

مروری بر برداشت‌کننده‌های انرژی دریایی مبتنی بر مبدل پیزوالکتریک

سیده فاطمه نبوی، انوشیروان فرشیدیان فر*، عارف افشارفرد

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*مسئول مکاتبات: farshid@um.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

برداشت انرژی دریایی
برداشت‌کننده امواج دریا
دریافت‌کننده
مبدل
مبدل پیزوالکتریک

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۶/۲۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۱۳

با توجه به تقاضای روزافزون بشر به انرژی، مطالعات بسیاری در حوزه برداشت انرژی متمرکز شده‌اند. هدف اصلی این تحقیقات، تولید انرژی از منابع محیط اطراف است. با توجه به اینکه ۷۰ درصد سطح کره زمین را اقیانوس‌ها و دریاها فراگرفته‌اند، انرژی دریایی یکی از پراده‌ترین منابع در این حوزه به حساب می‌آید. این منبع، پاک، بدون پسماند و در دسترس است. در عین حال چگالی بزرگتری نسبت به سایر همتایان خود (باد و خورشید) دارد. با توجه به این مزایا، در مطالعه حاضر روش‌های برداشت انرژی از انرژی دریایی ارائه خواهد شد. برداشت‌کننده‌های دریایی مطابق با نوع بهره‌برداری از منابع دریا و محل قرارگیری آن طبقه‌بندی و معرفی می‌شوند. بیان خواهد شد که برداشت‌کننده‌های امواج دریایی از دو قسمت دریافت‌کننده و مبدل تشکیل می‌شوند. هر یک از این قسمت‌ها و انواع آن با جزئیات، ارائه و بررسی خواهد شد. در نهایت، پژوهش‌های مرتبط با مهم‌ترین مبدل یعنی مبدل پیزوالکتریک معرفی می‌شود.

۱ مقدمه

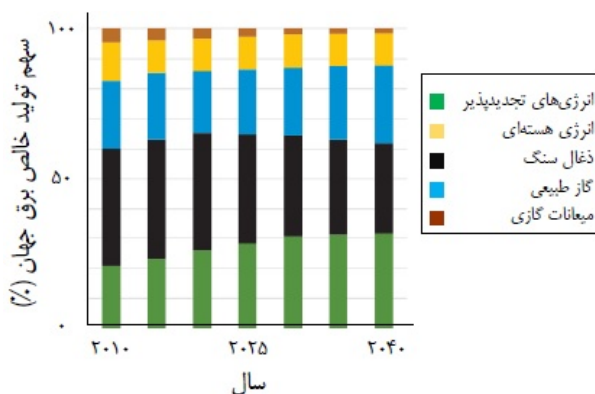
آن رشد اقتصادی نوسانی است. همچنین، رشد جمعیت نیز به نوعی، تقاضا برای انرژی را افزایش می‌دهد. همزمان با افزایش نیاز به انرژی، توان تولیدی منابع نیز در حال رشد است [۱].

شکل ۱ منابع مختلف تأمین‌کننده برق جهان و درصد خالص آن تا سال ۲۰۴۰ را مطابق پیش‌بینی گزارش سازمان انرژی ایالات متحده در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد [۱].

باتوجه به گزارش سازمان انرژی ایالات متحده^۱ در سال ۲۰۱۷، پیش‌بینی می‌شود نیاز جهانی به انرژی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۰، ۲۸ درصد افزایش یابد [۱]. به منظور درک بهتر میزان نیاز به انرژی، نمونه‌هایی از انرژی مورد نیاز لوازم خانگی که هرروزه با آن سروکار داریم، در جدول ۱ جمع‌آوری شده‌است.

جدول ۱: برخی از لوازم خانگی و انرژی مورد نیاز آن‌ها [۲]

انرژی مورد نیاز (Watt)	لوازم خانگی
۱۸۰۰-۱۰۰	اتو
۱۳۳-۶۵	تلویزیون ۱۹ تا ۳۶ اینچی
۱۷۰	تلویزیون ۵۳ تا ۶۱ اینچی
۱۴۰۰-۸۰۰	دستگاه تستر
۱۱۰۰-۷۵۰	دستگاه مایکروویو
۱۸۷۵-۱۲۰۰	سشوار
۱۲۰۰-۹۰۰	قهوه‌ساز



شکل ۱: سهم تولید خالص برق منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، هسته‌ای، ذغال سنگ، گاز طبیعی و میعانات گازی مطابق پیش‌بینی سازمان انرژی ایالات متحده در سال ۲۰۱۷ [۱]

از میان منابع مختلف شکل ۱، یکی از منابع در حال رشد انرژی‌های تجدیدپذیر است. بنابر این نمودار، این منبع در مقایسه با منابعی چون انرژی هسته‌ای، ذغال سنگ و میعانات گازی رشد چشمگیری دارد. تنها رقیب انرژی تجدیدپذیر در حوزه سهم تولید خالص برق، گاز طبیعی است؛ که با توجه به آلودگی و محدود بودن این منبع، به نظر رقیب چندان جدی

باتوجه به جدول ۱، مشاهده می‌شود که برای ساده‌ترین لوازم خانگی به میزان قابل توجهی انرژی الکتریکی نیاز است. برای درک موضوع، میز ناهار را در یک روز تعطیل تصور کنید. روشن بودن تلویزیون برای فضای پس‌زمینه ناهار، به نظر امری عادی می‌آید که چنانچه این زمان نیم ساعت به درازا بکشد برای تلویزیون ۵۳ اینچی تقریباً ۱۵۳ کیلوژول انرژی نیاز است. مطابق با جدول ۱، به راحتی می‌توان میزان مصرف خانگی انرژی الکتریکی را برای سایر لوازم خانگی محاسبه کرد و میزان برق مورد نیاز را بدست آورد. باتوجه به گزارش مذکور، انتظار می‌رود که بیشترین افزایش تقاضای انرژی از کشورهای غیر عضو سازمان اقتصاد و توسعه^۲ نظیر ایران باشد که در

¹U.S. Energy Information Administration (EIA) ²Organization of Economic Cooperation and Development (OECD)

برداشت‌کننده‌های دریایی مرتبط با بهترین مبدل یعنی پیزوالکتریکی ارائه و بررسی خواهد شد.

۲ مزایا و چالش‌های انرژی دریایی

باتوجه به آنچه در قسمت قبل ذکر شد، انرژی دریایی که شکلی از انرژی آبی است یکی از قدرتمندترین منابع انرژی تجدیدپذیر به حساب می‌آید. در ادامه برخی از مزایای دیگر انرژی دریایی بیان خواهد شد:

- چگالی انرژی دریایی حدود ۲ تا ۳ کیلووات بر مترمربع بوده که بزرگتر از چگالی انرژی باد (۰/۴ تا ۰/۶ کیلووات بر مترمربع) و چگالی انرژی خورشیدی (۰/۱ تا ۰/۲ کیلووات بر مترمربع) است [۳].
- امواج دریا می‌توانند مسافت زیادی را با تلفات کم طی کنند [۴].
- برای درک این موضوع می‌توان به طوفان‌های دریایی توجه کرد که هر روزه در اخبار هواشناسی گزارش می‌شود. مسافت بین شروع طوفان دریایی و محل‌هایی که از آن عبور می‌کنند طولانی بوده که این حاکی از تلفات کم انرژی امواج دریا است.
- مطابق گزارش دکتر جورج تیلور^۲ رئیس مرکز تکنولوژی توان دریایی^۳ در سال ۲۰۰۲، سیستم‌های امواج دریایی این توانایی را دارند که ۹۰ درصد زمان شبانه‌روز انرژی الکتریکی تولید کنند. این درحالیست که انرژی باد و خورشید در بهترین حالت ۲۰ تا ۳۰ درصد کارایی دارند [۵، ۶].

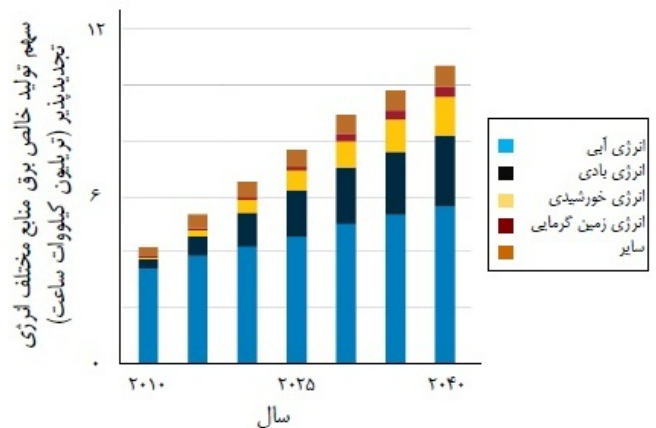
- تناسب خوبی بین منبع انرژی دریایی و تقاضا وجود دارد. چراکه حدود ۳۷ درصد جمعیت دنیا در ۹۰ کیلومتری ساحل زندگی می‌کنند [۳].

توجه به مزایای بیان‌شده، مانند هر پدیده‌ای در جهان، انرژی دریایی نیز با چالش‌هایی روبه‌رو است. در ادامه برخی از این چالش‌ها ارائه می‌شود که برای پیشرفت سیستم‌های انرژی دریایی، باید به آن‌ها غلبه کرد:

- فرکانس امواج دریا عمدتاً پایین (کمتر از ۱ تا ۲ هرتز) است. تبدیل این فرکانس به فرکانس ژنراتور ۵۰ هرتزی به گونه‌ای که خروجی مناسب تولید کند برای برداشت‌کننده‌های دریایی چالش محسوب می‌شود [۳، ۴].
- جهت امواج دریا دور از ساحل متفاوت است که برای حل این موضوع باید سیستمی ارائه شود که بتواند در جهات مختلف انرژی دریافت کند [۴، ۷].
- همچنین در طراحی سیستم‌های برداشت‌کننده باید دقت شود که طراحی به‌گونه‌ای انجام شود که آسیب به آبزیان و مناظر دریایی حداقل باشد. این نکته نیز یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در طراحی سیستم‌های برداشت‌کننده دریایی به حساب می‌آید.
- با توجه به چالش‌ها و مزایا، در ادامه مطالعات گوناگونی بیان خواهد شد که در حوزه برداشت انرژی امواج دریا، سعی در ارائه راه‌حل برای چالش‌ها و استفاده از مزایای این انرژی کرده‌اند. در این راستا، نخست اجازه دهید مقدمه‌ای بر برداشت انرژی ارائه شود.

