



Investigation of Offshore Wind Turbine Foundation - Floating Offshore and Fixed Base Offshore - and Potential of North and South Seas of Iran

Fereshteh Jafari¹, Hajieh Bastami^{2*}

¹MSc. Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 08.14.2021

Revised: 09.15.2021

Accepted: 09.21.2021

Keyword:

Wind turbine
Floating offshore
Iran's water potential
Offshore fixed base
Foundation
Wind turbine technology

***Corresponding Author:**

Hajieh Bastami

Email: hbastami@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In the present work, the potential and capability of Iran's waters for acquiring and installing different types of wind turbines is discussed. For this purpose, various types of offshore wind turbines such as offshore float as the latest type of wind turbines as well as various types of base fixed offshore wind turbines were studied. In addition to reviewing the state of wind turbine technology in Iran according to oceanographic features, geographical coordinates, transportation costs and the possibility of assembly and ease of installation for the northern and southern seas of Iran, the amount of wind resources, water depth and available area were also taken into consideration. Based on the SWOT model, recommendations were made for the use of different types of turbines. In a part of the research, a comparison was made between Iran and leading countries in this field. For the Caspian Sea, the type of traction base of these turbines is not recommended due to the structural complexity, difficult installation and transportation and the need for deep water, while monopile structures and the third generation of gravity are suitable options for the shallow depths of lakes. In addition, near the southern coast of Iran, due to high tides and many changes in water depth during the day and night and the impact of the tension of the restraint lines of traction platforms, the use of this structure is not recommended. Due to the high depth of water in coastal areas and very good stability in various weather conditions, spar structures are introduced as a desirable option.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفاهان

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۲۳۵-۲۰۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.297893.1648

20.1001.1.23829796.1400.18.3.11.4



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی پتانسیل دریا‌های شمالی و جنوبی ایران به منظور استقرار توربین‌های بادی دریایی با فونداسیون شناور فراساحلی و پایه ثابت ساحلی

فرشته جعفری^۱، حجه بسطامی^{۲*}

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در پژوهش حاضر، پتانسیل و قابلیت آب‌های کشور ایران برای دست‌یابی و نصب انواع توربین‌های بادی، بحث و بررسی می‌شود. به همین منظور، انواع توربین‌های بادی دریایی از قبیل شناور فراساحلی به‌عنوان نوین‌ترین نوع توربین‌های بادی و همچنین انواع توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت ساحلی، بررسی شده است. علاوه بر بررسی وضعیت فناوری توربین بادی در ایران، با توجه به ویژگی‌های اقیانوس‌شناسی، مختصات جغرافیایی، هزینه حمل‌ونقل و امکان مونتاژ و سهولت نصب برای دریا‌های شمالی و جنوبی ایران، میزان منابع بادی، عمق آب‌ها و مساحت موجود و براساس مدل سوات، پیشنهادهایی برای استفاده از انواع مختلف توربین‌های مذکور ارائه شده است. در بخشی از پژوهش نیز مقایسه‌ای بین کشور ایران با کشورهای پیشرو در این حیطه صورت پذیرفته است. برای دریاچه خزر، نوع پایه کششی این توربین‌ها با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری، نصب و حمل‌ونقل دشوار و نیاز به آب‌های عمیق، توصیه نمی‌شود درحالی که سازه‌های مونوپایل و نسل سوم گرانشی‌ها گزینه‌های مناسبی برای ژرفای کم این دریاچه هستند. همچنین در نزدیکی سواحل جنوبی ایران به دلیل جزر و مد زیاد و تغییرات بسیار در عمق آب در طول شبانه‌روز و تحت تأثیر قرارگرفتن میزان کشش خطوط مهارسازی سکوها پایه کششی، استفاده از این ساختار توصیه نمی‌گردد. برای این سواحل، به دلیل عمق بالای آب در نواحی نزدیک به ساحل و پایداری بسیار خوب در شرایط جوی گوناگون، سازه‌های اسپار به‌عنوان گزینه مطلوب معرفی می‌گردد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

کلید واژگان:

توربین بادی
شناور فراساحلی
پتانسیل آب‌های ایران
پایه ثابت ساحلی
فونداسیون
فناوری توربین بادی

*نویسنده مسئول: حجه بسطامی

پست الکترونیکی:

hbastami@tvu.ac.ir



©2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

استفاده از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌منظور جایگزینی سوخت‌های فسیلی و اجتناب از گرمایش کره زمین و حل مشکلات زیست‌محیطی، به سال‌های نه‌چندان دور برمی‌گردد [۱؛ ۲]. توربین بادی، یک ساختار ساده مبدل انرژی است که انرژی جنبشی باد را به‌وسیله ساز و کار الکتریکی - مکانیکی خود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. با وجود آن‌که انرژی باد و ایده توربین‌های بادی، بسیار مفید و کارآمد بود چندی پس از به‌کارگیری، دوستداران محیط‌زیست را آزرده‌خاطر کرد. دای^۱ و همکارانش با بررسی مزارع بادی، عواملی مانند تأثیرگذاری توربین‌ها بر پرواز پرندگان، آلودگی صوتی، برهم‌زدن نظم و زیبایی محیط‌زیست از لحاظ بصری را از جدی‌ترین ویژگی توربین‌های بادی برشمردند [۳]. همچنین قیمت بالای زمین و نیاز به وسعت زیادی از اراضی در مزارع بادی در راستای سازوکار عملکردی توربین‌ها، از دیگر موارد منفی این فناوری به‌شمار می‌رود. از این‌رو، پژوهشگران به فکر چاره برای رفع موانع موجود افتادند. پروفیسور ویلیام هریونموس^۲ در سال ۱۹۷۲ ایده نوین توربین‌های بادی شناور را مطرح کرد [۴]. در سال ۱۹۹۳ بارلتراب^۳ مفهوم مزرعه بادی شناور چند واحدی^۴ را معرفی کرد که چندین توربین را روی یک ساختار شناور قرار می‌دادند [۵]. تونگ^۵ در ۱۹۹۸ به بررسی جنبه‌های فنی و اقتصادی نصب یک نیروگاه بادی دریایی به‌صورت شناور پرداخت و موضوعات زیست‌محیطی، ساخت و نصب این توربین‌ها را در آن زمان مورد بحث قرار داد [۶]. در همان سال، اندرا اندرسون^۶ و مینو پاتل^۷ مقاله‌ای را در زمینه توسعه ابزار طراحی تحلیلی و عددی برای چگونگی عملکرد مزارع بادی در دریاها ارائه کردند و به ابزار انتقال انرژی تولید شده از دریاها به ساحل پرداختند [۷]. اندرسون و همکارانش فرم بدنه مناسب برای توربین‌های بادی شناور، ابزارهایی برای مدل‌سازی بارها، خستگی و آسیب‌های ناشی از آن را به‌عنوان سه مسئله اصلی در این حوزه حل کردند [۸]. بلو اچ تکنولوژی^۸ کشور هلند در سال ۲۰۰۷ اولین توربین بادی شناور جهان را با دو پره و از نوع پایه کششی^۹ در ۲۱/۳ کیلومتری آپولیا ایتالیا و در عمق ۱۱۳ متری، مستقر کرد که در پایان سال ۲۰۰۸ از رده خارج شد [۹]. پس از آن توربین بادی شناور هایویند^{۱۰} بود که در سال ۲۰۰۹ در دریای شمال با ظرفیت ۲/۳ مگاوات توسط شرکت زیمنس به بهره‌برداری رسید [۱۰؛ ۱۱]. پیرز کولازو^{۱۱} و همکاران انرژی امواج و بادهای فراساحلی را با هم ادغام کردند و فناوری‌ها و زیربنای موردنیاز این ایده را در سال ۲۰۱۵ مطرح کردند [۱۲]. حدود نیم قرن از اولین ایده توربین‌های بادی شناور گذشته بود که در سال ۲۰۱۸ بازده توربین بادی از ۳۰ کیلووات به بیشتر از ۵ مگاوات ارتقا یافت [۱۳]. انتظار می‌رود که در سال ۲۰۵۰ این آمار به عدد ۱۲۰۰ گیگاوات برسد [۱۴]. امروزه توربین‌های بادی ساحلی، انتقالی و فراساحلی به دلیل وسعت زیاد دریاها، سواحل و در ضمن ارزش بالای زمین و قابل استفاده‌تر بودن آن برای مصارف دیگر، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از اصلی‌ترین روش‌های طبقه‌بندی توربین‌های فراساحلی، براساس عمق آبی است که در آن قرار می‌گیرند. فونداسیون توربین‌های بادی پایه ثابت به‌طور کلی به دو نوع فونداسیون آب‌های کم عمق، که در عمق آب از صفر تا ۳۰ متر کاربری دارند، فونداسیون انتقالی که در عمق آب

¹ Dai

² William Heronemus

³ Bartrop

⁴ MUFOW

⁵ K.C Tong

⁶ Andrew R. Henderson

⁷ Minoo H. Patel

⁸ Blue H Technologies

⁹ TLP: Tension Leg Platform

¹⁰ Hywind

¹¹ Perez-Collazo

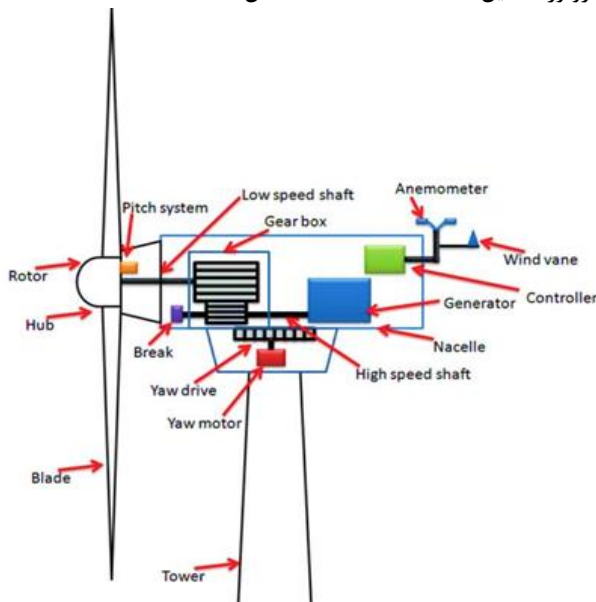
بین ۳۰ تا ۶۰ متر کاربری دارد و نوع دیگر مربوط به فونداسیون آب‌های عمیق است که برای آب‌هایی با عمق بیش از ۶۰ متر کاربرد دارند [۱۲].

انرژی باد یک انرژی تجدیدپذیر است که در کشور ایران، پتانسیل تولید ۴۰۰۰۰۰ مگاوات یعنی نصف توان تولید حال حاضر برق کشور را دارا می‌باشد. در پژوهش حاضر، پتانسیل آب‌های کشور ایران برای نصب انواع توربین‌های بادی دریایی براساس میزان منابع باد، عمق آب‌ها، مساحت موجود و دیگر ویژگی‌های اقیانوس‌شناسی، بررسی و در نهایت با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، مقایسه اقتصادی با فناوری فتوولتائیک و زمین‌گرایی و توربین‌های بادی در خشکی و تحلیل مدل SWOT هر سازه، پیشنهادهایی ارائه خواهد شد و هفت فونداسیون اصلی توربین‌های دریایی ضمن معرفی، تحلیل قرار می‌گردد. عنوان پژوهش حاضر به دلیل محدود بودن سوخت‌های فسیلی، آلودگی زیست‌محیطی و گرمایش جهانی، معایب متعدد توربین‌های بادی در خشکی، نوسان قیمت ارز و بحران حال حاضر کشور در بخش انرژی (برق و آب) دارای اهمیت فراوان می‌باشد.

توربین بادی

اجزا و نحوه عملکرد

توربین‌های بادی از سیزده جزء اساسی شامل: پایه، برج، نردبان دسترسی به نوک توربین، اتصال به شبکه الکتریکی، کنترل جهت‌گیری باد^۱، ناسل^۲، ژنراتور، بادسنج، ترمز مکانیکی یا الکتریکی، جعبه‌دنده، تیغه روتور (پره)، سرعت کنترل تیغه^۳، توپی روتور تشکیل شده است [۱۵؛ ۱۶] (شکل ۱).



