرژی تولید کرد؟ از سال ۲۰۰۳ م تاکنون ایده‌هایی در این باره مطرح شده است که در آنها به‌کمک جانمایی استوانه‌ای در معرض جریان آب و ایجاد حرکت نوسانی در آن می‌توان انرژی الکتریکی تولید کرد. این جریان می‌تواند جریان یک رودخانه یا جریان‌های تند اقیانوسی باشد. در این مقاله ابتدا با پدیده ارتعاشات خودمحرک ناشی از گردابه‌ها آشنا شده، سپس به بررسی امکان استحصال انرژی از این پدیده خواهیم پرداخت و آن را با روش‌های دیگر تولید انرژی مقایسه خواهیم کرد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات خودمحرک، گردابه، انرژی پاک، انرژی‌های نو، استحصال انرژی

مقدمه

را تجربه کرد. علت بروز آن نیز به‌وجود آمدن گردابه‌هایی در بالا و پایین استوانه و جدا شدن آنهاست. این گردابه‌ها، که دسته گردابه‌های فون کارمان^۲ نامیده می‌شوند، معمولاً از جریان سیال روی استوانه‌هایی با ابعاد چند میلی‌متر تا جریان‌های شدید باد روی کوه‌ها قابل مشاهده‌اند.

اصولاً به حرکت ارتعاشی اجسامی که به‌طور عمودی در برابر جریان یک سیال قرار گرفته باشند، ارتعاشات خودمحرک ناشی از گردابه گفته می‌شود. براحتی می‌توان با قراردادن انتهای لوله‌ای درون یک استخر و حرکت آن در جهت عمود بر محور استوانه این پدیده





شکل ۲. فروپاشی پل تاکوما

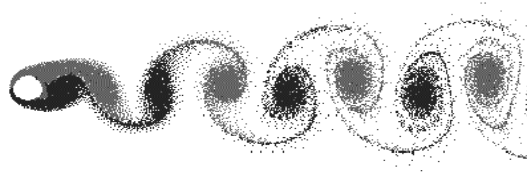


شکل ۳. برج‌های خنک‌کن فری بریج

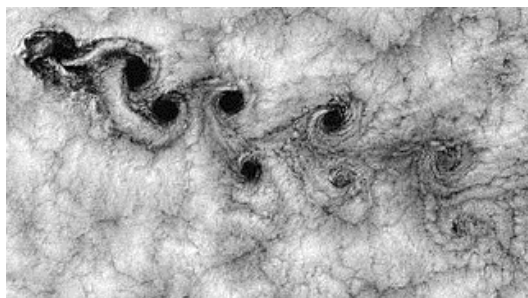
معمولاً حرکت ارتعاشی جسم، الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که این پدیده دارای ماهیتی غیرخطی است. این امر باعث شده است که نه تنها خود جریان، بلکه اثر متقابل سیال و سازه نیز مورد توجه محققان قرار بگیرد.

الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها

بسیاری از سازه‌ها همچون ساختمان‌ها، خطوط لوله، کابل‌ها، پل‌ها و دودکش‌ها از شکل آئرودینامیکی مناسبی برخوردار نیستند. همین امر سبب ایجاد



(الف)

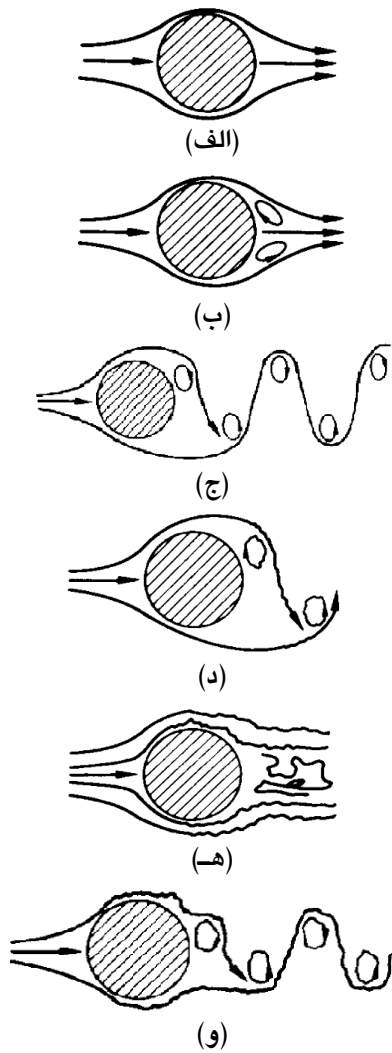


(ب)

شکل ۱. گردابه‌های ایجادشده بر اثر جریان روی (الف) یک استوانه کوچک، (ب) یک کوه بزرگ

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، که در معرض جریان‌های یکنواختی قرار گرفته‌اند، می‌تواند بسیار پر دامنه باشد. 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، پره توربین‌ها، لوله مبدل‌های حرارتی، خطوط انتقال نیرو، پل‌ها، آسمان‌خراش‌ها، خطوط لوله، دودکش‌ها، رایزرها^۴ و کابل‌های زیر آب مشهود است [۱]. فروپاشی پل تاکوما^۵، در سال ۱۹۴۰ م، و برج‌های خنک‌کن فری بریج^۶، در سال ۱۹۶۵ م، نمونه‌های مشهوری از اثر ارتعاشات خود محرک ناشی از جریان گردابه‌ها بر سازه‌های مهندسی است.





