



## ارزیابی چرخه زندگی اثرات و زیست‌محیطی نیروگاه بادی فراساحلی

امید سلمانی نژاد<sup>۱</sup>، سید مجید کشاورز<sup>۲</sup>

### چکیده

یک نیروگاه بادی یا مزرعه<sup>۱</sup> بادی، مجموعه‌ای از چندین توربین بادی است که در یک مکان قرار گرفته‌اند. یک نیروگاه بادی بزرگ می‌تواند شامل چندصد توربین بادی باشد. چنین مجموعه‌ای می‌تواند بر روی دریا قرار گرفته باشد. نیروی بادی شناور دریایی، یک فناوری نوظهور در صنعت باد فراساحلی، توجه فزاینده‌ای را به دلیل پتانسیل خود برای همکاری با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر برای کربن‌زدایی سیستم‌های انرژی به خود جلب کرده است. اثرات زیست‌محیطی مزرعه بادی دریایی شناور در مناطق عمیق دریا باید در نظر گرفته شود و روش‌هایی برای تقویت اثر کم کربن باید ابداع شود. مطالعات کمی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مزرعه بادی شناور دریایی انجام شده است، اما مقیاس این مطالعات نسبتاً کوچک بود. مزرعه بادی فراساحلی در آینده، داده‌های پایه بیشتری برای بهبود قابلیت اطمینان LCA باید جمع‌آوری شود. اثرات مزرعه بادی دریایی شناور بر اکولوژی دریایی و ویژگی‌های فیزیکی جوی باید در عمق مورد بررسی قرار گیرد. **کلیدواژه‌ها:** منطقه اعماق دریا، باد دریایی، نیروگاه بادی فراساحلی، ارزیابی چرخه حیات، تأثیرات محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای،

### مقدمه

در حال حاضر، منابع انرژی متعارف مبتنی بر سوخت‌های فسیلی یکی از محرک‌های اصلی اقتصادی در جهان هستند [۱]. با این حال، استفاده از سوخت‌های فسیلی چالش‌های عظیمی مانند تغییرات آب‌وهوایی جهانی [۲، ۳] و کاهش انرژی متعارف در مواجهه با افزایش تقاضای انرژی را به همراه داشته است [۴]. دگرگونی جهانی سیستم‌های انرژی برای کاهش تغییرات آب‌وهوا و برآوردن تقاضای فزاینده انرژی در حال انجام است [۵]. واضح است که رشد آینده در تولید انرژی اساساً در چارچوب جدید سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (RES) خواهد بود [۶]. استفاده از الکتریسیته کم کربن به‌عنوان مصرف نهایی انرژی، رکن اصلی در تحول سیستم‌های انرژی خواهد بود [۷]. در سال ۲۰۲۱ نزدیک به ۲۹۰ گیگاوات انرژی تجدیدپذیر جدید در سطح جهان اضافه شد. در نتیجه، ظرفیت نصب‌شده نیروی باد به‌طور قابل توجهی افزایش یافت [۸]. سهم بازار نیروی بادی فراساحلی به‌طور قابل توجهی در حال افزایش است و انتظار می‌رود ظرفیت نصب‌شده نیروگاه بادی دریایی در دهه‌های آینده رشد چشمگیری داشته باشد، با پیش‌بینی افزایش از ۳۴ گیگاوات در سال ۲۰۲۰ به ۳۸۰ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ و به بیش از ۲۰۰۰ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ [۹].

بیشتر فن‌آوری‌های نیروی بادی فراساحلی شامل تثبیت توربین‌های بادی در عمق آب در حدود ۳۰ تا ۵۰ متر با استفاده از فناوری‌های ثابت در پایین، مونوپیل، قاب مجرا یا گرانث است [۱۰]. سرعت باد بیشتر و ثابت‌تر در مناطق عمیق آب در اعماق بیشتر از ۵۰ متر می‌تواند تولید برق بیشتری را به همراه داشته باشد، اما فناوری‌های معمولی ثابت پایین در این مورد مقرون‌به‌صرفه نیستند [۱۱]. به لطف توسعه مداوم فن‌آوری‌های شناور، استقرار توربین‌های بادی دریایی در مقیاس بزرگ در مناطق عمیق‌تر آب ممکن شده است. نیروی بادی دریایی شناور توجه فزاینده‌ای را به خاطر پتانسیل خود برای همکاری با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر برای کربن‌زدایی سیستم‌های

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی، رشته برق قدرت، دانشگاه فنی حرفه ای یاسوج

slmanynzhadamyd@gmail.com

<sup>۲</sup> دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه ای استان یاسوج، ایران،

Skeshavarz.tvu@ac.i

انرژی جلب می‌کند. اگرچه در حال حاضر تنها ۰,۲ درصد از کل ظرفیت بادی نصب‌شده در دریا را تشکیل می‌دهد، این فناوری نوظهور در دهه آینده رشد قابل‌توجهی خواهد داشت (شکل ۱) [۱۲].

### بررسی ادبیات موضوع

#### توربین بادی و انواع آن

توربین بادی (Wind Turbine) به سازه‌ای گفته می‌شود که انرژی باد را به برق تبدیل می‌کند. انرژی باد یکی از اصلی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است که در ایران پتانسیل‌های فوق‌العاده‌ای دارد. در گذشته و به ویژه در ایران باستان، از انرژی باد برای آسیاب و آبیاری استفاده شده است. شکل زیر بقایای یک نمونه آسیاب بادی را در افغانستان کنونی نشان می‌دهد.



شکل شماره (۱) آسیاب بادی باستانی در افغانستان با محور چرخش عمودی

#### توربین بادی دریایی

توربین بادی دریایی یا فراساحلی (Offshore Wind Turbine) به توربینی گفته می‌شود که از انرژی باد روی سطح آزاد آب مانند اقیانوس‌ها، دریاها و یا دریاچه‌ها استفاده کند. اروپا پیشگام این نوع نیروگاه‌های بادی بوده است. اولین نیروگاه بادی دریایی در سال ۱۹۹۱ در دانمارک نصب شد. میانگین ظرفیت یک توربین بادی دریایی در اروپا ۳ مگاوات بود که انتظار می‌رود که این مقدار تا ۵ مگاوات برسد. بزرگ‌ترین نیروگاه بادی دریایی در Hornsea انگلیس در سال ۲۰۲۰ تأسیس شد که ظرفیت تولید برق ۱۲۱۸ مگاوات دارد. رتبه‌های بعدی نیز متعلق به انگلیس (Walney) با ظرفیت ۶۶۰ مگاوات است. نبرد بر سر ساخت بزرگ‌ترین توربین بادی نیز بین تولیدکننده‌های چینی، آلمانی و آمریکایی هر ساله شدت بیشتری می‌یابد که شرکت زیمنس فعلاً پیروز این میدان است. شکل (۲)



شکل شماره (۲) توربین بادی دریایی

### مزایا نیروگاه بادی دریایی

- به علت دوری از ساحل مشکلی برای ساکنین شهرها ایجاد نمی کند و به چشم انداز طبیعت آسیب نمی رسانند.
- نیروگاه بادی دریایی به علت سرعت باد بیشتر در مناطق دریایی، امکان تولید بیشتر برق را دارد.
- باد های دریایی موانعی مانند کوه ها که می توانند سرعت باد را کاهش دهند ندارند.

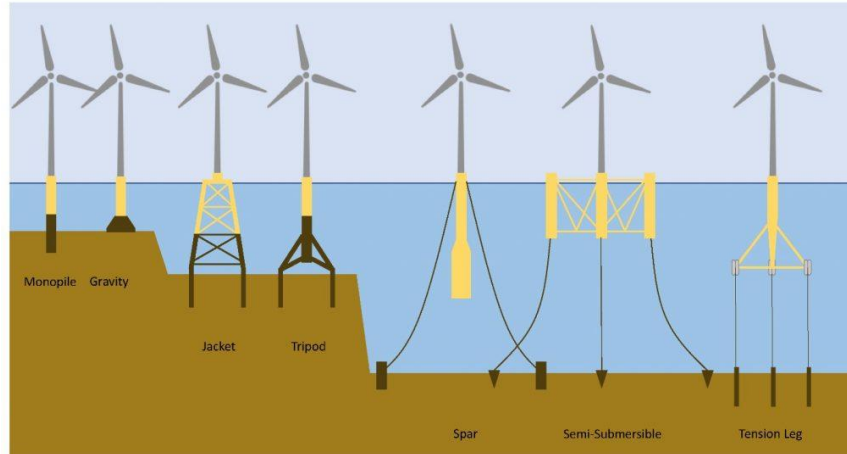
### معایب نیروگاه بادی دریایی

- عیب اصلی ان ها هزینه بالای نصب این توربین ها در بستر دریایی است.
- نیروگاه بادی دریایی مستعد آسیب به خاطر طوفان ها و باد های شدید دریایی هستند که ممکن است هزینه های تعمیر و نگهداری را افزایش دهد.
- نیروگاه بادی دریایی که در نزدیکی ساحل (کمتر از ۴۰ کیلومتر) هستند مشکلاتی را برای ساکنین، قایق رانان و ماهیگیران ممکن است ایجاد کند.