نخواهد بود. انرژی‌های تجدیدپذیر به دلایلی نظیر دوستدار محیط‌زیست بودن، ارزان‌قیمت بودن و دسترسی آسان، توجه محققان و سیاستمداران زیادی را به خود جلب کرده‌است.

منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار گسترده هستند. این گستردگی فضای زیادی از محیط اطراف را فرا می‌گیرد. به طوریکه از هر حرکتی می‌توان انرژی تولید کرد و آن را در چهارچوب انرژی تجدیدپذیر قرار داد. اما به طور کلی منابع انرژی تجدیدپذیر برجسته، از نگاه سازمان انرژی ایالات متحده به پنج دسته کلی: انرژی آبی، بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی^۱ و سایر تقسیم‌بندی می‌شود. شکل ۲ میزان سالانه برق تولیدی این منابع را تا سال ۲۰۴۰ بر حسب تریلیون کیلووات‌ساعت نشان می‌دهد [۱].



شکل ۲: سهم تولید خالص برق مختلف انرژی تجدیدپذیر از جمله آبی، بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی و سایر برحسب تریلیون کیلووات ساعت بنا بر پیش‌بینی سازمان انرژی ایالات متحده در سال ۲۰۱۷ [۱]

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود تولید خالص برق منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۴۰ رو به افزایش است. در این میان یکی از پراستادترین منابع، انرژی آبی است. به طوریکه مطابق نمودار شکل ۲ پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ حدود ۵/۹ تریلیون کیلووات ساعت انرژی الکتریکی (۵۳ درصد برق تولیدی از انرژی تجدیدپذیر) را بتوان از این منبع تولید کرد [۱]. رتبه دوم در این رده‌بندی مربوط به انرژی بادی است. دقت شود که برای بهره‌گیری از انرژی باد نیاز به سرعت مناسب هست. به علاوه، انرژی باد نیازمند محیط وسیعی است که به مناظر طبیعی آسیب وارد می‌کند. انرژی خورشیدی نیز نیازمند زاویه تابش مناسب خورشید است که برای این منبع محدودیت به حساب می‌آید.

همچنین، انرژی زمین‌گرمایی بسترسازی‌های خاص خود را می‌طلبد که این امر هزینه‌بر است. بنابراین منطقی است که انرژی آبی یا دریایی قدرتمندترین انرژی در حوزه منابع انرژی تجدیدپذیر باشد. در ادامه نخست مزایا و چالش‌های انرژی دریایی معرفی خواهد شد. در قسمت سوم مقدمه‌ای بر برداشت انرژی ارائه می‌شود. سپس، برداشت‌کننده‌های دریایی مطابق نوع بهره‌برداری از منابع دریایی و محل قرارگیری طبقه‌بندی شده و بررسی خواهد شد. با توجه به اینکه برداشت‌کننده‌های دریایی شامل دریافت‌کننده و مبدل هستند، هر یک از اجزا و انواع آن به دقت ارائه می‌شود. در بخش پنجم نیز پژوهش‌های پیشین

¹Geothermal ²Dr. George Taylor ³Ocean Power Technology (OPT)

۳ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی

تاریخچه برداشت انرژی به آسیاب‌های بادی^۱ بازمی‌گردد که نخستین طراحی آن‌ها را به ایرانیان نسبت داده‌اند [۸، ۹]. با این وجود، برخی مراجع شروع جدی برداشت انرژی را پروژه مرکز تحقیقاتی پروژه‌های پیشرفته دفاعی^۲ آمریکا می‌دانند [۱۰، ۱۱]. در این پروژه، هدف جمع‌آوری انرژی ناشی از حرکات پوتین‌های سربازان در میدان نبرد بود. این ایده، سرآغازی برحوزه جدیدی از علم بود که بعدها آن را برداشت انرژی نامیدند.

در عصر حاضر، با توجه به افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی و اشتباهی شگفت‌انگیز بشر به انرژی، برداشت انرژی یکی از موضوعات روز دنیا برای محققان و پژوهشگران به حساب می‌آید. در برداشت انرژی، هدف جمع‌آوری انرژی‌هایی است که به راحتی در محیط اطراف هدر می‌روند. منابع این علم بسیار گسترده هستند. دریافت انرژی از نوسانات کوله‌پشتی [۱۲]، حرکت انسان [۱۳]، نوسانات جاده و پل [۱۴]، نمونه‌های جذابی از ابتکار در حوزه برداشت انرژی از محیط پیرامون است.

دنیای برداشت انرژی در حوزه جسم انسان نیز جالب است. از راه رفتن [۱۵]، حرکت انگشتان دست و بازوها [۱۶]، ضربان قلب [۱۷] و نفس کشیدن [۱۸] انسان می‌توان انرژی الکتریکی بدست آورد. به منظور درک گستردگی حوزه این علم، همین بس که محققان از بال هواپیما [۱۹]، تایرخوردو [۲۰] و حتی سروصدای محیط پیرامونمان [۲۱] می‌توانند انرژی الکتریکی دریافت کنند.

گویی این علم وظیفه جمع‌آوری و یکسان‌سازی تمامی انرژی‌هایی که در گوشه کنار محیط در حال هدررفتن است را به عهده دارد. در این میان، یکی از وفادارترین منابع، انرژی امواج دریاست. چراکه در طول روز، این منبع ساعات مفید بیشتری نسبت به سایر منابع نظیر خورشید و باد دارد. برای درک بهتر میزان و گستردگی انرژی امواج دریای کره زمین به شکل ۳ توجه کنید [۲۲].

شکل ۳، میانگین قدرت سالانه امواج (kW/m) را نشان می‌دهد که در طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ اندازه‌گیری شده‌است. این داده‌ها بر اساس بویه‌ها و ماهواره‌ها اندازه‌گیری شده‌اند.

مطابق شکل ۳، گستردگی و میزان قدرت امواج دریایی درک می‌شود. بدین ترتیب منطقی است که مطالعات بسیاری بر امواج دریا و نحوه برداشت انرژی از این منبع، متمرکز شوند.

۴ طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های دریایی

با توجه به جامعیت و گستردگی مطالعات پیشین در حوزه برداشت‌کننده‌های دریایی، در ادامه طبقه‌بندی آن‌ها از دیدگاه‌های مختلف ارائه خواهد شد.

۱.۴ طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های دریایی مطابق نوع بهره‌برداری از منابع دریایی

در یک دیدگاه کلی برداشت‌کننده‌های دریایی را می‌توان مطابق با نوع بهره‌برداری آن‌ها از دریا، به انرژی گرمایی، انرژی جذرومدی^۳ سازه‌های شناور بادی^۴ و انرژی امواج دسته‌بندی کرد [۵]. در شکل ۴ نمونه‌ای از هرکدام از برداشت‌کننده‌ها ارائه شده‌است.

نمونه‌ای آزمایشگاهی از برداشت‌کننده‌های انرژی گرمایی که از تکنولوژی‌های مربوط به زمین‌گرمایی دریا استفاده می‌کنند در قسمت الف شکل ۴ نشان داده شده‌است [۲۳]. این دستگاه با نام OC-OTEC^۵ در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۸ برای دریافت ۲۱۰ کیلووات انرژی طراحی شده‌بود. لازم به ذکر است که در طراحی، دمای گرم و سرد به ترتیب ۲۶ و ۶ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

به دلیل جذرومد، امواجی حاصل می‌شود که امکان برداشت انرژی از آن‌ها در برخی مطالعات بررسی شده‌است [۲۷]. توربین جریان آزاد^۶، نمونه‌ای از برداشت‌کننده جذرومدی است که در قسمت ب شکل ۴ نشان داده شده‌است. نمونه اولیه این دستگاه در سال ۲۰۰۸، به قطر پره ۴/۶۸ متر ساخته و آزمایش شد. نتیجه آزمایش تولید ۱ مگاوات انرژی الکتریکی تولیدی روزانه بود^۷ [۲۴].



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴: برداشت‌کننده‌های دریایی ناشی از انرژی، الف) گرمایی [۲۳]، ب) جذرومدی [۲۴]، ج) سازه‌های شناور بادی [۲۵] و د) امواج [۲۶]

به منظور دریافت انرژی باد در سطح دریا، از سازه‌های شناور استفاده

¹Windmills

²Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)

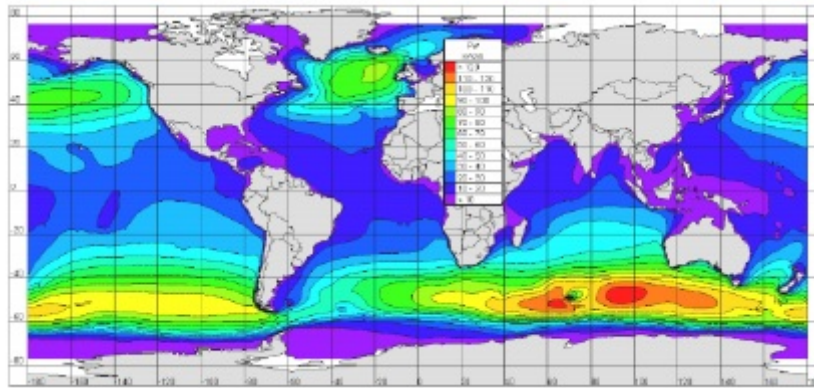
³Tidal

⁴Off-shore wind structure

⁵Open Cycle Ocean Thermal Energy Conversion (OC-OTEC)، در مراجع، از منبع انرژی گرمایی دریا با عنوان Ocean Thermal Energy Conversion یا OTEC یاد می‌کنند.

