انرژی بادی و ارزیابی چرخه زیست آن

حامد زارع ثانی[1*]، پیمان نیساری[1]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: hamed.zaresani@ut.ac.ir

چکیده

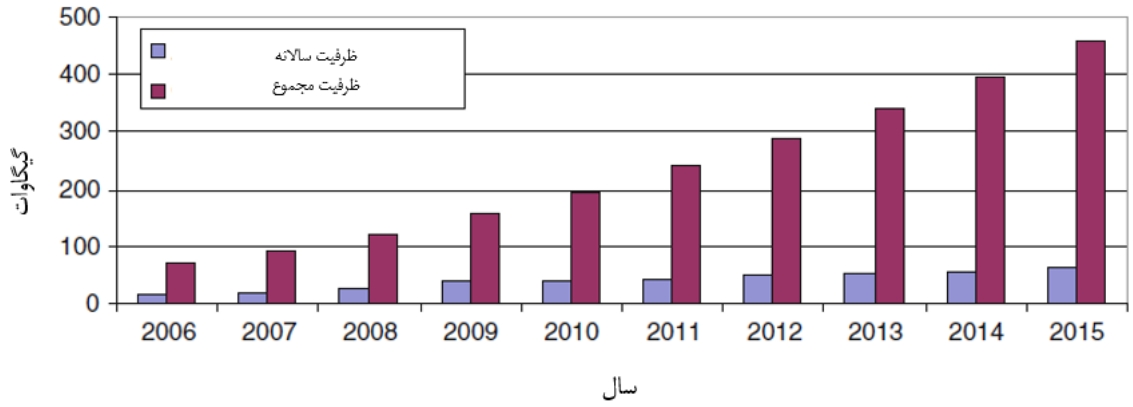
این پژوهش از دیدگاه ارزیابی چرخه زیست (LCA) انرژی باد را بررسی می‌کند. البته تمامی تحلیل‌ها باید زمانی انجام شود که استفاده از انرژی باد گسترش یافته است و نتایج آن‌ها باید با توجه به تکامل طراحی‌ها و عوامل اصلی توربین‌های باد تغییر یابد. به همین دلیل توربین‌های بادی مگاواتی دارای ژنراتورهای دو سویه القایی مدرن که بیشترین استفاده را در مزارع بادی دارند در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس، یک ارزیابی چرخه زیست گسترده روی توربین باد اجرا شده که تمام مراحل ساخت تا برچیدن و فرآوری ضایعات در پایان عمر مفید آن را پو شش می‌دهد. این نتیجه‌ی ثابت یافت شد که آلودگی دی اکسید کربن بر کیلووات ساعت تولید شده با افزایش توان نامی توربین کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر آلودگی و تأثیرات محیطی این انرژی، بسیار کمتر از بقیه منابع تولید الکتریسیته است. با این ذهنیت مطالعه اخیر روی توربین‌های بادی مگاواتی تمرکز کرده و به دنبال یافتن داده‌های ارزیابی چرخه‌ی زیست انرژی باد در حال حاضر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چرخه زیست، انرژی باد، توربین بادی

مقدمه

ایده استفاده از توربین باد برای تولید الکتریسیته به قرن نوزدهم باز می‌گردد. این زمینه با پیشگامی چارلز اف براش مورد مطالعه قرار گرفته است که یک مخترع سرشناس، متفکر و کار آفرین در زمان خود بوده است. براش اولین کسی بود که توربین باد را برای تولید الکتریسیته نصب و راه اندازی کرد (Rivkin *et al.*, 2012). منابع انرژی تجدید پذیر و به صورت جزئی‌تر انرژی باد در سال‌های اخیر گسترش قابل ملاحظه‌ای کرده‌اند و این با توجه به یافتن منبع جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی که منابع محدودی بوده و در طولانی مدت قادر به تأمین این میزان مصرف در دنیا نخواهد بود، بوده است. چندین نوع از توربین‌های مناسب تولید الکتریسیته وجود دارد اما بیشتر نمونه‌های نصب شده از نوع محور افقی می‌باشند. توان خروجی نامی آن‌ها از ۵۰۰ کیلووات تا ۵ مگاوات می‌باشد که به طور مستقیم به شبکه وصل و به صورت گروهی در مزارع بادی نصب شده‌اند تا از لحاظ اقتصادی، کنترل و تعمیرات قابل توجیه باشند. شکل (۱) نشان دهنده‌ی منحنی ظرفیت کامل تولید الکتریسیته جهان از انرژی باد است. افزایش ظرفیت سالانه به طور واضح در سال‌های اخیر تا حدود ۲۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۱۰ دیده می‌شود. مکانیزم اصلی تولید الکتریسیته توربین‌های