شکل ۱. اجزای تشکیل‌دهنده توربین بادی [۱۵]

¹ Yaw Control

² Nacelle

³ Pitch Control

پره‌های روتور با فرارگیری در معرض وزش باد همانند بال هواپیما انرژی را دریافت می‌کنند. هنگامی که باد می‌وزد، در یک طرف تیغه، کیسه هوایی کم‌فشار تشکیل می‌شود و تیغه را به سمت خود می‌کشد و سبب به‌حرکت درآمدن روتور می‌شود که به آن لیفت^۱ می‌گویند. نیروی لیفت بسیار بزرگ‌تر از نیروی بادی است که برخلاف ناحیه جلویی پره وارد می‌شود که به آن درگ^۲ می‌گویند. ترکیب نیروی لیفت و درگ باعث حرکت پروانه‌های پره‌های توربین و روتور می‌گردد. تعدادی چرخ‌دنده به‌صورت متوالی، چرخش روتور را از ۱۸ به ۱۸۰۰ دور در دقیقه یعنی سرعتی که باعث تولید الکتریسیته متناوب^۳ می‌شود، می‌رساند. پره‌های چرخان، پروانه داخل موتور که به جعبه‌دنده می‌رود را می‌چرخاند. جعبه‌دنده یا گیربکس، سرعت چرخش برای ژنراتور را افزایش می‌دهد. ژنراتور از میدان مغناطیسی برای تبدیل انرژی چرخشی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. نیروی خروجی تولید شده، به یک ترانسفورماتور می‌رود. ترانسفورماتور، انرژی حاصل از ژنراتور که حدود ۷۰۰ ولت است را به ولتاژ مناسب برای سیستم توزیع که معمولاً ۳۳۰۰۰ ولت است، تبدیل می‌کند. چرخ‌دنده، روتور و ژنراتور در قسمت بالایی برج در محفظه‌ای موسوم به ناسل قرار دارند. ناسل‌ها می‌توانند به‌اندازه‌ای بزرگ باشند که حتی یک بالگرد بر روی آن فرود آید. از دیگر اجزای اساسی یک توربین بادی می‌توان به کنترل‌کننده آن اشاره کرد. این بخش که وظیفه کنترل سرعت روتور را دارد، از آسیب‌های ناشی از وزش بادهای با سرعت بالا و چرخش بیش‌ازحد رتور جلوگیری می‌کند. این کنترل‌کننده داده‌های خود را از بادسنجی که در بالای برج و معمولاً انتهای آن نصب می‌شود گرفته، و در صورت افزایش باد و چرخش بیش‌ازحد روتور، یک ترمزکننده^۴ به‌صورت مکانیکی یا الکتریکی سرعت چرخش روتور را کاهش می‌دهد [۱۷؛ ۱۸].

چرا توربین بادی دریایی

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد، بهترین و پاک‌ترین انرژی شناخته شده است و در بسیاری از مقالات و کتب، این مهم بررسی و تأیید شده است که نمونه کار دمیرتاس^۵ مؤید این مسئله می‌باشد [۱۹]. کشور ایران علی‌رغم داشتن کویرهای وسیع، به دلیل درجه حرارت بسیار بالا، اختلاف دمای شب و روز و بادهای شنی نمی‌تواند از انرژی خورشیدی در این مناطق بهره‌برداری کند. همچنین از لحاظ مواد سازنده به دلیل نبود فناوری ساخت، تمامی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی وارداتی هستند و هزینه گزافی را برای اقتصاد کشور خواهد داشت؛ از این رو هزینه تعمیر و نگهداری بسیار بالا می‌باشد و بازده این نیروگاه‌ها می‌تواند تحت تأثیر مستقیم عوامل سازنده و محیطی قرار گیرد. از طرفی، علی‌رغم تلاش‌های بسیار برای دستیابی به انرژی زمین گرمایی، متأسفانه فناوری این انرژی آن‌طور که باید در دسترس نمی‌باشد و طبق پژوهش‌های انجام شده، تنها یک نیروگاه زمین گرمایی مشکین‌شهر از سال ۷۷ تا کنون در دست ساخت است که ظرفیت تولید ۵۵ مگاوات را دارد. با توجه به جنس فولادی پایه‌های برج‌های توربین بادی از نظر متالورژی و در نتیجه استحکام و طول عمر بالاتر، هزینه تعمیر و نگهداری کمتر، ساخت و طراحی به‌مراتب ساده‌تر و داخلی‌سازی چند نمونه توربین توسط شرکت‌های داخلی در ایران، توربین‌های بادی گزینه مناسبی برای سرمایه‌گذاری خواهند بود. در شکل ۲ بخش خاکستری متعلق به میزان تولید نیرو از انرژی باد و بخش زردرنگ از انرژی خورشیدی طی شش سال در ایران را نشان می‌دهد.^۶

¹ Lift

² Drag

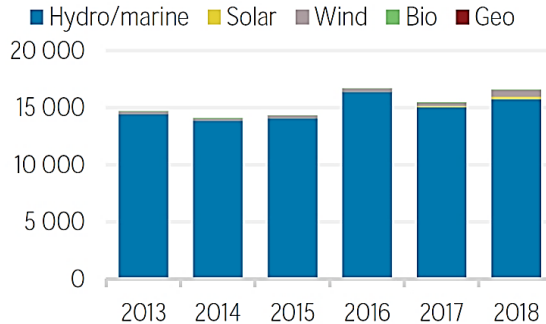
³ AC

⁴ Brake

⁵ Demirtas

^۶ این شکل به استناد مدارک موجود در آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA) استخراج شده است.

یک کیلووات ساعت برقی که از طریق توربین بادی تأمین می‌شود می‌تواند در کاهش ۸۵۰ گرم CO₂، ۲۰۹ گرم SO₂، ۲۶ گرم NOX و ۵۵ گرم خاکستر مؤثر باشد [۲۰].



شکل ۲. میزان تولید نیرو از انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ برحسب GWh [۲۱]

توربین‌های بادی فراساحلی نسبت به نوع پایه ثابت آن، مستقل از بستر عمل می‌کنند و می‌توانند صرف‌نظر از نوع و جنس خاک، نصب شوند. در واقع در خشکی و سواحل به دلیل وجود امواج الکترومغناطیسی، آلودگی بصری و صوتی ایده انتقال توربین‌های بادی به آب‌های عمیق به‌عنوان راهکاری برای دستیابی به برق بیشتر، در عین آسیب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین به علت وجود موانع، ساختمان‌ها، کوه‌ها و سازه‌های بلند، باد کمتری سهم توربین‌ها می‌گردد درحالی که در دریاها و به‌ویژه محیط‌های فراساحلی، به علت بادهای شدید، متراکم‌تر بودن هوا و فضای بازتر، توان تولیدی به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. توربین‌های فراساحلی بزرگ را می‌توان توسط کشتی‌ها یا کرجی‌ها طی عملیاتی به دل دریاها و اقیانوس‌ها منتقل کرد و توان تولیدی را از ۵۰ مگاوات در مزرعه‌های بادی واقع در خشکی به ۱۰۰ مگاوات در مزرعه‌های بادی فراساحلی افزایش داد.

یکی از عوامل مثبت زیست‌محیطی توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت، ایجاد جزیره‌های کوچک مصنوعی در محل این فونداسیون‌هاست و در نتیجه افزایش آبریزان آن ناحیه را به همراه خواهد داشت [۲۲]. نظر بر بالا بودن هزینه توربین‌های بادی شناور در مقایسه با نوع ثابت، استفاده آنها در برخی مکان‌ها اقتصادی نمی‌باشد. از این‌رو، استفاده از این توربین‌ها در اطراف آب‌های عمیق می‌تواند راه‌حلی مقرون‌به‌صرفه باشد.

انرژی باد و نحوه محاسبه آن

اندازه‌گیری انرژی موجود در هر مکان را انرژی یا قدرت باد^۱ می‌گویند [۲۳]. توان تولید شده از توربین‌های بادی را رانکی فرود^۲ در قالب رابطه (۱) و (۲) مطرح کرده است. در این معادله، رابطه بین سرعت باد و توان تولید شده به‌خوبی نشان داده شده است؛ به‌گونه‌ای که ۱۰ درصد افزایش در سرعت وزش باد می‌تواند سبب ۳۳ درصد افزایش در توان تولید شده گردد. حال با توجه به افزایش سرعت باد در دریاها و اقیانوس‌ها می‌توان به توجیه خوبی از ضرورت توربین‌های بادی شناور فراساحلی رسید [۲۴]. توان موجود در یک باد "P" است و نیرویی که می‌توان از نیروی ورودی باد "Pa" استخراج کرد را با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) می‌توان محاسبه کرد:

¹ Power Wind

² Rankine-Froude

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

$$P_a = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \quad (2)$$

در معادله‌های (۱) و (۲) قدرتی که در باد وجود دارد با $P(w)$ ، چگالی هوا^۱ با ρ ، مساحت روتور با $A(m^2)$ ، سرعت باد با $V(m/s)$ ، ضریب توان ناشی از اتلاف با C_p ^۲ و توان قابل استخراج توسط توربین بادی با $P_a(w)$ محاسبه می‌شود [۲۳]. ضریب توان C_p در برابر سرعت‌های مختلف باد اندازه‌گیری می‌شود و توسط سازندگان توربین ارائه می‌گردد و شامل تمام تلفات ترکیبی^۳ است. آلبرت بتز^۴، فیزیک‌دان آلمانی در سال ۱۹۱۹ نتیجه گرفت که هیچ توربین بادی نمی‌تواند بیش از $59/3$ درصد از انرژی جنبشی باد را تبدیل کند و این قانون به نام قانون بتز شهرت یافت. حد بتز نیز حداکثر مقدار نظری است که هیچ توربین بادی نمی‌تواند در عمل کار کند که چیزی در حدود 35 تا 40 درصد می‌باشد [۲۵].

به‌منظور روشن شدن محاسبه توان تولیدی توربین‌های بادی، یک توربین بادی با طول پره $50m$ در منطقه‌ای با متوسط سرعت باد $7.5 m/s$ و چگالی هوای $1.1 kg/m^3$ را در نظر بگیرید. اگر شرکت سازنده ضریب توان 0.4 را در برابر تلفات اعلام کرده باشد، توان تولیدی این توربین به این صورت خواهد بود:

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 & P &= 0.5 \times 1.1 \times 7853.9816 \times 7.5^3 \\ &= \pi \times 50^2 & &= 1822369.168 \text{ W} & P_a &= 1.82 \times 0.4 \\ &= 7853.9816 \text{ m}^2 & &= 1.82 \text{ MW} & &= 0.728 \text{ MW} \end{aligned}$$

ملاحظه می‌شود که این توربین بادی می‌تواند با در دسترس بودن سرعت مطلوب باد برای یک‌ساعت 0.728 مگاوات به‌طور مداوم تولید کند.

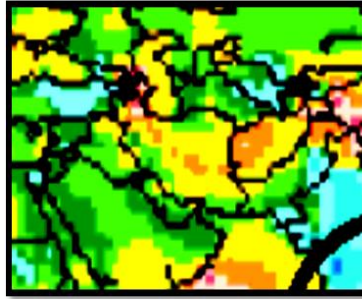
معرفی تحلیلی فونداسیون مناسب به‌منظور استقرار در دریاهاى ایران از حیث اقیانوس‌شناسی
کشور ایران یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین کشورهای خاورمیانه است که در غرب قاره آسیا قرار دارد. ایران از سمت شمال به دریاچه بزرگ خزر (کاسپین) و از سمت جنوب به منابع آبی خلیج فارس و دریای عمان دسترسی دارد. موقعیت جغرافیایی ایران به‌گونه‌ای است که از منابع بادی خوبی در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی بهره‌مند می‌باشد (شکل ۳).

^۱ چگالی هوا در سطح دریا در دمای 15 درجه سانتی‌گراد و با توجه به جو استاندارد بین‌المللی حدود $1/225$ کیلوگرم بر مترمکعب است.

^۲ Power Coefficient

^۳ تلفات ترکیبی شامل تلفات اجزای مکانیکی، تلفات آیرودینامیکی و الکتریکی می‌باشد.

