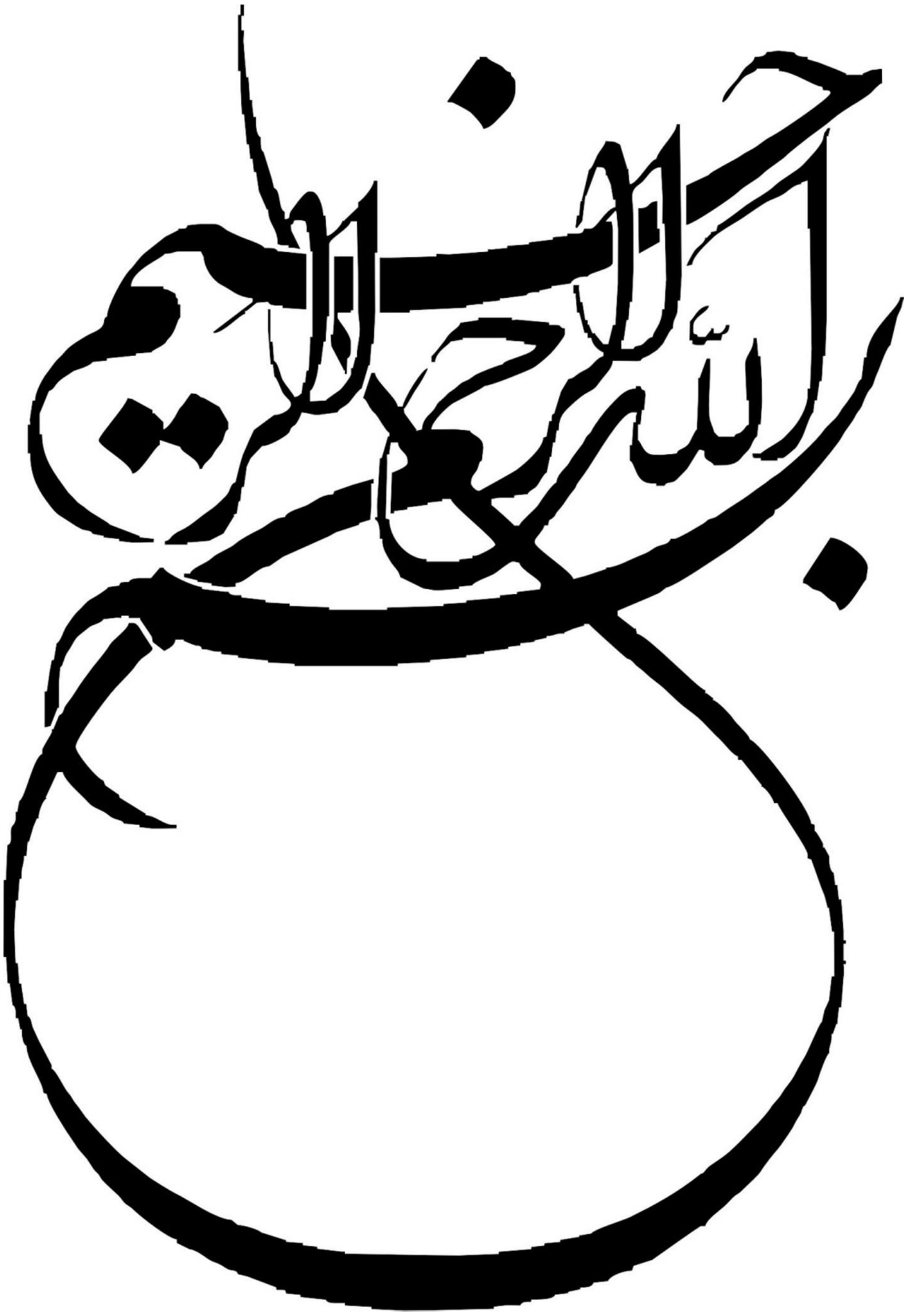

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی

امکان سنجی و جانمایی مزارع توربین بادی فراساحلی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان به همراه ارائه ی گزینه بهینه ی پایه زیرسازه ی توربین و الگوی بهینه ی آرایش و چینش مزارع

نگارنده: علی تمام گر

اساتید راهنما:

دکتر مهدی عجمی

دکتر محمد حسین کاظمی نژاد

بهمن ۱۳۹۵

شماره: ت ح ع ۲۴۸/۹۶
تاریخ: ۹۶/۲/۲۵
ویرایش:

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **علی تمام گر** به شماره **۹۲۰۴۰۲۴** رشته مهندسی **عمران** گرایش **سازه های دریایی** تحت عنوان **امکان سنجی و جانمایی مزارع توربین بادی فراساحلی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان به همراه ارائه ی گزینه بهینه ی پایه زیرسازه ی توربین و الگوی بهینه ی آرایش و چینش مزارع** که در تاریخ **۱۳۹۵/۱۱/۱۰** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۱۳) ☑   دفاع مجدد ☐   مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)   ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)   ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱- استادراهنمای اول	دکتر مهدی عجمی	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم	دکتر محمد حسین کاظمی نژاد		عدم حضور
۳- استاد مشاور	-		
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر ایمان آقایان		
۵- استاد ممتحن اول	دکتر فرشید جندقی علائی		
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سعید گلیان		

رئیس دانشکده:

۵

تشکر و قدردانی

با سپاس از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر عجمی که راهنمایی های ایشان همواره چراغ راه من بوده و از هیچ کمکی در این راه فروگزار ننمودند. بی شک بدون یاری های ایشان پیشرفت در مسیر انجام این تحقیق غیر ممکن بود.

و خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسبیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

تعهد نامه

اینجانب **علی تمام گر** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه های دریایی** دانشکده **مهندسی عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **امکان سنجی و جانمایی مزارع توربین بادی فراساحلی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان به همراه ارائه ی گزینه بهینه ی پایه زیرسازه ی توربین و الگوی بهینه ی آرایش و چینش مزارع** تحت راهنمائی **جناب آقای دکتر مهدی عجمی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

*** متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .**

چکیده

امروزه انرژی باد به عنوان یکی از پر استفاده ترین انواع انرژی های تجدید پذیر جهت استحصال انرژی، مورد توجه جهانیان می باشد. تحقیقات زیادی جهت استفاده از این نوع انرژی در خشکی چه در داخل و چه در خارج از کشور انجام شده است، اما علیرغم توجه ویژه جامعه علمی در سطح جهانی در زمینه استحصال انرژی باد در فراساحل، هنوز مطالعات اندکی در داخل کشور انجام شده است. لذا بر آن شدیم تا یک تحقیق جامع و کامل را در این زمینه تدوین نماییم تا سرآغاز تحقیقات گسترده در این زمینه در کشور عزیزمان باشیم. با در نظر داشتن سطح آب های جنوب کشور و نیز سکو های نفتی موجود در این منطقه، محدوده مطالعه و بررسی این تحقیق آب های جنوب کشور انتخاب شد.

در این تحقیق پس از انجام زون بندی که لازمه شروع یک تحقیق منسجم می باشد، اطلاعات باد مربوط به مناطق جنوبی کشور برای ۷ سال شامل سال های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۹ الی ۲۰۱۳ جمع آوری شد و پس از دسته بندی و ایجاد یک مرکز داده قابل استفاده برای کارهای بعدی، میانگین گیری سالیانه و تعیین ملاک امکان سنجی مناطق بر اساس استاندارد IEC، مطالعه الگوی باد منطقه جهت صحت سنجی اطلاعات مورد استفاده انجام شد. محدوده مناسب از لحاظ سرعت باد، با طول جغرافیایی ۵۰ الی ۵۲ و عرض جغرافیایی ۲۷ الی ۲۸ در نزدیکی بندر دیر و کنگان می باشد. همچنین در این مرحله از تحقیق مشخص شد که برای منطقه مذکور و نیر مناطق با سرعت کمی کمتر نیز توربین های بادی سازگار در مقیاس تولید انبوه وجود دارد. در قدم بعدی ضمن معرفی انواع زیرسازه های ثابت مورد استفاده در صنعت باد فراساحل و دسته بندی نقاط قوت و ضعف آن ها، از طریق یک سیستم امتیاز دهی طبق مطالعات انجام شده و در نظر گرفتن عمق حدودی منطقه مستعد که تقریباً ۵۰ متر می باشد، زیرسازه جکت به عنوان زیرسازه مناسب مشخص شد. در آخرین مرحله جهت تحقق موضوع تحقیق، با بررسی اثر wake از روش Jensen، صرفاً برای سرعت باد و بدون در نظر گرفتن سایر عوامل از جمله هزینه شبکه الکتریکی مزرعه بادی و تغییرات جهت باد، فواصل طولی و عرضی توربین ها در پلان قرارگیری آن ها مشخص شد.

امید است که این تحقیق بتواند زمینه ساز خوبی برای پیشرفت های بعدی و تحقیقات بومی در عرصه انرژی باد فراساحل ایران باشد.

کلمات کلیدی: فراساحل، مزرعه بادی، توربین بادی، زیرسازه، چینش و آرایش

فهرست مطالب

فهرست اشکال

فهرست جداول

فصل اول

مقدمه

۱) مقدمه

۱-۱ کلیات و تعاریف

۱-۱-۱ انرژی

در طی ۱۵۰ سال گذشته، سوخت های فسیلی به عنوان مهم ترین منبع تأمین انرژی استفاده شده است. منبع سوخت های فسیلی با سرعتی بیش از هر زمان دیگر رو به اتمام بوده و این روند به میزان مصرف بستگی دارد. پیش بینی مصرف انرژی در دنیا تا سال ۲۰۴۰، ۵۶٪ افزایش را نشان می دهد که این افزایش ناشی از تقاضا و جمعیت رو به رشد کشور های در حال توسعه مانند هند، چین و برزیل می باشد. منابع کشف شده زغال سنگ، نفت و گاز با توجه به روند استخراج فعلی، به ترتیب تنها ۱۱۲، ۴۶ و ۵۴ سال دیگر عمر خواهند کرد. استفاده از سوخت های فسیلی، تأثیرات مخرب بر محیط زیست و سلامت انسان دارد، علاوه بر آن سوخت های فسیلی منابع تجدید پذیر در مقیاس زمانی انسان نمی باشد و نیز قیمت آن نیز به سیاست های کشور های تولید کننده بستگی دارد. استفاده از انرژی های تجدید پذیر نه تنها باعث حفظ محیط زیست می شده، بلکه باعث استقلال کشور ها در زمینه انرژی می شود [1,2,3].

۱-۱-۲ انرژی باد

یکی ار منابع انرژی تجدید پذیر که در دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته است انرژی باد می باشد. باد هزاران سال است که برای انسان ها به عنوان یک منبع مهم انرژی مطرح است. از دید تاریخی تنها در جریان انقلاب صنعتی بود که انرژی باد اهمیت خود را از دست داد. استحصال انرژی از باد به وسیله توربین[1] های بادی که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند انجام می شود. توربین های بادی که عامل استحصال انرژی از باد می باشند از لحاظ تعداد رو به افزایشَ و از لحاظ فناوری، راندمان و محیط نصب در مسیر پیشرفت می باشند. توربین های بادی در مقایسه با سایر روش های استحصال انرژی چه در خشکی و چه در فراساحل[2] از ظرفیت تولید انرژی بالاتری برخوردار می باشند [4,5,2].

[1] Turbine
[2] Offshore

در پایان قرن ۱۹ میلادی، اولین توربین بادی مولد برق در دانمارک نصب شده است. این توربین حاصل تبدیل یک آسیاب بادی چوبی قدیمی به توربین بادی بود. در سال ۱۹۴۰ میلادی اولین توربین بادی با ظرفیت مگاواتی در آمریکا نصب و راه اندازی شد. پیشرفت در صنعت انرژی باد همواره تابع نوسانات قیمت سوخت های فسیلی بوده است، اما بحران سوخت دهه ۷۰ میلادی دوباره صنعت باد را احیا کرد و موجب معرفی ایده مزارع بادی[۳] گردید. در اوایل و اواسط دهه ۸۰ میلادی ظرفیت متداول برای توربین های بادی کمتر از ۱۰۰ کیلووات بوده است، این عدد در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ میلادی به ۵۰۰ کیلووات رسید، در اواسط دهه ۹۰ میلادی ظرفیت متداول برای توربین های بادی در بازه ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات بوده است و در حال حاضر این مقدار در حدود ۵ مگاوات می باشد [1,5,3].

از آغاز قرن ۲۱ میلادی، استفاده از انرژی باد مخصوصاً در اروپا، آمریکا، چین و هند قوت گرفت. ظرفیت توربین ها از ۵۰ کیلووات به ۶ مگاوات افزایش یافت. این افزایش ظرفیت از یک سو باعث به وجود آمدن چالش های مهندسی و طراحی جدیدی می شود و از سوی دیگر موجب بهبود تراز هزینه تولید (LPC) مزارع بادی می شود. مزارع بادی از لحاظ موقعیت نصب به دو دسته خشکی و فراساحل دسته بندی می شود [1]. در این دسته بندی، منظور از فراساحل، الزاماً آب های با عمق زیاد نمی باشد، لازم به ذکر است در سال ۲۰۱۳ بیشترین ظرفیت نصب شده کلی در عمق ۱۰-۲۰ متر بوده است [6]. می توان بر اساس گزارش های انجمن جهانی انرژی باد (GWEC)[۴] و انجمن انرژی باد اروپا (EWEA)[۵] جایگاه صنعت باد در سال ۲۰۱۲ به شرح زیر بوده است:

- رشد بازار جهانی سالیانه و ظرفیت تجمعی صنعت باد به ترتیب ۱۰٪ و ۱۹٪ بوده است [7,8].
- ظرفیت نصب شده کل در جهان ۲۸۲،۴۸۲ مگاوات بوده است [7,8].

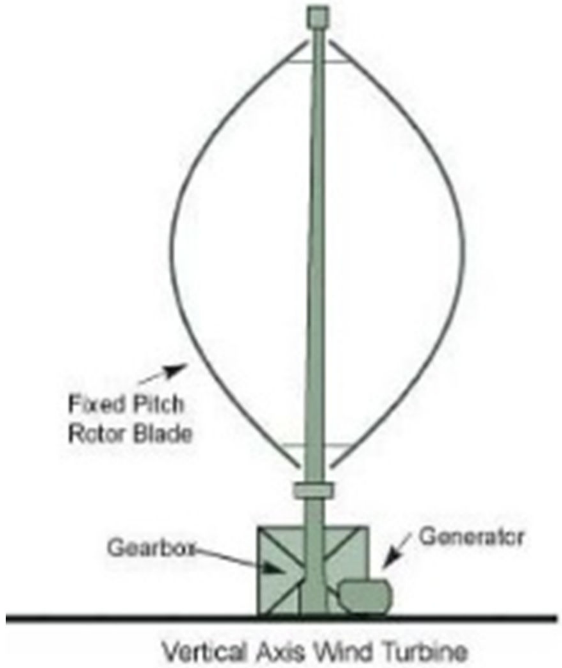
۱-۱-۳ توربین های بادی:

۱-۱-۳-۱ انواع توربین های بادی:

توربین های بادی انواع مختلفی دارند که در زیر به چند مورد پر کاربردتر اشاره شده است:

[3] Wind Farm
[4] Global Wind Energy Council
[5] European Wind Energy Association

- توربین های با محور عمودی[6]: در ایـن نـوع تـوربین هـا، محـور اصـلی چـرخش پـره هـا (بـه هر شکلی که باشند) بـه صـورت عمـودی نسـبت بـه افـق قـرار مـی گیـرد. شـکل زیـر یـک نمونه از این نوع را نشان می دهد.



شکل ۱-۱شکل کلی توربین بادی محور عمودی

یکی از بارزترین محاسن توربین های بادی با محور عمودی، سازگاری با شرایط باد با تغییر سـرعت زیاد می باشد، در کنار این ویژگی، هزینه کمتر احداث سازه نگهدارنده و سهولت بیشتر و هزینه کمتـر تعمیر و نگهداری، که ناشی از نصب تجهیزات اصلی (گیربکس و ژنراتور) روی سطح زمـین مـی باشـد، شایان ذکر است[9]. توربین های بادی با محور عمودی، خود به دو دسته تقسیم می شوند:

- توربین های بادی محور عمودی داریوس[7]: پره های این نوع توربین ها، شبیه بـه یـک همـزن تخم مرغ بزرگ می باشد. علیرغم بازده بالای این نوع توربین، مشکل اصلی آن نیاز بـه انـرژی کمکی برای آغاز حرکت آن می باشد. [9]
- توربین های بادی محور عمودی ساوونیوس[8]: این نوع توربین های محور عمودی، شامل دو یـا چند صفحه می باشند که به شکل زیر حول محور آن فرم داده شده اند.

---

[6] Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)
[7] Dariues VAWT
[8] Savonius VAWT

شکل ۱-۲نمونه واقعی توربین بادی محور عمودی از نوع داریوس

شکل ۱-۳شکل کلی توربین بادی محور عمودی از نوع ساوونیوس

یکی از مزیت های شاخص این نوع توربین ها، عملکرد مناسب آن هـا در شـرایط توربـولانس[9] بـالا بوده و بر خلاف نوع داریوس، نیاز به کمک راه اندازی ندارد.[9]

[9] Turbulence

به طور کلی می توان مزایا و معایب توربین های محور عمودی را به طور خلاصه چنین دانست[9]:

جدول ۱-۱جمع بندی مزایا و معایب توربین های بادی محور عمودی

مزایا	**معایب**
۱. بدون نیاز به سیستم تغییر جهت محور. ۲. تعمیر و نگهداری آسان و کم هزینه به علت قرار گیری قسمت های اصلی در نزدیکی سطح. ۳. سرعت کمتر مورد نیاز جهت آغاز به کار ۴. ارتفاع کلی کمتر و در نتیجه قابلیت استفاده در محل هایی که محدودیت ارتفاع سازه ها مطرح می باشد **۵.** قابلیت استفاده به صرفه تر بر روی سایر سازه ها (به علت مرکز جرم پایین تر) مانند پشت بام ها و...	۱. به طور کلی تولید برق کمتری دارند (نسبت به توربین های محور افقی (به دلیل نیروی درگ) ۲. نصب در ارتفاع کمتر نسبت به توربین های محور افقی و در نتیجه عدم بهره گیری از سرعت بیشتر باد در ارتفاع های بیشتر. ۳. تکنولوژی کمتر شناخته شده و تحقیقات کمتر در خصوص آن

- توربین های با محور افقی[10] (HAWT): در این نوع توربین ها محور چرخش پره ها موازی افق می باشد و شکلی مشابه آسیاب های بادی سنتی دارد. در این نوع توربین ها، تجهیزات اصلی در قسمت بالای سازه برج (مرکز محور چرخش پره ها) قرار می گیرد.

شکل ۱-۴شکل کلی توربین بادی محور افقی فراساحل

برای چرخش پره ها و نتیجتاً تولید برق، محور چرخش باید در امتداد راستای وزش باد قرار گیرد، برای برآورده کردن این نیاز در توربین های کوچک از یک باله آئرودینامیک در پشت ناسل استفاده می شود. در توربین های بزرگ تر وظیفه تغییر زاویه ناسل و بالطبع

[10] Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

محور چرخش به عهده یک موتور جداگانه می باشد. تقریباً تمام توربین های بزرگ از گیربکس بهره می برند که باعث تولید برق در طیف وسیعتری از سرعت باد می شود. به علت آشفتگی ناشی از بر هم کنش باد و سازه برج توربین بادی، پره ها متداولاً رو به باد و جلوی سازه برج نصب می شوند و به منظور عدم برخورد با برج بر اثر فشار باد، سخت تر و با کمی زاویه رو به بالا ساخته و نصب می شوند[9].

توربین های محور افقی پشت به باد با این دید که نیاز به سیستم چرخش ناسل ندارد تولید و به کار گرفته شده اند. علاوه بر آن، در توربین های مذکور به هنگام وزش باد های شدید (با به کارگیری پره های با انعطاف بیشتر ناشی از عدم وجود محدودیت انعطاف پره ها به منظور عدم برخورد با سازه برج)، پره ها به علت تغییر شکل، ناحیه کمتری از سطح را پوشش می دهند و می توانند فعال باشند. با تمام بحث های فوق، اثر مخرب توربولانس و خرابی بر اثر خستگی ناشی از آن باعث شده است اکثر توربین های بادی محور افقی حال حاضر، رو به باد ساخته شوند[9].

به طور کلی و خلاصه می توان مزایا و معایب توربین های بادی محور افقی را به شکل زیر طبقه بندی نمود[9]:

جدول ۱-۲جمع بندی مزایا و معایب توربین های بادی محور عمودی

مزایا	معایب
۱. بهره گیری از سرعت بیشتر باد به علت ارتفاع بیشتر محور و به طور کلی سطح جذب انرژی (افزایش هر ۱۰ ارتفاع، حدوداً ۲۰٪ افزایش سرعت باد و ۳۴٪ افزایش تولید انرژی را در پی دارد) **۲.** بازده استحصال انرژی بالا به علت استفاده حداکثری از انرژی باد، ناشی از اینکه پره ها همواره عمود بر راستای وزش باد قرار دارند.	۱. سختی و هزینه بالای ساخت و تعمیر و نگهداری به علت نصب تجهیزات در ارتفاع. ۲. خراب کردن چشم انداز طبیعی ۳. نیاز به سیستم چرخش محور ۴. متداولاً نیازمند سیستم خروج از مدار در صورت افزایش چشم گیر سرعت باد می باشند.

امروزه توربین های بادی با محور افقی و رو به باد بیشترین استفاده واقعی و توسعه یافته تر را در استحصال انرژی برق از باد را در مقیاس بزرگ و نیروگاهی دارند (به علت توان تولیدی بالاتر نسبت به سایر انواع)، لذا تمرکز این تحقیق بر روی این نوع توربین ها خواهد بود و لذا از این پس به طور خلاصه از آن ها با نام توربین بادی نام برده خواهد شد.

۱-۱-۳-۲ اجزای توربین بادی *[5]*:

- ژنراتور[11]: توربین های بادی معمولاً جهت تبدیل انرژی دورانی به برق از یک ژنراتور AC بهره می برند، در توربین های کوتاه تر این ژنراتور از نوع DC می باشد. برق تولیدی توسط ژنراتور به وسیله کابل ها انتقال می یابد.
- پره[12]: وظیفه پره های توربین بادی چرخاندن ژنراتور می باشد تولید برق یا افزایش تعداد پره ها افزایش می یابد. تعداد متداول برای پره ها ۳ می باشد، البته توربین هایی با ۲ و ۴ پره هم موجود می باشد و معمولاً بین ۳۰ الی ۵۰ متر طول داشته و جنس آن از فایبرگلاس می باشد.
- کنترلر[13]: وظیفه این قسمت بررسی شرایط توربین و بر اساس آن کنترل حرکات توربین می باشد. سیستم کنترل، پارامتر های مربوط به زاویه پره ها در راستای محور خود (جهت تنظیم ممان تولیدی)، زاویه ناسل در راستای محور عمودی و میزان فشار ژنراتور را به منظور بیشینه نمودن تولید برق تنظیم می کند.
- گیربکس[14]: وظیفه اصلی گیربکس تنظیم سرعت چرخش شفت می باشد به این ترتیب که یک عدد شفت سرعت پایین (متصل به پره ها) چرخش را به گیربکس انتقال داده و یک عدد شفت سرعت بالا (متصل به ژنراتور) چرخش را به ژنراتور منتقل می کند. بعضی از ژنراتور ها از سیستم مستقیم اتصال شفت پره ها بهره می برند که این قابلیت را دارند که در سرعت های دورانی پایین تر، تولید برق داشته باشند.
- روتور[15]: روتور شامل هاب و پره های متصل به آن می باشد. عملکرد توربین بادی بر اساس تعداد، شکل و طول پره ها تعیین می شود.
- ناسل[16]: محل قرارگیری تجهیزات و اجزای اصلی توربین بادی از جمله کنترلر، گیربکس، ژنراتور و محور اصلی انتقال (شفت[17]) می باشد.
- برج[18]: تاور ها متداولاً قطعات با مقطع دایره توخالی می باشند که محل قرارگیری ناسل و روتور در ارتفاع بوده و حدوداً بین ۶۰ تا ۱۰۰ متر ارتفاع دارند.

[11] Generator
[12] Blade
[13] Controller
[14] Gearbox
[15] Rotor
[16] Nacelle
[17] Shaft

۱-۱-۴ انرژی باد فراساحل

در حـال حاضـر بیشـتر تـوربین هـای بـادی نصـب شـده (بـه علـت هزینـه احـداث کمتـر) در خشـکی قـرار دارنـد. در مناسـب تـرین محـل هـای خشـکی[۱۹] کـه در آن هـا مـزارع تـوربین بـادی احداث شـده اسـت هـم مشـکل شـکایت همسـایگان از سـر و صـدا و لـرزش آن هـا وجـود دارد. امـا در فراسـاحل دیگـر خبـری از شـکایت همسـایگان نیسـت. از ایـن رو و بـه علـت مزایـای شـرایط محیطی فراساحل ماننـد زبـری کمتـر سـطح (و نتیجتـاً آشـفتگی کمتـر) و سـرعت و کیفیـت بهتـر بـاد در فراسـاحل، محـل احـداث مـزارع بـادی در حـال حرکـت بـه سـمت فراسـاحل مـی باشـد [2,4,5]. علل فوق، دلایل اصـلی انتقـال مـزارع بـادی از خشـکی بـه فراسـاحل مـی باشـد. از ایـن رو امروزه توربین های بـادی فراسـاحل بـه طـور گسـترده ای در کشـور هـای پیشـرفته مـورد اسـتفاده قرار می گیرند، برای مثال در دریای شـمال پـیش بینـی مـی گـردد ایـن مقـدار تـا سـال ۲۰۳۰ بـه 250 GW افـزایش یابـد.[10] شـکل ۱-۵ مربـوط بـه مزرعـه بـادی فراسـاحل شـرینگهام[۲۰] واقـع در انگلـیس بـا ظرفیـت حـداکثری 317 MW (بزرگتـرین مزرعـه تـوربین بـادی فراسـاحل) مـی باشـد. [11.1]

شکل ۱-۵ مزرعه بادی فراساحل شرینگهام در انگلیس

ایده احـداث مـزارع بـادی فراسـاحل بـرای اولـین بـار در دهـه ۳۰ مـیلادی ارائـه شـد امـا در آن زمـان محقـق نشـد. اخیـراً بـا پیشـرفت تکنولـوژی در زمینـه تـوربین هـای بـاد فراسـاحل، قیمـت انـرژی تولیـدی از ایـن راه قابـل رقابـت بـا سـایر روش هـای تولیـد انـرژی نـو مـی باشـد و امـروزه انرژی باد فراسـاحل یکـی از مهـم تـرین منـابع انـرژی تجدیـد پـذیر بـوده کـه مـی توانـد در سـطح

[18] Tower
[19] Onshore
[20] Sheringham Offshore Wind Farm

جهانی پاسخگوی نیاز انرژی باشد و پیش بینی می شود در آینده جایگزین سوخت های فسیلی شوند. بر اساس تخمین های صورت گرفته، در حدود ۱۰ میلیون مگاوات انرژی باد به طور مداوم در سطح زمین موجود می باشد [12,5].

انرژی باد فراساحل می تواند باعث حل مشکلات متعدد پیش روی صنعت باد[21] باشد. امکان تولید انرژی بیشتر و مداوم تر ناشی از باد های قوی تر و با احتمال وقوع بیشتر، از بین رفتن مشکلات از قبیل سر و صدا، آلودگی مناظر و اشغال زمین با حرکت مزارع بادی به سوی فراساحل میسر می شود. در مقابل مزایایی که به آن اشاره شد، مزارع باد فراساحل مسائل و چالش هایی از قبیل شرایط محیطی سخت، بارگذاری سنگین تر و هزینه احداث و نگهداری زیاد را نیز به همراه دارد [1].

برای سالیان متمادی کشور دانمارک در زمینه انرژی باد فراساحل به عنوان پیشرو مطرح بوده و هست، در سال ۲۰۰۲ میلادی اولین مزرعه بادی در مقیاس بزرگ در این کشور احداث شد و در سال ۲۰۰۸ میلادی نیز این کشور بیش از ۲۰٪ انرژی برق خود را از راه انرژی باد فراساحل تأمین نمود. در حال حاضر نیز در این کشور سیاست هایی در راستای کاهش اتکا بر سوخت های فسیلی و تأکید بر افزایش ظرفیت تولید انرژی از راه صنعت باد فراساحل اتخاذ شده است. در بریتانیا نیز در سال های اخیر چندین مزرعه بادی فراساحل احداث شده است و دولت برای افزایش ظرفیت تولید انرژی از این راه تا ۳۳ گیگاوات تا سال ۲۰۲۰ میلادی، برنامه ریزی کرده است [12].

۱-۱-۵ روند طراحی مزارع بادی فراساحل

روند طراحی مزارع بادی شامل بررسی شرایط محیطی، انتخاب توربین مناسب، تحقیقات در مورد بستر، بررسی موانع و خطرات، انتخاب زیرسازه و فونداسیون، تعیین بار های طراحی و تحلیل سازه ای می باشد [13].

از آنجا که توربین های بادی، انرژی موجود در باد را به انرژی برق تبدیل می کنند (در حدود ۵۹ درصد انرژی باد از طریق توربین به برق تبدیل می شود) ، در مزارع بادی، با عبور باد از هر توربین، مقداری از انرژی آن کاسته می شود. بنابراین تعداد ردیف های توربین در مزارع بادی برای رسیدن به بازده مناسب در هر منطقه با توجه به انرژی باد و مشخصات

[21] Wind Industry

توربین بـه کـار گرفتـه شـده، محـدود اسـت. همچنـین بـا توجـه بـه اثـرات منفـی ناشـی از بـر هـم خوردن جریـان بـاد توسـط هـر تـوربین بـر روی عملکـرد تـوربین بعـدی، فاصـله ردیـف هـا از هـم مشـخص شـده و بـا توجـه بـه شـرایط موجـود، آرایـش بهینـه مزرعـه بـادی در منطقـه مـورد نظـر ارائه خواهد شد.

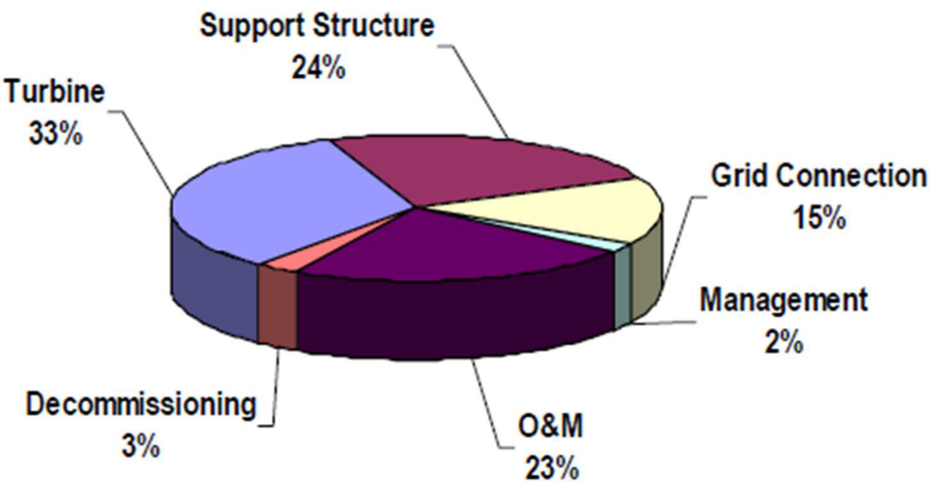
بـا در اختیـار داشـتن اطلاعـات بـاد و مشخصـات مزرعـه بـادی (ظرفیـت، تعـداد و آرایـش توربین ها) در هر منطقه، مـی تـوان میـزان بـرق تولیـدی آن را پـیش بینـی نمـود تـا بـازده منطقـه جهت احـداث مـزارع تـوربین بـادی مشـخص شـود و بـا ارائـه میـزان تقریبـی هزینـه هـای احـداث مزرعه بـادی در هـر منطقـه، صـرفه اقتصـادی آن مـورد بررسـی قـرار خواهـد گرفـت. در حقیقـت موضـوع تحقیق حاضر نیز اجرا و تشریح این روند طراحی برای سواحل جنوبی ایران است.

۱-۱-۶ زیرسازه توربین بادی فراساحل

۱-۱-۶-۱ کلیات

ایده های مختلفی برای زیرسـازه تـوربین هـای بـادی وجـود دارد و هـر کـدام نیـز نقـاط قـوت و ضعف خاص خـود را بـه همـراه دارنـد. بحـث صـرفه اقتصـادی هـر ایـده بـه شـرایط سـایت نصـب[۲۲] بستگی داشـته و عمـق نصـب از مهـم تـرین عوامـل تعیـین کننـده ایـن فـاکتور مـی باشـد. شـرایط بستر، حمل و نقل و نصب نیـز از جملـه عوامـل تـأثیر گـذار بـر مسـائل اقتصـادی مـزارع بـادی مـی باشد و حتی ممکن اسـت از هزینـه تولیـد نیـز بیشـتر شـود [12]. بـر اسـاس تحقیقـات انجـام شـده در زمینه زیرسـازه تـوربین هـای بـادی فراسـاحل، مـی تـوان گفـت کـه حـدود ۳۰ درصـد از کـل هزینـه احـداث توربین هـای مـذکور در اعمـاق کمتـر از ۲۰ متـر، مربـوط بـه زیرسـازه آن مـی باشـد (در اعمـاق بـیش از ۲۰ متر ایـن مقـدار افـزایش خواهـد یافـت)، از اینـرو و بـا توجـه بـه اهمیـت صـرفه اقتصـادی بـرای ایـده مـزارع بادی فراسـاحل، انتخـاب زیرسـازه مناسـب بـا توجـه بـه الگـوی بـاد و شـرایط منطقـه امـری مهـم اسـت. در شکل زیر، یک نمودار کلی از هزینه های احداث مزارع بادی آمده است.