⁶Free flow turbine

^۷ سازنده این دستگاه، به دلیل اختراع خود توانست قراردادی به ارزش ۱/۱۵ میلیون دلار از دولت کانادا دریافت کند.



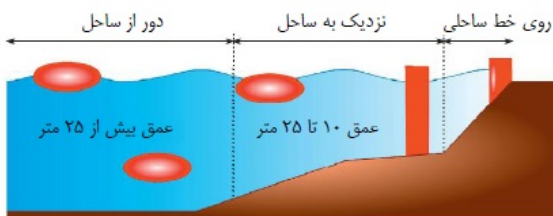
شکل ۳: برآورد میانگین قدرت امواج سالانه دریایی (kW/m)، اندازه‌گیری شده از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ [۲۲]

می‌شود. برای درک چگونگی می‌توان به مقالات مروری [۲۸، ۲۹] مراجعه کرد. قسمت ج شکل ۴ پروژه ۳ کیلومتری که در سال ۲۰۰۱ در دانمارک انجام شد را نشان می‌دهد. هدف پروژه میدل‌گاردن^۱ تولید ۴۰ مگاوات انرژی الکتریکی بود. در آن زمان، این پروژه بزرگ‌ترین مزرعه سازه‌های شناور بادی به حساب می‌آمد [۲۵]. انرژی ناشی از امواج دریا به دلیل توان خروجی بالا، یکی از پرمفردترین حوزه‌های برداشت انرژی دریایی به حساب می‌آید [۵].

یک نمونه ساده از برداشت‌کننده امواج دریا با نام تجاری لیمپت^۲ در قسمت د شکل ۴ نشان داده شده‌است. آزمایش‌های سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ بر روی این دستگاه حاکی از توان تولیدی بیشینه ۵۰۰ کیلووات بود. لازم به ذکر است این دستگاه با قطر توربین ۲/۶ متری در جزیره آیلی^۳ در غرب اسکاتلند آزمایش شد [۳۰].

۲.۴ طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های امواج دریا مطابق محل قرارگیری

با توجه به محل قرارگیری، برداشت‌کننده‌های امواج دریا را می‌توان به سه دسته کلی روی خط ساحلی، نزدیک به ساحل و دور از ساحل دسته‌بندی کرد [۳، ۴، ۳۱]. نمای شماتیک این تقسیم‌بندی که مطابق با عمق دریا و فاصله از ساحل سنجیده می‌شود در شکل ۵ نشان داده شده‌است [۳].



شکل ۵: نمای شماتیک تقسیم‌بندی مناطق ساحلی بر مبنای فاصله از ساحل [۳]

با توجه به تقسیم‌بندی شکل ۵، برداشت‌کننده‌های امواج دریایی متفاوتی طی سال‌های اخیر ارائه شده‌است. لازم به ذکر است از دیدگاه دیگری می‌توان برداشت‌کننده‌های امواج را متناسب با عمق به سه دسته کم عمق^۴، نیمه عمیق^۵ و عمیق^۶ نیز تقسیم‌بندی کرد. در ادامه هر یک از این برداشت‌کننده‌ها به طور خلاصه معرفی شده و مزایا و چالش‌های آن مطرح می‌شود.

با توجه به تنوع روش‌های دریافت انرژی از دریا، در انتخاب نحوه استفاده باید دقت کرد. در جدول ۲ خلاصه‌ای از مشخصات دستگاه‌های مرتبط با هر یک از روش‌های بهره‌برداری از انرژی دریا جمع‌آوری شده‌است. با توجه به قدرت خروجی، روش سازه‌های شناور بادی روشی کارآمد و بهینه به نظر می‌رسد. با این وجود، در کنار ابعاد بزرگ موردنیاز و آلودگی صوتی، هزینه ساخت زیادی می‌طلبد. به علاوه هزینه نگهداری توربین‌های باد در کنار دور از دسترس بودن آن‌ها، یکی دیگر از مشکلات این روش است.

توربین جریان آزاد نیز برای آبزیان مضر است. به علاوه این روش تنها در زمان‌های خاص کارایی دارد. همچنین، برای انتقال برق نیاز به هزینه و زیرساخت‌های مربوطه است. این مشکل برای برداشت‌کننده OC-OTEC نیز وجود دارد. چرا که با توجه به قسمت الف شکل ۴ فضای زیادی از ساحل اشغال شده و در نتیجه به مناظر طبیعی آسیب وارد می‌کند.

انرژی امواج دریا همیشه در دسترس بوده و متناسب با محل استفاده، در ابعاد مختلف می‌تواند طراحی شود. در کنار این مزایا، توان خروجی انرژی امواج دریا بسیار چشمگیر است. مطابق جدول ۲، مشاهده می‌شود که لیمپت در فضای اشغالی کم، قدرت خروجی قابل توجهی را فراهم می‌کند. با توجه به این دلایل، امواج دریا نسبت به سایر منابع دیگر دریا بیشتر مورد توجه بوده‌است. به طوریکه در سال‌های اخیر، برداشت‌کننده‌های امواج دریایی

۱.۲.۴ برداشت‌کننده‌های امواج دریایی روی خط ساحل

برداشت‌کننده‌های روی خط ساحلی عموماً در ساحل یا در حاشیه ساحلی در قالب موج‌شکن به صورت سد یا قسمتی متصل به صخره نصب می‌شوند [۳]. به عبارت دیگر، معمولاً این برداشت‌کننده‌ها متصل به ساحل هستند [۳۱]. این سیستم‌ها می‌توانند به بستر دریا نیز متصل شوند و بنابر این توضیح، در ناحیه امواج کم عمق قرار می‌گیرند [۷]. مزیت اصلی این برداشت‌کننده‌ها تعمیر، نگهداری و نصب آسان است. چراکه در اغلب موارد

¹Middelgarden ²Land Installed Marine Power Energy Transmitter (LIMPET) ³Isle of Islay ⁴Shallow water ⁵Moderate water ⁶Deep water

جدول ۲: روش‌های مختلف بهره‌برداری از انرژی دریا و مشخصات دستگاه‌ها

نام دستگاه	محل	نوع منبع	سال آغاز	ابعاد	قدرت خروجی	مرجع
OC-OTEC	هاوایی، ایالات متحده	گرمایی	۱۹۹۳	-	۲۱۰ kW	[۲۳]
توربین جریان آزاد	نیویورک، ایالات متحده	جذرومدی	۲۰۰۸	۴/۶۸ متر	۱ MWh	[۲۴]
میدل‌گاردن	کپنهاگ، دانمارک	سازه شناور بادی	۲۰۰۱	۳ کیلومتر	۴۰ MW	[۲۵]
لیمپت	جزیره آیلی، اسکاتلند	امواج	۱۹۹۸	۲/۶ متر	۵۰۰ kW	[۳۰]

بهرتر، مطالب ارائه‌شده به طور خلاصه در جدول ۳ قرار داده شده‌است. با توجه به جدول ۳، چنانچه توان خروجی مدنظر باشد، به نظر برداشت‌کننده‌های دور از ساحل به دلیل چگالی زیاد انرژی امواج، گزینه مناسبی خواهند بود. با این وجود، این سیستم‌ها با توجه به دور بودن از ساحل، نیاز به خطوط انتقال قدرت داشته که این مسأله هزینه ساخت را افزایش می‌دهد.

به علاوه، با توجه به افزایش انرژی امواج در این نقاط، این سیستم‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در شرایط طوفانی نیز پایدار بمانند که این امر مستلزم ملاحظات طراحی است. در این راستا مطابق جدول ۳، به نظر برداشت‌کننده‌های روی خط ساحلی گزینه بهتری باشند. نظر به نزدیکی این سیستم‌ها به ساحل، علاوه بر عدم نیاز به خطوط انتقال قدرت پیچیده، با توجه به کاهش چگالی انرژی امواج، نیاز به ملاحظات طراحی در زمینه پایداری وجود ندارد. از طرفی، مشکل برداشت‌کننده‌های دریایی نزدیک ساحل، فضای اشغالی زیاد و آسیب به منظره ساحل و توان خروجی کم است.

در این بین، برداشت‌کننده نزدیک ساحل در عین تکمیل کردن برخی نقص‌های دو نوع برداشت‌کننده دیگر، برخی نقاط قوت آن‌ها را نیز تضعیف می‌کند. به عنوان مثال این برداشت‌کننده‌ها، توان خروجی متوسط رو به پایین داشته و تا حدودی بنابر فاصله از ساحل، نیاز به خطوط انتقال قدرت دارد. گویی این برداشت‌کننده، سطح متوسط دو نوع دیگر است که بنابر نیاز روزافزون بشر به انرژی گزینه خط خورده به حساب می‌آید.

در مرحله بعدی، جزئیات برداشت‌کننده بررسی خواهد شد. برداشت‌کننده دریایی شامل دو جزء کلی دریافت‌کننده و مبدل است که هر جز انواع مختلفی دارد. به تناسب این گستردگی، در ادامه طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های امواج دریا بر مبنای دریافت‌کننده و مبدل ارائه خواهد شد.

۳.۴ طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های امواج دریا مطابق با نوع دریافت‌کننده

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های برداشت‌کننده امواج دریا، دریافت‌کننده است. این جز وظیفه جمع‌آوری امواج را به عهده دارد. سه نوع دریافت‌کننده شامل تضعیف‌کننده^۱، جاذب نقطه‌ای^۲ و ترمیناتور^۳ برای برداشت‌کننده‌های امواج دریا ارائه شده‌است [۷، ۳]. در ادامه هر یک از آن‌ها معرفی خواهند شد.

۱.۳.۴ دریافت‌کننده تضعیف‌کننده

طول این شکل از دریافت‌کننده‌ها نسبت به طول موج محل استقرار، بسیار بزرگ است. همچنین، این دریافت‌کننده‌ها معمولاً موازی موج ورودی نصب

این برداشت‌کننده‌ها در محل‌های قابل دسترس نصب می‌شوند. همچنین، با توجه به نزدیکی این سیستم‌ها به اماکن مسکونی، نیاز به سیستم انتقال قدرت و شبکه پیچیده وجود ندارد.