مدرن افقی که در اکثر مزارع بادی یافت می‌شود، با تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی به وسیله نیروی آیرودینامیکی مقابل پره‌های توربین و تولید گشتاور روی شفت اصلی است و این انرژی مکانیکی سپس توسط ژنراتور به انرژی الکتریسیته تبدیل می شود. ضعف این سیستم در مقایسه با سیستم‌های رایج تولید الکتریسیته این است که تنها زمانی که باد کافی وجود دارد می‌تواند انرژی الکتریسیته تولید کند. همچنین از دید اقتصادی امکان پذیر نیست که الکتریسیته تولید شده را برای استفاده یا اتصال به شبکه در زمان دیگر ذخیره کرد؛ چرا که این نوع از انرژی، غیر قابل کنترل بوده و مدام در حال نوسان با تبعیت از تغییر در سرعت باد می‌باشد. از دیدگاه شبکه برق نیز در کل ملزومات مورد نیاز برای متصل شدن مزارع بادی جدید بیش از پیش دشوار شده است. کوشش‌های بسیاری برای بهبود تزریق این نوع از انرژی به شبکه به منظور تنظیم انرژی تولید شده توسط مزارع باد به وسیله‌ی سیستم‌های کنترل پایدارکننده به علت تغییر ولتاژ یا فرکانس تأمین شده توسط مزارع از دیدگاه اتصال یا جلوگیری از قطعی کامل مزارع بادی زمانی که خلأ کوچک ولتاژی در شبکه به وجود می‌آید انجام گرفته است. این تأثیرات منفی حاصل از غیر قابل کنترل بودن مزارع بادی به همراه شبکه و همزمان افزایش ظرفیت انرژی باد نصب شده در سیستم، نقش انرژی پایه تعداد سایتهای تولید انرژی در حال بهره برداری را کاهش داده یا حداقل مقدار سوخت فسیلی لازم جهت بهره وری از آن‌ها را کاهش داده است (Singh *et al*., 2013).



شکل ۱. ظرفیت جهانی تجمعی توربین‌های بادی نصب شده (Singh *et al*., 2013).

اجزای توربین‌های بادی

همانطور که ذکر شد امروزه بیشتر توربین‌های باد استفاده شده در مقیاس‌های بزرگ تولید انرژی در جهان دارای سه پره و محور افقی هستند. اجزای اصلی توربین ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

زیربنا

برای اینکه توربین بادی پایدار باشد باید زیربنای آن قابلیت تحمل بارهایی که به توربین وارد می‌شود را دارا باشد. نوع زیربنای ساخته شده وابسته به نوع توربین و همچنین به نوع خاکی است که در آن مستقر می‌شود. آشکار است که اجزای زیر بنا به طور قابل

ملاحظه‌ای در مزارع بادی دریایی در مقایسه با مزارع بادی ساحلی پیچیده‌تر است. انواع مختلفی از زیر بناهای دریایی با توجه به عمق دریا و جایی که توربین‌ها نصب می‌شوند وجود دارد که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

-مونوپایل (۴ تا ۲۵ متر): لوله‌ی فولادی توخالی به اضافه‌ی مخلوطی که بین لوله و محل انتقال تزریق شده (محل انتقال یا گذار، کف دریا است که از لوله پایین‌تر قرار گرفته).

-زیربنای سطحی: از فولاد با سیمان ساخته شده که روی زمین قرار گرفته است.

-جکت (۳۰ تا ۳۵ متر): شبیه به برج‌های شبکه‌ای پروژه‌های نفت و گاز نصب شده در دریا.

-تریپاد: مانند مونوپایل که با سه اتصال به کف دریا وصل شده است.

-مولتی پایل (بالای ۴۰ متر): مانند مونوپایل چندین لوله به کف دریا با مخلوط اتصالی وصل شده که زیربنایی بزرگتر از مونوپایل‌های رایج به وجود می آورد.

شکل ۲. انواع مختلف زیربناهای دریایی (EWEA, 2012)

برج

برج‌ها نه تنها جهت تحمل وزن ناسل و روتور بلکه برای جذب نیروهای ناشی از تغییرات باد باید ساخته شوند. انواع مهم برج‌های قابل استفاده عبارتند از:

-برج‌های فولادی تو خالی: بیشتر توربین‌های بادی بزرگ دارای برج‌های فولادی توخالی هستند که به صورت قسمت‌های۲۰-۳۰ متری و دارای فلانژ در انتها ساخته می‌شوند که در محل نصب به یکدیگر متصل می‌شوند و قطر آن‌ها با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد تا مقاومت را بالا برده و مواد لازم را کاهش دهد.

-برج‌های سیمانی ساخته شده در سایت نصب: این برج‌ها دارای محدودیت ارتفاع هستند. مزیت این برج‌ها بی نیازی برای حمل و نقل بخش‌های مختلف برج به محل نصب و راه‌اندازی توربین می‌باشد.

-برج‌های سیمانی از پیش ساخته شده: از بخش‌هایی تشکیل شده که روی یکدیگر قرار می‌گیرند.

-برج‌های شبکه‌ای: از بخش‌های فولادی ساخته شده است. مهم‌ترین مزیت آن‌ها قیمت آن‌هاست به طوریکه نصف مواد لازم برای برج‌های تو خالی را نیاز داشته و به همان اندازه درجه‌ی سختی و پایداری را تأمین می‌کند. مهمترین عیب آن‌ها ظاهرشان است که از لحاظ استاتیکی برای توربین‌های بزرگ کمتر استفاده شده‌اند و عمدتاً در هند، آمریکا و آلمان رایج می‌باشند.

-برج‌های ترکیبی: برج‌ها همچنین می‌توانندبه صورت ترکیبی از روش‌های بالا نیز ساخته شوند. رایج‌ترین مدل، ساخت قسمت پایینی از سیمان و قسمت بالایی از فولاد توخالی است که به نظر می آید برای ساخت توربین‌های بزرگ مگاواتی در آینده رغبت بیشتری برای استفاده از این برج‌ها وجود داشته باشد.