^۴ Albert Betz



شکل ۳. تصویر منابع بادی کشور ایران و اطراف آن (مناطق سبز و آبی دارای منابع بادی کم و مناطق زرد و قرمز دارای منابع بادی زیاد) [۲۶]

با بررسی توربین‌های بادی دریایی می‌توان آن‌ها را به‌طور کلی به دو دسته تقسیم کرد: در آب‌های عمیق توربین‌های بادی شناور فراساحلی در سه دسته فونداسیون سیستم شناوری: اسپار^۱، نیمه‌غوطه‌ور^۲ و پایه کششی^۳ و در نواحی کم‌عمق، چهار نوع فونداسیون پایه ثابت: یکپارچه^۴، گرانشی^۵، جکت^۶ و سه‌پایه^۷. در عمق ۲۰ تا ۵۰ متری آب، از دو فونداسیون یکپارچه و گرانشی که ساختار یک‌پایه‌اند استفاده می‌گردد و برای عمق‌های بین ۵۰ تا ۸۰ متر از دو ساختار جکت و سه‌پایه که نامشان نشأت گرفته از فرم پی آن‌هاست، استفاده می‌شود [۲۷؛ ۲۸]. هر کدام از سازه‌ها، ایده خاصی به منظور حفظ پایداری خود در برابر نیروی وارد از جانب امواج و بادهای استفاده می‌کنند.

دریای خزر

رژیم بادی دریاچه خزر: تحلیل ویژگی‌های باد و طوفان‌های شدید اجازه می‌دهد که دریای خزر از نظر رژیم باد به مناطق مختلفی تقسیم شود. معیار اساسی برای این تقسیم‌بندی فراوانی، سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه قرار گرفت. در زمستان زمانی که شدت چرخه‌های جوی بر بخش‌های میانی و جنوبی دریای خزر افزایش می‌یابد، میانگین سرعت باد به ۷/۵-۷ متر بر ثانیه می‌رسد [۲۹].

گوناگونی وضعیت باد روی دریای خزر، ناشی از گستره طولی آن به موازات نصف‌النهار، شرایط متفاوت اروگرافی سواحل و تنوع در جهت‌های هوای گذری از روی نواحی مختلف است. دریای خزر پیوسته تحت تأثیر توده‌های هوای سرد قطبی و توده‌های گرم نیمه‌جنوب حاره‌ای است. مقادیر بالای سرعت باد (۸-۶ متر بر ثانیه) بیشتر در ناحیه شبه‌جزیره آبشوران مشاهده می‌شود؛ جایی که ویژگی اروگرافی باعث گسترش بادهای شدید و طوفانی می‌گردد [۲۹]؛ از این رو برای این دریا توربین‌های بادی دریایی شناور اولین انتخاب خواهند بود.

در بخش جنوبی دریای خزر میانگین سرعت باد کمتر است، در نواحی مرکزی آن ۵-۴ متر بر ثانیه، در سواحل شرقی ۴-۳/۵ متر بر ثانیه و در گوشه جنوب شرقی ۳-۲/۵ متر بر ثانیه است. مقدار کم میانگین سرعت باد (۳-۲/۵ متر بر ثانیه) در سواحل جنوب غربی و در آب‌های ساحلی ایران و سواحل جنوبی دریای خزر روی می‌دهد. در فصول

¹ Single Point Anchor Reservoir (Spar)

² Semi-Submersible

³ Tension Leg Platforms (TLP)

⁴ Monopile

⁵ Gravity

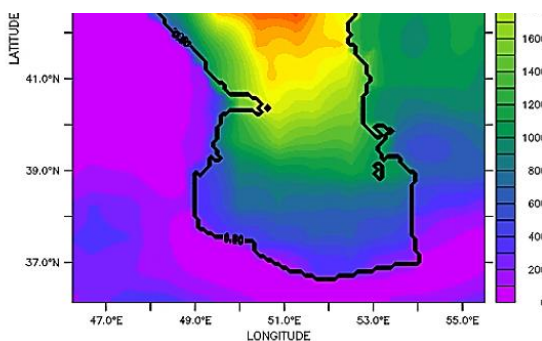
⁶ Jacket

⁷ Tripod

گرم سال همچون فصول سرد میانگین سرعت باد از جنوب به شمال افزایش می‌یابد، گرچه در فصول گرم، تفاوت بین سرعت باد در بخش دریایی با ساحل چندان زیاد نیست؛ بنابراین در نتیجه گوناگونی فرایندهای جوی بر دریای خزر، تفاوت رژیم گرمایی دریا و خشکی و چگونگی توزیع اروگرافی ناحیه، میانگین سرعت باد در طول سال در مناطق مختلف دریای خزر، تفاوت اساسی دارد [۲۹].

علی‌رغم نایکنواختی سرزمین پیرامون دریای خزر از نظر جغرافیایی، دریای خزر و سواحل آن را می‌توان به نواحی با رژیم جهت باد تقریباً یکنواخت تقسیم کرد. روی خزر جنوبی فراوانی بادهای جنوب شرقی افزایش می‌یابد (۳۵-۲۵ درصد)، و در بخش‌های جنوب شرقی آن بادهای غربی و شمال غربی غلبه دارد (۳۰-۲۵ درصد). در زمان‌های گرم سال، تغییرات عمده‌ای در رژیم باد روی می‌دهد. در این شرایط، بادهای شمال غربی تقریباً بر کل دریای خزر غلبه دارد (۴۰-۳۰ درصد در بخش‌های مرکزی خزر میانی و ۲۵-۱۵ درصد در سواحل) [۲۹].

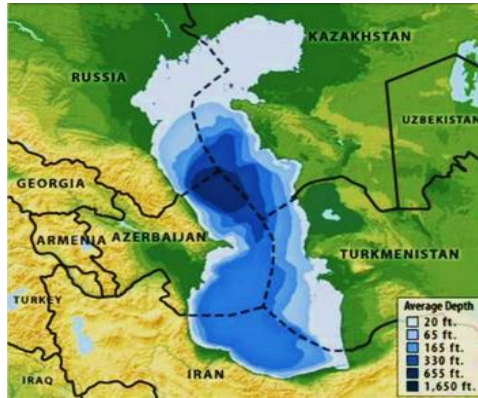
در ناحیه آبشوران به علت اروگرافی ناحیه، جریان اصلی باد شمالی (۵۰-۴۰ درصد) و جنوبی‌تر از آن، جریان غالب باد شمال شرقی (۲۵ درصد) است. در ناحیه لنکران-آستارا جهت اصلی باد، غربی است (۴۵-۳۰ درصد) که مربوط به نسیم ساحلی و چرخه کوهپایه-دره‌ای می‌باشد [۲۹].



شکل ۴. میانگین انرژی باد در ارتفاع ۵۰ متر خزر میانی و جنوبی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ بر حسب kWh/m² [30]

به دلیل کاهش منابع بادی در خزر جنوبی، استفاده از توربین‌های بادی دریایی در هر جای این دریا توجیه اقتصادی نخواهد داشت و [۲۲] و [۳۱] مؤید این مسئله هستند اما مناطقی با ثبات و قدرت بادی خوبی شناسایی شده‌اند؛ از این رو در ادامه، پیشنهادهایی برای انواع فونداسیون‌ها با شاهدگیری از مقالات ارائه شده است تا با نصب آن‌ها به تأمین برق کشور کمک گردد. پتانسیل سنجی سایت‌های نفت و گاز برای استقرار توربین‌های بادی می‌تواند پیشنهادی راهگشا برای سایر مناطق جنوبی دریای خزر باشد.

عمق آب دریای خزر: عمق آب‌ها به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار و اساسی در برنامه‌ریزی و تعبیه توربین‌های بادی شناور در دریاها مطرح می‌باشد. در شکل ۵ که اینفوگرافیک اعماق دریای خزر را به تصویر می‌کشد، عمیق‌ترین مناطق در قسمت مرکزی و جنوبی واقع شده‌اند که در بعضی از مناطق جنوبی ۹۰۰ الی ۱۰۰۰ متر عمق دارد، سواحل این دریاچه جمعاً ۶۳۷۹ کیلومتر است که حدود ۹۲۲ کیلومتر آن در خاک ایران واقع شده است و وسعت حوزه آبرگیر آن ۳۷۳۳۰۰۰ کیلومتر مربع است که ۲۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع آن در خاک ایران قرار دارد [۳۲].



شکل ۵. نقشه و اینفوگرافیک عمق دریای خزر [۳۲]

باتوجه به شکل ۵ سواحل دریای خزر به‌طور متوسط دارای عمق ۶ تا ۲۰ متر می‌باشند و بخش عمده خزر حوزه ایران، دارای عمق ۱۰۰ متر می‌باشد که حدود ۲۰۰۰۰۰ کیلومترمربع وسعت دارد.

توربین‌های بادی شناور نیمه‌غوطه‌ور، گزینه مناسبی برای شرق خزر جنوبی می‌باشد؛ زیرا درفت پایین این سازه، آن را قادر می‌سازد تا در آب‌های کم‌عمق حدود ۴۰-۵۰ متر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین امکان بکسل آن به ساحل در صورت بروز نقص و تعمیر سازه‌ها با هزینه خیلی کمتر در مقایسه با تعمیرات اساسی که در دریا انجام می‌شوند، از مزایای این فونداسیون است [۳۳]. اما از معایب داشتن قسمت عمده‌ای از ساختار در نزدیکی سطح آزاد این است که سازه بیشتر تحت تأثیر خوردگی و بارهای ناشی از قطعات یخ قرار دارد و در برابر امواج شدید بیشتر تحت تأثیر قرار خواهد داشت [۳۴]. همچنین منطقه جنوب‌شرقی دریای خزر به علت کم بودن ارتفاع موج و عمق آب دریا، شرایط مناسبی برای توربین بادی دریایی شناور دارد. استفاده از توربین‌های بادی شناور، گزینه مناسب‌تری از لحاظ اقتصادی در برابر توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت دانسته شده است که رزاقی کلجاهی و همکاران در [۳۵] تأییدی بر این تحلیل ارائه داده‌اند.

نیمه‌غوطه‌ور: این فونداسیون شامل یک ساختار مثلثی با استوانه‌های فلزی توخالی^۱ می‌باشد که از طریق شناوری زیاد، به پایداری می‌رسند. هر گوشه این ساختار، ستون‌های لوله‌ای عمودی دارد که توسط مهاربندها به هم اتصال یافته‌اند. این ستون‌ها می‌توانند با نگه داشتن ماسه در خود، به سطح شناوری مناسبی دست یابند [۳۶]. سیستم مهارسازی این ساختار با ۳-۶ خط اتصال است. مونتاژ کامل نیمه‌غوطه‌ورها در یک لنگرگاه خشک و حمل‌ونقل آن توسط یک کشتی بکسل امکان‌پذیر می‌باشد [۲۴]. شکل ۶ این سازه‌ها را با تکنیک SWOT نشان می‌دهد.

^۱ Pontoon



شکل ۶. ویژگی‌های درونی و برونی توربین بادی شناور فراساحلی با فونداسیون نیمه‌غوطه‌ور

فونداسیون پایه کششی توربین‌های بادی شناور، با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری، نصب و حمل‌ونقل دشوار و نیاز آن به آب‌های عمیق ۱۸۰۰ متری، فقط در آب‌های عمیق دریای خزر پیشنهاد می‌شوند^۱ که رزاقی کلجایی و همکاران در [۳۷] با بررسی شرایط محیطی و ژئوتکنیکی دریای خزر، صحت این پیشنهاد را گواهی می‌دهد. با توجه به عمق ۶ تا ۲۰ متری سواحل خزر جنوبی، توربین بادی دریایی پایه ثابت با فونداسیون گرانشی مناسب خواهند بود. در عمق‌های کمتر حدود ۳ تا ۵ متر، نسل اول به دلیل داشتن سازه‌های سنگین و در نتیجه حمل‌ونقل دشوار، برای مناطق کم عمق پیشنهاد می‌گردند تا از لحاظ اقتصادی مقرون بصرفه باشد. از عمق ۱۰ تا ۲۰ متر بین دو نسل دوم و سوم، به دلیل حمل و نقل آسان‌تر و سبک‌تر بودن سازه‌های نسل سوم، گزینه مناسبی برای احداث در این مناطق پیشنهاد می‌شوند. اوایل سال ۲۰۱۹، ۱۳ مورد از فونداسیون گرانشی در کشورهای دانمارک، آلمان، سوئد، فنلاند و بلژیک نصب شد که حداکثر عمق آب در نظر گرفته شده برای آنها ۲۰ متر بوده است [۳۸].

