



اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین توربین بادی؛ الزامات و راهبردها

فرزاد یآوری

گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

نازنین پیله‌وری (مسئول مکاتبات)

گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

pilevari.nazanin@wtiau.ir

رضا رادفر

گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

چکیده

در این مقاله، به الزامات و راهبردهای مفهوم اقتصاد چرخشی در راستای خلق ارزش پایدار در زنجیره تامین صنعت توربین بادی پرداخته شده است. درحقیقت هدف مفهوم اقتصاد چرخشی، ارتقای ارزش ممکن یک محصول یا یک ماده در طول زمان و همچنین کاهش مصرف مواد اولیه و افزایش بهره‌وری منابع می‌باشد. در این تحقیق به کارگیری اقتصاد چرخشی با رویکرد کاهش ضایعات، کاهش اثرات زیست محیطی تولید و مصرف، افزایش بهره‌وری و کارایی بیشتر منابع و رسیدگی به نگرانی‌های در حال ظهور در رابطه با امنیت و کمبود منابع در تولید توربین‌های بادی و همچنین پایان عمر آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. پیش‌بینی می‌گردد انرژی بادی روند رو به رشدی در تولید، نصب و راه‌اندازی در دنیا طی کند. در زنجیره تامین برای توربین‌های بادی، بالاترین ریسک مربوط به مواد خام است. اغلب مواد مورد استفاده در تولید توربین‌های بادی مانند عناصر موجود در آهنربای دائم در زمره مواد بحرانی و استراتژیک قرار دارند. در ایران نیز ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر رشد محسوسی دارد. پس از از رده خارج کردن توربین‌های بادی، مواد حاصل از توربین‌های بادی باید به طور موثر دفع شوند. با کاهش مقدار مواد مورد نیاز از تولید اولیه، اثرات زیست محیطی کاهش می‌یابد. در این مقاله جداسازی و دفع این اجزا و مواد و اثرات زیست محیطی و پتانسیل بازیافت و چرخشی بودن توربین بادی در راستای شکاف تحقیقاتی مهم در صنعت توربین‌های بادی ارزیابی می‌شود. این مقاله به ارتباط بین موضوعات پایان عمر، اقتصاد چرخشی و ارزیابی چرخه عمر توربین‌های بادی می‌پردازد.

کلمات کلیدی: اقتصاد چرخشی، توربین بادی، انرژی‌های تجدیدپذیر، زنجیره تامین، بهره‌وری منابع

مقدمه

کنیم، سپس محصولات و مواد را در پایان هر عمر، سرویس، بازیابی و بازسازی کنیم. اهداف اقتصاد چرخشی عبارتند از:

- کاهش ضایعات
- کاهش اثرات زیست محیطی تولید و مصرف
- افزایش بهره‌وری و کارایی بیشتر منابع
- رسیدگی به نگرانی‌های در حال ظهور در رابطه با امنیت و کمبود منابع (BLADE)

با افزایش گام‌ها در راستای اجرای اصول اقتصاد چرخشی در بخش‌های مختلف، نیاز به ارزیابی گردش یک محصول برای یک شرکت برای پیگیری پیشرفت، حمایت از تصمیم‌گیری‌های داخلی و طراحی سیاست‌های تجاری وجود دارد. چرخشی بودن اساساً نشان دهنده سنجش است که یک سیستم از یک جریان چرخشی کاملاً احیا کننده پیروی می‌کند. پیشرفت‌های زیادی در توسعه شاخص‌ها برای اندازه‌گیری چرخشی، به‌ویژه در سطح خرد صورت نگرفته است. (Elia, Gnoni, & Tornese, 2017) مطالعات اخیر ویژگی‌های مهم شاخص را برای نشان دادن چرخشی بودن ذکر کرده‌اند. ویژگی‌های مورد نیازی که شاخص می‌تواند بر اساس این مطالعات در نظر بگیرد، کاهش مصرف ورودی، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش تلفات مواد با ارزش و افزایش ارزش پایدار است. (Elia et al., 2017) یک مطالعه مروری اخیر، شاخص‌های چرخشی موجود را تحلیل کرده که نشان‌دهنده درجه چرخشی یک سیستم و ابزارهای ارزیابی چرخشی است که ارزش ایجاد شده توسط سیستم چرخشی را اندازه‌گیری می‌کند. شاخص‌های مورد تجزیه و تحلیل عبارت‌اند از شاخص چرخشی در سطح محصول جدید، چرخش (T)، شاخص چرخشی مواد (MCI)، شاخص چرخشی جهانی، نمونه اولیه شاخص اقتصاد چرخشی و ارزش اقتصاد چرخشی. (Corona, Shen, Reike, Carreón, & Worrell, 2019)

ما بیش از آنچه زمین می‌تواند فراهم کند استفاده می‌کنیم. امروزه ما از حدود ۱/۶ زمین استفاده می‌کنیم. به این معنی که ما در حال استفاده از حدود ۶۰ درصد بیشتر از منابع زمین

اصطلاح اقتصاد چرخشی ابتدا در سال ۱۹۹۰ معرفی و سال‌های بعد در محافل دانشگاهی مورد توجه قرار گرفت. این مفهوم به حفظ ارزش محصولات و مواد خام تا بیشترین زمان ممکن می‌پردازد و باعث کاهش مصرف مواد و بهره‌وری بیشتر استفاده از مواد می‌گردد. مفهوم اقتصاد چرخشی در متون مختلف با بیانات متفاوتی مطرح شده است اما در این تحقیق به سه استراتژی در خصوص این مفهوم شامل بهره‌وری منابع، افزایش طول عمر محصولات و استفاده مجدد از آنها و همچنین بازیافت منابع در صنعت توربین‌های بادی توسط شرکت‌های سازنده پرداخته می‌شود.

در چند سال اخیر، اقتصاد چرخشی (CE) در سراسر جهان مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. دولت‌ها در حال بررسی مدل اقتصاد چرخشی برای کنترل مصرف منابع و اقدامات آب و هوایی هستند. اتحادیه اروپا برای تحقق اهداف اقلیمی خود، برنامه اقدام اقتصاد چرخشی را برنامه ریزی کرده است. (Commission, 2020) محققان اقتصاد چرخشی را راهی برای تنظیم مکانیزم‌هایی برای ایجاد تحولات صنعتی احیاکننده در حرکت می‌دانند که منجر به دستیابی به تولید و مصرف پایدار می‌شود. (Korhonen, Nuur, Feldmann, & Birkie, 2018) کاربرد اصول اقتصاد چرخشی در بخش‌های مختلف مانند غذا، انرژی و حمل و نقل تأثیر مثبتی خواهد داشت. (Macarthur & Heading, 2019) گیسلینی نیاز به سرعت بخشیدن به انتقال اقتصاد چرخشی در حوزه‌های فنی-اجتماعی از طریق یک رویکرد ارزیابی چند سطحی و چند چارچوبی را توصیه می‌کند. (Ghisellini & Ulgiati, 2020)

اقتصاد چرخشی به‌عنوان جایگزینی برای اقتصاد خطی یا مدل «ساختن-دور ریختن» دیده می‌شود. هدف آن حفظ منابع در گردش تا زمان ممکن است. این رویکرد ما را ملزم می‌کند که حداکثر مقدار را از اجزاء در حین استفاده استخراج

مواد بحرانی

این مقاله به دنبال پرداختن به طراحی و نوآوری برای پایداری و همچنین اقتصاد چرخشی و بسته شدن حلقه‌های مواد و کاربرد آنها در زنجیره تامین صنعت توربین‌های بادی حرکت می‌کند. بر اساس دو معیار اصلی اهمیت اقتصادی (EI) و ریسک عرضه (SR) مواد بحرانی که در سال ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفته که در جدول ۱ ذکر شده است. (Parliament, 2019)