روتور

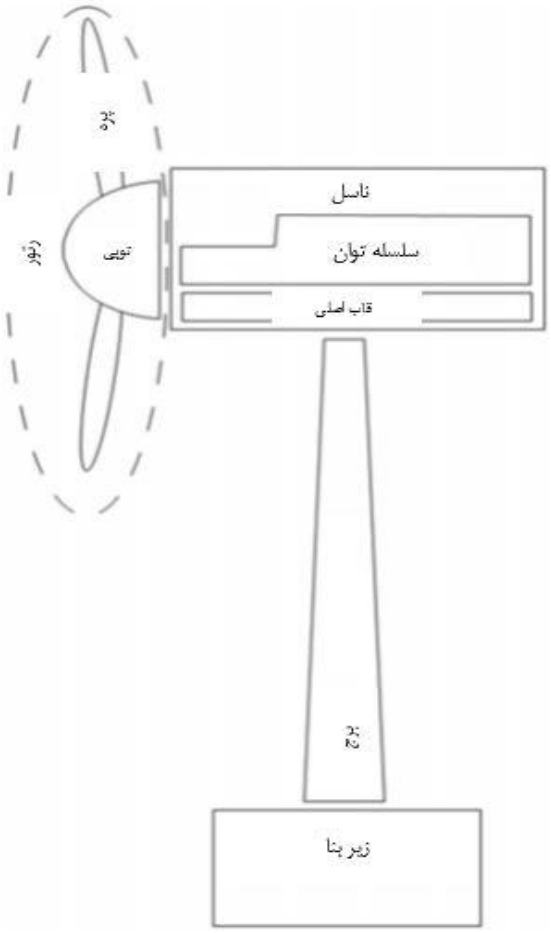
روتور انرژی باد را به حرکت چرخشی مکانیکی تبدیل می کند و شامل پره های توربین و توپی (قطعه‌ای که پره‌ها را به شفت متصل می‌کند) می‌شود. توپی مرکز روتور بوده و از فولاد ریخته گری شده یا آهن ساخته شده است. با توجه به نوع توربین بادی توپی ممکن است به شفت سرعت پایین گیربکس و یا به صورت مستقیم به ژنراتور توربین بدون گیربکس متصل شده باشد. درصد بالایی از توربین‌های نصب شده‌ی امروزی هنوز هم به گیربکس برای بالا بردن دور خود تا دور نامی ژنراتور متصل شده‌اند. به دلیل اینکه گیربکس بیشترین خرابی را در بین اجزای توربین دارد، بنابراین میل زیادی برای ساخت توربین‌های مدرن مگاواتی بدون گیربکس به دلیل کاهش تعمیرات وجود دارد. امروزه بیشتر روتورها، دارای سه پره و شفت افقی بوده و بین ۴۰ تا۹۰ متر قطر دارند. روتورهای رایج برای پمپاژ آب ۱۶ پره یا بیشتر دارند و از آهن ساخته شده‌اند اما روتورهای سه پره‌ای راندمان بیشتری را برای تولید توان در توربین‌های بزرگ داشته و همچنین توزیع وزن بهتری دارند که اجازه چرخش با پایداری بیشتری را می‌دهد. پره‌های توربین اساساً از فایبر گلاس یا فیبر کربن به همراه پلاستیک ساخته شده‌اند و از لحاظ شکل شبیه به بال‌های هواپیما هستند. عبور باد از انتهای پره‌ها باعث ایجاد یک فشار قوی می‌شود و این در حالی که در سمت نوک پره‌ها فشار پایینی ایجاد می‌شود که این نیرو به علاوه نیروی مقاومت باعث چرخش روتور هستند. همه کارخانجات پره‌ها را با توجه به فاکتورها و مدل‌های خود می‌سازد.

ناسل

ناسل در برگیرنده و نگه دارنده‌ی تمام قسمت‌های متحرک توربین بادی می‌باشد و باید قابلیت چرخش برای قرار گرفتن در جهت باد را داشته باشد. بنابراین به وسیله‌ی سیستم یاتاقان بندی به برج وصل شده است. طراحی ناسل یک کارخانه نسبت به کارخانه

دیگر با توجه به طراحی توربین و نوع قرار گیری اجزای قدرت (شفت اصلی، گیربکس، ژنراتور، سیستم کوپلینگ و ترمز)، تفاوت دارد.

گیربکس سرعت چرخش ۱۸ تا ۵۰ دور بر دقیقه را به دور نامی ژنراتور در حدود تقریبی ۱۷۵۰ دور بر دقیقه تبدیل می‌کند. سرعت چرخش ژنراتور وابسته به فرکانس جریان الکتریکی و تعداد جفت‌های قطب آن است. ژنراتور انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌کند. ژنراتور های دو سویه القایی سینکرونی امروزه متداول‌ترین نوع مورد استفاده در توربین‌های باد توان بالا می‌باشند. در ادامه اجزای اصلی ذکر شده در قسمت قبل یک اتصال بین ژنراتور و گیربکس نیز الزامی است که یک اتصال قابل انعطاف، معمولاً برای این هدف به کار برده می‌شود. ترمزهای مکانیکی نیز همچنین به سیستم توان متصل شده‌اند. استاندار معمول استفاده شده جهت طراحی توربین ها با دو سیستم ترمز همراه است. بنابراین هر دو ترمز آیرودینامیکی و مکانیکی در توربین بادی بکار گرفته می‌شوند. سیستم ترمز آیرودینامیکی در نوک پره یا روی تمام طول پره‌های روتور جهت تغییر زاویه قرار گرفته است و در بیشتر توربین‌ها سیستم دوم معمولاً یک ترمز دیسکی مکانیکی است که در صورت عدم کارکرد سیستم آیرودینامیکی و یا زمانی که توربین جهت



شکل ۳. اجزای توربین بادی (Singh *et al.*, 2013).

تعمیر و نگهداری متوقف شده استفاده می‌شود.