در مقابل در ساحل امواج، انرژی کمتری دارند [۳۱]. یکی از دلایل این امر، تداخل امواج با بستر دریا است. همچنین، موج مسیر طولانی را از محل تولید می‌پیماید تا به ساحل برسد. حتی با وجود میرایی کم امواج دریا، باز هم به هرحال بخشی از انرژی امواج تا به ساحل برسند، میرا می‌شود. در کنار همه این‌ها، این برداشت‌کننده‌ها معمولاً فضای زیادی اشغال می‌کنند و این امر می‌تواند اثرات منفی بر چهره محیط‌زیست داشته‌باشد [۳، ۴، ۷]. در قسمت بعد برداشت‌کننده‌های دریایی نزدیک ساحل ارائه خواهد شد.

۲.۲.۴ برداشت‌کننده‌های امواج دریای نزدیک به ساحل

این شکل از برداشت‌کننده‌ها به فاصله چندصد کیلومتری از ساحل و ناحیه نیمه‌عمیق (با توجه به مرجع [۳]، ۱۰ تا ۲۵ متر و با توجه به مرجع [۳۱] کمتر از ۲۰ متر عمق) قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها معمولاً با استفاده از لنگر به بستر دریا متصل می‌شوند. بنابراین، در طراحی آن باید دقت شود که سیستم باید تنش‌های حاصل از برخورد امواج با سازه را تحمل کند [۳]. به علاوه، اتصال به بستر دریا بخشی از انرژی امواج را می‌گیرد. همانند برداشت‌کننده‌های روی خط ساحل، در این برداشت‌کننده‌ها هم به دلیل قرارگیری در ناحیه نیمه‌عمیق انرژی امواج کم است [۴]. در قسمت بعدی برداشت‌کننده‌های امواج دریای نزدیک به ساحل ارائه و بررسی خواهد شد.

۳.۲.۴ برداشت‌کننده‌های امواج دریای دور از ساحل

این برداشت‌کننده‌ها در ناحیه عمیق (عمق بیشتر از ۲۵ متر)، استفاده می‌شوند. معمولاً به صورت شناور یا در زیرسطح دریا هستند. لازم به ذکر است، این سیستم‌ها با توجه به اینکه در محل قرارگیری آن‌ها انرژی امواج بالاست، خروجی الکتریکی بالایی دارند. اما دقت می‌شود که این انرژی امواج می‌تواند تأثیر منفی بر سیستم بگذارد. چراکه انرژی امواج عاملی تهدیدکننده برای سیستم به حساب می‌آید و باید در طراحی، پایداری آن‌ها را در نظر گرفت [۳، ۴، ۳۱]. با توجه به آنچه بیان شد، در قسمت بعد به منظور درک کامل، جمع‌بندی انواع برداشت‌کننده‌های امواج دریا به اقتضای محل قرارگیری، ارائه خواهد شد.

۴.۲.۴ جمع‌بندی برداشت‌کننده‌های امواج دریا مطابق محل قرارگیری

با توجه به مطالب پیشین، تا حدودی مفهوم برداشت‌کننده‌های امواج دریای مستقر در ساحل، نزدیک و دور از ساحل مشخص شد. به منظور تصمیم‌گیری

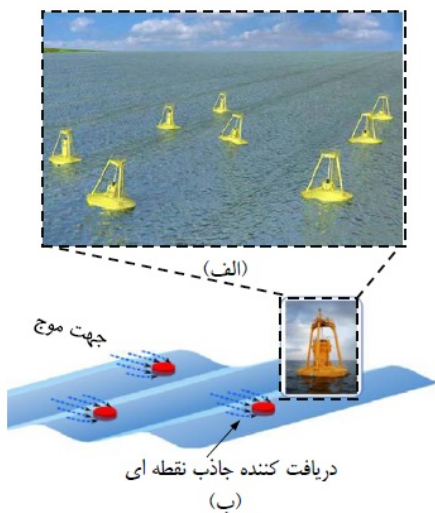
¹Attenuator ²Point absorber ³Terminator

جدول ۳: مقایسه برداشت‌کننده‌های امواج دریا مطابق محل قرارگیری

نوع برداشت‌کننده ← پارامتر مورد بررسی ↓	روی خط ساحل	نزدیک ساحل	دور از ساحل
عمق	کمتر از ۱۰ متر	۱۰ تا ۲۵ متر	بیشتر از ۲۵ متر
اثرات محیط‌زیستی	زیاد	متوسط	کم
چگالی انرژی امواج	کم	متوسط	زیاد
ملاحظات طراحی	کم	متوسط	متوسط
نیاز به خطوط انتقال قدرت	ناچیز	متوسط	متوسط

و برگشتی (ارتعاشات) و حرکت چرخش جسم شناور بر آب، انرژی دریافت می‌کنند [۳، ۴، ۳۲]. سیستم‌های دارای این شکل از دریافت‌کننده معمولاً یا در سطح آب شناور هستند یا به بستر دریا لنگر شده‌اند [۷]. بویه‌های شناور^۲ نمونه‌ای از این دریافت‌کننده، در شکل ۷ نشان داده شده‌است.

با توجه به قسمت الف شکل ۷، بویه‌ها شناور بر آب هستند. مطابق قسمت ب شکل ۷ مشاهده می‌شود که با گذر موج از این برداشت‌کننده‌ها نوعی حرکت نوسانی وارد می‌شود. در نتیجه حرکت نوسانی، این دریافت‌کننده‌ها امواج را جمع‌آوری کرده و سیستم مربوطه آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. چنانچه این برداشت‌کننده‌ها در ناحیه عمیق نصب شوند، با توجه به بالا بودن چگالی امواج، توان خروجی قابل توجه خواهد بود. در مقابل، فرکانس پایین امواج دریا یکی از چالش‌های ارتعاشاتی برای این نوع از دریافت‌کننده‌ها به حساب می‌آید. همچنین، به دلیل دور بودن بویه‌ها از سطح ساحل، نیاز به خطوط انتقال قدرت وجود دارد. در قسمت بعد دریافت‌کننده ترمیناتور ارائه خواهد شد.

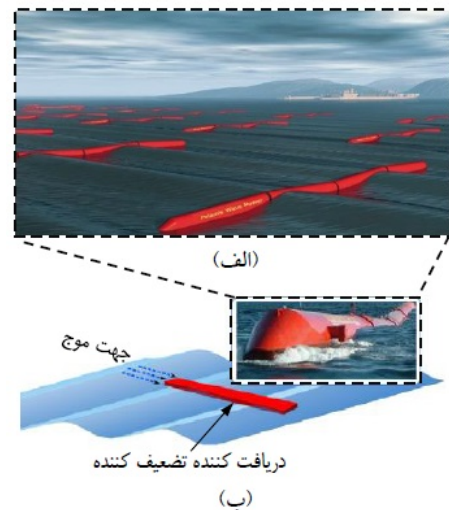


شکل ۷: دریافت‌کننده جاذب نقطه‌ای؛ الف) بویه [۴] و ب) محل قرارگیری آن نسبت به امواج [۳]

۳.۳.۴ دریافت‌کننده ترمیناتور

از نظر ابعادی، دریافت‌کننده ترمیناتور مانند دریافت‌کننده تضعیف‌کننده بوده و به همان میزان طویل است. تنها تفاوت دریافت‌کننده ترمیناتور قرارگیری آن نسبت به جهت امواج است. بُعد طویل این شکل از دریافت‌کننده، عمود بر جهت امواج نصب می‌شوند [۳، ۴]. برخلاف دریافت‌کننده جاذب نقطه‌ای که

می‌شوند. بدین ترتیب این دریافت‌کننده‌ها اندازه موج را تضعیف می‌کنند. این دریافت‌کننده‌ها عموماً به صورت مجموعه‌ای از استوانه‌های متصل به هم اجازه جابه‌جایی و چرخش اجزا نسبت به یکدیگر را می‌دهند [۳، ۴، ۳۲]. لازم به ذکر است این دریافت‌کننده در مقایسه با ترمیناتور، فضای کمتری اشغال می‌کند [۷]. پلامیس^۱، نمونه‌ای از این دریافت‌کننده، در شکل ۶ نشان داده شده‌است [۳].



شکل ۶: دریافت‌کننده تضعیف‌کننده الف) پلامیس [۳۳] و ب) محل قرارگیری آن نسبت به امواج [۳]

با توجه به قسمت الف شکل ۶ برداشت‌کننده‌های پلامیس می‌توانند موازی با یکدیگر نصب شوند. مطابق قسمت ب شکل ۶، دریافت‌کننده تضعیف‌کننده، شناور بر سطح آب قرار می‌گیرد. به طوریکه با عبور موج از استوانه‌های متصل، این استوانه‌ها نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند. با این حرکات نسبی، انرژی امواج جمع‌آوری شده و در سیستم مربوطه به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. یکی از مشکلات این نوع از دریافت‌کننده‌ها کارایی تک‌جهته آن‌هاست. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که اگر جهت امواج تغییر کند، انرژی امواج دریافت نشده و در نتیجه انرژی تولید نمی‌شود. در قسمت بعد دریافت‌کننده جاذب نقطه‌ای ارائه خواهد شد.

۲.۳.۴ دریافت‌کننده جاذب نقطه‌ای

در مقایسه با دریافت‌کننده‌های تضعیف‌کننده، جاذب نقطه‌ای طول کوچک‌تری دارد. قطر سطح مقطع این دریافت‌کننده‌ها کوچکتر از طول موج دریا است که در آن کارایی دارد. همچنین، این دریافت‌کننده‌ها از حرکات رفت

¹Pelamis ²Off-shore buoys

دیگر برای این دو برداشت‌کننده به حساب می‌آید. همچنین، با اتصال به بستر دریا بخشی از انرژی دریا هدر می‌رود که این نیز یک نکته‌ای منفی برای این نوع دریافت‌کننده‌ها است. در ادامه، انواع مبدل برداشت‌کننده‌های امواج دریا معرفی و بررسی خواهد شد.