نسبت به آن چیزی که می‌تواند هر سال بازسازی شود، هستیم. تا سال ۲۰۵۰، با افزایش جمعیت جهان و در نتیجه افزایش مصرف، این مقدار می‌تواند به ۳ الی ۴ زمین برسد که به وضوح ناپایدار است. در پرتو این، شناخت محدودیت‌های استفاده از منابع زمین و انرژی، و اهمیت نگرستن به جهان به‌عنوان یک «سیستم» که در آن آلودگی و زباله به‌عنوان یک آفت تلقی می‌شود، در پایه‌های تفکر اقتصاد چرخشی قرار دارد. (Bocken, De Pauw, Bakker, & Van Der Grinten, 2016)

مواد بحرانی ۲۰۲۳			
Silicon Metal	Magnesium	Feldspar	Aluminium /bauxite
Strontium	Manganese	Fluorspar	Antimony
Tantalum	Natural Graphite	Gallium	Arsenic
Titanium Metal	Niobium	Germanium	Baryte
Tungsten	PGM	Hafnium	Beryllium
Vandium	Phosphate Rock	Helium	Bismuth
Nickel	Copper	HREE	Boron/Borate
	Phosphorus	Lithium	Cobalt
	Scandium	LREE	Coking Coal

جدول ۱- مواد بحرانی جهانی (Parliament, 2019)

مورد استفاده در یک توربین بادی باید صورت گیرد. از بین مواد موجود در یک مزرعه بادی که در این تحقیق در نظر گرفته شده، ماده کمیاب مورد استفاده در آهنرباها در لیست مواد حیاتی اتحادیه اروپا قرار دارد. (Parliament, 2019)

مواد مورد استفاده در توربین بادی

جدول ۲ رتبه بحرانی بودن مواد مورد استفاده در مزرعه بادی را نشان می‌دهد. گزارش اتحادیه اروپا در مورد مواد حیاتی، مواد حیاتی را رتبه‌بندی نمی‌کند، بنابراین رتبه‌های جدول ۲، تحلیل نویسنده بر اساس مقادیر ریسک عرضه و اهمیت اقتصادی در گزارش است. رتبه ۱ نشان دهنده مهم‌ترین است در حالی که رتبه ۵ نشان دهنده کمترین موضوع مورد بررسی است. آهنرباهای NdFeB حیاتی‌ترین ماده مورد استفاده در مزرعه بادی هستند. چین تقریباً ۹۵ درصد از

بحرانی بودن مواد مختلف توسط اتحادیه اروپا تحلیل شده است. بحرانی بودن معیاری است که نشان می‌دهد چگونه یک ماده خاص از نظر اقتصادی و استراتژیک برای اقتصاد حیاتی است. از ۶۱ ماده مورد تجزیه و تحلیل در سال ۲۰۲۳، ۳۴ ماده خام در حوزه اروپا حیاتی هستند. بحرانی بودن مواد بر اساس اهمیت اقتصادی و ریسک عرضه ارزیابی می‌شود. مواد خام با اهمیت بالا برای اقتصاد اتحادیه اروپا و با ریسک بالا مرتبط با عرضه آنها به عنوان مواد حیاتی مورد توجه قرار می‌گیرند. اهمیت اقتصادی بر اساس اهمیت یک ماده معین در اقتصاد اتحادیه اروپا از نظر کاربردهای نهایی و ارزش افزوده در بخش‌های مختلف محاسبه می‌شود. ریسک عرضه نشان دهنده اختلال در زنجیره تامین مواد به اتحادیه اروپا است. در دسترس بودن مواد جایگزینی که می‌توانند به‌طور عملی برای اهداف مشابه جایگزین شوند و تولید ثانویه مواد خام با بازیافت، بحرانی بودن مواد را کاهش می‌دهد. بنابراین، تمرکز ویژه‌ای بر اقدامات مورد نیاز برای مواد خام حیاتی

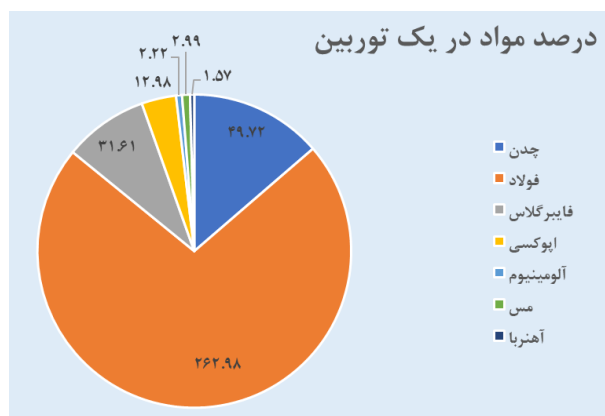
عناصر کمیاب زمین مورد نیاز برای آهنرباها را تولید می کند، بنابراین خطر عرضه بزرگی را به همراه دارد.

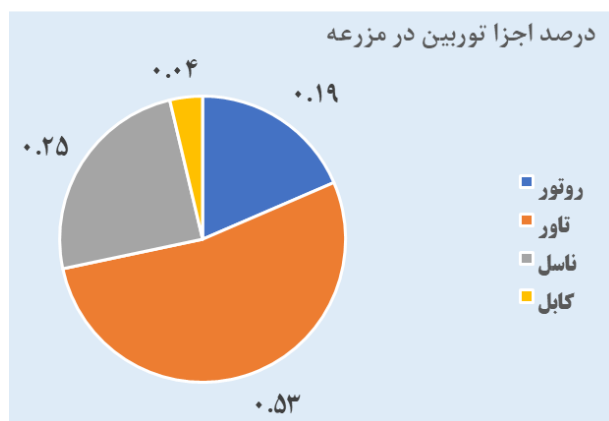
ردیف	ماده	رتبه بحرانی
۱	آهنربا	۱
۲	آهن	۲
۳	چدن	۲
۴	آلومینیوم	۳
۵	فایبرگلاس	۴
۶	اپوکسی	۴
۷	کابل	۴
۸	مس	۵

جدول ۲- رتبه بحرانی مواد توربین بادی (Parliament, 2019)

آهنرباهای دائمی و اجزای کلیدی ژنراتور توربین بادی وجود دارد که چین نقشی شبه انحصاری برای آن ایفا می کند. اتحادیه اروپا تنها در مرحله مونتاژ نقش عمده ای ایفا می کند، جایی که سهم آن بالای ۵۰ درصد است. (Bobba, Carrara, Huisman, Mathieux, & Pavel, 2020)

انرژی بادی در حال حاضر یکی از مقرون به صرفه ترین فناوری های انرژی تجدیدپذیر برای کاهش تغییرات آب و هوایی است و بخش رو به رشدی در پایگاه صنعتی جهان باقی خواهد ماند. در زنجیره تامین برای توربین های بادی، بالاترین خطرات در مرحله مواد خام وجود دارد. اتحادیه اروپا تنها ۱ درصد از مواد خام انرژی بادی را تامین می کند. نگرانی های عمده ای در مورد تامین عناصر کمیاب برای تولید