ارزیابی چرخه زیست توربین بادی

پیشینه

تحقیقات علمی مرتبط شامل تعداد زیادی آنالیز چرخه زیست انرژی بادی و توربین‌های بادی است (Ardente *et al*., 2008; Ben *et al*., 2008; Góralczyk, 2003; Tryfonidou and Wagner, 2004; Wiese and Kaltschmitt, 1996; Gürzenich *et al*., 1999; Uchiyama, 1995; Nadal, 1998; Haack, 1981; Krohn, 1997; Uchiyama, 1996; Schleisner, 2000; Lenzen and Munksgaard, 2002; Lenzen and Wachsmann, 2004; Crawford, 2009; Weinzettel *et al*., 2009; Martínez *et al*., 2009). بیشتر آن‌ها روی آنالیز انرژی و آلودگی دی اکسید کربن تمرکز کرده‌اند و نتایج آن‌ها بسیار متغییر است. چرا که گسترش‌های مهمی در زمینه انرژی باد در سال‌های اخیر انجام گرفته است. در یک زمان کوتاه، توربین های بادی با ظرفیت های مختلف تولید الکتریسیته گسترش یافته‌اند و از محدوده‌ی تقریبی توان خروجی نامی تنها در حد چند کیلووات تا بزرگترین توربین های بادی مگاواتی (۷/۵ مگاوات) قرار دارند. این تغییرات علاوه بر مشکلاتی مانند تخمین عمر مفید و ساعات تولید واقعی سالانه، تأثیرات مهمی بر روی نتایج پایانی هر تحقیقی می‌گذارد. علیرغم گوناگونی‌های مشاهده شده، این نتیجه‌ی ثابت یافت شد که آلودگی دی اکسید کربن بر کیلووات ساعت تولید شده با افزایش توان نامی توربین کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر آلودگی و تأثیرات محیطی این انرژی، بسیار کمتر از بقیه منابع تولید الکتریسیته است. با این ذهنیت مطالعه اخیر روی توربین‌های بادی مگاواتی تمرکز کرده و به دنبال یافتن داده‌های ارزیابی چرخه‌ی زیست انرژی باد در حال حاضر است.

ارزیابی چرخه زیست توربین های بادی دو مگاواتی

این ارزیابی چرخه‌ی زیست توربین باد بر روی ژنراتور دو سویی القایی مگاواتی و نوعی از توربین بادی که بیشترین استفاده را در دنیا دارد تمرکز می کند.

محدودیت سیستم

برای سیستم، یک استاندارد محدودکننده باید تعریف شود تا نتایج بررسی‌ها قابل فهم و تفسیر درستی باشد. استاندارد به کار رفته در این مورد شامل موارد زیر است:

– مرحله ساخت اجزای اصلی توربین

– حمل و نقل توربین باد به سایت نصب در مزرعه بادی

– نصب و اجرای توربین در سایت نهایی آن

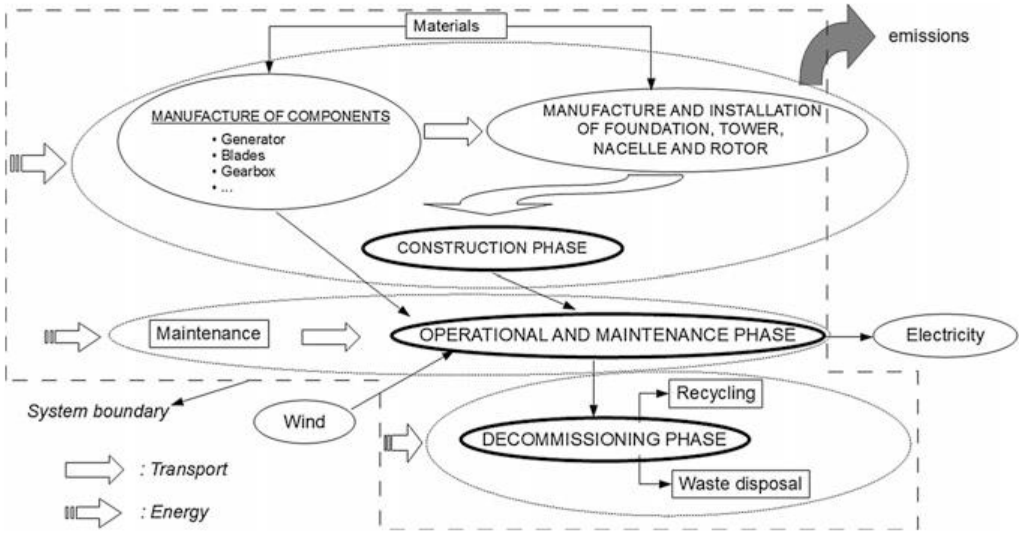
– برچیدن توربین و فرآوری پسماندهای تولیدی بعدی

در شکل (۴) نمایش دیاگرامی این استاندارد محدود کننده آمده است. تمام تابلوهای برق استفاده شده برای تولید الکتریسیته توسط توربین که برای توزیع انرژی شبکه است از سیستم کنار گذاشته شده است و شامل موارد زیر می‌باشد:

– سیم کشی ولتاژ متوسط

– ترانسفورمر ایستگاه زمینی

– شبکه انتقال و توزیع الکتریسیته



شکل ٤. محدودیت‌ها و مرزهای سیستم ارزیابی چرخه زیست (Martínez *et al.*, 2009)

واحد عملکرد

واحد عملکرد ارزیابی چرخه زیست برای الکتریسیته‌ی تولید شده توسط توربین باد در این تحقیق برای یک کیلووات ساعت الکتریسیته تعریف می‌شود. انتخاب یک واحد عملکردی که مناسب تلاش اجرا شده بوده و همچنین یک فاکتور مهم برای اطمینان یافتن از معنی‌دار بودن نتایج است، امری ضروری است. مواردی که در اینجا مورد مطالعه قرار می‌گیرد اثرات زیست محیطی انرژی باد در مقایسه با انواع دیگر منابع انرژی تجدید پذیر و تجدید ناپذیر است. بنابراین انتخاب یک کیلووات ساعت به عنوان واحد عملکردی یک دید واضح بر روی نتایج را به ما داده و مقایسه‌ها را آسان‌تر می‌کند.