[22] Construction Site



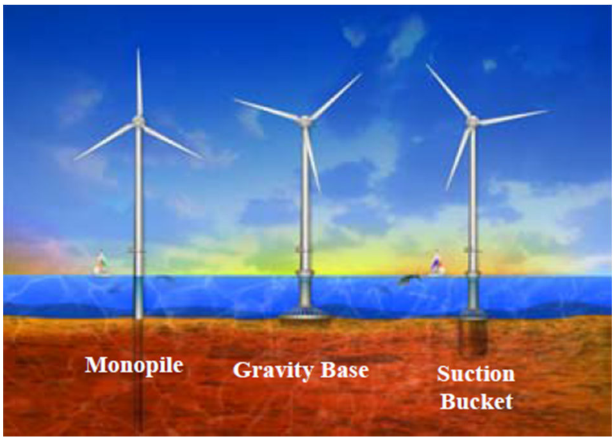
شکل ۱-۶ نمودار میزان نسبی هزینه ها در احداث مزارع بادی [۱۰]

البته لازم به ذکر است که نمودار بالا، بـه صـورت تقریبـی بـوده و میـزان دقیـق هزینـه هـا بسـته بـه هـر پروژه مـی توانـد متفـاوت باشـد. علـی رغـم مزایـای احـداث مـزارع بـادی در فراسـاحل، طراحـی سـازه برای این نوع از مزارع بـادی بـه علـت شـرایط محیطـی سـخت در کنـار نیـروی بـاد بـرای طراحـان یک چالش به حساب می آید [2].

۱-۱-۶-۲ انواع زیرسازه توربین های بادی فراساحل

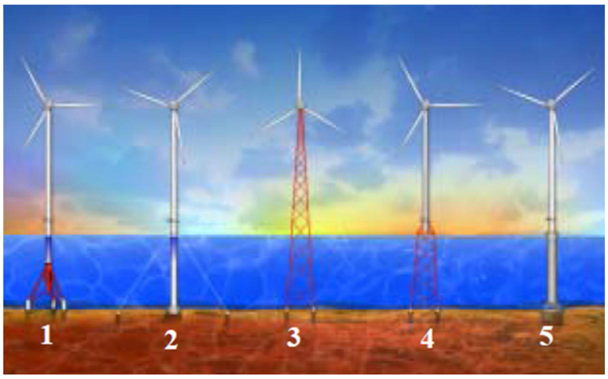
همانند دیگـر سـازه هـای دریـایی، یـک روش طبقـه بنـدی زیـر سـازه هـای تـوربین هـای بـادی، طبقـه بنـدی بـر اسـاس عمـق آبـی اسـت کـه سـازه در آن احـداث مـی گـردد. زیـر سـازه تـوربین هـای بـادی فراساحل را می توان بر اساس عمق نصب به سه دسته اصلی تقسیم نمود [5]:.

- زیرسازه آب های کم عمق که متداولاً در اعماق ۵ الی ۳۰ متر استفاده می شود:
  - سازه تک شمع (Monopile)
  - سازه وزنی (Gravity Base)
  - سازه مکشی (Suction Bucket)



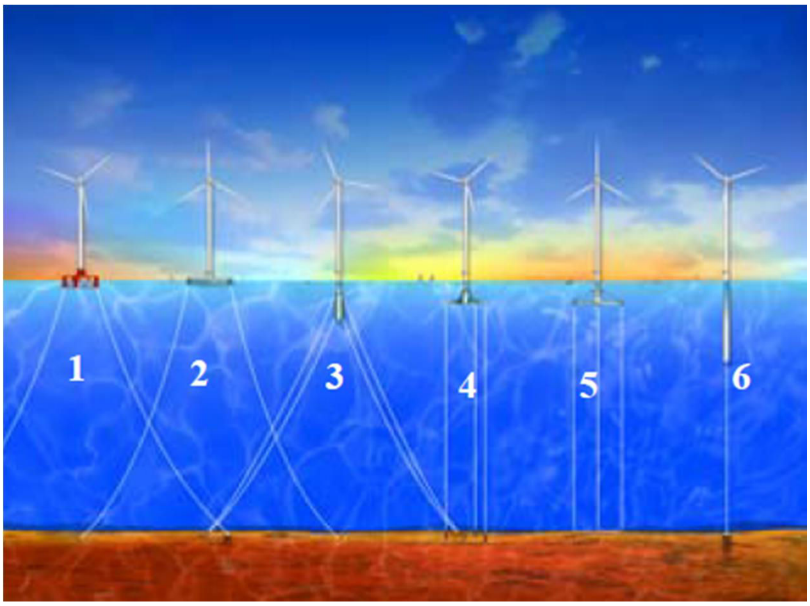
شکل ۱-۷ شکل شماتیک زیرسازه های مورد استفاده جهت نصب توربین بادی در آب های کم عمق

- زیرسازه آب های با عمق متوسط که متداولاً در اعماق ۳۰ الی ۶۰ متر استفاده می شود:
  - سازه سه پایه (Tripod)
  - سازه تک شمع مهار شده (Guyed Monopile)
  - سازه جکت (Jacket)



شکل ۱-۸ شکل شماتیک زیرسازه های مورد استفاده جهت نصب توربین بادی در آب های با عمق متوسط

- زیرسازه آب های با عمق زیاد که متداولاً در اعماق بیش از ۶۰ متر استفاده می شود:
  - سازه اسپار (Spar-Type)
  - سازه پایه کششی (Tension Leg Platform)
  - سازه نیمه مستغرق (Semi-Submersible)
  - سازه پانتون (Pantoon)



شکل ۱-۹ شکل شماتیک زیرسازه های مورد استفاده جهت نصب توربین بادی در آب های با عمق زیاد

جزئیات و توضیحات کامل در مورد هر کدام از انواع زیر سازه های آب های با عمق کم و متوسط که بحث اصلی این پایان نامه می باشد در فصول بعد ارائه خواهد شد.

۱-۲ سؤالات و فرضیات

۱-۲-۱ منطقه مناسب

۱. چه فاکتور هایی از شرایط محیطی، بر عملکرد توربین های بادی تأثیر می گذارند؟
۲. توربین های بادی موجود، به چه مشخصات محیطی نیاز دارند، به عبارت دیگر محدوده مناسب هر کدام از فاکتور های مؤثر در عملکرد توربین های بادی برای توربین های متداول و موجود چیست؟
۳. مشخصات باد در چه مناطقی از حوزه مورد مطالعه در محدوده مناسب عملکرد توربین های بادی می باشد؟
۴. توربین بادی ای که با شرایط منطقه مستعد احداث مزارع بادی سازگار می باشد (با توجه به شرایط منطقه) چیست؟
۵. چه عوامل محیطی در طراحی زیر سازه توربین های بادی فراساحل مؤثر می باشد؟
۶. توربین بادی ای که با شرایط منطقه مستعد احداث مزارع بادی سازگار باشد، چه مشخصاتی (از دید طراح زیرسازه و جهت طراحی سازه نگهدارنده آن) دارد؟ (مانند وزن، ارتفاع و...)

۱-۲-۲ زیرسازه بهینه

۱. سازه (ها) ی مناسب، با توجه به شرایط محیطی موجود هر منطقه و مشخصات توربین بادی سازگار چه می باشد؟
۲. از لحاظ اقتصادی کدامیک از سازه های پیشنهادی مناسب می باشند؟

۱-۲-۳ چینش و آرایش

۱. چه عواملی در طراحی آرایش و چیدمان مزارع بادی فراساحل مؤثر می باشند؟
۲. با توجه به عوامل مؤثر در طراحی آرایش و چیدمان، مشخصات توربین های پیشنهادی، شرایط منطقه مورد نظر، و در نظر داشتن فاکتور بازده مناسب چند ردیف توربین بادی در مزرعه بادی هر منطقه می تواند احداث شود و فاصله ردیف ها از هم چه مقدار می باشد؟
۳. فاصله توربین ها در هر ردیف، چه مقداری باشد تا بهترین عملکرد هر توربین بادی و نتیجتاً کل مزرعه حاصل شود؟
۴. آرایش کلی و شکل پلان مزارع بادی در هر یک از مناطق مستعد، جهت بهینه شدن عملکرد آن ها چه می باشد؟
۵. ظرفیت اسمی مزرعه بادی پیشنهادی در هر منطقه چه مقداری می باشد؟
۶. پیش بینی تولید واقعی هر مزرعه به صورت سالیانه و با توجه به الگوی باد منطقه، چه مقداری می باشد؟
۷. با توجه به ظرفیت اسمی و تولید واقعی پیش بینی شده برای هر مزرعه، آیا احداث آن از لحاظ اقتصادی به صرفه می باشد؟

۱-۳ نوآوری پژوهش

با وجود اهمیت فراوان استفاده از انرژی باد جهت تولید برق و همچنین فراوانی دسترسی کشور ایران به دریا ها، متأسفانه هیچ تحقیق جامع و مناسبی در زمینه تولید برق به وسیله توربین های بادی فراساحل که مختص شرایط محیطی دریا های ایران باشد صورت نگرفته است. از اینرو می توان این تحقیق را یک نو آوری پژوهشی نامید و آنرا زمینه ساز پیشرفت در حوزه تولید برق در فراساحل دانست.

۱-۴ ضرورت

با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران (دریای خزر[23] در شمال و خلیج فارس[24] و دریای عمان[25] در جنوب ایران) و مزایای توضیح داده شده در قسمت های قبل در مورد توربین های بادی فراساحل و همچنین پیشرفت روز افزون دنیا در زمینه توربین های بادی انجام یک پژوهش کامل در این زمینه ضروری می باشد. علاوه بر آن با توجه به استقرار سکو های نفتی و بنادر در آب های جنوبی ایران و امکان فراهم آوردن برق مورد نیاز آن ها از طریق روش های استحصال انرژی پاک، موضوع این تحقیق با هدف بررسی امکان احداث مزارع بادی و ارائه راهکار های مرتبط با آن، انتخاب شد.

۱-۵ روش تحقیق و روند انجام پایان نامه

شرح کار های انجام شده در این پایان نامه به طور مفصل در هر فصل آمده است و به طور خلاصه به شرح زیر می باشد:

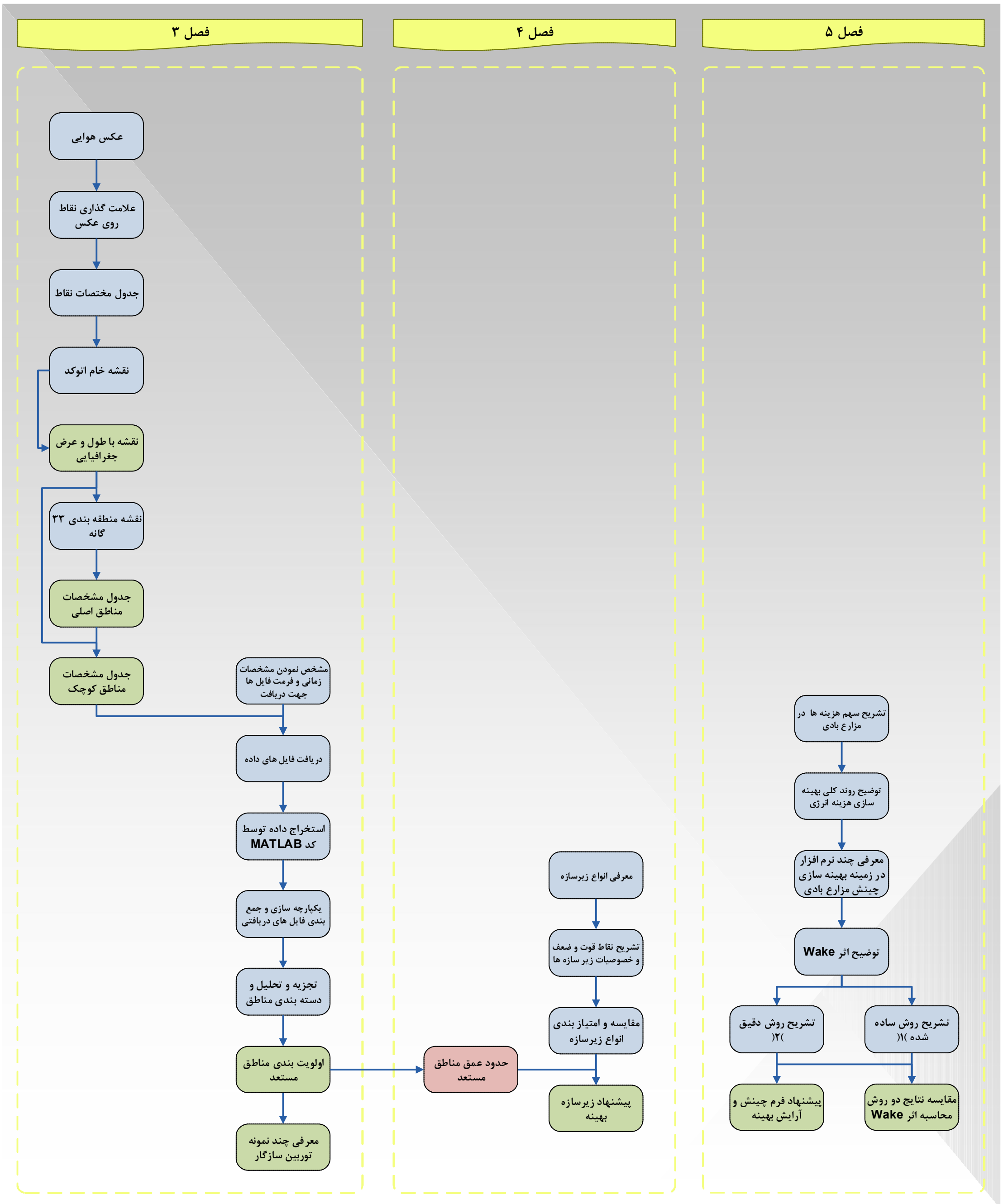
- فصل ۱ – مقدمه: مبانی کلی و تعاریف اولیه جهت آشنایی با توربین های بادی فراساحل ارائه شده است.
- فصل ۲ – مرور ادبیات فنی: در این فصل تحقیقات قبلی انجام شده در مورد موضوعات مرتبط با این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته و به کلیات آن ها اشاره شده است.
- فصل ۳ - معرفی منطقه بهینه جهت احداث مزرعه بادی فراساحل: در این فصل ابتدا مدل جغرافیایی منطقه مورد بررسی جهت انجام امکان سنجی تهیه شده و سپس با استفاده از آن، اطلاعات باد مربوط به منطقه مورد بررسی جمع آوری و با تحلیل آن مناطق مستعد و کلاس باد مربوطه تعیین شده، سپس چند نمونه توربین بادی مناسب سازگار با مناطق پیشنهادی معرفی گردیده است.
- فصل ۴ – معرفی زیرسازه مناسب: در این فصل با استفاده از عمق مناطق مستعد به دست آمده از فصل ۲ و نیز بررسی ها و مطالعات صورت گرفته در مورد انواع فناوری های زیرسازه های موجود، یک نمونه سیستم زیرسازه پیشنهادی با در نظر گرفتن عوامل محیطی و اقتصادی ارائه شده است.

---

[23] Caspian Sea
[24] Persian Gulf
[25] Oman Sea

• فصل ۵ - چینش و آرایش: در این فصل توضیح اجمالی در مورد هزینه ها و فاکتور های مؤثر بر چینش توربین ها در مزارع بادی ارائه شده و یک فرم چینش ساده با توجه به اثرات اندر کنش آئرودینامیکی توربین ها پیشنهاد شد. در این قسمت چند نرم افزار در این زمینه نیز معرفی گردید.

در ادامه روند انجام قسمت های اصلی پایان نامه به صورت شکل آمده است.



شکل ۱-۱۰ روند انجام پایان نامه

فصل دوم

مرور ادبیات فنی

۲)مرور ادبیات فنی

۲-۱ معرفی منطقه بهینه جهت احداث مزرعه بادی فراساحل

در مقالـه ارائـه شـده توسـط مـاریموتو و همکـاران[1] در سـال ۲۰۱۴ بـا عنـوان بررسـی فـاکتور هـای مـؤثر بـر تولیـد انـرژی تـوربین بـادی و سـلول خورشـیدی [14]، یـک مـدل ریاضـی جهـت بررسـی پـارامتر هـای مـؤثر بـر تـوان الکتریکـی تولیـدی تـوربین هـای بـادی معرفـی شـده اسـت. پـارامتر هـای مـورد بررسـی در ایـن زمینـه شـامل سـطح پوشـش داده شـده توسـط پـره هـای تـوربین، دانسـیته هـوا و سـرعت بـاد مـی باشـد کـه بـرای تـوربین هـای بـا ظرفیـت ۱,۶۵ و ۱,۸ مگـاوات بـوده اسـت. در ایـن تحقیـق پـس از بررسـی عوامـل مـذکور، یـک فرمـول جهـت محاسـبه توان خروجی توربین ارائه شد و به طور خلاصـه بـر اسـاس ایـن تحقیـق مـی تـوان گفـت کـه تـأثیر پارامتر های اصلی مؤثر بر توان تولیدی توربین بادی به شرح زیر می باشد:

- ✓ افـزایش شـعاع سـطح پوشـش داده شـده (افـزایش طـول پـره هـا) باعـث استحصـال مقدار بیشتری انرژی از باد می شود.
- ✓ مقدار انرژی تولیدی با توان سوم سرعت باد رابطه مستقیم دارد.
- ✓ بـا افـزایش دانسـیته هـوا، انـرژی موجـود در بـاد نیـز افـزایش مـی یابـد. ایـن افـزایش دانسیته می تواند ناشی از افزایش فشار هوا و یا کاهش دما باشد.

در مرجع ارائـه شـده از طـرف سـازمان بـی وی جـی[2] [15] معرفـی کامـل اجـزای تـوربین بـادی فراساحل به همراه تشریح جزئیات آمده است.

در گـزارش سـال ۲۰۱۴ در خصـوص صـنعت بـاد فراسـاحل اروپـا، تهیـه شـده توسـط انجمـن انرژی بـاد اروپـا[3] [16] ، اطلاعـات و آمـار مربـوط بـه پیشـرفت هـا و جایگـاه صـنعت بـاد فراسـاحل در اروپا بیان شـده اسـت. آمـار فـوق مربـوط بـه ظرفیـت اضـافه شـده سـال ۲۰۱۴ و کـل ظرفیـت تـا آن زمـان، پـیش بینـی و انتظـار در سـال هـای بعـد، مسـائل تخصصـی مربـوط بـه مـزارع بـادی (حداکثر ظرفیت توربین ها و ...) می باشد.

[1] Mrimuthu C. et al.
[2] BVG Associates
[3] European Wind Energy Association (EWEA)

در پایان نامه ارائه شده در سال ۲۰۱۳ توسط رایلی[۴] با عنوان دستور العمل مکان یابی مزرعه بادی فراساحل به کار رفته در آب های جزیره های Rhode و Black [17]، روند مکان یابی سایت تأسیس مزرعه بادی برای یک منطقه خاص بررسی و پیاده شده است. در این تحقیق به توسعه ابزار مکان یابی در سطح وسیع با در نظر گرفتن عوامل زیر پرداخته شده است:

- ✓ سرعت بهینه توربین بادی
- ✓ فاصله از شبکه برق
- ✓ محدودیت های اجتماعی
- ✓ محدودیت های زیست محیطی

عملیات مکان یابی دقیق با در نظر گرفتن عوامل زیر انجام شد:

جدول ۲-۱عوامل مؤثر بر مکان یابی در مرجع [۱۷]

RESOURCE AND CONSTRAINTS		MITIGEABILITY OF SITING FACTORS	
TECHNICAL COST	***FACTORS***	***EXCLUSIONARY***	***MITIGEABLE***
FOUNDATION COST	DEPTH		X
	GEOLOGY		
	SEDIMENTOLOGY		
CABLE COST	DISTANCE TO COAST		X
	DISTANCE BETWEEN TURBINES		INCLUDED IN MICROSITING (WIFSO)
RESOURCE			
WIND	WIND POWER		X
	WAKE		INCLUDED IN MICROSITING (WIFSO)
ECOSYSTEM SERVICES			
PROVISIONING SERVICE	COMMERCIAL FISHERIES		X
CULTURAL SERVICE	RECREATIONAL FISHERIES		X
	VISUAL IMPACT	X	
REGULATING SERVICE	BIODIVERSITY		X
	SPECIES RESILIENCE		X
	SPECIES RARITY/ENDANGERED		X
OTHER EXCLUSIONARY FACTORS			
WAVE CLIMATE	EXTREME WAVES BREAKING AREA(50 YEARS STORM-95% CI)	X	
FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION REGULATION		X	

برای فاکتور های ذکر شده در بالا، یک فرمول برای مشخص کردن ضریب استعداد منطقه که در تحقیق با WIFSI مشخص شده است ارائه شد که با نتایج حاصله، مکان

[4] O'Reully C. M.

مناسب در مقیاس بزرگ مشخص و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، چینش و آرایش برای منطقه مستعد تعریف شد.

۲-۲ انتخاب زیرسازه بهینه جهت استفاده در مزارع بادی فراساحل

در پایان نامه ارائه شده توسط زایجر[۵] [18] چهار نوع زیر سازه تک شمع، سه پایه، وزنی و پایه مکشی برای یک توربین ۶ مگاواتی در عمق حدودی ۲۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با صرفنظر از اندرکنش زیرسازه و توربین و همچنین اثر خستگی، برای ۳ روش بارگذاری زیر طراحی انجام شده است:

- ✓ شرایط آماده به کار: باد در حالت بیشینه و موج کاهش یافته
- ✓ شرایط آماده به کار: باد کاهش یافته و موج در حالت بیشینه
- ✓ شرایط تولید انرژی: سرعت باد بهینه توربین

طراحی برای یک توربین ۲۰ مگاواتی با وزن ۲۷۲ تن در عمق متوسط (۲۰ متر) انجام گرفته است. خلاصه نتایج این تحقیق برای هر کدام از انواع زیرسازه به شرح زیر می باشد:

- ✓ مکشی: سطح اشغال بیشتر فونداسیون (عمق کم و سطح اشغال زیاد)
- ✓ سه پایه با فونداسیون مکشی: سنگین ترین نوع زیرسازه تمام فلزی با هزینه ساخت بیش از سه پایه با فونداسیون شمعی می باشد، اما به عنوان یک مزیت می تواند در حالتی که توربین بر روی آن سوار شده است در محل نصب شود.
- ✓ وزنی: علیرغم تفاوت اساسی با سایر انواع مورد بحث، اما در صورت فرض ضریب ۳۰ برای نسبت هزینه مصالح و ساخت واحد وزن فولاد به بتن مسلح، می تواند در مقایسه گنجانده شود.

مقاله ارائه شده توسط چو[۶] [19] در مورد مقایسه و کاربرد دو نوع زیر سازه جکت ۴ پایه (متداول در صنعت نفت و گاز) و ۳ پایه (ایده جدید) در صنعت باد فراساحل می باشد. با بررسی حالت حدی نهایی و خستگی در این تحقیق و طراحی دو نمونه در شرایط محیطی مشابه، مشخص شد که جکت سه پایه می تواند به عنوان گزینه مناسب به جای جکت ۴ پایی مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس این تحقیق جکت ۳ پایه نسبت به ۴ پایه، برتری در

[5] Zaaijer M. B.
[6] Chew K. H.

زمینه اقتصادی (وزن فولاد به کار رفته ۱۷٪ کمتر و تعداد اتصالات جوشی ۲۵٪ کمتر) دارد. بر اساس تحلیل و بررسی میزان حساسیت عملکرد دینامیکی در شرایط و جهت بارگذاری متفاوت، و نا هم راستایی جهت باد و موج در این تحقیق مشخص شد که هر دو نوع جکت در برابر تغییر جهت بارگذاری حساسیت بالایی دارند، و تأثیر نا هم راستایی باد و موج نسبت به مورد قبل کمتر می باشد.

در پایان نامه ارائه شده در سال ۲۰۱۰ توسط لی[7] [20] تحلیل و بررسی زیرسازه جکت با اتصال شمع به بستر برای مزارع بادی فراساحل با تمرکز بیشتر روی مدلسازی و رفتار سازه ای در ظرفیت نهایی در شرایط بارگذاری حد اکثری نیروی باد و موج انجام شده است. در این تحقیق، طراحی و بهسازی برای جکت مستقر در آب با عمق متوسط ۷۰ الی ۱۰۰ متر صورت گرفته است. تحلیل واژگونی استاتیکی و آیین نامه طراحی API برای کنترل ظرفیت نهایی مدل زیرسازه مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل واژگونی با استفاده از کد USFOS (بر اساس روش اجزاء محدود غیر خطی) و آیین نامه طراحی API (بر اساس محاسبات دستی) انجام شده و به عنوان نتیجه در این تحقیق آمده است که حاصل دو روش پاسخ مشابه هم بوده است.

در پایان نامه ارائه شده توسط پاندیت[8] در سال ۲۰۱۴ [1] روند طراحی زیرسازه توربین بادی فراساحل معرفی و ساده سازی مراحل بر اساس بارگذاری، فرکانس طبیعی، طول اتصال گروته، عمق نفوذ، حد های تنش و واژگونی بر اساس IFC ارائه شده است. در این تحقیق با انجام محاسبات روند ساده شده بر روی یک نمونه واقعی از پیش طراحی شده، مشخص شد که روند ارائه شده از دقت ۰-۶٪ نسبت به روش های موجود بهره می برد.

در رساله ارائه شده توسط تمپل[9] در سال ۲۰۰۶ [4] با موضوع طراحی زیرسازه توربین های بادی فراساحل، پس از معرفی و بررسی اساسی و مفهومی توربین های بادی فراساحل، با استفاده از تجربیات موجود در طراحی، روند طراحی بهبود یافته ای با هدف کاهش هزینه ارائه شده است. این کار با استفاده از بررسی مقایسه ای روند طراحی زیرسازه در ۴ مزرعه بادی و نیز یک سکوی نفتی انجام شده است.

[7] Li P.
[8] Pandit A.
[9] Tempel V. D.

در پایان نامه ارائه شده در سال ۲۰۱۱ توسط باغبانچی [5] تأثیر شرایط محیطی از قبیل عمق، آشفتگی و همچنین قطر شمع و ارتفاع زیرسازه بر یک نمونه زیرسازه تک شمع که به عنوان پایه توربین ۵ مگاواتی طراحی شده است مورد بررسی قرار گرفته است. این روند با استفاده از کد FAST طی شده است.

در پایان نامه ارائه شده توسط فورونس[10] در سال ۲۰۱۰ [2] تأثیر کاهشی حرکت درفت[11] در زیرسازه نوع هایویند[12] (یک ایده زیرسازه شناور) با استفاده از صفحه هیو[13] بررسی شده است. این بررسی و مقایسه نتایج آن برای رفتار سازه در حالت حدی نهایی و حالت حدی خستگی صورت گرفته است. در این تحقیق مشخص شد که با کاهش طول درفت ، عمر مفید سازه کاهش یافته، ولی با استفاده از صفحه هیو عمر مفید سازه افزایش می یابد. ضمناً در حالت حدی نهایی، استفاده از صفحه هیو موجب کاهش حرکت هیو و افزایش حرکت پیچ[14] می شود.

در مقاله ارائه شده توسط مالهورتا[15] در سال ۲۰۱۱ [13]، چند نوع زیرسازه و فونداسیون متداول توربین های بادی و مزایا و معایب آن ها مورد تشریح قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق همچنین نکات مهم و کلیدی در زمینه انتخاب و طراحی این نوع زیر سازه ها ارائه شده است.

در پایان نامه ارائه شده توسط گرون[16] در سال ۲۰۱۱ [21]، با بررسی مباحث طراحی و اجرایی مزارع بادی فعلی، دسته بندی و اشاره به مزایا و معایب مزارع چند نوع زیرسازه انجام گرفته است.

در پایان نامه انجام شده توسط مینامبرس[17] در سال ۲۰۱۲ [22]، با استفاده از روش جمع آوری اطلاعات به صورت پرسشنامه ای، آینده صنعت باد فراساحل و رتبه بندی زیرسازه های مختلف (ثابت، نیمه مستغرق و شناور) بر اساس نظر کارشناسان پیش بینی شده است.

[10] Furunes E. W.
[11] Draft
[12] Hywind
[13] Heave
[14] Pitch
[15] Malhorta S.
[16] Gerven F. V.
[17] Minambres O. Y.

۲-۳ چینش و آرایش بهینه مزارع بادی

در مقاله ارائه شده توسط کوسیاک و همکاران[18] در سال ۲۰۱۰ [23]، یک مدل برای جانمایی توربین ها در مزرعه بادی با هدف حداکثر سازی توان تولیدی مزرعه به صورت کلی با در نظر گرفتن اثرات wake و تغییر جهت باد ارائه شده است.

در مقاله های ارائه شده توسط سامورانی[19] در سال ۲۰۱۳ [24] و کوونگ[20] در سال ۲۰۱۲ [25] روش محاسبه اثر wake تشریح و روند این محاسبات برای یک نمونه انجام شده است. همچنین در تحقیق ارائه شده توسط کوونگ، اثرات پخش صدا نیز پس از معرفی و تشریح، در محاسبات لحاظ شده است.

در مقاله ارائه شده توسط ولورده[21] در سال ۲۰۱۴ [26]، الگوریتم ها و نرم افزار های ارائه شده در زمینه بهینه سازی چینش و آرایش مزارع بادی تا کنون معرفی شده است.

۲-۴ مقالات فارسی در زمینه مزارع بادی فراساحل

در این بخش به بررسی چند تحقیق بومی در زمینه مزارع بادی پرداخته می شود که صرفاً جهت بررسی آن ها بوده و در این پایان نامه با رویکرد ورود علم، فقط از منابع خارجی استفاده شده است.

در مقاله ارائه شده توسط خلیلی سامانی در سال ۱۳۹۲ [32]، ضمن معرفی اجمالی انواع زیرسازه مورد استفاده جهت احداث مزارع بادی فراساحل و آنچه در این مقاله نزدیک ساحل نامیده شده است، زیرسازه با توجه به توپولوژی منطقه زیرسازه تک شمع برای احداث مزارع مذکور پیشنهاد شده است. علاوه آن پس از بررسی سرعت باد در ارتفاع های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر از سطح آب، محل مستعد پیشنهادی جهت احداث مزرعه بادی، بندر دیر می باشد که با نتیجه تحقیق حاضر نیز همسو می باشد.

در مقاله ارائه شده توسط خلیلی سامانی در سال ۱۳۹۰ [33]، پس از بررسی سرعت و الگوی باد آب های جنوبی ایران، بهترین مناطق مستعد احداث مزارع بادی فراساحل به ترتیب بندر دیر، بندر کنگان و بندر ماهشهر می باشد که با نتایج حاصل از این پایان نامه مطابقت دارد.

---

[18] Kusiak A. et al.
[19] Samorani M.
[20] Kwong W. Y.
[21] Velverde P. S.

در مقاله ارائه شده توسط رضایی منفرد در سال ۱۳۹۳ با رویکرد امکان سنجی نصب توربین بادی فراساحلی در بخش های کم عمق خلیج فارس [34]، ضمن معرفی مختصر زیرسازه جهت احداث مزارع بادی فراساحل، با این دید که عمق آب در کرانه های جنوبی ایران نسبتاً کمتر می باشد، زیرسازه پیشنهادی جهت استفاده در مزارع بادی این منطقه سازه های وزنی ارائه شده است. علاوه بر آن زیرسازه پیشنهادی برای آب های شمال ایران سازه های وزنی و تک شمع معرفی شده است.

در مقاله ارائه شده توسط رضایی منفرد در سال ۱۳۹۳ با تمرکز بر زیرسازه [35]، با بررسی شرایط محیطی خلیج فارس از جمله عمق آب، مشخصات امواج منطقه و شرایط خاک، برای عمق های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ متری، به ترتیب زیرسازه های تک شمع، سه پایه، و سه پایه و جکت به عنوان پیشنهاد مناسب ارائه شده است که تا حدودی با نتایج این پایان نامه مطابقت دارد.

۲-۵ جمع بندی

در قسمت مرور ادبیات فنی در این تحقیق با بررسی کار های خارجی و داخلی انجام گرفته در زمینه مزارع بادی فراساحل، جایگاه فعلی و میزان پیشرفت تحقیقات در این زمینه سنجیده شد و نتایج زیر حاصل شد.

در حوزه امکان سنجی احداث مزارع بادی چه در خشکی و چه در فراساحل، پارامتر های مؤثر بر انرژی تولیدی توربین های بادی بررسی شده و مؤثر ترین عامل، سرعت باد به عنوان مبنای محاسبات قرار گرفت. همچنین محدودیت های مزارع بادی فراساحل مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت.

در حوزه تحقیقات راجع به زیرسازه (پایه)، روند های طراحی، موارد استفاده و خصوصیات انواع زیرسازه های مورد استفاده فعلی در صنعت باد فراساحل بررسی شد و اطلاعات آن جهت استفاده در بهینه یابی زیرسازه دسته بندی شد.

در حوزه تحقیقات در زمینه چینش و آرایش مزارع بادی، روش ها و فاکتور های مؤثر بر جانمایی نسبی توربین های بادی مورد مطالعه قرار گرفت تا از اطلاعات حاصل در بخش ارائه چینش و آرایش استفاده شود. همچنین به جهت کامل بودن تحقیقات، برخی الگوریتم ها و نرم افزار ها در این زمینه مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین با بررسی تحقیقات داخلی در زمینه مزارع بادی فراساحل، مشخص شد که هنوز تحقیقات زیادی در این حوزه صورت نگرفته است و بنیه تحقیقات داخلی در این موضوع ضعیف است. همچنین

مشخص شد که در تحقیقات داخلی، بررسی ها کلی بوده و جزئیات (از جمله استاندارد های ارتفاع باد ملاک عمل و ...) در آن ها لحاظ نشده است.

با توجه به آنچه در مورد تحقیقات داخلی بیان شد، و جهت گیری این پایان نامه (رویکرد واردات علم به روز و کاربردی)، در این تحقیق، فقط منابع خارجی مورد استفاده قرار گرفت و تحقیقات داخلی صرفا جهت تعیین مرز و مقایسه با تحقیقات خارجی مورد بررسی قرار گرفت.