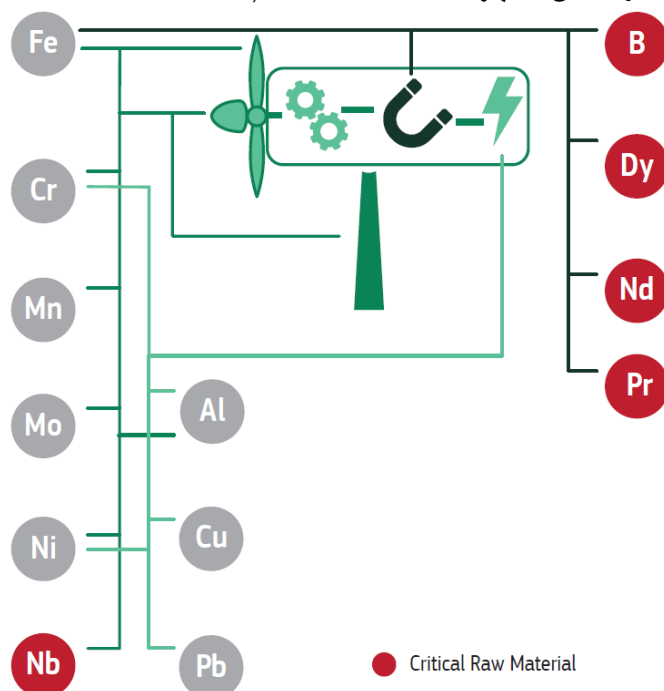
شکل ۱- تصویر درصد مواد مورد استفاده در یک توربین بادی و کل مزرعه بادی

Supply Risk	Material	Batteries	Fuel Cells	Wind Generators	Traction Motors	Photovoltaics	Robotics	Drones	3D Printing	Digital technologies
●	LREEs			●	●	●	●	●		●
●	HREEs			●	●	●	●	●		
●	Magnesium			●			●	●	●	●
●	Niobium		●		●			●	●	
●	Germanium						●	●		●
●	Borates			●	●	●	●	●	●	●
●	Scandium							●	●	
●	Strontium			●			●	●		
●	Cobalt		●	●	●		●	●	●	●
●	PGMs			●			●	●		●
●	Natural graphite		●	●			●	●		●
●	Indium						●	●		
●	Vanadium			●			●	●	●	●
●	Lithium		●	●			●	●		
●	Tungsten						●	●	●	
●	Titanium		●	●			●	●	●	●
●	Gallium						●	●		●
●	Silicon metal		●	●		●	●	●	●	●
●	Hafnium							●	●	
●	Manganese		●	●	●		●	●	●	●
●	Chromium			●	●		●	●	●	●
●	Zirconium			●			●	●	●	●
●	Silver			●			●	●	●	●
●	Tellurium						●	●	●	●
●	Nickel		●	●			●	●	●	●
●	Copper		●	●	●	●	●	●	●	●

شکل ۲- ریسک تامین مواد توربین بادی و سایر محصولات (Bobba et al., 2020)

عناصر کمیاب، یعنی نئودیمیم، پرازئودیمیم و دیسپروزیوم، ترکیبات کلیدی در قوی‌ترین ماده آهنربایی، یعنی نئودیمیم-آهن-بور (NdFeB) هستند. این آهنربا برای تولید ژنراتورهای سنکرون آهنربای دائمی (PMSG) استفاده می‌شود که در پیکربندی‌های اصلی توربین‌های بادی استفاده می‌شود. مرتبط‌ترین مواد مورد نیاز در تولید برق بادی و

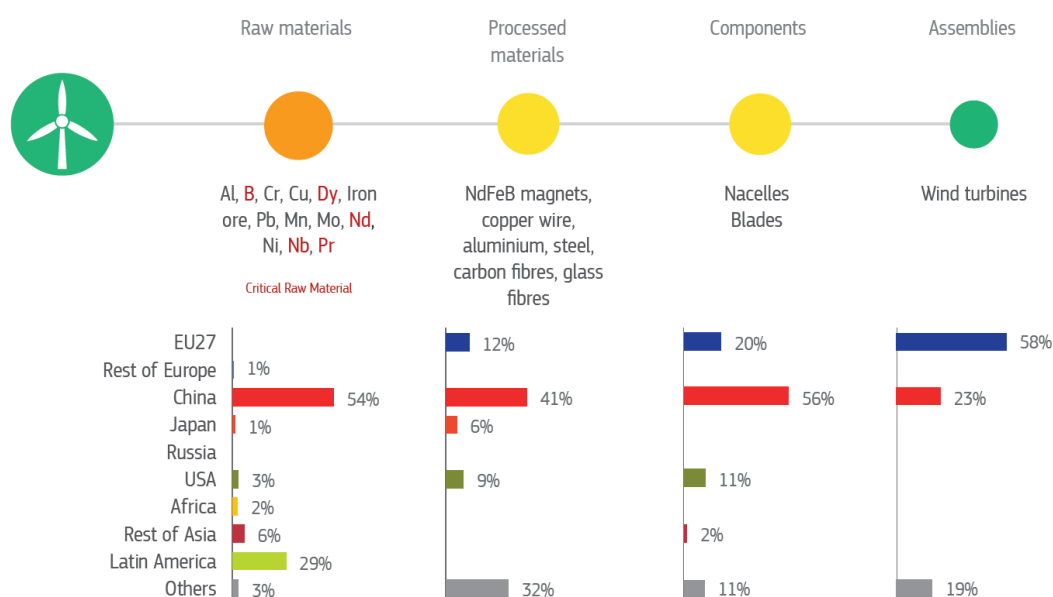
اجزای اصلی یک توربین بادی در شکل ۳ فهرست شده است. (Bobba et al., 2020)



شکل ۳- مواد اولیه بحرانی بخش‌های مختلف توربین بادی (Bobba et al., 2020)

اقدامات کرد، به طور قابل توجهی افزایش یافته است. (Bobba et al., 2020)
ارزیابی گلوگاه برای توربین‌های بادی نشان می‌دهد که ریسک تامین مواد خام در طول زنجیره تامین بالاترین ریسک است. (Bobba et al., 2020)

هزینه ساخت توربین‌های بادی متأثر از قیمت فلزات است، به ویژه در مورد توربین‌هایی که از ژنراتورهای حاوی عناصر کمیاب استفاده می‌کنند. نگرانی‌ها مبنی بر اینکه عرضه عناصر کمیاب ممکن است برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده برای انتقال جهانی به آینده انرژی پایدار کافی نباشد، از سال ۲۰۱۱ که چین تقریباً محدودیت‌های صادراتی را

