

مروری بر فناوری‌های تبدیل انرژی امواج اقیانوس

محمدحسین جهانگیر^۱، امیررضا محمودی^۲

mh.jahangir@ut.ac.ir

۱- استادیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله به مرور علمی رابط جلویی از مبدل‌های انرژی امواج پرداخته می‌شود که از بین تمام مراحل دیگر مانند سیستم انتقال قدرت و تبدیل انرژی الکتریکی، در نخستین گام تبدیل انرژی امواج قرار دارند. با شناخت پیشرفت‌های اخیر این بخش، ایجاد یک مبدل به صورت اقتصادی و تجاری ممکن می‌شود. هدف این مقاله مروری، ارائه اطلاعاتی درباره مبدل‌های جلویی انرژی در یک جاذب نقطه‌ای، و تاکید بر راهبردها و مسائلی است که باید در طراحی چنین دستگاه‌هایی مدنظر قرار گیرند تا قابلیت بهره‌برداری از انرژی امواج را بهبود بخشند.

واژگان کلیدی: تبدیل انرژی در رابط جلویی، جاذب نقطه‌ای، سیستم انتقال قدرت، مبدل انرژی موج

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱۰/۰۷

۱- مقدمه

اولین اقدامات در جهت بهره برداری از انرژی امواج در اوایل قرن هجدهم میلادی آغاز شد. به لطف پیشرفت تکنولوژی، بسیاری جنبه‌های متفاوت دریافت انرژی از امواج اخیراً شناخته شده است. اما هنوز همگرایی فنی و مفهومی لازم حاصل نشده که بتوان یکی از دستگاه‌ها را به عنوان مناسبترین دستگاه برای جذب انرژی امواج معرفی کرد. بنابراین، تکثیر تکنولوژی‌های انرژی امواج در سرتاسر دنیا در حال انجام است. هزاران اختراع در سراسر دنیا درباره روش‌های مختلف بهره برداری انرژی امواج ثبت شده است. اولین اختراع در ۱۷۹۹ ثبت شده [۱]. از آن زمان تا سال ۱۹۸۰ هزاران روش متفاوت ثبت شد [۲]. گزارش‌های سالانه درباره انرژی امواج از طرف آژانس بین‌المللی انرژی منبع به روز رسانی‌های منظم درباره موقعیت پژوهش‌های مرتبط با انرژی امواج است. ضمیمه نهم از گزارش سال ۲۰۰۶ [۳] بیش از ۸۰ مورد ایده‌های در حال شکل‌گیری برای دریافت انرژی امواج را معرفی کرده است. بسیاری مولفان از انرژی امواج به عنوان انرژی پایدار یاد کرده [۴و۵] و همچنین دسته بندی‌های مختلفی را بر اساس ملاک انتخابی پیشنهاد کرده‌اند.

یک دیاگرام ترسیمی که توسط هاگرمان پیشنهاد شده و بر پایه شناخته شده‌ترین اصول تبدیل انرژی امواج است، هنوز هم برای برآورد مبدل‌های انرژی امواج مفید است [۶]. دسته بندی‌های او بر پایه مود حرکتی جذب انرژی (پرتابی^۱، بالا و پایین رفتن^۲، غلتیدن^۳)، سازه ثابت یا منعطف، نوع واکنش نیرو (سازه ثابت، تکیه گاه ثابت و مرجع لخت) و نوع سیال عامل (هوا، آب و روغن هیدرولیک) است. این دسته‌بندی‌ها امروزه نیز معتبر هستند البته تکنولوژی جدید تبدیل مستقیم انرژی به آن افزوده شده است.

دستگاه‌های متفاوت تبدیل انرژی امواج بر اساس اصول کاریشان مرور شده‌اند [۲]. دستگاه‌های مورد نظر در مرحله نمونه اولیه و تحت پیشرفت‌های اساسی بودند. آن مرور شامل تقریباً تمام دستگاه‌هایی می‌شد که تا آن زمان آزمایش شده بودند. ایده‌های متفاوت تبدیل انرژی امواج بر

اساس مکان و اصول کارکردیشان مرتب شده‌اند [۷]. اگرچه اکثر دستگاه‌های ساحلی که با امواج فعال می‌شوند در نظر گرفته نشده‌اند. فعالیت‌های شاخص در زمینه ایجاد دستگاه‌های ساحلی و تجاری سازی آنها در زمان‌های اخیر در مراجع قابل رویت هستند [۸-۱۰]. این کارها شامل امکان‌های قوی‌تر و قیدهای طراحی آنها برای مبدل‌های انرژی امواج از انواع مختلف هستند. دسته بندی مشترکی که توسط این مولفان بر اساس نحوه کارکرد مبدل‌ها پیشنهاد شده، شامل تقسیم مبدل‌های انرژی امواج به گروه‌های ستون نوسانگر آب^۴، دستگاه‌های سرریز شونده^۵ و اجسام فعال شونده توسط موج^۶ است.

اگرچه تحقیقات پرشماری بر روی هر یک از این مبدل‌های انرژی امواج صورت پذیرفته، اجسام فعال شونده توسط امواج به عنوان موفق‌ترین و گسترده‌ترین آنها گزارش شده‌اند [۱۱-۱۴]. هر مبدل فعال شونده توسط موج در سه مرحله انرژی موج را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. شکل ۱ مراحل مختلف یک نمونه از مبدل‌های انرژی امواج را نشان می‌دهد که در آن، رابط جلویی به طور مستقیم در ارتباط با موج برخوردی است. این رابطه عموماً از یک جسم شناور یا بیشتر ساخته شده اند که نسبت به مراجع کاملاً ثابت یا نیمه ثابتی حرکت می‌کنند. علاوه بر این، یک سیستم انتقال قدرت^۷ کوپل شده است تا جابجایی رابط-های جلویی را به دیگر انواع مفید انرژی تبدیل کند.

اکثر سیستم‌های حمل قدرت، حرکت مکانیکی از نوع دورانی تولید می‌کنند، هرچند برخی از آنها حرکت خطی تولید می‌کنند تا بتوانند ژنراتورهای خطی را به حرکت درآورند. انرژی تولید شده در بخش تولید الکتریسیته که با سیستم انتقال قدرت کوپل شده، توسط کابل‌های زیر آبی به محل مصرف منتقل می‌شود.

یک دستکاری ساده در یکی یا بیشتر از آن مراحل، دستگاهی جدید خواهد ساخت و بسیاری از چنین دستگاه‌هایی به منظور انجام آزمایش‌های تجاری اختراع و ثبت شده‌اند. مقاله حاضر بر مرحله رابط جلویی متمرکز شده است.

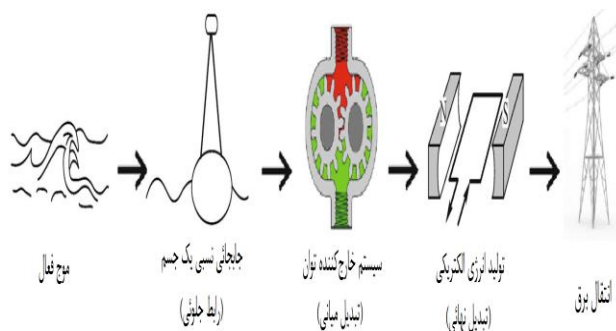
4 Oscillating Wave Column
5 Overtopping Devices
6 Wave Activated Bodies
7 Power Take off (PTO)

1 Pitch
2 Heave
3 Surge

اکثر اجسام فعال شونده با موج که اخیراً ساخته شده‌اند بر اساس شناوری رابط جلویی، شکل و جهت‌گیری رابط‌های جلویی، مدهای حرکت، چارچوب مرجع و اصول کاری دسته‌بندی شده‌اند. هر یک از این دستگاه‌ها در قسمت بعد بررسی شده‌اند.