### فیلم نیروگاه بادی دریایی Walney

#### انواع توربین بادی دریایی

توربین های بادی دریایی را می توان بر اساس پی (Foundation) به دو دسته ثابت و شناور (Floating) تقسیم کرد. پی ثابت در آب های کم عمق تا حدوداً ۵۰ متر، مانند توربین بادی ساحلی استفاده می شود. پی توربین ها ممکن است یک پایه، سه پایه یا به صورت Jacket باشد. جکت هایی که در صنعت نفت استفاده می شود در عمق بستر ۲۰ تا ۸۰ متری از سطح دریا می تواند برای توربین بادی استفاده شود. برای عمق های بیش از ۸۰ متر استفاده از پی ثابت از لحاظ فنی غیر ممکن است و دیگر اقتصادی نخواهد بود. از این رو توربین بادی شناور نیاز است که به کف دریا متصل باشد. در سال ۲۰۰۹ اولین توربین بادی دریایی شناور در مقیاس واقعی در دریای شمالی نروژ نصب شد. در این میان انواع فناوری ها، توربین های بادی نیمه شناور نیز اقبال عمومی یافته اند. شکل (۳)



شکل شماره (۳) انواع فونداسون توربین های بادی دریایی

### چشم انداز توربین بادی شناور

امروزه توربین های بادی دریایی شناور به تعداد خیلی کم نصب شده است اما چشم انداز بزرگ تری برای آن تصور می شود. برای مثال چین می خواهد تا سال ۲۰۳۰ یک گیگاوات از این فناوری نصب کند. انجمن انرژی باد ژاپن بیان کرده است که تا سال ۲۰۵۰ مقدار ۱۸ گیگاوات توربین بادی شناور در این کشور نصب می شود. کره جنوبی ۱۰۳ میلیارد دلار برای گسترش این فناوری تا سال ۲۰۲۲ سرمایه گذاری خواهد کرد.



شکل شماره (۴) WindFloat Atlantic توربین های بادی شناور نیمه غوطه ور

### توربین بادی ساحلی

توربین بادی ساحلی (Onshore Wind Turbine) به توربینی گفته می شود که بر روی زمین نصب شده باشند. معمولاً برای این توربین ها مکان هایی با ساکنین کمتر انتخاب می شود. این مناطق ممکن است شامل کوه ها، دره ها، دشت ها و فلات ها باشد.

## اولین توربین بادی

اولین توربین بادی که برای تولید برق استفاده شد، در سال ۱۸۸۷ در گلاسکو اسکاتلند ساخته شد. این توربین به وسیله James Blyth با ارتفاع برج ۱۰ متر با بادبان های پارچه ای برای شارژ باتری ساخته شد تا روشنایی کلبه خود را تامین کند. بعد از آن در سال ۱۸۸۸ در کیولند اوهایو آمریکا توربین بادی با قطر روتور ۱۷ متر بر روی برج ۱۸ متری قرار گرفته بود که می توانست با ۱۴۴ پره خود، توان ۱۲ کیلووات تولید کند.

بزرگ ترین نیروگاه بادی دنیا با نام Gansu در کشور چین تاسیس شد که تا سال ۲۰۲۰ ظرفیت تولید برق خود را به ۲۰ گیگاوات می رسد. بعد از آن نیروگاه بادی Shepherds با ۸۴۵ مگاوات در ایالت اورگان آمریکا قرار گرفته است. شکل (۵)



شکل (۵) توربین بادی ۶۶۰ کیلووات گروه راه نو

## مزایای توربین بادی ساحلی

- هزینه نیروگاه های بادی ساحلی نسبتا ارزان است که اجازه می دهد نیروگاه های بزرگ تاسیس شوند.
- فاصله کم میان مصرف کننده ها و توربین بادی، باعث افت ولتاژ کمتر روی کابل می شود.
- نصب توربین بادی ساحلی بسیار سریع است و مقیاس نصب آن در حدود ماه است.

## معایب نیروگاه های بادی ساحلی

- یک از مسائل توربین بادی ساحلی این است که به نظر بعضی از مردم چشم انداز طبیعت را خراب می کند.
- توربین های بادی ساحلی در تمام سال به خاطر سرعت کم باد روی خشکی ها، برق تولید نمی کنند.
- صدای توربین بادی می تواند برای مناطق مسکونی مانند صدای ماشین چمن زنی، آلودگی صوتی ایجاد کند.
- حمل و نقل اجزای توربین بادی برای نصب در محل، در توربین های بادی ساحلی به علت طول زیاد سخت تر است.

همان طور که در شکل زیر مشاهده می شود، حمل پره های با طول زیاد در جاده ها با چالش های همراه است. شکل (۶)



شکل (۶) حمل و نقل توربین بادی ساحلی

### توربین بادی آف‌گرید

به طور معمول توربین بادی در یک نیروگاه، توان تولید خود را به داخل شبکه سراسری تزریق می‌کنند که به آن توربین‌های آن‌گرید (On-grid) نیز می‌گویند. در کشور ما ایران شبکه سراسری به همه شهرها و روستاها کشیده شده است و همه از نعمت برق برخوردارند. اما در بسیاری از کشورهای همسایه ایران، مانند عراق و افغانستان یا شبکه برق وجود ندارد یا شبکه پایدار نیست. در این شرایط مصرف‌کننده‌های برق، خود می‌توانند برق مورد نیاز را تولید کنند. این روش تولید برق، دور از شبکه سراسری یا آف‌گرید (Off-grid wind Turbine) نامیده می‌شود. در نتیجه توربین‌های بادی دور از شبکه سراسری یا آف‌گرید در مناطقی موضوعیت پیدا می‌کنند که شبکه سراسری امکان پاسخ‌گویی ندارد و یا هزینه آن بسیار بالاست. کاربردی بودن توربین بادی آف‌گرید به میانگین سالیانه سرعت باد بستگی دارد که باید در آن منطقه حداقل ۴ متر بر ثانیه باشد.

### کاربرد توربین بادی کوچک

امروزه کاربردهای متداول توربین بادی کوچک شامل کاربردهای مسکونی تجاری و صنعتی، استفاده در قایق‌های ماهیگیری و دریانوردی، مزارع و روستاهای دور افتاده، پمپاژ آب و تصفیه آب، نظارت از راه دور، ایستگاه‌های مخابراتی و ایستگاه‌های دریایی می‌باشد. علیرغم تمایل بازار برای استفاده از سیستم باد کوچک در شبکه و محیط شهری، برنامه‌های دور از شبکه همچنان نقش مهمی در مناطق دور افتاده کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه دارند. بیش از ۸۰٪ تولید کنندگان توربین بادی کوچک برای برنامه‌های آف‌گرید تولید می‌کنند. در چین، که میلیون‌ها خانوار هنوز فاقد برق هستند، واحدهای آف‌گرید بیش از ۸۵ درصد بازار را تشکیل می‌دهند.

### توربین بادی فراساحلی شناور

چالش اصلی پیش روی بشر امروزی دستیابی به یک سیاره سبز و پایدار است. برای رسیدن به این هدف، انرژی‌های تجدیدپذیر نقش اساسی دارند و تلاش برای نوآوری در این بخش بسیار شدید است. در این مطلب ما بر روی یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر تمرکز خواهیم کرد: انرژی بادی فراساحلی شناور؛ پس تا انتهای این مطلب با ریابو همراه باشید. اول از همه، اجازه دهید تعریف کنیم که انرژی بادی فراساحلی چیست: این انرژی، یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر است که با استفاده از نیروی باد در فراساحل به دست می‌آید، جایی که به دلیل عدم وجود موانع، باد به سرعت بالاتر و ثابت‌تری می‌رسد.