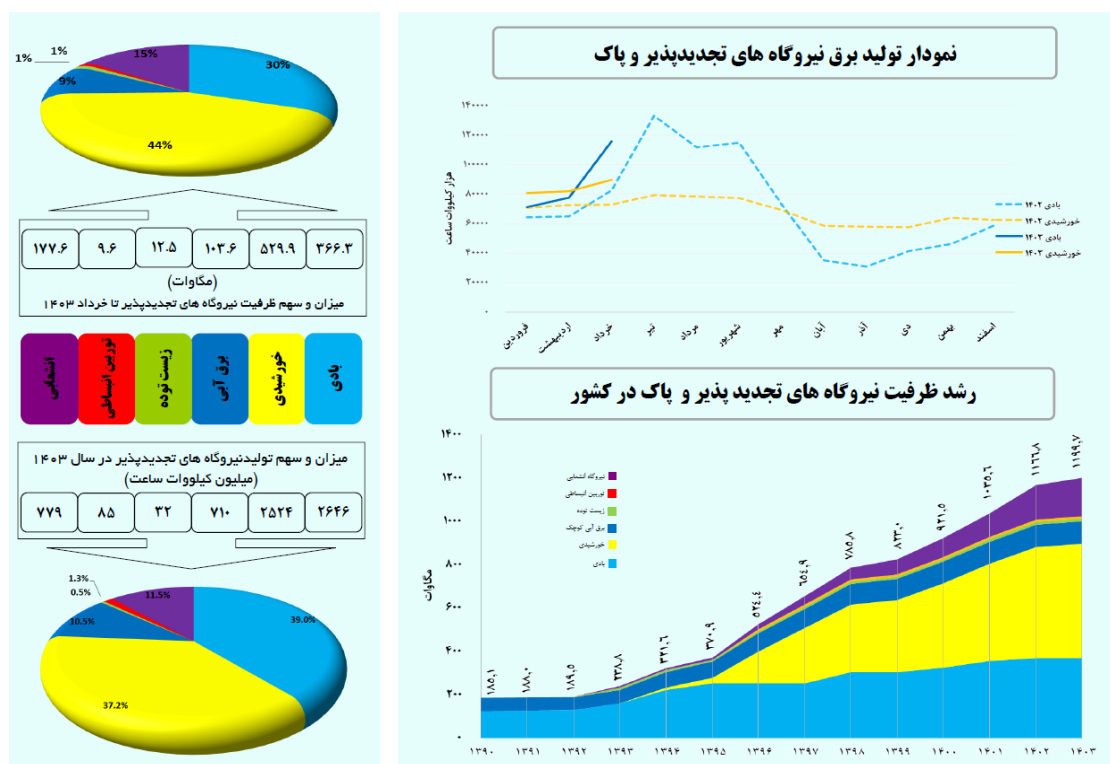


اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین توربین بادی؛ الزامات و راهبردها

شکل ۴- مواد اولیه و قطعات توربین بادی و کشورهای تامین کننده (Bobba et al., 2020)

نیروگاه‌های تجدیدپذیر در ایران

در ایران نیز ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر رشد محسوسی دارد و تا خرداد ۱۴۰۳ این مقدار به حدود ۱۲۰۰ مگاوات رسیده است. از این مقدار حدود ۳۶۶ مگاوات (معادل ۳۰ درصد) سهم توربین‌های بادی می‌باشد. (آمار، ۱۴۰۳)



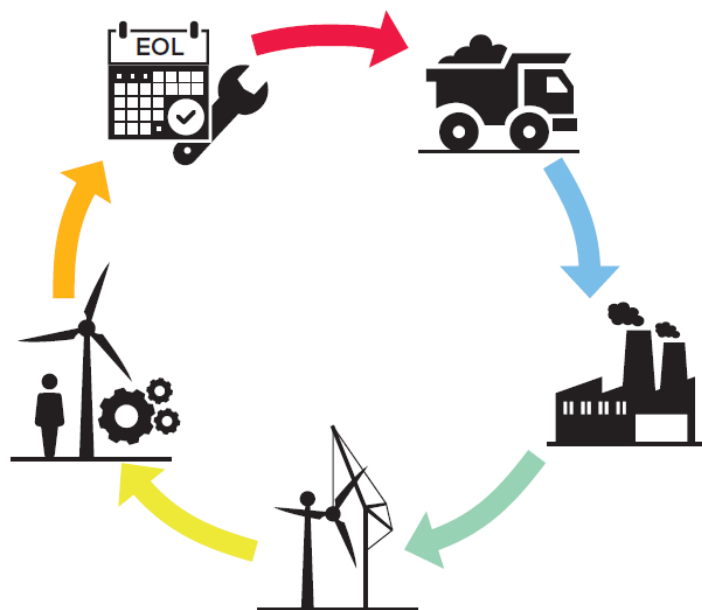
شکل ۵- ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر (آمار، ۱۴۰۳)

چرخشی‌تر را با فروش مجدد توربین‌های بادی و بازیافت حلقه بسته پرها نشان داد. (Bech, 2017) تمرکز اصلی اصول اقتصاد چرخشی بیشتر در توربین‌های بادی بر روی دفع پره‌های توربین بادی با بازیافت موثر یا استفاده مجدد از پرها برای کاربردهای دیگر است. (Jensen & Skelton, 2018) هائو فیبر کربن و پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) را به‌عنوان مواد مورد استفاده در پره‌های توربین بادی مقایسه می‌کند تا با بازیافت مواد موجود در پرها، اقتصاد چرخشی در پرها را چرخشی‌تر کند. (Hao et al., 2020)

از طرفی نیروگاه‌های تجدیدپذیر در اغلب استان‌های ایران در حال بهره‌برداری می‌باشند و در گستره وسیعی از کشور پراکنده هستند. مزارع بادی نیز در استان‌های گیلان، خراسان رضوی، قزوین، آذربایجان شرقی و سیستان و بلوچستان با ظرفیت‌های مختلف تولید برق می‌کنند. (آمار، ۱۴۰۳)

اقتصاد چرخشی در توربین‌های بادی

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مفهوم اقتصاد چرخشی باید در مورد توربین‌های بادی برای افزایش بهره‌وری منابع و به طور بالقوه پایدارتر کردن آن‌ها اجرا شود. NIRAS پتانسیل تبدیل زنجیره مواد مزارع بادی به یک سیستم



شکل ۶- سیستم چرخشی در زنجیره تامین توربین بادی (Marylise Schmid, 2020)

انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین برق کشور، در قالب ماده (۱۲) قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر و ارتقای نظام مالی کشور، نسبت به اتخاذ تمهیدات لازم جهت توسعه احداث نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، نیروگاه‌های خودتأمین در بخش‌های صنایع کوچک و متوسط، کشاورزی، تجاری، عمومی، اداری و خانگی، برقی‌سازی خودروها با اولویت اتوبوس‌های شهری، تاکسی‌ها، موتورسیکلت‌ها و تأمین سرمایه‌های و گرمایش ساختمان‌ها در استان‌های ساحلی جنوب کشور با استفاده از مکنده (پمپ)‌های حرارتی زمین‌گرمایی اقدام نمایند. (انرژی (۱۴۰۲)

از کار افتادن توربین‌های بادی به همان اندازه که ناوگان در حال پیر شدن است، اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. ORE Catapult تخمین می‌زند که حدود ۱/۵ گیگاوات باد تا سال ۲۰۳۰ در سطح جهان و ۱۳ گیگاوات تا سال ۲۰۴۰ باید از رده خارج شود. در اصل، ۸۵ تا ۹۰ درصد مواد مورد استفاده در توربین‌های بادی - پایه، برج، اجزای گیربکس و ژنراتور - ممکن است قابل بازیافت باشند. (Spyroudi & Catapult, 2021)

صنعت بادی متعهد به ترویج اقتصاد چرخشی‌تر و تعیین راه‌هایی است که از طریق آن بتواند از این امر حمایت کند. یک فرآیند پایدار برای برخورد با توربین‌های بادی در پایان عمر مفید آنها برای به حداکثر رساندن مزایای زیست‌محیطی نیروی باد از رویکرد چرخه عمر مورد نیاز است (شکل ۶). برای انجام این کار، صنعت بادی فعالانه به دنبال صنایع و بخش‌هایی است که بتوانند از مواد و تجهیزات خارج شده از مزارع بادی استفاده کنند. صنعت بادی می‌خواهد با آنها کار کند تا از طریق توسعه طرح‌ها و مواد ساختاری جدید و قابل بازیافت‌تر، ظرفیت‌هایی در چرخش پره‌های توربین بادی ایجاد کند. (Marylise Schmid, 2020)

در ایران براساس برنامه پنجساله هفتم پیشرفت (۱۴۰۳-۱۴۰۷) مقرر گردیده ظرفیت منصوبه تجدیدپذیر به ۱۲۰۰۰ مگاوات برسد که این مقدار ۱۰ برابر میزان کنونی است و تولید برق تجدیدپذیر نیز در پایان برنامه به ۲۱۰۰۰ میلیون کیلووات ساعت افزایش یابد. همچنین براساس ماده ۴۶ برنامه، وزارتخانه‌های نفت، نیرو، صنعت، معدن و تجارت و کشور مکلفند به منظور رفع ناترازی‌های انرژی و افزایش سهم

در این چرخه مورد توجه قرار گرفته است. مشکل امروز این است که با مدیریت موثرتر زباله‌های تولید شده، مرحله پایان عمر و از رده خارج کردن مزارع بادی را پایدارتر کنیم. این کار فرصت‌هایی را برای پیاده‌سازی الگوی اقتصاد چرخشی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مزارع بادی در طول چرخه عمر آنها ارائه می‌دهد. مواد مختلفی در اجزای یک مزرعه بادی استفاده می‌شود. در این تحقیق چگونگی جداسازی و دفع این اجزا و مواد و اثرات زیست‌محیطی و پتانسیل بازیافت و چرخشی بودن مزارع بادی ارزیابی می‌شود.