۴- شناورها

هر شیئی با وزن مخصوص کمتر از آب اطرافش به عنوان یک شناور در مبدل‌های نوع فعال شونده با موج به منظور حرکت در راستای حرکت موج استفاده می‌شود. این شناورها عموماً سیلندرهای توخالی یا اجسام توخالی دیگر هستند که برای حرکت نسبت به هر مرجعی ساخته شده‌اند. این شناورها می‌توانند بر روی سطح، مانند شکل ۳، شناور باشند یا در زیر آب غرق باشند که بر اساس نوع جابجایشان حین تعامل با موج‌های ورودی دسته‌بندی می‌شوند [۱۵-۱۹]. بسیاری مهندسان و دانشمندان جسم فعال شونده با موج را به منظور افزایش نرخ کلی تبدیل انرژی طراحی کرده‌اند. جدول ۱ خلاصه‌ای از طراحی‌های مختلف شناورها به منظور افزایش راندمان را ارائه می‌دهد.



شکل (۱) مراحل یک مبدل انرژی موج

نمایش پیشرفت‌های اخیر در قسمت‌های متفاوت یک مبدل انرژی امواج^۱ از نوع فعال شونده با موج در شکل ۲ قابل مشاهده است. از فلوچارت فوق درمی‌یابیم که بسیاری پیشرفت‌ها بر تبدیل در رابط جلویی یک مبدل انرژی امواج از نوع فعال شونده با موج متمرکز هستند.

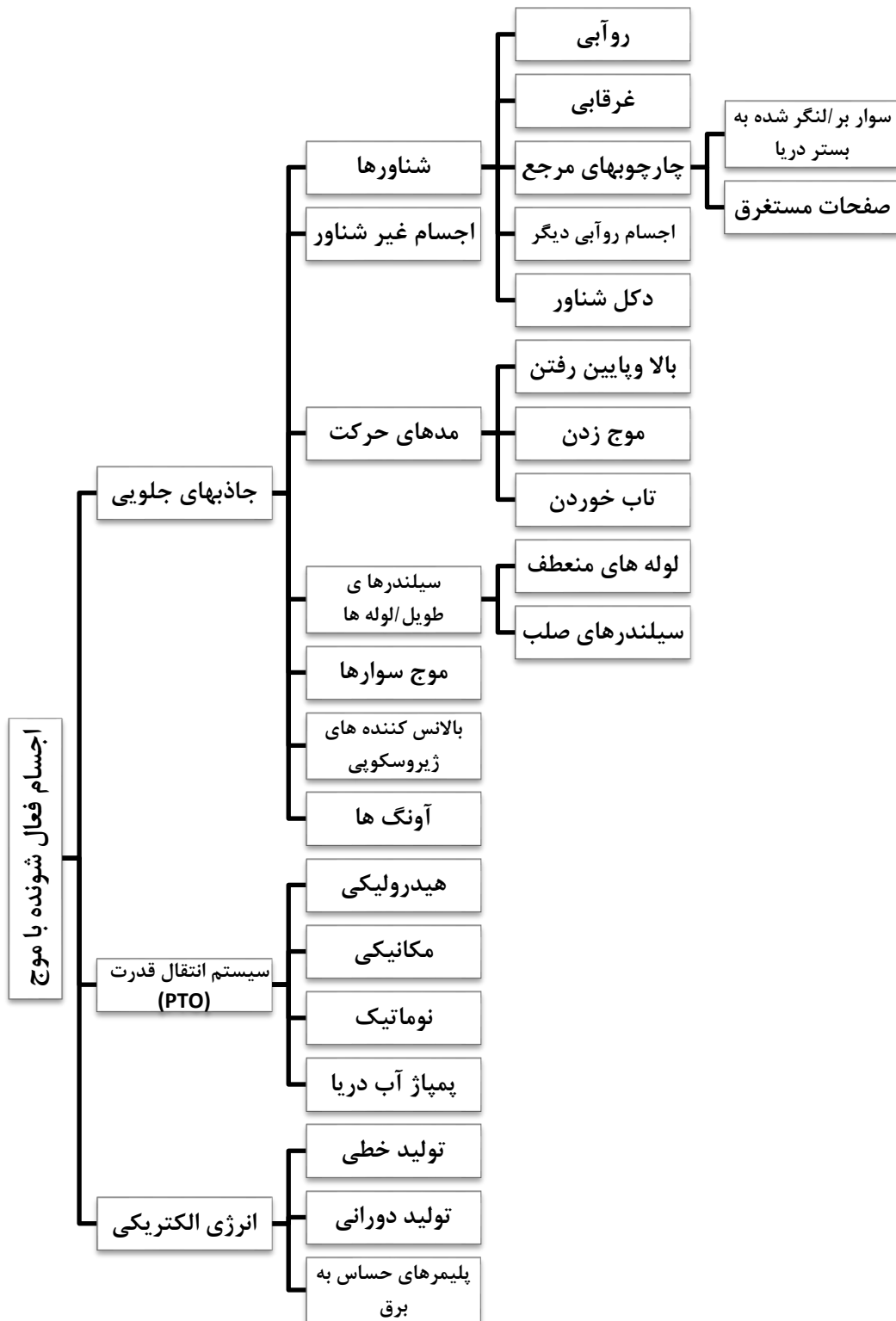
۲- اجسام فعال شونده با موج (WAB)

اجسام فعال شونده با موج دستگاه‌هایی هستند که با حرکت نسبی اجسام نوسانگری کار می‌کنند که توسط حرکت موج ایجاد شده. این نوع دستگاه‌ها می‌توانند به عنوان جاذب‌های نقطه‌ای (به نسبت طول موج برخوردی ابعاد کوچکی دارند)، تضعیف‌کننده - که در جهت اصلی موج می‌خواهند و نسبت به یکدیگر نوسان می‌کنند («پلامیس»^۲، پایان دهنده - دستگاه‌های بزرگی که با قله موج هم تراز شده‌اند (محور اصلی عمود بر جهت اصلی موج) و دستگاه‌های نصب شونده در کف دریا که توسط اختلاف فشار کار می‌کنند دسته‌بندی شوند. این دستگاه‌ها شامل یک مرجع تزلزل ناپذیرند که جسم جاذب می‌تواند نسبت به آن نوسان کند و انرژی توسط سیستم انتقال قدرت، با میراندن یا مقاومت در برابر حرکت این اجسام مهار می‌شود.

۳- تبدیل انرژی در رابط جلویی

رابط‌های جلویی در وهله اول از اجسام شناور ساخته شده‌اند و بر روی سطح اقیانوس شناور هستند. تعداد کمی از دستگاه‌ها این اجسام را زیر آب نگاه می‌دارند و از اختلاف فشار ایجاد شده توسط امواج در بالای این اجسام استفاده می‌کنند.

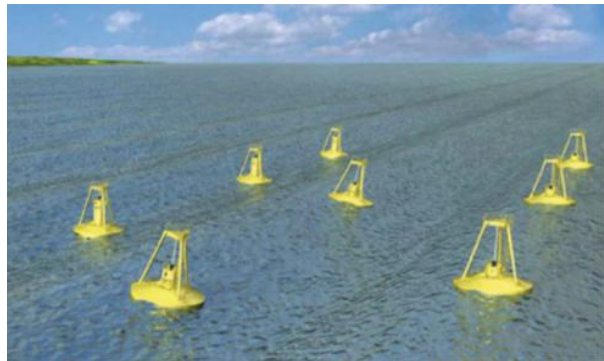
1 Wave Energy Converter
2 Pelamis



شکل (۲) اجسام فعال شونده با موج

۴-۱- شناورهای روآبی

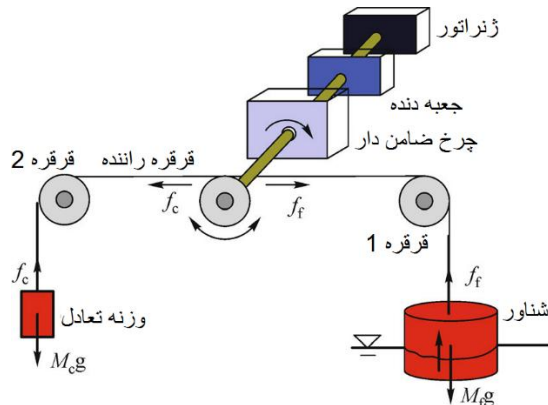
شناورها چنان که در قسمت قبل اشاره شد می‌توانند روآبی یا زیرآبی باشند. شناورهای روآبی به گونه ای طراحی شده‌اند که بر روی امواج دریا شناور باشند و در یک مد نوسان خاص حرکت کرده و انرژی امواج را برداشت کنند. این حرکت‌های نسبی سپس به دستگاه‌های انتقال منتقل می‌شوند و نهایتاً به مولد انرژی می‌رسند. ممکن است یک یا بیشتر از این شناورها به منظور استخراج انرژی امواج وجود داشته باشد. مدل تبدیل انرژی پیشنهاد شده [۲۱] آنگونه که در شکل ۴ نیز نشان داده شده، نمونه ای از شناورهای روآبی است که انرژی امواج را در هنگام بلند شدن استخراج می‌کند و توسط سیستم‌های مناسب انتقال به مولد منتقل می‌کند.