۴.۴ طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های امواج دریا مطابق با نوع مبدل

امواج جمع‌آوری شده توسط دریافت‌کننده به وسیله مبدل به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در حوزه برداشت‌کننده‌های امواج دریا، سه مبدل کاربرد بیشتری دارند. این مبدل‌ها شامل توربینی، الکترومغناطیسی و پیزوالکتریکی هستند که در ادامه هر یک از آن‌ها معرفی و بررسی می‌شود.

۱.۴.۴ مبدل توربینی

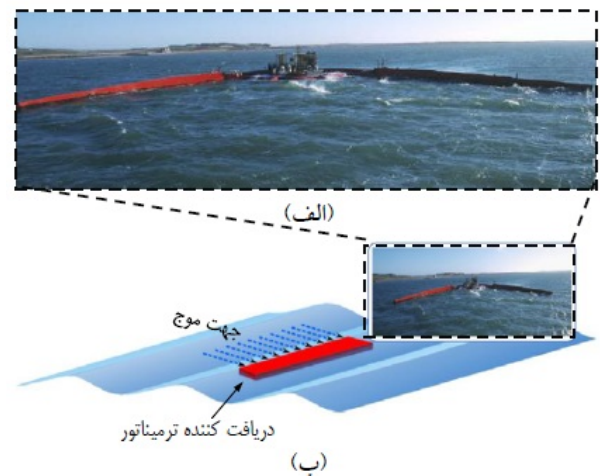
این مبدل با استفاده از توربین و روتور متصل به آن انرژی جمع‌آوری شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توربین هیدرولیکی نظیر پلتون^۲ و فرانسس^۳، از انواع توربین‌های مورد استفاده در برداشت‌کننده‌های امواج دریایی است. از توربین‌های هوا هم در برداشت‌کننده‌های امواج دریا استفاده می‌شود [۳]. توربین ولز^۴ یکی از ساده‌ترین و ارزان‌قیمت‌ترین توربین‌های هوایی مورد استفاده در برداشت‌کننده‌های دریایی است. در مقابل، این مبدل‌ها معایبی مانند آلودگی صوتی بالا و کارایی پایین دارند. چراکه با توجه به فرکانس پایین امواج (۱-۲ هرتزی) و فرکانس (۵۰ هرتزی) روتور، نیاز به دستگاهی برای تبدیل فرکانس وجود دارد که در این بین ممکن است بخشی از انرژی هدر رود. شکل ۹ نحوه کارکرد توربین‌های هوا و توربین ولز در برداشت‌کننده امواج دریا را به طور شماتیک نشان می‌دهد [۳۵].

با توجه به قسمت الف شکل ۹، مشاهده می‌شود که جابه‌جایی امواج دریا باعث جابه‌جایی سیال موجود در بدنه سیستم برداشت‌کننده امواج دریا می‌شود. در نتیجه، هوای محفظه نیز به نوسان در می‌آید. این نوسانات باعث حرکت چرخش توربین هوا خواهد شد (قسمت ب شکل ۹).

چرخش توربین، به وسیله شفت به ژنراتور منتقل می‌شود و انرژی الکتریکی تولید می‌شود. توربین ولز یکی از توربین‌های هوایی است که در برداشت‌کننده لیمپت کاربرد دارد [۳۰]. برای مطالعه بیشتر در حوزه توربین‌های هوای مورد استفاده در برداشت‌کننده‌های امواج دریا می‌توان به مقالات [۳۶، ۳۷] مراجعه کرد.

محدودیت مبدل توربینی با وجود خروجی بالا، فضای اشغالی بزرگ است. این مبدل‌ها هرچه قطرشان بزرگ‌تر باشد، انرژی بیشتری تولید می‌کنند. این بدان معناست که به منظور افزایش توان خروجی، به فضای بزرگتری نیاز است که یک محدودیت برای این مبدل به حساب می‌آید. به علاوه در حین روند تبدیل فرکانس‌ها نیز بخشی از انرژی ممکن است هدر رود. در قسمت بعد مبدل الکترومغناطیسی^۵ ارائه خواهد شد.

در هر جهتی امواج را جمع‌آوری می‌کند، این دریافت‌کننده تنها در یک جهت می‌تواند امواج را دریافت کند [۷]. هیولای موج^۱ نمونه‌ای از این دریافت‌کننده است که در شکل ۸ نمایی از آن مشاهده می‌شود.



شکل ۸: دریافت‌کننده ترمیناتور؛ الف) هیولای موج [۳۴] و ب) محل قرارگیری آن نسبت به امواج [۳]

با توجه به قسمت الف شکل ۸، دریافت‌کننده ترمیناتور نیز شناور بر سطح آب است. برخورد عمودی جریان امواج به این سیستم باعث حرکت نسبی اجزا نسبت به هم می‌شود و بدین ترتیب انرژی امواج جمع‌آوری می‌شود. امواج جمع‌آوری شده نیز در سیستم مربوطه به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. این سیستم علاوه بر فضای اشغالی بزرگ، تنها در یک جهت کارایی دارد. حال آنکه جهت امواج ممکن است تغییر کند. با توجه به اینکه انواع دریافت‌کننده‌ها با ذکر مثال ارائه شد، به منظور تصمیم‌گیری، در قسمت بعد به طور خلاصه مزایا و چالش‌های آن‌ها جمع‌بندی خواهد شد.

۴.۳.۴ جمع‌بندی دریافت‌کننده‌ها

با توجه به مطالب پیشین، مفهوم دریافت‌کننده‌های امواج مشخص شد. در ادامه، به منظور درک و تصمیم‌گیری بهتر، در جدول ۴ برخی از خصوصیات دریافت‌کننده‌ها قرار داده شده است.

مطابق جدول ۴، مشاهده می‌شود که دریافت‌کننده جاذب نقطه‌ای در عین فضای اشغالی کوچک، محدودیتی نسبت به جهت موج ندارد. همچنین، در اغلب موارد این برداشت‌کننده‌ها نیازی به اتصال به بستر دریا ندارند. این در حالی است که دریافت‌کننده تضعیف‌کننده فضای بزرگی اشغال می‌کند. به علاوه، تنها در یک جهت موج توانایی دریافت انرژی دارد. موارد بیان شده برای دریافت‌کننده ترمیناتور نیز صادق است.

دریافت‌کننده ترمیناتور علاوه بر اینکه فضای نسبتاً بزرگی نیاز دارد، نسبت به جهت موج نیز محدودیت دارد. دقت می‌شود که با توجه به اینکه دریافت‌کننده‌های ترمیناتور و تضعیف‌کننده به ترتیب موازی و عمود بر جهت جریان کارایی دارند، باید به بستر دریا متصل شوند. این امر نیز محدودیتی

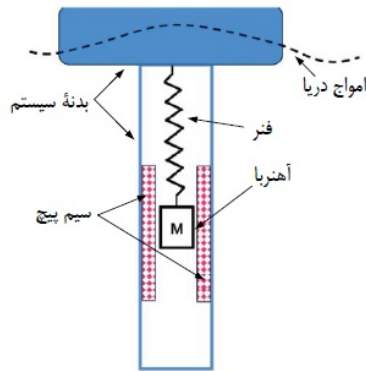
¹Wave dragon

^۲ Pelton، نوعی توربین آبی که نخستین بار در سال ۱۸۸۰ ارائه شد. این توربین شامل کاسه‌هایی است که با ورود آب و ضربه به آن، توربین شروع به کار می‌کند.
^۳ Francis، این توربین از نوع عکس‌العملی است و به همین دلیل در یک سوی آن آب پرفشار و در سوی دیگر آب کم فشار وجود دارد.
^۴ Wells air turbine، نوعی از توربین کم‌فشار است که فقط به یک سمت می‌چرخد. این دستگاه ساده اما هوشمندانه در اواخر ۱۹۷۰ میلادی ساخته شد.

^۵Electromagnetic transducer

جدول ۴: مقایسه دریافت‌کننده‌های برداشت‌کننده امواج دریا

نوع برداشت‌کننده ← پارامتر مورد بررسی ↓	تضعیف کننده	جاذب نقطه‌ای	ترمیناتور
محدودیت نسبت به جهت موج	دارد	ندارد	دارد
نیاز به اتصال به بستر دریا	دارد	ندارد	دارد
فضای اشغالی	بزرگ	کوچک	بزرگ
وابستگی به فرکانس موج	دارد	دارد	دارد



شکل ۱۰: نمای شماتیک برداشت‌کننده امواج دریا با استفاده از مبدل الکترومغناطیس [۳۹]

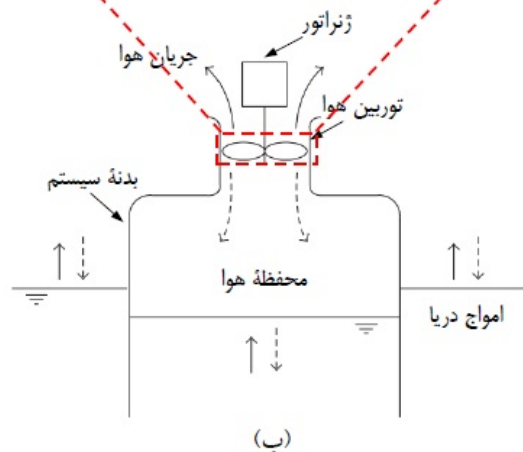
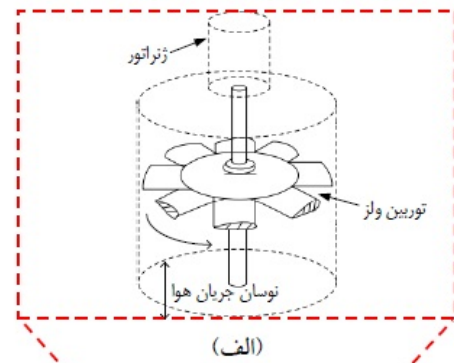
۳.۴.۴ مبدل پیزوالکتریکی

یکی از مبدل‌های کوچک مقیاس در حوزه برداشت‌کننده امواج دریا، مبدل پیزوالکتریکی است. این خاصیت نخستین بار توسط برادران کوری^۴ در سال ۱۸۸۰ مطرح شد. مواد پیزوالکتریکی در مقابل فشار، از خود انرژی الکتریکی تولید می‌کنند که به آن خاصیت مستقیم پیزوالکتریکی گفته می‌شود. مواد پیزوالکتریکی این توانایی را دارند که در فضای اشغالی کوچک، انرژی قابل توجهی را تولید کنند.