پتانسیل بالای آن، هم در سطح اجتماعی-اقتصادی و هم در سطح زیست محیطی، آن را به یکی از منابع تجدیدپذیر تبدیل می‌کند که نقش مهمی در فرآیند کربن‌زدایی خواهد داشت.

### چرا باد فراساحلی شناور؟

- ✓ نزدیک به ۸۰ درصد از پتانسیل منابع بادی فراساحلی جهان در آب‌های عمیق‌تر از ۶۰ متر است.
- ✓ ۲,۴ میلیارد نفر در ۱۰۰ کیلومتری خط ساحلی زندگی می‌کنند باد فراساحلی شناور می‌تواند انرژی در مقیاس بزرگ را مستقیماً به بازارهای جهانی برساند.
- ✓ باد فراساحلی شناور به طور بالقوه می‌تواند انرژی ۱۲ میلیون خانه در اروپا را تا سال ۲۰۳۰ تامین کند.
- ✓ باد فراساحلی، ضریب ظرفیت بالاتری دارد.

### توربین‌های بادی ما چگونه شناور می‌شوند؟ و چرا در طوفان واژگون نمی‌شوند؟

- ✓ امروزه بیشتر توربین‌های بادی در آب‌هایی با عمق کمتر از ۶۰ متر به کف دریا ثابت می‌شوند.
  - ✓ نسل بعدی توربین‌های بادی فراساحلی طوری طراحی شده‌اند که بیشتر به سمت دریا شناور شوند، جایی که بادهای قوی‌تر هستند، اما عمق آب، طراحی‌هایی که در پایین ثابت هستند را غیراقتصادی می‌کند.
- توربین‌های بادی شناور با خطوط پهلوگیری و لنگرهای متعدد به بستر دریا متصل می‌شوند، تقریباً به همان روشی که یک سکوی نفتی شناور لنگر انداخته می‌شود.
- باد فراساحلی شناور کلید انتقال مراکز پرجمعیت به انرژی پاک است و همچنین به معنای ایجاد هزاران شغل در تولید، نصب و بهره‌برداری بادی است.

### سکوهای شناور برای توربین‌های بادی

انرژی باد فراساحلی شناور مبتنی بر سکوهای شناور برای توربین‌های بادی است. انتخاب یک نوع یا دیگری به شرایط دریا و بستر دریا، بادهای منطقه، اندازه توربین بادی، عمق بنادر، امکانات تولید یا در دسترس بودن و قیمت مواد و تجهیزات بستگی دارد. شکل (۷)



شکل (۷) مطالعات قبلی در مورد نیروی باد دریایی شناور

تابه‌حال، فن‌آوری‌های نیروی باد شناور هنوز در حال تکامل هستند و در مقیاس تجاری به کار گرفته نشده‌اند [۱۳]. با استفاده از نیروی باد شناور دریایی به‌عنوان کلیدواژه در مجموعه Web of Science Core برای جستجو، در مجموع ۸۹۳ مطالعه گزارش شده است. شکل ۲ نقشه دانش هم‌زمانی کلمه کلیدی را نشان می‌دهد که توسط VOSviewer انجام شده است. اندازه گره تعداد کلمات کلیدی را نشان می‌دهد. این کلمات کلیدی با فرکانس بالا به‌شدت مرتبط با تحقیقات نیروی باد شناور به ۵ خوشه تقسیم شدند. این کلمات بیشتر به طراحی ساختاری توربین‌های بادی و دینامیک سیستم مربوط می‌شود و نشان می‌دهد که مطالعات بر روی نیروی باد شناور همچنان بر عملکرد فنی توربین‌های بادی و پایداری زیر سازه‌های شناور متمرکز است. López-Queija و همکاران [۱۴] یک بررسی انتقادی از آخرین فن‌آوری‌های کنترل توربین بادی شناور انجام داد. نتایج آن‌ها نشان داد که کنترل توربین بادی و کنترل ساختاری دو زمینه اصلی تحقیقات کنترلی در آینده هستند. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از تکنیک‌های پیشنهاد شده برای سازه‌های شناور سطح بالا برای سیستم‌های انرژی باد بزرگ‌تر توسط سرگینکو و همکاران انجام شد. [۱۳]. مطالعه آن‌ها بر روی دینامیک سیستم متمرکز شد و نشان داد که منطقه هواپیما بر طراحی یک سکوی نیمه شناور حاکم نیست. کیک آبادی و همکاران [۱۵] مدل یک توربین بادی شناور را به‌روز کرد و شبیه‌سازی‌ها را در حضور اغتشاش اجرا کرد. در مطالعه آن‌ها، روشی با استفاده از کنترل سطح پویا برای دستیابی به پایداری یک توربین بادی شناور توصیف شد. علاوه بر این، چند مطالعه امکان‌سنجی اقتصادی مزرعه بادی دریایی شناور (OWF) را نیز مورد بحث قرار داده‌اند. میهر و همکاران [۱۰] هزینه یکسان شده انرژی (LCOE) پنج توربین بادی شناور دریایی مختلف را تحلیل و مقایسه کرد. آن‌ها نشان دادند که LCOE توربین‌های شناور مستقر در مقیاس بزرگ و در عمق ۵۰ تا ۱۵۰ متر با توربین‌های ثابت پایین قابل مقایسه است. مطالعه‌ای توسط Maienza و همکاران [۱۶] پایداری اقتصادی فناوری جدید را با توسعه یک مدل هزینه چرخه عمر برای OWFs تجزیه و تحلیل کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین  $LCOE_{OWF} = 9.74 \text{ € c/kWh}$  بود که در حد پایینی محدوده معمولی برای یک OWF ثابت پایین بود. در یک مطالعه اخیر، ژانگ و همکاران [۱۷] یک رویکرد یکپارچه برای برآورد LCOE نیروی باد شناور ایجاد کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که طرح کنار هم برای توربین‌های بادی می‌تواند LCOE را کاهش دهد.

### مطالعات قبلی LCA در نیروی بادی شناور دریایی

ارزیابی پتانسیل نیروی باد شناور فراتر از در نظر گرفتن معیار دستیابی به فناوری پایدارتر و برداشت ارزش اقتصادی دوستانه‌تر در فرآیند طراحی است. عملکرد محیطی بهتر در طول عمر آن، این فناوری جدید را به‌ویژه در مورد استقرار در مقیاس بزرگ، رقابتی‌تر خواهد کرد. تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی چرخه زندگی در حال حاضر به یک وظیفه اصلی برای ارزیابی فناوری‌های جدید انرژی تبدیل شده است [۱۸]. ارزیابی چرخه حیات (LCA) یک ابزار قدرتمند برای تعیین کمیت اثرات زیست‌محیطی فناوری‌های انرژی در طول چرخه عمر آن‌ها است. نتایج LCA می‌تواند به ما در درک خروجی محیطی بهینه در مدل تولید انرژی انتخاب شده، اطلاع‌رسانی تصمیمات سیاستی و هدایت توسعه بخش انرژی کمک کند [۱۹].

اثرات زیست‌محیطی انرژی باد به‌طور گسترده بر اساس رویکرد LCA مورد مطالعه قرار گرفته است. یک مرور ادبیات توسط Mendecka و Lombardi [20] تا ۱۴۸ مطالعه مختلف LCA انرژی بادی را گزارش کرد که در میان آن‌ها ۳۲ مطالعه در مورد فناوری‌های فراساحلی بودند. با این وجود تا به امروز تنها ۹ مطالعه LCA در مورد نیروی باد شناور در Web of Science شناسایی شده است. تعداد مطالعات LCA در مورد این موضوع کم است که ممکن است ناشی از توسعه فناوری باشد که هنوز ادامه دارد [۱۳] و داده‌های در دسترس عموم که برای انجام ارزیابی LCA استفاده می‌شود محدود است.