شکل (۳) شناورهای OPT [۲۰]

۴-۳- چارچوب‌های مرجع

اکثر مبدل‌های انرژی امواج، از القای جابجایی نسبی بین اجسام صلب توسط عمل موج برای استحصال انرژی امواج استفاده می‌کنند. این جابجایی نسبی سپس به یک سیستم انتقال قدرت منتقل شده تا به دیگر انواع قابل استفاده انرژی تبدیل شود. روش‌های متفاوتی در دستگاه‌های مختلف برای تولید جابجایی نسبی استفاده شده. تعداد کمی از دستگاه‌ها به بستر دریا ثابت شده‌اند و از آن به عنوان چارچوب مرجع نوسان استفاده می‌کنند. برخی، از صفحات افقی مستغرق به عنوان میراکننده (دمپر) استفاده می‌کنند و با موج در جهت عمودی حرکت می‌کنند. برخی از دستگاه‌ها از اجسام شناور بسیاری استفاده می‌کنند که دوره طبیعی متفاوتی دارند و باعث ایجاد جابجایی نسبی می‌شوند. و برخی نیز از دکل‌های



شکل (۴) شناور روآبی [۲۰]

۴-۲- شناور زیرآبی

این مبدل‌های انرژی [۲۲] کاملاً در زیر آب غرق شده‌اند و از قله و قعر موج برای تولید حرکت نسبی درون ساختارهایشان استفاده می‌کنند تا بتوانند تولید برق کنند. این گونه از مبدل‌ها، از مزیت اثرات بصری کمتر بر افراد و قرار گرفتن در برابر نیروهای کوبشی کمتر از طرف امواج برخوردار هستند. به عنوان مثال، شناور زیرآبی شکل ۵ را در نظر بگیرید که از یک استوانه پر شده با هوا و یک استوانه بالایی متحرک تشکیل شده که همگی توسط سازوکاری مناسب به بستر دریا محکم شده‌اند. به علت حرکت موج، استوانه بالایی هوای موجود در استوانه زیرین را متراکم می‌کند و هوای متراکم برای راه‌اندازی بخش مولد قدرت استفاده می‌شود.



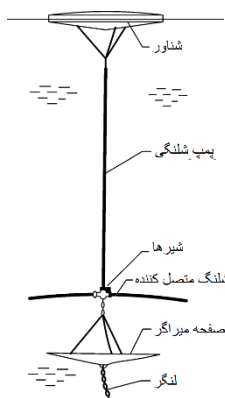
شکل (۵) شناورهای مستغرق

هنگامی که شناور نسبت به صفحات مستغرق بالا می‌رود، شلنگ کشیده می‌شود و حجم داخلی کاهش می‌یابد. آب حاضر در شلنگ از طریق یک شیر کنترل خارج می‌شود و برای چرخاندن یک توربین استفاده می‌گردد. هنگامی که شناور پایین می‌آید، شلنگ حجم اصلی خود را باز می‌یابد و اجازه می‌دهد که آب از طریق یک شیر دیگر وارد شود.

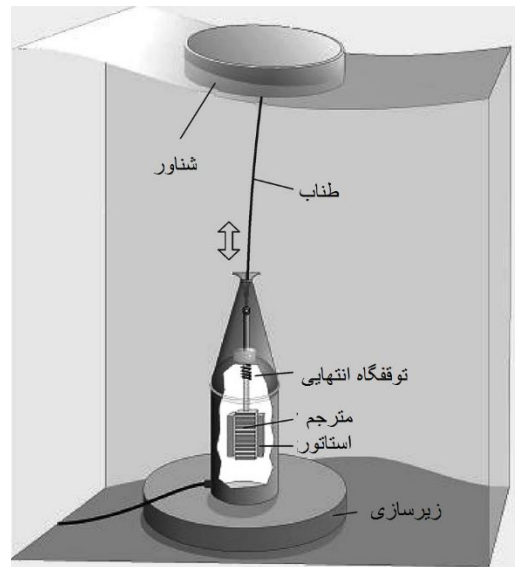
۴-۴- اجسام شناور دیگر

علاوه بر اجسام شناور مرسوم، شناورهای بسیار دیگری نیز به منظور استحصال انرژی از امواج پیشنهاد شده‌اند. مبدل انرژی موج «مانتا»^۱ که در شکل ۸ نشان داده شده، برای تبدیل بالا و پایین رفتن و موج زدن شناور به یک دوران با گشتاور بالا طراحی شده و توسط یک مولد رانش مستقیم دورانی^۲ کار می‌کند تا تبدیل انرژی ساده و مطمئنی را فراهم سازد [۲۵].

یک نمونه به اسم شارلوت^۳ (شکل ۹) و ساخته شده توسط باتی^۴ [۲۶] از یک ستون مرکزی ساخته شده که توسط آرایه‌ای از استوانه‌ها محصور شده که به عنوان شناور از آن‌ها یاد می‌شود. سیستم انتقال قدرت درون ستون مرکزی جاسازی شده است. نمونه به گونه‌ای ساخته شده است که هندسه ستون و شناورها به گونه‌ای باشند که شرایط رزونانس در هر دو انتهای بازه فرکانسی موج ایجاد شود. مکانیزم تنظیم در این مدل ممکن شده و می‌توان از امواج مورد نظر حداکثر انرژی را برداشت کرد.



شکل (۷) شناور صفحه مستغرق [۲۴]



شکل (۶) شناورهای سوار بر بستر دریا [۲۳]

اعماق دریا استفاده می‌کنند که به بستر دریا با لنگر محکم شده‌اند و از آن به عنوان چارچوب مرجع استفاده می‌کنند. اگرچه تنوع در طراحی وجود دارد، تمام این دستگاه‌ها از حرکت نسبی برای تبدیل برداشت انرژی از امواج استفاده می‌کنند.

۴-۳-۱- نصب شده/لنگر شده در کف دریا

مبدل‌های انرژی امواج با قرار دادن یک جرم سنگین در کف دریا یا با استفاده از لنگر در بستر دریا قرار داده شده‌اند. جرم سوار شده بر بستر دریا به خاطر گرانش در کف دریا ثابت شده است و از جابجایی شناورها جلوگیری می‌کند. شکل ۶ چارچوب مرجع سوار شده در کف دریا را نشان می‌دهد.

۴-۳-۲- صفحات مستغرق

صفحات مستغرق آنچنان که در شکل ۷ نیز نمایش داده شده، به عنوان چارچوب مرجع شناورهای روآبی نیز عمل می‌کنند. شناورهایی که در واقع با کف دریا در تماس نیستند. این صفحات به اندازه‌ای هستند که بتوانند به عنوان دمپر در برابر اوج گرفتن موج عمل کنند. در [۲۴] یک مبدل انرژی موج با یک شناور روآبی و چارچوب مرجع پیشنهاد شد، که در آن شناور توسط یک اتصال الاستومریک به صفحه مستغرق متصل شده و صفحه مستغرق توسط شلنگ به بستر دریا بسته شده است.