پورشفیع و همکاران در [۳۹] طی تقسیم‌بندی ۹ گانه مناطق جنوب‌غربی دریای خزر، منطقه ۷ که در نزدیکی بندر آستارا قرار دارد با عمق ۲۰ متر و میانگین سرعت باد ۶ متر بر ثانیه را بهترین ناحیه برای توربین‌های بادی دریایی شناخته‌اند؛ زیرا جهت باد این منطقه، ثابت و مداومت خوبی دارد و غالباً از سمت غرب و جنوب‌غربی می‌باشد. همچنین طبرسا در [۴۰] مشخصات اقلیمی موج و باد دریای خزر جنوبی با مزرعه بادی گابارد واقع در دریای شمال در انگلستان را مقایسه کرده است. این مزرعه با میانگین سرعت باد ۰ متر بر ثانیه، میانگین ارتفاع امواج ۳.۳ متر و بلندترین ارتفاع موج ۳.۲ متر و عمق آب ۲۵ تا ۳۵ متر به فاصله ۲۳ کیلومتری ساحل گزارش شده است که مشابه پارامترهای اقیانوس شناختی دریای خزر است و در این مزرعه بادی ۱۵۰ توربین با ظرفیت اسمی ۴۰۵ مگاوات تعبیه شده است. در [۴۰] به تشابه با مزرعه بادی گابارد با تعداد ۱۵۰ توربین مدل Siemens SWT-3.3-101 برای دریای خزر، میزان تولید سالانه انرژی ۱۱۰۴.۱۴ گیگاوات ساعت اعلام شده است.

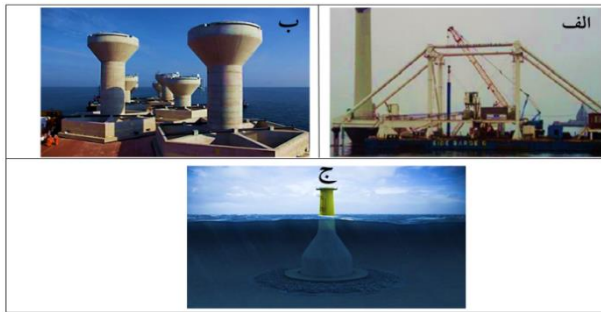
^۱ ویژگی‌های اسکوی پایه کششی در بخش دریای عمان بررسی شده است.

گرانشی: از این ساختار برای دریاهایی با بستر سفت و سخت استفاده می‌شود [۴۱]. پایه‌های آن معمولاً در سه شکل مستطیل، دایره و هشت‌ضلعی طراحی و ساخته می‌شوند و نقش این پایه‌های سنگین حفظ پایداری و جلوگیری از چرخش فونداسیون توربین است [۴۲؛ ۴۳]. این فونداسیون در سه نسل ساخته و نصب شده‌اند:

نسل اول: این نوع فونداسیون یک سازه بتونی کاملاً جامد، بدون سوراخ و سلول است. داشتن وزن زیاد به دلیل ساختار کاملاً جامد، سخت و یک‌پارچه و در نتیجه نیاز به باربرها و جرثقیل‌های خاص برای حمل‌ونقل از نقاط ضعف این سازه‌ها هستند ولیکن برای ژرفای کم آب (۳ تا ۷ متر) و نواحی ساحلی بسیار مناسب هستند [۳۸] (شکل ۷-الف).

نسل دوم: این سازه برای ژرفای خیلی کم - ۴ متر - تا ژرفای ۲۰ متر مناسب می‌باشند. وزن این سازه‌ها به دلیل وجود حفره و سوراخ‌هایی، بسیار کمتر از نسل اول است؛ از این رو حمل‌ونقل و عملیات نصب آن‌ها ساده‌تر می‌باشد. پس از نصب، سوراخ‌ها یا سلول‌ها با ماسه پر می‌شوند و به وزن نهایی طراحی شده می‌رسند [۳۸] (شکل ۷-ب).

نسل سوم: این فونداسیون، مخروطی‌شکل است و در طول مراحل حمل و نصب، نیمه شناور می‌باشد که نیاز به بالابر را در عملیات حمل‌ونقل به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. هنگامی که این پایه در بستر دریا قرار می‌گیرد، سوراخ داخلی با ماسه پر می‌شود تا به وزن نهایی طراحی برای تحمل بارها برسد. این نسل برای ژرفای ۱۳ تا ۲۰ متر مناسب است و به علت ویژگی‌های فوق، از دو نسل قبل مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌باشد [۳۸] (شکل ۷-ج).



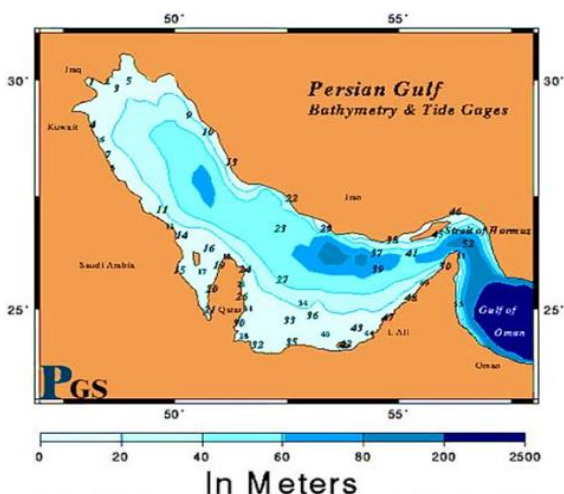
شکل ۷. فونداسیون نوع گرانشی توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت ساحلی الف: فونداسیون نسل اول [۴۴]؛ ب: فونداسیون نسل دوم [۴۵]؛ ج: فونداسیون نسل سوم [۴۶]

دریای خلیج فارس

خلیج فارس تحت تأثیر سه سیستم آب‌وهوایی اصلی شامل: آنتی‌سایکلون سرد سیبری، سیستم کم‌فشار سودان و مانسون‌های هند می‌باشد. این ناحیه تحت تأثیر بادهای غالب از شمال غرب موسوم به «باد شمال» است که در قسمت‌های جنوبی تغییر جهت می‌دهد و به سمت شمال تمایل پیدا می‌کند. این بادهای باعث به‌وجود آمدن امواج و جریان‌های سطحی می‌گردند [۲۹]. آب‌وهوای خلیج فارس، خشک و نیمه‌استوایی است. در بخش جنوبی به دلیل کم بودن آب‌های ورودی به خلیج فارس، رسوبات کربناتی زیاد است. جهت باد در طول زمستان از شمال غربی است و در کرانه جنوبی بادهای از جهت غرب می‌وزند و با پیشروی به سمت تنگه هرمز، جهت وزش باد از جنوب غرب تغییر می‌یابد. در مناطق شمالی خلیج فارس و در فصل تابستان، بادهای موسمی از شمال غرب به جنوب می‌وزند اما باد غالب از جنوب شرق به شمال غرب است. به‌طور کلی در دریای خلیج فارس در ۷۵ درصد مواقع شاهد آب‌های بی‌تلاطم هستیم که عملیات نصب و نگهداری را تسهیل می‌کند و باعث کنترل راحت‌تر سازه‌ها می‌گردد [۴۱]. نواحی منطقه دیر با حداکثر سرعت باد ۳/۹۰۲ متر بر ثانیه و کمترین سرعت باد ۲/۳۴۳ متر بر ثانیه، پتانسیل خوبی برای نصب توربین با

ارتفاع ۱۰ متر به بالا دارد [۴۷]. پنج جزیره خارگ، لاوان، کیش و قشم در ارتفاع ۱۰ متر و میانگین متوسط سرعت باد از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۴ بررسی شده است. نتایج نشان داده که در اطراف جزیره سیری در ارتفاع ۴۰ متر، سرعت متوسط سالانه باد ۵۹۰۳۴۶۰۸۵۱ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۸۰ متری ۶۵۱۷۴۲۱۶۹۳ متر بر ثانیه می‌باشد [۴۸]. با توجه به نزدیکی جزیره سیری به این منطقه، عملیات نصب، حمل‌ونقل و تعمیر و نگهداری می‌تواند با سهولت بیشتری صورت پذیرد.

خلیج فارس ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر پهنا و سطح حدود ۲۲۶۰۰۰ کیلومترمربع دارد. ژرفای میانگین آن حدود ۳۵ متر و ژرف‌ترین نقطه آن در کرانه ایرانی تنگه هرمز است که ژرفایی تا ۱۶۵ متر دارد ولی میانگین آن در کناره‌های محور ۷۴ تا ۹۲ متر است و سراسیمی آن در خلیج عمان است. آب‌وهوای حاکم بر خلیج فارس خشک نیمه‌استوایی است که در تابستان دما را ۴۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد و محیط بادخیزی را برای منطقه فراهم می‌آورد [۲۹]. کرانه جنوبی خلیج فارس به‌ویژه در شرق شبه‌جزیره قطر، منطقه وسیع و کم‌عمقی (۱۰ تا ۲۰ متر) است. عمیق‌ترین نقطه خلیج فارس ۹۳ متر ژرفا دارد که در ۱۵ کیلومتری جزیره تنب بزرگ قرار گرفته است. کم‌عمق‌ترین منطقه نیز دارای ژرفای بین ۱۰ تا ۳۰ متر است که شامل مناطق غربی می‌شود [۴۸].



شکل ۸. نقشه عمق آب‌های خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان [۴۹]

طهماسبی‌فرد و همکاران در [۵۰] پس از بارگذاری موج و جریان و همچنین بار باد به‌صورت استاتیکی و گشتاور آیرودینامیکی، خروجی‌های تحلیل تنش اجزای سازه را به‌دست آورده‌اند. آنالیز انهدام پیش‌روند انجام و سازه جکت برای خلیج فارس از لحاظ فنی مناسب دانسته شده است.

حداکثر شوری آب در تنگه هرمز و رأس خلیج فارس و در ماه بهمن و حداقل شوری آب در مردادماه است. شوری آب از ۳۸ هزارم تا ۴۱ هزارم متغیر است. به گزارش مهندسان متالورژی مورلی و آتلی در خلیج فارس میزان خوردگی فولاد در مناطق دارای تلاطم ۰/۱۴ میلی‌متر بر سال و در سایر نقاط ۰/۰۷ میلی‌متر بر سال می‌باشد [۴۱].

بخش عمده خلیج همیشه فارس ایران، به دلیل عمق کم آب از ۱ تا ۶۰ متر، از پتانسیل مناسبی برای استفاده از توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت در نواحی ساحلی بهره‌مند می‌باشد. در بخش‌های نزدیک به ساحل که عمق کمتری دارند (با در نظر گرفتن اختلاف سطح آب در شب و روز به دلیل جزر و مد)، سازه مونوپایل پیشنهاد می‌گردد. سیستم

فونداسیون مونوپایل نصب سریع و آسان در ۲۴ ساعت دارد [۵۱] و تأثیرات محلی و زیست‌محیطی روی آن کم است [۵۲]. با اضافه کردن سیم‌های کششی به پایه مونوپایل می‌توان این ساختار را از آب‌های کم‌عمق به آب‌های عمیق منتقل کرد تا انعطاف‌پذیری افقی مونوپایل‌ها را کاهش دهد و در نتیجه به ثبات توربین بادی کمک کند [۴۲].

مونوپایل: در نواحی کم‌عمق یا دریا‌هایی با عمق متوسط حدود ۳۰ متر کاربرد دارند [۵۳؛ ۵۴]. مونوپایل یک تک‌لوله فولادی با قطر بزرگ است که به داخل بستر دریا نفوذ می‌کند. از دیگر عوامل تأثیرگذار می‌توان به شرایط خاک و شدت بارگذاری محیطی اشاره کرد. مونوپایل‌های موجود در سواحل معمولاً ۵ تا ۱۲ متر قطر دارند [۵۵؛ ۵۶] و ضخامت خارجی دیواره تا ۱۵۰ میلی‌متر است [۵۵]. طول جاسازی شده L به قطر خارجی D دارای نسبت باریکی یعنی حدود کمتر از ۱۰ می‌باشد و بنابراین به‌عنوان ساختارهای سفت و سختی رفتار می‌کنند که چرخش آن‌ها بیش از خم شدن است [۵۷؛ ۵۸].

ساختار جکت، سازه‌های سنگینی هستند و برای عمق آب در حدود ۲۰ تا ۵۰ متر مناسب می‌باشند. کشور ایران به دلیل داشتن سکوه‌های نفت و گاز در دریاها، زیرساخت‌های لازم در طراحی، ساخت و نصب سازه‌های جکت را داراست [۴۱]. طهماسی‌فرد و همکاران در [۵۰] تأییدی بر پیشنهاد سازه‌های جکت برای این آب‌ها را ارائه دادند که آب‌های منطقه دیر و کنگان را برای این سازه‌ها مناسب دانسته‌اند.