داده های استفاده شده

زمانی که یک ارزیابی چرخه زیست روی سیستم بادی اجرا می‌شود، نیاز است داده‌هایی از هر یک از اجزای اصلی توربین بادی و در واقع از اجزای کوچکتر سازنده آن‌ها جمع آوری شود. این اجزا به شدت متغییر هستند و ممکن است شامل انواع مختلفی از اجزا مکانیکی، الکتریکی و الکترونیکی باشند. این کار دشواری است که تمام اطلاعات مورد نیاز را از تأمین‌کنندگان مختلف به جهت اجرای ارزیابی چرخه زیست روی هر یک از اجزای توربین بدست آورد. این مهم است که یک چرخه زیست مناسب که شامل اجزای مهم (زیر بنا، برج، ناسل و روتور) هر واحد باشد، انتخاب گردد. اکثر داده‌های فهرست شده بطور مستقیم از شرکت‌های تولید توربین بادی (ژنراتور، گیربکس، پره ها و ...) گرفته شده است که در مقالات ارائه شده توسط سایر محققین موجود بود. به استثنای حمل و نقل که این داده‌ها از یک کمپانی سوم که تأمین‌کننده حمل و نقل مانند حجم و توان و... است، تأمین شده است. در مواردی که بدست آوردن داده‌ی کارآمد امکان پذیر نبوده از پایگاه داده‌ای "Ecoinvent" (Boustead and Hancock, 2003; Frischknecht and Rebitzer, 2005; Frischknecht *et al*., 2005) استفاده شده است. داده‌های مربوط به هزینه و مواد استفاده شده برای ساخت اجزای اصلی توربین باد توسط شرکت "Gamesa" که یک سازنده بزرگ جهانی است تأمین شده. جدول (۱) خلاصه‌ی کاملی از مواد مورد استفاده برای اجزای اصلی توربین‌ها و انرژی صرف شده برای فرآیند تولید ان‌ها در رابطه با اجزای اصلی را نشان می‌دهد. علاوه بر مواد و انرژی مصرف شده، حمل و نقل اجزا از محل ساخت به مکان پایانی توربین در مزرعه باد نیز باید مورد محاسبه قرار گیرد. زمانی که برای اولین بار توربین در سایت نصب و راه اندازی می‌شود، نیازمند به تعمیرات و نگهداری است تا اطمینان حاصل شود که تا پایان عمر مفید خود کار خواهد کرد. به طور منطقی باید تمام این عملیات ها نیز در داخل ارزیابی چرخه زیست اجرا شده وارد شود و اطلاعات از لحاظ اینکه چقدر روغن و گیریس استفاده شده یا چندین فیلتر تعویض شده و حمل و نقل مواد و کارگران و ... نیز وارد شود.

فرضیات

زمانی که یک ارزیابی چرخه زیست بر روی سیستمی پیچیده مانند تولید انرژی باد اجرا می‌شود، محدودیت‌هایی باید بر روی جزئیات داده‌های وارد شده در نظر گرفته شود. فقط زمانی ارزیابی چرخه زیست می‌تواند کامل باشد که به همراه محدودیت‌هایی که از لحاظ مزایا، منابع مورد نیاز و زمان وجود داشته، بدون از دست دادن کیفیت نتایج خروجی بدست آمده باشد. همانطور که در بالا ذکر شد قدم اول اعمال استاندارد محدودکننده به سیستم مورد مطالعه می‌باشد. مطالعه‌ی حاضر شامل تمام اجزای زیر بنا که توربین را نگه می دارد به علاوه اجزای دیگر (برج، ناسل و روتور) می‌شود.

تمام اجزایی که برای اتصال به شبکه توزیع و تأمین برق مورد نیاز است از محدوده مرز سیستم مورد مطالعه خارج است. استاندارد محدودکننده‌ی اصلی استفاده شده، نسبت وزن هر یک از اجزا در رابطه با وزن کلی سیستم مورد مطالعه بوده است. با وجود استفاده

از این استاندارد محدودکننده، که به طور عمومی در هر موردی کارآمد نیست، از کنار گذاشتن اجزا و موادی که وزن کمی در سیستم دارند و ممکن است تأثیرات محیطی مهمی داشته باشند جلوگیری می‌کند. همچنین تعداد اجزای کوچکی که نیاز به بررسی جداگانه و وارد کردن داده دارند را کاهش می‌دهد؛ اما روی نتایج پایانی تأثیری نمی‌گذارد و ارزیابی چرخه زیست را انعطاف پذیر می‌نماید. داده‌های استفاده شده برای تعریف میزان تأثیر هر یک از اجزای اصلی از پایگاه داده‌ای تولیدکننده آن اجزا تأمین شده است. داده‌های اصلی گردآوری شده عبارتند از: مواد خام مورد نیاز برای تولید کننده، انرژی مصرف شده در فرایند تولید و جزییات حمل و نقل مواد و اجزا.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مواد و انرژی لازم برای ساخت اجزای اصلی توربین (Martínez *et al*., 2009)