اولین مطالعه LCA در مورد نیروی باد شناور توسط Weinzettel و همکاران انجام شد. [۲۱] در مزرعه بادی با ۴۰ توربین شناور ۵ مگاواتی. نتایج آن‌ها نشان داد که وقتی ضریب ظرفیت بالاتری برای OWF شناور در نظر گرفته شد، اثرات زیست‌محیطی OWF شناور با اثرات OWF معمولی قابل مقایسه بود. بعداً، تحلیلی از انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و عملکرد انرژی یک OWF با ۱۰۰ توربین ۵ مگاواتی و شش طرح مختلف فونداسیون دریایی توسط Raadal و همکاران انجام شد. [۲۲]. تسای و همکاران [۲۳] مزایای زیست‌محیطی استقرار OWF در فواصل مختلف از ساحل و اعماق آب را بر اساس داده‌های موجودی چرخه حیات ایالات متحده (LCI)



مقایسه کرد. در مطالعه آن‌ها ۱۰۰ توربین ۳ مگاواتی در ترکیب با انواع پی‌های دریایی در نظر گرفته شد Elginz و Bas [24]. مطالعه LCA را برای یک سکوی شناور دریایی چندمنظوره که ترکیبی از تولید انرژی باد و موج است، اجرا کردند. چپیندولا و همکاران [۲۵] یک مطالعه مقایسه‌ای برای تأثیرات زیست‌محیطی چرخه زندگی سه مزرعه بادی در مقیاس کوچک در مکان‌های خشکی، کم‌عمق و اعماق آب در تگزاس و ساحل خلیج مجاور انجام داد. وانگ و همکاران [۲۶] انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات را برای توربین‌های بادی ۲ مگاواتی خشکی و شناور، تنها با در نظر گرفتن چرخه حیات خود توربین بادی، بررسی کرد. مطالعه‌ای توسط پوزول و همکاران. [۲۷] چندین شاخص اثرات زیست‌محیطی را برای OWF شناور ۲۴ مگاواتی محاسبه کرد. یلدیز و همکاران [۲۸] نتایج LCA یک توربین بادی شناور نوع بارج ۲ مگاواتی را با نتایج LCA سایر انواع توربین‌های بادی مقایسه کرد. در مطالعه اخیر LCA توسط Garcia-Teruel و همکاران. [۱۱]، اثرات زیست‌محیطی دو OWF شناور بر اساس دو پروژه آزمایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تأثیر استراتژی‌های عملیات و نگهداری (O&M) و انتخاب کشتی بر نتایج LCA برجسته شد.

### هدف و سهم این کار

به‌طور خلاصه، در مطالعات شناور OWF LCA که تا به امروز انجام شده است، چند محدودیت وجود دارد. تعداد مطالعات LCA بر روی OWF های شناور کمتر از فناوری‌های نیروی بادی در خشکی و زمین ثابت است. علاوه بر این، رتبه‌بندی توان توربین‌های بادی در نظر گرفته شده در اکثر مطالعات بیش از ۵ مگاوات نبود و مقیاس مزارع بادی نسبتاً کوچک بود که ممکن است روندهای آینده بازار را نشان ندهد. علاوه بر این، تحقیقات روی OWF های شناور در چین دیر آغاز شد. اولین پروژه مهندسی بادی شناور نمایشی که به‌طور مشترک توسط شرکت China Three Gorges و گروه انرژی هوشمند Mingyang توسعه داده شد، به‌تازگی در سال ۲۰۲۱ به شبکه متصل شد؛ بنابراین، مطالعات LCA موجود ذکر شده در بالا بر اساس پروژه‌های آزمایشی در خارج از کشور بود. داده‌های پس‌زمینه مورد استفاده در این مطالعات برای انجام LCA بر اساس پایگاه‌های اطلاعاتی چرخه حیات خارجی، مانند پایگاه داده ecoinvent بود. بیشتر داده‌های LCI موجود در این پایگاه‌های داده بر اساس موارد خارجی جمع‌آوری شده‌اند، بنابراین نتایج LCA مبتنی بر این داده‌ها ممکن است نماینده OWF های شناور در چین نباشد.

برای رسیدگی به این شکاف‌ها، یک LCA از OWF شناور انجام شد که در آن داده‌های LCI چین اولویت‌بندی شدند، اگرچه همان پارامترهای مواد و فرآیند را می‌توان در پایگاه‌های داده دیگر یافت. این تجزیه و تحلیل با استفاده از یک مطالعه موردی که در آن ۱۰۰ توربین بادی ۶،۷ مگاواتی از دیدگاه استقرار در مقیاس بزرگ در نظر گرفته شد، انجام شد. باید n باشد.

اشاره کرد که روند فعلی در صنعت توربین‌های بادی به سمت توربین‌های ۵-۱۰ مگاواتی است [۲۹]. اگرچه توربین‌هایی با توان بالاتر تولید شده‌اند، اما با توجه به در دسترس بودن داده‌ها عدم قطعیت پارامترهای ورودی و داده‌های پس‌زمینه پس از به دست آوردن نتایج LCA برای مطالعه موردی پایه به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. علاوه بر این، از دیدگاه استقرار در مقیاس بزرگ در دهه آینده، تحلیل سناریو برای بحث در مورد تأثیر مرتبط با مسیرهای مختلف تولید فولاد بر انتشار تجمعی GHG از فرآیند بالادست OWF شناور انجام شد.

در ادامه مقدمه، روش‌های ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی استقرار نیروی باد شناور در بخش ۲ مورد بحث قرار می‌گیرند. ارزیابی LCA با انجام یک مطالعه موردی در بخش ۳ به تفصیل شرح داده شده است. نتایج ارزیابی به تفصیل در بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. ۴. نتایج اساسی در بخش ۵ خلاصه می‌شود. در نهایت، برخی از توصیه‌های سیاست برای توسعه پایدارتر نیروی باد شناور در بخش ۶ آورده شده است.

این مطالعه بینش جدیدی در مورد مزایای زیست‌محیطی برای استقرار OWF شناور ارائه می‌دهد. شرایط فرآیند و رویه‌های مربوطه در این مطالعه LCA جهانی هستند، اگرچه تجزیه و تحلیل LCA بر اساس یک مورد جداگانه انجام شد. مطالعه آینده LCA در مورد نیروی باد شناور را می‌توان برای اعمال بر این اساس گسترش داد، زیرا فناوری به تکامل خود ادامه می‌دهد و داده‌های اولیه بیشتری در دسترس قرار می‌گیرند. علاوه بر این، نتایج این مطالعه به مؤلفه‌ها یا فرآیندهایی اشاره می‌کند که منجر به اثرات زیست‌محیطی بزرگ در سیستم می‌شود، بنابراین توسعه طرح‌های بهبود یافته برای OWF های شناور با بار زیست‌محیطی کمتر را هدایت می‌کند.

## تولید و حمل‌ونقل قطعات

این مرحله شامل ساخت و حمل‌ونقل اجزای مختلف در OWF شناور بود. برق تولیدشده توسط توربین‌های بادی دریایی به جریان مستقیم ولتاژ بالا تبدیل شده و سپس به ساحل منتقل می‌شود. این رویکرد پیشرو فعلی برای اتصال نیروگاه‌های بادی دور از ساحل است [۴۳]. در نتیجه، اجزای موجود در OWF شناور شامل توربین‌های بادی، پایه‌های شناور (شناورها) و یک سیستم انتقال نیرو بود. توربین‌های بادی تا حد زیادی بین مزارع بادی دریایی و خشکی مشابه هستند. هر توربین بادی عمدتاً شامل چهار قسمت روتور، ناسل، برج و کابل انتقال بود. فولاد، مس، الیاف شیشه و رزین مواد اولیه اصلی مورد استفاده برای ساخت این قطعات بودند. مواد خاص و مقادیر آن‌ها با توجه به داده‌های تأمین‌کننده برآورد شد [۳۷]. شناورها که برای استقرار توربین بادی در اعماق مختلف آب ضروری هستند [۴۴]، شامل یک سکوی شناور و یک سیستم پهلوگیری بودند. سکوی نیمه شناور نسبت به سایر انواع سکوی شناور اقتصادی‌تر است [۱۶]، بنابراین در این مطالعه مورد توجه قرار گرفت. این سکو در عمق آب ۶۰ تا ۸۰ متر [۳۶] اعمال شد که وزن و مواد آن بر اساس یک سند عمومی برآورد شد [۴۵]. در این مطالعه به‌عنوان سازه فولادی با وزن ۲۷۵۰ تن مدل‌سازی شد. سیستم پهلوگیری شامل زنجیر پهلوگیری و لنگرها بود. وزن هر طول زنجیر ۰٫۳۸ تن در متر تخمین زده شد [۴۶]. هر سکوی نیمه شناور مجهز به چهار زنجیر پهلوگیری ۱۹۵ متری و چهار لنگر تعبیه‌شده با کشش ۵ تنی بود [۳۶]. سیستم انتقال نیرو شامل یک پست دریایی و کابل‌های زیردریایی بود. پست فراساحلی شامل سازه ژاکت و تجهیزات الکتریکی بالایی بود. کابل‌های زیردریایی شامل کابل‌های بین آرایه‌ای (۳۳ کیلوولت) و کابل صادراتی (۱۳۲ کیلوولت) بود. ۲۰ کیلومتر کابل صادراتی و ۴۵ کیلومتر کابل بین آرایه‌ای در نظر گرفته شد. مواد خاص و مقادیر آن‌ها برای سیستم با ارجاع به داده‌های ارائه‌شده توسط Elginco [24] و Bas برآورد شد. تمام اجزای توربین‌های بادی پس از تولید در محل تولید تأمین‌کننده، قرار بود به بندر مونتاژ منتقل شوند. شناورها عموماً در یک کارخانه کشتی‌سازی ساخته می‌شوند [۴۷]؛ بنابراین، فرض بر این بود که این زیرساخت‌ها مستقیماً توسط بارج به بندر مونتاژ کشیده می‌شوند؛ و فرض بر این بود که هر قسمت از سیستم انتقال نیرو مستقیماً توسط کامیون و بارج به محل نصب منتقل می‌شود. علاوه بر این، حمل‌ونقل برای مواد خام نیز در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن مسافت و وزن اجزاء، تمامی حمل‌ونقل‌های انجام‌شده در این مرحله برحسب tkm تقریبی شدند.