جکت: این سازه یک ساختار فولادی سه یا چهار پا است که با جوش دادن مقاطع فولادی متصل می‌شوند و مهاربندها ایستادگی خوبی به ساختار می‌دهد. به‌طور کلی برای این سازه، از یک ساختار فولادی توخالی استفاده می‌شود و انواع متنوعی دارند [۴۳] (شکل ۹).



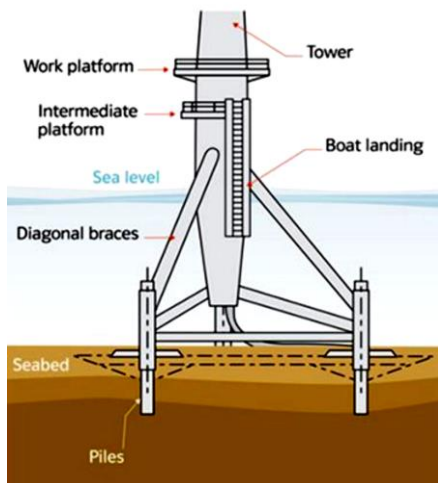
شکل ۹. فونداسیون جکت توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت [۵۹]

سازه‌های گرانشی، پیشنهاد خوبی برای خلیج فارس هستند. نسل سوم این سازه به دلیل سبک‌تر بودن، حمل‌ونقل آسان و پایداری مناسب با نواحی کم‌عمق خلیج فارس هماهنگی دارد و [۴۱] و [۳۷] مؤید این مسئله می‌باشد. کمی فراتر تا ژرفای ۸۰ متر، شاید فونداسیون سه‌پایه از توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت، به دلیل نیاز حداقلی یا حتی بی‌نیازی به کنترل آب‌سنگی موضعی، گزینه مناسبی گمان شود اما به دلیل سنگینی این سازه‌ها و عملیات نصب و حمل‌ونقل سخت و دشوار به دلیل نیاز به یک محیط ساختمانی برای مونتاژ [۶۰] از نظر صرفه اقتصادی نمی‌توان آن را گزینه مناسبی دانست.

¹ Embedded Length

² Outer Diameter

ساختار سه پایه: گوشه‌های سازه سه پایه در محل‌های هر ساق نصب می‌گردند و با لنگرهایی به بستر دریا متصل می‌شوند. این لنگرها پایداری و ایستادگی خوبی در برابر بارهای جانبی ایجاد می‌کنند [۶۰]. این سازه باید در عمق بیش از ۷ متر تعبیه شود تا از برخورد کشتی‌ها به پایه‌های سازه جلوگیری شود. این فونداسیون برای عمق کم‌آب از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد و بیش از ۲۰ متر ژرفا نیاز است [۴۱] (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. فونداسیون سه پایه توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت [۶۰]

در آب‌های ژرف خلیج فارس می‌توان به ساختار نیمه‌غوطه‌ور از میان توربین‌های بادی شناور فراساحلی اندیشید؛ زیرا این سازه‌ها مستقل از شرایط و عمق آب هستند و به‌طور کلی ریسک پایینی دارند. امکان مونتاژ و تعمیر آن‌ها در خشکی میسر است و با توجه به پیشرفت روزافزون علم، قابلیت خوبی برای ارتقا به سطح بالاتری از تکنولوژی دارند. این سازه‌ها در معرض خوردگی و بارهای ناشی از یخ قرار می‌گیرند که در نواحی جنوبی به علت آب‌وهوای گرم، تکه‌های یخ وجود ندارد و این امر از بارهای اعمالی به سازه می‌کاهد و کنترل پذیری آن را تسهیل می‌کند.

با نزدیک شدن به تنگه هرمز و با افزایش عمق آب تا ۸۰ و ۲۰۰ متر سازه نوع اسپار به دلیل ساختار ساده و پایدار آن بهترین گزینه می‌باشند. این مناطق با وجود عمق بالا، به خشکی نزدیک هستند و عملیات حمل‌ونقل و مونتاژ این سکوها را بسیار ساده می‌کند. اما باید توجه داشت که به استناد انجمن انرژی بادی بریتانیا، برای استقرار توربین‌های بادی فراساحلی، حداقل فاصله ۵ کیلومتر از خط ساحلی باید رعایت شود [۴۱]. نکته مهم این است که به دلیل قرارگیری عمیق سکو در آب حتی در نامساعدترین وضعیت جوی نیز این سازه در معرض حداقلی امواج و بادها قرار می‌گیرد. به همین سبب، بازدهی این نوع دکل‌ها بسیار بالا می‌باشد. اسپارها حتی در صورت رهاشدن از کابل‌های مهار خود، به هیچ عنوان وارونه نمی‌شوند و تعادل خود را حفظ می‌کنند اما مسئله‌ای که استفاده از این فونداسیون منحصربه‌فرد را دشوار می‌سازد، اندازه بسیار عظیم سازه و در نتیجه حمل‌ونقل دشوار آن است که عملیات انتقال به سایت و نصب را نیز به مراتب دشوار می‌کند [۲۴-۲۶؛ ۲۸]. جریان‌های دریایی بیش از بارهای موج و باد بر سازه‌های اسپار تأثیر دارند و عمق آب‌خوری حدود ۱۱۰ متر دارند که امیری‌نیا و همکاران در [۶۱] صحت این مطلب را تأیید کرده‌اند.

اسپار: این فوندانسیون شامل یک استوانه شناور بسیار عظیم است که برای پایداری خود از ماسه استفاده می‌کند. مرکز ثقل این سازه بسیار کمتر از مرکز شناوری آن در زیر آب قرار می‌گیرد. قسمت‌های انتهایی سازه، وزن سنگینی دارند، این درحالی است که قسمت‌های فوقانی استوانه نزدیک به سطح آب، معمولاً توخالی می‌باشد و مرکز شناوری را بالا می‌برند. به‌طور کلی سکوه‌های اسپار شبیه به ستونی عظیم هستند. نحوه مهارسازی این سکوها نیز مانند پایه کشتی است اما در نوع اسپار کابل‌ها بسیار عادی در دریا مهار می‌شوند. اسپارها به دلیل یک وزنه عظیم در انتهای سازه، پایداری بیشتری نسبت به پایه کشتی‌ها دارند [۶۲؛ ۶۳]. شکل ۱۱ مدل SWOT برای این دسته از توربین‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. ویژگی‌های درونی و برونی توربین بادی شناور فراساحلی با فوندانسیون اسپار

دریای عمان

طول خط ساحلی ایران در مجاورت دریای عمان حدود ۶۳۷ کیلومتر است و حداکثر عمق دریا در محدوده آب‌های ساحلی ایران در این ناحیه به بیش از ۲۰۰۰ متر می‌رسد. جلگه ساحلی ایران با عرض ۳۰ کیلومتر در مجاورت دریای عمان از حدود بندرعباس در تنگه هرمز تا گواتر در مرز با پاکستان امتداد می‌یابد [۲۹]. دریای عمان در حاشیه شمالی سیستم‌های جوی گرمسیری قرار دارد؛ به‌طوری که این دریا در معرض وزش بادهای موسمی مونسون قرار می‌گیرد. از آنجا که تغییرات فصلی در این دریا چندان طولانی نیست؛ این تغییرات موجب جریان‌های دریایی نمی‌گردند. جهت جریان‌های سطحی آب در دریای عمان در همه جا یکسان نیست و کاملاً به جهت وزش باد بستگی دارد. در فصل تابستان که بادهای موسمی جنوب‌غربی در دریای عمان حاکم هستند آب به داخل دریای عمان در جهت شمال‌غربی جریان دارد و یک جریان سطحی از دریای عمان به خلیج فارس وجود دارد. در فصل زمستان که بادهای موسمی شمال‌شرقی حاکم می‌شوند آب به خارج از دریای عمان جریان می‌یابد. بادهای شدید در دریای عمان در بهار و زمستان می‌وزند که شدت وزش این بادهای در ماه‌های دی و بهمن بیش از سایر ماه‌ها است. جزر و مد در دریای عمان نامنظم است و از شرق به غرب بیشتر می‌شود؛ به‌طوری که در بخش شرقی حدود دو متر و در دهانه تنگه هرمز به حدود ۳/۵ متر می‌رسد. پدیده فراچاهش^۱ یکی از پدیده‌هایی است که در شمال‌غرب دریای عمان و حوالی جاسک

^۱ Upwelling

به وقوع می‌پیوندد. مطالعات نشان داده است که در ساحل دریای عمان به علت ویژگی‌های توپوگرافی، امواج به‌دام‌افتاده به فراوانی مشاهده شده‌اند [۲۹]. این دریا به دلیل دسترسی به اقیانوس هند در بخش مرکزی تا شرقی آن چیزی حدود ۲۵۰۰ متر عمق دارد ولی با وجود عمق زیاد، تا خشکی فاصله چندانی ندارد.

به دلیل عمق زیاد ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ متر آب، از میان توربین بادی شناور، سکوه‌های پایه‌کشی به دلیل کاربردهای فراساحلی و پایداری بالا در شرایط جوی نامناسب و قرارگیری در معرض امواج و طوفان‌های دریایی، مناسب‌ترین گزینه هستند. هزینه تولید تمام شده این نوع از توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های بادی پایه ثابت، علی‌رغم حفاری در عمق زیاد، کم‌تر می‌باشد و از طرفی، فرایند نصب این سازه‌ها بسیار ساده است؛ بنابراین می‌توانند به راحتی از پایگاهی به پایگاه دیگر انتقال یابند. سازه پایه‌کشی، حرکات تکانه‌ای و زاویه‌ای بسیار خوبی دارد اما برای استفاده از این سازه سه مانع اساسی وجود دارد: پیچیدگی نصب، لنگراندازی، تغییر در کشش لنگرها به دلیل تغییرات جزر و مد و اتصال فرکانسی بین دکل و سیستم از جمله این موارد هستند. این پیشنهاد براساس کار پژوهشی صادقی‌نیا و همکاران [۴۸] و رزاقی کلجاهی و همکاران [۳۷] ارائه شده است. در نزدیکی سواحل جنوبی ایران به دلیل جزر و مد زیاد و تغییرات بسیار در عمق آب در شبانه‌روز و تحت تأثیر قرارگرفتن میزان کشش خطوط مهارسازی و لنگرگاهی سکوه‌های پایه‌کشی، به شرط وجود عمق مناسب ۱۸۰۰ متر، استفاده از این ساختار توصیه نمی‌شود.

پایه‌کشی: این نوع فونداسیون چهار پایه استوانه‌ای دارد. در این ساختار هم‌زمان با کشیدن دکل به سمت پایین توسط خطوط مهارسازی، آن را به سمت بالای آب نیز می‌کشاند. این ساختار، یک ستون اصلی بزرگ دارد که چندین خط‌کشی به آن وصل شده است. این خطوط می‌توانند کابل‌های کششی، لوله‌های تاندونی یا میله‌های توپر باشند. مقدار کشش خطوط مهارسازی بسیار مهم است و بی‌توجهی به این مهم، سبب واژگونی کل دکل خواهد شد. این کابل‌ها از حرکت عمودی^۱ و حرکت چرخشی^۲ سکو که توسط امواج خروشان دریا ایجاد می‌شوند جلوگیری می‌کنند. در این ساختار، پایه‌ها توسط پانتون‌های مثلثی به یکدیگر متصل شده‌اند. این فونداسیون در برابر حرکات افقی و عرضی^۳ آزاد می‌باشد. سیستم لنگر در بستر دریا نیز می‌تواند از نوع گرانشی، مکشی یا پایه‌های فرورفته در بستر باشد و معمولاً وابسته به خاک است. این سازه‌ها ساختاری شناور دارند که تمرکز اصلی آن‌ها کنترل حرکت عمودی سازه می‌باشد که به کف دریا مهار شده‌اند. پیشرفته‌ترین مدل این ساختار در سال ۲۰۱۴ و مدل پلاستار ۴ بوده است [۳۶]; [۶۴]. شکل ۱۲ ویژگی‌های این سازه را براساس مدل SWOT نشان می‌دهد.