مؤلفه	مواد			انرژی	
زیربنا	۷۰۰	بتن	تن	۵/۱۲	MWh
	۲۵	آهن	تن		
	۱۵	استیل	تن		
برج	۱۴۳	استیل	تن	۴۷/۲	MWh
ناسل	۱۸/۵	آهن	تن	۲۸۷/۱۱	MWh
	۲۱/۶۹	استیل	تن		
	۰/۳۵	سلیس	تن		
	۳/۵	مس	تن		
	۰/۸	فایبرگلاس	تن		
	۱/۲	رزین	تن		
روتور	۱۱/۸۹	رزین	تن	۳۳/۱	MWh
	۷/۹۲	فایبرگلاس	تن		
	۱۴	چدن	تن		

فرضیات اصلی تشکیل دهنده ارزیابی چرخه زیست سیستم توان بادی

– وزن اجزای اصلی مورد استفاده به عنوان استاندارد محدودکننده برای مشخص کردن بودن یا نبودن آن‌ها در فهرست چرخه‌ی زیست بوده است. جمع کلی اجزای مطالعه شده برای این سیستم ۹۵ درصد از وزن زیربنا، ۹۵ درصد از وزن برج، ۸۵ درصد از وزن ناسل و ۸۵ درصد از وزن روتور است.

– تمام داده‌های آلودگی و تأثیرات مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی از پایگاه داده‌ای "Ecoinvent" گرفته و مربوط به اسپانیا می‌باشد که کارخانه‌های سازنده توربین‌ها در آن کشور قرار گرفته‌اند.

– توربین‌های بادی مگاواتی مدرن دارای عمر مفید بیست سال هستند.

– تخمین زده می‌شود که جمع‌آوری توربین بعد از عمر مفید آن‌ها و فرآوری اجزای کوچکتر و ضایعات بر اساس پروژه جمع‌آوری توسط کارخانه‌ای که نگه دارنده‌ی توربین در وضعیت کارکرد است انجام می‌شود. اساساً در نظر گرفته می‌شود که ۹۰ تا ۹۵ درصد فلزات (آهن و فولاد و مس) بازیافت، پلاستیک PVC و فایبر گلاس و سیمان دفن و روغن‌ها و دیگر اجزای پلاستیکی سوزانده شوند.

– خروجی سالانه توربین بادی به صورت تعداد ساعات تولید آن در نظر گرفته می‌شود تا از ارزش اقتصادی مزرعه بادی اطمینان حاصل شود. مثلاً ۲۰۰۰ ساعت تولید در سال که برای یک توربین با توان نامی ۲ مگاوات این خروجی برابر ۴ گیگاوات در سال می‌باشد.

– در صورت کارکرد صحیح، در مورد تعمیر و نگهداری توربین در طول عمر مفید آن تخمین زده می‌شود که یکبار تعویض ژنراتور با توجه به نقص آن مورد نیاز باشد (ژنراتور جدید به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل ساخت و نصب آن می‌شود).

در نهایت، تخصیص تمام نیازهای استاندارد ایزو ۱۴۰۴۴ انجام نگرفت (ISO ISO 2006a, b; Guinée *et al*., 2001). تنها عملکردی که در این سیستم تحلیلی و در تمام اجزای آن مورد بررسی قرار گرفت تولید الکتریسیته بود. بنابراین تمام اثرات محیطی در ارتباط با سیستم به تولید الکتریسیته اختصاص داده شد. در نظر گرفته شد که مواد بازیافتی در انتهای عمر مفید خود جایگزین مواد اصلی مورد استفاده در مرحله تولید توربین می‌گردند.

شناخت روش و طبقه بندی‌های تحلیل اثرات

زمانی که یک ارزیابی چرخه زیست اجرا می‌شود، یک روش ارزیابی اثرات محیطی نیز باید انتخاب شود و تصمیم گیری در مورد استفاده از کدام یک از طبقه بندی‌های اثرات نیز باید انجام گیرد. در این مورد روش ارزیابی CML LAIDEN 2000 می‌باشد (Guinée *et al*., 2001) و طبقه بندی‌ها شامل:

–تخلیه منابع طبیعی: این طبقه بندی مربوط به استخراج سوخت‌های فسیلی و معدنی مرتبط با ورودی‌های سیستم تحت بررسی و تأثیرات آن‌ها بر روی سلامتی انسان و اکوسیستم است.

–اسیدی شدن: این طبقه تغییرات مواد ریز اسیدی درون خاک، آب زیرزمینی، آب سطحی، ارگانیسم ها، اکوسیستم و ... است.

-اتروفیکاسیون: این طبقه افزایش مواد ریز مغذی در محیط و در نتیجه آلودگی در هوا و خاک و آب است.

-سمیّت آب‌های جاری: این طبقه اثرات آلودگی در هوا و خاک و آب را در اموسیستم آبی است.

-گرمایش جهانی: این طبقه تأثیرات گازهای گلخانه‌ای روی سلامتی انسان و محیط است.

-سمیّت بشری: این طبقه اثرات سمیّت ریز ساختارها و اثرات آن‌ها روی سلامتی انسان‌ها را نشان می‌دهد.

-سمیّت محیط زیست آبزیان: این طبقه اثرات آلودگی روی اکوسیستم دریایی است.

-تخریب لایه ازن: این طبقه اثرات پرتوهای UV-B تابش شده‌ای است که به سطح زمین راه یافته‌اند.

-اکسیدشدگی فتوشیمیایی: این طبقه اثرات ازن روی محیط زیست می‌باشد که آن نیز می‌تواند روی انسان‌ها و اکوسیستم تأثیر گذاشته و محصولات کشاورزی را تخریب کند.