¹ Manta WEC

² Direct Drive Rotary

³ Charlotte

⁴ Beatty

مکان دکل توسط یک سیستم افساربندی متداول حفظ می‌شود. حدود نود درصد سازه زیر آب است. معمولاً دکل بین شناور و صفحه مستغرق قرار داده می‌شود. عملکرد نهایی دکل در مبدل انرژی موج این است که زمانی که شناور به علت موج‌های پرنرژی بالا می‌رود، نسبتاً ثابت باشد. این به مانند یک اتصال مابین شناور و چارچوب مرجع عمل می‌کند. تمام سیستم‌های انتقال انرژی و مولد قدرت درون دکل جاسازی می‌شوند و بنابراین از محیط اقیانوس محافظت می‌شوند.

۵- اجسام غیر شناور

علاوه بر اجسام شناور به عنوان مبدل‌های انرژی در رابط جلویی، انواع غیرشناور نیز نقشی حیاتی در استحصال انرژی بازی می‌کنند. پژوهشگران ادعا می‌کنند که این دسته از دستگاه‌ها بهتر از انواع شناور هستند زیرا در شرایط سخت آب و هوایی و امواج خشن، بسیار کمتر در خطر خراب شدن هستند. عموماً، مبدل‌های جلویی زمانی به صورتی کار می‌کنند که دوره تناوب موج برخوردی به دوره تناوب طبیعی دستگاه نزدیک باشد. هرچند، در شرایط واقعی دوره تناوب طبیعی شناورها بسیار کمتر از دوره تناوب بسیاری از امواج است. این محدودیت به خوبی با استفاده از اجسام غیر شناوری برطرف شده که باعث می‌شوند وزن مخصوص بیشتر و در نتیجه دوره تناوب بیشتری حاصل شود. شکل ۱۱ یک مبدل انرژی موج غیر شناور را نمایش می‌دهد [۲۸] که از یک بازو که میانه آن باریک شده، یک محفظه غیر شناور پر شده از آب در انتهای بازو و یک جرم تعادل در انتهای دیگر تشکیل شده است. هنگامی که موج به محفظه نیمه شناور می‌رسد، بازو به علت عدم توازن مابین دو انتهایش نوسان می‌کند و این نوسان به یک حرکت دورانی تبدیل و نهایتاً توسط سیستم انتقال به مبدل منتقل می‌شود.

۶- مودهای حرکت

شناورها به انواع شناور بالا رونده، شناور موج خروشان و شناور نوسانگر به طرفین تقسیم می‌شوند.

یکی از مدل‌های پیشنهاد شده متشکل است از یک شناور و یک استوانه خالی متصل به آن (شکل ۱۰) [۲۷]. استوانه توخالی دو باله پروانه‌ای را در بر می‌گیرد و این دو باله در هنگام بالا و پایین رفتن شناور باز و بسته می‌شوند که به علت اختلاف فشار آب به ترتیب قسمت بالایی و پایینی سیلندر را متناوباً پر می‌کنند و به شرایط تشدید می‌رسند.

۴-۵- دکل‌های شناور

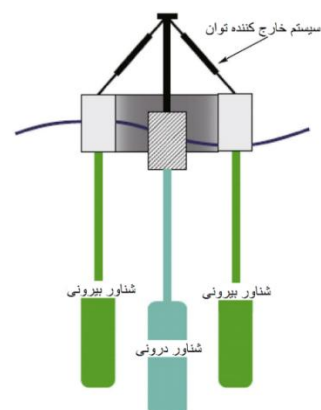
دکل یک محفظه شناور است که عموماً یک سازه استوانه‌ای شکل توخالی است که شبیه به یک شناور بسیار بزرگ است.



شکل (۸) مبدل انرژی Manta [۲۵]

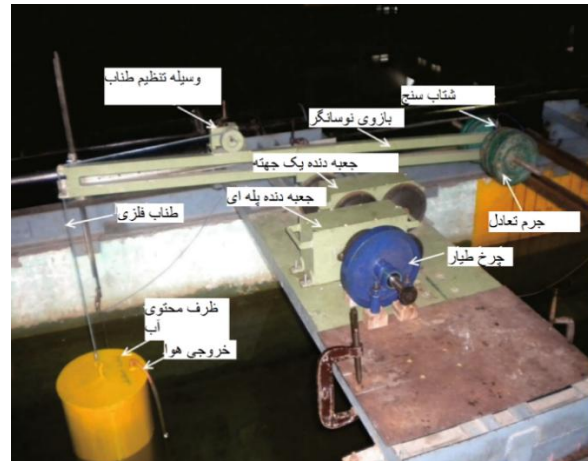


شکل (۹) مبدل انرژی شارلوت [۲۶]



شکل (۱۰) مبدل انرژی از نوع تنظیم جرمی [۲۷]

نصب می‌شوند بنابراین الکتریسیته می‌تواند با اتلاف کمتری به شبکه برسد. این دستگاه‌ها عموماً از یک نوسانگر یا زبانه که از زیر لولا شده‌اند (مانند شکل ۱۳) تشکیل می‌شوند، که از بالاتر از سطح آب تا بستر دریا امتداد دارد. هنگامی که موج به زبانه برخورد می‌کند، زبانه نسبت به مرجع لولا تاب می‌خورد. سیستم انتقال قدرت هیدرولیکی به پمپ-های زبانه متصل است و توربین پلتون برای تبدیل انرژی هیدرولیکی آب پمپاژ شده به الکتریسیته استفاده می‌شود [۳۱].



شکل (۱۱) مبدل انرژی از نوع غیر شناور [۲۸]

۳-۶- مبدل‌های انرژی امواج با نوسان به طرفین شناور نوسانگر به طرفین انرژی امواج را جذب کرده و بالاتر از بستر دریا از طرفی به طرف دیگر تاب می‌خورد. این حرکت‌های نسبی برای فشرده سازی سیال عامل، که ممکن است هیدرولیک یا نوماتیک باشد، به منظور چرخاندن توربین استفاده می‌شود. توربین به ژنراتور متصل است و برق تولید خواهد شد. مبدل انرژی امواج با نوسان به طرفین (شکل ۱۴) که توسط «بیوپاور سیستمز»^۲ [۳۲] ساخته شده، یک آرایه از تیغه‌هایی است که بر روی بستر دریا سوار شده‌اند و محور اصلی آنها در نزدیکی انتهای پایینی است. امواج پرنرژ با تیغه‌ها وارد تعامل شده و در نتیجه سیستم به طرفین نوسان می‌کند و این حرکت توسط یک ماژول

۱-۶- مبدل‌های انرژی امواج در حرکت رفت و برگشتی قائم

این‌ها ساده‌ترین انواع جاذب‌های نقطه‌ای هستند که دارای شناورهایی می‌باشند که تنها در هنگام اوج گرفتن موج حرکت می‌کنند و عموماً بسیار کوچکتر از طول موج هستند [۲۹]. شناورهای این دستگاه‌ها هنگام عبور یک موج به بالا و پایین حرکت می‌کنند. حرکت رو به بالا توسط نیروی شناوری وارد شده از طرف موج ایجاد می‌شود، در حالی که حرکت رو به پایین به علت شتاب جاذبه است. هنگام حرکت رو به بالا، انرژی به صورت پتانسیل ذخیره می‌شود و مابقی انرژی توسط سیستم انتقال قدرت دریافت می‌گردد. هنگام پایین آمدن، انرژی پتانسیل شناور آزاد می‌شود و توسط سیستم انتقال قدرت مهار می‌گردد تا تبدیل انرژی بیشتری صورت پذیرد. دستگاه «ویواستار»^۱ [۳۰]، با چندین شناور (شکل ۱۲) که در آن هر یک از شناورها توسط بازوهای به یک سکو و سکو نیز توسط پایه‌هایی به کف دریا متصل شده است. یک سیستم هیدرولیک دارای آکومولاتور به عنوان سیستم انتقال قدرت استفاده می‌شود که جابجایی در اوج‌گیری هر شناور با موج را به فشار هیدرولیکی تبدیل کرده و آن را ذخیره می‌کند.