¹ Heave

² Roll & pitch

³ Surge & sway

⁴ PelaStar



شکل ۱۲. ویژگی‌های درونی و برونی توربین بادی شناور فراساحلی با فونداسیون پایه کششی

علاوه بر فونداسیون پایه کششی، سازه اسپار نیز به دلیل ساختار ساده‌ای که دارد و به دلیل پایداری بالا و امکان مونتاژ آن در محل پایگاه، در آب‌های عمیق دریای عمان گزینه مناسبی معرفی می‌گردد [۳۷].

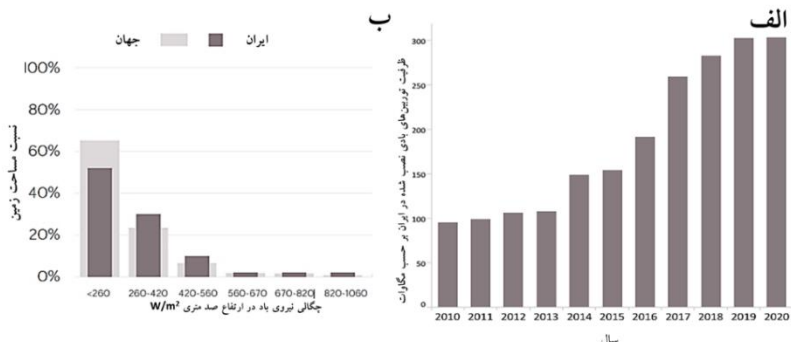


شکل ۱۳. انواع فونداسیون توربین بادی شناور فراساحلی از سمت راست به ترتیب نوع نیمه غوطه‌ور، پایه کششی و اسپار [۶۴]

وضعیت فناوری توربین بادی و پتانسیل کشور ایران در مقایسه با کشورهای پیشرو با بررسی گزارش‌های ساتبا^۱، تاکنون تعداد ۲۶ نیروگاه بادی با ظرفیت مجموع ۳۰۹/۵ مگاوات در ایران احداث و بهره‌برداری شده است که این رقم سهم کل نیروگاه‌های بادی تا تیرماه ۱۴۰۰ از مقدار ۹۰۳/۳۶ مگاوات برق

^۱ سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق کشور ایران

تجدیدپذیر تولید شده در کشور ایران می‌باشد. مطابق شکل ۱۴-الف ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در ایران در سال ۲۰۲۰ میلادی معادل ۳۰۰ مگاوات می‌باشد و این آمار تنها برای نیروگاه‌های بادی در خشکی است؛ زیرا هیچ‌گونه توربین بادی دریایی تاکنون در ایران ثبت نشده است.



شکل ۱۴. الف) ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در ایران بر حسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰. ب) پتانسیل چگالی نیروی باد در شش کلاس آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا در ارتفاع ۱۰۰ متر [۲۱].

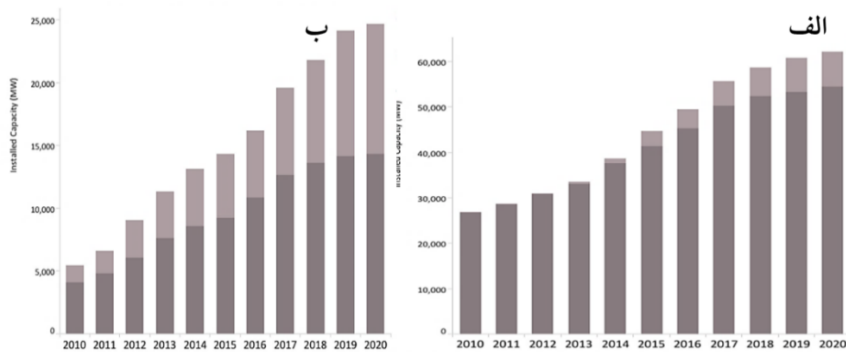
طبق آمارهای آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، در شکل ۱۴-ب مناطق کلاس سوم و بالاتر به‌عنوان یک منبع باد خوب در نظر گرفته می‌شوند؛ به‌طوری که در کلاس سوم این شکل، چگالی نیروی باد در ارتفاع ۱۰۰ متر در ۱۰ درصد مناطق ایران مقدار $420-560 \text{ W/m}^2$ است.

به دلیل تلاش پژوهشگران و مهندسان ایرانی، در کشور ایران فناوری توربین بادی در حال پیشرفت می‌باشد. شرکت صبا نیرو به‌عنوان اولین شرکت سازنده توربین بادی در خاورمیانه در سال ۱۳۷۹ فعالیت خود را آغاز کرده و فناوری توربین‌های ۶۶۰ کیلووات از شرکت وستاس دانمارک را بومی کرده است. این شرکت با همکاری گروه مینا توربین‌های بادی تا ۲/۵ مگاوات را تا طول پره ۵۰/۳ متر بومی‌سازی و تولید می‌کنند و توربین‌هایی با توان ۴ تا ۴/۵ مگاوات را در برنامه کار خود دارند. همچنین شرکت ویندمکس از سال ۱۳۹۴ با دستیابی به فناوری توربین‌های بادی محور عمودی ساوونیوس و داریوس، کار خود را آغاز کرد. مسئولیت طراحی و ساخت تجهیزات کارخانه‌ها و نیروگاه‌های بادی نیز بر عهده شرکت ماشین‌سازی اراک می‌باشد. علمداری در [۲۰] نیز فناوری ایرانی KAMI-600 که یک نیروگاه بادی ۶۰۰ کیلووات در سال ۱۳۹۲ مطرح شده است.

کشور ایران به‌دلیل بهره‌مندی از منابع نفت و گاز، دارای فناوری ساخت سکوی نفتی در دریاها می‌باشد که این سازه‌ها با فونداسیون‌های پایه ثابت دریایی توربین بادی نیز بسیار تشابه دارند.

در دو دهه گذشته کشورهای بلژیک، چین، دانمارک، آلمان و انگلستان به‌عنوان کشورهای پیشرو در استقرار انرژی دریایی در بازار جهانی مدعی بوده‌اند و تا پایان سال ۲۰۲۰، ظرفیت کلی نصب شده از باد دریایی حدود ۳۴ گیگاوات اعلام شده است [۶۵]. در شکل ۱۵ ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در دو کشور آلمان و انگلیس بر حسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در دو بخش خشکی و دریا نشان داده شده است که به ترتیب ۶۰۰۰۰ مگاوات و ۲۵۰۰۰ مگاوات می‌باشد.

¹ National Renewable Energy Laboratory (NREL)



شکل ۱۵. الف) ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در آلمان برحسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰. ب) ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در انگلستان برحسب مگاوات از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰. خاکستری کمرنگ برای بخش دریایی و خاکستری پررنگ برای بخش خشکی می‌باشد (۲۱).

در این میان، چین بالاترین تأسیسات بادی دریایی را با بیش از ۳ گیگاوات ظرفیت نصب شده، ثبت کرد. پس از آن هلند با ۱/۵ گیگاوات، بلژیک با ۰/۷ گیگاوات و انگلستان با ۰/۴ گیگاوات قرار به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار گرفتند. تا به امروز، حدود ۹۰ درصد از ظرفیت جهانی نصب‌شده، در دریای شمال و مجاور اقیانوس اطلس [۶۶] قرار دارد. تا به امروز، بزرگ‌ترین مزرعه بادی دریایی جهان، هورنسی یک^۱ انگلستان با ظرفیت ۱/۱۲ گیگاوات است [۶۷]. در آینده‌ای نه‌چندان دور، پیشرفت جهشی در صنعت توربین‌های بادی دریایی خواهیم داشت؛ به‌طوری که ژاپن هدف خود را برای باد دریایی تا سال ۲۰۴۰ از ۱۰ گیگاوات در سال ۲۰۳۰ به ۴۵ گیگاوات افزایش می‌دهد [۶۸] و هند اهداف بلندپروازانه‌ای از ۵ گیگاوات باد دریایی تا سال ۲۰۲۲ و ۳۰ گیگاوات تا ۲۰۳۰ تعیین کرده است [۶۹]. ایالات متحده آمریکا نیز هدف ۳۰ گیگاوات باد دریایی را تا سال ۲۰۳۰ تعیین کرده است [۷۰] و اهداف کره شمالی فراتر است؛ زیرا کشورش از برنامه ۴۲/۲ میلیارد دلار برای بزرگ‌ترین مزرعه بادی دریایی جهان با ظرفیت ۸/۲ گیگاوات در شهر ساحلی جنوب‌غربی سینان تا سال ۲۰۳۰ رونمایی کرده است [۶۷]. طبق سناریوی ۱/۵ درجه سانتی‌گراد IRENA، باد دریایی می‌تواند به ظرفیت کلی نصب شده حدود ۳۸۲ گیگاوات تا سال ۲۰۳۰ و حدود ۲۰۰۲ گیگاوات تا سال ۲۰۵۰ برسد [۷۱]. فناوری توربین‌های بادی نیز تغییرات مثبتی خواهد داشت؛ برای مثال، شرکت توربین بادی دانمارکی Vestas در حال تحقیق روی یک توربین بادی دریایی بزرگ‌تر با ظرفیت نامی ۱۷ مگاوات است که می‌تواند در آینده، عملی شود [۷۲]. با توجه به پیشرفت‌های اخیر، اندازه توربین‌ها می‌تواند در یک یا دو دهه به ۲۰ مگاوات برسد [۶۶].

بررسی اقتصادی توربین‌های بادی

میانگین وزنی جهانی هزینه برق^۲ برای بادهای دریایی به‌طور کلی از ۰/۱۶۲ دلار/کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۰ به ۰/۰۸۴ دلار/کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. با این حال، LCOE بین ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ افزایش یافته

^۱ Hornsea 1

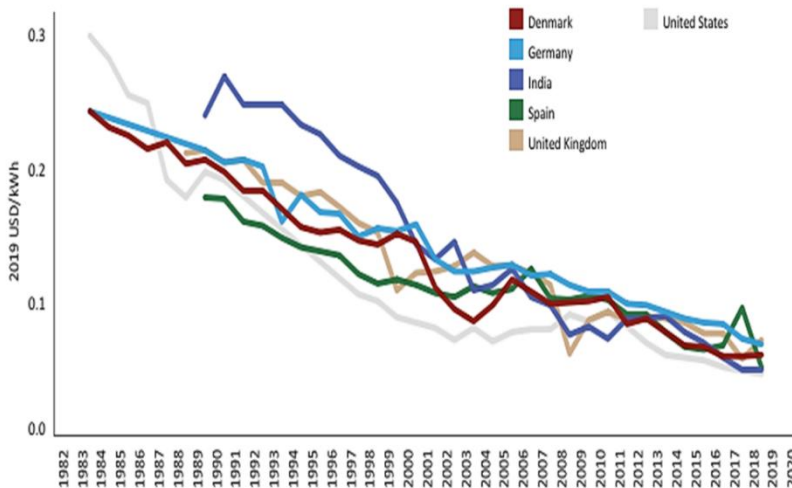
^۲ Levelised Cost of Electricity (LCOE)

است؛ زیرا پروژه‌ها بیشتر به آب‌های عمیق‌تر منتقل شده‌اند که در سال ۲۰۱۱ به اوج ۰/۱۷۱ دلار/کیلووات ساعت در ساعت و ۰/۱۶۵ دلار/کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۴ رسید و پس از آن با کاهش شدید مواجه شد.



شکل ۱۶. میانگین وزنی جهانی هزینه برق از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ برحسب دلار/کیلووات ساعت [۷۳]

در کشورهای پیشرو مانند چین، ژاپن، آلمان و انگلیس مقدار LCOE برای باد دریایی تا سال ۲۰۲۰ به شدت کاهش یافته است.



شکل ۱۷. میانگین وزن‌دهی LCOE پروژه‌های تازه وارد باد خشکی توسط کشورهای پیشرو از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۹ [۲۱]

به‌طور حتم هر طرحی پیش از شروع به کار نیاز به برآورد قیمت و در نتیجه سرمایه‌گذاری دارد. این هزینه‌ها شامل موارد مختلفی از جمله ساخت حمل‌ونقل و نصب خود توربین‌ها، فونداسیون توربین‌ها، اقدامات مربوط به انتقال نیرو

تولیدی به خشکی، عملیات کنترل و ... می‌باشد. در جدول ۱ درصد هزینه سرمایه‌گذاری پروژه شرکت زمینس برای توربین ۲/۵ مگاواتی فراساحلی در هریک از این موارد، به‌عنوان نمونه بررسی شده است.