شکل ۴. شکل‌گیری گردابه‌ها در اعداد رینولدز گوناگون

استحصال انرژی از اقیانوس

اصولاً هر وسیله‌ای که با هدف استحصال انرژی از اقیانوس یا هر منبع آبی دیگر ساخته می‌شود، باید

دارای چند ویژگی باشد؛ مثلاً باید:

- چگالی انرژی بالایی داشته باشد.
- محیط زیست را تهدید نکند.
- تعمیر و نگهداری آن مشکل نباشد.
- عمر مفید خوبی داشته باشد.

امروزه اقیانوس‌ها یکی از منابع نامحدود انرژی به‌شمار می‌روند. این منابع انرژی، پاک و تجدیدپذیرند. از انواع

پدیده جدایش، به‌هنگام اعمال جریان سیال روی آنها می‌شود. اصطلاحاً به چنین سازه‌هایی اجسام بلاف^۷ گفته می‌شود. (بلاف اصطلاحاً به شکل‌هایی هندسی گفته می‌شود که خاصیت آئرو دینامیکی ضعیفی دارند و جریان در پشت آنها براحتی دچار جدایش می‌شود).

هنگامی که اجسام بلاف در معرض جریان‌های عرضی قرار می‌گیرند، گردابه‌های تشکیل شده در پشت آنها یکنواخت نمی‌شود، اما دارای الگوی مشخصی می‌باشند که در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها به عدد رینولدز بستگی دارد. جزئیات مربوط به تغییرات رژیم جریان در گستره وسیعی از رینولدز در جدول ۱ ذکر شده است [۲]. ناگفته نماند که در برخی از منابع رژیم جریان با دقت بیشتری شناسایی شده است، به‌طوری‌که در بعضی از آنها شاهد بیش از ۱۵ نوع رژیم گوناگون جریان می‌باشیم [۳ و ۴].

مطالعات تجربی نشان می‌دهد که فرکانس اعمال نیروی عمودی روی جسم در مقیاس هرتز بنابر رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$f_s = \frac{SU}{D} \quad (1)$$

به کمیت بدون بعد S عدد استروهل^۸ گفته می‌شود. برای استوانه‌هایی با مقطع دایره، مربع و اکثر مقاطع بلاف عدد استروهل در بازه $0.14 \leq S \leq 0.25$ قرار دارد. این کمیت با افزایش عدد رینولدز اندکی افزایش می‌یابد. عدد استروهل $S = 0.2$ ، مقداری رایج برای استوانه است.

انرژی‌های اقیانوسی می‌توان به انرژی حاصل از موج‌ها، جریان‌ها، جزرومد، گرادیان دما و شوری آب اشاره کرد [۵ و ۶].

امروزه به دلیل نیاز روزافزون 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^۴ و وزارت انرژی امریکا^۱) ویژگی‌هایی را مشخص کرده‌اند تا بدین وسیله بتوان منابع انرژی اقیانوسی را، که قابلیت استفاده تجاری دارند، شناخت. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

- داشتن چگالی انرژی بالا
- عدم ایجاد محدودیت برای دریانوردی
- عدم تخریب نواحی با ارزش ساحلی
- دوستاندار محیط زیست و زندگی آبیان
- حداقل نیاز به تعمیر و نگهداری
- استحکام و قدرت بالای سازه
- 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 [۵].

الف: مبدل‌هایی که براساس نوسانات سطحی یا امواج کار می‌کنند (مانند ستون‌های آب، شناورها، فلپ‌ها یا پاندول‌ها^{۱۱} [۶ و ۷]) خروجی انرژی بالایی دارند، اما فقط در یک باند فرکانسی خاص. نامنظم بودن روند شکل‌گیری امواج باعث شده است تا این دستگاه‌ها شانس کمی برای نشان دادن بازده 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 ۱۵ تا ۳۰ درصد

استخراج می‌کنند، اما فقط برای جریان‌های سریع‌تر از ۲ متر بر ثانیه. در جریان‌های ضعیف‌تر بازده آنها بسیار افت می‌کند [۸].

ج: مبدل‌های جزرومدی حداقل به ۵ متر هد نیاز دارند و به بزرگی سدها هستند. همچنین برای ساخت، به ۵ تا ۷ سال زمان نیاز دارند و هزینه ساخت آنها بسیار زیاد است [۸]. بیشتر این مبدل‌ها روی سطح فعالیت می‌کنند و باعث اشغال فضای با ارزش موجود در ساحل می‌شوند.