فصل سوم

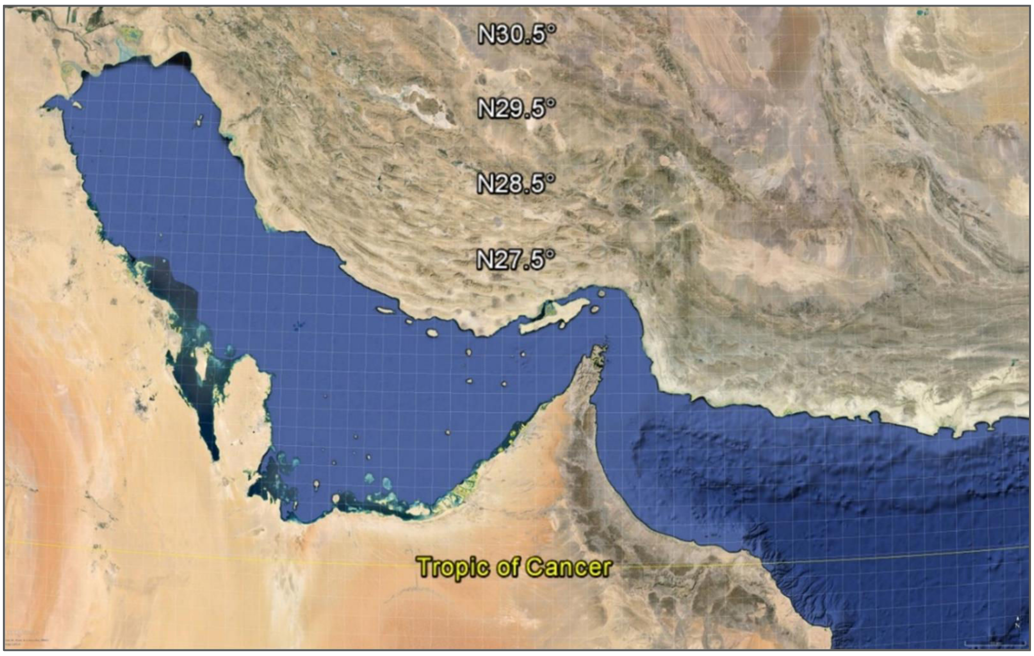
معرفی منطقه بهینه جهت احداث مزرعه بادی فراساحل

۳) معرفی منطقه بهینه جهت احداث مزرعه بادی فراساحل

۳-۱ مدل جغرافیایی منطقه

۳-۱-۱ کلیات و تعاریف

در ادامه توضیحات مفصل ارائه شده در مقدمه، اولین قدم در این تحقیق در راستای ارائه منطقه یا مناطق مستعد، تهیه یک مدل جغرافیایی از خلیج فارس و دریای عمان می باشد که از آن در مراحل بعدی برای منطقه بندی استفاده خواهد شد. برای تهیه مدل جغرافیایی منطقه مورد بررسی و تبدیل آن به نقشه قابل استفاده، ابتدا با استفاده از عکس های هوایی و مدل سه بعدی شرکت گوگل[1] (شکل ۳-۱) از طریق نرم افزار مخصوص کمپانی مذکور به نام نقشه های گوگل[2]، نقاطی به صورت حدودی بر روی عکس ها مشخص گردید تا کلیت کار واضح باشد.



شکل ۳-۱ شکل خلیج فارس و دریای عمان

[1] Google Company
[2] Google Maps

۳-۱-۲ تهیه مدل جغرافیایی منطقه

نقاط مشخص شده در محل خط ساحلی بوده و به عنوان مرز محدوده مورد بررسی تلقی می شود. البته شایان ذکر است که مختصات نقاط نیازمند برخورداری از دقت بالایی نمی باشد، چون همانگونه که در مقدمه اشاره شد، با توجه به کیفیت کلی کمتر باد در مناطق خشکی، انتظار می رود که محل های مستعد در نزدیکی مرز آب و خشکی واقع نشود. علاوه بر آنچه مورد اشاره مجدد قرار گرفت، مساحت محدوده های پیشنهادی به طور نسبی به اندازه ای زیاد خواهد بود که خطا های به وجود آمده در تعیین مختصات نقاط، قابل چشم پوشی می باشد. در ادامه، با مشخص شدن مختصات نقاط، با استفاده از ضرایب تبدیل طبق جدول ۳-۱، انتقال مختصات به دست آمده از سیستم درجه[3]-دقیقه[4]-ثانیه[5]، به سیستم متریک[6] انجام گردید.

جدول ۳-۱ تبدیل واحد درجه به متر

عرض جغرافیایی	۱ درجه جغرافیایی به متر	۱ ثانیه جغرافیایی به متر
۲۴ شمالی	۱۱۰،۷۵۸	۳۰,۷۷
۲۵ شمالی	۱۱۰،۷۷۳	۳۰,۷۷
۲۶ شمالی	۱۱۰،۷۸۸	۳۰,۷۷
۲۷ شمالی	۱۱۰،۸۰۴	۳۰,۷۸
۲۸ شمالی	۱۱۰،۸۱۹	۳۰,۷۸
۲۹ شمالی	۱۱۰،۸۳۶	۳۰,۷۹
۲۴ – ۲۹	**۱۱۰،۷۹۶**	**۳۱**

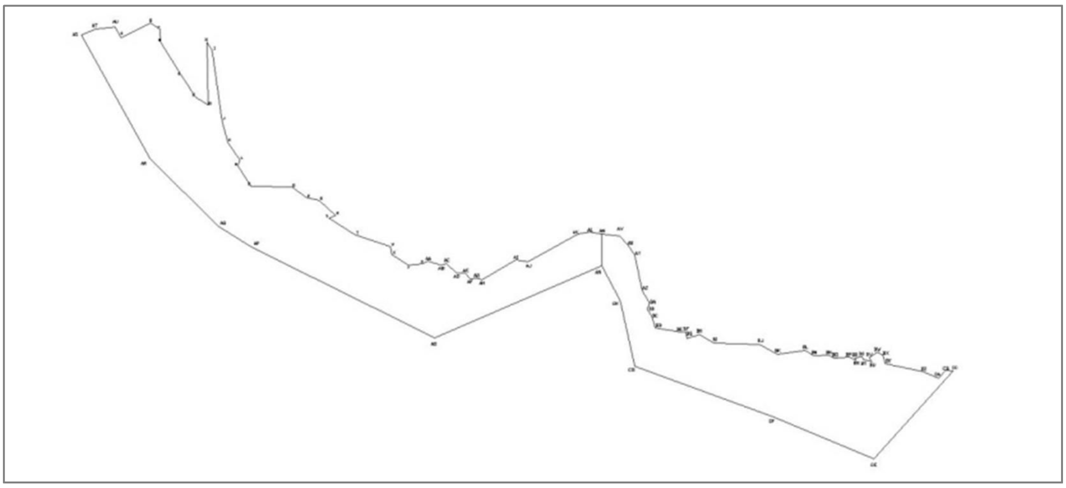
با توجه به آنچه در جدول ۳-۱ آمد، مقدار ۳۱ متر برای هر ثانیه انتخاب شد. لازم به ذکر است این تقریب تأثیری در دقت پروژه نخواهد داشت و صرفاً جهت ارائه نمایش گرافیکی قابل لمس از منطقه می باشد، چرا که تمام مراحل محاسباتی بر اساس مختصات جغرافیایی پیش رفته است. نقاط مشخص شده در هر دو دستگاه به صورت جدول درآمده که در زیر قسمتی از آن آمده است.

3 Degree
4 Minute
5 Second
6 Metric

POINT	DEGREES	MINUTES	SECONDS	METERS	Distance from previous
A	49	33	43.37	**5,352,701**	5,352,701.1
	29	59	46.29	**3,239,589**	3,239,588.7
B	49	59	28.27	**5,399,048**	46,347.0
	30	12	41.38	**3,262,841**	23,252.7
C	50	7	40.31	**5,413,809**	14,761.2
	30	6	7.61	**3,251,028**	(11,813.1)

شکل ۳-۲ نمونه ای از تبدیل واحد از درجه جغرافیایی به متر

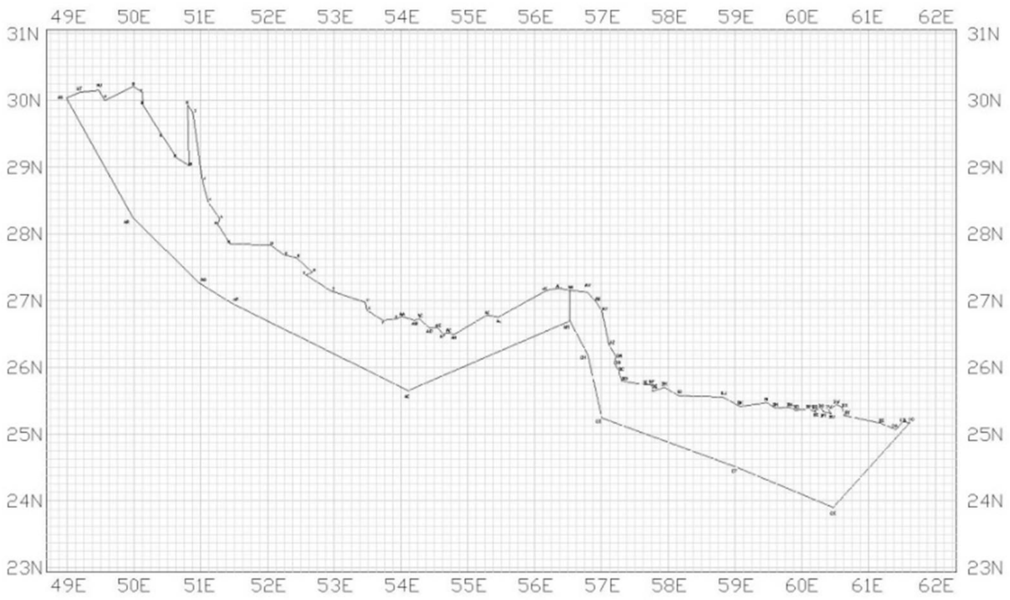
جهت تهیه مدل جغرافیایی دو بعدی، نقاط بدست آمده در سیستم متریک با استفاده از نرم افزار اتوکد[۷] از شرکت اتودسک[۸] به شکل گرافیکی در آمد (شکل ۳-۳) تا برای مراحل بعدی با سهولت بیشتری بتوان از آن استفاده نمود.



شکل ۳-۳ نقشه خام خلیج فارس و دریای عمان

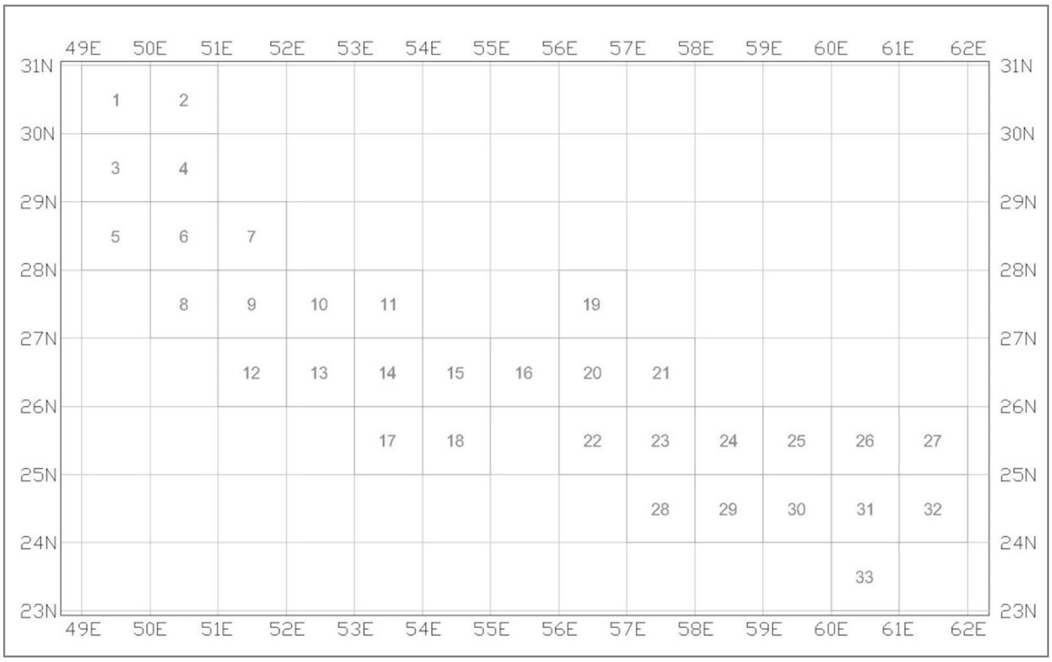
نقشه ترسیمی با اضافه شدن خطوط طول[۹] و عرض[۱۰] جغرافیایی اصلی و فرعی به ترتیب با دقت های یک درجه و ۰,۱۲۵ درجه، قابل استفاده جهت منطقه بندی می باشد که نقشه نهایی در شکل ۳-۴ آمده است.

[7] Autocad
[8] Autodesk
[9] Longitude
[10] Latitude



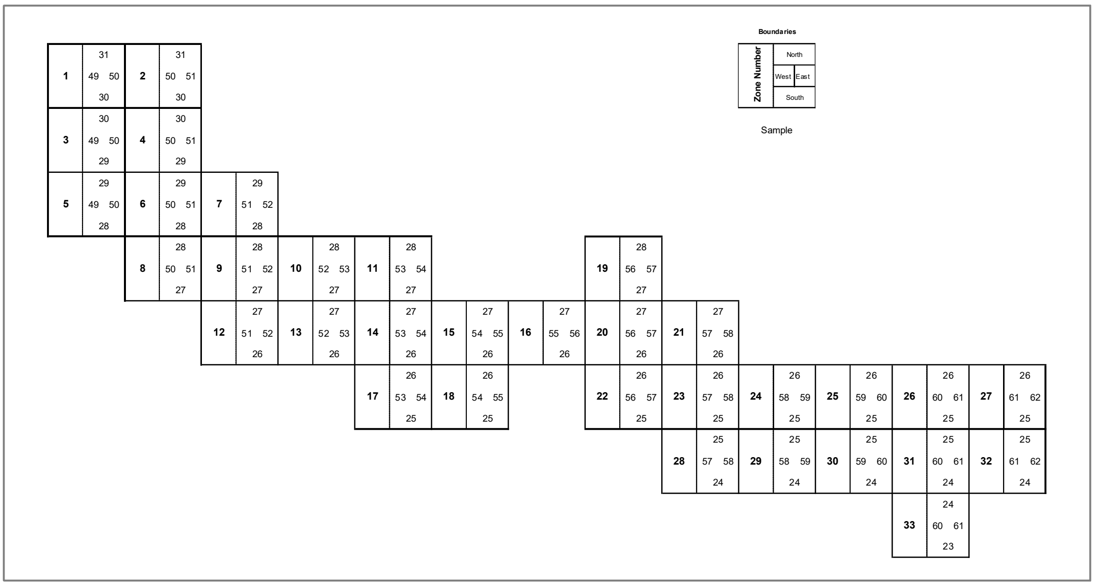
شکل ۳-۴ نقشه کامل خلیج فارس و دریای عمان

با استفاده از نقشه بدست آمده (شکل ۳-۴)، کلاً با انتخاب ۳۳ منطقه[11] و اندازه هر کـدام ۱ درجـه جغرافیایی در طول و عرض، پوشش خوبی جهت استخراج داده و طبقـه بنـدی اطلاعـات حاصـل شـد (شکل ۳-۵). مشخصات کلی هر منطقه جهت استفاده بعدی تهیه شد (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۵ نقشه منطقه بندی خلیج فارس و دریای عمان

[11] Zone



شکل ۳-۶ مشخصات مرز های مناطق اصلی خلیج فارس و دریای عمان

در راستای موضوع تحقیق و تأکید بر آب های ایرانی و همچنین مشخص شدن مـرز خشـکی و آب با استفاده از نقشه، برای هر کدام از محدوده های جزئی (۰,۱۲۵ x ۰,۱۲۵ درجـه جغرافیـایی) اینکـه در مرز مورد مطالعه قرار دارند، مورد بررسی قرار گرفت که نمونه هایی از نتیجه نهایی ایـن بررسـی در جدول ۳-۲ آمده است.

جدول ۳-۲ نمونه هایی از قسمت های مورد بررسی مناطق جزئی

1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09
1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18
1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27
1.28	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36
1.37	1.38	1.39	1.40	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45
1.46	1.47	1.48	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54
1.55	1.56	1.57	1.58	1.59	1.60	1.61	1.62	1.63
1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72
1.73	1.74	1.75	1.76	1.77	1.78	1.79	1.80	1.81

6.01	6.02	6.03	6.04	6.05	6.06	6.07	6.08	6.09
6.10	6.11	6.12	6.13	6.14	6.15	6.16	6.17	6.18
6.19	6.20	6.21	6.22	6.23	6.24	6.25	6.26	6.27
6.28	6.29	6.30	6.31	6.32	6.33	6.34	6.35	6.36
6.37	6.38	6.39	6.40	6.41	6.42	6.43	6.44	6.45
6.46	6.47	6.48	6.49	6.50	6.51	6.52	6.53	6.54
6.55	6.56	6.57	6.58	6.59	6.60	6.61	6.62	6.63
6.64	6.65	6.66	6.67	6.68	6.69	6.70	6.71	6.72
6.73	6.74	6.75	6.76	6.77	6.78	6.79	6.80	6.81

۳-۲ معرفی منطقه بهینه

۳-۲-۱ کلیات و تعاریف

بـا توجـه بـه توضـیحات ارائـه شـده قبلـی و همچنـین در نظـر داشـتن سـطح آب هـای جنـوب ایـران، ایـن قسـمت از تحقیـق امکـان احـداث مزرعـه بـادی در آب هـای منطقـه مـذکور را مـورد بررسـی قـرار مـی دهـد. مشـخص نمـودن یـک منطقـه جهـت احـداث مزرعـه بـادی یـک کـار بسـیار پیچیـده بـوده و مسـتلزم صـرف زمـان و هزینـه فـراوان مـی

باشد، چرا که پارامتر های فنی و اقتصادی فراوانی در رد یا تأیید گزینه هایی که در مرحله مقدماتی تحقیقات معرفی شده اند دخیل می باشند. از جمله پارامتر های فنی تأثیرگذار، می توان به میانگین و تغییرات سرعت و جهت باد، مشخصات امواج منطقه، الگوی رفتاری جریان های منطقه، خصوصیات خاک بستر، و از جمله پارامتر های اقتصادی شاخص نیز می توان به هزینه احداث، طول دوره بازگشت سرمایه، مقایسه هزینه صرف شده جهت تولید برق در مزرعه بادی فراساحل و مقایسه با سایر روش های تولید (معمولاً هزینه متوسط برای هر کیلووات محاسبه می شود)، اشاره کرد. لازم به ذکر است که تمامی عوامل فنی و اقتصادی فوق الذکر، به صورت جدایی ناپذیر تشکیل یک مسئله امکان سنجی می دهند که یافتن پاسخ مناسب برای آن، ابتدایی ترین و پایه ای ترین قدم برای موفقیت در زمینه احداث مزرعه بادی می باشد. به علت گستردگی موضوع، از پرداختن به ریز جزئیات خودداری می شود و صرفاً کمیت باد منطقه از لحاظ سرعت بررسی می شود که اولین گام در بررسی جهت یافتن منطقه بهینه می باشد.

توربین های بادی چه از نوع نصب در خشکی[۱۲] و چه نصب در فراساحل[۱۳] بر اساس اصلی ترین مشخصه آن ها که کلاس باد[۱۴] (بر اساس استاندارد جهانی IEC-61400) می باشد، معرفی و دسته بندی شوند. استاندارد مذکور توسط کمیسیون بین المللی صنعت برق[۱۵] ارائه شده است. جدول ۳-۳ برگرفته از استاندارد مذکور می باشد [27,27]:

جدول ۳-۳ طبقه بندی کلاس باد مناطق بر اساس میانگین سرعت باد سالیانه

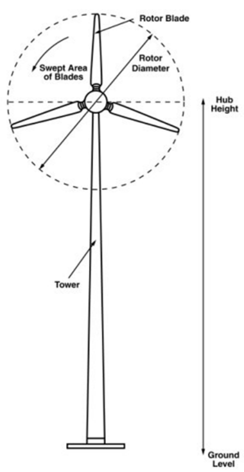
کلاس باد	میانگین سرعت باد سالیانه در ارتفاع هاب (متر بر ثانیه)
I سرعت زیاد	۱۰
II سرعت متوسط	۸,۵
III سرعت کم	۷,۵
IV	۶

[12] Onshore
[13] Offshore
[14] Wind Class
[15] International Electrotechnical Commission (IEC)

در جدول ۳-۳ میانگین سرعت باد سالیانه منطقه ملاک طبقه بندی قرار می گیرد و پس از مشخص شدن میانگین و کلاس باد، می توان توربین مناسب منطقه را انتخاب نمود.

جدا از طبقه بندی فوق، در مشخصات توربین های بادی چند فاکتور حائز اهمیت دیگر هم وجود دارد که در زیر آمده است:

- ظرفیت[۱۶] (توان اسمی): این پارامتر که با توجه به ظرفیت بالای توربین های امروزی (به خصوص توربین های فراساحل) با واحد مگاوات[۱۷] مشخص می شود بیانگر حداکثر توان خروجی توربین بادی (که تحت شرایط خاص سرعت باد حاصل می شود) می باشد. ظرفیت مزارع بادی جمع ظرفیت توربین های نصب شده در آن می باشد.
- قطر روتور[۱۸]: قطر دایره فرضی است که نوک پره های توربین به هنگام چرخش بر آن مسیر حرکت می کند.
- سطح پوشش داده شده توسط پره ها به هنگام چرخش[۱۹]
- ارتفاع هاب[۲۰]: این پارامتر نشان دهنده ارتفاعی است که هاب توربین در آن نصب می شود. به بیان دیگر می توان گفت همان فاصله محور چرخش پره های توربین تا سطح آب (یا زمین) می باشد (طبق شکل ۳-۷). تمام پارامتر های مربوط به سرعت باد در ارتفاع هاب بیان و استفاده می شود.

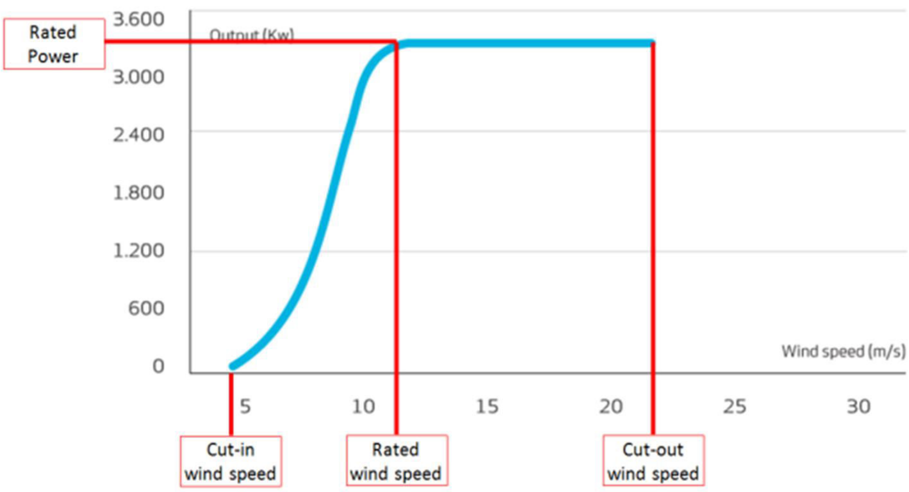


شکل ۳-۷ معرفی ابعاد اجزای متداول در توربین بادی

---
16 Capacity
17 Megawatt (MW)
18 Rotor Diameter
19 Swept Area of Blades
20 Hub Height

- سرعت شروع به کار[۲۱]
- سرعت بهینه[۲۲]
- سرعت خارج شدن از مدار[۲۳]
- نمودار توان تولیدی[۲۴]

جهت تولید برق به هنگام وزش باد، پس از رسیدن سرعت باد به سرعت شروع به کار (متداولاً حدود ۳ تا ۴,۵ متر بر ثانیه)، تولید برق آغاز می شود. با افزایش سرعت باد، برق تولیدی توربین با نسبت مستقیم با توان سوم سرعت باد افزایش می یابد. این افزایش تا رسیدن سرعت باد به سرعت بهینه (متداولاً حدود ۱۱ الی ۱۵ متر بر ثانیه) که در آن، توربین بادی بیشترین توان خروجی (توان اسمی) را ارائه می دهد ادامه دارد. با رسیدن به سرعت باد بهینه تا سرعت خارج شدن از مدار (متداولاً حدود ۲۰ الی ۳۵ متر بر ثانیه)، توربین بادی با تغییر زاویه پره ها توان تولیدی را به طور ثابت و برابر توان اسمی نگه می دارد. با رسیدن سرعت باد به مقدار خارج شدن از مدار، به علت جلوگیری از آسیب احتمالی، توربین از مدار خارج شده و تولید برق متوقف می شود.[14,28] توضیحات فوق در شکل ۳-۸ که نمونه ای از نمودار توان (برای توربین Vestas V126) می باشد نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ نمودار مقدار انرژی تولیدی توسط توربین بر حسب سرعت باد

مقدار انرژی استحصال شده توسط توربین بادی مستقیماً تحت تأثیر پارامتر هایی شامل دانسیته هوا[۲۵]، سطح پوشش پره ها و سرعت باد می باشد [28]. در رابطه محاسبه مقدار انرژی (رابطه ۳-۱)،

(۱-۳)

[21] Cut-in wind speed
[22] Rated wind speed
[23] Cut-out wind speed
[24] Power Curve

یک ضریب قدرت[۲۶] هم وجود دارد که این رابطه را به طور غیر مستقیم به خصوصیات و بازده توربین مرتبط می سازد.

$$P = 0.5\,.\,\rho\,.\,C_p\,.\,V^3\,.\,A$$

در رابطه فوق:

- P : انرژی استحصال شده توسط توربین بادی.
- ρ : دانسیته هوا (kg/m^3)
- C_p : ضریب قدرت توربین (بدون واحد)
- V : سرعت باد (m/s)
- A : سطح پوشش پره ها (m^2)

۳-۲-۲ جمع آوری، دسته بندی و تحلیل اطلاعات باد

اولین گام در یک پروژه احداث مزرعه بادی فراساحل، انتخاب منطقه و محدوده مناسب می باشد. در رابطه انرژی استحصال شده توسط توربین بادی، توان تولیدی توسط توربین با توان سوم سرعت باد رابطه مستقیم دارد، از این رو و با توجه به عملکرد توربین بادی و وابستگی آن به سرعت باد، انتخاب منطقه مناسب بادخیز[۲۷] جهت احداث مزرعه بادی و همچنین انتخاب توربین با مشخصات مناسب جهت کاهش هزینه ها و به طور کلی افزایش راندمان اهمیت فراوانی دارد. در این مرحله اطلاعات باد منطقه دسته بندی شده و الگوی باد منطقه به دست آمده و بر اساس آن گزینه هایی جهت انجام مطالعات و اندازه گیری های دقیق تر میدانی در محل مانند نصب وسایل اندازه گیری ارائه می گردد.

در این تحقیق با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات میدانی سرعت باد، از داده های ماهواره ای استفاده شد. مرکز هواشناسی اروپا[۲۸] که اطلاعات آن مورد استفاده سازمان ملی اقیانوس شناسی ایران نیز می باشد به عنوان مرجع تهیه داده برای این پایان نامه انتخاب شد. سازمان مذکور یک سازمان مستقل بین المللی می باشد که ضمن تهیه و ارائه اطلاعات پیش بینی آب و هوا، تحقیقات جهت بهبود کیفیت و مهارت پیش بینی آب و هوا و همچنین تهیه آرشیو اطلاعات جوی را نیز انجام می دهد[29]. با توجه به پایه ای بودن کارهای انجام شده این تحقیق و ارتباط مستقیم داده های مورد نیاز با هم، باید یک الگوی واضح و مناسب برای اطلاعات دریافتی و تحلیل شده مشخص گردد که در

---

[25] Air Density
[26] Power Coefficient
[27] Windy
[28] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

پی آن، امکان طبقه بندی منظم داده ها و سهولت حداکثری جهت مراجعات بعدی چه برای صحت سنجی و چه برای تحلیل ریزتر به هر قسمت از منبع داده، فراهم باشد. به این منظور مشخصات زیر برای هر فایل به عنوان نظام یکسان اعمال شد.

- بازه زمانی: برای هر فایل، بازی زمانی یکساله می باشد که مدت، شروع و پایان آن، منطبق بر سال میلادی می باشد.
- نقطه زمانی داده ها: از طریق سایت مورد استفاده در این تحقیق، می توان حداکثر به داده های ۴ نقطه زمانی در هر روز (هر ۶ ساعت، شروع از ساعت ۰۰:۰۰) دسترسی داشت که در راستای دقت بیشتر، هر ۴ نقطه زمانی جهت تحلیل انتخاب شد.
- تعداد پرش نقاط زمانی[29]: این پارامتر بیانگر تعداد داده های صرفنظر شده می باشد که جهت دقت حداکثری، مقدار آن ۰ در نظر گرفته شده است، یعنی تمام داده های در محاسبات و تحلیل دخیل خواهد بود.
- پارامتر مد نظر: سرعت باد در دو راستای طول و عرض جغرافیایی انتخاب شد. علت این انتخاب نوع دسترسی به پایگاه داده سایت ECWMF بود.
- محدوده و مرز جغرافیایی: محدوده برای هر فایل، یک درجه طولی و یک درجه عرضی جغرافیایی تعیین شد.
- فاصله نقاط مکانی: این فاصله بیانگر فاصله طولی و عرضی نقاط مکانی که داده سرعت باد آن ها دریافت می شود است که همانند قبل، بیشترین دقت ممکن، یعنی ۰,۱۲۵ درجه جغرافیایی در هر جهت انتخاب شد.
- فرمت فایل: فرمت های قایل ارائه توسط سایت مورد استفاده، Grib و NetCDF[30] می باشد، که از بین آن ها، NetCDF به علت برخورداری امکان استخراج مستقیم توسط نرم افزار متلب[31]، انتخاب شد.

همانگونه که در بالا آمده است، اصول انتخاب متغیر های فوق، دقت حداکثر و دسترسی سایت می باشد و در انتخاب پارامتر هایی که در دقت مؤثر نمی باشد، سعی بر برقراری تعادل بین حجم فایل های دریافتی، یکپارچگی داده ها و زمان مورد نیاز جهت دسته بندی اطلاعات می باشد، بنابراین، انتخاب ها به صورت تجربی انجام شده است. به صورت کلی می توان مشخصات هر فایل را در جدول ۳-۴ خلاصه نمود:

[29] Time Step
[30] Network Common Data Form
[31] MATLAB

جدول ۳-۴ مشخصات فایل های داده دریافتی

پارامتر	شرح
بازه زمانی	۱ سال
نقطه زمانی داده ها	ساعت های ۰۰:۰۰، ۰۶:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۸:۰۰
پرش نقطه زمانی	۰
داده مورد نظر	U10 و V10
ابعاد محدوده	۱ درجه طولی و ۱ درجه عرضی جغرافیایی
ابعاد شبکه مکانی	۰,۱۲۵ درجه طولی و ۰,۱۲۵ درجه عرضی جغرافیایی
فرمت فایل	NetCDF

پس از انتخاب الگوی مناسب فایل ها، مثال هایی که جهت بررسی اطلاعات باد مورد انتخاب قرار گرفت، ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ میلادی بود. همچنین برای حصول اطمینان از عدم تغییر الگوی باد منطقه در دوره های گذشته، سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ نیز انتخاب شد تا در پایان با سایر سال ها مقایسه شود. فایل های دانلود شده بر اساس سال و محدوده مورد بایگانی قرار گرفت.

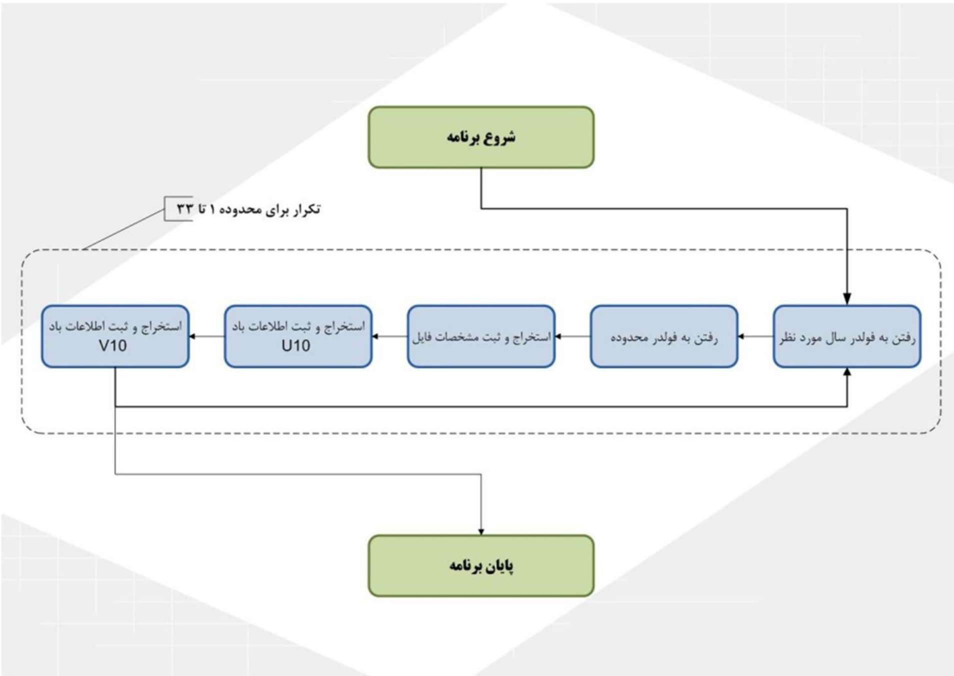
در فرمت NetCDF (مخفف Network Common Data Form) مجموعه ای از داده های علمی به صورت ماتریسی مورد تولید، دسترسی و اشتراک گذاری قرار می گیرند. فرمت NetCDF شامل مجموعه ای از داده ها است که با استفاده از یک سربرگ برای کل فایل به صورت برداری و ماتریسی مشخص می شوند[30]. فایل های دریافتی شامل اطلاعات زیر می باشد:

- طول جغرافیایی (Longitude) که برای هر فایل بر اساس زون[۳۲] مشخص می شود.
- عرض جغرافیایی (Latitude) که برای هر فایل بر اساس زون مشخص می شود.
- نقطه زمانی (Time) بازه زمانی یک ساله برای سال مورد نظر مشخص می شود.
- سرعت باد در جهت طولی جغرافیایی (U10) که داده دریافتی و مورد تحلیل می باشد.
- سرعت باد در جهت عرضی جغرافیایی (V10) که داده دریافتی و مورد تحلیل می باشد.