## ساخت مزرعه بادی

این مرحله عمدتاً شامل نصب توربین‌های بادی شناور و پست‌های دریایی بود. علاوه بر این، کابل‌کشی زیردریایی گنجانده شد. فرض بر این بود که توربین‌های بادی شناور ابتدا در بندر مونتاژ شده و به‌طور یکپارچه به OWF شناور بکسل شده‌اند. سپس نصب پست دریایی و کابل‌های زیردریایی در OWF شناور انجام شد.

روش‌های نصب توربین‌های بادی شناور شامل استفاده از تأسیسات نفت کوره مانند کشتی‌های جک‌آپ و یدک‌کش‌ها بود. زمان عملیات برای هر کشتی جک‌آپ برای جمع‌آوری و انتقال یک توربین به‌طور کلی یک روز بود [۴۸]. در این مطالعه فرض شد که پنج کشتی جک‌آپ به مدت ۲۴ ساعت در روز کار می‌کنند. مصرف روغن سوخت برای کارکرد یک کشتی ۱۷۰ لیتر در ساعت محاسبه شد [۲۳]. علاوه بر این، حمل‌ونقل برای کشتی‌های جک‌آپ در این مرحله گنجانده شد. هر کشتی جک‌آپ توسط دو یدک‌کش یدک می‌کشید. مصرف نفت کوره برای یک یدک‌کش ۵۹۶ لیتر در ساعت محاسبه شد [۱۱]. همان‌طور که در بالا ذکر شد، پست دریایی شامل دو قسمت از جکت بود.

ساختار و تجهیزات پست در بالای آن. در این مطالعه، فرآیندهای نصب برای پست مشابه با توربین بادی در نظر گرفته شد. علاوه بر این، ۵۵۱۷ مترمکعب حفاری با حفار هیدرولیک برای آماده‌سازی بستر دریا برآورد شد و ۳۹۹۰ تن سنگریزه برای حفاظت از آب شستگی استفاده شد [۲۴]. گذاشتن کابل‌های زیردریایی شامل پاک‌سازی مسیر، اتصال و نصب در میدان بود. حجم حفاری ترانش‌ها برای کابل‌های بین آرایه‌ای و صادراتی به ترتیب ۰٫۶ مترمکعب و ۰٫۸ مترمکعب در هر متر کابل برآورد شد [۲۴].

## O&M

مفهوم O&M در نظر گرفته شده در این مطالعه ای بود که توربین ها را می توان برای عملیات تعمیر و نگهداری عمده و جایگزینی اجزای اصلی جدا کرد و به ساحل کشاند [۱۱]. طول عمر ۲۵ سال برای این O&M شناور در نظر گرفته شد [۳۶]. دو نوع خدمات برای تعمیر و نگهداری O&M شناور در نظر گرفته شد: تعمیر و نگهداری و تعمیر و نگهداری اصلاحی.

با توجه به نگهداری پیشگیرانه، فرکانس در سال ۲،۵ روز برای هر توربین بادی، ۷،۵ روز برای پست و ۱۴ روز برای کابل ها در نظر گرفته شد. هر روز شامل ۲۴ ساعت زمان کار در نظر گرفته شد [۲۳]. با توجه به تعمیر و نگهداری اصلاحی، جایگزینی اجزای اصلی شکست خورده یکی از رایج ترین وظایف است. در این مطالعه، ژنراتور جزء هسته توربین در نظر گرفته شد که در صورت بروز خرابی باید به طور کامل تعویض شود. خرابی در سایر اجزاء قابل تعمیر بدون تعویض در نظر گرفته شد [۲۳]. تعداد ژنراتورهایی که نیاز به تعویض کامل برای O&M شناور در طول عمر آن داشتند، چهار و میزان خرابی سالانه ۰،۹۹۹ خرابی در سال در نظر گرفته شد [۱۱]. علاوه بر این، زنجیر پهلویی و لنگرها به جای تعمیر، جایگزین شده بودند. در مجموع ۲۴ زنجیره پهلویی و ۲۵ لنگر در طول عمر O&M شناور نیاز به تعویض داشتند و میزان خرابی آن ها به ترتیب ۰،۱۴۸ و ۰،۱۵۷ خرابی در سال در نظر گرفته شد [۱۱].

## فعالیت از رده خارج کردن

در پایان عمر، تمام اجزای توربین های بادی و قسمت بالای پست برداشته می شوند، در حالی که کابل های زیر دریایی و سیستم های پهلویی در کف دریا باقی می ماند. در این مطالعه از کار انداختن به عنوان یک فرآیند نصب معکوس در نظر گرفته شد؛ بنابراین، مصرف انرژی برای جداسازی قطعات مانند فرآیند مونتاژ بود. نرخ بازیابی مواد در داده های پس زمینه تنظیم شده است، بنابراین مدل بازیافت در این مرحله در نظر گرفته نشده است. فلزات فولاد، چدن، مس، آلومینیوم و سرب ۹۰ درصد بازیافت شدند [۲۳]. بارهای زیست محیطی فعالیت های تصفیه مواد بعدی در این مطالعه گنجانده نشده است زیرا در نظر گرفته شده است که این بارها باید به استفاده کنندگان از مواد بازیافتی و سیستم های دفع زباله اختصاص داده شود [۲۲].

## ارزیابی اثرات زیست محیطی

به طور کلی، یکی از چندین روش ارزیابی تاثیر چرخه عمر (LCIA) مانند [49] (ReCiPe (H)، برای انجام ارزیابی های تاثیر انتخاب می شود. شاخص های اثرات زیست محیطی مانند تغییرات آب و هوا، اسیدی شدن و کاهش منابع به طور کلی در این روش های LCIA گنجانده شده است. موجودی جمع آوری شده در مرحله قبل ابتدا به نتایج جمع آوری شده برای مصرف منابع مختلف یا انتشار آلاینده تبدیل می شود. سپس نتایج به عنوان محاسبه خواهد شد.

نمرات شاخص مربوطه پس از تعیین روش [50] LCIA فرآیند محاسبه امتیازات شاخص را می توان با استفاده از معادله زیر توصیف کرد: (۲)

که در آن،  $E_i$  امتیاز شاخص  $i$  است.  $E_i$  نشان دهنده مصرف منبع  $i$  یا انتشار آلاینده  $i$  است (یعنی نتایج انباشته از تبدیل موجودی)؛ و  $CF_{ij}$  ضریب معادل پارامتر  $i$  به نشانگر  $j$  (یعنی فاکتور مشخصه) است.