جدول ۱. هزینه سرمایه‌گذاری پروژه کلید در دست شرکت زمینس با اندازه توربین ۲/۵ مگاوات دریایی با فاصله ۱۰ کیلومتر از ساحل [۲۸]

موارد موردنیاز به هزینه	درصد کل هزینه سرمایه‌گذاری
توربین‌های بادی	۴۹
زیرساخت‌های الکتریکی و اتصال به شبکه	۱۸
فونداسیون	۱۸
مانیتورینگ	۴
سایر هزینه‌ها	۱۱

در جدول ۲ نیز هزینه بهره‌برداری سالانه توربین ۲ مگاوات در خشکی ارائه شده است و درصد درآمد سالانه آن طبق آمار و ارقام، ۲۰ تا ۲۷ درصد برآورد گردیده است.

جدول ۲. هزینه بهره‌برداری سالانه توربین بادی کلاس ۲ مگاوات [۲۸]

هزینه‌ها	درصد قیمت کارخانه قبلی	درصد درآمد سالانه
قرارداد تعمیر و نگهداری	۱.۰-۱.۲	۵.۰-۶.۵
ذخایر تعمیر	۰.۸-۰.۵	۳.۰-۵.۰
بیمه‌ها	۰.۶-۰.۵	۳.۰-۳.۵
اجاره زمین	۱.۵-۱.۰	۶.۰-۸.۰
مدیریت/مشاوره	۰.۶-۰.۳	۲.۰-۳.۰
متفرقه (برق از شبکه، تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها و ...)	۰.۳-۰.۲	۱.۰-۱.۵
کل هزینه‌های سالانه	۵.۰-۳.۵	۲۷.۵-۲۰.۰

به‌طور کلی برای انتخاب توربین باید مقدار ظرفیت تولید توربین‌ها^۱ محاسبه گردد که هرچه این مقدار بالاتر باشد؛ توربین، بازده اقتصادی تری دارد [۴۸]. با توجه به آنکه تمامی نیروگاه‌های بادی در خشکی نصب شده‌اند، برآورد هزینه‌ها و مطالعات اقتصادی این انرژی پاک نیز در محدوده خشکی محاسبه شده است. در جدول ۳ هزینه‌های پایداری (منافع) نیروگاه‌ها با پنج فناوری مختلف با استفاده از روش NEW-DEA نشان داده شده است [۷۴].

^۱ Capacity Factor (CF)

جدول ۳. هزینه‌های پایداری (منافع) نیروگاه‌ها با پنج فناوری مختلف با استفاده از روش NEW-DEA [۷۴]

کاراجی	ایجاد اشتغال	رشد بازار	سهم بازار	رادیو اکتیویته	انتشار معادل دی - اکسیدکربن	استفاده از زمین	استفاده از آب	هزینه‌های معادل سالانه	هزینه‌های معادل پایداری (دلار بر کیلووات در سال) برای هر نیروگاه
فتوولتائیک	۷۶/۳۶	۱۱۷/۶۲	۲۵/۹	۰	۲۴/۵	۳/۱۳	۰/۱۵۶	۱۱۱۰/۳	
بادی	۱۴/۹۲	۱۸/۴۱	۴۰/۱	۰	۸/۸	۸/۴۲	۰	۵۶۱/۲	
خورشیدی-حرارتی	۲۰/۱۹	۱۰/۵۳	۰	۰	۱۴۲	۲/۰۵	۲/۴۴۴	۷۷۸	
سیکل ترکیبی توربین گازی	۹/۶۵	۰/۳۱	۳۱۱/۸	۰	۲۲۳/۹	۰/۱۲	۴۲/۶۵۶	۱۵۳/۹	
سیکل ترکیبی توربین گازی سازی تجمعی	۹/۶۵	۰/۸۴	۰	۰	۴۹۰/۵	۰/۱۲	۶۵/۷۸۷	۶۲۵/۷	

آزادسازی قیمت انرژی به‌خصوص هزینه سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر مبنای قیمت‌های واقعی انرژی، استفاده از توربین‌های بادی را کاملاً توصیه‌پذیر می‌کند. اگر قیمت ریالی گاز به قیمت ریالی گازوئیل نزدیک‌تر شود یا قیمت ارز افزایش یابد، به دلیل بالا بودن هزینه برق تولیدی نیروگاه‌های گازی، نیروگاه‌های بادی بسیار مقرون‌به‌صرفه خواهند بود به طوری که دو نیروگاه غیرقابل رقابت با هم دانسته شده‌اند [۷۵]. علاوه بر موارد بیان شده، از جنبه ایجاد اشتغال، به استناد IRENA کشور ایران تا به امروز برای تعداد ۳۴۰۰ کار در حوزه انرژی باد، ظرفیت دارد.

نتیجه‌گیری

در راستای آخرین سند فناوری باد وزارت نیرو مبنی بر اقدام پژوهشگران به امکان‌سنجی توربین‌های بادی دریایی (فراساحلی) و اطلس‌شناسی دریاها، در پژوهش حاضر، پتانسیل آب‌های ایران با هدف نصب انواع مختلف توربین بادی دریایی بررسی شد و به همین منظور انواع توربین‌های بادی براساس مدل سوات بحث و بررسی گردیدند. انواع توربین‌های بادی دریایی شناور فراساحلی در سه فونداسیون اصلی اسپار، پایه کششی و نیمه‌غوطه‌ور و توربین‌های بادی دریایی پایه ثابت ساحلی در چهار فونداسیون مونوپایل، گرانثی، جکت و سه‌پایه ضمن تطبیق با شرایط اقیانوس‌شناسی دریاها، ایران، بررسی شدند و مزایا، معایب، فرصت‌ها و تهدیدهای هرکدام از انواع مورد بحث قرار گرفت. در بین فونداسیون‌های شناور نوع اسپار پایدارترین و مناسب‌ترین سازه برای نواحی نامناسب جوی ولیکن با حمل‌ونقل و نصب دشوار به دلیل داشتن ساختاری بسیار عظیم، معرفی شد. پس از آن نوع پایه کششی با پایداری کمتری نسبت به نوع اسپار به دلیل کابل‌های مهار و لنگرهای آن و تحت تأثیر قرار گرفتن در برابر جزر و مد ولی حمل‌ونقل آسان‌تر شرح داده شد. در آخر، نوع نیمه‌غوطه‌ور برای دریایی با ژرفای حدود ۴۰ تا ۵۰ متر و حساس در برابر خوردگی، بارها و امواج به‌عنوان سومین مدل بررسی شد. در بخش‌های کم‌عمق سازه مونوپایل و سازه گرانثی در سه نسل، برای ژرفای ۲۰ تا ۵۰ متر با فونداسیون پایه ثابت معرفی شدند که سازه مونوپایل به دلیل نصب آسان در کمتر از ۲۴ ساعت برای عمق‌های کمتر، مناسب دانسته شد و از بین سه نسل گرانثی، نسل اول برای اعماق کم ۳ تا

۷ متر، نسل دوم ژرفای ۴ تا ۲۰ متر و در نهایت نسل سوم برای اعماق ۱۳ تا ۲۰ با حمل و نقل آسان تر و طراحی سبک تر معرفی شدند. سازه های جکت و سه پایه نیز به عنوان دو دسته دیگر از توربین های بادی دریایی پایه ثابت، برای دریاهایی با ژرفای ۵۰ تا ۸۰ متر با در نظر گرفتن سایر شرایط از حیث اقیانوس شناسی، مناسب دانسته شدند. به دلیل بالا بودن هزینه برق تولیدی نیروگاه های گاز و افزایش قیمت ریبالی و ارز، نیروگاه های بادی به علل متعددی که در متن بیان شده است، مقرون به صرفه تر دانسته شده اند.

روش پیشنهادی براساس ویژگی های اقیانوس شناسی و مختصات جغرافیایی، هزینه حمل و نقل و امکان مونتاژ و سهولت نصب ارائه شده است. با توجه به مطالعه ای که در خصوص ویژگی و موقعیت جغرافیای دریای خزر صورت گرفت، به دلیل منابع باد کم، نوع پایه کششی این توربین ها با توجه به پیچیدگی های ساختاری، نصب و حمل و نقل دشوار و نیاز آن به آب های عمیق ۱۸۰۰ متری، تنها برای آب های عمیق پیشنهاد می گردد. این در حالی است که سازه های مونوپایل و نسل سوم گرانشی ها گزینه های مناسبی برای ژرفای کم این دریا هستند. همچنین در نزدیکی سواحل جنوبی ایران به دلیل جزر و مد زیاد و تغییرات بسیار در عمق آب در شبانه روز و تحت تأثیر قرار گرفتن میزان کشش خطوط مهارسازی و لنگرگاهی سکوه های پایه کششی، استفاده از این ساختار در نزدیکی سواحل به شرط عمق ۱۸۰۰ متری، توصیه نمی گردد این در حالی است که سازه های اسپار به دلیل عمق بالای آب در نواحی نزدیک به ساحل، پایداری بسیار خوب در شرایط جوی گوناگون از گزینه های مطلوب شناخته شدند.

References

- [1] European Commission. (2020). *Boosting Offshore Renewable Energy for a Climate Neutral Europe*. European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_2096
- [2] Feldhaus, P., & Vahlenkamp, T. (2010, October). *Transformation of Europe's Power System until 2050 Including Specific Considerations for Germany Electric Power and Natural Gas Practice*. https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/epng/pdfs/transformation_of_europes_power_system.ashx
- [3] Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.-N., & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy – A review. *Renewable Energy*, 75, 911-921. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>
- [4] Heronemus, W. E. (1972, Sep. 11-13). *Pollution-free energy from offshore winds* 8th Annual Conference and Exposition, Marine Technology Society, Washington, D.C. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10029324950/>
- [5] Bartrop, N. (1993). Multiple unit floating offshore wind farm (MUFOW). *Wind Engineering*, 17(4), 183-188.
- [6] Tong, K. C. (1998). Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 399-410. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00036-1)
- [7] Henderson, A. R., & Patel, M. H. (1998, January). *Floating offshore wind energy*. BWEA Conference, https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Henderson/publication/30415925_Floating_Offshore_Wind_Energy/links/544d686b0cf24b5d6c42b522/Floating-Offshore-Wind-Energy.pdf
- [8] Henderson, A. R., Watson, G. M., Patel, M. H., & Halliday, J. A. (2000). Floating Offshore Wind Farms—An Option? *Proceedings of the offshore wind energy in mediterranean and other European seas, Siracusa, Sicilia, Italy*, 15.