-سمیّت زمین: این طبقه اثرات آلودگی روی اکوسیستم خشکی است.

بررسی ارزیابی‌ها و دید آینده نگرانه

نتایج حاصل از تولید یک کیلووات الکتریسیته در جدول (۲) نشان داده شده است که به صورت تأثیرات بخش‌های گوناگون در ارزیابی چرخه زیست مورد مطالعه قرار گرفته شده، طبقه‌بندی شده‌اند. مقصود جلوگیری کردن از پتانسیل وابسته به دیگر فازهای ارزیابی چرخه زیست و همچنین ساده‌سازی مقایسه نتایج با ارزیابی چرخه زیست دیگر منابع تجدیدپذیر و منابع رایج است. برای مثال یک مقایسه بین اثرات زیست محیطی تولید انرژی الکتریسیته در اسپانیا در سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد که انرژی مورد نیاز، با توجه به اثرات زیست محیطی بررسی شده، در حدود ۸۹ تا ۹۹ درصد کمتر است. در یک مورد خاص آلودگی دی اکسید کربن به طور مستقیم در ارتباط با تغییرات آب و هوا برای یک کیلووات تولید الکتریسیته با انرژی باد ۹۸ درصد کمتر از سایر روش‌های تولید انرژی در اسپانیا است.

نتیجه‌ی جالب دیگر از طریق یک مقایسه با محوریت مدت زمان مورد نیاز برای از بین رفتن اثرات زیست محیطی حاصل از ساخت، عمر مفید، تعمیرات، جمع کردن توربین و فرآوری ضایعات می‌باشد. انرژی اسپانیا به عنوان هدف مقایسه استفاده شده زیرا توربین مورد مطالعه در اسپانیا قرار دارد و تولیدکننده نیز اسپانیایی است اما نتایج می تواند با سایر کشورها نیز مطابقت داده شود. با توجه به تمام این گفته‌ها اثرات زیست محیطی حاصل از توربین با توجه به مقوله اثر مورد مطالعه، حدود ۵۳ تا ۷۸۴ روز کمتر می‌شود. مقایسه با جزئیات بیشتر این است که مهمترین اجزا با بیشترین اثرات زیست محیطی روتور، برج و ناسل می‌باشند. اثر روتور به دلیل استفاده از مقادیری فایبرگلاس در ساخت پره‌ها، قسمت پوشش نوک ناسل و مرکز پره و همچنین پوشش توپی مهم است. چون اثرات

زیست محیطی مرتبط با این مواد به دلیل اینکه در پایان عمر مفید توربین بازیافت نمی‌شوند، تشدید می‌یابند. این زمینه از تحقیق به عنوان بررسی پتانسیل بازیافت کردن فایبرگلاس‌ها جهت کاهش اثرات زیست محیطی مورد بررسی سایر محققین قرار گرفته است و حتی از این مواد به عنوان جایگزین برای سایر انواع پلاستیک مورد استفاده در کاربردهایی غیر از توربین‌های بادی می‌توان استفاده کرد.

در مورد ناسل هم می‌توان گفت که یکی از عناصری که تأثیرات محیطی زیادی دارد مس مورد استفاده در سیم کشی و دیگر اجزای الکتریکی و همچنین فایبرگلاس مورد استفاده در پوشش اصلی است که از اجزای سیستم قدرت توربین محافظت می‌کند.

جدول ۲. نتایج حاصل از ارزیابی چرخه زیست اجزای توربین بادی با ارائه طبقه‌بندی (Martínez *et al.*, 2009)

طبقه‌بندی تأثیر	مجموع	نگهداری	برج	زیربنا	روتور	ناسل
تخلیه منابع طبیعی [kg Sb eq]	3.75E-05	2.78E-06	7.28E-066	4.39E-06	1.88E-05	4.33E -06
اسیدی شدن [kg SO2 eq]	5.43E-05	3.51E-04	1.35E-03	1.56E-03	2.61E-03	6.96E-04
اتروفیکاسیون [kg po-4 eq]	5.68E-06	4.98E-11	1.41E-10	8.69E-11	1.83E-10	6.11E-11
سمیّت آب‌های جاری [kg 1,4-DB eq]	2.81E-03	6.48E-03	1.40E-03	3.63E-04	4.36E-04	6.84E-03
گرمایش جهانی [kg CO2 eq]	6.58E-03	8.19E-05	1.65E-03	4.00E-04	2.43E-04	4.43E-04
سمیّت بشری [kg 1,4-DB eq]	1.55E-02	3.25E-01	1.69E+00	4.48E-01	1.04E+00	9.26E-01
سمیّت محیط زیست آبزیان [kg 1,4-DB eq]	4.41E+00	2.78E-05	4.89E-05	1.48E-05	1.55E-05	4.99E-05
تخریب لایه ازن [kg CFC-11 eq]	5.21E-10	5.10E-07	1.84E-07	1.06E-07	6.75E-07	6.51E-07
اکسید شدگی فتوشیمیایی [kg C2H4]	2.13E-06	7.64E-06	5.34E-06	3.53E-06	1.94E-05	1.84E-05
سمیّت زمین [kg 1,4-DB eq]	1.56E-04	3.24E-07	1.71E-06	8.,25E-07	1.91E-06	8.98E-07