این مقاله به یک شکاف تحقیقاتی مهم در صنعت توربین‌های بادی می‌پردازد. از رده خارج کردن توربین‌های بادی در پایان عمر نیاز به بهبود دارد و فرصت‌هایی را برای اجرای اقدامات جدید ارائه می‌دهد. ارتباط بین موضوعات پایان عمر توربین‌های بادی، اقتصاد چرخشی و ارزیابی چرخه عمر در حال حاضر به طور گسترده تحقیق نشده است. علاوه بر این، تحقیقات در مورد اندازه‌گیری چرخشی یک سیستم و اعمال آن در مورد توربین‌های بادی به طور کامل توسعه نیافته است. این مقاله تلاش می‌کند تا روشی را ایجاد کند تا ارزیابی چرخشی را با ارتباط آن با اثرات زیست‌محیطی در مراحل پایان عمر توربین‌های بادی پیوند دهد. بنابراین، انگیزه اصلی این تحقیق، اقدام بر روی این شکاف تحقیقاتی موجود و ایجاد فرصت‌هایی برای دفع پایدار توربین‌های بادی و بهبود تصویر مزارع بادی به عنوان یک جایگزین کاملاً "سبز" است.

توسعه مزارع بادی توسط کشورها در سال‌های اخیر برای دستیابی به اهداف آب و هوایی افزایش یافته است. همانطور که مزارع بادی به پایان عمر خود می‌رسند که معمولاً ۲۰ تا ۲۵ سال است، تعداد مزارع بادی که باید از رده خارج شوند در سال‌های آینده افزایش می‌یابد. تجربه از کار انداختن مزارع بادی در حال حاضر محدود است و تنها تعداد کمی از مزارع بادی تا به امروز از رده خارج شده‌اند. (Ankrah, 2022; Topham & McMillan, 2017)

با افزایش تعداد مزارع بادی که قرار است از رده خارج شوند، تحقیقات در مورد از رده خارج کردن مزارع بادی در حال

پس از از رده خارج کردن توربین‌های بادی، مواد حاصل از توربین‌های بادی باید به طور موثر دفع شوند. اگر مواد به درستی دفع شوند با فروش آنها در بازار ضایعات منجر به منافع پولی می‌شود و با کاهش مقدار مواد مورد نیاز از تولید اولیه، اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. نرخ بازیافت فلزات اصلی مانند آهن، مس، آلومینیوم در جهان بیش از ۵۰ درصد است، اما در مقایسه با کسری از محتوای بازیافتی در کل ورودی فلز، هنوز نیاز به بهبود بازیافت فلزات وجود دارد. (Graedel et al., 2011) صنعت بادی در انتقال به سمت انرژی بادی در معرض خطر عرضه عظیمی قرار خواهد گرفت و نگرانی بزرگی از عناصر کمیاب (REE) مورد استفاده در آهنرباها برای توربین خواهد بود، بنابراین استخراج مواد از منبع مواد ثانویه بسیار مهم است. (Cao et al., 2019; Gonzalez, Ortego, Topham, & Valero, 2018)

بازیافت فولاد، چدن، مس و آلومینیوم به عنوان فلزات رایج در یک توربین بادی با فرآیندهای مشابه سایر صنایع به خوبی شناخته شده است. با این حال، بازیافت پره‌های توربین بادی هنوز تحت تحقیق است و هیچ راه‌حل تجاری واضحی در مقیاس بزرگ اجرا نشده است. (Europer, 2017) تحقیقاتی برای یافتن بهترین روش برای رسیدگی به مواد کامپوزیت مورد استفاده در پره توربین بادی انجام شده است. این مطالعات، فرآیندهای مکانیکی آسیاب پره‌ها برای استفاده از آن به عنوان مواد پرکننده و تقویت‌کننده، سوزاندن حرارتی پره یا تجزیه در اثر حرارت برای مهار انرژی و دریافت روغن‌های پیرولیز و فرآیندهای ترموشیمیایی مانند سولولیز برای به دست آوردن رزین‌ها و فیبر را مقایسه می‌کنند. (Europer, 2017; Naqvi et al., 2018; Psomopoulos, Kalkanis, Kaminaris, Ioannidis, & Pachos, 2019; Sakellariou, 2018) اجرای این راه‌حل‌ها در مقیاس تجاری برای دفع موثر مواد در یک مزرعه بادی مورد نیاز است.

این مقاله بر روی یک حوزه نسبتاً جدید پایان عمر مزارع بادی متمرکز است. تجربه عملی زیادی در این زمینه وجود ندارد و نیاز به توسعه دارد. همچنین موضوع اقتصاد چرخشی

این حال، یافتن تعریفی که مبنایی برای قوانین، سیاست‌ها و استراتژی‌ها باشد، بسیار مهم است. (Sillanpää & Ncibi, 2019) بعلاوه، اقتصاد چرخشی را می‌توان به عنوان یک مفهوم چتر در نظر گرفت زیرا برخی از مفاهیم دیگر در این اصطلاح ریشه دارند. (Blomsma & Brennan, 2017) جدول ۳ مجموعه‌ای از تعاریف را ارائه می‌دهد.

افزایش است. هنوز تجربه زیادی در مورد از رده خارج کردن مزارع بادی بزرگ وجود ندارد، با این حال سیاست‌های اجرا شده توسط اکثر دولت‌ها تضمین می‌کند که در طول برنامه‌ریزی یک مزرعه بادی، یک طرح از رده خارج کردن ارائه می‌شود. اما هنوز نیاز به اجرای اصول کلی اقتصاد چرخشی در از کار انداختن برای افزایش بهره‌وری منابع و کسب حداکثر منافع مالی و زیست‌محیطی وجود دارد.