دو دسته مواد: سرامیکی و پلیمری عمده مواد پیزوالکتریکی مورد استفاده در تحقیقات را پوشش می‌دهند. پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF)^۵ و تیتانات زیرکونات سرب (PZT)^۶ به ترتیب دو نمونه پیزوالکتریکی پلیمری و سرامیکی پرکاربرد هستند [۴۲].

با توجه به اینکه برداشت انرژی با استفاده از نوسان انجام می‌شود، نوع پلیمری پیزوالکتریکی به دلیل نرم بودن پلیمرها بیشتر در حوزه حسگرها کاربرد دارد. در برداشت انرژی بیشتر از پیزوالکتریکی‌های سرامیکی استفاده می‌شود. شکل ۱۱ نمونه‌ای از برداشت‌کننده امواج دریای دارای مبدل پیزوالکتریکی که توسط وو^۷ و همکاران ارائه شد را نشان می‌دهد [۴۳].

با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می‌شود امواج دریا باعث نوسان سیستم شناور می‌شود. با نوسان بدنه سیستم، تیر پیزوالکتریکی متصل به آن نیز نوسان خواهد کرد. در نتیجه، با نوسان تیر پیزوالکتریکی، انرژی امواج به انرژی الکتریکی تبدیل خواهد شد. همچنین، در برداشت‌کننده ارائه شده در شکل ۱۱ از پیزوالکتریکی PZT4 استفاده شده است. در قسمت بعد، مبدل‌های ارائه شده مقایسه و بررسی خواهند شد.



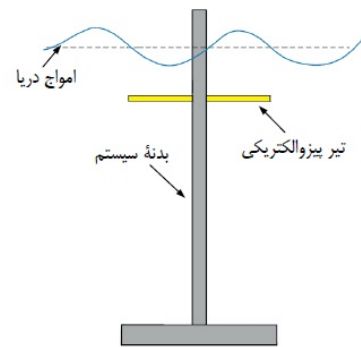
شکل ۹: برداشت‌کننده امواج دریا دارای مبدل توربین؛ الف) نمای شماتیک و ب) جزئیات قسمت توربین هوای ولز [۳۵]

۲.۴.۴ مبدل الکترومغناطیسی

اساس کار این نوع مبدل بر پایه قانون فارادی^۱ الکترومغناطیس استوار است. از جابه‌جایی آهنربا در سیم پیچ^۲، جریان القا شده و در نتیجه انرژی الکتریکی تولید می‌شود [۳۸]. نمای شماتیک نمونه‌ای از این مبدل در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود [۳۹].

سیستم نشان داده شده در شکل ۱۰ نمای ساده از نحوه استفاده از مبدل الکترومغناطیس در برداشت‌کننده‌های امواج دریا را نشان می‌دهد. نوسانات امواج آب باعث نوسان فنر می‌شود. بدین ترتیب آهنربای متصل به فنر نیز در حضور سیم پیچ نوسان می‌کند. در نتیجه جریان القا شده و انرژی الکتریکی از امواج دریا حاصل می‌شود [۳۹]. برای مطالعه بیشتر در این حوزه می‌توان به مقالات [۴۰، ۴۱] مراجعه کرد. در قسمت بعد مبدل پیزوالکتریکی^۳ معرفی و بررسی می‌شود.

¹Faraday's law ²Coil ³Piezoelectric transducer ⁴Curie borthers ⁵Polyvinylidene fluoride (PVDF) ⁶Lead Zirconate Titanate (PZT) ⁷Wu



شکل ۱۱: نمای شماتیک برداشت‌کننده امواج دریا با استفاده از مبدل پیزوالکتریک [۴۳]

قائم انرژی بیشتری تولید می‌کند. از سیستم ارائه‌شده به قطر ۷۶ میلی‌متر و طول ۹۱۴ میلی‌متر، ۶۰ تا ۱۸۰ میلی‌وات انرژی دریافت شد. ارتورک^۶ و دلپورت^۷ [۴۶] در سال ۲۰۱۱، سازه ساندریجی شامل الیاف شیشه و پیزوالکتریک را به منظور دریافت انرژی مطالعه کردند. مزایای این چیدمان، خمش مؤثر مناسب، وزن کم و آلودگی صوتی کم در حین برداشت انرژی بود. مطابق شکل ۱۲، در این پژوهش با اضافه‌کردن زائده‌ای به انتهای سازه ۲۵۴ میلی‌متری، شکل ظاهری مانند ماهی طراحی شد. هدف از این طراحی، افزایش انرژی خروجی بود. با قرارگیری کامل سازه پیزوالکتریک در آب، در فرکانس ۶ هرتز، ۱۲۰ میلی‌وات انرژی تولید شد.

۴.۴.۴ جمع‌بندی مبدل‌ها

با توجه به مطالب پیشین، مفهوم مبدل‌های امواج مشخص شد. مبدل توربینی به فضای بزرگی نیاز دارد. به علاوه در طراحی آن باید محفظه و ملزومات مربوطه نیز در نظر گرفته شود که تمامی این موارد محدودیت مکان و طراحی را به همراه دارد. همچنین نیاز به سرویس و تعمیر، یکی دیگر از محدودیت‌های مبدل‌های توربینی است. در مقابل، مشکلات ذکر شده برای مبدل الکترومغناطیس مطرح نیست.

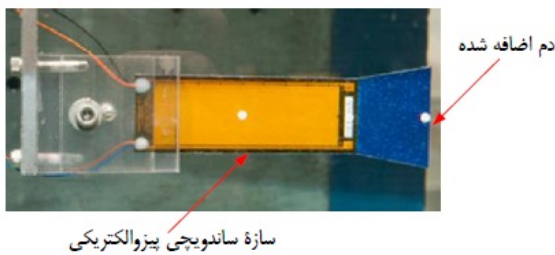
در مبدل‌های الکترومغناطیسی فاصله سیم‌پیچ و آهن‌ربا نکته حساس و مهمی است که با توجه به نوسانات اتفاقی و غیرقابل پیش‌بینی امواج (در اغلب مواقع)، برای این مبدل محدودیت به حساب می‌آید. همچنین، چگالی انرژی مبدل پیزوالکتریک در عین فضای اشغالی کم، حدود سه برابر چگالی انرژی مبدل الکترومغناطیسی است [۴۴].

دقت می‌شود که به دلایلی که ذکر شد، در ادامه پژوهش‌های مرتبط با برداشت‌کننده‌های دریایی دارای مبدل پیزوالکتریک ارائه خواهد شد.

۵ پژوهش‌های پیشین مرتبط با برداشت‌کننده‌های دریایی پیزوالکتریک

در حوزه برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک، در سال ۲۰۰۷ زرکیندن^۱ و همکاران [۴۵] امکان برداشت انرژی با استفاده از مبدل پیزوالکتریک را بررسی کردند. در این پژوهش هدف بررسی رفتار تداخل سیال و جامد^۲ بود. این رفتار با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار عددی کامسول مالتی‌فیزیکس^۳ انجام شد. در این مدل‌سازی که با نسبت ۱ به ۲۰ انجام شده بود، از دو لایه پیزوالکتریک PVDF و یک لایه فوم به طول ۰/۳ میلی‌متر به عنوان مبدل استفاده شد. موج ورودی هارمونیک و با تناوب ۱/۱ ثانیه و اندازه ۰/۳ متر بود. در نهایت، تقریباً ۳ ولت انرژی الکتریکی از این مدل‌سازی تولید شد.

در سال ۲۰۰۹، مورای^۴ و رستگار^۵ [۹] با ارائه سیستمی برای امواج فرکانس متغیر و فرکانس پایین، امکان برداشت انرژی را بررسی کردند. همچنین، دو نوع حرکت اجسام شناور؛ جابه‌جایی قائم و چرخش در این پژوهش مطالعه شد. بنابر آزمایش‌های این پژوهش، مشاهده شد که جابه‌جایی



شکل ۱۲: سازه ساندریجی ماهی‌شکل ارائه‌شده برای برداشت انرژی از امواج دریا [۴۶]

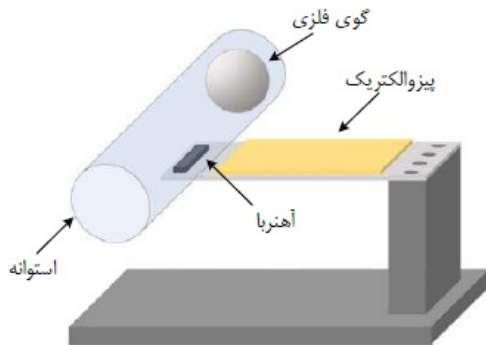
در سال ۲۰۱۳، چا^۸ و همکاران [۴۷] شکل دیگری از برداشت‌کننده امواج دریایی پیزوالکتریک را بررسی کردند. در این پژوهش برای حالت‌های غوطه‌وری یک‌هشتم، یک‌چهارم، نیم و تمام طول تیرپیزوالکتریک آزمایش انجام و میزان انرژی خروجی مطالعه شد. تیر پیزوالکتریک مورد استفاده در این پژوهش مانند پژوهش مرجع [۴۶] بود. با این تفاوت که در لایه وسط آلومینیوم قرار داده شد. با طول ۱۰۳ میلی‌متر، حالت بهینه غوطه‌وری یک‌هشتم، با فرکانس ۱۳/۵ هرتز بود که ۱۰ میکرووات خروجی بدست آمد. زی^۹ و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۱۴ با اتصال دو تیر پیزوالکتریک به ستون، طرح جدید در حوزه برداشت‌کننده‌های دریایی دارای مبدل پیزوالکتریک را مدل‌سازی کردند. مطابق شکل ۱۳، تیرهای پیزوالکتریک که شامل دولایه PZT4 و یک لایه فولاد بودند، تنها حرکت عمودی را دریافت می‌کردند. با کمی دقت مشاهده می‌شود تیر پیزوالکتریک در تماس مستقیم با جریان آب قرار گرفته است که این امر در کوتاه‌شدن عمر و کارایی پیزوالکتریک تأثیر قابل توجهی دارد. به هر روی، از ۸ متر تیرپیزوالکتریک، در حالت بهینه، ۳۰ وات انرژی تولید شد.