شکل (۱۲) مبدل انرژی موج در حرکت به بالا و پایین [۳۰]

۲-۶- مبدل‌های انرژی امواج خروشان

هنگامی که امواج در نزدیکی ساحل به ارتفاع ۱۰ تا ۱۵ متر می‌رسند، مبدل‌های انرژی امواج خروشان بهترین گزینه هستند. این مبدل‌ها در فاصله نزدیک‌تری از خشکی

^۲ BioPower Systems

^۱ WaveStar

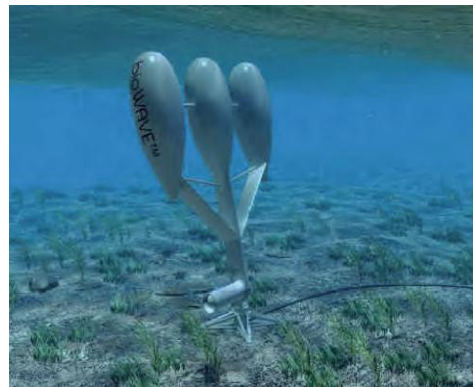
بندی شده‌اند و لوله به گونه ای لنگر شده که سر آن به سمت امواج قرار گیرد. لاستیک توسط امواج فشرده یا منبسط می‌شود که این باعث اختلاف فشارهایی در طول آن می‌گردد که باعث ایجاد یک موج محذب می‌شود. سرعت موج محذب به ابعاد و جنس لوله بستگی دارد که به گونه ای طراحی می‌شود که موج محذب با سرعتی برابر با سرعت موج خارجی حرکت کند. در این حالت تشدید، موج محذب حین عبور از لوله رشد می‌کند و این امکان استخراج انرژی به صورت غیر مستقیم و انتقال آن به سیستم انتقال قدرت را فراهم می‌سازد. شکل ۱۵ «آناکوندا»^۱ [۳۳]، که یک مبدل انرژی موج با لوله منعطف می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳) مبدل انرژی موج در موج زدن [۳۱]

۷-۲- سیلندرهای صلب

مبدل انرژی موج با سیلندر صلب یک جاذب انرژی فرا ساحلی است که از یک ساختار مار مانند نیمه مستغرق تشکیل شده. این ساختار از بخش استوانه‌ای بندبند تشکیل شده که بندهای آن توسط اتصالات لولایی بهم متصل شده‌اند. هنگامی که موج عبور می‌کند، سیلندرهای نسبت به هم خم می‌شوند و سیلندرهای هیدرولیکی در برابر این حرکت نسبی مقاومت می‌کنند. آنگاه این سیلندرهای هیدرولیکی، روغن تحت فشار را از طریق آکمولاتورها و موتورهای هیدرولیکی پمپاژ می‌کنند. موتور هیدرولیکی به نوبه خود بخش مولد قدرت را راه می‌اندازد. شکل ۱۶ «پلامیس» [۳۴] را نشان می‌دهد که از مولدهای انرژی موج از نوع سیلندر صلب است.



شکل (۱۴) مبدل انرژی موج با تاب خوردن [۳۲]

خودکفای مبدل قدرت که سوار بر دستگاه است به الکتریسیته تبدیل می‌شود.

۷- سیلندرهای بلند/ لوله‌ها

در مبدل انرژی موج، برای انتقال حرکت موج به سیستم انتقال قدرت مبدل‌های جلویی مناسب مورد نیاز هستند. تکنیک‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند که حرکت نسبی مخصوص به خود را دارند و از آن برای انتقال انرژی موج به مولد قدرت از طریق سیستم سیستم انتقال قدرت استفاده می‌کنند. علاوه بر مبدل‌های جلویی معمولی، لوله‌های منعطف و صلب نیز تقاضای بالایی دارند.

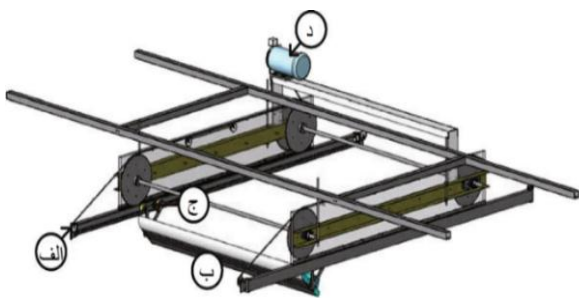
۷-۱- لوله‌های منعطف

این سازه اساساً از یک لوله لاستیکی پر شده با آب تشکیل می‌شود که درون دریا قرار داده شده. هر دو انتهای لوله آب

۸- موج سواری

مبدل رابط جلویی همچنین ممکن است بر اساس حرکت سوار بر موج خود هنگامی که موج از میان آن عبور می‌کند، در گروه موج سوارها قرار گیرد. این وسایل بسیار مناسب نصب در نزدیکی ساحل هستند. عموماً مبدل‌های انرژی امواج از نوع موج سوار (شکل ۱۷) از مجموعه ای از پاروها تشکیل شده‌اند که به یک پیشران مشترک متصل هستند و به صورت مکانیکی به ماشین الکتریکی مربوط می‌شوند. این پاروها زمانی که موج برخورد می‌کند در راستای افقی حرکت می‌کند و ماشین الکتریکی تولید برق

¹ Anaconda



الفسراهگاهها؛ ب-پارویی؛ ج-غلنک؛ د-ماشین الکتریکی

شکل (۱۷) مبدل انرژی از نوع موج سوار [۳۵]

۱۰- آونگ ها

وسایل جاذب انرژی از نوع آونگی از اجزائی که با حرکت موج در راستای افقی حرکت می‌کنند استفاده کرده تا جابجایی‌های اولیه را به صورت نوسانی ایجاد کنند [۳۸-۴۱]. این‌ها روش‌های ساده‌ای هستند برای استخراج انرژی امواج که بالقوه از نظر دوام و نگهداری دارای برتری هستند. حرکت نسبی که توسط آونگ ایجاد می‌شود برای فشرده سازی سیال عامل استفاده می‌شود، به جای آنکه به صورت مستقیم برای تولید برق به کار گرفته شود. سپس سیال عامل تحت فشار برای راه اندازی بخش تولید قدرت استفاده می‌شود. مبدل انرژی از نوع آونگی که در شکل ۱۹ پیشنهاد شده از یک آونگ دو ضربه به عنوان رابط جلویی استفاده می‌کند و هنگامی که برخورد موج احساس شود، آونگ نوسان می‌کند. میله‌های سیلندر هیدرولیکی نیز به تناسب حرکت کرده و سیال را فشرده می‌کنند و به مراحل بعدی تولید قدرت می‌فرستند.

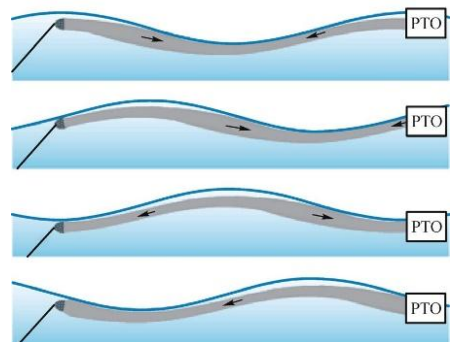
۱۱- بحث

این مقاله‌ی مروری تمامی تکنیک‌های تبدیل انرژی که برای جاذب‌های نقطه‌ای ایجاد شده را مطرح و بررسی می‌کند. تکنیک‌های مختلفی معرفی می‌شوند که هر یک از آن‌ها مزایای خود را دارند. به علاوه، اجزاء خاصی در طراحی مبدل‌های انرژی در رابط جلویی وجود دارند

می‌کند [۳۵]. هنگامی که یک پارو به انتهای پایین دست سیستم می‌رسد، ماشین الکتریکی به موتور الکتریکی تبدیل می‌شود و پارو را بالا آورده، از مسیر خارج می‌کند. بنابراین پاروی بعدی را برای شروع به کار پایین می‌آورد. همچنین مشاهده شده که راندمان این دستگاه‌ها از افت‌های متفاوتی از قبیل اصطکاک، اینرسی و درگ تاثیر می‌گیرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کارایی به زاویه موج وابسته است و مهم است که هندسه پاروها به گونه‌ای بهینه شود که بر افت‌های اینرسی و اصطکاک غلبه کند.