در این تحقیق جهت استخراج اطلاعات از فایل های دریافتی، یک کد در قالب برنامه متلب[۳۳] تهیه شد که این قابلیت را دارد که در زمان اجرا، بر اساس بایگانی انجام شده (تقسیم ۳۳ گانه محدوده ها)، دو مؤلفه اطلاعات باد هر محدوده را استخراج و به صورت جداگانه با فرمت تکست[۳۴] ذخیره نماید. همچنین جهت امکان کنترل مجدد و آسان برای مراجعات بعدی، مشخصات اصلی جغرافیایی فایل

[32] Zone
[33] MATLAB
[34] Text

دانلود شده برای هر محدوده در یک فایل با فرمت تکست ذخیره می شود. فلوچارت کد مذکور در شکل ۳-۹ آمده است:



شکل ۳-۹ فلوچارت کد استخرج داده از فایل های *netCDF*

نمونه کد متلب به صورت خلاصه و بریده شده از بدنه کد اصلی برای یک محدوده در زیر آمده است:

```
…
cd ..
cd 006 % 006 Start Point
clc
fopen('File_Info.txt','w+')
diary File_Info.txt
ncdisp('006.nc','time')
ncread('006.nc','longitude')
ncread('006.nc','latitude')
diary File_Info.txt
fopen('U_10.txt','w+');
diary U_10.txt
ncread('006.nc', 'u10')
diary U_10.txt
fopen('V_10.txt','w+');
diary V_10.txt
ncread('006.nc', 'v10')
diary V_10.txt  % 006 End Point
…
```

در کد تهیه شده، دستورات کاربردی و عملکرد آن ها به شرح زیر می باشد:

- cd: دستور عملگر بر روی شاخه اطلاعات مورد استفاده می باشد.

- cd ..: برای رفتن به شاخه بالاتر (سال مورد نظر) استفاده می شود.
- cd 008: برای رفتن به زیر شاخه (در اینجا محدوده ۸) استفاده می شود.

- fopen: برای باز کرد فایل تکست (جهت ثبت داده ها و کنترل های بعدی در صورت نیاز) که قرار است در آن مرز محدوده فایل ذخیره شود.
- diary: برای ثبت اطلاعات نمایش داده شده در فایل باز شده استفاده می شود.
- ncdisp: برای نشان دادن اطلاعات فایل های با فرمت netcdf (در اینجا زمان و مرز های جغرافیایی آن) استفاده می شود و پارامتر معرفی شده به دستور را از روی فایل نمایش می دهد (در اینجا زمان، طول و عرض جغرافیایی)
- ncread: برای خواندن داده های فایل دریافتی با فرمت netcdf (در اینجا u10 و v10 یعنی سرعت باد در دو جهت) استفاده می شود.

پس از استخراج داده های فایل ها و ذخیره آن ها در قالب فایل تکست، جهت تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار اکسل[35] از سری مجموعه نرم افزاری آفیس[36] استفاده شد. برای اینکار، ابتدا یک فایل نمونه که با فرمت خروجی های بدست آمده از مرحله قبل سازگار باشد تهیه شد. فایل تهیه شده، پس از ورود مؤلفه های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر، سرعت باد را در ارتفاع مورد نظر که ارتفاع هاب می باشد (با توجه به آنچه در قبل گفته شد، در این تحقیق ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده) محاسبه کرده، و میانگین روزانه، ماهیانه و سالیانه را برای هر مؤلفه و یکبار به صورت برآیند محاسبه می کند. این ویژگی ها باعث می شود که سهولت هرگونه استفاده بعدی از اطلاعات دسته بندی شده، افزایش یابد.

جهت تبدیل داده سرعت باد از ارتفاع استاندارد ۱۰ متر از سطح آب (داده های سایت ECMWF) به ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح آب و برای مشخص نمودن کلاس باد منطقه، از قانون توان پروفیل باد[37] (رابطه ۳-۲) که یک رابطه می باشد، استفاده شده است. به طور کلی پروفیل باد در لایه اتمسفر[38] به طور طبیعی توزیع لگاریتمی[39] دارد و رابطه فوق الذکر به علت در نظر گرفتن زبری سطح[40]، جواب های با دقت بالا ارائه می دهد:

$$\frac{u}{u_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha} \qquad (۳-۲)$$

[35] Microsoft Office Excel
[36] Microsoft Office
[37] Wind Profile Power Law
[38] Atmosphere
[39] Logaritmic
[40] Surface Roughness

در رابطه بالا:

- z_r : ارتفاع مبنا که سرعت باد در آن معلوم است.
- z : ارتفاع مورد نظر جهت محاسبه سرعت باد.
- u_r : سرعت باد مبنا در ارتفاع مبنا.
- u : سرعت باد در ارتفاع مورد نظر.
- α : ضریب پایداری جوی.

ضریب پایداری جوی ۰/۱۴۳ متداولاً نتایج خوبی ارائه می دهد، چرا که دو تراز ارتفاعی اختلاف آنچنانی ندارند که خطای قابل ملاحظه ای در پاسخ به وجود آید. در شرایطی که درخت ها و یا سازه ها بر روی باد اثر می گذارند، ضریب ۰/۱۴۳ ممکن است پاسخ های نادرست دهد. حتی در شرایط پایداری جوی طبیعی، مقدار ۰/۱۱۰ برای روی آب های آزاد (مانند مزارع بادی فراساحل) نسبت به مقدار ۰/۱۴۳ جواب های بهتری می دهد[31,31].

با توجه به توضیحات بالا، رابطه قانون توان پروفیل باد با ضریب ۰,۱۱ جهت تبدیل سرعت باد از ارتفاع ۱۰ متر (مبنا) به سرعت باد در ارتفاع مورد نظر ۱۰۰ متر (مورد نظر) استفاده شد.

جهت محاسبه سرعت باد، متأثر از دو مؤلفه طولی و عرضی نیز از رابطه برآیند گیری بردار های عمود بر هم (رابطه ۳-۳)، استفاده شد.

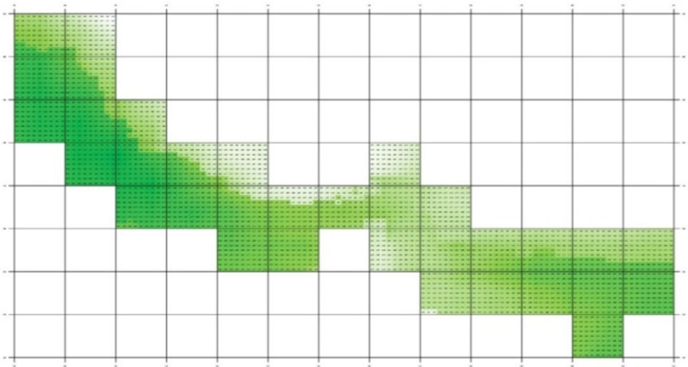
$$S_w = \sqrt{(V10)^2 + (U10)^2} \qquad (۳-۳)$$

در رابطه بالا:

- $U10$ مؤلفه سرعت باد در راستای طولی جغرافیایی.
- $V10$ مؤلفه سرعت باد در راستای عرضی جغرافیایی.
- S_w سرعت باد.

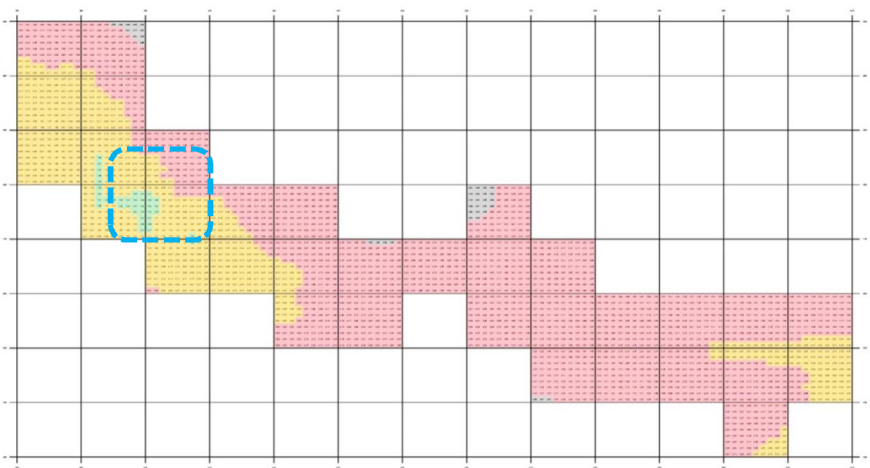
پس از تهیه فایل اکسل و ورود اطلاعات باد، برای هر منطقه و هر سال، یک فایل اکسل بدست آمده که تمامی فایل های مذکور در آن به صورت گرافیکی جمع بندی شد. فایل اکسل جمع بندی برای سال ۲۰۱۳ به عنوان نمونه در شکل ۳-۱۰ آمده است و این نمایش برای سایر سال ها در پیوست آمده است. جمع بندی زیر سرعت باد نسبی را نشان می دهد،

نقاط پررنگ تر نشـان دهنـده سـرعت بیشـتر بـاد و نقـاط کمرنـگ تـر نشـان دهنـده سـرعت کمتـر باد می باشد.



شکل ۳-۱۰ میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۳

همانگونه که مشاهده می شود، الگـوی کلـی بـاد منطقـه ثابـت مـی باشـد و منـاطق مسـتعد هـر سـاله از لحـاظ موقعیـت مکـانی حـدودی تکـرار مـی شـود. بـرای تعیـین منطقـه مسـتعد، نـوع دیگری از نمایش گرافیکی انتخـاب شـد کـه در آن منـاطق بـا سـرعت میـانگین کمتـر از ۳ متـر بـر ثانیه با رنگ خاکستری، بین ۳ تا ۶ متـر بـر ثانیـه بـا رنـگ قرمـز، ۶ تـا ۷,۵ متـر بـر ثانیـه بـا رنـگ زرد و بیش از ۷,۵ متر بر ثانیـه بـا رنـگ سـبز مشـخص شـده اسـت. ایـن تقسـیم بنـدی بـر اسـاس دسـته بنـدی بـا تأکیـد بـر سـرعت میـانگین سـالیانه در IEC 61400 تعیـین شـده اسـت کـه در شکل ۳-۱۱ آمده است:



شکل ۳-۱۱ میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۳ (نقشه کامل)

شکل ۳-۱۲ محل زون ۸ و ۹ بر روی نقشه

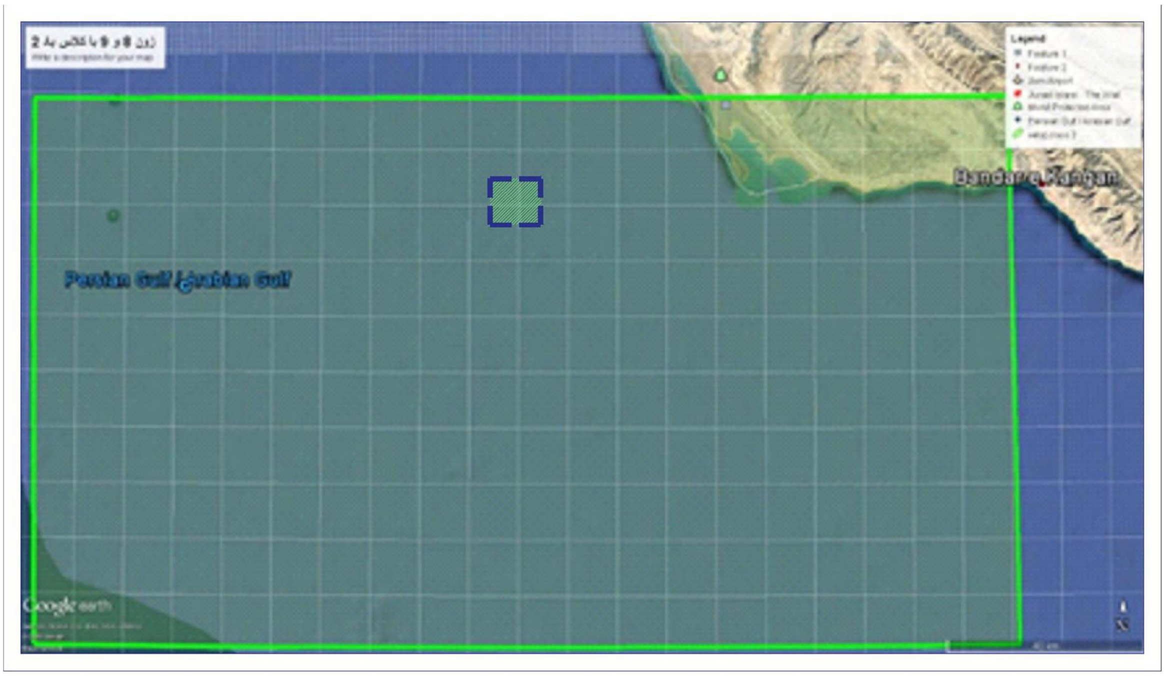
بـا توجـه بـه تحقیقـات صـورت گرفتـه، پـایین تـرین کـلاس بـاد کـه تـوربین بـادی سـازگار بـا آن بـه صـورت انبـوه تولیـد مـی شـود، کـلاس III مـی باشـد، یعنـی بـرای منطقـه بـا میـانگین سـرعت سـالیانه سـرعت بـاد کمتـر از ۶ متـر بـر ثانیـه (کـلاس بـاد IV و کمتـر) تـوربین بـادی سـازگار فقـط چنـد نمونـه آن هـم بـه صـورت آزمایشـی و تحقیقـاتی موجـود مـی باشـد. بـا توجـه بـه ایـن موضـوع حـداقل میـانگین سـرعت بـاد قابـل قبـول در حـال حاضـر ۶ متـر بـر ثانیـه (کـلاس III) مـی باشـد. منـاطق بـا کـلاس بـاد II، کـه بـا توجـه بـه بررسـی هـای صـورت گرفتـه بـالاترین کـلاس موجـود در محـدوده مـورد بررسـی مـی باشـد (در اشـکال بـالا بـا رنـگ سـبز مشـخص شـده اسـت)، در زون ۸ یعنـی حـد فاصـل ۵۰ تـا ۵۲ درجـه طـولی و ۲۷ تـا ۲۸ درجـه عرضـی واقـع شـده اسـت. منطقـه مـذکور بـه عنـوان قـویترین گزینـه جهـت احـداث مزرعـه بـادی فراسـاحل معرفـی مـی گـردد. بعـد از آن منـاطق بـا کـلاس بـاد III (میـانگین سـرعت بـاد سـالیانه بـین ۶ تـا ۷,۵ متـر بـر ثانیـه) بـه عنـوان گزینـه هـای بعـدی جهـت آغـاز بررسـی هـا و تحقیقـات تکمیلـی و امکـان سـنجی دقیـق تـر و گسـترده تـر معرفـی مـی گـردد. دسـته بنـدی منـاطق بـا میـانگین سـرعت بـاد سـالیانه بـیش از ۶ متـر بـر ثانیـه بـا دقـت ۱ درجـه طـولی و ۱ درجـه عرضـی جغرافیـایی بـا مرتـب سـازی بـر اسـاس کـلاس بـاد منطقـه و سـرعت باد میانگین در سال ۲۰۱۳ به صورت جدول ۳-۵ می باشد:

جدول ۳-۵ اولویت بندی مناطق با میانگین سرعت باد سالیانه بیش از ۶ متر بر ثانیه بر اساس سرعت باد

Boundaries					Wind Speed Parameters			
Zone	Longitude		Latitude		Mean (For 1*1 degrees)	Maximum (For 0.125*0.125 degrees)	Minimum (For 0.125*0.125 degrees)	IEC Wind Class
008	50	51	27	28	7.2	7.5	7.0	II
009	51	52	27	28	6.7	7.5	4.3	II
012	51	52	26	27	6.9	7.4	6.2	III
005	49	50	28	29	6.9	7.1	6.7	III
006	50	51	28	29	6.7	7.3	5.1	III
003	49	50	29	30	6.6	7.0	6.0	III
013	52	53	26	27	6.3	6.8	5.5	III
032	61	62	24	25	6.2	6.3	6.0	III

7.06	7.16	7.29	7.21	7.15	7.12	7.11	7.12	7.16	7.03	6.89	6.74	5.29	5.12	4.99	4.58	4.29
7.08	7.18	7.32	7.25	7.21	7.21	7.23	7.29	7.37	7.20	7.03	6.86	5.69	5.48	5.32	4.76	4.43
7.12	7.23	7.37	7.31	7.29	7.31	7.37	7.46	7.58	7.36	7.16	6.97	6.79	6.62	6.47	6.36	6.22
7.08	7.18	7.30	7.25	7.23	7.26	7.32	7.42	7.55	7.35	7.17	7.00	6.84	6.71	6.59	6.48	6.34
7.03	7.11	7.20	7.15	7.14	7.16	7.23	7.32	7.45	7.29	7.14	7.01	6.90	6.80	6.73	6.61	6.46
6.98	7.05	7.13	7.08	7.07	7.09	7.15	7.24	7.37	7.24	7.13	7.04	6.96	6.91	6.88	6.74	6.58
6.94	7.01	7.07	7.03	7.02	7.04	7.09	7.18	7.30	7.20	7.13	7.07	7.04	7.03	7.04	6.87	6.69
6.91	6.97	7.03	7.00	6.99	7.01	7.06	7.15	7.27	7.19	7.14	7.12	7.12	7.15	7.20	7.00	6.79
6.87	6.94	6.99	6.96	6.96	6.99	7.05	7.13	7.24	7.17	7.15	7.15	7.18	7.25	7.33	7.09	6.87

شکل ۳-۱۳محدوده مستعد احداث مزرعه بادی فراساحل (بزرگنمایی محدوده های ۸ و ۹ شکل ۳-۱۱)



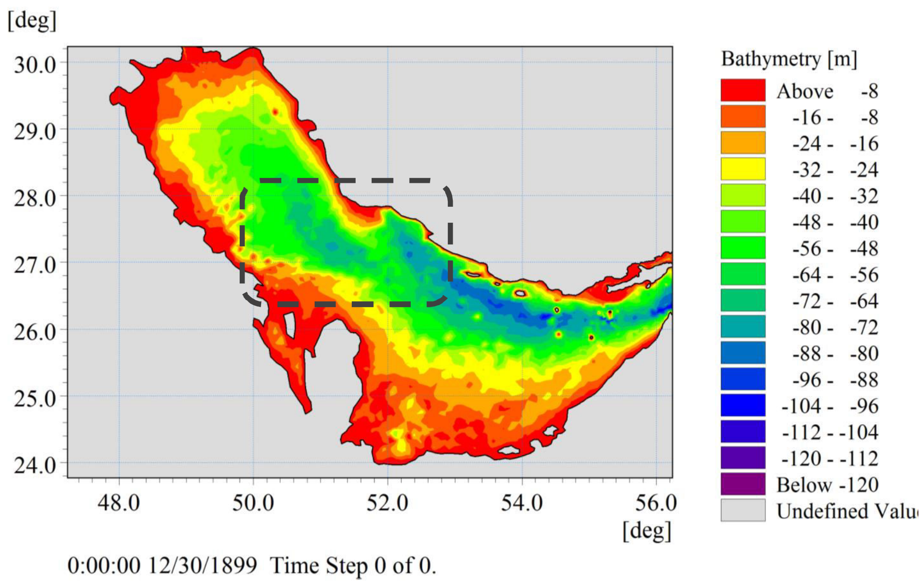
شکل ۳-۱۴ بزرگنمایی محل زون ۸ و ۹ بر روی نقشه

در شکل های ۳-۱۲ و ۳-۱۳مناطق با کلاس باد II با رنگ سبز بر روی نقشه مشخص شده است. زون های مستعد در نزدیکی بندر کنگان و بندر دیر می باشد (زون ۸ با مرز های ۵۰ و ۵۱ شرقی و همچنین ۲۷ و ۲۸ شمالی، زون ۹ با مرز های ۵۱ و ۵۲ شرقی و همچنین ۲۷ و ۲۸ شمالی) و لذا در صورت احداث مزرعه بادی در زون های با کلاس باد II، امکان انتقال برق تولیدی به مناطق نزدیک و استفاده از آن وجود دارد.

در مطالعه دقیق تر با بیشترین دقت مورد مطالعه این تحقیق (۰,۱۲۵ در ۰,۱۲۵ درجه جغرافیایی) در زون های مذکور، مشخص شد که بهترین منطقه جهت احداث مزرعه بادی در محدوده مختصات جغرافیایی ۲۷,۶۸۷۵ و ۲۷,۸۱۲۵ درجه عرضی شمالی و ۵۰,۹۳۷۵ و ۵۱,۰۶۲۵ درجه شرقی واقع شده است (در شکل ۳-۱۴ با خط چین و هاشور پر رنگ تر مشخص شده است).

۳-۲-۳ تخمین عمق مناطق مستعد

با مشخص شدن منطقه مستعد، باید عمق محدوده مذکور هم مشخص شود تا بتوان در مراحل بعدی از آن برای پیشنهاد زیر سازه مناسب استفاده کرد. جهت تخمین عمق حدودی منطقه مستعد از شکل ۳-۱۴ استفاده شد:



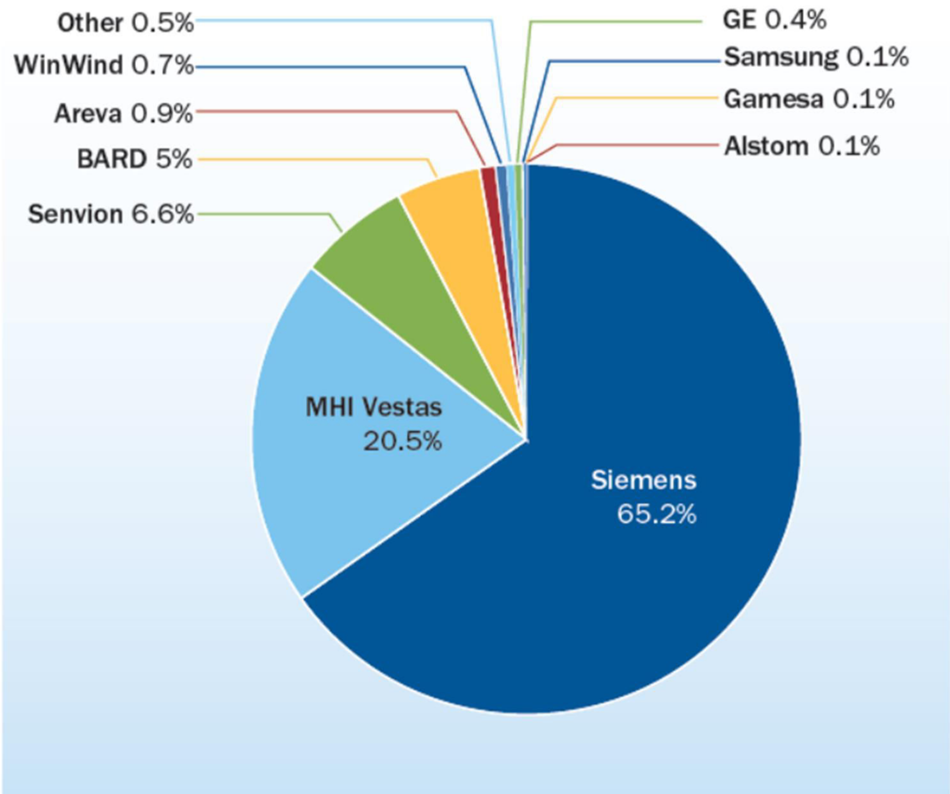
شکل ۳-۱۵ نقشه اعماق آب در خلیج فارس

منطقه مستعد (زون ۸ و ۹) در نقشه ۳-۱۴ مشخص شده است. همانگونه که دیده می شود، در اکثر محل ها عمق در محدود ۴۰ الی ۵۶ متر می باشد، اما در مواردی تا حدود ۷۲ متر نیز می باشد. باید به هنگام انتخاب زیرسازه مناسب این مورد را در نظر گرفت، چون پایه ای ترین و تعیین کننده ترین متغیر (در آغاز مطالعات احداث مزارع بادی) عمق احداث می باشد.

۳-۲-۴ معرفی توربین سازگار با منطقه

امروزه شرکت های زیادی در زمینه تولید توربین های بادی در دنیا مشغول به فعالیت می باشد که هرکدام از ویژگی های خاص خود بهره مند می باشد. طبق گزارش ژانویه سال ۲۰۱۵ توسط انجمن انرژی باد اروپا که در شکل ۳-۱۵ آمده است، بیشترین سهم از توربین های بادی نصب شده اروپا متعلق به شرکت زیمنس[۴۱] بوده و پس از آن شرکت وستاس[۴۲] می باشد. این سهم بندی برای سایر شرکت های اصلی فعال در این زمینه در شکل ۳-۱۵ مشخص می باشد:

[41] Siemens
[42] Vestas



شکل ۳-۱۶ سهم سازندگان توربین بادی از بازار اروپا

دو برند فوق به عنوان مبنای کار قرار گرفته و چند مدل از توربین آن ها به عنوان نمونه توربین بادی سازگار با کلاس های II و III در جدول ۳-۶ به طور خلاصه شده نام برده شده اند تا در صورت نیاز بتوان جهت ارجاعات بعدی از آن استفاده نمود.

جدول ۳-۶ توربین های پیشنهادی سازگار با کلاس باد منطقه

کلاس باد	Siemens	Vestas
II	SWT-2.3-101	V126 3.45 MW
III		V136 3.45 MW

مشخصات فنی هرکدام از توربین های فوق در پیوست ۳ آمده است.

۳-۳ جمع بندی و نتیجه گیری

۳-۳-۱ مدل جغرافیایی منطقه

در پایان این قسمت، یک نقشه با دقت مناسب و در دستگاه مختصاتی منطبق بر جهانی، یک جدول منطقه بندی قابل استفاده با نقشه یا به صورت مجزا از محدوده مورد مطالعه، یک جدول برای مشخصات جغرافیایی منطقه های جزئی واقع در محدوده مورد مطالعه به دست آمد که پایه تحقیق و پیش نیاز مراحل بعدی می باشد.

۳-۳-۲ محدوده منطقه مستعد

با توجه به جدول ۳-۵ در دو محدوده ۱ درجه در ۱ درجه مناطق با کلاس باد II قرار دارند (مناطق ۸ و ۹) که به عنوان مستعد ترین گزینه ها پیشنهاد می گردد. بعد از آن مناطق با کلاس باد III به ترتیب جدول ۳-۵ گزینه های پیشنهادی می باشد. با توجه به تکنولوژی موجود هنوز توربین بادی سازگار با کلاس باد IV که عملاً اقتصادی هم باشد به تولید انبوه نرسیده است، لذا مناطق با کلاس باد IV در حال حاضر به عنوان گزینه مطرح و پیشنهاد نمی شود.

۳-۳-۳ عمق منطقه مستعد

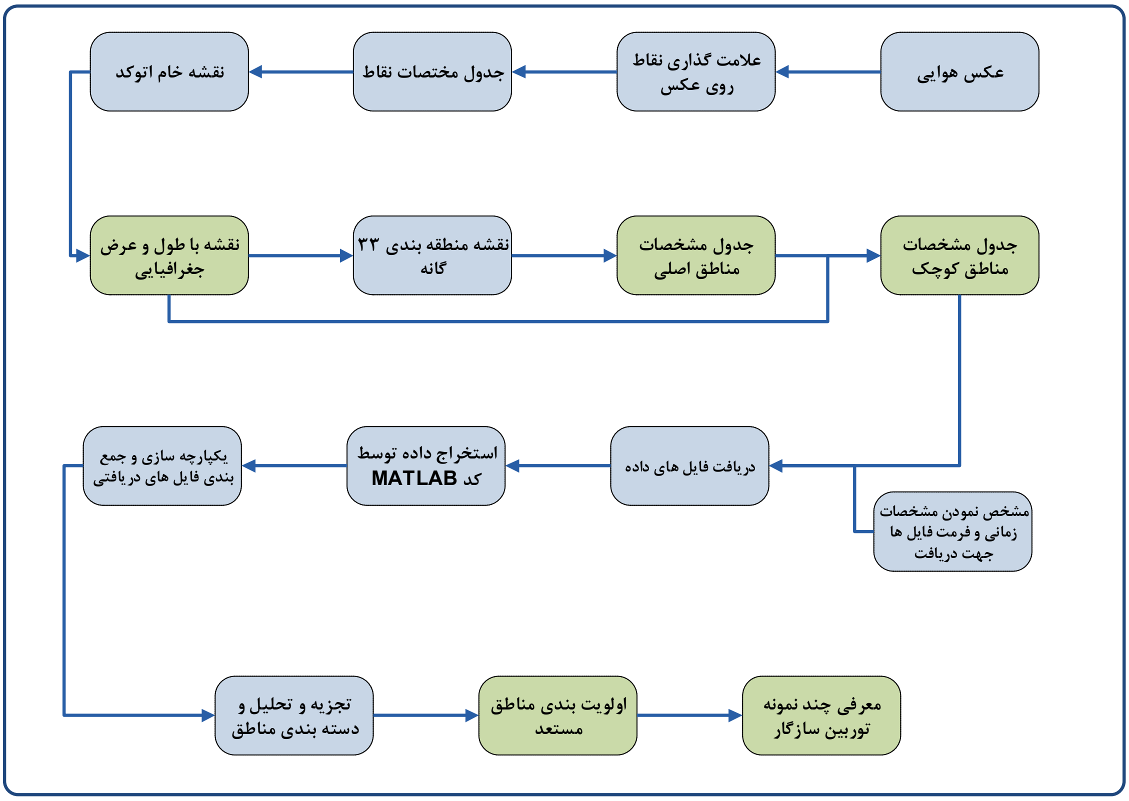
با توجه به محدوده منطقه مستعد و توضیحات قبلی، عمق معیار برای مراحل بعدی ۵۰ متر در نظر گرفته می شود.

۳-۳-۴ توربین سازگار با منطقه مستعد

با توجه به کلاس باد منطقه و توضیحات قبلی، توربین های V126 و V136 شرکت وستاس و توربین SWT-2.3-101 شرکت زیمنس به عنوان توربین های موجود سازگار با منطقه ارائه می شود.

۳-۳-۵ روند پیشرفت فصل

در شکل ۳-۱۶ خلاصه ای از روند کارهای انجام گرفته در این فصل آمده است:



شکل ۳-۱۷روند کلی فعالیت های انجام شده در فصل سوم

فصل چهارم

انتخاب زیرسازه بهینه جهت مزارع بادی خلیج فارس

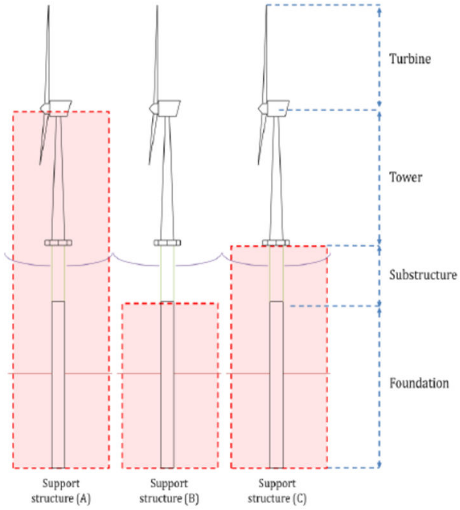
۴) انتخاب زیرسازه بهینه جهت مزارع بادی خلیج فارس

۴-۱ کلیات و تعاریف

در مورد سازه نگهدارنده[1] تعاریف مختلفی در منابع ارائه شده است. در یک سری از موارد زیرسازه به کل سازه زیر توربین اطلاق شده است (شکل ۴-۱ سمت چپ). در مواردی هم سازه برجی جزئی از زیرسازه در نظر گرفته نشده است (شکل ۴-۱ وسط). در مرجع [22] هم زیر سازه به کل آنچه زیر آب قرار می گیرد نسبت داده می شود (شکل ۴-۱ راست) که در این تحقیق از این تعریف جهت سازه نگهدارنده استفاده خواهد شد. به طور کلی اجزای تشکیل دهنده یک توربین بادی به همراه سازه نگهدارنده آن را می توان به صورت زیر از بالا به پایین دسته بندی کرد[22,18]:

- توربین[2]: بالاترین قسمت مجموعه که خود شامل دو جزء پره ها جهت جذب انرژی و ناسل جهت استقرار دستگاه ها از جمله ژنراتور، گیربکس، تجهیزات کنترلی و... می باشد.
- سازه برجی[3]: متداولاً به شکل یک سازه سیلندری فلزی می باشد که عموماً توسط سازنده توربین ارائه می شود و جهت نگه داشتن توربین در ارتفاع مورد نظر استفاده می شود.
- سازه نگهدارنده: این قسمت خود به دو جزء اصلی زیر تقسیم می شود:
  - زیرسازه[4]: قسمت بالایی سازه نگهدارنده می باشد که حدفاصل بستر و زیر تاور قرار دارد.
  - فونداسیون[5]: قسمت پایینی سازه نگهدارنده می باشد که در تماس مستقیم با خاک بوده وظیفه انتقال بار مجموعه به بستر را بر عهده دارد. فاکتور اصلی دخیل در طراحی فونداسیون، مسائل ژئوتکنیکی می باشد.
- سیستم مهار[6]: سیستمی که در بعضی از انواع سازه نگهدارنده (سازه های نیمه شناور، تک شمع مهار شده و...) جهت مهار استفاده می شود.

[1] Support Structure
[2] Turbine
[3] Tower
[4] Sub-Structure
[5] Foundation



شکل ۴-۱ اجزا و تعریف زیرسازه [۲۲]

در حال حاضر می توان سازه های نگهدارنده به کار رفته در صنعت باد فراساحل را به دو گروه کلی دسته بندی نمود[22]:

- سازه های با اتصال ثابت به بستر[7]
- سازه های شناور[8]

تفاوت اساسی میان دو گروه فوق، نوع اتصال مجموعه توربین بادی به بستر می باشد که در نوع ثابت، سازه نگهدارنده به صورت مستقیم با بستر در تماس است و در نوع شناور، مجموعه از طریق مهار ها به بستر متصل می باشد[22].