این گروه در همان سال، حالت دیگری از برداشت‌کننده امواج دریا را ارائه کردند که نمای شماتیک آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این مدل‌سازی از جابه‌جایی طولی تیر به منظور دریافت انرژی استفاده شد. در انتهای تیر به منظور افزایش جابه‌جایی طولی، جرمی نصب شد. مبدل‌های پیزوالکتریک به صورت اتصالات به بدنه ستون متصل شدند که با جابه‌جایی طولی، انرژی تولید شود. پس از بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر طول پیزوالکتریک و نوع دریا بر خروجی الکتریکی، بیشینه انرژی برای ۶ متر پیزوالکتریک PZT4، ۱۴۵ وات گزارش شد [۴۹].

¹Zurkinder ²Fluid-Structure interaction ³Comsol Multiphysics ⁴Murray ⁵Rastegar ⁶Erturk ⁷Delporte ⁸Cha ⁹Xie

به دلیل امواج دریا، گوی فلزی به حرکت در می‌آید. با توجه به جاذبه بین گوی و آهنربا، جابه‌جایی تیرپیزوالکتریکی به طریقی تقویت و انرژی الکتریکی تولید می‌شود.

یکی از مشکلات روش شکل ۱۵ صدایی است که به دلیل ضربات وارده از سوی جاذبه بین آهنربا و گوی حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که روش ارائه‌شده تنها توانایی جذب انرژی در یک راستا را دارد. در آزمایش مربوط به این مطالعه، بیشینه خروجی برای ساندویچ پیزوالکتریکی شامل فولاد به طول ۳۸ میلی‌متر، ۱۲ ولت گزارش شده‌است.



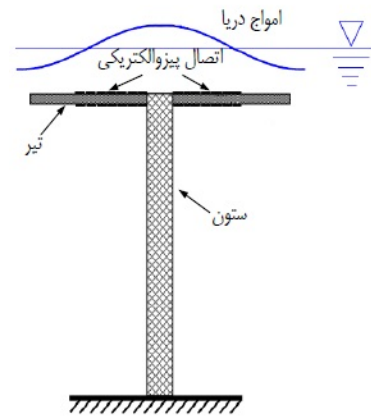
شکل ۱۵: نمای شماتیک برداشت‌کننده امواج دریای ارائه‌شده توسط هانگ و همکاران [۵۱]

در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۷، موستادا^۳ و همکاران [۵۲] روش ساخت جدید لایه‌ای^۴ برای پیزوالکتریک ارائه دادند. همچنین، تأثیر چیدمان پیزوالکتریک بر میزان خروجی الکتریکی در برداشت‌کننده دریایی بررسی شد. لازم به ذکر است نوآوری خاصی در زمینه نحوه قرارگیری تیرپیزوالکتریکی در جریان اقیانوس در این پژوهش انجام نشد. تنها به روش‌های مختلف، تیر پیزوالکتریکی ساخته و در محفظه سیال آزمایش شد که بیشینه خروجی در این مطالعه در مقاومت ۱ مگا اهم، ۲ ولت بود.

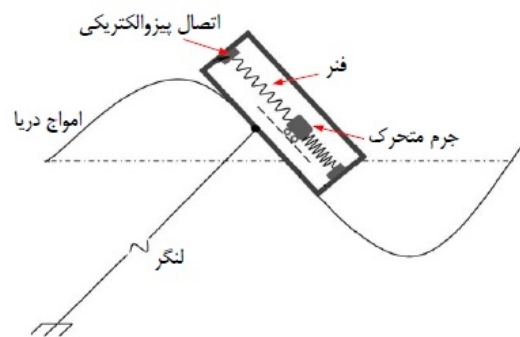
در پاراگراف‌های پیشین، خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر، در زمینه برداشت‌کننده‌های دریایی با استفاده از مبدل پیزوالکتریکی ارائه‌شد.

در جدول ۵ خلاصه‌ای از این مطالعات جمع‌آوری شده‌است. با کمی دقت مشاهده می‌شود آن دسته از مطالعاتی که خروجی قابل توجه‌ای دارند همگی دارای طول بلندی هستند که یک مشکل برای سیستم‌های ارائه‌شده است. تیرپیزوالکتریکی محدودیت ابعادی نداشته و می‌تواند در هر اندازه‌ای که استفاده شود. به علاوه با کمی دقت در اشکال مربوط به مطالعات، مشاهده می‌شود که پیزوالکتریک در تماس مستقیم با سیال قرار گرفته‌است. این امر در دراز مدت مشکل‌ساز بوده و کارایی مبدل را کاهش می‌دهد. به علاوه، کمی دور از واقعیت است.

به علاوه، با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که در بیشتر مطالعات از پیزوالکتریک سرامیکی استفاده می‌شود. همانطور که پیش از این نیز بیان شد، علت آن ترد بودن و در نتیجه تولید انرژی مناسب نسبت به تغییرات کوچک است.



شکل ۱۳: نمای شماتیک برداشت‌کننده امواج دریای ارائه‌شده توسط زی و همکاران؛ الف) مرجع [۴۸]



شکل ۱۴: نمای شماتیک برداشت‌کننده امواج دریای ارائه‌شده توسط ویت و همکاران [۵۰]

همچنین، در سال ۲۰۱۵ نیز شکل دیگری از برداشت‌کننده امواج دریا با استفاده از مبدل پیزوالکتریکی توسط این گروه ارائه شد. در شکل ۱۱ نحوه عملکرد این پژوهش توضیح داده‌شد. نتیجه این مدل‌سازی، دریافت ۲۴ وات انرژی از ۲ متر اتصال پیزوالکتریکی نوع PZT4 بود [۴۳].

ویت^۱ و همکاران [۵۰] در سال ۲۰۱۶ سیستم پیزوالکتریکی شناور بر سطح آب را ارائه کردند. این سیستم برای قسمت‌های نیمه عمیق و عمیق دریا طراحی شده‌بود. مطابق شکل ۱۴ که نمای شماتیک پژوهش را نشان می‌دهد، سیستم بر امواج دریا شناور است. دقت می‌شود که بدنه سیستم به وسیله لنگر به بستر دریا متصل بوده و بدین ترتیب بخشی از انرژی دریا هدر می‌رود. با حرکت بدنه سیستم، جرم متحرک متصل به دو فنر نوسان می‌کند. این نوسانات از طریق فنر به اتصالات پیزوالکتریکی رسیده و در نتیجه از امواج دریا انرژی الکتریکی تولید می‌شود. موج ورودی دریا در این پژوهش به صورت هارمونیک با تناوب ۶ ثانیه و ارتفاع ۱/۳ متر در نظر گرفته شده‌بود. در حالت بهینه، از پیزوالکتریک PZT4 به طول ۲۰۰ میلی‌متر، ۱۰۳ وات انرژی تولید شد.

سال ۲۰۱۷، هانگ^۲ و همکاران [۵۱] مدلی به منظور تقویت انرژی در تیر پیزوالکتریکی ارائه کردند. مطابق شکل ۱۵، در انتهای تیرپیزوالکتریکی آهنربایی قرار داده شده‌است. در بالای آهنربا، استوانه‌ای دارای گوی فلزی قرار گرفته‌است. گوی فلزی می‌تواند درون استوانه حرکت کند. با حرکت سیستم

¹Viet ²Hwang ³Mustuda ⁴Painted

جدول ۵: برداشت‌کننده‌های دریایی پیزوالکتریکی و جزئیات آن‌ها

مرجع	خروجی	نوع مبدل	طول سیستم (mm)	سال	نام پژوهشگران
[۴۵]	۳ V	PVDF	۳۰	۲۰۰۷	زرکیندن و همکاران
[۹]	۱۸۰ mW	المان پیزوالکتریکی	۹۱۴	۲۰۰۹	مورای و رستگار
[۴۶]	۱۲۰ mW	ساندویچ پیزوالکتریکی	۲۵۴	۲۰۱۱	ارتورک و دلپورت
[۴۷]	۱۰ μ W	ساندویچ پیزوالکتریکی	۱۰۳	۲۰۱۳	چا و همکاران
[۴۸]	۳۰ W	PZT4	۸×۱۰^۳	۲۰۱۴	زی و همکاران
[۴۹]	۱۴۵ W	PZT4	۶۰×۱۰^۳	۲۰۱۴	زی و همکاران
[۴۳]	۲۴ W	PZT4	۲×۱۰^۳	۲۰۱۵	وو و همکاران
[۵۰]	۱۰۳ W	PZT4	۲۰۰	۲۰۱۶	ویت و همکاران
[۵۱]	۶۸/۹ μ W	ساندویچ پیزوالکتریکی	۳۸	۲۰۱۷	هانگ و همکاران
[۵۲]	۲ V	ساندویچ پیزوالکتریکی	۵۰۰	۲۰۱۷	موستادا و همکاران

۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نیاز گسترده بشر به انرژی، امروزه انرژی یکی از دغدغه‌های محققان، پژوهشگران و حتی سیاستمداران شده‌است. برداشت انرژی علمی است که به سبب آن می‌توان از منابعی که در محیط اطراف در حال هدر رفتن است انرژی دریافت کرد. یکی از این منابع، انرژی امواج دریا است. با توجه به این مزایای ذکرشده، در پژوهش حاضر روش‌های برداشت انرژی دریایی ارائه شد. بیان شد که برداشت‌کننده‌های دریایی مطابق با نوع بهره‌برداری از منابع دریا به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که در آن انرژی امواج دریا به نسبت سایرین توان خروجی بیشتری دارد. سپس طبقه‌بندی برداشت‌کننده‌های امواج دریا مطابق با محل قرارگیری ارائه و بررسی شد. گفته شد که ساختار برداشت‌کننده‌های امواج دریا شامل دو جز دریافت‌کننده و مبدل است که انواع هرکدام به تفصیل بیان شد. در این میان مبدل پیزوالکتریک به دلیل مزایای ذکرشده در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب کرده‌بود. در این راستا پژوهش‌های مرتبط با برداشت‌کننده‌های امواج دریایی دارای مبدل پیزوالکتریکی ارائه و بررسی شد. مشاهده شد که هر کدام از برداشت‌کننده‌ها مزایا و چالش‌های خود را داشتند. امید است با ارائه پژوهش حاضر، سایر محققان درصدد تقویت مزایا و ارائه راه‌حل برای چالش‌های ذکرشده برآیند.