۹- بالانس کننده های ژيروسکوپی

این تکنیک از اثر ژيروسکوپی برای استحصال انرژی امواج بهره می‌گیرد [۳۶ و ۳۷]. عموماً اثر ژيروسکوپی با قرار دادن یک چرخ طیار در حال چرخش درون یک دستگاه شناور و آب بندی شده محقق می‌شود. هنگامی که این چرخ طیار تحت اثر موج‌های ورودی قرار می‌گیرد، گشتاوری تولید می‌شود که بخش تولید انرژی را راه‌اندازی می‌کند. بیشتر این دستگاه‌ها در محیط اقیانوس به کارکردی مطمئن و طولانی مدت دست می‌یابند. شکل ۱۸ یک مثال از مبدل انرژی موج با بالانس کننده ژيروسکوپی است.



شکل (۱۵) مبدل انرژی موج آناکوندا [۳۳]

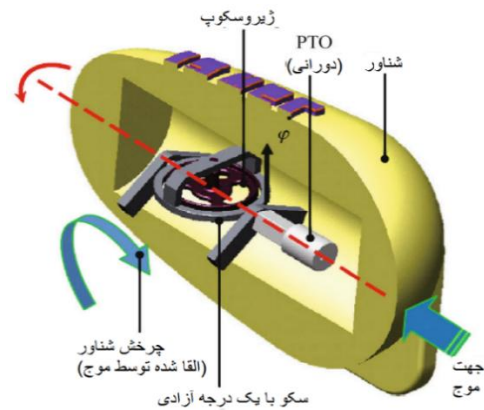


شکل (۱۶) مبدل انرژی موج پلامیس [۳۴]

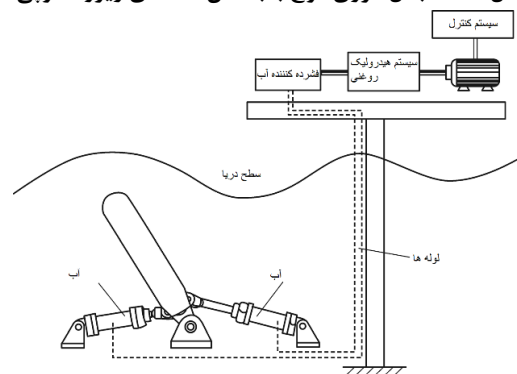
در صورتی که جاذب در قسمت‌های پرمعمق دریا مستقر شده، مد حرکتی موج زدن ارجحیت دارد [۳۱]. در دریای عمیق، اکثر امواج نیروهای بالابرنده به شناورها وارد می‌کنند، درحالی که موج‌های شکسته نیروهای افقی به ساختارهای شناور وارد کرده و تنش‌های سازه‌ای عظیمی را باعث می‌شوند. برای جلوگیری از آسیب رسیدن به دستگاه در اثر امواج خشن و شکسته، اجزای دستگاه باید کاملاً بالاتر از حد دسترسی موج قرار گیرند و مبدل‌های انرژی رابط جلویی باید توسط اتصال‌های منعطف مانند طناب و زنجیر به هم متصل شوند. برای ساختار فوق، استفاده از یک سکو و دکل که به بستر دریا لنگر شده باشد مناسب‌ترین گزینه است [۴۲]. مبدل انرژی رابط جلویی از نوع لوله منعطف یا صلب نتایج امیدوار کننده‌ای به همراه امکان تبدیل بیشتر انرژی را فراهم می‌سازد [۳۳ و ۳۴]. این مبدل‌های انرژی رابط جلویی از نوع لوله‌ای خود را با موج ورودی هم‌تراز کرده و به صورت خودکار در بیش از یک مد حرکتی حرکت می‌کنند. همچنین گفته می‌شود وسیله‌ای که دارای چند مبدل انرژی رابط جلویی متصل به یک سیستم انتقال قدرت باشد، بسیار کارتر از چند دستگاه مجزا عمل می‌کند [۳۰]. علاوه بر انواع مرسوم فوق، نوع آونگی و ژيروسکوپ هم وجود دارند که از یک نظر افق‌های تازه‌ای به روی ما گشوده‌اند، و آن این که هیچگونه اجزاء متحرک خارجی در معرض امواج ندارند و باز هم قادر هستند با استفاده از بی‌نظمی‌ها متغیر در سطح آب، انرژی امواج را جذب کنند. از آنجایی که این نوع از دستگاه‌ها هیچ بخش متحرکی در خارج از خود ندارند، در شرایط سخت آب و هوایی از مزیت بالقوه‌ای از دیدگاه ایمنی بهره می‌برند. مشخص شده که، اگرچه فاصله مابین دوره موج و دوره نوسان طبیعی دستگاه بسیار زیاد است، علاوه بر دستکاری طرح دستگاه، با تنظیم سیستم انتقال قدرت نیز می‌توان دستگاه را با موج هم‌فاز کرد. بنابراین، مبدل‌های انرژی موج در آینده باید با روش‌های تنظیمی مختلفی سازگار باشند.

۱۲- نتایج

ظهور دستگاه‌ها و روش‌های جدید تبدیل انرژی موج از طریق بهبود یکی یا بیشتر از مراحل تبدیل انرژی در یک مبدل در حال رخ دادن است. اگرچه بسیاری پیشرفت‌های



شکل (۱۸) مبدل انرژی موج با بالانس کننده ژيروسکوپ



شکل (۱۹) مبدل انرژی موج از نوع آونگی [۴۰]

که نقشی حیاتی در عملکرد موثر آنها بازی می‌کنند. بینشی که ماحصل این مرور است می‌تواند در طراحی مبدل‌های نوین و پیشرفته مورد استفاده قرار گیرد. هر مبدل انرژی موج برای آنکه کارا باشد باید هرچه نزدیک‌تر به دوره نوسان طبیعی خود کار کند. دوره نوسان طبیعی امواج دریا معمولاً بسیار طولانی‌تر از دوره نوسان طبیعی دستگاه‌های کوچک جذب نقطه‌ای است؛ که این باعث می‌شود اکثر جاذب‌های انرژی نقطه‌ای کوچک راندمان کمتری داشته باشند. بزرگتر کردن یا سنگین‌تر کردن دستگاه دو روش ممکن برای بزرگتر کردن دوره نوسان طبیعی دستگاه هستند. بنابراین، هر جاذب نقطه‌ای باید با در ذهن داشتن این دو نکته طراحی شود. همچنین از یافته‌های هیکینن و همکاران [۲۲] مشخص می‌شود که جاذب‌های نقطه‌ای باید امواج را در بیش از یک مد حرکتی مهار سازند (بالا و پایین رفتن، موج زدن و تاب خوردن). از آنجا که بیشتر فناوری‌های موجود بر حرکت عمودی (بالا و پایین رفتن) تمرکز کرده‌اند، مبدل‌های انرژی آینده بایستی بیش از یک مد حرکتی را شامل شوند. پیشنهاد می‌شود که

۱۳- جداول

جدول (۱) روش‌های طراحی در شناورها به منظور افزایش

راندمان

توصیف	نحوه طراحی برای تبدیل انرژی در خط مقدم	شناورها
یک سازه پیستونی مابین دو شناور قرار داده شده تا توربین ساحلی را به حرکت درآورد	استفاده از دو شناور، یکی روی سطح آب، دیگری معلق زیر آب	«سیریزر» ^۱ [۳۵]
پنج بخش لوله ای که توسط مفاصل یونیورسال به هم متصل شده‌اند و در دو جهت تا میشوند تا ژنراتور را از طریق بخش هیدرولیکی به حرکت درآورد	پنج بخش لوله‌ای که با مفاصل یونیورسال به یکدیگر متصل شده‌اند	«پلامیس» ^۲ [۴۳]
ژنراتور الکتریکی درون دستگاه با نوسان آونگ حرکت میکند	شناور روآبی متصل با آونگ	«توان موج نپتون» ^۳ [۲۲]
ژنراتور الکتریکی توسط نوسان‌های تولیدی از دو کلک که بهم لولا شده‌اند حرکت می‌کند	دو کلک لولا شده به عنوان شناورهای روآبی	«دگزاووبو» ^۴ [۴۴]
توربین ژنراتور متحرک با غشاء سلولی نوماتیک که با موج فعال می‌شود	شناورسازی غشاء منعطف ساخته شده از چندین سلول	AWS [۴۵]