انواع سیستم های ارتباط با بستر مجموعه را می توان به صورت زیر دسته بندی نمود[22]:

- فونداسیون در سیستم پایه ثابت: سیستم های موجود در این زمینه متداولاً از صنعت نفت و گاز وارد صنعت باد شده اند و متداول ترین انواع آن در زیر آمده است:
  - فونداسیون شمعی[9]: در حال حاضر پرکاربرد ترین نوع فونداسیون در صنعت باد فراساحل می باشد. متداولاً شامل یک المان استوانه ای توخالی با انتهای

[6] Mooring system
[7] Bottom Mounted-Fixed Support Structure
[8] Floating Platform
[9] Pile Foundation

باز می باشد که به روش شمع کوبی یا حفاری اجرا می شود. شمع ها می توانند به صورت عمودی (زاویه ۹۰ درجه با افق) و یا مایل (با زاویه غیر از ۹۰ نسبت به افق) در محل دائمی خود نصب شوند. در حال حاضر بزرگترین شمع اجرا شده در پارک بادی لاندن اری[۱۰] بوده که طول آن تقریباً ۶۰ متر، قطر آن ۵,۷ متر و عمق نفوذ آن ۲۵ متر در بستر می باشد.

- فونداسیون وزنی[۱۱]: متداول ترین جایگزین فونداسیون شمعی می باشد اما بر خلاف آن به بستر نفوذ نمی کند و بر روی بستر قرار می گیرد. پایداری این نوع سازه به وسیله وزن مرده آن تأمین می شود. در صورت نیاز پس از اجرای فونداسیون وزنی بر روی بستر، می توان با اضافه کردن بالاست اضافی مانند ماسه، بتن، سنگ و یا آهن وزن فونداسیون را افزایش داد.
- فونداسیون مکشی[۱۲]: این نوع فونداسیون، با وزن کمتر نسبت به فونداسیون وزنی، شامل یک سیلندر با قطر زیاد و وجه بالایی بسته (باکت) می باشد. پس از قرار گیری آن بر روی بستر، با استفاده از پمپ، آب داخل باکت تخلیه شده و نتیجتاً به علت اختلاف فشار ایجاد شده، نیروی رو به پایین به وجود می آید و این نیرو باعث نفوذ باکت به داخل خاک می شود. پس از خارج کردن پمپ از مدار، سیستم فونداسیون اجرا شده با توجه به اصطکاک سطحی و اثر نیروی نوک بین باکت و خاک، در جای خود ثابت شده و مقاومت مورد نیاز را از این طریق تأمین می کند.

- مهار در سیستم پایه شناور: قسمتی از سیستم که توربین بادی را به بستر متصل می کند تا امکان جابجایی را از آن صلب کند[22]. لنگر ها به ۴ شکل زیر در صنعت بادی فراساحل کاربرد دارند:
  - مهار وزنی[۱۳]
  - مهار شمع[۱۴]
  - مهار مکشی[۱۵]

[10] London array
[11] Gravity Base Foundation
[12] Suction Bucket Foundation
[13] Gravity Base Anchor
[14] Driven Pile Anchor
[15] Suction Anchor

- لنگر کششی[16]: در این نوع مهار، نیروی افقی مقاوم در برابر جابجایی توسط سازه قرار داده شده در بستر و مقاومت اصطکاکی آن با سطح بستر و از طریق کابل متصل به سازه تأمین می شود.

عملکرد سه مورد اول در نقش مهار، دقیقاً مشابه نقش آن ها به عنوان فونداسیون اصلی می باشد.

- قطعات با اهمیت درجه دو: این قطعات متصل به سازه اصلی اجرا شده و وظیفه ایجاد دسترسی به توربین، انتقال برق تولیدی و حفاظت از سازه اصلی را بر عهده دارند. این قطعات بسته به نوع سازه می توانند متفاوت باشند. در زیر به چند نمونه اصلی از آن ها اشاره شده است [22]:
  - سکوی پهلوگیری شناور[17]: این قطعه از جنس فولاد تولید شده و در پایین تاور نصب می شود و وظیفه آن مهار شناور هایی که قصد دسترسی به توربین را دارند می باشد. همچنین با استفاده از آن دسترسی پرسنل و تجهیزات به زیرسازه جهت بازرسی و کنترل مشکلات زیرسازه فراهم شده و درصورت لازم تعمیرات لازم انجام می شود.
  - نردبان دسترسی[18]: وظیفه آن ایجاد دسترسی از سکوی پهلوگیری شناور به سکوی اصلی می باشد (باید شرایط ایمنی جهت استفاده بی خطر از آن برای پرسنل فراهم باشد)
  - سکوی اصلی[19]: این قسمت محیط امن جهت فعالیت پرسنل را فراهم می کند و گاهاً یک جرثقیل هم با هدف تسهیل عملیات تعمیر و نگهداری بر روی آن نصب شده است. این قسمت عموماً از جنس فولاد می باشد اما در برخی موارد مانند پروژه هورن رو ۲[20] در دانمارک از بتن در ساخت آن استفاده شده است. برتری فولاد به بتن در این زمینه در تأثیر پذیری کمتر از خوردگی و تعمیر و امکان نگهداری دائمی آن خلاصه می شود.

16 Drag Embedded Anchor
17 Boat Landing Platform
18 Access Ladder
19 Main Platform
20 Horn Rev 2

- جی تیوب[21]: استوانه های توخالی که وظیفه آن ها حفاظت و هدایت کابل های بـرق بر روی زیرسازه می باشد. اسم آن ها به علت شکل کلی آن ها که دارای یک خـم در نزدیکی بستر جهت ورود کابل از کانال است می باشد.
- آند های فدا شونده[22]: بـرای بـه حـداقل رسـاندن خـوردگی، زیرسـازه بـا اسـتفاده از حفاظت کاتدی از داخل و بیرون تجهیز مـی شـود. جـنس آنـد هـای فـدا شـونده از آلومینیوم می باشد.

با ترکیب ایده های فونداسـیون و زیـر سـازه، مـی تـوان تعـداد زیـادی سیسـتم سـازه ای تعریـف کرد و با توجه به سرعت پیشـرفت چشـمگیر صـنعت بـاد فراسـاحل، گزینـه هـای جدیـد بـه عنـوان سیسـتم سـازه ای مطـرح مـی شـود. در زیـر چنـد نمونـه پـر کـاربرد از ایـن سیسـتم هـا آمـده است[22]:

- پایه ثابت:
  - سازه تک شمع[23]
  - سازه وزنی[24]
  - سازه سه پایه[25]
  - سازه جکت / قاب[26]
  - سازه سه شمع[27]
- پایه شناور:
  - سازه اسپار[28]
  - سازه نیمه مستغرق[29]
  - سازه پایه کششی[30]

در ادامـه بـه توضـیح و تشـریح هـر کـدام از سیسـتم هـای فـوق و همچنـین محاسـن و معایـب آن ها پرداخته می شود.

---
[21] J-Tube
[22] Sacrificial Anodes
[23] Monopile Structure
[24] Gravity Structure
[25] Tripod Structure
[26] Jacket / Lattice Structure
[27] Tripile Structure
[28] Spar Floater Structure
[29] Semisubmersible Structure
[30] Tension Leg Platform

۴-۲ تشریح انواع سازه های پایه ثابت

۴-۲-۱ سازه های وزنی (Gravity Based):

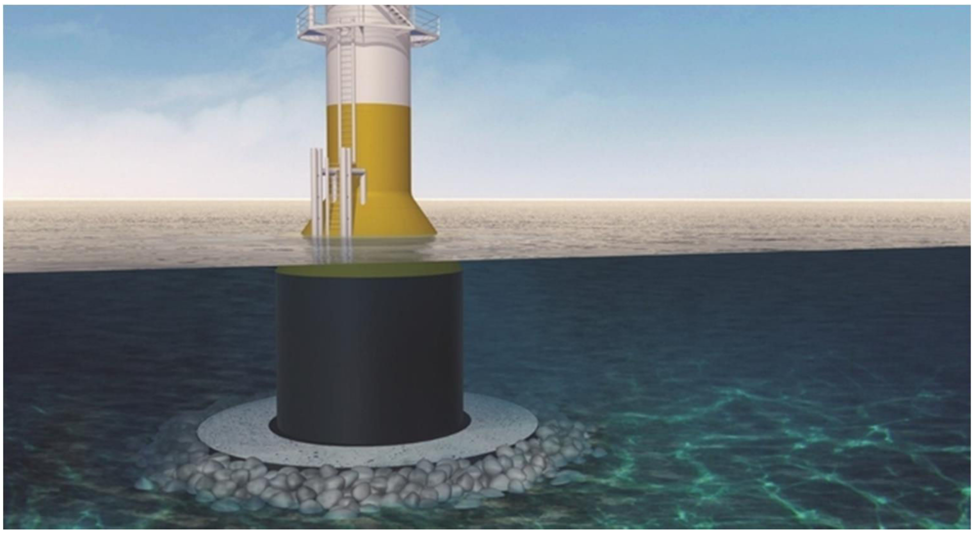
۴-۲-۱-۱ معرفی

زیر سازه های وزنی مقاومت خود را در برابر جابجایی از نیروی وزن سازه و بالاست تأمین می کنند. در قسمت پایه زیر سازه، از بتن مسلح در ساخت استفاده شده است که تاور توربین روی آن نصب می شود. در ساخت این نوع زیرسازه ابتدائاً از شکل دایره در پلان استفاده شد که بعد ها به علت دشواری ساخت به اشکال مستطیلی تغییر یافت[12,22].

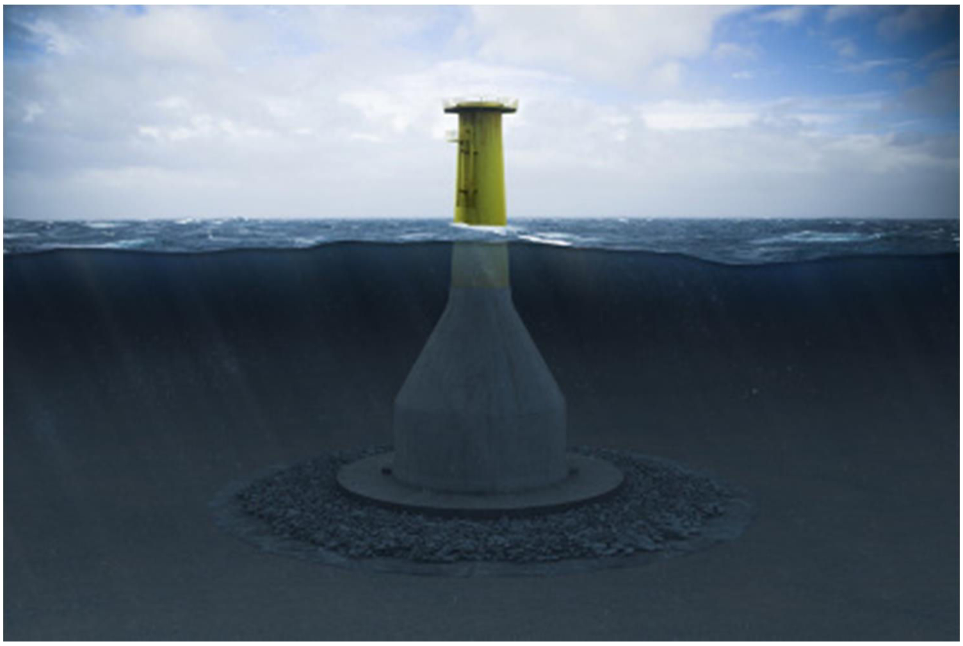
قطعات بتنی زیرسازه وزنی در خشکی ساخته شده و سپس به صورت شناور به سایت نصب منتقل می گردد و در آنجا با مصالح پر کننده مانند ماسه و سنگ پر می شود. علت اقتصادی بودن این نوع زیرسازه ها نیز هزینه ساخت ارزان آن ها می باشد. استفاده از این نوع زیرسازه به مناطقی که سطحی ترین لایه بستر آن مقاومت کافی دارد خلاصه می شود [12].

در شکل های ۴-۲ الی ۴-۴ شمای کلی این نوع زیرسازه برای توربین بادی فراساحل نشان داده است:

شکل ۴-۲ شکل کلی سازه وزنی[13]



شکل ۴-۳ شکل کلی سازه وزنی



شکل ۴-۴ شکل کلی سازه وزنی

در ساخت اولین مزرعه بادی فراساحل در سال ۱۹۹۱ از زیر سازه وزنی استفاده شد. در آن زمان ۱۱ عدد زیرسازه که وزن هر کدام بیش از ۹۰۰ تن بود در آب های دانمارک جهت ساخت مزرعه بادی استقرار یافت. آخرین مزرعه بادی با استفاده از این سیستم به نام Nysted 2 در سال ۲۰۰۹ با استفاده از ۹۰ زیرسازه به وزن ۱۲۰۰ تا ۱۹۰۰ تن (بدون احتساب وزن بالاست) ساخته و به بهره برداری رسید[22].

خصوصیات کلی این سازه ها در زیر آمده است:

- در شرایطی که بار های محیطی کوچک و بار مرده زیاد باشد اقتصادی است.
- امکان حمل با بارج یا به روش شناوری را دارد (می تواند در خشکی به صورت پیش ساخته اجرا و آماده شود و سپس به محل نصب حمل شود)
- در حالت عملیاتی و استفاده، دو سوم وزن کل سازه را بالاست تشکیل می دهد.

۴-۲-۱-۲ نقاط قوت و ضعف

- نقاط قوت:

۱. قابلیت استفاده در مکان هایی که اجرای شمع با مشکلات جدی روبرو است (مانند بستر سنگی و ...)

۲. مراحل نصب کمتر به این علت که سازه می تواند تا تراز مورد نیاز نصب پایه توربین اجرا شود و نیازی به قطعه میانی نیست

۳. عدم نیاز به عملیات حفاری و شمع کوبی

۴. عمر مفید طولانی سازه ای به این ترتیب که با کمی تعمیر و نگهداری می تواند بیش از ۱۰۰ سال مورد استفاده مطمئن قرار گیرد.

۵. خفیف بودن اثرات خستگی در این نوع سازه ها

۶. تأثیر کمتر بر روی محیط اطراف به علت عدم نیاز به شمع کوبی

۷. نیاز کم به حفاظت در برابر آب شستگی[۳۱]

۸. امکان نصب شبکه انتقال به صورت داخلی تا رسیدن به بستر.

- نقاط ضعف:

۱. در شرایط محدودی اقتصادی می باشد (اعماق کم در حدود ۲۰ متر)

۲. نیازمند آماده سازی بستر قبل از نصب (بستر باید به صورت کاملاً افقی و پوشیده از سنگ خرد شده باشد)

۳. هزینه بالای انتقال به سایت به علت وزن زیاد سازه.

۴. هزینه ساخت زیاد.

۵. عدم امکان استفاده در بستر نرم و کم مقاومت.

[31] Scour Protection

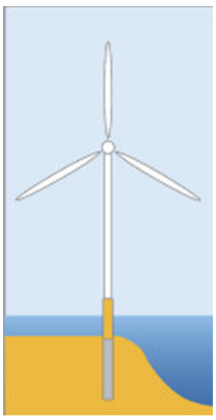
۴-۲-۲ تک شمع و تک شمع مهار شده (Monopile و Guyed Monopile):

۴-۲-۲-۱ معرفی

این نوع سازه به طور کلی شامل یک عدد استوانه فلزی (شمع با عمق نفوذ معمولاً ۱۰ تـا ۲۰ متـر) که متداولاً از جنس فولاد بوده و یک قطعه میانی که حدفاصل تک شمع و تـاور قـرار مـی گیـرد مـی باشد. بار عمودی در این نوع زیرسازه به خوبی به بستر منتقل می شود و بیشتر حساسـیت طراحـی آن بر روی بار های جانبی می باشد. نصب آن به طور کلی به دو روش که به شرایط بستر بسـتگی دارنـد و در ادامه آمده است انجام می شود. در صورتی که جنس بستر سنگی باشد، تک شـمع داخـل حفـره از پیش حفاری شده نصب و سپس به وسیله گروت پر می شود و در غیر این صـورت بـه وسـیله چکـش ساده یا چکش ویبره دار در محل نصب می شود. اساسی ترین مورد در هنگام نصب این نـوع زیرسـازه، پدیده آب شستگی ناشی از جریان های در نزدیکی بستر می باشد که باعث جابجایی خاک در محل به هم رسیدن شمع و خاک می باشد و این موضوع ضمن کاهش عمق نفوذ شـمع در خـاک، باعـث مـی شود طول بیشتری از شمع در معرض بار های هیدرودینامیکی قرار گیرد. به منظور جلوگیری از ایجـاد تأثیر از پدیده مذکور، از حفاظت در برابر آب شستگی با استفاده از چند لایه سنگی (قلوه سنگ ریز بـه عنوان فیلتر در لایه اول و یک لایه درشت تر سنگی جهت حفظ لایه اول در برابـر جابجـایی) اسـتفاده می شود. پس از نصب شمع، قطعه میانی با استفاده از یک اتصال گروتـه (اتصـال گروتـه باعـث حـذف خطاهای موجود در محل اتصال شمع و قطعه میانی می شود) به آن اتصال می یابد[20,22].

تک شمع مهار شده، نمونه تغییر یافته تک شمع می باشد که به جهت بهبود عملکرد در بارگـذاری جانبی و تغییر شکل های ناشی از آن به وسیله مهارهایی به بستر متصل شده است[13].

در شکل های ۴-۵ و ۴-۶، شمای کلی این نوع زیرسازه آمده است:



شکل ۴-۵ شکل کلی سازه تک شمع

شکل ۴-۶ شکل کلی سازه تک شمع[13]

استفاده از تک شمع از صنعت نفت و گاز دریای شمال، که دهه های متمادی مورد استفاده قرار می گیرند نشأت گرفته است. این پیشینه و فراگیری استفاده در کنار تحقیقات گسترده، زمینه را برای استفاده مطمئن و با ریسک کم از این نوع سازه ها در صنعت باد را فراهم می کند[22].

تک شمع ها در حال حاضر بیشترین سهم را در صنعت باد فراساحل دارند. در انگلستان تا آخر سال ۲۰۱۱ میلادی، در ۱۳ مزرعه بادی از مجموع ۱۵ عدد از زیر سازه تک شمع استفاده شده است. در کل اروپا در حدود بیش از نصف مزارع بادی از این سیستم سازه ای بهره می برند[22].

۴-۲-۲-۲ نقاط قوت و ضعف

- نقاط قوت:

۱. تأثیر نسبتاً ناچیز و در محدوده بسیار کوچک بر محیط زیست اطراف محل استقرار

۲. پرکاربردترین نوع زیرسازه جهت توربین بادی فراساحل تا کنون (تکنولوژی اثبات شده) ناشی از سهولت ساخت و نصب و همچنین استفاده فراگیر (به واسطه استفاده در صنعت نفت و گاز)

۳. عدم نیاز به آماده سازی بستر در محل نصب
۴. قیمت ارزان مواد اولیه ساخت (مانند فولاد)
۵. امکان تولید سری و تعداد بالا
۶. امکـان اسـتفاده در اعمـاق بیشـتر نسـبت بـه تـک شـمع (فقـط بـرای تـک شـمع مهار شده)

- نقاط ضعف:

۱. نیـاز بـه حفاظـت در برابـر آب شسـتگی بـه صـورت دائمـی در طـول عمـر مفیـد سازه
۲. نیاز به بازسازی لایه گروت بین تک شمع و قطعه میانی در اثر گذشت زمان
۳. محدودیت نصب تا عمق ۴۰ متر
۴. صعوبت ساخت در صورت افزایش ابعاد
۵. سختی کم در صورت استفاده در عمق زیاد
۶. عملیات برچیدن سخت پس از اتمام عمر مفید

۴-۲-۳ سه پایه (Tripod و Tri-Pile):

۴-۲-۳-۱ معرفی

تراپیاد یک سازه با ۳ پایه سیلندری از جنس فولاد که بـه قطعـه میـانی متصـل مـی باشـد اسـت. زیرسازه با استفاده از شمع هایی که از طریق راهنما[۳۲] های پایه ها در بستر کوبیده می شوند به بسـتر اتصال می یابد[22].

تراپیاد ها را معمولاً به صورت چند تایی با استفاده از بارج و یدک کش به سایت نصب منتقل شـده و در آنجا به وسیله جرثقیل در موقعیت نهایی نصب قرار می گیرند. در این مرحله شـمع کـوبی انجـام شده و فضای خالی بین شمع ها و سازه با بتن یا گروت پر می شود.

سه شمع یک سازه شامل سه عدد شمع مجزا و یک عدد قطعه میانی کـه آن هـا را از بـالا بـه هـم متصل می سازد می باشد. قطعه میانی با استفاده از قطعـات تخـت فـولادی و بـا عملیـات جوشـکاری ساخته می شود و در حدود ۴۹۰ تن وزن دارد. اتصالات بین شـمع هـا و قطعـه میـانی بـا اسـتفاده از گروت پر می شود[22]. برای نصب، ابتدا شمع ها با استفاده از الگو در محل دقیق خود و بـه گونـه ای که سطح نهایی سر شمع ها از سطح آب بیرون زده باشد، کوبیده مـی شـوند. سـپس قطعـه میـانی بـا رعایت قرارگیری سر هرکدام از وجوه آن داخل یک شمع نصب می شود. علت استفاده از الگو، نیـاز بـه دقت بالای مورد نیاز جهت قرارگیری دقیق قطعه میانی بر روی هر کدام از شمع ها می باشد[22].

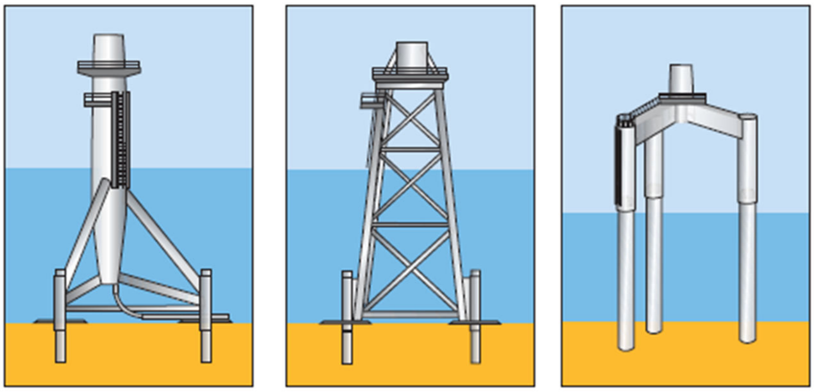
در شـکل هـای ۴-۷ تـا ۴-۹ شـمای کلـی ایـن نـوع زیرسـازه بـرای تـوربین بـادی فراسـاحل نشان داده است:

شکل ۴-۷ شکل کلی سازه سه پایه[*13*]

---

[32] Sleeve

شکل ۴-۸ شکل کلی سازه سه شمع



شکل ۴-۹ شکل سمت راست سازه سه شمع، شکل وسط سازه جکت، شکل سمت چپ سازه سه پایه

با وجود اینکه تراپیاد ها در صنعت نفت و گاز ی سیستم سازه ای شناخته شده ای می باشد، اما فقط در یک پروژه در صنعت باد (Alpha Ventus در آلمان) از آن ها استفاده شده است. البته تا سال ۲۰۱۵ یک پروژه دیگر (Borkum Phase 1) هم از این سیستم بهره خواهد برد. سه شمع ها یک سیستم نوظهور نشأت گرفته از تک شمع ها می باشد و توسط بارد[۳۳] به ثبت رسیده است. تا به حال ۵ مزرعه بادی با این سیستم در برنامه ساخت قرار گرفته اند[22].

[33] BARD

۴-۲-۳-۲ نقاط قوت و ضعف

- نقاط قوت:

۱. نسبت به تک شمع ها و سازه های وزنی طیف گسترده تری از شرایط محیطی را تحمل می کنند (ممکن است در شرایط محیطی یکسان که سازه های وزنی و تک شمع جوابگو نباشد، این نوع سازه ها مناسب باشد.)

۲. نیاز به آماده سازی بستر ندارد

۳. مصالح مصرفی کمتر و بالطبع وزن کمتر نسبت به تک شمع به علت سختی بیشتر (ناشی از عملکرد متفاوت سیستم شمع ها که در تک شمع، یک عدد شمع در برابر واژگونی به صورت خمشی عمل نموده اما در این نوع سازه برای مقاومت در برابر واژگونی تمام شمع ها تقریباً فقط نیروی محوری تحمل می کنند که علت آن عملکرد یکپارچه سیستم می باشد)

۴. بدون نیاز به محافظت در مقابل آب شستگی

۵. امکان اجرای شبکه برق به صورت داخلی تا بستر

۶. برچیدن آسان پس از عمر مفید

- نقاط ضعف:

۱. عدم امکان اجرا در اعماق کمتر از ۷ متر (به علت استفاده از قطعه اتصال ۳ شمع)

۲. عملیات ساخت پیچیده و زمان بر نسبت به تک شمع و سازه های وزنی

۳. محدودیت در انبار کردن و انتقال به علت عرض نسبتاً زیاد

۴. اثرات زیاد خستگی بر قطعه اتصال سه سر شمع

۴-۲-۴ قاب مشبک مهار شده (Jacket یا Braced Lattice Tower):

۴-۲-۴-۱ معرفی

جکت یک سازه متشکل از ۳ یا ۴ پایه که به وسیله اعضای لاغر مهاربندی شده اند می باشد. تمام اعضا در این نوع سازه از نوع سیلندر توخالی بوده و اتصالات بین آن ها از نوع جوشی می باشد. هر عدد از اتصالات به صورت ویژه ساخته می شود. جکت ها هم مانند تک شمع ها جهت اتصال به تاور به قطعه میانی نیاز دارند. وظیفه این قطعه حصول اطمینان از تقسیم نیرو های توربین بادی به طور مساوی به تمام پایه ها سپس بستر می باشد. اتصال قطعه میانی به جکت یکی از مهم ترین مسائل در نصب جکت می باشد. جکت ها نسبت به سایر زیر سازه ها استعداد بیشتری در استفاده در آب های عمیق و فاکتور های اقتصادی دارد[20,22].

در [19] به این موضوع اشاره شده که در یک مورد مقایسه ای طراحی دو نمونه ۳ و ۴ پایه از سیستم سازه ای جکت، نمونه ۳ پایه طراحی شده ۱۷٪ وزن کمتر و ۲۵٪ تعداد اتصالات جوشی کمتر نسبت به نمونه ۴ پایه با شرایط طراحی مشابه داشت.

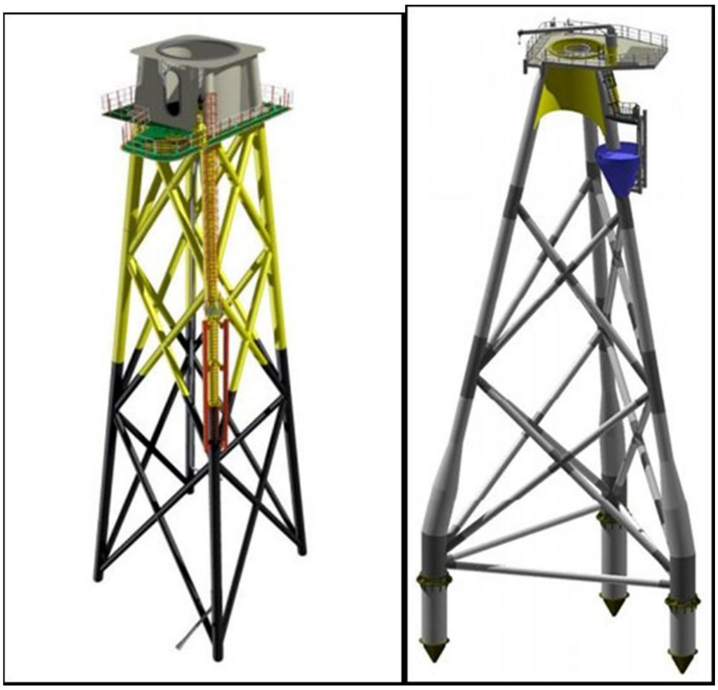
پس از ساخت سازه، آن را به وسیله بارج به سایت نصب انتقال می دهند. دو روش نصب برای جکت ها انجام می شود[22]:

- شمع کوبی پس از استقرار سازه در محل نصب نهایی: این روش قدمت بیشتری داشته و در ساخت مزرعه بادی Beatrice Demonstration به کار رفته و بدین صورت است که جکت پس از قرارگیری در محل نهایی به وسیله شمع هایی که در راهنما کوبیده می شوند به بستر متصل می شود.
- شمع کوبی پیش از استقرار سازه در محل نصب نهایی: در این روش ابتدا شمع ها به کمک یک الگو جهت نصب دقیق شمع ها کوبیده می شود و سپس سازه جکت بر روی بستر مستقر و به شمع ها متصل می گردد و فضای موجود بین بدنه شمع و راهنما به وسیله پرکننده گروتی پر می شود. از این روش نصب برای اولین بار در پروژه Alpha Ventus در آلمان استفاده شده است.

مزیـت شـمع کـوبی پـیش از اسـتقرار سـازه در محـل، صـرفه جـویی در زمـان نصـب و بـالطبع هزینه می باشد[22].

شمای کلی این نوع سازه در شکل های ۴-۱۰ و ۴-۱۱ آمده است:

شکل ۴-۱۰ شکل کلی سازه جکت[*13*]



شکل ۴-۱۱ شکل سمت راست سازه جکت با سه پایه، شکل سمت چپ سازه جکت با چهار پایه[*19*]

جکت ها به عنوان تازه وارد هایی در صنعت باد می باشد که در پروژه هایی از جمله Alpha Ventus در آلمان، Beatrice Demonstration و Ormonde Park در انگلستان استفاده شده اند. این نوع سازه ها می توانند صنعت باد را به اعماق بیشتر آب ببرند. تا سال ۲۰۰۷ با استفاده از زیرسازه های مورد استفاده، عمق آب ۲۰ متری برای صنعت باد قابل دسترس بود، اما در Beatrice Park با استفاده از سیستم سازه ای جکت، نصب در اعماق ۲۰ الی ۴۵ متر از سطح آب انجام شد[22].

۴-۲-۴-۲ نقاط قوت و ضعف

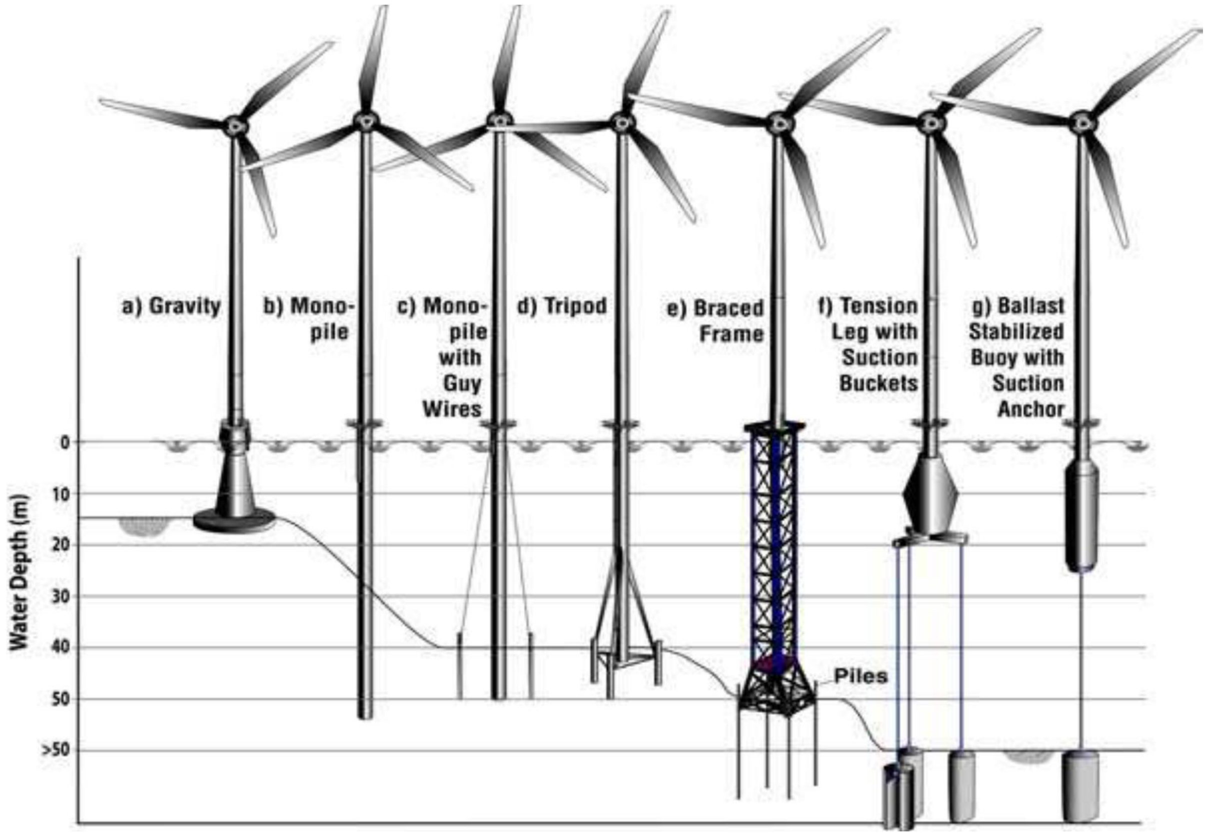
- نقاط قوت:

۱. سازه سبک و با سختی مناسب
۲. عملکرد انتقال بار و سازه ای مناسب
۳. صرفه اقتصادی در اعماق متوسط و زیاد
۴. نیاز به حفاظت در برابر آب شستگی ندارد
۵. تأثیر پذیری کم از شرایط خاک
۶. عملکرد خوب در مقابل بار موج

- نقاط ضعف:

۱. صعوبت ساخت
۲. عملیات نصب پیچیده با توجه به شابلون
۳. اتصال پیچیده به قطعه میانی

۴-۳ بررسی و مقایسه انواع زیرسازه ها



شکل ۴-۱۲ شکل کلی سازه های مورد استفاده در صنعت باد فراساحل[13]

در این قسمت طبقه بندی و رتبه بندی هر کدام از سیستم های سازه ای که در قسمت قبل معرفی شد بر اساس یک دسته بندی که در ادامه آمده است و یک سیستم ساده امتیاز دهی (۱۰ برای بیشترین سازگاری و ۰ برای کمترین سازگاری با پارامتر مورد نظر نسبت به سایر انواع سازه) انجام خواهد گرفت. این بهینه یابی با استفاده از تجربیات گذشته و کار های انجام شده که در فصل مرور ادبیات فنی آمده است انجام شده است. بر اساس تحقیقات انجام شده مزایا و معایب و همچنین پیش نیاز های اجرای هر کدام از سیستم های سازه ای در قالب مزارع بادی فراساحل بررسی و با در نظر گرفتن تمام موارد به صورت یکجا، انواع زیر سازه ها رتبه بندی شد. هدف از این رتبه بندی، دستیابی به یک گزینه بهینه زیرسازه جهت استفاده در مزارع بادی فراساحل با توجه به عمق مناطق مستعد و نیز در نظر داشتن شرایط ساخت و نصب و نیز هزینه ها بوده است.