روش LCIA انتخاب شده در این مطالعه [51] CML 2002 بود که به دلیل عدم تفاوت منطقه ای در ضریب مشخصه هر شاخص، تطبیق پذیری قوی دارد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل چند شاخص برای درک عملکرد زیست محیطی RES در ابعاد چندگانه ضروری است [۵۲]؛ بنابراین، هفت دسته تاثیر در این مطالعه انتخاب شدند. جزئیات در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که [53] eFootprint که توسط چین توسعه داده شد و اولین سیستم ارزیابی آنلاین LCA در جهان است، برای انجام تبدیل موجودی و محاسبه شاخص در این مطالعه استفاده شد.

## محدودیت ها زیست محیطی

اثرات زیست‌محیطی مورد بحث در این مطالعه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر انتشار آلاینده‌های مضر ناشی از مصرف منابع و انرژی در تمام مراحل چرخه زندگی یک OWF شناور بود. با این حال، اثرات زیست‌محیطی استقرار یک OWF شناور به موارد ناشی از مصرف منابع و انرژی محدود نمی‌شود. اثرات ساخت و ساز مزرعه بادی و بهره‌برداری بر محیط اعماق دریا و ویژگی‌های فیزیکی جوی در محدوده ارزیابی این مطالعه لحاظ نشده است. به عنوان مثال، زیرساخت‌های سخت وارد شده به محیط دریایی ممکن است اثرات اکولوژیکی متفاوتی را به همراه داشته باشد [۶۱]. اثر بیداری ناشی از عملکرد توربین بادی ممکن است بر دمای محلی، بارندگی و سرعت باد تأثیر بگذارد. برای ارزیابی جامع تر و چند بعدی اثرات زیست‌محیطی، این اثرات فیزیکی و اکولوژیکی بر محیط زیست دریایی باید در سیستم ارزیابی در آینده گنجانده شود.

روش LCA مورد استفاده در این مطالعه مبتنی بر فرآیند بود. این روش سنتی LCA تنها می‌تواند لایه محدودی از ورودی‌های مواد و بارهای محیطی مرتبط را به دلیل محدودیت در داده‌ها و حجم کار ردیابی کند [۶۲]؛ یعنی، این روش تنها می‌تواند برخی از مسیرهای زنجیره تأمین مرتبط را در یک سیستم اقتصادی در نظر بگیرد. یک روش ترکیبی LCA می‌تواند در تحقیقات آینده برای جبران این کمبود استفاده شود. روش LCA ترکیبی LCA مبتنی بر فرآیند سنتی را با تجزیه و تحلیل ورودی-خروجی توسعه یافته محیطی ترکیب می‌کند. به طور کلی، LCA ترکیبی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد [۶۲]: (۱) زنجیره تولید یک محصول بر اساس LCA مبتنی بر فرآیند تقسیم می‌شود و موجودی مواد ورودی مستقیم برای هر زنجیره ساخته می‌شود، (۲) ماتریس معکوس مدل ورودی-خروجی لئونتیف برای محاسبه عوامل تنش محیطی تجمعی بخش‌های مربوطه مربوط به مواد ورودی مستقیم استفاده می‌شود. ماتریس معکوس لئونتیف تمام مسیرهای زنجیره تأمین را در سیستم اقتصادی در نظر می‌گیرد، بنابراین مرزهای سیستم LCA سنتی را گسترش می‌دهد [۶۳] و (۳) اثرات زیست‌محیطی چرخه عمر سیستم را می‌توان از طریق موجودی ورودی مواد مستقیم و انباشته محاسبه کرد. عوامل تنش محیطی بخش‌های مربوطه برای هر ماده. علاوه بر این، روش مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت داده‌های پیش زمینه برای شناسایی تعاملات احتمالی بین پارامترها مناسب نیست. تحلیل حساسیت جهانی مبتنی بر واریانس ممکن است در آینده برای اصلاح بیشتر راه حل عدم قطعیت داده‌های پیش زمینه اعمال شود. این رویکرد از خواص لحظه دوم برای محاسبه شاخص حساسیت یک متغیر استفاده می‌کند [۶۴]. علاوه بر این، چاکرابورتی و همکاران [۶۵]. یک رویکرد تحلیل حساسیت ترکیبی همراه با بسط تابع همبسته چند جمله‌ای با تحلیل حساسیت مبتنی بر توزیع پیشنهاد کرد. این روش ترکیبی می‌تواند تجزیه و تحلیل حساسیت سیستم را که متضمن متغیرهای تصادفی وابسته و مستقل بدون نیاز به تغییر خاصی است، انجام دهد.

داده‌های پیش زمینه مورد استفاده برای انجام این مطالعه LCA عمدتاً از ادبیات و گزارش‌های مرتبط بود. داده‌های اولیه از پروژه‌های واقعی برای کیفیت نتایج LCA بسیار مهم هستند. با این حال، آخرین داده‌های اولیه جمع‌آوری نشده‌اند، زیرا نیروی بادی شناور داخلی به‌تازگی وارد مرحله نمایش مهندسی شده است. علاوه بر این، هیچ تحقیق مرتبطی در چین انجام نشده است؛ بنابراین، نتایج LCA این مطالعه تنها می‌تواند یک مرجع کلی ارائه دهد. با بهبود مستمر فناوری نیروی باد دریایی شناور، باید تا حد امکان داده‌های پایه جمع‌آوری شود تا وضعیت واقعی سیستم را منعکس کند.

## نتیجه گیری ها

در این مطالعه، هفت شاخص تأثیر زیست‌محیطی برای یک OWF با ۱۰۰ توربین ۶٫۷ مگاواتی با استفاده از روش LCA محاسبه شد و داده‌های پس‌زمینه عمدتاً از پایگاه داده چرخه حیات هسته چین (CLCD) بود. از دیدگاه استقرار جهانی، اثرات مسیرهای مختلف تولید فولاد بر انتشار تجمعی گازهای گلخانه‌ای OWF شناور مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. محدودیت‌های این مطالعه مورد بحث قرار گرفت. نتایج اصلی را می‌توان به شرح زیر گرفت:

مطالعه موردی نشان داد که نیروی باد شناور بیشترین تأثیر را بر اتروفیکاسیون دارد. مس به شدت بر این دسته تأثیر می‌گذارد. تغییر  $\pm 20$  در این پارامتر منجر به تغییر  $\pm 13$  در امتیاز شاخص شد؛ و فولاد پارامتر اصلی موثر بر عملکرد زیست‌محیطی OWF شناور بود. تغییر  $\pm 20$  در این پارامتر منجر به تغییر  $\pm 3$  تا  $\pm 15$  درصد در امتیاز شاخص هر دسته محیطی شد. علاوه بر این، ردپای کربن

این OWF شناور ۲۵,۷۶ گرم CO<sub>2</sub>-eq/kWh بود. این نتیجه در مقایسه با سایر روش های تولید انرژی تجدیدپذیر نسبتاً خوب بینانه است.

نیروی بادی شناور دریایی در سال ۲۰۲۶ به سرعت رشد خواهد کرد و ظرفیت نصب شده جمعی تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۱۶٫۶ گیگاوات خواهد رسید. تأثیر مسیبه های تولید فولاد بر ردپای کربن نیروی باد شناور بسیار زیاد است. تحت کوره بلند و مسیبه های کوره اکسیژن پایه، انتشار جمعی گازهای گلخانه ای از فرآیند بالادست نیروی باد شناور تا سال ۲۰۳۰ به ۴,۱۱ Mt CO<sub>2</sub>-eq خواهد رسید. اگر مسیبه های کوره قوس الکتریکی دنبال شود، مقدار آن تنها تا ۱,۲۳ Mt خواهد بود. CO<sub>2</sub>-eq. آسیا و آمریکای شمالی بازارهای اصلی انرژی باد شناور پس از سال ۲۰۲۵ خواهند بود، با این حال، میانگین شدت انتشار گازهای گلخانه ای تولید فولاد در آسیا بسیار بالاتر از آمریکای شمالی است و حدود ۱,۸۳ تن CO<sub>2</sub>-eq/t است. ارزش در آمریکای شمالی به دلیل نسبت بالای تولید EAF در صنعت فولاد آن، در حدود ۰,۹۶ تن CO<sub>2</sub>-eq/t نسبتاً پایین است.