پیشینه تحقیق

اقتصاد چرخشی را می‌توان به عنوان یک مفهوم کل‌نگر و چند بعدی دید و بنابراین تعریف روشنی در دسترس نیست. با

ردیف	نویسنده	تعریف
۱	Yuan et al. (2006, 5)	هسته اقتصاد چرخشی، جریان چرخشی (بسته) مواد و استفاده از مواد خام و انرژی از طریق طریق فازهای چندگانه است.
۲	Ellen MacArthur Foundation (2013, 7)	«اقتصاد چرخشی یک سیستم صنعتی ترمیمی یا احیاکننده با تفکر و طراحی است. مفهوم «پایان عمر» را با بازسازی جایگزین می‌کند، به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌رود، استفاده از مواد شیمیایی سمی را که استفاده مجدد را مختل می‌کنند حذف می‌کند، و هدف از بین بردن زباله در مدل‌های کسب‌وکار از طریق طراحی برتر است.»
۳	Stahel (2016, 435)	«اقتصاد چرخشی» کالاهایی را که در پایان عمر مفید خود هستند به منابعی برای دیگران تبدیل می‌کند، حلقه‌ها را در اکوسیستم‌های صنعتی بسته و ضایعات را به حداقل می‌رساند. منطق اقتصادی را تغییر می‌دهد، زیرا تولید را با قابلیت جایگزین می‌کند: از آنچه می‌توانید استفاده مجدد کنید، چیزهایی را که قابل استفاده مجدد نیست باز یافت کنید، چیزهایی که آسیب دیده‌اند را تعمیر کنید، چیزهایی را که قابل تعمیر نیستند بازسازی کنید.
۴	Murray et al. (2017, 377)	اقتصاد چرخشی یک مدل اقتصادی است که در آن برنامه‌ریزی، منابع، تدارکات، تولید و بازفراوری به‌عنوان فرآیند و خروجی طراحی و مدیریت می‌شوند تا عملکرد اکوسیستم و رفاه انسان را به حداکثر برسانند.
۵	Geissdoerfer, Savaget, Bocken, and Hultink (2017, 759)	سیستم احیا کننده‌ای که در آن ورودی منابع و اتلاف، انتشار و نشت انرژی با کند کردن، بسته شدن و بازی کردن حلقه‌های مواد و انرژی به حداقل می‌رسد. این کار را می‌توان از طریق طراحی ماندگاری بالا، نگهداری، تعمیر، استفاده مجدد، ساخت مجدد، نوسازی و بازیافت به دست آورد.
۶	Korhonen et al. (2018, 39)	«اقتصاد چرخشی، اقتصادی است که از سیستم‌های تولید-مصرف اجتماعی ساخته شده است که خدمات تولید شده از جریان خطی طبیعت-جامعه-طبیعت مواد و انرژی را به حداکثر می‌رساند. این کار با استفاده از جریان‌های مواد چرخه‌ای، منابع انرژی تجدیدپذیر و جریان‌های انرژی از نوع آبشاری انجام می‌شود. اقتصاد چرخشی موفق به هر سه بعد توسعه پایدار کمک می‌کند. اقتصاد چرخشی جریان خروجی را به سطحی محدود می‌کند که طبیعت آن را تحمل کرده و با رعایت نرخ بازتولید طبیعی، از چرخه‌های اکوسیستم در چرخه‌های اقتصادی استفاده می‌کند.

۷	European Parliament (2020)	«یک مدل تولید و مصرف که شامل استفاده مجدد، تعمیر، نوسازی و بازیافت مواد و محصولات موجود برای حفظ مواد در اقتصاد در هر زمان ممکن است. اقتصاد چرخشی نشان می‌دهد که زباله‌ها خود به یک منبع تبدیل می‌شوند و در نتیجه مقدار واقعی زباله را به حداقل می‌رساند. این به طور کلی با یک مدل اقتصادی خطی سنتی، که بر اساس الگوی «بگیر، بساز، مصرف کن، دور بریز» مخالف است.
---	----------------------------	--

جدول ۳- تعریف مفهوم اقتصاد چرخشی

مشابه مفهوم کلی اقتصاد چرخشی، مدل‌های کسب و کار چرخشی در چند سال اخیر نه تنها از سوی دانشگاه‌ها، بلکه از سوی پزشکان، سیاستمداران و فعالان محیط‌زیست نیز مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته‌اند. (Fehrer & Wieland, 2021) علاوه بر این، نمونه‌هایی از شرکت‌هایی وجود دارد که با موفقیت ایده مدل‌های کسب و کار چرخشی را ادغام کرده‌اند. (Guldmann, Bocken, & Brezet, 2019) شرکت‌ها با این حال، برای بستن حلقه‌ها در یک اقتصاد چرخشی، ایجاد ارزش برای سازمان و مشتریان و تبدیل به یک تجارت پایدار، لازم است کسب و کار خود را از نو به سوی چرخشی طراحی کنند. (Linder & Willander, 2017) جدول ۴ تعاریف مختلفی که درک نسبتاً همگنی از اصطلاح مدل‌های کسب و کار چرخشی دارند ارائه می‌کند. (Geissdoerfer, Pieroni, Pigosso, & Soufani, 2020)

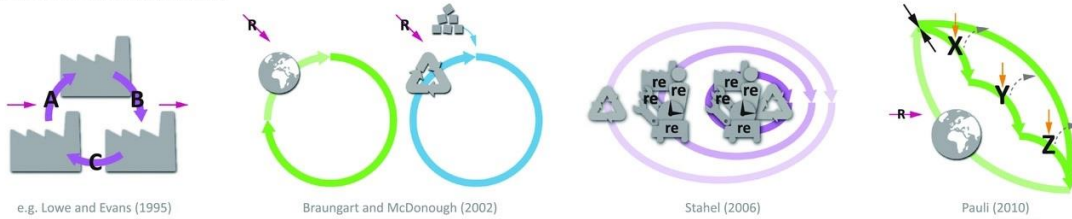
ردیف	نویسنده	تعریف
۱	Roos (2014, 257)	مدل کسب و کار زنجیره ارزش چرخشی (یا مدل کسب و کار سبز) مدلی است که در آن تمام خروجی‌های واسطه‌ای که در فعالیت‌های ارزش آفرینی شرکت‌ها کاربرد بیشتری ندارند، در قالب کاهش هزینه یا جریان‌های درآمد کسب درآمد ذکر می‌شوند.
۲	M. Linder and Willander (2017, 183)	یک مدل کسب و کار که در آن منطق مفهومی برای خلق ارزش مبتنی بر استفاده از ارزش اقتصادی حفظ شده در محصولات پس از استفاده در تولید محصولات جدید است. بنابراین، یک مدل کسب و کار چرخشی دلالت بر جریان بازگشتی به تولیدکننده از سوی کاربران دارد، اگرچه می‌تواند واسطه‌هایی بین دو طرف وجود داشته باشد.
۳	Nußholz (2017, 12)	یک مدل کسب و کار چرخشی نحوه ایجاد، جذب و ارائه ارزش توسط یک شرکت با منطق خلق ارزش است که برای بهبود کارایی منابع از طریق کمک به افزایش عمر مفید محصولات و قطعات و بستن حلقه‌های مواد (به عنوان مثال از طریق طراحی، تعمیر و ساخت مجدد با عمر طولانی) طراحی شده است.
۴	Oghazi and Mostaghel (2018, 3)	منطق این است که چگونه یک سازمان با کند کردن، بسته شدن یا باریک کردن جریان‌های حلقه‌های منابع، ایجاد ارزش، ارائه و به دست می‌آورد.
۵	Geissdoerfer et al. (2020, 7)	«مدل‌های کسب و کار که حلقه‌های مواد و انرژی را به چرخه در می‌آورند، گسترش می‌دهند، تشدید می‌کنند و/یا غیر مادی می‌کنند تا ورودی‌های منابع به داخل، ضایعات و انتشار از یک سیستم سازمانی را کاهش دهند. این مفهوم شامل اقدامات بازیافت (بازیافت)، استفاده از توسعه فاز (توسعه)، فاز استفاده بیشتر توسعه فاز (تشدید)، و جایگزینی محصولات با راه‌حل‌های خدماتی و نرم افزاری (غیر مادی) است.