انعطاف و دامنه کاربرد مناسب هر کدام از زیرسازه ها جهت مقایسه در ۴ دسته کلی و ۱۵ پارامتر به شرح زیر طبقه بندی خواهد شد:

- **انعطاف در کاربرد:**
  - گستردگی بازه اعماق نصب
  - گستردگی بازه جنس بستر قابل نصب در آن
- **عملیات ساخت:**
  - عملیات مورد نیاز انبارش و انتقال به سایت نصب
  - سهولت ساخت
  - فراگیر بودن تکنولوژی
  - سبک بودن سازه و مصرف و هزینه متریال به کار رفته در ساخت
- **عملیات نصب:**
  - نیاز به آماده سازی بستر
  - نیاز به حفاظت در برابر آب شستگی
  - نصب قطعه میانی
  - پیش ساخته بودن و حجم عملیات دریایی
- **بهره برداری، عمر مفید و عملیات برچیدن:**
  - تعمیر و نگهداری و عمر مفید
  - تأثیر بر محیط اطراف
  - تأثیر پذیری از خستگی
  - قرارگیری و حفاظت شبکه برق
  - سهولت عملیات برچیدن

جدول ۴-۱ مقایسه زیر سازه ها بر اساس انعطاف در کاربرد

انعطاف در کاربرد		
نوع زیرسازه	**گستردگی بازه اعماق نصب**	**گستردگی بازه جنس بستر قابل نصب در آن**
سازه وزنی	فقط اعماق کم (۰)	بستر سخت (۵)
تک شمع (تک شمع مهار شده)	نسبتاً انعطاف پذیر ((۷،۵)۵)	همه نوع بستر (۱۰)
سه پایه	نسبتاً انعطاف پذیر برای بیش از ۱۰ متر (۵)	همه نوع بستر (۱۰)
جکت	عالی (۱۰)	همه نوع بستر (۱۰)

جدول ۴-۲ مقایسه زیر سازه ها بر اساس عملیات ساخت

عملیات ساخت				
نوع زیرسازه	عملیات مورد نیاز انبارش و انتقال به سایت نصب	سهولت ساخت	فراگیر بودن تکنولوژی	سبک بودن سازه و مصرف و هزینه متریال به کار رفته در ساخت
سازه وزنی	وزن زیاد (۰)	بسیار ساده (۱۰)	مناسب (۵)	بسیار سنگین (۰)
تک شمع (تک شمع مهار شده)	نسبت به سازه وزنی بهتر است (۵)	نسبتاً ساده (۵)	عالی (۱۰)	فولاد ارزان (۵)
سه پایه	ابعاد زیاد (۰)	عملیات ساخت پیچیده (۰)	مناسب (۵)	فولاد ارزان (۵)
جکت	ابعاد قطعات کوچک تر و وزن کمتر (۱۰)	عملیات ساخت پیچیده (۰)	مناسب (۵)	بسیار سبک (۱۰)

جدول ۴-۳ مقایسه زیر سازه ها بر اساس عملیات نصب

عملیات نصب				
نوع زیرسازه	نیاز به آماده سازی بستر	نیاز به حفاظت در برابر آب شستگی	نصب قطعه میانی	پیش ساخته بودن و حجم عملیات دریایی
سازه وزنی	تسطیح و ایجاد لایه خر سنگ (۰)	محافظت متوسط نیاز دارد (۵)	نیاز ندارد (۱۰)	صعوبت نصب دارد (۱۰)
تک شمع (تک شمع مهار شده)	بدون نیاز به آماده سازی بستر (۱۰)	محافظت زیاد نیاز دارد (۰)	نصب آسان (۵)	شمع کوبی و حفاری و گروته کردن درجا (۵)
سه پایه	بدون نیاز به آماده سازی بستر (۱۰)	محافظت بسیار کم نیاز دارد (۱۰)	نصب پیچیده (۱۰)	شمع کوبی و حفاری و گروته کردن درجا (۰)
جکت	بدون نیاز به آماده سازی بستر (۱۰)	محافظت بسیار کم نیاز دارد (۱۰)	نصب پیچیده (۱۰)	شمع کوبی و حفاری و گروته کردن درجا و شابلون (۰)

جدول ۴-۴ مقایسه زیر سازه ها بر اساس بهره برداری، عمر مفید و عملیات برچیدن

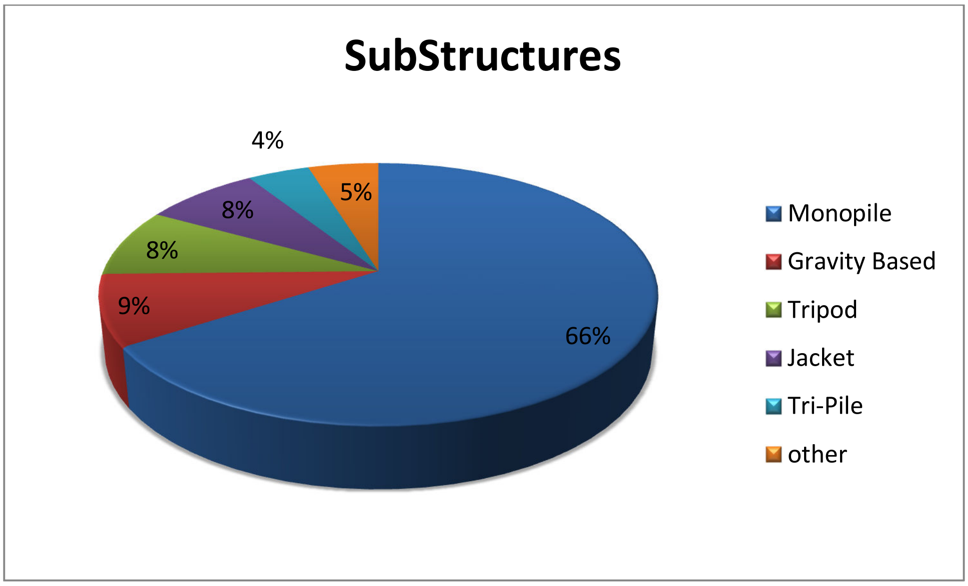
بهره برداری، عمر مفید و عملیات برچیدن					
نوع زیرسازه	تعمیر و نگهداری و عمر مفید	تأثیر بر محیط اطراف	تأثیر پذیری از خستگی	قرارگیری و حفاظت شبکه برق	سهولت عملیات برچیدن
سازه وزنی	بیش از ۱۰۰ سال (۱۰)	بسیار زیاد (۰)	کم (۱۰)	داخلی (۱۰)	مشکل (۰)
تک شمع (تک شمع مهار شده)	نیاز به بازسازی گروت و شرایط سخت خمش ((۵))۰)	بسیار کم (۱۰)	زیاد (۰)	خارجی (۰)	مشکل (۰)
سه پایه	قطر شمع های کم و عملکرد سازه ای مناسب (۵)	متوسط (۵)	زیاد (۰)	داخلی (۱۰)	ساده (۱۰)
جکت	قطر شمع های کم و عملکرد سازه ای مناسب (۵)	متوسط (۵)	متوسط (۵)	داخلی (۱۰)	نسبتاً ساده (۵)

پارامتر هایی که در جداول ۴-۱ الی ۴-۴ آمده است و همچنین مبنای رتبه بندی هر کدام به صورت تفصیلی در ادامه توضیح داده شده است:

- انعطاف در برابر اعماق نصب متفاوت: زیرسازه ها به ترتیب حداکثر عمق قابل استفاده متداول مرتب شده اند، فقط باید این نکته را در نظر داشت که سه پایه ها به علت قطعه اتصالی نسبتاً بزرگ در عمق کمتر از ۷ متر قابل نصب نمی باشد.
- محدودیت بستر جوابگو: سازه های وزنی فقط در بستر های مستحکم امکان اجرا دارند، اما سایر سازه ها، در خاک های نرم تر با شمع کوبی و در سایر خاک ها با عملیات حفاری و به طور کلی تقریباً با تمهیدات لازم در تمام انواع خاک بستر قابل اجراست.
- انبارش و انتقال به سایت: سازه های وزنی و سه پایه به علت وزن و ابعاد زیاد قطعات نیازمند عملیات انبارش و انتقال مشکل می باشد. علاوه بر آن ساخت سازه اتصال

دهنده در سه پایه زمان بر می باشد و باید سایت ساخت مناسب برای آن در پیش بینی شود. تک شمع ها از لحاظ صعوبت انتقال با مشکل کمتری نسبت به دو سازه فوق مواجه می باشد. تک شمع های با مهار و جکت به علت قطعات کوچک تر از لحاظ انتقال و انبارش با کمترین مشکل مواجه می باشد.

- سهولت ساخت: سازه های وزنی به دلیل نداشتن اتصالات متعدد و جزئیات فراوان ساده ترین ساخت را در بین زیر سازه ها دارا می باشد. تک شمع ها هم به دلیل مشابه نسبتاً ساده ساخته می شوند. اما سه پایه به علت قسمت اتصال دهنده شمع ها و جکت در کل بدنه خود به علت جزئیات فراوان و همچنین اتصالات متعدد، عملیات ساخت به مراتب پیچیده تری دارند.
- فراگیر بودن تکنولوژی: با توجه به استفاده گسترده از تک شمع ها چه در صنعت نفت و گاز چه در زمینه انرژی های نو، این نوع زیر سازه نسبت به سایر انواع زیر سازه ها تکنولوژی مطمئن تری می باشد که چه از لحاظ طراحی و چه اجرا بسیار جا افتاده تر است. سایر انواع زیرسازه تقریباً از این لحاظ با هم برابرند.



شکل ۴-۱۳سهم زیرسازه ها از بازار انرژی بائ اروپا

- سبک بودن سازه ای و مصرف و هزینه کم متریال: سازه های وزنی با توجه به عامل مقاوم در برابر واژگونی که نیروی وزن آن است از لحاظ وزن و مصرف مواد در بدترین رتبه قرار دارد. تک شمع و tri-pile هم به علت قیمت کم فولاد (مواد اولیه ارزان) شرایط بهتری نسبت به سازه های وزنی دارند. سبک ترین نوع سازه (به علت

سیستم سازه ای قاب شکل) که ضمناً از مواد اولیه ارزان (فولاد) ساخته می شود، جکت می باشد.

- نیاز به آماده سازی بستر: برای سازه های وزنی بستر باید افقی و پوشیده از خرده سنگ باشد، اما در سایر سازه ها با توجه به اینکه عامل انتقال بار، شمع می باشد، نیازمند تمهید خاصی برای نصب شمع نمی باشد.
- حفاظت در برابر آب شستگی: سازه های وزنی به حفاظت کمی در برابر آب شستگی نیاز دارد، در حالی که سازه های تک شمع نیاز به حفاظت گسترده در برابر آب شستگی دارد. سازه های سه پایه و جکت هم تقریباً نیاز به حفاظت در برابر آب شستگی دارد.
- نصب قطعه میانی: قطعه میانی در سازه وزنی با این روش که زیر سازه تا بالاتر از سطح آب ساخته شود، می تواند به عنوان جزئی از سازه اصلی باشد در سازه های تک شمع به علت وجود یک سر شمع نصب قطعه میانی ساده می باشد. در سازه های سه پایه و جکت به علت وجود شکل هندسی عملیات نصب قطعه میانی سخت می باشد.
- پیش ساخته بودن و عملیات دریایی کم با نصب: سازه های وزنی فقط با صعوبت نصب مواجه می باشد، اما به علت پیش ساخته بودن عملیات دریایی کم نیاز دارد. سایر سازه ها به علت نیاز به شمع کوبی و حفاری (در صورت نیاز) عملیات دریایی پیچیده ای دارند. سه پایه و جکت به علت عملیات نصب قطعات متعدد علاوه بر شمع کوبی نیاز به عملیات گسترده تر دریایی دارد.
- تعمیر و نگهداری و عمر مفید: سازه های وزنی با کمی تعمیر و نگهداری به عمر مفید بیش از ۱۰۰ سال می رسد که در بین سایر انواع سازه ها بیشترین است. سازه های تک شمع به خاطر نیاز به بازسازی گروت محل اتصال قطعه میانی و همچنین عملکرد سازه در خمش شدید نیاز به تعمیر و نگهداری بیشتری دارد. سه پایه و جکت نیز نیاز به حفاظت و کنترل اتصالات متعدد دارد.
- تأثیر بر محیط اطراف: سازه های وزنی به علت ابعاد بزرگ خود و نوع قرارگیری (روی بستر) محدوده زیادی را متأثر می نماید. سه پایه و جکت به علت داشتن فضای خالی در کناره ها نسبتاً تأثیر کمتری بر محیط اطراف می گذارد. تک شمع

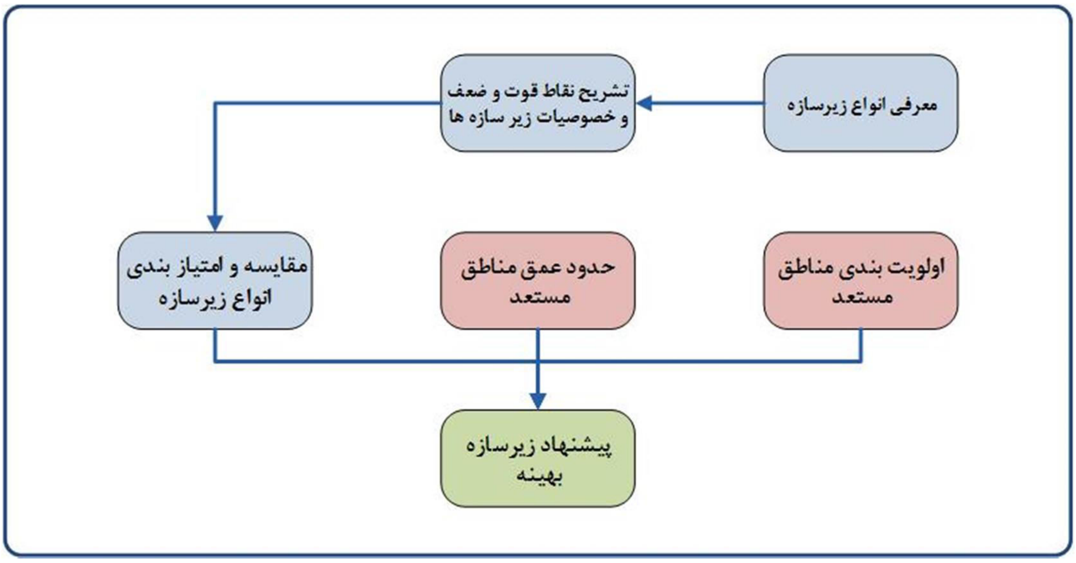
بـه علـت ابعـاد بسـیار کـم و همچنـین عـدم نیـاز بـه آمـاده سـازی بسـتر، تـأثیر بسـیار ناچیزی بر محیط اطراف خود در محل نصب دارد.

- تأثیرپـذیری از خسـتگی: سـازه هـای وزنـی تـأثیر کمـی از خسـتگی مـی پذیرنـد. در سـازه های سه پایه، خستگی بر قطعه اصلی اثر نسبتاً زیادی می گذارد.
- نحوه قرارگیری شبکه انتقال نیروی بـرق: در تمـام سـازه هـا بـه جـز تـک شـمع مـی توانـد به صـورت داخلـی، یعنـی داخـل بدنـه تـو خـالی قـرار گیـرد کـه ایـن بـه معنـی محافظـت بیشتر شبکه مذکور تا رسیدن به بستر می باشد
- برچیدن: برچیدن سازه های وزنـی بـه علـت وزن و ابعـاد زیـاد، و تـک شـمع بـه علـت قطـر و ضخامت زیاد شـمع کوبیـده شـده بسـیار مشـکل خواهـد بـود. ایـن موضـوع بـرای جکـت به علت یکپارچـه بـودن قـاب نیـز وجـود دارد. عملیـات برچیـدن سـه پایـه بـه علـت شـمع های لاغرتر نسبتاً ساده می باشد.

۴-۴ جمع بندی و نتیجه گیری

بـا توجـه بـه جـداول قسـمت قبـل و همچنـین عمـق حـدودی کـه در فصـل قبـل آمـده اسـت، بـرای زون ۸ و ۹ حـدود عمـق ۵۰ متـر مـی باشـد کـه بـه طـور کلـی مـی تـوان گفـت ایـن منـاطق تنهـا بـا جکـت سـازگار اسـت. البتـه مـی تـوان از سـازه هـای شـناور هـم بـه عنـوان گزینـه نـام بـرد، امـا بـا توجـه بـه اینکـه حتـی در سـطح جهـانی هـم اسـتفاده از ایـن نـوع زیـر سـازه انجـام نشـده اسـت (چنـد مـورد بـه صـورت آزمایشـی در حـال طـی مراحـل تکامـل طـرح مـی باشـد)، در حـال حاضـر بـه عنـوان گزینـه محتمـل پیشـنهاد نمی گردد.

در شکل ۴-۱۴ خلاصه روند کار های انجام گرفته در این فصل آمده است:



شکل ۴-۱۴ روند کلی فعالیت های انجام شده در فصل پنجم

فصل پنجم

چینش و آرایش

۵) چینش و آرایش

۵-۱ کلیات

۵-۱-۱ هزینه های مزارع بادی فراساحل

امروزه مزارع بادی یکی از منابع انرژی درخور توجه به شمار می آیند، اما هزینه بالای تولید برق از این راه، یک مانع برای رقابت با سایر روش های استحصال انرژی به شمار می آید. با اینکه هزینه تولید انرژی باد در فراساحل چه در زمینه ساخت و راه اندازی و چه در زمینه تعمیر و نگهداری نسبت به خشکی بیشتر است، اما در فراساحل، حجم بالاتر تولید ناشی از توان و تداوم بیشتر باد مورد انتظار است. بهینه سازی چینش مزرعه بادی علی رغم آنکه با کاهش هزینه تولید زمینه را برای رقابت فراهم می آورد، اما یک چالش مهم مهندسی محسوب می شود.

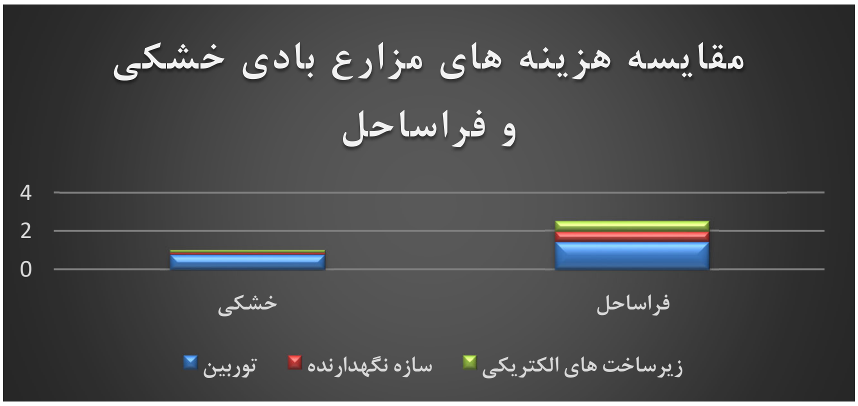
تا به حال تحقیقات زیادی در زمینه افزایش استحصال انرژی از باد در خشکی انجام گرفته است. بیشتر این تحقیقات در زمینه انتخاب محل دقیق سایت احداث و تأثیر عوارض طبیعی زمین بر عملکرد توربین و باد انجام گرفته است و در اکثر موارد بهینه سازی چینش و آرایش مزارع بادی، بیشینه کردن تولید سالیانه انرژی مدنظر قرار داده شده است. در سال های اخیر این بهینه سازی برای صنعت باد فراساحل نیز انجام شده است که بر اساس آن اصلی ترین عامل، اثرات wake می باشد [26].

مزارع بادی فراساحل ذاتاً نسبت به مزارع بادی در خشکی هزینه بیشتری دارند [26]. در جدول ۵-۱ و نمودار شکل ۵-۱ زیر تقسیم حدودی هزینه های مزارع بادی فراساحل و در خشکی برای دو مورد مشابه آمده است:

جدول ۵-۱ مقایسه سهم بندی هزینه ها در مزارع بادی فراساحل و خشکی *[26]*

	سهم از کل هزینه در فراساحل (٪)	سهم از کل هزینه در خشکی (٪)
توربین	۴۴	۶۴
سازه نگهدارنده	۱۶	۷
زیرساخت های الکتریکی	۱۷	۱۰
نصب	۱۳	۱۱
برنامه ریزی و توسعه	۱۰	۸
کل هزینه (میلیون یورو)	**۳,۲۷۰**	**۱,۲۲۷**

باید توجه داشت که درصد های آمده در هر ستون جدول فوق، بر اساس هزینه نهایی همان ستون می باشد، به عنوان نمونه برای هرینه نصب، اگرچه اختلاف بین خشکی و فراساحل ۲٪ می باشد، اما با در نظر گرفتن کل هزینه، این هزینه برای خشکی رقم حدودی ۱۳۵ و برای فراساحل ۴۲۵ میلیون یورو یعنی بیش از ۳ برابر است. شکل دیگر این مقایسه در ادامه آمده است.



شکل ۵-۱ مقایسه هزینه های احداث مزارع بادی در خشکی و فراساحل

همانگونه که مشاهده می شود، سهم توربین از کل هزینه های احداث یک مزرعه بادی در فراساحل فقط ۴۴ درصد می باشد، ولی این رقم در خشکی به ۶۴ درصد افزایش می یابد. هزینه کلی احداث، سهم زیرسازه، زیرساخت های الکتریکی و نصب در فراساحل نسبت به خشکی بیشتر است و این موضوع ناشی از پیچیدگی بیشتر پروژه در فراساحل می باشد. زیرسازه مزارع بادی فراساحل، از لحاظ طراحی و نصب وابستگی زیادی به شرایط محیطی آب ها، خصوصیات بستر و عمق آب در محل احداث دارد و به طور کلی از هر دو لحاظ طراحی و نصب پیچیده تر از آنچه در خشکی اتفاق میافتد می باشد [26].

۵-۱-۲ هزینه انرژی

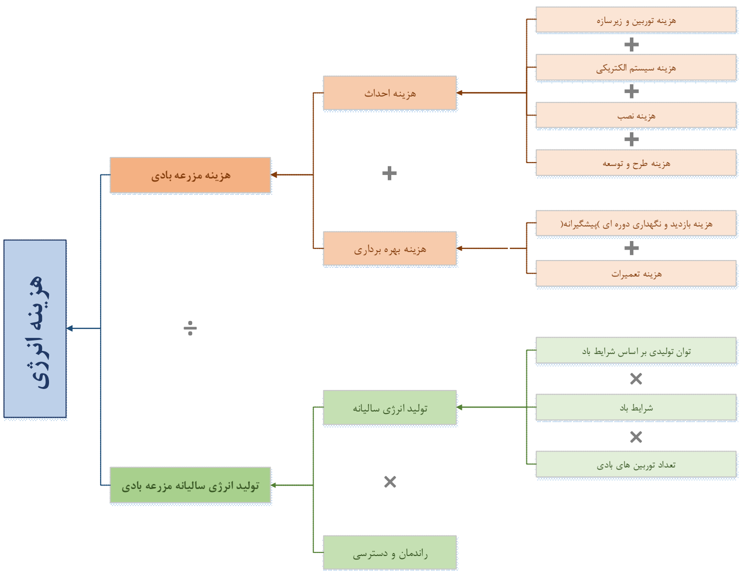
CoE بیانگر هزینه برای هر واحد انرژی تولیدی (Cost per unit of energy produced) می باشد و واحد آن برای مثال می تواند به شکل €/kWh باشد. CoE به عنوان یک شاخص کلی بهره وری پروژه کاربرد دارد و تعیین کننده صرفه اقتصادی یک پروژه می باشد. رابطه محاسبه CoE بر اساس واحد ذکر شده در قبل (۵-۱) در زیر آمده است[26]:

$$CoE = \frac{\sum_{n=0}^{N} \frac{Inv + C_{O\&M} + C_{others}}{(1+a)^n}}{\sum_{n=0}^{N} \frac{AEP}{(1+a)^n}} \qquad (۵-۱)$$

که در فرمول بالا:

- Inv : سرمایه گذاری سالیانه بر حسب €
- $C_{O\&M}$: هزینه راه اندازی و نگهداری بر حسب €
- C_{others} : سایر هزینه ها در طول عمر مفید پروژه بر حسب €
- a : ضریب تخفیف بر حسب درصد
- AEP : میزان تولید انرژی سالیانه بر حسب kWh
- N : طول عمر مفید پروژه بر حسب سال

یک راه دیگر تفصیلی بیان CoE نمودار شکل ۵-۲ می باشد:



شکل ۵-۲ تعریف CoE [26]

هزینه انرژی تولیدی بـه طـور مســتقیم از تولیـد ســالیانه انـرژی (کـه خـود متـأثر از خصوصـیات توربین ها و شـرایط بـاد منطقـه مـی باشـد) و همچنـین کـارکرد تـوربین هـا (دسترسـی و کـارایی) و نیـز اتـلاف (اتـلاف در مرحلـه استحصـال و اتـلاف ناشـی از اثـر wake) تـأثیر مـی پـذیرد. تمـامی فاکتور های مذکور باید در مراحـل اولیـه طراحـی مزرعـه بـادی مـد نظـر قـرار گیرنـد تـا در نتیجـه CoE کاهش یابد [26].

۵-۱-۳ محاسبه توان تولیدی سالیانه مزرعه بادی

تـوان تولیـدی تـوربین مـی توانـد بـر اسـاس سـرعت بـاد مـؤثر در محـدوده تـوربین بـه وسـیله نمودار توان توربین کـه توسـط سـازنده ارائـه مـی شـود محاسـبه شـود. در صـورتی کـه فـرض شـود کـه مزرعـه بـادی تحـت اثـر یـک سـرعت بـاد ثابـت اسـت، میـزان بـرق تولیـدی کـل آن از طریـق رابطه ۵-۲ محاسبه می شود:

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{3} u_i^3 \qquad (۵-۲)$$

نهایتاً میزان انرژی تولیدی سالیانه (AEP) را می توان از فرمول ۵-۳ محاسبه کرد:

$$AEP = 8766 \sum_i \sum_j \sum_k F_{ijk} P_{ijk} \qquad (۵-۳)$$

در رابطه بالا:

- i : تعداد شاخص های جهت باد
- j : تعداد شاخص های سرعت باد
- k : تعداد توربین ها
- F_{ijk} : احتمال وزش باد با سرعت u_i در جهت Θ_j برای توربین شماره k
- P_{ijk} : توان تولیدی توربین در سرعت u_i، جهت Θ_j برای توربین شماره k بر حسب کیلووات (kW)
- AEP : میزان انرژی تولیدی سالیانه بر حسب کیلووات ساعت (kW.hr)
- 8766 : میانگین تعداد ساعت ها در یک سال با در نظر گرفتن سال های کبیسه

با توجه به حجم زیاد محاسـبات مربـوط بـه تـوان تولیـدی و نیـز نیـاز بـه داده هـای بـاد دقیـق جمـع آوری شـده بـه وسـیله وسـایل انـدازه گیـری میـدانی در محـل و عـدم وجـود چنـین داده

هایی برای مناطق مستعد معرفی شده در این پایان نامه، از انجام محاسبات خودداری می شود.

۵-۱-۴ بهینه سازی مزرعه بادی فراساحل

همانگونه که در قسمت قبل آمد، هزینه و بازده مزرعه بادی به فاکتور های متعددی وابسته است. چینش و آرایش مزارع بادی می تواند به روش های مختلفی بهینه شود. متداول ترین این روش ها چینش توربین های بادی به گونه ای است که انرژی استحصال شده کل مزرعه را با کاهش اثرات و تداخلات آیرودینامیکی بین توربین ها بیشینه کرد [26].

با توجه به چالش حرکت به سمت فراساحل، توسعه دهندگان با چالش بیشینه کردن استحصال انرژی با پایین ترین هزینه احداث و بهره برداری در طول عمر مفید مزرعه بادی در یک بازه اقتصادی، ایمن و با توجه به مسائل زیست محیطی رو به رو می باشد. این موضوع یک چالش مهندسی چند متغیره را شکل می دهد که شامل ارائه بهترین راه حل جهت موارد زیر می باشد:

- انتخاب توربین: انتخاب توربین بر روی هزینه احداث و نیز انرژی تولیدی تأثیر مستقیم دارد. توربین همچنین مهم ترین عامل جزئی در فراهم بودن و قابلیت اطمینان مزرعه بادی می باشد. به همین علت، مدلسازی دقیق توربین در نتیجه مسأله نقش مهمی دارد.
- انتخاب زیرسازه: این پارامتر هم به عنوان یک فاکتور غیرعامل اما حائز اهمیت در CAPEX مطرح می باشد. مشخصات آن به اندازه و وزن توربین، خصوصیات خاک و عمق آب در محل نصب بستگی دارد [26].
- زیرساخت های الکتریکی: زیرساخت های الکتریکی شامل کابل های داخلی، کابل انتقال و پست فراساحل می باشد. طراحی صحیح این پارامتر باعث می شود که دسترسی و استفاده از آن با کمترین هزینه ممکن امکان پذیر باشد. اتلاف انرژی در کابل های داخلی و انتقال می تواند تا ۳ الی ۵ درصد انرژی تولیدی باشد [26].
- چینش توربین ها: یکی از فاکتور های مؤثر در میزان انرژی تولیدی توسط توربین ها، اثر wake می باشد. بنابراین جانمایی درست باید به صورت مهندسی و دقیق

انجـام گیـرد. ایـن پـارامتر همچنـین تـأثیر مسـتقیم بـر زیرسـازه و زیرسـاخت هـای الکتریکی دارد.

- هزینـه راه انـدازی و نگهـداری: یکـی از پـارامتر هـای بحرانـی در مـزارع بـادی فراسـاحل می باشد کـه متـداولاً سـهم ۲۰ درصـدی از CoE را شـامل مـی شـود. هزینـه راه انـدازی و نگهداری با ابعـاد، دسترسـی و اسـتفاده مزرعـه بـادی رابطـه مسـتقیم دارد. مزرعـه بـادی و توربین ها باید بـه صـورت دقیـق مدلسـازی شـوند تـا بـا پـیش بینـی مقـدار خرابـی، رونـد راه انـدازی و نگهـداری مناسـب تعریـف شـده و هزینـه هـای ایـن پـارامتر و کـلاً مزرعـه بادی کاهش یابد.

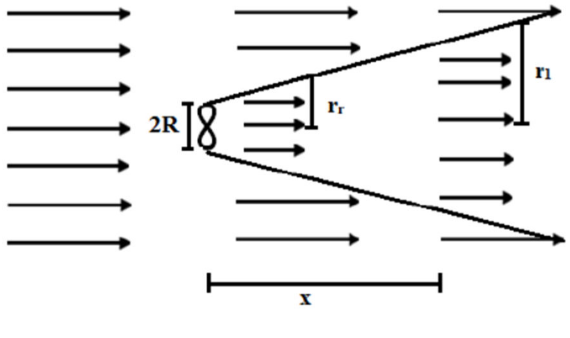
۵-۱-۵ اثر WAKE

به طور خلاصه می توان اثر wake را در توربین های بادی به صورت زیر تعریف نمود:

افت انرژی باد به هنگـام عبـور از سـطح پوشـش داده شـده توسـط پـره هـای تـوربین بـادی کـه در غالب افت سرعت باد در پایین دست خود را نشان می دهد.

یکی از مهـم تـرین مـوارد تـأثیر گـذار در بهینـه سـازی چیـنش و آرایـش مـزارع بـادی در سـال های اخیر، اثر wake مـی باشـد [26]. ایـن پـارامتر، بـر روی میـزان انـرژی تولیـدی تـوربین هـا اثـر مسـتقیم دارد و لـذا تـأثیر خـود را در مقـدار AEP نشـان مـی دهـد و مـی تـوان بـا افـزایش آن (بهینه سازی چینش و آرایش مزارع بادی)، CoE را کاهش داد.

بـرای محاسـبه اثـرات wake یـک مـدل بسـته تحلیلـی بـرای اولـین بـار توسـط Jensen ارائـه شد. در ارائه ایـن مـدل از مـومنتم اثـر wake و فـرض اینکـه جهـت جریـان بـه صـورت خطـی مـی باشد استفاده شده است [25] و در شکل ۵-۳ نمایش داده شده است:



شکل ۵-۳ محدوده اثر *wake* و پارامتر های فرمولی آن

در قسمت های بعد دو روش برای محاسبه سرعت باد پایین دست تحت اثر wake توضیح داده خواهد شد.

۵-۱-۶ نرم افزار های تجاری برای بهینه سازی چینش و آرایش

نرم افزار های متعدد تجاری برای بهینه سازی مزارع بادی از جمله OpenWind توسط True Power ،AWS WindFarmer توسط Garrad Hassan ،GL WindFarm توسط ReSoft، و WindPro توسط EMD در دسترس می باشد [26].

در این تحقیق به علت محدودیت های موجود (دسترسی به نسخه اصلی، حجم پایان نامه و...) از استفاده از نرم افزار ها خودداری شده و صرفاً قابلیت های کلی آن ها به صورت جدول خلاصه ۵-۲ در زیر آمده است:

جدول ۵-۲ قابلیت های نرم افزار های مخصوص بهینه سازی مزارع بادی فراساحل [26]

	OpenWind	WindFarmer	WindFarm	WindPro
محاسبات بازده انرژی	✓	✓	✓	✓
مدل های پیشرفته اثر wake	✓	✓	✓	✓
محاسبات هزینه		✓		✓
محدودیت های سایت	✓	✓		✓
بهینه سازی				
چینش و آرایش بر اساس CoE	✓		✓	
چینش و آرایش بر اساس AEP		✓	✓	✓
سر و صدای سیستم الکتریکی	✓	✓	✓	✓

با بررسی قابلیت های نرم افزار های تجاری، این نتیجه حاصل شد که فقط تعداد اندکی از آن ها با کاهش اثر wake، بهینه سازی مزرعه بادی را انجام می دهند و از سایر فاکتور ها مانند سیستم الکتریکی صرف نظر می شود. در عوض نرم افزار های تجاری بیشتر بر روی تحلیل و ارائه بازده مزرعه بادی بر اساس سیستم طراحی شده و مشخصات آن متمرکز می باشد.