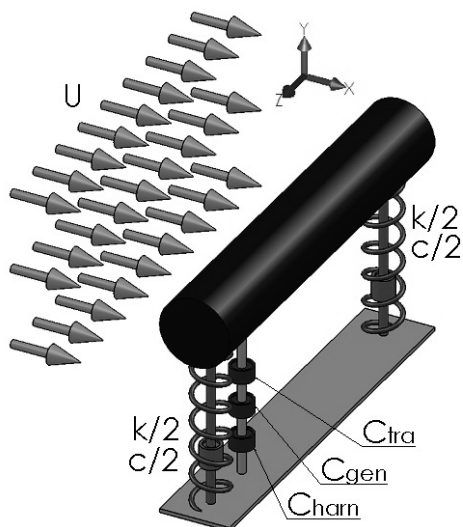
د: مبدل‌هایی چون توربین‌های آبی یا سدهای جزرومد زندگی موجودات آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

استحصال انرژی پاک از آب به کمک ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها^{۱۲}

ایده 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. از این پس برای اختصار به جای "دستگاه مبدل انرژی ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها به انرژی پاک" از عبارت "مبدل گردابه" استفاده خواهیم کرد.

نخستین بار پروفیسور مایکل برنیتساس^{۱۳}، استاد دانشگاه میشیگان، در سال ۲۰۰۵ م، چنین ایده‌ای را مطرح کرد [۱۰]. از آن زمان تاکنون نیز این دانشگاه مرکز اصلی تحقیقات روی این موضوع بوده است. نخستین مقاله علمی در این زمینه توسط برنیتساس، در سال ۲۰۰۸ م، منتشر و بازده این دستگاه محاسبه شده است [۵]. مبدل گردابه از یک جسم بلافاصله صلب تشکیل شده است که به صورت الاستیک روی پایه‌ای نصب 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 ۵ نمایی شماتیک از این دستگاه نمایش شده است.



شکل ۵. نمایی شماتیک از دستگاه مبدل گردابه

به طوری که در این شکل U سرعت جریان، $k/2$ ضریب سختی فنرها، $c/2$ ضریب میرایی سیستم، C_{tra} ضریب میرایی سیستم انتقال قدرت، C_{gen} ضریب میرایی ژنراتور و نهایتاً C_{charm} انرژی به دست آمده معادل 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 مطالعه پدیده ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها می‌گذرد. جدا شدن متوالی گردابه‌ها باعث به وجود آمدن نیروی نوسانی متقارن می‌شود. استوانه قرار گرفته در این وضعیت در جهت عمود بر محور خود و جریان شروع به نوسان می‌کند (شکل ۵) و از سیال انرژی می‌گیرد. این پدیده کاربردهای بسیاری دارد که از جمله عبارت است از:

- کاربردهای دریایی (مثل لوله‌ها، ریزرهای زیر آب، کابل‌ها و پایه سکوه‌های حفاری و استخراج)
- کاربردهای هسته‌ای (مثل میله‌های کنترل موجود در راکتورها)
- کاربردهای مکانیکی (مثل مبدل‌های حرارتی)
- کاربردهای عمرانی (مثل پل‌ها، برج‌ها و پایه پرچم‌ها).

در همه این موارد تلاش شده است تا این ارتعاشات را میرا کنند، 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 غیرخطی: این پدیده یکی از مشخصات ذاتی ارتعاشات ناشی از گردابه‌هاست. در بازه وسیعی از فرکانس در همسایگی فرکانس طبیعی، فرکانس تشکیل گردابه‌ها با فرکانس حرکت سیلندر یکسان شده، اصطلاحاً روی هم قفل می‌شوند^{۱۴}. در این حالت دیگر فرکانس تشکیل گردابه‌ها از قانون استرومال پیروی نمی‌کند. اصطلاحاً به پدیده هماهنگی بین نوسانات سازه و گردابه‌های تشکیل شده همگام‌سازی^{۱۵} گفته می‌شود. گستره همگام‌سازی به نسبت وزن سیستم بستگی دارد و در بازه وسیعی اتفاق می‌افتد. به علاوه دامنه ارتعاشات خاصیت خودمحدودکننده دارد. با علم به این موارد می‌توان پی‌برد که این پدیده خاصیت خودمحرک دارد. بنابراین کاملاً مشخص است که با یک پدیده کاملاً غیرخطی سروکار داریم. تجهیزات استحصال انرژی از اقیانوس که به وسیله قطعات متحرکی همچون شناورها و فلپ‌ها کار می‌کنند، با رسیدن به رزونانس خطی بیشترین دامنه را از خود بروز می‌دهند. این امر باعث می‌شود که تنها در دامنه



فرکانسی محدودی بیشترین کارایی را داشته باشند. چون اساس کار مبدل گردابه را رزونانس غیرخطی^{۱۶} تشکیل می‌دهد، در بازه فرکانسی بسیار وسیع‌تری بازدهی بالا دارد.