جدول ۴- مدل‌های کسب و کار اقتصاد چرخشی

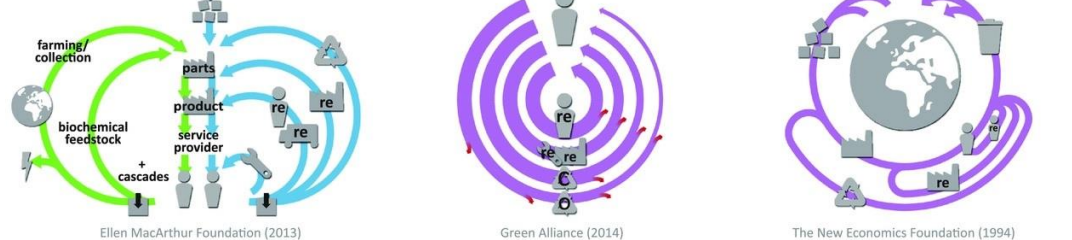
این مدل‌ها به طور هدفمند فاقد برخی جزئیات هستند تا توجه را به ساختار زیربنایی این تفاسیر جلب کنند: در حقیقت نقش عمده ای که راهبردهای «چرخشی» یا افزایش عمر منابع و همچنین دغدغه سازماندهی رابطه بین استراتژی‌ها دارند، را نشان دهد. به دلیل درک گسترده آن، بسیاری از مطالعات تحقیقاتی مفهوم اقتصاد چرخشی را به طور متفاوتی تعریف می‌کنند. اغلب تحقیقات انجام شده تنها بر ابعاد کاهش، استفاده مجدد و بازیافت متمرکز است و اغلب از پارادایم یک تغییر سیستمی به عنوان جوهر مفهوم غفلت می‌کند. جدول ۴ تفاسیر مختلف مفهوم اقتصاد چرخشی را نشان می‌دهد. (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017)

در تحقیقاتی که در این حوزه صورت گرفته اغلب ارزیابی چرخه عمر محصول و اقتصاد چرخشی به صورت مجزا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شده است. لذا این شکاف تحقیقاتی مشاهده شده است که ارزیابی چرخه عمر محصول با رویکرد اقتصاد چرخشی باید مورد مطالعه قرار گیرد. از طرفی اغلب مطالعات به صورت تئوری و آرایه مفاهیم مورد توجه اندیشمندان قرار گرفته است. بنابراین استفاده از رویکرد اقتصاد چرخشی به صورت عملیاتی در زنجیره تامین مخصوصا برای مواردی که مواد اولیه محصولات در زمره عناصر کمیاب قرار می‌گیرد. با توجه به موارد ذکر شده این مقاله به الزامات و راهبردهای رویکرد اقتصاد چرخشی در ارزیابی چرخه عمر محصول توربین بادی به صورت عملیاتی می‌پردازد.

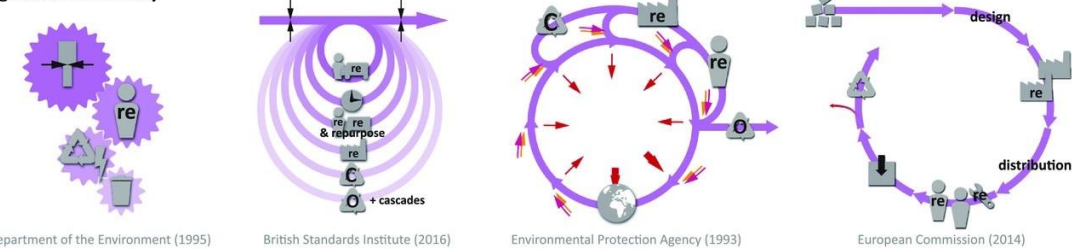
Seminal thinkers/ frameworks



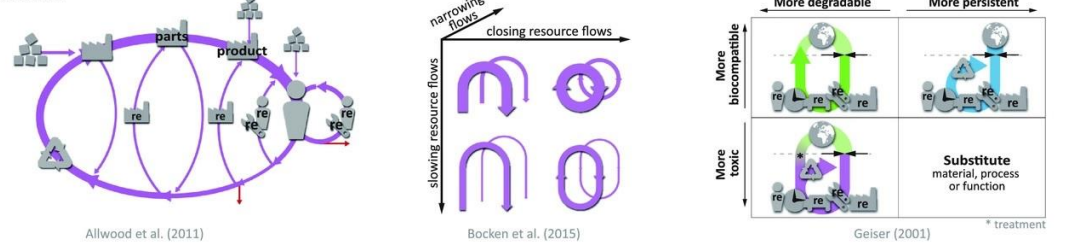
Think tanks



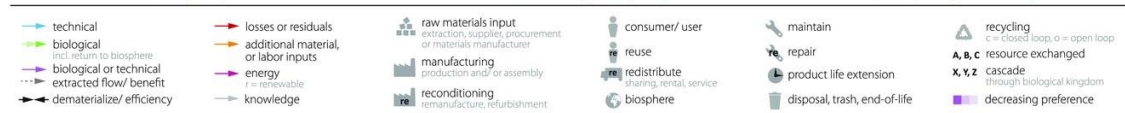
Legislative & advisory



Academia



Business



شکل ۷- مدل‌های مفهومی اقتصاد چرخشی (Kirchherr et al., 2017)

سال ۱۹۹۰، اصطلاح "ارزیابی چرخه عمر" ابداع شد. (Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2018) بعداً این مفهوم توسط شرکت‌های مختلف پیاده‌سازی شد. امروزه ارزیابی چرخه عمر به عنوان "ابزاری برای ارزیابی اثرات بالقوه زیست‌محیطی و منابع مورد استفاده در طول

ارزیابی چرخه عمر توربین بادی مفهوم ارزیابی چرخه عمر (LCA) برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ معرفی شد و توسط هانت به عنوان تجزیه و تحلیل مشخصات منابع و محیط (REPA) نامیده شد و بعداً در

اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین توربین بادی؛ الزامات و راهبردها

تجزیه و تحلیل ارزیابی چرخه عمر را تشریح می‌کند. (ISO, 2006; Standard, 2006) هنوز نیاز به استانداردسازی یک روش و محاسبات وجود دارد تا بتوان چندین مطالعه را با هم مقایسه کرد. (Davidsson, Höök, & Wall, 2012) دیویدسون همچنین بیان می‌کند که بیشتر مطالعات، اعتبار بازیافت را در نظر می‌گیرند، بنابراین تأثیر زیست‌محیطی مواد کمتر است، با این حال هیچ اطمینانی وجود ندارد که مواد در پایان عمرشان به‌درستی بازیافت شوند. مطالعات ارزیابی چرخه عمر مختلفی برای چرخه زندگی یک مزرعه بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در میان تولیدکنندگان توربین بادی، وستاس چندین مطالعه ارزیابی چرخه عمر در مورد توربین‌های بادی خود منتشر کرده است. این مطالعات مواد مورد استفاده در یک توربین را ذکر کرده و تأثیر زیست‌محیطی آن را در طول عمر کامل محاسبه می‌کند. (Razdan & Garrett, 2015, 2017a, 2017b) جدای از مطالعات ارزیابی چرخه عمر منتشر شده توسط سازندگان توربین بادی، چندین مطالعه تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفت. تحقیقات انجام شده با تعدادی از مفروضات ساخته شده، روش ارزیابی، مدل توربین بادی و مکان‌های مزارع بادی در نظر گرفته شده متفاوت است. بنابراین یک تغییر در خروجی اثرات زیست‌محیطی و زمان بازپرداخت انرژی در این مطالعات ارزیابی چرخه عمر مشاهده شد. با این حال، این مطالعات میزان و انواع مواد مورد استفاده در تولید توربین بادی را ذکر می‌کند. [۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰]. (Ardenete, Beccali, Cellura, & Brano, 2008; Chipindula, Botlaguduru, Du, Kommalapati, & Huque, 2018; Crawford, 2009; Demir & Taşkın, 2013; Dones et al., 2007; Gomaa, Rezk, Mustafa, & Al-Dhaifallah, 2019; Guezuraga, Zauner, & Pölz, 2012; Haapala & Prempreeda, 2014; Koltun & Tharumarajah, 2014; Lee & Tzeng, 2008; Lenzen & Munksgaard, 2002; Martínez, Sanz, Pellegrini, Jiménez, &