۵-۲ روش اول: روش ساده شده بدون اثر مشخصات توربین بادی

این روش توسط Kwong و همکاران، مبنای محاسبات اثر wake قرار گرفته است. برای تعیین سرعت باد مؤثر در محل یک توربین که تحت اثر wake یک توربین بالادست قرار دارد، معادله مومنتم به شکل زیر (۵-۴) نوشته می شود:

$$\pi r_r^2 u_r + \pi(r_1^2 - r_r^2)u_0 = \pi r_1^2 u \qquad (۵-۴)$$

در معادله بالا:

- r_r : شعاع (سطح پوشش داده شده توسط) توربین
- r_1 : شعاع wake اثر wake در فاصله x پایین دست
- u_0 : سرعت باد بالادست (بدون اثر wake)
- u_r : سرعت باد بلافاصله بعد از توربین در جهت باد
- u : سرعت باد در هر فاصله x پایین دست

بر اساس تئوری بتز Betz's، سرعت باد بلافاصله بعد از توربین، تقریباً ثلث سرعت باد بالادست می باشد و با فرض اثر خطی برای wake، سرعت باد در پایین دست به صورت رابطه ۵-۵ محاسبه می شود [25]:

$$u = u_0\left(1 - \frac{2}{3}\left(\frac{r_r}{r_1}\right)^2\right) \qquad (۵-۵)$$

که در آن r_r از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$r_1 = r_r + ax \qquad (۵-۶)$$

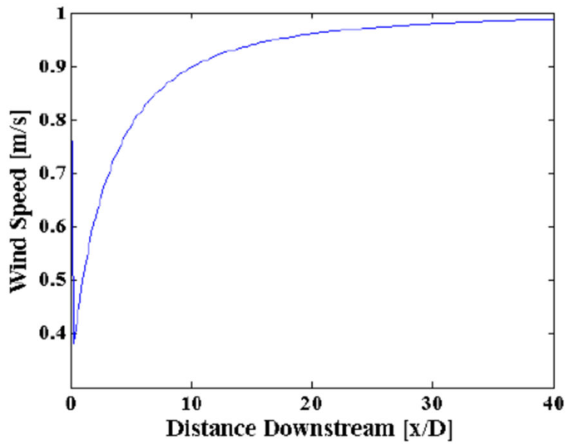
در رابطه ۵-۶، a ثابت محیط است که از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$a = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \qquad (۵-۷)$$

در رابطه بالا:

- z : ارتفاع هاب (متر)
- z_0 : زبری سطح محیط (متر)

در شکل زیر تغییرات سرعت باد به صورت تابعی از فاصله از مرکز اثر wake نشان داده شده است.



شکل ۵-۴ سرعت باد به صورت تابعی از فاصله از مرکز، با اثر یک *wake* و نرمالیزه شده بر اساس قطر توربین

برای توربین های تحت اثر چند wake، سرعت مؤثر باد می تواند مجموع افت های توربین های بالادست تلقی شود. اگرچه روش بالا که بر پایه فرض اینکه افت ها می تواند جمع جبری شود، ساده شده معادله دینامیک سیالات برای ترکیب wake ها می باشد، در کار های انجام شده، مخصوصاً موارد بهینه سازی به صورت فراگیر استفاده شده است و همچنان در نرم افزار های طراحی مزرعه بادی به کار می رود. سرعت باد مؤثر توربینی که تحت اثر چند wake قرار دارد از فرمول ۵-۸ محاسبه می شود:

$$u = u_0\left[1 - \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(1 - \frac{u_i}{u_0}\right)^2}\right] \qquad (۵-۸)$$

روشی که تا اینجا به آن اشاره شد روش ساده شده ای برای تخمین سرعت باد پایین دست و در آن اثر تمامی پارامتر ها، بالاخص مشخصات عامل ایجاد اثر wake (توربین بالادست) در نظر گرفته نشده است. در پیوست نتایج این روش با آنچه که در این پایان نامه به عنوان روش اصلی استفاده شده است مقایسه شده است.

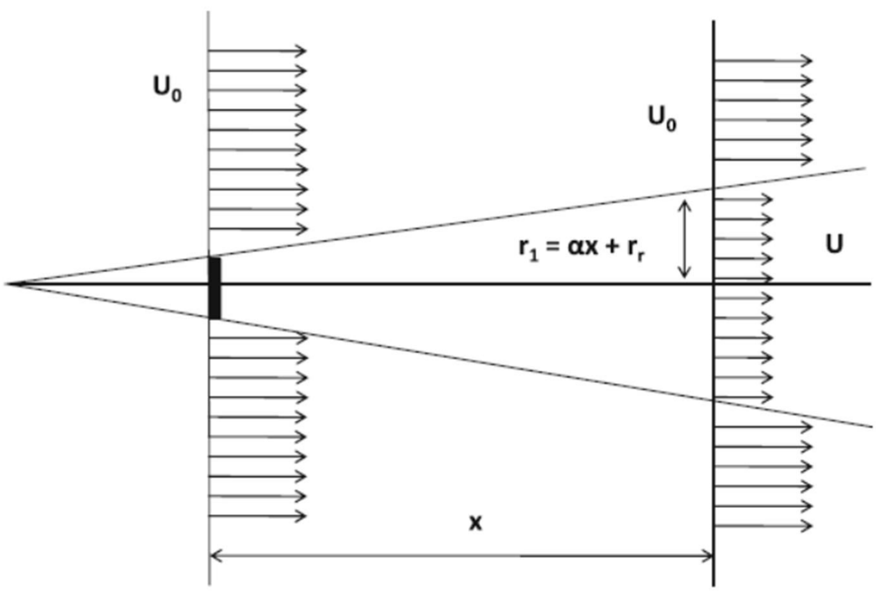
۵-۳ روش دوم: روش با در نظر گرفتن مشخصات توربین بادی

در ایـن قسـمت از روش Jensen بـرای محاسـبات اسـتفاده شـده اسـت کـه یـک روش دقیـق بـرای محاسـبه اثـرات wake مـی باشـد و مبنـای محاسـبات فـرم چیـنش و آرایـش بهینـه در ایـن پایان نامه قرار گرفته است.

بـرای ارائـه فـرم چیـنش و آرایـش بهینـه از تـوربین Vestas 136 (یکـی از تـوربین هـای پیشنهادی در فصل ۳) استفاده شد که مشخصات کلی آن در زیر آمده است:

- بیشترین توان تولیدی (Rated Power): ۳,۴۵ مگاوات
- سرعت باد شروع به کار (Cut-in wind speed): ۳ متر بر ثانیه
- سرعت باد خروج از مدار (Cut-out wind speed): ۲۲,۵ متر بر ثانیه
- کلاس باد: IEC III
- قطر سطح پوشش داده شده توسط پره ها: ۱۳۶ متر
- ارتفاع نصب: ۸۲ متر، ۱۱۲ متر و ۱۳۲ متر (که ۱۱۲ متر برای محاسبات انتخاب شد)
- ضریب تراست (Thrust Coefficient): ۰,۸

در شکل ۵-۵ کلیت این روش و روند محاسبات به همراه فرمول های مورد استفاده، آمده است:



شکل ۵-۵ محدوده اثر *wake* و پارامتر های فرمولی آن

- α : ضریبی که بیانگر میزان پخش اثر wake بر اساس فاصله می باشد و از فرمول ۵-۹ محاسبه می شود:

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \qquad (۵-۹)$$

- a : ضریب القا که از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$a = 0.5\left(1-\sqrt{1-C_T}\right) \qquad (۵-۱۰)$$

- r_d : شعاع روتور پایین دست که از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$r_d = r_r\sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \qquad (۵-۱۱)$$

- vd_{ij} : افت ایجاد شده در نقطه j تحت اثر wake ناشی از i

$$vd_{ij} = \frac{2a}{1+\alpha\left(\frac{x_{ij}}{r_d}\right)^2} \qquad (۵-۱۲)$$

- u_j : سرعت باد در نقطه j تحت اثر wake ناشی از i که از فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$u_j = u_0\left(1-vd_{ij}\right) \qquad (۵-۱۳)$$

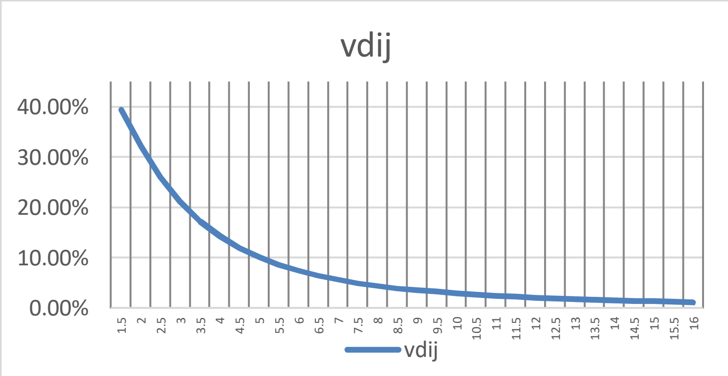
- v_{def} : اثر wake ناشی از چند عامل (توربین) که از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$v_{def} = \sqrt{\sum_{i\in W(j)} {vd^2}_{ij}} \qquad (۵-۱۴)$$

با استفاده از فرمول های فوق و مبنا قرار دادن توربین Vestas V136، افت ایجاد شده ناشی از اثر wake در فواصل ۱ الی ۱۶ برابر قطر سطح پوشش داده شده توسط پره های توربین محاسبه شد و نتیجه برای بازه ۴ الی ۶ برابر قطر سطح پوشش داده شده توسط پره های توربین به صورت جدول ۵-۳ و نمودار موجود در آن به نمایش در آمده است.

جدول ۵-۳مقادیر محاسبه شده مربوط به اثر *wake*

distance multiplier based on rotor diameter	xij (m)	Vdij
4	544	14.3%
4.5	612	12.0%
5	680	10.1%
5.5	748	8.6%
6	816	7.5%



همانطور که در جدول ۵-۳ مشاهده می شود، با دور شدن از عامل ایجاد اثر wake، افت ناشی از آن نیز کاهش می یابد، اما در کنار این موضوع، افزایش فاصله توربین ها هزینه CoE را مخصوصاً در قسمت سیستم انتقال نیروی تولیدی (افزایش طول کابل ها) و تعمیر و نگهداری افزایش می دهد، لذا جهت رسیدن به چینش و آرایش بهینه، باید تمام هزینه های دخیل در CoE را در کنار هم و به صورت یک مجموعه بهینه نمود. در این پایان نامه به علت زمان بر و گسترده بودن بهینه سازی همه جانبه، از آن پرهیز و فقط به اثر wake پرداخته می شود.

۵-۴ تعیین فواصل بهینه

۵-۴-۱ تعیین فاصله بین ردیف ها

با توجه به نمودار جدول ۵- ۳، در فاصله ۵,۵ برابر قطر سطح پوشش داده شده توسط پره های توربین، افت سرعت به کمتر از ۱۰٪ می رسد که به عنوان مبنای فرضی برای محاسبه فاصله ردیف های مزرعه بادی مورد بررسی اثر ناشی از چند توربین قرار گرفت (مقدار ۵,۵ برابر قطر سطح پوشش داده شده برای قرارگیری توربین پایین دست، نزدیک فاصله نقاط ممکن قرارگیری توربین در تحقیق کوونگ می باشد) و نتیجه این بررسی به صورت جدول ۵-۴ آمده است:

جدول ۵-۴ مقادیر محاسبه شده مربوط به اثر *wake* ناشی از ۶ توربین بالادست بر اساس فاصله ۵/۵ برابر قطر روتور

Turbine	z	z0	alpha	Ct	a	rr	rd	xij	vdij	vdef
Vestas V136	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	748	8.64%	**9.0%**
	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	1496	2.45%	
	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	2992	0.63%	
	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	5984	0.16%	
	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	11968	0.04%	

با بررسی دقیق تر اعداد بین ۵ الی ۵/۵ برابر قطر روتور، و با فرض ثابت بودن فاصله تمام ردیف ها، کمترین فاصله که میزان افت را به زیر ۱۰٪ می رساند، ۵/۲ برابر قطر روتور بدست آمد.

جدول ۵-۵ مقادیر محاسبه شده مربوط به اثر *wake* ناشی از ۵ توربین بالادست بر اساس فاصله ۵/۲ برابر قطر روتور

Turbine	Turbine number	z	z0	alpha	Ct	a	rr	rd	xij	Vdij	vdef
Vestas V136	1	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	707.2	9.49%	**9.8983%**
	2	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	1414.4	2.72%	
	3	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	2828.8	0.71%	
	4	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	5657.6	0.18%	
	5	112	0.11	0.072	0.8	0.277	68	86.5	11315.2	0.05%	

در تحقیق کوونگ نیز همچنین در این قسمت مشخص شد که تأثیر اصلی توربین های بالادست بر روی مقدار افت ناشی از wake، تا ۲ ردیف توربین بالادست محسوس می باشد و توربین های جلوتر نقش بسیار کمی در کاهش سرعت باد دارند.

۵-۴-۲ تعیین فاصله بین ستون ها

برای تعیین فاصله بین ستون ها، با استفاده از مقدار α و فرمول ، هدف عدم ایجاد همپوشانی اثر wake دو توربین در یک ردیف بر توربین ردیف پشت قرار گرفت. علت این موضوع این بود که در صورت ایجاد همپوشانی در یک ردیف بعد، میزان افت به بالاتر از ۱۰٪ می رسید. ضمناً به جهت بیشینه نمودن انرژی تولیدی، چینش به گونه ای انجام گرفت که در هنگام وزش باد در جهت باد غالب، توربین های یک ردیف تحت تأثیر wake دو ردیف جلوتر باشد. این بدان معناست که در این حالت، افت سرعت برای هر توربین، کمتر از ۳٪ می باشد (و در حالت هایی که باد در جهت غالب نمی وزد، حداکثر ۱۰٪ افت را تجربه خواهد کرد). با رعایت محدودیت های فوق، فاصله بین ستون های پلان چینش، ۳ برابر قطر روتور تعیین شد که با نتایج تحقیق کوونگ [25] در زمینه حداکثر انرژی تولیدی و تحقیق ساموراني [24] مطابقت دارد.

۵-۴-۳ شکل کلی پلان پیشنهادی چینش

در دو قسمت قبل، فواصل توربین ها به طور خلاصه به صورت زیر تعیین شد:

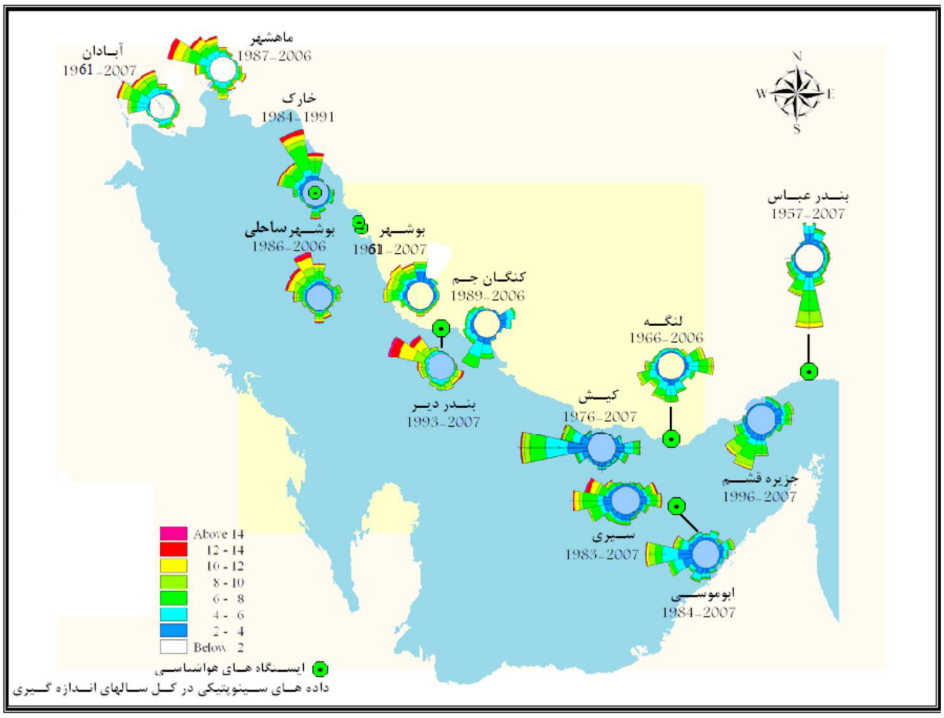
فاصله بین ردیف ها ۵/۲ برابر قطر روتور، به گونه ای که:

- افت سرعت ناشی از اثر wake حتی در صورتی که این اثر ناشی از چند عامل (توربین) در یک راستا اتفاق بیافتد هم کمتر از ۱۰٪ باشد.

فاصله بین ستون ها ۳ برابر قطر روتور، به گونه ای که:

- هر توربین تحت اثر wake فقط یک عامل (توربین) در ردیف جلوی خود قرار گیرد.
- در صورت وزش باد در جهت غالب، توربین ها تحت اثر wake ناشی از عوامل دو ردیف جلوتر از خود قرار گیرند که نتیجه آن افت سرعت کمتر از ۳٪ می باشد.

جهت باد قالب در منطقه بندر دیر بر اساس شکل ۵-۶ در نظر گرفته شد.

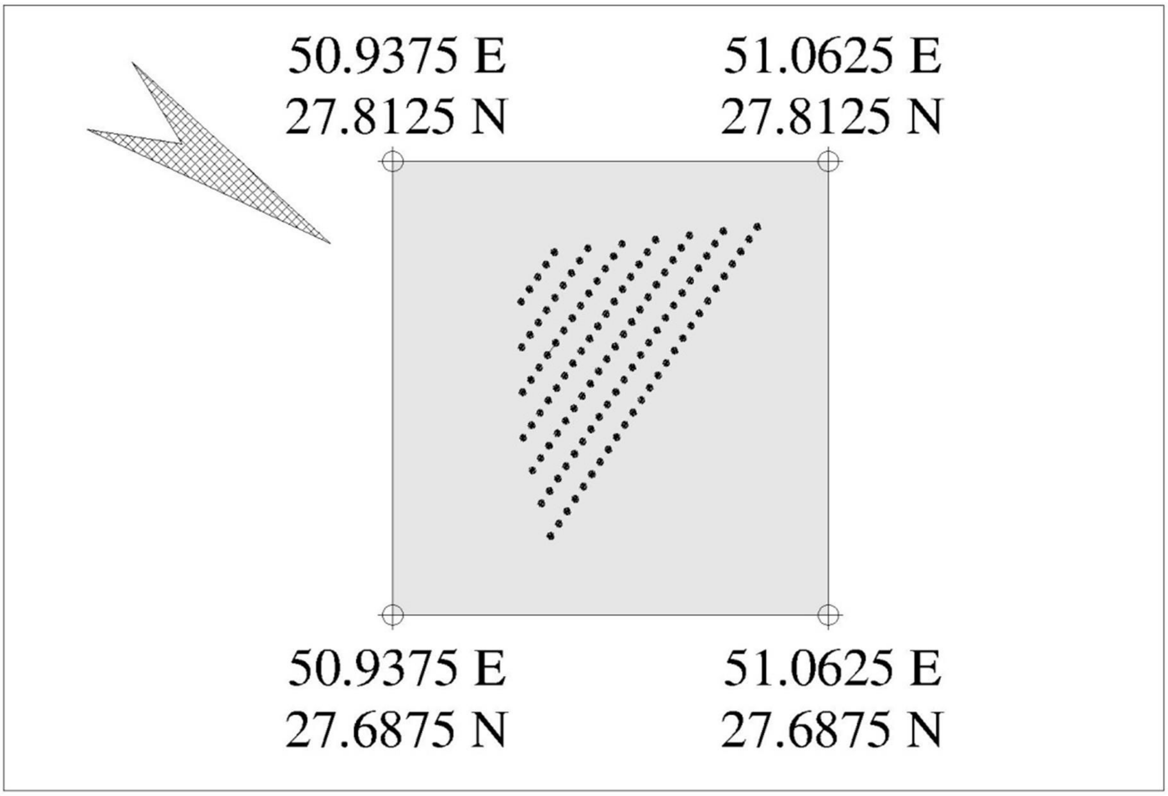


شکل ۵-۶ گلباد های سالانه قسمت شمالی خلیج فارس[36]

البته باید توجه داشت که مدل ارائه شده، یک مدل ساده بوده که فقط تحت اثر wake و برای یک جهت باد ارائه شده است. برای ارائه یک مدل جامع و پیچیده باید پارامتر هایی از قبیل درصد وقوع باد در جهت های مختلف، محل قرارگیری پست برق فراساحل و طول کابل های مورد نیاز نیز در تعریف مسئله دخیل باشد.

۵-۵ جمع بندی و نتیجه گیری

در ایـن فصـل بـا مـرور کلیـات مربـوط بـه هزینـه هـای مـزارع بـادی و بررسـی اثـرات عوامـل محیطـی بـر روی چیـنش تـوربین هـا در مـزارع بـادی، اثـر wake بـه عنـوان مهـم تـرین عامـل در بین عوامل دخیل در انـرژی تولیـدی توسـط تـوربین هـا و کـلاً مزرعـه معرفـی و سـپس بـر اسـاس آن یک مدل ساده از چینش یک مزرعـه بـادی ارائـه شـد. در مـدل ارائـه شـده، بـا توجـه بـه جهـت وزش باد غالب ، فاصـله هـر تـوربین بـا تـوربین کناردسـت خـود ۵/۲ برابـر قطـر روتـور و بـا تـوربین پایین دست خود ۳ برابـر قطـر روتـور محاسـبه شـد. عـلاوه بـر آن بـا محاسـبات صـورت گرفتـه بـر اسـاس فواصـل بـالا، مشـخص شـد کـه در محـدوده معرفـی شـده (شـکل ۳-۱۴)، امکـان نصـب حـدوداً ۵۰۰ دسـتگاه تـوربین V136 وجـود دارد کـه ایـن عـدد تـوان خروجـی حـدود ۱۷۰۰ مگاوات را نتیجه می دهد. ایـن تـوان خروجـی در مقایسـه بـا مـزارع بـادی سـاخته شـده و در حـال کـار فعلـی (متـداولاً حـدود ۳۰۰ مگـاوات بـرای مـزارع بـادی بـزرگ) کمـی بلنـد پروازانـه و دور از انتظار مـی باشـد، لـذا بایـد بـا در نظـر داشـتن میـزان سـرمایه ممکـن و نیـز هزینـه هـای سیسـتم های انتقـال بـرق تولیـدی، در فـاز طراحـی یـک مزرعـه کـاربردی، بخـش اعظمـی از ۵۰۰ دسـتگاه تـوربین کـاهش داده شـود. بـرای مثـال یـک گزینـه ممکـن چیـنش مزرعـه بـادی در شـکل ۵-۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۷ پلان پیشنهادی بهینه به دست آمده از محاسبات

در شکل ۵-۷ نقاط سیاه رنگ محل قرارگیری توربین ها می باشد. فواصل بین توربین ها همانگونه که در محاسبات قسمت ۵-۴-۱ و ۵-۴-۲ نتیجه گیری شد به شرح زیر در نظر گرفته شد:

- فواصل بین مرکز دو توربین کنار هم (عمود بر راستای باد غالب) ۳ برابر قطر روتور یعنی ۴۱۰ متر.
- فواصل بین مرکز دو توربین بالادست و پایین دست (راستای باد غالب) ۵,۲ برابر قطر روتور یعنی ۷۱۰ متر.

ابعاد محدوده خاکستری در راستای طول جغرافیایی حدود ۱۲ کیلومتر و در راستای عرضی جغرافیایی حدود ۱۲,۵ کیلومتر می باشد (این محدوده با مختصاتی که در شکل ۵-۷ آمده است، همان محدوده معرفی شده در شکل ۳-۱۴ می باشد). جهت باد غالب نیز با توجه به شکل ۵-۶ در نظر گرفته شده است.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶) نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ جمع بندی نتایج

در این تحقیق ابتدا با بررسی تحقیقات داخلی و خارجی صورت گرفته در زمینه مزارع بادی فراساحل، مشخص شد که هیچ گونه تحقیق داخلی منسجم و فراگیر در این زمینه انجام نشده است، لذا تصمیم بر آن شد که با مد نظر قراردادن تحقیقات خارجی و با رویکرد واردات علم، تمام جوانب امکان سنجی احداث مزارع بادی فراساحل در آب های جنوبی ایران تا حد ممکن مورد تحقیق قرار گیرد، بنا بر این سه زمینه اصلی امکان سنجی احداث و معرفی محدوده مناسب، معرفی و بهینه یابی در زمینه زیرسازه های موجود در صنعت باد فراساحل، و نهایتاً بررسی فاکتور های موثر در چینش و ارائه یک نمونه آرایش بهینه در منطقه مستعد، برای تمرکز این تحقیق انتخاب شد. همچنین مراجع مورد استفاده در این پایان نامه تماماً مراجع خارجی به جز در فصل مرور ادبیات فنی (به علت رویکرد واردات علم) انتخاب شد.

در پایه ای ترین مرحله تحقیق با در نظر داشتن محدوده مورد مطالعه (خلیج فارس و دریای عمان) و نیز بررسی نحوه دسترسی و دریافت داده های سرعت باد (از وب سایت ECMWF) شبکه بندی ریز ۰,۱۲۵ در ۰,۱۲۵ درجه جغرافیایی به عنوان میزان دقت تحقیق مشخص شد و بر اساس آن محدوده مورد مطالعه تقسیم بندی شد. در این تقسیم بندی شبکه بندی درشت دارای ابعاد ۱ در ۱ درجه جغرافیایی بود.

در مرحله بعدی با تمرکز بر یافتن محدوده مناسب احداث مزرعه بادی فراساحل، یک کد متلب برای استخراج داده های سرعت باد نوشته شد که بر اساس شبکه بندی انجام شده در قسمت قبلی، به وسیله آن داده های مذکور استخراج و در فایل های مجزا طبقه بندی و ذخیره می شد. همچنین با استفاده از رابطه توان پروفیل باد، داده های به سرعت در ارتفاع مورد نظر تبدیل می شد. نتیجه این قسمت از تحقیق، معرفی یک منطقه با ابعاد ۰,۱۲۵ در ۰,۱۲۵ درجه با مرکز ۵۱ درجه شرقی و ۲۷,۷۵ درجه شمالی با عمق حدودی ۵۰ متر به عنوان مستعد ترین منطقه جهت احداث مزرعه بادی حاصل شد. در این قسمت از تحقیق به علت محدودیت های زمانی از بررسی جزئی سرعت باد و محاسبه میزان توان تولیدی حدودی هر توربین با توجه به شرایط منطقه صرفنظر شد.

در ادامه با بررسی انواع سیستم های زیرسازه موجود و مورد استفاده در صنعت باد فراساحل و در نظر داشتن اعماق قابل استفاده و نیز موارد مربوط به ساخت و نصب، به وسیله یک سیستم امتیاز دهی ساده، بهینه یابی انجام شد و به عنوان نتیجه، زیرسازه جکت برای شرایط منطقه معرفی شده در قسمت قبلی به عنوان سازگارترین گزینه پیشنهاد شد. در این قسمت به علت زمانبر بودن، از طراحی و مقایسه اقتصادی-عملکردی چند نمونه زیرسازه محتمل، خودداری شد.

در نهایت با تحقیق در زمینه فاکتور های موثر بر چینش مزارع بادی فراساحل، با در نظر گرفتن اثر wake، دو روش برای انجام محاسبات مربوط به فواصل توربین انتخاب شد. در نتیجه این قسمت مشخص شد که روش با در نظر گرفتن اثر توربین بالادست، روش کاملتری بوده و مبنای محاسباتی قرار گرفت که بر اساس آن فواصل ۳ برابر قطر روتور در راستای عمود بر باد غالب و ۵٫۲ برابر قطر روتور در راستای باد غالب (این نوع چینش افت سرعت باد حدود ۱۰٪ را در شرایط وزش باد در جهت غالب نتیجه می دهد) ارائه شد. در این قسمت از تحقیق، به علت گستردگی و حوزه متفاوت بهینه سازی چینش و آرایش پیشنهادی، از پرداختن به آن خودداری شد.

۶-۲ پیشنهاد کار های آینده

در این پایان نامه علیرغم تلاش برای هر چه وسیع تر نمودن مرز تحقیق، به علت گستردگی شاخه های موضوع، امکان پرداختن به تمامی پیزمینه ها به صورت عمیق وجود نداشت، لذا در ادامه پیشنهادات کار های محتمل بعدی و نیز توضیح مختصر در هر زمینه، با توجه به آنچه در تحقیق حاضر حاصل شد آمده است.

در حوزه معرفی منطقه مستعد می توان گفت نظر به اینکه به علت هزینه های زیاد و غیر قابل بازگشت احداث مزارع بادی، داده های مورد استفاده برای مشخص نمودن منطقه نهایی احداث مزرعه بادی باید از دقت بسیار بالایی برخوردار باشند، لذا به نظر می رسد نباید به داده های ماهواره ای اکتفا کرد و لازم است پس از مرحله مطالعه اطلاعات حاصل از اندازه گیری های ماهواره ای، وسایل اندازه گیری میدانی در گسترده ترین بازه زمانی ممکن با کوتاه ترین فواصل اندازه گیری در چارچوب پروژه تعریف شده در مناطق مستعد مستقر شده و اطلاعات بدست آمده از آن ها از چند جنبه مهم (تخمین توان تولیدی توربین بادی با استفاده از نمودار توان توربین، تهیه گلباد منطقه و ...) مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و

با استفاده از این بررسی ها منطقه دقیق معرفی گردد. ضمناً در زمینه انتخاب توربین نیز باید طیف گسترده ای از شرایط موجود از جمله محدودیت های سیاسی و اقتصادی مد نظر قرار گیرد.

در حوزه پیشنهاد زیرسازه بهینه، از آنجاییکه تأثیر شدیدی بر روی هزینه های احداث و تعمیر و نگهداری دارد، پیشنهاد می گردد که گزینه های محتمل مورد طراحی گیرند تا محدودیت های عملکردی و نیز فاکتور های اقتصادی مربوط به هر گزینه کاملاً مشخص گردد و مقایسه بین گزینه های از بالاترین دقت ممکن برخوردار باشد. همچنین پس از مشخص شدن سیستم زیرسازه، لازم است که بهینه سازی اقتصادی بر روی آن انجام شود تا نهایتاً خروجی تحقیق کاملاً قابل استفاده در یک پروژه باشد.

در زمینه چینش و آرایش با توجه به گستردگی پارامتر های دخیل در آن از جمله میزان توان خروجی، هزینه احداث و نگهداری، هزینه زیرساخت ها و سایر پارامتر ها، باید با یک روش بهینه سازی که حداکثر پارامتر ها را با هم در نظر بگیرد، الگوی بهینه چیدمان توربین ها مشخص شود.

موارد بالا تنها گوشه ای از زمینه های کلی تحقیق های کاربردی در چارچوب صنعت باد فراساحل بوده و با در نظر داشتن محدودیت های زمانی، اقتصادی و امکانات موجود می توان موضوعات بسیاری را در این زمینه برای تحقیق برگزید.

مراجع

[1] Pandit A., (2014), Master thesis, “Efficient Support Structure Design for Variation of Environmental Parametes whithin an Offshore Windfarm”, Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology.

[2] Furunes E. W., (2010), Master thesis, “Floating Wind Turbines at Medium Water Depths”, Faculty of Engineering Science and Technology, NTNU University.

[3] http://energy.gov, US. Department Of Energy & http://www.worldcoal.org/, World Coal Association.

[4] Tempel V. D., (2006), PhD. thesis, “Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines”, Faculty of Applied Sciences, Dleft University of Technology.

[5] Bagbanci H., (2011), Master thesis, “Dynamic Analysis of Offshore Floating Wind Turbines”, Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica de Lisboa.

[6] DTI, (2001), “Efficiency and Performance”, Crown, UK.

[7] Fried L. et al., (2012), “Global Wind Report”, Global Wind Energy Council, Brussels.

[8] Zervos A. et al., (2009), “Pure Power – Wind Energy Targets for 2020 and 2030”, EWEA.

[9] http://www.centurionenergy.net

[10] Musial W. & Butterfield s., (2006), “Energy from Offshore Wind”, Offshore Technology Conference, Texas.

[11] http://www.4coffshore.com/windfarms/sheringham-shoal-united-kingdom-uk27.html

[12] Bakmar, C. L., (2009), PhD. thesis, “Design of Offshore Wind Turbine Support Structures: Selected Topics in the Field of Geotechnical Engineering”, Department of Civil Engineering, Aalborg University.

[13] Malhorta S., (2011), “Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations”, Wind Turbines, ISBN: 978-953-307-221-0, pp 231.

[14] Marimuthu C. & Kirubakaran V., (2014), “A Critical Review of Factors Affecting Wind Turbine and Solar Cell System Power Production”, Int. J. Adv. Engg. Res. Studies, 3, 2, pp 143.

[15] BVG Associates, (2009), “A Guide to an Offshore Wind Farm”, The Crown Estate.

[16] Corbetta et al., (2015), “The Eropean Offshore Wind Industry – key trends and statistics 2014 “, EWEA,.

[17] O’Reilly C. M., (2013), Master thesis, “Offshore Wind Farm Siting Procedures Applied Offshore of Block Island, Rhode Island”, University of Rhode Island.

[18] Zaaijer, M. B., “Comparison of Monopile, Tripod, Suction Bucket and Gravity Base Design for a 6 MW Turbine”, Dutch Ministry of Economic Affairs.

[19] Chew K. H., (2014), “Offshore Wind Turbine Jacket Substructure: A Comparison Study between Four-Legged and Three-Legged Design”, Journal of Ocean and Wind Energy, 2, 1, pp 74.

[20] Li P., (2010), Master thesis, “Analysis and Design of Offshore Jacket Wind Turbine”, Department of Marine Technology, NTNU.