ماده اصلی بکار رفته در ساخت برج، فولاد است. اثرات زیست محیطی زیادی در انتهای عمر مفید توربین با توجه به اینکه فولاد قابل بازیافت است، کاهش می‌یابد. تمام نتایج مربوطه به توربین‌های باد موجود در بازار مرجع داده شده؛ ولی با این وجود تمایل به سمت انرژی بادی با ابعاد بزرگتر توربین، قطر بزرگتر و توان بیشتر، بیشتر است. همچنین قابل ذکر است که افزایش مقیاس توربین بادی

در آینده کاهش بیشتری روی اثرات زیست محیطی تولید الکتریسیته دارد و این می‌تواند متأثر از این باشد که تکنولوژی توان بادی در حال پیشرفت است و مزیت‌های بیشتری از لحاظ بهبود عملکرد و نگهداری توربین‌های بادی در حال پیدایش‌اند. برای نمونه توربین‌های بادی بدون گیربکس رو به گسترش هستند؛ به دلیل اینکه گیربکس بیشترین خرابی را در بین اجزای توربین دارد و این کار نه تنها به دلیل کاهش هزینه تعمیرات و خرابی است بلکه برای افزایش زمان تولید انرژی مفید توربین‌ها در مدت زمان عمر مفید آن‌ها می‌باشد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه انرژی بادی را از نقطه نظر ارزیابی چرخه زیست بررسی نموده است. این تجزیه و تحلیل انرژی بادی را در زمان‌های مختلف که در حال طی مسیر پیشرفت خود بود مورد مطالعه قرار داده است و ارزیابی‌ها بر روی توربین‌های چند مگاواتی جدید که هم اکنون رایج‌ترین نوع توربین در مزارع بادی می‌باشد اجرا گردیده است و نتایج آن قابل انتساب به توربین‌های پیشرفته امروزی هم می‌باشد. بر این اساس با استفاده از نتایج سایر محققین، یک ارزیابی چرخه زیست کامل انجام شد که در بردارنده کلیه مراحل از ساخت تا جمع‌آوری و پردازش زباله‌ها در پایان عمر مفید توربین می‌باشد. نتایج به وضوح نشان دهنده تأثیرات اندک زیست محیطی انرژی بادی در تمامی طبقات تأثیر، نسبت به سایر منابع تولید الکتریسیته می‌باشد.

منابع

Ardente F, Beccali M, Cellura M, Lo Brano V (2008) Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. Renew Sustain Energy Rev 12(1):200–217

Ben Amar F, Elamouri M, Dhifaoui R (2008) Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia. Renew Energy 33(10):2311–2321

Boustead I, Hancock GF (2003) Implementation of life cycle assessment methods. Ecoinvent report no. 3. In: Frischknecht R, Jungbluth N (eds) Handbook of industrial energy analysis. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, pp 22–28

Crawford RH (2009) Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. Renew Sustain Energy Rev 13(9):2653–2660

Frischknecht R, Rebitzer G (2005) The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. J Cleaner Prod 13(13–14):1337–1343

Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H-J, Doka G, Dones R, Heck T et al (2005) The ecoinvent database: overview and methodological framework. Int J Life Cycle Assess 10(1):3–9

Goralczyk M (2003) Life-cycle assessment in the renewable energy sector. Appl Energy 75(3–4):205–211

Guinee JB, Gorree M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, van Oers L, Wegener Sleeswijk A, Suh S, Udo de Haes HA, de Bruijn JA, van Duin R, Huijbregts MAJ (2001) Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. Kluwer, Amsterdam

Gurzenich D, Methur J, Bansal NK, Wagner H-J (1999) Cumulative energy demand for selected renewable energy technologies. Int J Life Cycle Assess 4(3):143–149

Haack BN (1981) Net energy analysis of small wind energy conversion systems. Appl Energy 9:193–200

ISO (2006a) ISO 14040: environmental management—life cycle assessment—principles and framework. International Standard Organization, Geneva

ISO (2006b) ISO 14044: environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines. International Standard Organization, Geneva

Krohn S (1997) The energy balance of modem wind turbines. Wind Power Note 16:1–16Lenzen M, Munksgaard J (2002) Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines-review and applications. Renew Energy 26(3):339–362

Lenzen M, Wachsmann U (2004) Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment. Appl Energy 77(2):119–130

Martínez E, Sanz F, Pellegrini S, Jiménez E, Blanco J (2009) Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. Int J Life Cycle Assess 14(1):52–63

Nadal G (1998) Life cycle direct and indirect pollution associated with PV and wind energy systems. SC de Bariloche, Argentina: Fundación Bariloche, Av 12 de Octobre 1915, CC 138

Rivkin DA, Toomey K, Silk VL (2012) Wind turbine technology and design. The art and science of windpower. Jones & Bartlett Publishers, Burlington

Schleisner L (2000) Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. Renew Energy 20:279–288

Singh A, Pant D, Olsen SI (2013) Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources. Springer. London

Tryfonidou R, Wagner H-J (2004) Multi-megawatt wind turbines for offshore use: aspects of life cycle assessment. Int J Global Energy Issues 21(3):255–262

Uchiyama Y (1995) Life cycle analysis of electricity generation and supply systems. In: Electricity, health and the environment: comparative assessment in support of decision making, IAEA-SM-338/33, Vienna, Austria

Uchiyama Y (1996) Life cycle analysis of photovoltaic cell and wind power plants. In: Assessment of greenhouse gas emissions from the full energy chain of solar and wind power and other energy sources, IAEA Working material, Vienna (Austria)

Weinzettel J, Reenaas M, Solli C, Hertwich EG (2009) Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. Renew Energy 34(3):742–747

Wiese A, Kaltschmitt M (1996) Comparison of wind energy technologies with other electricity generation systems—a life-cycle analysis. In: European Union wind energy conference. Stephens & Associates, Bedford (UK)