اثرات زیست محیطی مورد بحث در این مطالعه، اثرات ناشی از مصرف منابع و انرژی در تمام مراحل چرخه حیات OWF شناور بود. اثرات فیزیکی و زیست محیطی در محدوده ارزیابی در نظر گرفته نشد. علاوه بر این، روش LCA مورد استفاده در این مطالعه تنها می تواند لایه محدودی از ورودی های مواد و بارهای محیطی مرتبط را به دلیل محدودیت در داده ها و حجم کار ردیابی کند. یک روش ترکیبی LCA می تواند در تحقیقات آینده برای جبران این کمبود استفاده شود؛ و روش مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت داده های پیش زمینه برای شناسایی تعاملات احتمالی بین پارامترها مناسب نیست. تحلیل حساسیت جهانی مبتنی بر واریانس ممکن است در آینده برای اصلاح بیشتر راه حل عدم قطعیت داده های پیش زمینه اعمال شود. علاوه بر این، داده های پیش زمینه مورد استفاده برای انجام این مطالعه LCA عمدتاً از ادبیات و گزارش های مرتبط بود. داده های پایه بیشتری باید در آینده جمع آوری شود تا قابلیت اطمینان LCA بهبود یابد.

### پیامدهای سیاسی

فن آوری های نیروی باد دریایی شناور به سرعت در حال توسعه هستند OWF. شناور مقیاس بزرگ تر در دهه آینده در آسیا، اروپا و آمریکای شمالی مستقر خواهد شد. مطالعات نشان داده اند که انتشار گازهای گلخانه ای چرخه زندگی در استقرار در مقیاس بزرگ نسبتاً کم است. از این نظر، نیروی بادی شناور در ارتقای تحول سیستم های انرژی رقابتی است. با این حال، در سایر مقوله های زیست محیطی مانند اتروفیکاسیون، نمی توان اثرات منفی را نادیده گرفت. علاوه بر این، تفکر چرخه حیات بر این نکته تأکید دارد که توسعه پایدار یک سیستم باید فعالیت های تولید بالادستی را در نظر بگیرد؛ بنابراین، برخی از توصیه های سیاستی برای توسعه پایدارتر نیروی بادی دریایی شناور در زیر آورده شده است:

صنعت نیروی باد دریایی شناور باید روش هایی را برای بازیافت کابل های زیردریایی توسعه دهد. مس ماده اولیه اصلی مورد استفاده برای کابل ها است و ساخت قطعات مسی منجر به افزایش اتروفیکاسیون می شود. خوشبختانه مس این پتانسیل را دارد که به طور مداوم بدون به خطر انداختن ویژگی های آن بازیافت شود. اگر مس بازیافت شود، عملکرد زیست محیطی OWF شناور بهبود می یابد.

علاوه بر این، مسیبه های تولید فولاد به شدت بر ردپای کربن نیروی باد شناور تأثیر می گذارد. بخش فولاد باید فرآیند تولید را به طور مداوم بهینه کند تا آن را تمیزتر کند. سهم مسیبه های تولید کوره قوس الکتریکی (EAF) در کل صنعت فولاد را می توان افزایش داد و فناوری تولید EAF را می توان بیشتر بهبود بخشید، به طوری که میانگین انتشار گازهای گلخانه ای - شدت تولید فولاد را می توان بیشتر کاهش داد و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه ای را به حداقل رساند OWF. شناور در مرحله ساخت. فرآیند بازسازی توربین بادی نیز می تواند تأثیر مثبتی داشته باشد. فولاد ۸۰ درصد از اجزای توربین بادی را تشکیل می دهد. اگر هر جزء برای رسیدن به مشخصات اولیه یا فراتر از آن بازسازی شود، نه تنها زمان تحویل تجهیزات را کوتاه می کند، بلکه بازگشت سرمایه (ROI) را نیز بهبود می بخشد.

علاوه بر این، اگر میزان استفاده از ضایعات فولادی به عنوان ماده خام در مسیبه های تولید EAF افزایش یابد، شدت انتشار گازهای گلخانه ای از فرآیند تولید می تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد.

از سطح ملی، هر یک از کشورها باید به‌طور فعال نوآوری فناوری و تبدیل به فناوری‌های کم‌کربن را ترویج کنند. تسریع در کربن‌زدایی شبکه برق یکی از مهمترین ابزارها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرآیند تولید است. مناطقی با استقرار انرژی باد شناور در مقیاس بزرگ در آینده می‌توانند سهم سوخت پاک مورد استفاده در تمام مراحل چرخه حیات را افزایش دهند. دولت‌ها می‌توانند مشوق‌های مالی را برای تقویت توسعه و اجرای فن‌آوری‌های پاک‌سازی مانند فن‌آوری‌های اتلاف حرارت و بازیافت انرژی پسماند اتخاذ کنند.

برای بهبود سیستم ارزیابی اثرات زیست‌محیطی باید داده‌های پایه بیشتری جمع‌آوری شود. یک سیستم پایش محیط زیست دریایی جامع تر باید ایجاد شود تا بتوان خطرات اکولوژیکی را ارزیابی کرد. روش‌های ارزیابی باید بیشتر اصلاح شوند تا عملکرد زیست‌محیطی OWFهای شناور را در ابعاد بیشتری در آینده منعکس کنند.

## References

1. O. Ellabban, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renew Sustain Energy Rev*, 39 (2014), pp. 748-764
2. J.C. Feng, J. Yan, Y. Wang, Z. Yang, S. Zhang, S. Liang, *et al.* Methane mitigation: learning from the natural marine environment *Innovation*, 3 (2022), p. 100297
3. N. Watts, M. Amann, N. Arnell, S. Ayeb-Karlsson, K. Belesova, M. Boykoff, *et al.*. The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate *Lancet*, 394 (2019), pp. 1836-1878
4. J.D. Fonseca, J.M. Commenge, M. Camargo, L. Falk, I.D. Gil. Sustainability analysis for the design of distributed energy systems: a multi-objective optimization approach. *Appl Energy*, 290 (2021), p. 116746
5. R. Madurai Elavarasan, R. Pugazhendhi, T. Jamal, J. Dyduch, M.T. Arif, N. Manoj Kumar, *et al.* Envisioning the UN Sustainable Development Goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the post-COVID-19 world. *Appl Energy*, 292 (2021), p. 116665
6. J.H. Williams, A. DeBenedictis, R. Ghanadan, A. Mahone, J. Moore, W.R. Morrow 3rd, *et al.* The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity. *Science*, 335 (2012), pp. 53-59
7. IEA. Renewables 2021-analysis and forecast to 2026. 2021.
8. IRENA. Offshore renewables: an action agenda for deployment. 2021.
9. Myhr, C. Bjerkseter, A. Ågotnes, TA. Nygaard. Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective. *Renew Energy*, 66 (2014), pp. 714-728
- A. Garcia-Teruel, G. Rinaldi, P.R. Thies, L. Johanning. Life cycle assessment of floating offshore wind farms: an evaluation of operation and maintenance. *Appl Energy*, 307 (2022), p. 118067
10. GWEC. Global offshore wind report 2021. 2021.
11. N.Y. Sergiienko, L.S.P. da Silva, E.E. Bachynski-Polić, B.S. Cazzolato, M. Arjomandi, B. Ding
12. Review of scaling laws applied to floating offshore wind turbines. *Renew Sustain Energy Rev*, 162 (2022), p. 112477
13. J. López-Queija, E. Robles, J. Jugo, S. Alonso-Quesada. Review of control technologies for floating offshore wind turbines. *Renew Sustain Energy Rev*, 167 (2022), p. 112787