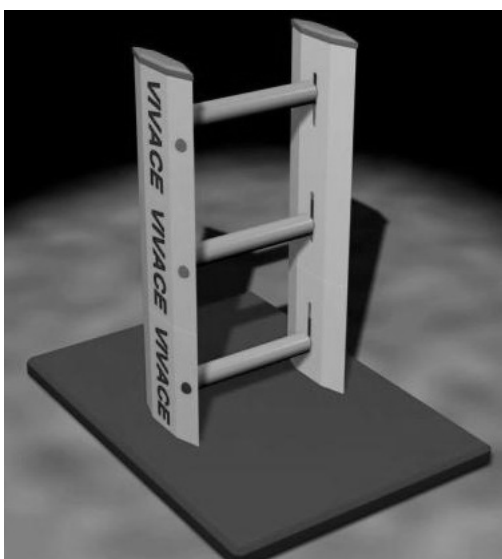
طول همبستگی: در ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها، طول همبستگی برای جریان روی استوانه بدین شکل تعریف می‌شود: بیشترین طول استوانه، به طوری که گردابه‌های تولیدشده هم‌فاز بمانند.

هرچه طول همبستگی بیشتر باشد، نیروهای روی سیلندر بزرگتر خواهد بود. این طول در تئوری بینهایت است، اما در عمل نسبت طول به قطر^{۱۷} سیلندر نباید بیشتر از ۲۰ باشد.

تبدیل انرژی: انرژی مکانیکی سیلندر می‌تواند توسط تسمه تایم یا هر سیستم انتقال قدرت دیگری به ژنراتور منتقل شود. حتی می‌توان انرژی را به شکل مکانیکی با پمپاژ آب از سیستم خارج کرد. انرژی خارج‌شده، به هر شکل که باشد، برای سیستم حکم یک میراکننده 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 بازده مناسبی، در بازه هم‌گام‌سازی گسترده، فراهم کند. با در نظر گرفتن این عوامل، طراحی‌های متعددی برای مبدل گردابه انجام شده است که در شکل ۶ نمونه‌ای از آن نمایش داده شده است.

در این مبدل از سه سیلندر استفاده شده است. این دستگاه در کف رودخانه یا اقیانوس نصب می‌شود. چون ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها برای هر جسم بلالاف 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 چند پارامتر دیگر نیز نیازمندیم که وضعیت یک دسته از آنها را نسبت به یکدیگر و جریان مشخص می‌کند.



شکل ۶. نمونه‌ای از یک مبدل گردابه سه‌سیلندر

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، h عمق آب، d ارتفاع مجموعه مبدل گردابه، t فاصله عمودی بین مرکز سیلندرها و در نهایت p فاصله افقی بین سیلندرهاست.

بازده مبدل گردابه

به‌طور کلی نخستین گام در ارزیابی هر منبع انرژی محاسبه بازده آن است. می‌دانیم که سطح مقطع استوانه‌ای به قطر D و طول L ، که به‌صورت عمود در معرض جریان قرار دارد، برابر با LD است. حال اگر چگالی سیال برابر با ρ و سرعت جریان برابر با U باشد، هد انرژی جنبشی با استفاده از قانون برنولی برابر خواهد بود با:

$$\frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2)$$

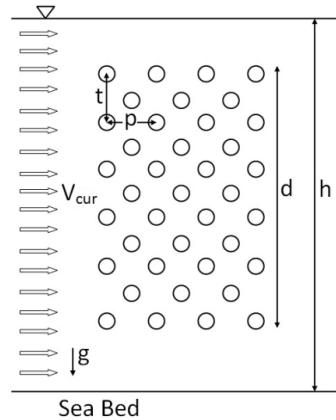
طراحی: نیروگاه‌هایی که با مولدهای گردابه ساخته می‌شوند، سه ویژگی اساسی دارند. این نیروگاه‌ها انعطاف‌پذیر، مقیاس‌پذیر و مدولارند. در ادامه به تشریح هر یک از این موارد می‌پردازیم.

مدولار: معمولاً یک مجموعه 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.

انعطاف‌پذیر: مبدل گردابه انعطاف‌پذیر 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 شبیه‌سازهای توربولانس، 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.

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

کاربرد: مدولاربودن، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری باعث شده است که مبدل‌های گردابه برای گستره وسیعی از کاربردها مناسب باشند. در جدول ۲ مشاهده می‌شود که، برحسب توان مورد نیاز مصرفی،



شکل ۷. وضعیت قرارگیری مجموعه‌ای از مبدل‌های گردابه در جریان آب

بنابراین نیروی وارد بر سطح مقطع استوانه برابر خواهد بود با:

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 DL \quad (3)$$

و نهایتاً توان سیال از ضرب نیرو در سرعت آن به دست خواهد آمد؛ یعنی:

$$P = \frac{1}{2} \rho U^3 DL \quad (4)$$

با تقسیم توان به دست آمده از مبدل گردابه به این مقدار می‌توان بازده این سیستم را پیدا کرد. برنیتساس مقدار بیشینه بازده تئوریک را برابر با ۰/۳۷ به دست آورده است.

$$\eta_{UL-VIVACE} = 0.37 \quad (5)$$

او مقدار آزمایشگاهی آن را، در سرعت ۰/۸۴ متر بر ثانیه، ۰/۲۲ پیشنهاد کرده است و ادعا می‌کند که در کارهای آینده این مقدار افزایش خواهد یافت [۵].