- [9] Energy Technologies Institute. (2022). *Deep Water*. Energy Technologies Institute LLP. <https://www.eti.co.uk/programmes/offshore-wind/deep-water>
- [10] Onstad, A. E., Stokke, M., & Sætran, L. (2016). Site Assessment of the floating wind turbine Hywind Demo. *Energy Procedia*, 94, 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.205>
- [11] McPhee, D. (2020). 'World's largest' floating wind farm off Aberdeenshire delayed by six months. Aberdeen Journals Ltd. <https://www.pressandjournal.co.uk/fp/news/aberdeen-aberdeenshire/2561968/worlds-largest-floating-wind-farm-off-aberdeenshire-delayed-by-six-months/>
- [12] Pérez-Collazo, C., Greaves, D., & Iglesias, G. (2015). A review of combined wave and offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.032>
- [13] Ye, K., & Ji, J. (2018). The effect of the rotor adjustment on the vibration behaviour of the drive-train system for a 5 MW direct-drive wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(17), 3027-3044. <https://doi.org/10.1177/0954406217729418>
- [14] ETIPWind Executive Committee Alexander Vandenberghe, W. T., WindEurope,. (2020). *ETIPWindRoadmap*. Etipwind. <https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-roadmap-2020.pdf>
- [15] Kaveh, A., & Sabeti, S. (2019). Optimal Design Of Jacket Supporting Structures For Offshore Wind Turbines Using Enhanced Colliding Bodies Optimization Algorithm [Research]. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 9(1), 129-145.
- [16] Ye, K. (2018). *A study of the dynamic performance of the multi-system involved in the offshore floating type wind turbine*. <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/133157>
- [17] Aghamiri, S. R., . Ghadami, Farid. (2016). *Review of wind turbines and offshore wind turbines, advantages and limitations*. National Conference on Applied Engineering in Young and Elite Researchers Club, Islamic Azad University, West Branch of Tehran, Iran. <https://www.sid.ir/Fa/Seminar/ViewPaper.aspx?ID=88247>
- [18] Department of Energy. (2014, June 20). *How Do Wind Turbines Work?* . energy.gov. <https://www.energy.gov/articles/how-wind-turbine-works>
- [19] Demirtas, O. (2013). Evaluating the Best Renewable Energy Technology For Sustainable Energy Planning. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 3(S), 23-33.
- [20] Alamdari, E., . Wasti khabaz, Mahmoud,. Omid, Hossein. . (2013). *wind energy and construction of wind power plants with iranian technology*. 1st national conference on new and clean energy, Hamedan, Iran. <https://civilica.com/doc/210011/>
- [21] International Renewable Energy Agency. (2011-2020). *Data & Statistics*. IRENA - International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/statistics>
- [22] Zeinali, T., Jamil, M., & Najafi, G. H. (2018). *Technology of construction and installation of offshore wind farms for coastal areas of Iran*. Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of the Islamic World, Iran. <https://civilica.com/doc/775571>
- [23] Zafar, U. (2018). *Literature Review of Wind Turbines*. (Chair of Geotechnical Engineering Bauhaus Universität, Weimar, Issue. https://www.researchgate.net/publication/329680977_Literature_Review_of_Wind_Turbines

- [24] Chattot, J.-J. (2011). Wind turbine aerodynamics: analysis and design. *International Journal of Aerodynamics*, 1(3-4), 404-444. <https://doi.org/10.1504/IJAD.2011.038853>
- [25] David E. Watson. (2015). *Wind Turbine Power Coefficient (Cp)*. FT EXPLORING SCIENCE and TECHNOLOGY. <https://www.ftexploring.com/wind-energy/wind-power-coefficient.htm>
- [26] Climate-Charts. (2021). *Wind Speed*. Climate-Charts. <https://www.climate-charts.com/World-Climate-Maps.html>
- [27] Akhila Dharanikota & Suresh Rajendran. (2019, 07/23). *Numerical And Experimental Methods For Offshore Wind Turbine Design-A Review*. International Conference on Computational and Experimental Marine Hydrodynamics (MARHY 2018), Chennai, India. https://www.researchgate.net/publication/334625059_Numerical_And_Experimental_Methods_For_Offshore_Wind_Turbine_Design-A_Review
- [28] Sangbaad. (2021). *Wind Turbin*. sangbaad. <http://www.sangbaad.ir/category/%D9%85%D9%82%D8%A7%D9%84%D8%AA/%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%A8%D8%A7%D8%AF/>
- [29] Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science. (2021). *About INIOAS*. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science. <http://www.inio.ac.ir/Default.aspx?tabid=1204>
- [30] Zereshkian, S., & Mansoury, D. (2018). The Assessment of Offshore Wind Energy as a source of Electrical Energy for Offshore Oil and Gas Platforms of the Caspian Sea. *Hydrophysics*, 4(1), 57-68.
- [31] Niknam Geremi, H., Hakimzadeh, H., & Madadi, H. (2018). Feasibility Study of Installing Offshore Wind under Wind and Wave Environmental Loads in Caspian Sea. *Journal of Maritime Transport Industry*, 4(1), 4-17. <https://doi.org/10.30474/jmti.2018.64895>
- [32] Marinepress. (2019, October 4). *map and infographic of the depth of the caspian sea (caspian)*. Marinepress. <https://marinepress.ir/>
- [33] Wandji, W. N., Natarajan, A., & Dimitrov, N. (2016). Development and design of a semi-floater substructure for multi-megawatt wind turbines at 50+ m water depths. *Ocean Engineering*, 125, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.021>
- [34] Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2005, October 26–28). *Engineering challenges for floating offshore wind turbines*. A National laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Copenhagen, Denmark. <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/38776.pdf>
- [35] RazaghiKaljahi, A., LotfollahiYghin, M. A. . (2013). *Investigating the performance of tension base wind turbines against gravity-environmental forces and how to increase the efficiency of offshore wind turbines in the southeast of the Caspian Sea*. The first National Conference on New and Clean Energy, Hamedan, Iran. <https://civilica.com/doc/210099>
- [36] Nilsson, D., & Westin, A. (2014). Floating wind power in Norway-Analysis of opportunities and challenges. *CODEN: LUTEDX/TEIE*, 1-154.
- [37] RazaghiKaljahi, A., LotfollahiYghin, M. A. . (2013). *Investigation and evaluation of the possibility of using different options of offshore wind turbines according to the environmental and geotechnical conditions of the coasts and seas*. The first National Conference on New and Clean Energy, Hamedan, Iran. <https://civilica.com/doc/210099>

- [38] Esteban, M. D., Lopez-Gutierrez, J., & Negro, V. (2019). Gravity-Based Foundations in the Offshore Wind Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 64. <https://doi.org/10.3390/jmse7030064>
- [39] Pourshafie, F., Lashtehnesaei, M. A., & NezamivandChegini, A. H. . (2017). *Feasibility study of installing offshore wind turbines in the southwestern part of the Caspian Sea*. 16th Iran Hydraulic Conference, Ardabil, Iran. <https://civilica.com/doc/727392>
- [40] Tabarsa, A. (2017). *Feasibility Study of Offshore Wind Turbine Project in Caspian Sea*. International Conference on Macro Science and Engineering Infrastructure Development., Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/730425>
- [41] Rezaei Monfared, H., . Sedaghat, Aref., Watani Oskooi, Asghar. (2014). *Investigation of shallow northern and southern parts of the persian gulf for installation of offshore wind turbines according to environmental conditions*. The first regional conference on sea, development and water resources of the persian gulf coastal regions, Hormozgan, Iran. <https://civilica.com/doc/393396/>
- [42] Malhotra, S. (2011, April 04). Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations. In D. I. Al-Bahadly (Ed.), *Wind Turbines* (pp. 36). InTech. <https://doi.org/10.5772/15461>
- [43] Shrestha, S. (2015). *Design and analysis of foundations for onshore tall wind turbines* [Clemson]. South Carolina. https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3296&context=all_theses
- [44] Esteban, M. D., Couñago, B., López-Gutiérrez, J. S., Negro, V., & Vellisco, F. (2015). Gravity based support structures for offshore wind turbine generators: Review of the installation process. *Ocean Engineering*, 110, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.033>
- [45] Aarsleff. (2021). *Offshore Wind Turbine Foundations*. AARSLEFF. <https://www.aarsleff.com/>
- [46] Seatowe. (2022). *Self-installing foundations optimized for production and logistics*. Seatower. <http://seatower.com/home/>
- [47] Razmjo, A., & Shirmohammadi, R. (2016). Statistical Analysis and Potential Evaluation of Wind Energy in Dayyer port [Research]. *Iranian Journal of Energy*, 19(1), 167-179.
- [48] Sadeghian, A., Shirzadeh, A. . (2005). *A study of location selection methods for installing wind turbines*. 5th National Energy Conference, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/20191>
- [49] Persiangulfstudies. (2021). *Depth map of persian gulf, strait of hormuz and makran sea (oman)*. The persian gulf studies center. <http://www.persiangulfstudies.com/fa/pages/792>
- [50] Tahmasbi Fard, A., Azarsina, F., & Kazemi, S. (2017). *Feasibility study of offshore wind turbine construction with jacket guard structure in the Persian Gulf region using SACS engineering software*. The first international conference on new developments in civil engineering, Amol, Iran. <https://civilica.com/doc/726970>
- [51] Junginger, M., Agterbosch, S., Faaij, A., & Turkenburg, W. (2004). Renewable electricity in the Netherlands. *Energy Policy*, 32(9), 1053-1073. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00063-6)

- [52] Mingjun, B. (2017). Design Flow of Monopile Foundation for Offshore Wind Turbine. *Southern Energy Construction*, 4(S1), 56-61. <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.011>
- [53] 4Coffshore. (2021). *Monopiles Support Structures by 4C Offshore*. 4Coffshore. <https://www.4coffshore.com/>
- [54] Ali, H. M., Al-Esbe, I., & Alwan, H. M. (2021). A review of offshore wind turbines: global added capacity, monopile structure foundations stresses and deflection. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 9(2), 712-731. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i2.1879>
- [55] Achmus, M., Kuo, Y.-S., & Abdel-Rahman, K. (2009). Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 725-735. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.12.003>
- [56] Anaya-Lara, O., Tande, J. O., Uhlen, K., & Merz, K. (2018). *Offshore Wind Energy Technology*. John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-us/Offshore+Wind+Energy+Technology-p-9781119097761>
- [57] Peng, J., Clarke, B., & Rouainia, M. (2011). Increasing the resistance of piles subject to cyclic lateral loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 977-982. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000504)
- [58] Tomlinson, M. J., & Boorman, R. (2001). *Foundation design and construction*. Pearson education. <https://www.pearson.com/uk/educators/higher-education-educators/program/Tomlinson-Foundation-Design-and-Construction-7th-Edition/PGM521364.html>
- [59] Smulders. (2022). *Beatrice Offshore Wind Farm | Jackets*. Smulders Group Smulders is a member of Eiffage Group. <https://www.smulders.com/en/beatrice>
- [60] 4Coffshore. (2021). *Tripod Support Structures by 4C Offshore*. 4Coffshore. <https://www.4coffshore.com/>
- [61] Amirinia, G. H. R., Zahbion, B., & Mazaheri, S. (2012). *Investigating the effect of sea currents on the dynamic response of offshore floating wind turbines*. 14th Marine Industries Conference, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/473527>
- [62] Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., & Weinstein, A. (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2(3), 033104. <https://doi.org/10.1063/1.3435339>
- [63] Savenije, L., Ashuri, T., Bussel, G., & Staerdahl, J. (2010). *Dynamic modeling of a spar-type floating offshore wind turbine*. European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC), Warsaw, https://www.researchgate.net/profile/Gerard-Van-Bussel/publication/254852069_Dynamic_modeling_of_a_spar-type_floating_offshore_wind_turbine/links/0deec53bc12eb20025000000/Dynamic_modeling_of_a_spar-type_floating_offshore_wind_turbine.pdf
- [64] Jonkman, J. (2007). *Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine*. Nrel. <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41958.pdf>
- [65] IRENA. (2011-2020). *Statistics Time Series*. IRENA - International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- [66] IRENA. (2019). *FUTURE OF WIND*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pdf

- [67] Hyonhee Shin. (2021, February 5). South Korea unveils \$43 billion plan for world's largest offshore wind farm. *REUTERS*. <https://finance.yahoo.com/news/south-korea-unveils-43-billion-102034227.html>
- [68] Aya Takada. (2020, Des 15). *Japan Plans Huge Offshore Wind Expansion to Hit Climate Goal*. Bloomberg L.P. <https://www.bloomberquint.com/business/japan-to-lift-offshore-wind-capacity-fourfold-in-decade-to-2040>
- [69] Reve. (2020, December 9). *Offshore Wind Power in India: Key policy advances can lead to rapid gains for sector*. Evwind. <https://www.evwind.es/2020/12/09/offshore-wind-power-in-india-key-policy-advances-can-lead-to-rapid-gains-for-sector/78461>
- [70] Adrijana Buljan. (2021, March 30). *US Jumpstarts Offshore Wind, Targets 30 GW by 2030* offshore wind. <https://www.offshorewind.biz/2021/03/30/us-jumpstarts-offshore-wind-targets-30-gw-by-2030/>
- [71] IRENA. (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf
- [72] Steve Hanley. (2021, February 12). *Vestas Unveils World's Most Powerful Offshore Wind Turbine*. cleantechnica. <https://cleantechnica.com/2021/02/12/vestas-unveils-worlds-most-powerful-offshore-wind-turbine/>
- [73] IRENA. (2020, June). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. IRENA - International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf
- [74] Shakouri, G. H., Kazemi, A., Abdolapour, S., & Goldansaz, S.-M.-R. (2020). Economic, Social and Environmental Assessment of Electricity Generation from Renewable and Gas Technologies [Research]. *Iranian Journal of Energy*, 23(3), 7-33.
- [75] Motahari, S. A. A., Ahmadian, M., Abedi, Z., & Ghaffarzadeh, H. R. (2014). Economic Evaluation Of Wind Power Development In Iran Considering The Effect Of Energy Price Liberalization Policy. *Iranian Energy Economics*, 3(10), 179-200.