اخیر در زمینه فرآوری الکتریسیته به منظور دستیابی به راندمان الکتریکی بیشتر برای دستگاه اتفاق افتاده‌اند (جدول ۲)، افزایش حقیقی در راندمان نیازمند رابط جلویی موثر است. مبدل انرژی رابط جلویی تنها مرحله مسئول جذب حداکثری انرژی از امواج ورودی است و دیگر مراحل فقط انرژی جذب شده را فرآوری می‌کنند. تا زمانی که تبدیل انرژی در رابط جلویی در تمام طیف موج با بیشترین اثرگذاری رخ ندهد، کارایی دستگاه افزایش نخواهد یافت. مقاله مروری حاضر پیشرفت‌های مختلف در زمینه تبدیل انرژی در رابط جلویی و شاخصه‌ی هر کدام را در شرایط کنونی به طور خلاصه بیان می‌کند. از این مرور درباره رابط‌های جلویی، نتایج ذیل حاصل شده‌اند. یک دستگاه به منظور اینکه دارای رابط جلویی با کارایی بالا باشد باید:

- از انرژی در بیش از یک مد حرکتی استفاده کند.
 - بسامد طبیعی دستگاه باید با بسامد امواج تطابق داشته باشد.
 - پیشانی دستگاه در مقابل جبهه موج باید حداقل باشد و در عین حال از حداکثر انرژی استفاده کند.
 - دستگاه باید بتواند از هر دو حرکت رو به بالا و رو به پایین موج جهت استحصال انرژی استفاده کند؛ و مشخص شده که استفاده از اجسام غیر شناور و بالانس کردن اجرام در این راستا مفید خواهد بود.
 - دستگاه بایستی حداقل اجزاء متحرک قابل رویت را در بخش خارجی خود داشته باشد و تمام چرخه تبدیل انرژی را درون یک محفظه آیرودینامیکی مخفی کند.
 - چارچوب مرجع برای حرکت یک مبدل انرژی رابط جلویی نباید توسط نیروهای هیدرودینامیکی خارجی تحت تاثیر قرار گیرد؛ تا بتوان از امنیت و عمر طولانی دستگاه مطمئن بود.
- هرگونه پیشرفت رابط‌های جلویی در آینده باید با توجه به نکات فوق، تغییرات مناسبی در دستگاه ایجاد کند.

¹ Searaser² Pelamis³ Neptune Wave Power⁴ Dexawave

جدول (۲) شاخصه‌های تعدادی از مبدل‌های انرژی جلوبیی (اولیه)

مبدل انرژی جلوبیی	دستگاه	مشخصه	توضیحات
شناورها	روآبی	«سیریزر» [۴۶]	سیریزر حدوداً توان ثابتی را استحصال می‌کند. تولید توان در ساحل و ساختار ساده. هزینه های نصب و نگهداری کمتر است و نوسان توان کمینه است
		«پلامیس» [۴۳]	تولید توان یکنواخت و دائم است. شکل طویل، لاغر و همخوان با جریان ماشین نیروهای ضربه ای و درگ را کمینه می‌کند
		«توان موج نیتون» [۲۳]	اجزاء منحرک در تماس با آب دریا نیستند و از خوردگی و خرابی در امانند. قابلیت تغییر اندازه و جابجایی. طراحی ماژولار به منظور تولید مقرون به صرفه. قطعات قابل تعویض به منظور نگهداری مقرون به صرفه.
		«دگزاویو» [۴۴]	مبدل می‌تواند به راحتی در جای دیگری نصب شود.
		«ای دلبیو اس» ^۱ [۴۵]	به صورت طبیعی بار اضافی و خروج از حالت بهینه در موج‌های بزرگ را صرف نظر می‌کند. سیستم لنگر بار امواج را کاهش می‌دهد. سیستم هوای محبوس شده قطعات تحرک را از
	مستغرق	مستغرق [۴۷]	دستگاه می‌تواند برای استفاده های نزدیک ساحل بکار گرفته شود. دستگاه کاملاً زیر آب قرار دارد و از نیروهای
شناورهای دارای چارچوب مرجع	سوار بر / لنگر شده به بستر دریا [۶]	پایداری بالا	ساختار ساده برای سوار کردن مبدل انرژی موج بر بستر
		میراکنندگی کارا	از آنجایی که دستگاه به بستر دریا به صورت صلب محکم نشده، از زمین لرزه های بستر
		اجسام روآبی دیگر [۲۷-۲۵]	بیش از یک مد نوسانی قابل دستیابی است تا بتوان حداکثر انرژی را استخراج کرد.
		دکل [۴۲]	ساختار با پایداری بالا. وسایل تبدیل انرژی را از محیط اقیانوس محفوظ
مبدل‌های غیر شناور انرژی امواج	مبدل‌های غیر شناور نزدیک ساحل [۲۸]	به دلیل چگالی زیاد جسم غیر شناور، حداکثر انرژی قابل استخراج است. از خرابی و توقف فعالیت در هنگام شرایط بد جوی و موج‌های	این دستگاه‌ها برای کاربردهای نزدیک ساحل مناسب هستند.

¹AWS

تولید در دریا در سال‌های بسیاری ثبت شده است	مد حرکتی ساده. اگرچه موج‌ها دوره‌ای هستند، تولید توان متداوم ممکن است.	بالا و پایین رفتن [۲۹،۳۰]	میدل انرژی امواج با مدهای حرکتی متفاوت
این دستگاه‌ها برای نصب در نزدیکی ساحل مناسب هستند.	برای استحصال انرژی از موج‌های کم عمق به کار گرفته شده. دستگاه از نوع موج‌زن در فاصله کمتری تا خشکی نصب می‌شود، بنابراین الکتریسیته با افت کمتری می‌تواند به شبکه	موج زدن [۳۱]	
تولید توان و انتقال به شبکه پایا است و از کیفیت درخور مصرف برخوردار است.	برای استخراج انرژی از دریای عمیق استفاده می‌شود. کارکرد بهینه را ممکن می‌سازد. به گونه‌ای طراحی شده که از مواجهه با امواج سهمگین جلوگیری شود. ساختار الهام گرفته از طبیعت.	تاب خوردن [۳۲]	
هزینه‌های نصب توجه پذیر با کارایی قابل قبول.	لولاها و مفاصل در این میدل‌ها موجود نیستند بنابراین عمر بیشتری از آنها انتظار می‌رود. لوله های لاستیکی برای مدت طولانی تری در	لوله های منعطف [۳۴]	میدل انرژی موج با سیلندر طویل / لوله
این دستگاه‌ها مناسب محیط فراساحلی هستند.	با استفاده از تک تک سیلندرها به عنوان استخراج کننده انرژی افزایش می‌یابد. تولید انرژی بیشینه است حتی در موج‌های کوچک. با کاهش پاسخگویی سیستم، میدل انرژی از	سیلندر صلب [۳۳]	
پاروی موج که در سیستم تعبیه شده تا انرژی موج را برداشت کند، به علت نیروهای اینرسی و اصطکاک، نمی‌تواند در پیشانی موج بماند. همانطور که پارو از قله موج عبور می‌کند، توان منفی از میدان موج جذب می‌شود	پیشبینی می‌شود که در نزدیک ساحل بیشترین کاربرد را خواهد داشت	موج سوارها [۳۵]	میدل انرژی موج سوار
مدل کوپل شده غیر خطی (مکانیک و هیدرودینامیک) جهت بهبود شکل شناور به منظور بیشینه سازی جذب توان استفاده می‌شود. راندمان این وسیله با تغییر ابعاد شناور افزایش می‌یابد.	عملکرد مطمئن و بادوام در صورتی دست یافتنی است که از چرخ طیار در شناور کاملاً آب بندی شده استفاده شود.	بالانس کننده‌های ژيروسکوپی	میدل انرژی موج لخت ^۱
تولید انرژی مداوم با استفاده از این وسایل قابل دستیابی	دستگاه آونگی از هر دو سیر خود تولید انرژی می‌کند. سیستم ساده است و هیچ عضو	آونگ‌ها [۳۸-۴۱]	میدل انرژی موج آونگی