طراحی، کاربرد و صحه‌گذاری

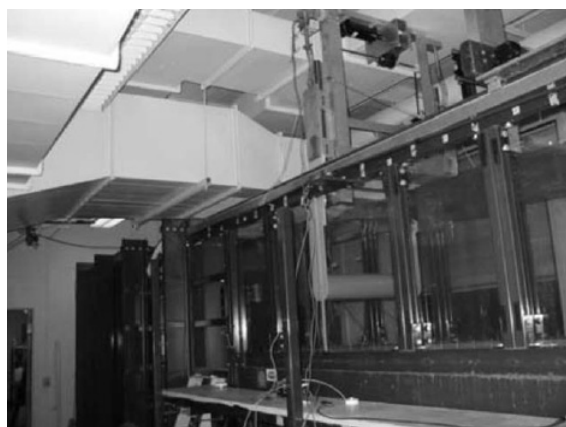
در این بخش به نحوه طراحی مبدل گردابه و بررسی ویژگی‌های آن می‌پردازیم و آن را با دیگر منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر مقایسه می‌کنیم.

پیشنهادهایی برای نیروگاه مولد گردابه داده شده است. این توان علاوه بر اینکه با ابعاد نیروگاه متناسب است، به اندازه سیلندرها و مکان قرارگیری آنها نسبت به هم نیز مرتبط می‌شود. توجه داشته باشید که توان‌های محاسبه‌شده براساس فرض‌های زیر بوده است:

الف: سرعت جریان برابر با $1/5$ متر بر ثانیه

ب: نسبت تبدیل توان (بازده) برابر با $0/22$ باشد. این مقدار از آزمایشات انجام‌شده (شکل ۸) به دست آمده است [۵]. البته این مقدار قدری محافظه‌کارانه انتخاب شده؛ زیرا روی سیستم تحت آزمایش هیچ‌گونه بهینه‌سازی انجام نشده است.

ج: فاصله نسبی سیلندرها $P = 8D$ و $t = 5D$ باشد. این فاصله از فاصله $4D$ که در مراجع برای حداقل تداخل پیشنهاد شده، قدری بیشتر است [۴ و ۱۱]. در ضمن، همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، سیلندرها به‌طور متناوب در جهت جریان قرار گرفته‌اند. د: وزن فونداسیون و سازه نگاه‌دارنده براساس مقررات مدیریت ریسک و ایمنی DNV برای سازه‌های زیر آبی محاسبه شده و ۲۵ درصد ضریب اطمینان برای آن در نظر گرفته شده است [۱۲].



شکل ۸. مدل مورد بررسی در آزمایشگاه هیدرودینامیک، دانشگاه میشیگان

براساس این فرضیات می‌توان پارامترهای طراحی مجموعه مبدل گردابه را محاسبه کرد. به این نکته نیز باید توجه داشت که بینهایت راه‌حل برای طراحی جزئیات هر نیروگاه وجود دارد. پارامترهای طراحی، به‌خصوص L و D به‌گونه‌ای انتخاب شده است که تعداد سیلندرها زیاد نباشد. درست است که تعداد زیاد سیلندرها چگالی انرژی را بالا می‌برد، اما پیچیدگی سیستم را نیز افزایش می‌دهد. علاوه بر این فرض شده که هر واحد مسکونی معمولی ۱ کیلووات مصرف انرژی دارد. بر این اساس، نیروگاه‌هایی در ۶ توان متفاوت مد نظر قرار گرفته که مشخصات آنها در جدول ۲ آمده است.

صحه‌گذاری. در این بخش، برای صحه‌گذاری از دو روش متفاوت استفاده شده است. در ابتدا مبدل گردابه با منابع انرژی قدیمی و منابع انرژی جایگزین براساس اطلاعات موجود در منبع ۱۳ مقایسه شده است. مقایسه هزینه انرژی تولیدی با روش‌های گوناگون استحصال در شکل ۱۲ آمده است. اطلاعات این نمودار براساس هزینه سوخت مطابق جدول ۳ و یک سری فرضیات دیگر برای هزینه‌های جاری و تعمیر و نگهداری است که در مرجع ۵ ذکر شده است.

اما روش دوم، صحه‌گذاری براساس مقایسه مبدل گردابه با دیگر روش‌های مطرح استحصال انرژی از امواج است. این روش به دلیل نبود اطلاعات کافی مشکل می‌باشد. مبدل‌های انتخاب‌شده برای مقایسه پلامیس^{۱۸} [۱۴ و ۷]، شناور اُ. پی. تی^{۱۹} [۱۶ و ۱۵] و انرژی‌تک^{۲۰} [۱۸ و ۱۷ و ۷] می‌باشند. در ادامه به توضیح مختصری درباره هر یک از روش‌های استحصال انرژی اقیانوس می‌پردازیم.