[21] Gerven F. V., (2011), Master thesis, “Optimising the Design of a Steel Substructure for Offshore Wind Turbines in Deeper Waters”, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

[22] Minambres O. Y., (2012), Master thesis, “Assessment of Current Offshore Wind Support Structures Concepts – Challenges and Technological Requirements by 2020”, Karlshochschule International University.

[23] Kusiak A. & Song Z., (2010), “Design of a Wind Farm Layout for Maximum Wind Energy Capture”, Renewable Energy, 35, pp 685-694.

[24] Samorani M., (2013), “The Wind Farm Layout Optimization Problem”, pp 21-38, Handbool of Wind Power Systems, 9, Pardalos P. M. et al., Springer, Berlin.

[25] Kwong W. Y., (2012), “Wind Farm Layout Optimization Considering Energy Generation and Noise Propagation”, ASME, pp 1-10, Chicago.

[26] Velverde P. S., (2014), “Offshore Wind Farm Layout Optimization – State of the Art”, Journal of Ocean and Wind Energy, 1, 1, pp. 23-29.

[27] http://www.iec.ch, International Electrotechnical Commision

[28] Badran O. et al., (1992), “Evaluation of Parameters Affecting Wind Turbine Power Generation”, Researchgate

[29] http://www.ecmwf.int/, European Center for Medium-Range Weather Forecasts

[30] https://en.wikipedia.org/wiki/NetCDF

[31] HSU S. A. et al., (1993), “Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent Under Near-Neutral Stability Conditions at Sea”, Journal of Applied Meteorology, 33, pp 757-765

[32] خلیلی سامانی، م، ۱۳۹۲، ملاحظات احداث مزارع بادی فراساحلی در خلیج فارس، همایش ملی انرژی های نو و پاک، ص ۱، همدان.

[33] خلیلی سامانی، م، ۱۳۹۰، امکان یابی استحصال انرژی از باد های فراساحلی در خلیج فارس، همایش صنایع دریایی، ص ۱، جزیره کیش.

[34] رضایی منفرد، ح ا، ۱۳۹۳، بررسی بخش های کم عمق شمالی و جنوبی خلیج فارس برای نصب توربین های بادی فراساحلی با توجه به شرایط محیطی، همایش منطقه ای دریا، توسعه و منابع آب مناطق ساحلی خلیج فارس، هرمزگان.

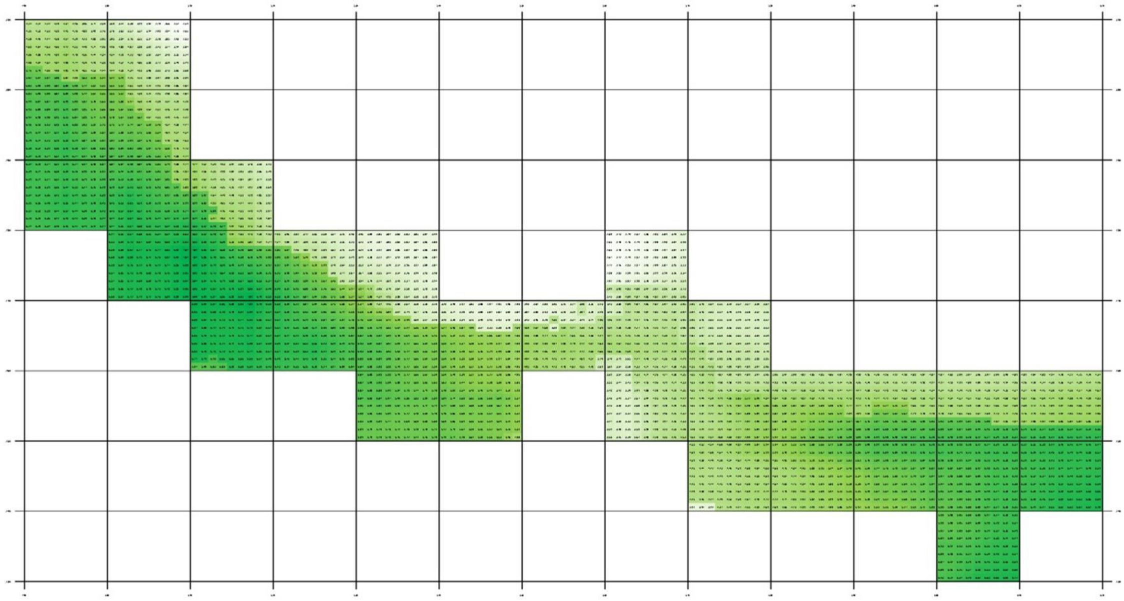
[35] رضایی منفرد، ح ا، ۱۳۹۳، بررسی امکان استفاده از پایه های مختلف توربین های بادی فراساحلی با توجه به شرایط محیطی و عمق آب در خلیج فارس، همایش ملی توسعه پایدار دریا محور، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.

[36]کمیجانی، ف، ۱۳۹۳، تحلیل رژیم باد خلیج فارس با استفاده از داده های ایستگاه های هواشناسی همدیدی، مجله علمی ترویجی نیوار.

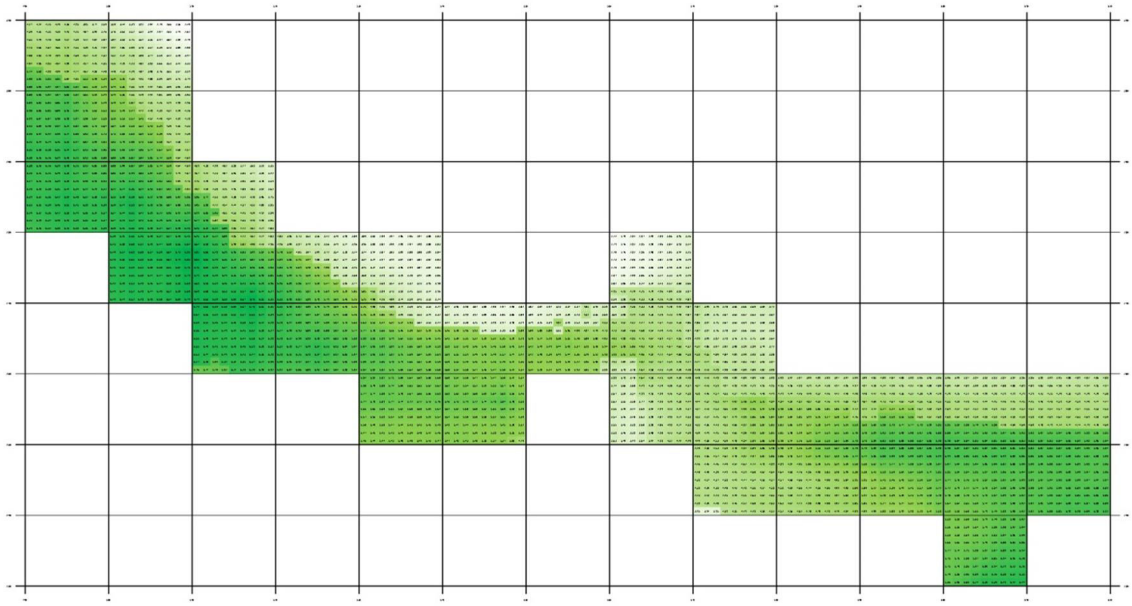
پیوست ها

پیوست ها

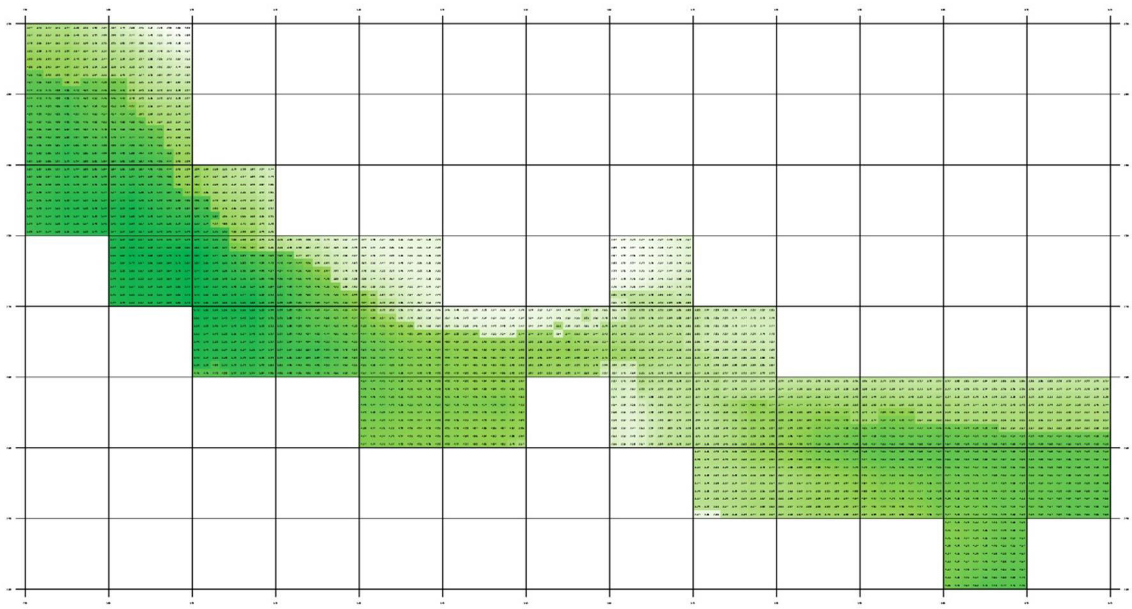
پیوست ۱: نمایش گرافیکی سرعت باد میانگین (نمایش نوع ۱)



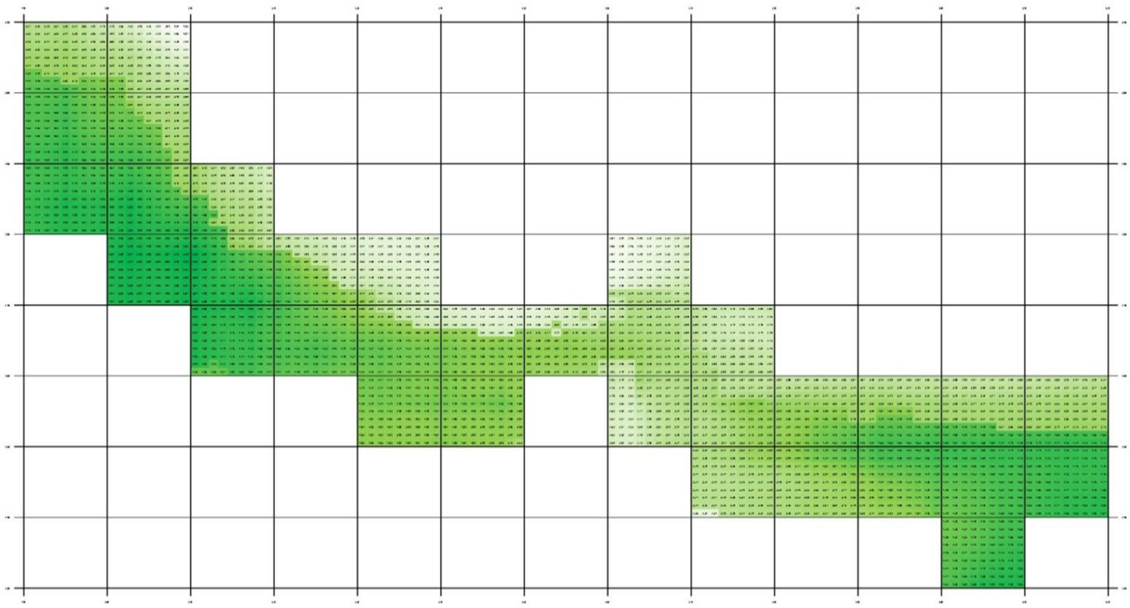
شکل ۰-۱ میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۰۰



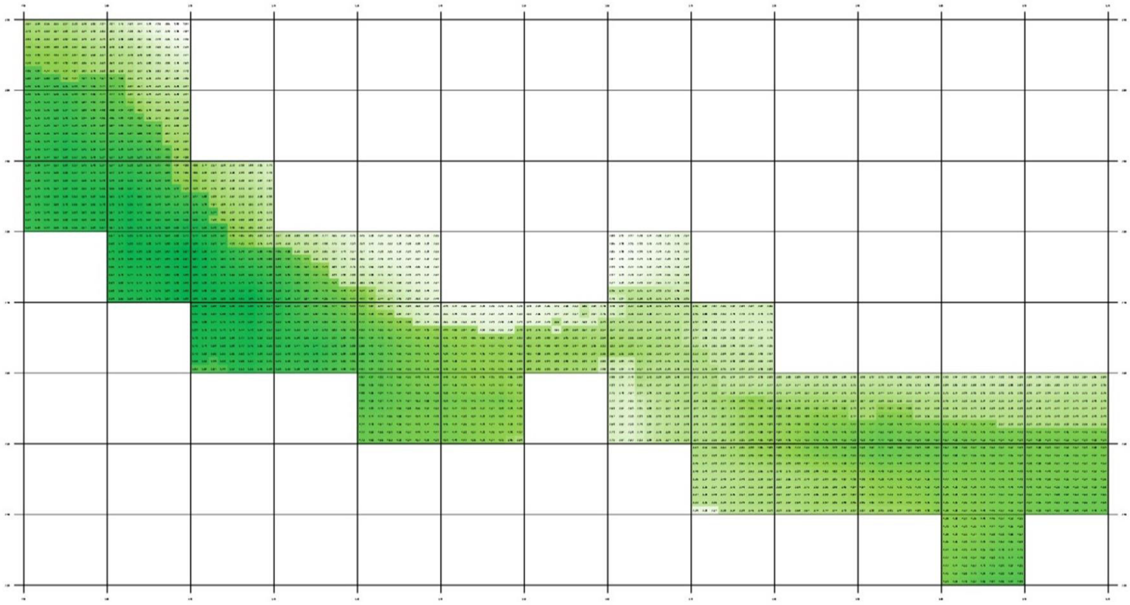
شکل ۰-۲میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۰۵



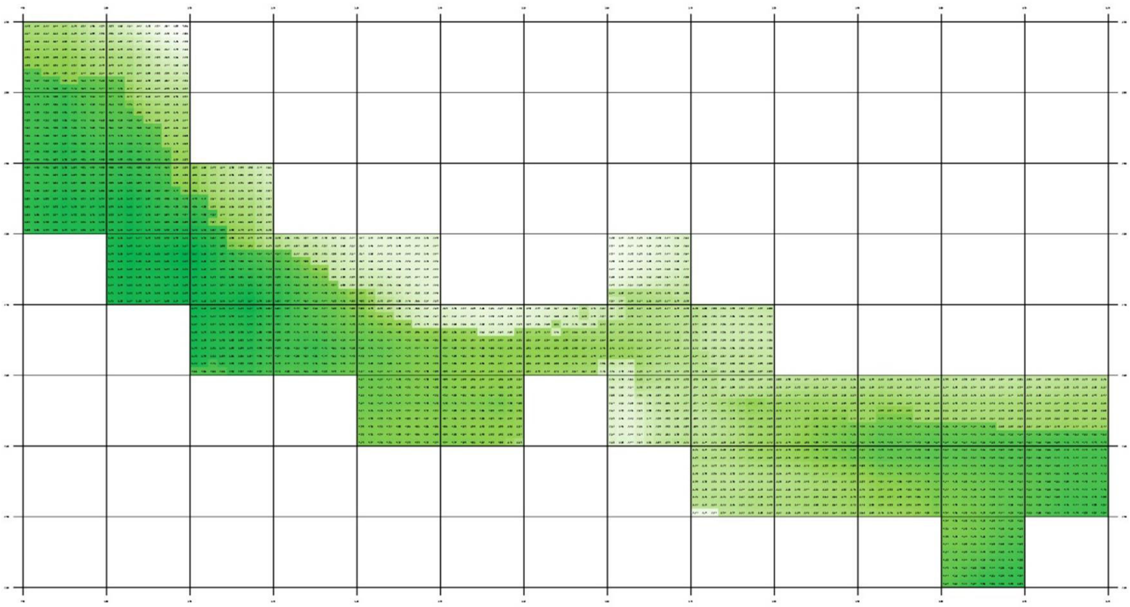
شکل ۰-۳ میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۰۹



شکل ۰-۴میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۰

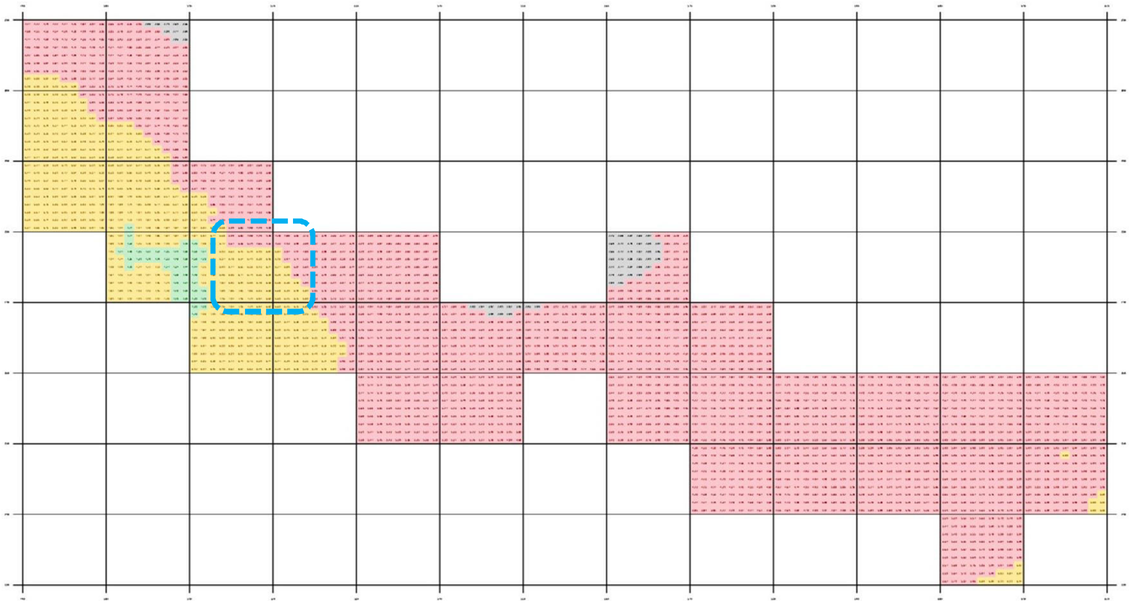


شکل ۰-۵میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۱

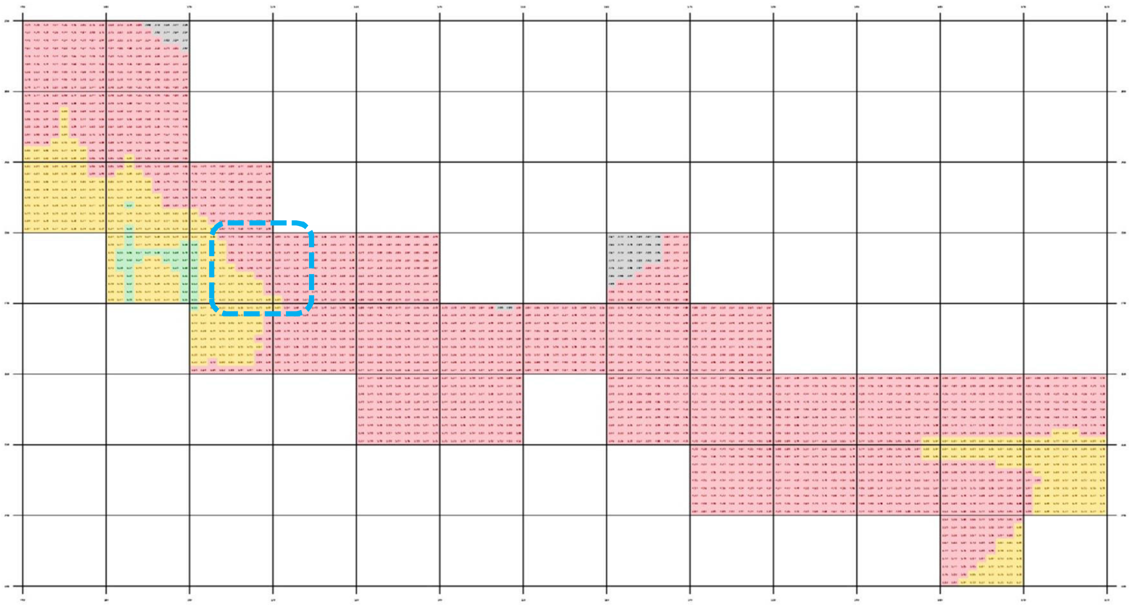


شکل ۰-۶میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۲

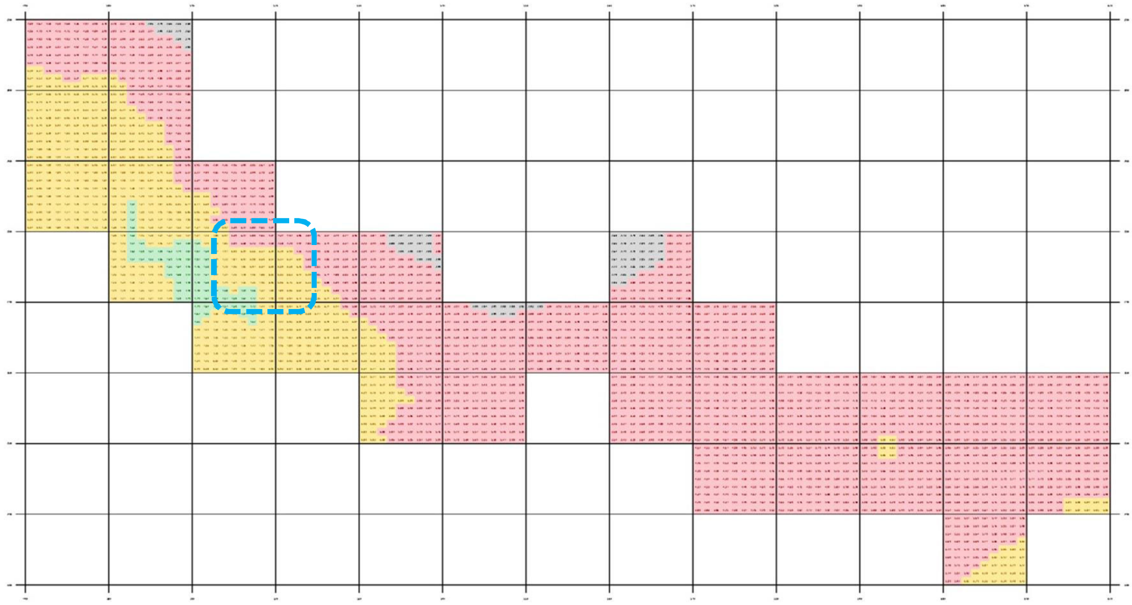
پیوست ۲: نمایش گرافیکی سرعت باد میانگین (نمایش نوع ۲)



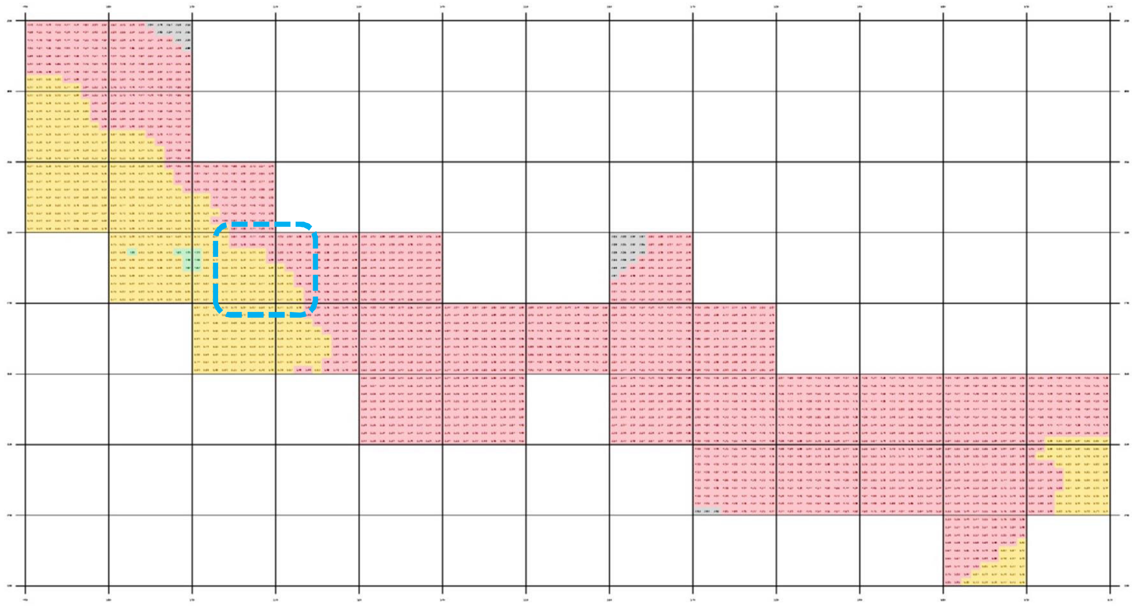
شکل ۰-۷میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۰۹



شکل ۰-۸میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۰



شکل ۰-۹میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۱



شکل ۰-۱۰میانگین سرعت باد سالیانه برای سال ۲۰۱۲

پیوست ۳: مشخصات فنی توربین های سازگار با منطقه

Technical specifications

SWT-2.3-101

Rotor	
Diameter	101 m
Swept area	8,000 m²
Rotor speed	6-16 rpm
Power regulation	Pitch regulation with variable speed
Blades	
Type	B49
Length	49 m
Aerodynamic brake	
Type	Full-span pitching
Activation	Active, hydraulic
Transmission system	
Gearbox type	3-stage planetary/helical
Gearbox ratio	1:91
Gearbox oil filtering	Inline and offline
Gearbox cooling	Separate oil cooler
Oil volume	Approximately 400 l
Mechanical brake	
Type	Hydraulic disc brake
Generator	
Type	Asynchronous
Nominal power	2,300 kW
Voltage	690 V
Cooling system	Integrated heat exchanger

Yaw system	
Type	Active
Monitoring system	
SCADA system	WebWPS
Remote control	Full turbine control
Tower	
Type	Cylindrical and/or tapered tubular
Hub height	80 m or site-specific
Operational data	
Cut-in wind speed	3-4 m/s
Rated power at	12-13 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Maximum 3 s gust	55 m/s (standard version) 60 m/s (IEC version)
Weights	
Rotor	62 tons
Nacelle	82 tons
Tower for 80 m hub height	162 tons

6

V126-3.45 MW™ IEC IIB
Facts & figures

POWER REGULATION Pitch regulated with variable speed

OPERATING DATA

Rated power	3,450 kW
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	22.5 m/s
Re cut-in wind speed	20 m/s
Wind class	IEC IIB

Standard operating temperature range from -20°C* to +45°C with de-rating above 30°C

*subject to different temperature options

SOUND POWER

(Noise modes dependent on site and country)

ROTOR

Rotor diameter	126 m
Swept area	12,469 m²
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders

ELECTRICAL

Frequency	50/60 Hz
Converter	full scale

GEARBOX

Type	two planetary stages and one helical stage

TOWER

Hub heights	87 m (IEC IIB), 117 m (IEC IIB), 137 m (IEC IIIA/DIBtS), 147 m (IEC IIIA), 149 m (DIBtS) and 166 m (DIBtS)

NACELLE DIMENSIONS

Height for transport	3.4 m
Height installed (incl. CoolerTop®)	6.9 m
Length	12.8 m
Width	4.2 m

HUB DIMENSIONS

Max. transport height	3.8 m
Max. transport width	3.8 m
Max. transport length	5.5 m

BLADE DIMENSIONS

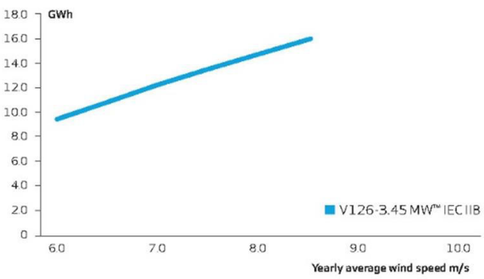
Length	61.7 m
Max. chord	4 m

Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes

TURBINE OPTIONS

- Power Mode (site specific)
- Condition Monitoring System
- Service Personnel Lift
- Vestas Ice Detection
- Vestas De-Icing
- Low Temperature Operation to - 30°C
- Fire Suppression
- Shadow detection
- Increased Cut-In
- Nacelle Hatch for Air Inlet
- Aviation Lights
- Aviation Markings on the Blades
- Obstacle Collision Avoidance System (OCAS™)

ANNUAL ENERGY PRODUCTION



Assumptions
One wind turbine, 100% availability, 0% losses, k factor = 2,
Standard air density = 1.225, wind speed at hub height

V136-3.45 MW™ IEC IIIA
Facts & figures

POWER REGULATION Pitch regulated with variable speed

OPERATING DATA

Rated power	3,450 kW
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	22.5 m/s
Re cut-in wind speed	20 m/s
Wind class	IEC IIIA

Standard operating temperature range from -20°C* to +45°C with de-rating above 30°C

*subject to different temperature options

SOUND POWER
(Noise modes dependent on site and country)

ROTOR

Rotor diameter	136 m
Swept area	14,527 m²
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders

ELECTRICAL

Frequency	50/60 Hz
Converter	full scale

GEARBOX

Type	two planetary stages and one helical stage

TOWER

Hub heights	82 m (IEC IIIA), 112 m (IEC IIIA), 132 m (IEC IIIA/DIBt2) and 149 m (DIBtS)

NACELLE DIMENSIONS

Height for transport	3.4 m
Height installed (incl. CoolerTop®)	6.9 m
Length	12.8 m
Width	4.2 m

HUB DIMENSIONS

Max. transport height	3.8 m
Max. transport width	3.8 m
Max. transport length	5.5 m

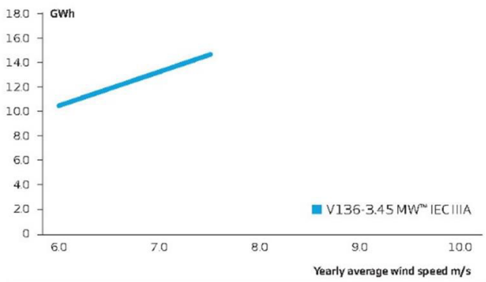
BLADE DIMENSIONS

Length	66.7 m
Max. chord	4.1 m

Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes

TURBINE OPTIONS
- Power Mode (site specific)
- Condition Monitoring System
- Service Personnel Lift
- Vestas Ice Detection
- Vestas De-Icing
- Low Temperature Operation to - 30°C
- Fire Suppression
- Shadow detection
- Increased Cut-In
- Nacelle Hatch for Air Inlet
- Aviation Lights
- Aviation Markings on the Blades
- Obstacle Collision Avoidance System (OCAS™)

ANNUAL ENERGY PRODUCTION



Assumptions
One wind turbine, 100% availability, 0% losses, k factor =2,
Standard air density = 1.225, wind speed at hub height

پیوست۴: مقایسه نتایج دو روش محاسبه اثر wake

جدول ۰-۱مقایسه نتایج دو روش محاسبه افت ناشی از اثر *wake*

Turbine	z	z0	alpha	distance multiplier based on rotor diameter	Vdij روش دوم	Vdij روش اول
Vestas V136	112	0.11	0.072194	1	47%	51%
	112	0.11	0.072194	1.5	39%	45%
	112	0.11	0.072194	2	32%	40%
	112	0.11	0.072194	2.5	26%	36%
	112	0.11	0.072194	3	21%	32%
	112	0.11	0.072194	3.5	17%	29%
	112	0.11	0.072194	4	14%	27%
	112	0.11	0.072194	4.5	12%	24%
	112	0.11	0.072194	5	10%	22%
	112	0.11	0.072194	5.5	9%	21%
	112	0.11	0.072194	6	7%	19%
	112	0.11	0.072194	6.5	6%	18%
	112	0.11	0.072194	7	6%	16%
	112	0.11	0.072194	7.5	5%	15%
	112	0.11	0.072194	8	4%	14%
	112	0.11	0.072194	8.5	4%	13%
	112	0.11	0.072194	9	4%	13%
	112	0.11	0.072194	9.5	3%	12%
	112	0.11	0.072194	10	3%	11%
	112	0.11	0.072194	10.5	3%	11%
	112	0.11	0.072194	11	2%	10%
	112	0.11	0.072194	11.5	2%	9%
	112	0.11	0.072194	12	2%	9%
	112	0.11	0.072194	12.5	2%	8%
	112	0.11	0.072194	13	2%	8%
	112	0.11	0.072194	13.5	2%	8%
	112	0.11	0.072194	14	2%	7%
	112	0.11	0.072194	14.5	1%	7%
	112	0.11	0.072194	15	1%	7%
	112	0.11	0.072194	15.5	1%	6%
	112	0.11	0.072194	16	1%	6%

Abstract

These days wind energy has become one of the most pupolar field for researchers among different types of renewable enrgy. There has been many researches conducted in the field of onshore wind energy. Although offshore wind has been the subject of many investigations worldwide there is still a huge gap in the subject among academic works in Iran, therefore it was the main field of this thesis both to fulfill the gap and become a start point of further work. Due to numerous oil and gas platforms in the southern waters of Iran, this research focuses on the Persian Gulf and Oman Sea as area of research.

To achieve the goal of this research, first of all wind data was collected from ECWMF website as a reliable database of meteorogical data. The data was then processed, organized and studied. The result was average annual wind speed for thee zone of study. The suggested area for construction of a wind farm had the coordinate of 27-28 in latitude and 50-52 in longitude, somewhere around Bandar Kangan and Bandar Dayyer.

After determining of suitable area, all types of offshore fixed substructures that are used in offshore wind industry was studied and pros and cons was listed. As a conclusion it can be said that the most applicable and adequate one was jacket substructure according to water depth of around 50 meters in selected areas.

In the end layout of a wind farm was presented using Jensen method considering wind speed and omitting complicated parameters such as electricity network of the farm and change of wind direction.

Keywords: Offshore, Wind farm, Wind Turbine, Substructure, Layout

Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Coastal Engineering, Ports and Marine Structures

Feasibility study on offshore wind farms in Persian Gulf and Oman Sea, and proposing optimal substructure and layout for assumed wind turbines and wind farms in the studied area

By Ali Tamamgar

Supervisors:

Dr. Mahdi Adjami

Dr. Muhammad Hossein Kazemi Nezhad

January 2017