¹ ISWES

۱۴-مراجع

- [11] Falnes J., "A review of wave-energy extraction." *Marine Structures*, Vol. 20, No. 4, pp. 185–201, 2007.
- [12] Al-Habaibeh A., Su D., McCague J., Knight A., "An innovative approach for energy generation from waves." *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 8, pp. 1664–1668, 2010.
- [13] Ahn K. K., Truong D. Q., Tien H. H., Yoon J. I., "An innovative design of wave energy converter." *Renewable Energy*, Vol. 42, pp. 186–194, 2012.
- [14] Lindroth S., Leijon M., "Offshore wave power measurements—a review." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 9, pp. 4274–4285, 2011.
- [15] Nazari M., Ghassemi H., Ghiasi M., Sayehbani M., "Design of the point absorber wave energy converter for Assuluyeh Port." *Iranica Journal of Energy and Environment*, Vol. 4, No. 2, pp. 130–135, 2013.
- [16] Rahm M., Ocean wave energy. "Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations." The Faculty of Science and Technology, Uppsala University, 2010.
- [17] Grilli S. T., Grilli A. R., Bastien S. P., "Small buoys for energy harvesting: experimental and numerical modelling studies." In: *Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hawaii, USA, 2011.
- [18] Hadano K., Koirala P., Ikegami K., "A refined model for float energy conversion device." In: *Proceedings of the 17th International and Polar Engineering Conference*. Lisbon, Portugal, 2007.
- [19] Hicks D. C., Pleass C M., "Physical and mathematical modeling of a point absorber wave energy conversion system with nonlinear damping. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization*," pp. 113–124, 1986.
- [20] Drew B., Plummer A. R., Sahinkaya M. N.. "A review of wave energy converter technology." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A, Journal of Power and Energy*, Vol. 223, No. 8, pp. 887–902, 2009.
- [21] Taneura K., Nakano K., Koirala P., Hadano K., "On the resonance characteristics of the float type wave power generation device." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 542–553, 2011.
- [22] Heikkinen H., Lampinen M. J., Böling J.. "Analytical study of the interaction between waves and cylindrical wave energy converters" [1] Clément A., McCullen P., Falcão A., Fiorentino A., Gardner F., Hammarlund K., Lemonis G., Lewis T., Nielsen K., Petroncini S., Pontes M.T., Schild P., Sjöström B.O., Sørensen H. C., Thorpe T., "Wave energy in Europe: current status and perspectives." *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, No. 5, pp. 405–431, 2002.
- [2] Pelc R., Fujita R. M., "Renewable energy from the ocean". *Marine Policy*, Vol. 26, No. 6, pp. 471–479, 2002.
- [3] Murray R., "Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies". Report by AEA Energy & Environment on the behalf of Sustainable Energy Ireland for the IEA's Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, 2006.
- [4] Langhamer O., Aikonen K., Sundberg J.. "Wave power—sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters". *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 4, pp. 1329–1335, 2010.
- [5] Zabihian F., Fung A. S., "Review of marine renewable energies: case study of Iran". *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, pp. 2461–2474, 2011.
- [6] Hagerman G., "Wave energy resource and economic assessment for the state of Hawaii." SEASUN Power Systems, for DBEDT, Final Report, 1992.
- [7] Drew B., Plummer A. R., Sahinkaya M. N.. "A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A*", *Journal of Power and Energy*, Vol. 223, No. 8, pp. 887–902, 2009.
- [8] Martinelli L., Ruol P., Cortellazzo S. G., "On mooring design of wave energy converters: the seabreath applications". In: *Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering*. Santander, Spain, pp. 1-6, 2012.
- [9] Vicente P. C., Falcão A. F., Gato L. M. C., Justino P. A. P., "Dynamics of arrays of floating point-absorber wave energy converters with inter-body and bottom slack-mooring connections". *Applied Ocean Research*, Vol. 31, pp. 267–281, 2009.
- [10] Fitzgerald J., Bergdahl L., "Rigid moorings in shallow water: a wave power application. Part I: experimental verification of methods". *Marine Structures*, Vol. 22, No.4, pp. 809–835, 2009.

- generation system by applying gyroscopic moment.” In: Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009.
- [37] Bracco G., Giorcelli E., Mattiazzo G., “ISWEC: a gyroscopic mechanism for wave power exploitation.” *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 46, No. 10, pp. 1411–1424, 2011.
- [38] Ogai S., Umeda S., Ishida H.. “An experimental study of compressed air generation using a pendulum wave energy converter.” *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, No. 5, pp. 290–295, 2010.
- [39] Schlemmer K., Fuchshumer F., Böhmer N., Costello R., Villegas C.. “Design and control of a hydraulic power take-off for an axisymmetric heaving point absorber.” In: Proceedings of European Wave and Tidal Energy Conference. Southampton, UK, 2011.
- [40] Lin Y. G., Tu L., Zhang D. H., Liu H. W., Li W.. “A study on dual-stroke pendulum wave energy conversion technology based on a water/oil integrated transmission system.” *Ocean Engineering*, Vol. 67, pp. 27–34, 2013.
- [41] McCabe A. P., Bradshaw A., Meadowcroft J. A. C., Aggidis G., “Developments in the design of the PS Frog Mk 5 wave energy converter.” *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 2, pp. 141–151, 2006.
- [42] Mekhiche M., Edwards K. A., “Ocean power technologies power buoy: system-level design, development and validation methodology.” In: Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium, Seattle, WA, 2014.
- [43] Salter S., “Pelamis wave.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.power-technology.com/projects/pelamis/>
- [44] Elbae L., “Dexawave blue ocean energy.” Accessed on 10 December 2013; <http://www.dexawave.com/converters.html>
- [45] Grey S., “AWS Ocean.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.awsocan.com/technology.aspx>
- [46] Smith A., “Searaser.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.ecotricity.co.uk>
- [47] Valério D., Beirão P., Sá da Costa J.. “Optimisation of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing.” *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 17–18, pp. 2330–2344, 2007.
- oscillating in two modes.” *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 150–160, 2013.
- [23] Simply Blue Energy. “WEC with reference frame.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.simplyblueenergy.com>
- [24] Berggren L., Johansson M., “Hydrodynamic coefficients of a wave energy device consisting of a buoy and a submerged plate.” *Applied Ocean Research*, Vol. 14, No. 1, pp. 51–58, 1992.
- [25] Columbia Power Technologies, Inc. “Manta WEC.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.columbiapwr.com>
- [26] Beatty S. J., “Analysis and development of a three body heaving wave energy converter.” Dissertation for the Bachelor’s Degree. University of British Columbia, Vancouver, 2003.
- [27] Orazov B., O’Reilly O. M., Savaş Ö., “On the dynamics of a novel ocean wave energy converter.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 24, pp. 5058–5069, 2010.
- [28] Amarkarthik A., Chandrasekaran S., Sivakumar K., Sinhmar H., “electrical energy from water waves.” *Frontiers in Energy*, Vol. 6, No. 4, pp. 361–365, 2012.
- [29] Faizal M., Ahmed M. R., Lee Y. H., “A design outline for floating point absorber wave energy converters.” *Advances in Mechanical Engineering*, pp. 1–18, 2014.
- [30] Neils S. E., Hansen K., “Heave type wave energy converter.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.wavestarenergy.com>
- [31] “Wave Roller.” Extracted from web site. Accessed on 11 December 2013; <http://www.awenergy.com/>
- [32] BioPower Systems. “Sway type WEC.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.biopowersystems.com/>
- [33] Sustainable Energy Research Group, University of Southampton. “Anaconda wave energy converter.” Accessed on 11 December 2013; <http://www.energy.soton.ac.uk/>
- [34] Dalton G. J., Alcorn R., Lewis T.. “Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America.” *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 443–455, 2010.
- [35] Hazlett B., Incullet I., Incullet D.. “Electric power generation by ‘Surfing’ water waves.” *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 11, pp. 2510–2514, 2009.
- [36] Kanki H., Arii S., Furusawa T., Otoyoto T., “Development of advanced wave power