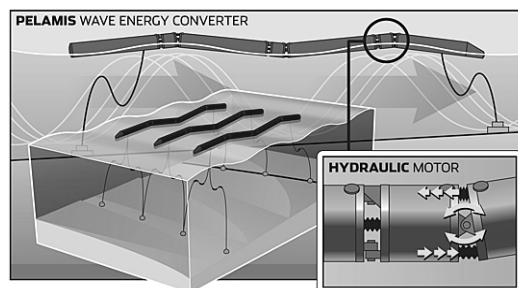
پلامیس. از جمله مبدل‌های انرژی اقیانوسی است که روی سطح اقیانوس نصب می‌شود و به‌گونه‌ای طراحی

کف دریا به خشکی منتقل می‌شود. این وسیله در سال ۱۹۹۴ م طراحی و برای نخستین بار، در سال ۱۹۹۷ م، در نیوجرسی آمریکا آزمایش شده است. همچنین یک نیروگاه ۵۰ کیلوواتی از آن در هاوایی نصب شده است و شرکت بهره‌بردار آن قصد دارد نیروگاهی ۱۰ مگاواتی از آن را نیز در انگلستان نصب کند.



شکل ۱۰. شناور ا. پی. تی

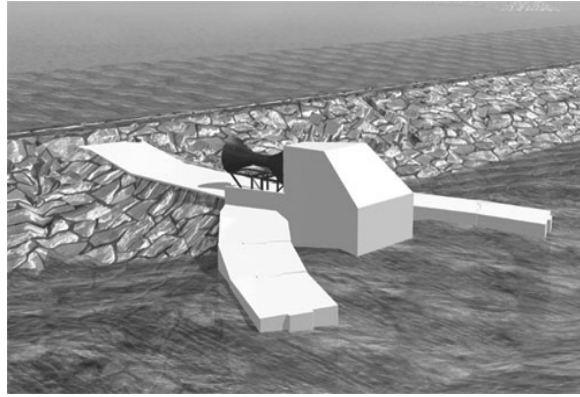
شده است که می‌تواند به صورت یک مجموعه کنار هم قرار بگیرد [۷ و ۱۴ و ۱۵]. این وسیله شبیه به یک سیلندر بلند است که به چهار قسمت تقسیم شده و توسط سه لولا به یکدیگر متصل شده است. وجود لولاها باعث می‌شود تا در پی تغییر پروفیل سطح آب به وسیله امواج، استوانه‌ها به شکل سطح درآیند. لولاها به تلمبه‌هایی هیدرولیک مجهزند که می‌توانند انرژی حرکت نسبی استوانه‌ها را استخراج کرده، به کمک ژنراتورهایی به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. این وسیله در سال ۱۹۹۸ م طراحی شده است. پیش‌بینی شده است که در سال ۲۰۱۰ م قابل رقابت با سایر روش‌ها باشد. این وسیله در مکانی با عمق ۵۰ تا ۶۰ متر و با فاصله ۵۰ تا ۱۰ کیلومتری از ساحل لنگر انداخته و نصب می‌شود.



شکل ۹. پلامیس

انرژیتهک. ایده اولیه این وسیله در سال ۱۹۹۲ م در استرالیا مطرح و ساخت نخستین مدل و آزمایش روی آن در سال ۱۹۹۷ م انجام شد. اولین نمونه آن با ابعاد واقعی در لنگرگاه بندر کمبلا^{۲۱} 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.

شناور ا. پی. تی. از جمله مبدل‌های شناور انرژی اقیانوسی است که به بستر دریا متصل می‌شود و به یک شناور مجهز است که روی سطح قرار گرفته و با سطح آب بالا و پایین می‌رود. در این 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 مجموعه تولید انرژی به کار رود [۱۶]. جریان الکتریکی تولیدشده در این شناور به وسیله کابلی از



شکل ۱۱. انرژی‌تک

است. نحوه کار این دستگاه براساس تقویت ارتعاشات ناشی از گردابه‌هاست. در ساده‌ترین شکل، این مبدل از یک استوانه صلب که روی دو فنر خطی نصب شده تشکیل می‌شود. براساس آزمایش‌های انجام‌شده روی مبدل گردابه می‌توان به این نتایج پی برد:

نخست اینکه مبدل گردابه به‌عنوان یکی از تجهیزات استحصال انرژی از جریان آب تمامی شرایطی را که کمیسیون انرژی کالیفرنیا و وزارت انرژی امریکا وضع کرده‌اند، برآورده می‌کند. این وسیله بر حمل و نقل آبی، زندگی موجودات دریایی، و نواحی با ارزش ساحلی اثر منفی نمی‌گذارد. عملکرد آن ساده و در عین حال بسیار قوی است و حداقل ۲۰ سال عمر می‌کند. همچنین چگالی انرژی بالایی دارد. از دیگر نکات مثبت این روش می‌توان به سازگاری آن با انواع جریان‌ها، قابلیت دسترسی در تمام سال، بازه وسیع همگام‌سازی، قابلیت تولید انرژی با بازده بالا در سرعت‌های بسیار پایین و بازده بالاتر در سرعت‌های بالا اشاره کرد. لازم به‌ذکر است که قابلیت مقیاس‌گذاری، مدولار بودن و انعطاف‌پذیری طراحی باعث شده تا مبدل گردابه در بسیاری از کاربردها قابل استفاده باشد. صحنه‌گذاری روی این ایده به‌وسیله مقایسه با منابع قدیمی تولید انرژی و منابع جدید تولید انرژی به‌خصوص تجهیزات استحصال انرژی از امواج، نتایج قابل توجهی به‌دنبال داشته است. به این نکته نیز باید توجه داشت که نتایج مورد استفاده برای مقایسه مبدل گردابه حاصل از چند آزمایش اولیه بوده، که هیچ‌گونه بهینه‌سازی روی آنها انجام نشده است. برای بالابردن کارایی مبدل گردابه روی سه موضوع می‌توان بیشتر کار کرد:

الف: بهینه‌سازی هیدرودینامیک ارتعاشات ناشی از گردابه تحت میرایی بالا، تقویت گردابه‌ها و زمان‌بندی جدایش گردابه‌ها

مبدل گردابه. در این مقاله با این وسیله آشنا شدیم. ایده اولیه این مبدل در سال ۲۰۰۳ م مطرح شد و سه مدل گوناگون از آن در آزمایشگاه هیدرودینامیک دریایی دانشگاه میشیگان در سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ م آزمایش شد. چون چگالی انرژی به اندازه نیروگاه و جزئیات طراحی وابسته است یکی از طراحی‌های قابل قیاس از جدول ۲ برای مقایسه 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 به‌عنوان یک واحد مولد گردابه با توان $7/6$ کیلووات انتخاب شده است. درصد دسترسی (درصد زمانی که نیروگاه قادر است توان طراحی شده را تولید کند) برای مولد گردابه ۹۰ درصد است. کاهش ۱۰ درصدی نیز به‌دلیل وجود زمان‌هایی برای تعمیر و نگهداری و نیز زمان تغییر جهت جریان در جزرومد است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ایده جدیدی برای استحصال انرژی پاک و نامحدود از جریان آب مطرح شد. در این راستا دستگاهی به نام مبدل گردابه طراحی و آزمایش شده



جدول ۱. الگوی شکل‌گیری گردابه‌ها در سرعت‌ها و اعداد رینولدز گوناگون

شکل	محدوده اعداد رینولدز	وضعیت جریان
قسمت الف از شکل ۴	$Re < 5$	رژیم جریان بدون جدایش
قسمت ب از شکل ۴	$5 \leq Re < 40$	وجود یک جفت گردابه ثابت
قسمت ج از شکل ۴	$40 \leq Re < 90$ $90 \leq Re < 150$	دو رژیم که در آنها جریان گردابه‌ها آرام است
قسمت د از شکل ۴	$150 \leq Re < 300$ $300 \leq Re < 3 \times 10^5$	گذار از جریان گردابه‌های آرام به جریان گردابه‌های درهم جریان گردابه‌ها کاملاً درهم است
قسمت هـ از شکل ۴	$3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$	جریان لایه مرزی از حالت آرام به درهم تبدیل شده، جریان گردابه‌ها باریک‌تر شده و درهم ریخته می‌شود
قسمت و از شکل ۴	$3.5 \times 10^6 \leq Re$	شکل‌گیری مجدد جریان درهم گردابه

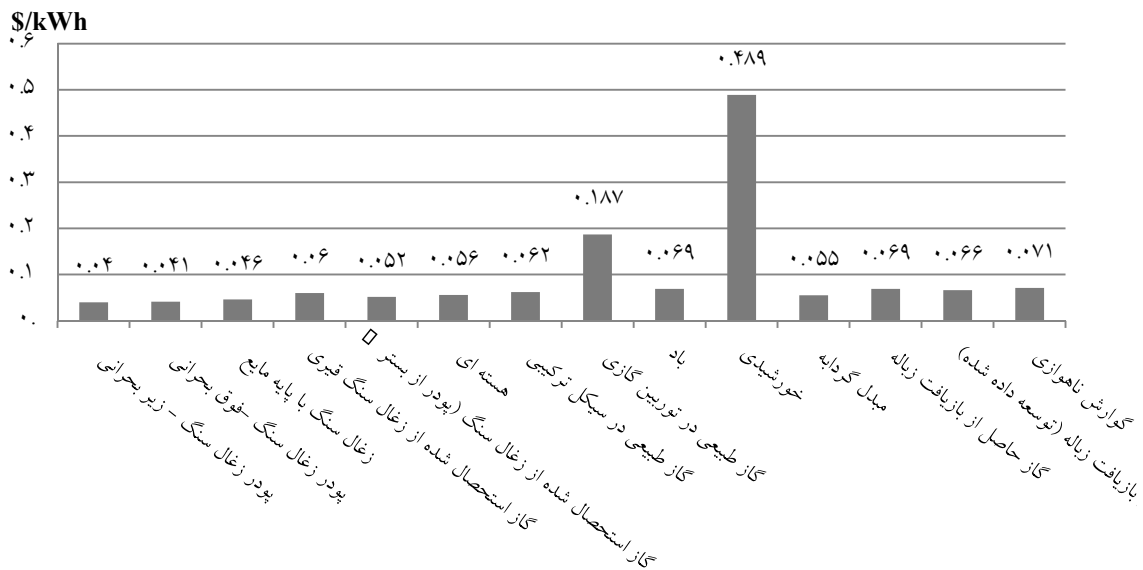
جدول ۲. مشخصات طراحی برای نیروگاه مبدل گردابه در شش مقیاس گوناگون