مراجع

- [7] Czech, Balazs and Bauer, Pavol. Wave energy converter concepts: Design challenges and classification. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(2):4-16, 2012.
- [8] Dodge, Darrell M. *Illustrated history of wind power development*. Darell M. Dodge, 2001.
- [9] Murray, R and Rastegar, J. Novel two-stage piezoelectric-based ocean wave energy harvesters for moored or unmoored buoys. in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009*, vol. 7288, p. 72880E. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [10] Kumar, Ch Naveen. Energy collection via piezoelectricity. in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 662, p. 012031. IOP Publishing, 2015.
- [11] Jamal, GR Ahmed, Hassan, Hamidul, Das, Amitav, Ferdous, Jannatul, and Lisa, Sharmin A. A novel battery charger operated from random sound sources or air pressure. in *2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, pp. 1-4. IEEE, 2014.
- [12] Granstrom, Jonathan, Feenstra, Joel, Sodano, Henry A, and Farinholt, Kevin. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart Materials and Structures*, 16(5):1810, 2007.
- [13] Nia, Elham Maghsoudi, Zawawi, Noor Amila Wan Abdullah, and Singh, Balbir Singh Mahinder. A review of walking energy harvesting using piezoelectric materials. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 291, p. 012026. IOP Publishing, 2017.
- [14] Wang, Hao, Jasim, Abbas, and Chen, Xiaodan. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—a comprehensive review. *Applied energy*, 212:1083-1094, 2018.
- [15] Donelan, J Maxwell, Li, Qinggua, Naing, Veronica, Hoffer, JA, Weber, DJ, and Kuo, Arthur D. Biomechanical energy harvesting: generating electricity during walking with minimal user effort. *Science*, 319(5864):807-810, 2008.
- [16] Yang, Rusen, Qin, Yong, Li, Cheng, Zhu, Guang, and Wang, Zhong Lin. Converting biomechanical energy into electricity by a muscle-movement-driven nanogenerator. *Nano Letters*, 9(3):1201-1205, 2009.
- [17] Zurbuchen, Adrian, Pfenniger, Alois, Stahel, Andreas, Stoeck, Christian T, Vandenberghe, Stijn, Koch, Volker M, and Vogel, Rolf. Energy harvesting from the beating
- [1] Sieminski, Adam et al. International energy outlook. *Energy Information Administration (EIA)*, 18, 2014.
- [2] Save on energy, 2018.
- [3] López, Iraide, Andreu, Jon, Ceballos, Salvador, de Alegría, Iñigo Martínez, and Kortabarria, Iñigo. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27:413-434, 2013.
- [4] Drew, Benjamin, Plummer, Andrew R, and Sahinkaya, M Necip. A review of wave energy converter technology, 2009.
- [5] Pelc, Robin and Fujita, Rod M. Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6):471-479, 2002.
- [6] Power buoys: electricity from waves, 2001.

- [31] Clément, Alain, McCullen, Pat, Falcão, António, Fiorentino, Antonio, Gardner, Fred, Hammarlund, Karin, Lemonis, George, Lewis, Tony, Nielsen, Kim, Petroncini, Simona, et al. Wave energy in europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5):405–431, 2002.
- [32] Melikoglu, Mehmet. Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, 148:563–573, 2018.
- [33] 2018.
- [34] Kofoed, Jens Peter, Frigaard, Peter, Friis-Madsen, Erik, and Sørensen, Hans Chr. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable energy*, 31(2):181–189, 2006.
- [35] Takao, Manabu and Setoguchi, Toshiaki. Air turbines for wave energy conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012, 2012.
- [36] Falcão, António FO and Henriques, Joao CC. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 85:1391–1424, 2016.
- [37] Falcão, António FO, Henriques, João CC, Gato, Luís MC, and Gomes, Rui PF. Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter. *Ocean engineering*, 75:148–156, 2014.
- [38] Elvin, Niell and Erturk, Alper. *Advances in energy harvesting methods*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [39] Chen, H Ming and DelBalzo, Donald R. Electromagnetic spring for sliding wave energy converter. in *OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington*, pp. 1–5. IEEE, 2015.
- [40] Trapanese, Marco. Optimization of a sea wave energy harvesting electromagnetic device. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(11):4365–4368, 2008.
- [41] Yin, Xiuxing, Li, Xiaofan, Boontanom, Vicky, and Zuo, Lei. Mechanical motion rectifier based efficient power takeoff for ocean wave energy harvesting. in *ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*, pp. V003T41A002–V003T41A002. American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [42] Erturk, Alper and Inman, Daniel J. *Piezoelectric energy harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- [43] Wu, Nan, Wang, Quan, and Xie, XiangDong. Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure. *Applied Ocean Research*, 50:110–118, 2015.
- [44] Priya, Shashank. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. *Journal of electroceramics*, 19(1):167–184, 2007.
- [45] Zurkinden, AS, Campanile, F, and Martinelli, L. Wave energy converter through piezoelectric polymers. in *Proceedings of the COMSOL Users Conference (Grenoble)*, 2007.
- [46] Erturk, Alper and Delporte, Ghislain. Underwater thrust and power generation using flexible piezoelectric composites: an experimental investigation toward self-powered swimmer-sensor platforms. *Smart materials and Structures*, 20(12):125013, 2011.
- heart by a mass imbalance oscillation generator. *Annals of biomedical engineering*, 41(1):131–141, 2013.
- [18] Dagdeviren, Canan, Yang, Byung Duk, Su, Yewang, Tran, Phat L, Joe, Pauline, Anderson, Eric, Xia, Jing, Doraiswamy, Vijay, Dehdashti, Behrooz, Feng, Xue, et al. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(5):1927–1932, 2014.
- [19] Anton, Steven R and Inman, Daniel J. Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles. in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*, vol. 6928, p. 692824. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [20] Lee, Jaeyun and Choi, Bumkyoo. Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires. *Energy conversion and management*, 78:32–38, 2014.
- [21] Khan, Farid Ullah et al. State of the art in acoustic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(2):023001, 2015.
- [22] Cornett, Andrew M et al. A global wave energy resource assessment. in *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008.
- [23] Vega, Luis A. Ocean thermal energy conversion. *Encyclopedia of sustainability science and technology*, pp. 7296–7328, 2012.
- [24] Rourke, Fergal O, Boyle, Fergal, and Reynolds, Anthony. Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2):398–409, 2010.
- [25] Musial, Walter and Ram, Bonnie. Large-scale offshore wind power in the united states: Assessment of opportunities and barriers. tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- [26] 2018.
- [27] Hammons, Thomas James. Tidal power. *Proceedings of the IEEE*, 81(3):419–433, 1993.
- [28] Henderson, Andrew R, Morgan, Colin, Smith, Bernie, Sørensen, Hans C, Barthelmie, Rebecca J, and Boesmans, Bart. Offshore wind energy in europe—a review of the state-of-the-art. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 6(1):35–52, 2003.
- [29] Colmenar-Santos, Antonio, Perera-Perez, Javier, Borge-Diez, David, and dePalacio Rodríguez, Carlos. Offshore wind energy: A review of the current status, challenges and future development in spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:1–18, 2016.
- [30] Whittaker, TJT, Beattie, W, Folley, M, Boake, C, Wright, A, Osterried, M, and Heath, T. The limpet wave power project—the first years of operation. *Renewable Energy*, 2004.

- [47] Cha, Youngsu, Kim, Hubert, and Porfiri, Maurizio. Energy harvesting from underwater base excitation of a piezoelectric composite beam. *Smart materials and Structures*, 22(11):115026, 2013.
- [48] Xie, XD, Wang, Q, and Wu, N. Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate. *International Journal of Engineering Science*, 81:41-48, 2014.
- [49] Xie, XD, Wang, Q, and Wu, N. Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves. *Journal of Sound and Vibration*, 333(5):1421-1429, 2014.
- [50] Viet, NV, Xie, XD, Liew, KM, Banthia, N, and Wang, Q. Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester. *Energy*, 112:1219-1226, 2016.
- [51] Hwang, Won Seop, Ahn, Jung Hwan, Jeong, Se Yeong, Jung, Hyun Jun, Hong, Seong Kwang, Choi, Jae Yoon, Cho, Jae Yong, Kim, Jung Hun, and Sung, Tae Hyun. Design of piezoelectric ocean-wave energy harvester using sway movement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 260:191-197, 2017.
- [52] Mutsuda, Hidemi, Tanaka, Yoshikazu, Patel, Rupesh, Doi, Yasuaki, Moriyama, Yasuo, and Umino, Yuji. A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting. *Applied Ocean Research*, 68:182-193, 2017.