14. J. Keighobadi, H. Mohammadian KhalafAnsar, P. Naseradinmousavi .Adaptive neural dynamic surface control for uniform energy exploitation of floating wind turbine .Appl Energy, 316 (2022), p. 119132
- B. Maienza, A.M. Avossa, F. Ricciardelli, D. Coiro, G. Troise, C.T. Georgakis .A life cycle cost model for floating offshore wind farms .Appl Energy, 266 (2020), p. 114716
15. L. Zhang, Y. Li, W. Xu, Z. Gao, L. Fang, R. Li, *et al.* .Systematic analysis of performance and cost of two floating offshore wind turbines with significant interactions .Appl Energy, 321 (2022), p. 119341
16. Rashedi, I. Sridhar, KJ. Tseng .Life cycle assessment of 50MW wind farms and strategies for impact reduction .Renew Sustain Energy Rev, 21 (2013), pp. 89-101
17. S.M. Jordaan, C. Combs, E. Guenther .Life cycle assessment of electricity generation: a systematic review of spatiotemporal methods .Adv Appl Energy, 3 (2021), p. 100058
- C. Mendecka, L. Lombardi .Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: a review of simplified models and harmonization of the results .Renew Sustain Energy Rev, 111 (2019), pp. 462-480
18. J. Weinzettel, M. Reenaas, C. Solli, E.G. Hertwich .Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine .Renew Energy, 34 (2009), pp. 742-747
19. H.L. Raadal, B.I. Vold, A. Myhr, T.A. Nygaard .GHG emissions and energy performance of offshore wind power .Renew Energy, 66 (2014), pp. 314-324
20. L. Tsai, J.C. Kelly, B.S. Simon, R.M. Chalal, G.A. Keoleian
21. Life cycle assessment of offshore wind farm siting: effects of locational factors, lake depth, and distance from shore .J Ind Ecol, 20 (2016), pp. 1370-1383
22. N. Elginöz, B. Bas .Life cycle assessment of a multi-use offshore platform: combining wind and wave energy production .Ocean Eng, 145 (2017), pp. 430-443
23. J. Chipindula, V. Botlaguduru, H. Du, R. Kommalapati, Z. Huque .Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in Texas .Sustainability, 10 (2018), p. 2022
24. S. Wang, S. Wang, J. Liu .Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines .J Cleaner Prod, 210 (2019), pp. 804-810
25. B. Poujol, A. Prieur-Vernat, J. Dubranna, R. Besseau, I. Blanc, P. Pérez-López .Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data .J Ind Ecol, 24 (2020), pp. 248-262
26. N. Yildiz, H. Hemida, C. Baniotopoulos .Life cycle assessment of a barge-type floating wind turbine and comparison with other types of wind turbines .Energies, 14 (2021), p. 5656
27. J.P. Jensen .Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines .Wind Energy, 22 (2019), pp. 316-326
28. Standardization ECf. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework (ISO 14040:2006). 2006.
29. Standardization ECf. Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines (ISO 14044:2006). 2018.
30. M. Pan, J. Sikorski, J. Akroyd, S. Mosbach, R. Lau, M. Kraft .Design technologies for eco-industrial parks: from unit operations to processes, plants and industrial networks .Appl Energy, 175 (2016), pp. 305-323
31. Farina, A. Anctil .Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally .Resour Conserv Recycl, 176 (2022), p. 105938
32. Hasanbeigi A. Steel climate impact:an international benchmarking of energy and CO2 intensities. 2022.

33. KOWL. Kincardine offshore windfarm project - Section 36C variation environmental statement: Tech. rep. 2017.
34. B. Zhao, C. Shuai, P. Hou, S. Qu, M. Xu .Estimation of unit process data for life cycle assessment using a decision tree-based approach *Environ Sci Technol*, 55 (2021), pp. 8439-8446
- D. Herrmann, W. Dewulf, M. Hauschild, A. Kaluza, S. Kara, S. Skerlos .Life cycle engineering of lightweight structures .*CIRP Ann*, 67 (2018), pp. 651-672
35. CLCD. CLCD-the basic database of life cycle assessment in China. <https://www.ike-global.com/>
36. Ecoinvent. Ecoinvent - the world's most consistent & transparent life cycle inventory database. <https://ecoinvent.org/>
37. M. Jansen, C. Duffy, T.C. Green, I. Staffell .Island in the Sea: The prospects and impacts of an offshore wind power hub in the North Sea .*Adv Appl Energy*, 6 (2022), p. 100090
38. X. Sun, D. Huang, G. Wu .The current state of offshore wind energy technology development *Energy*, 41 (2012), pp. 298-312
39. Energy FW. Windfloat gen 3 — principle power – quest floating wind energy. <https://www.principlepower.com/windfloat2020>
40. Statoil. Hywind Scotland pilot park project - environmental statement: Tech. Rep. <https://tethys.pnnl.gov/publications/hywind-scotland-pilot-park-environmental-statement2015>
41. L. Castro-Santos, V. Diaz-Casas, R.Y. Brage .The importance of the activity costs in a shipyard: a case study for floating offshore wind platforms .*Ships Offshore Struct*, 15 (2020), pp. 53-60
42. Arvesen, C. Birkeland, E.G. Hertwich .The importance of ships and spare parts in LCAs of offshore wind power .*Environ Sci Technol*, 47 (2013), pp. 2948-2956
43. M. Suvarna, A. Katragadda, Z. Sun, Y.B. Choh, Q. Chen, P. Ps, *et al.* .A machine learning framework to quantify and assess the impact of COVID-19 on the power sector: An Indian context .*Adv Appl Energy*, 5 (2022), p. 100078
44. R.E. Kirchain Jr., J.R. Gregory, E.A. Olivett .Environmental life-cycle assessment
45. *Nat Mater*, 16 (2017), pp. 693-697
46. J. Guinée .Handbook on life cycle assessment — operational guide to the ISO standards
47. *Int J Life Cycle Assess*, 6 (2001), p. 255
48. Wade, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, P. Sinha .The Product Environmental Footprint (PEF) of photovoltaic modules-Lessons learned from the environmental footprint pilot phase on the way to a single market for green products in the European Union .*Prog Photovolt Res Appl*, 26 (2018), pp. 553-564
49. IKE Environmental Technology Co. L. eFootprint—the world's first online LCA evaluation system. <http://v2.efootprint.net/>
50. A.W. Sleeswijk, L.F. van Oers, J.B. Guinee, J. Struijs, M.A. Huijbregts .Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000 .*Sci Total Environ*, 390 (2008), pp. 227-240
51. Y. Yao, Y. Chang, E. Masanet .A hybrid life-cycle inventory for multi-crystalline silicon PV module manufacturing in China .*Environ Res Lett*, 9 (2014), p. 114001
52. N.Y. Amponsah, M. Trolborg, B. Kington, I. Aalders, R.L. Hough .Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: a review of lifecycle considerations .*Renew Sustain Energy Rev*, 39 (2014), pp. 461-475



53. H.L. Raadal, L. Gagnon, I.S. Modahl, OJ. Hanssen .Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power .Renew Sustain Energy Rev, 15 (2011), pp. 3417-3422
54. Nugent, BK. Sovacool .Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: a critical meta-survey .Energy Policy, 65 (2014), pp. 229-244
55. Lennon, M. Lunardi, B. Hallam, P. Dias .The aluminium demand risk of terawatt photovoltaics for net zero emissions by 2050 .Nature Sustain, 5 (2022), pp. 357-363
56. J. Oda, K. Akimoto, T. Tomoda .Long-term global availability of steel scrap Resour Conserv Recycl, 81 (2013), pp. 81-91
57. J.C. Feng, J. Liang, Y. Cai, S. Zhang, J. Xue, Z. Yan .Deep-sea organisms research oriented by deep-sea technologies development .Sci Bull, 67 (2022), pp. 1802-1816
58. S. Suh, M. Lenzen, G.J. Treloar, H. Hondo, A. Horvath, G. Huppes, *et al.* .System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches .Environ Sci Technol, 38 (2004), pp. 657-664
59. B. Su, B.W. Ang .Multiplicative decomposition of aggregate carbon intensity change using input–output analysis .Appl Energy, 154 (2015), pp. 13-20
60. I.M. Sobol, Y.L. Levitan .On the use of variance reducing multipliers in Monte Carlo computations of a global sensitivity index .Comput Phys Commun, 117 (1999), pp. 52-61
61. S. Chakraborty, R. Chowdhury .A hybrid approach for global sensitivity analysis .Reliab Eng Syst Saf, 158 (2017), pp. 50-57

## Abstract

A wind power plant or wind farm is a collection of several wind turbines located in one place. A large wind farm can consist of several hundred wind turbines. Such a complex can be located on the sea.

Offshore floating wind power, an emerging technology in the offshore wind industry, has attracted increasing attention due to its potential to cooperate with other renewable energies to decarbonize energy systems. The environmental effects of floating offshore wind farms in deep sea areas should be considered and methods to enhance the low-carbon effect should be devised. Few studies have been conducted to evaluate the environmental effects of offshore floating wind farms, but the scale of these studies was relatively small. In the future offshore wind farm, more baseline data should be collected to improve the reliability of LCA. The effects of floating offshore wind farm on marine ecology and physical atmospheric properties should be investigated in depth.

**Keywords:** deep sea area, offshore wind, offshore wind farm, life cycle assessment, environmental impacts, greenhouse gas emissions,