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

جدول ۳. فرضیات هزینه سوخت

نوع سوخت	برآورد هزینه مصرف
زغال سنگ خرد شده	۱/۲۵
زغال سنگ قیری	۲/۷۵
زغال سنگ خرد شده حوزه رودخانه	۱/۲۵
اورانیوم	۰/۵
گاز طبیعی	۶
گاز حاصل از بازیافت زباله‌ها	۱/۸
هزینه‌های سرمایه‌گذاری	۱۴





شکل ۱۲. مقایسه هزینه منابع قدیمی و جدید انرژی و مبدل‌های گردابه

rigid circular cylinder on elastic supports," *Ocean Engineering*, vol. 38, pp. 719-731, 2011.

- [4] M. M. Zdravkovich, *Flow around Circular Cylinders*, Oxford, Oxford University, 1997.
- [5] M. M. Bernitsas, et al., "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*, vol. 130, pp. 041101-15, 2008.
- [6] M. T. Pontes and A. Falcao, "Ocean Energies: Resources and Utilization," in 18th WEC Congress, Buenos Aires, 2001.
- [7] Wave Net. European Wave Energy Thematic Network, 2003, Online Available at: [http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Full%20Report\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Full%20Report(11.1).pdf)
- [8] "Wave Energy Project Results: The Exploitation of Tidal Marine Currents," Commission of the European Com. DGXII Report EUR16683EN, 1996.

ب: بهینه‌سازی گستره همگام‌سازی و دامنه نوسانات ناشی از گردابه تحت میرایی بالا
ج: بهینه‌سازی سیستم استحصال انرژی.

در مقیاس نیروگاهی نیز به دو مسئله می‌توان توجه کرد: نخست بهینه‌سازی بین کاهش میزان پیچیدگی سیستم و بالابردن چگالی انرژی استحصال‌شده و دیگر بهینه‌سازی وضعیت قرارگیری سیلندرهای مبدل گردابه در فضای سه‌بعدی داخل اقیانوس.

مراجع

- [1] T. Sarpkaya, "A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations," *Journal of Fluid and Structures*, vol. 19, pp. 389-447, 2004.
- [2] C. M. Harris, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 2002.
- [3] K. Raghavan and M. M. Bernitsas, "Experimental investigation of Reynolds number effect on vortex induced vibration of

- 14. lock-in region
- 15. synchronization
- 16. nonlinear resonance
- 17. aspect ratio
- 18. Pelamis
- 19. OPT buoy(Ocean Power Technologies)
- 20. Energetech
- 21. Kembla

* * *

- [9] Marine Turbines. Online Available at: <http://www.marineturbines.com/>
- [10] M. M. Bernitsas and K. aghavan, "Fluid Motion Energy Converter," 11/272,504, 2005.
- [11] M. M. Zdravkovich, *Flow around Circular Cylinders (Fundamentals)*, vol. 2. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [12] DNV. (Det Norske Veritas). Online Available at: <http://www.dnv.com/>
- [13] "Capacity Needs Forum Status Report," Michigan Public Service Commissions U-14231, 2005.
- [14] Pelamis Wave Power, Online Available at: <http://www.pelamiswave.com/>
- [15] Ocean Power Technology. Online Available at: www.oceanpowertech.com
- [16] Ocean Power Technology, 2001, "Testimony to the US Congress," On-line Online Available at: epw.senate.gov/107th/tay_0530.htm
- [17] Oceanlinx. Online Available at: www.oceanlinx.com.
- [18] Energetics wave energy technology. Available: www.gizmag.com/go/3932/



شرکت ایتراک

مهندسی و ساخت تجهیزات صنایع ایران

طراحی و ساخت تجهیزات صنایع :

به ویژه برای :

- صنایع غذایی و دارویی
- صنایع شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کشتارگاهها و صنایع جنبی گوشت
- سیستم‌های انتقال مواد
- تجهیزات خطوط رنگ کارخانه‌ها
- کوره‌های زباله‌سوز و لاشه سوز
- مخازن تحت فشار و راکتورها
- سازه‌های صنعتی و انواع گریپینگ با گالوانیزه گرم

تهران - خیابان ظفر - خیابان نصیری - بلوار سیما جنوبی - شماره ۱۶
 صندوق پستی ۱۱۳۶ - ۱۹۳۹۵
 تلفن: ۰۲۲۲۶۰۷۴۲ - ۲۲۲۷۲۸۳۹ تلفکس: ۰۲۲۲۶۰۹۹۰
 web site: www.itrac-co.com
 E-mail: info@itrac-co.com

پی‌نوشت

1. vortex-induced vibration (VIV)
2. Von Carman vortex street
3. lift force
4. risers
5. Tacoma
6. Ferrybridge power stations
7. bluff bodies
8. Strouhal number
9. California Energy Commission(CEC)
10. Department Of Energy of the United States
11. water column, buoy, flap or pendulum
12. vortex-induced vibration aquatic clean energy (VIVACE)
13. Michael M. Bernitsas