چرخه عمر محصولات، یعنی از استخراج مواد خام، مراحل تولید و استفاده، تا مدیریت ضایعات تعریف می‌شود. (Hauschild et al., 2018) خروجی‌های مطالعه ارزیابی چرخه عمر ما را قادر می‌سازد تا اثرات یک سیستم را در سطح کل‌نگر مطالعه کنیم. خروجی مطالعات ارزیابی چرخه عمر را می‌توان برای دیدگاه دولتی برای تدوین سیاست‌ها، دیدگاه صنعتی برای محاسبه اثرات محصولات آنها و برای دیدگاه مصرف‌کننده پیاده‌سازی کرد. (Curran, 2010; Hauschild et al., 2018) راهنمای استفاده از مطالعات ارزیابی چرخه عمر را در کاربردهای دنیای واقعی توصیف می‌کند. (Vogtlander, 2010) مراحل اساسی برای انجام یک مطالعه ارزیابی چرخه عمر به شرح زیر است: (Hauschild et al., 2018)

- تعریف هدف و محدوده: برای تنظیم زمینه مطالعه
- تجزیه و تحلیل موجودی: برای جمع‌آوری اطلاعات جریان‌های فیزیکی
- ارزیابی تأثیر: برای تبدیل جریان‌های فیزیکی به اثرات بر محیط زیست
- تفسیر: برای تجزیه و تحلیل نتایج

تعدادی از مطالعات کامل ارزیابی چرخه عمر در مورد مزارع بادی انجام شده است، اکثر آنها برای مزارع بادی خشکی انجام شده‌اند. این مطالعات شامل اثرات توربین‌های بادی در مراحل ساخت، نصب، بهره‌برداری و پایان عمر می‌باشد. از ۷۲ مطالعه ارزیابی چرخه عمر انجام شده توسط Ortegon در سال ۲۰۱۳، تنها ۱۱ مطالعه جنبه‌های انحلال را به طور جزئی شامل می‌شدند. (Ortegon, Nies, & Sutherland, 2013) در این مراحل از چرخه عمر در توربین‌های بادی، مرحله ساخت و نصب حدود ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد. (Thomson & Harrison, 2015)

دیویدسون مطالعات مختلف ارزیابی چرخه عمر را در مزارع بادی مقایسه کرد و دریافت که آنها بر اساس فرضیات متفاوتی هستند. استاندارد ISO 14040 و ISO 14044 اصول و چارچوب و دستورالعمل‌های اساسی برای انجام

شناخته می‌شود. توربین‌های بادی محور افقی مجهز به سیستم‌های کنترل هیدرولیک یا الکتریکی هستند که به طور مداوم گام پره‌ها را تنظیم می‌کنند تا سرعت روتور از حداکثر ظرفیت در بادهای قوی بیشتر نشود. برای جلوگیری از آسیب، اکثر توربین‌های بادی مدرن اگر سرعت باد از ۸۸ کیلومتر در ساعت فراتر رود، چرخش خود را متوقف می‌کنند.

○ ناسل: در بالای برج قرار دارد، ناسل سیستم الکترومکانیکی توربین بادی شامل گیربکس، ژنراتور، اینورترها، هیدرولیک، یاتاقان‌ها و شفت محرک را در خود جای می‌دهد. یک ناسل به یک یاتاقان فرعی ثابت می‌شود که به آن اجازه می‌دهد تا با روتور بچرخد تا با جهت باد مطابقت داشته باشد. ناسل‌های مورد استفاده در توربین‌های بادی در مقیاس کاربردی می‌توانند شامل بیش از ۱۵۰۰ جزء مجزا، بیش از ۱۵ متر طول و بیش از ۳۰۰ تن وزن باشند.

○ ژنراتور: ژنراتورهای توربین بادی در داخل ناسل قرار دارند و انرژی جنبشی تولید شده توسط پره‌های روتور چرخان را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. ژنراتورهای توربین بادی با سایر ژنراتورها متفاوت هستند زیرا باید با منبع گشتاوری که دائماً در نوسان است کنار بیایند. به دلیل مقدار نیرویی که تولید می‌کنند، ژنراتورهای توربین بادی در مقیاس کاربردی به سیستم‌های خنک‌کننده نیاز دارند تا از گرم شدن بیش از حد آنها جلوگیری کند. اغلب ژنراتور در نزدیکی مجرای قرار دارد که از یک فن خنک‌کننده استفاده می‌کند، اما برخی از ژنراتورها مجهز به سیستم خنک‌کننده آب هستند.

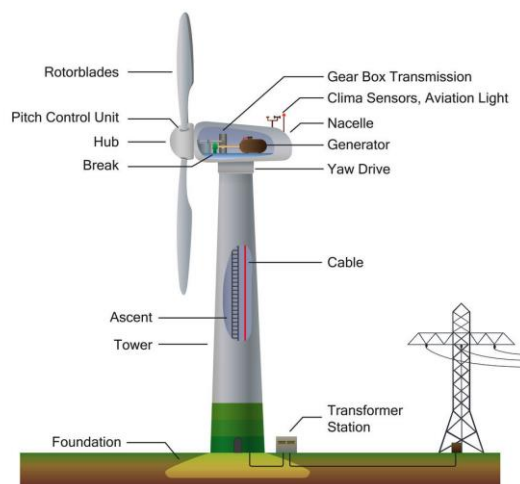
Blanco, 2009; Wagner, Mathur, Wagner, & Mathur, 2013; Weinzettel, Reenaas, Solli, & Hertwich, 2009; Xie, Fu, Liu, & Hwang, 2020) از آنجایی که ارزیابی چرخه عمر فرآیند پیچیده‌ای است که مراحل مختلف چرخه عمر یک توربین را در نظر می‌گیرد، برای تطبیق با سناریوهای پایان عمر آینده، باید تحقیقات بیشتری انجام شود.

توربین‌های بادی دارای پنج جزء اصلی هستند:

○ فونداسیون: برای توربین‌های خشکی، فونداسیون معمولاً یک بلوک بتنی است که اغلب در زیر زمین پنهان می‌شود. توربین‌های دریایی که در خارج از دریا قرار دارند به پایه‌های شناور یا پایه‌های محکم شده در بستر دریا متصل می‌شوند. فونداسیون توربین باید به اندازه کافی سنگین باشد تا بتواند وزن خود توربین و نیروی باد را تحمل کند.

○ برج: برج‌ها از استوانه فولادی برای کاهش کشش ساخته شده‌اند و می‌توانند از ۳ متر تا بیش از ۱۱۰ متر ارتفاع داشته باشند. برج‌ها باید حداقل به اندازه قطر پره‌های توربین در حال چرخش باشند و معمولاً دو تا سه برابر قطر پره‌ها هستند. سرعت باد می‌تواند در ارتفاعات به طور چشمگیری افزایش یابد، بنابراین برج‌های بلندتر در معرض بادهای قوی‌تری قرار می‌گیرند و در نتیجه برق بیشتری تولید می‌کنند.

○ روتور: پره‌های توربین بادی دارای طراحی ایرفویل آیرودینامیک هستند. معمولاً یک روتور توربین بادی دارای سه پره متصل به هاب مرکزی است. پره‌ها توخالی هستند و معمولاً از مواد کامپوزیتی برای حداکثر سبکی و استحکام ساخته می‌شوند. حرکت پره‌های روتور به عنوان گام پره

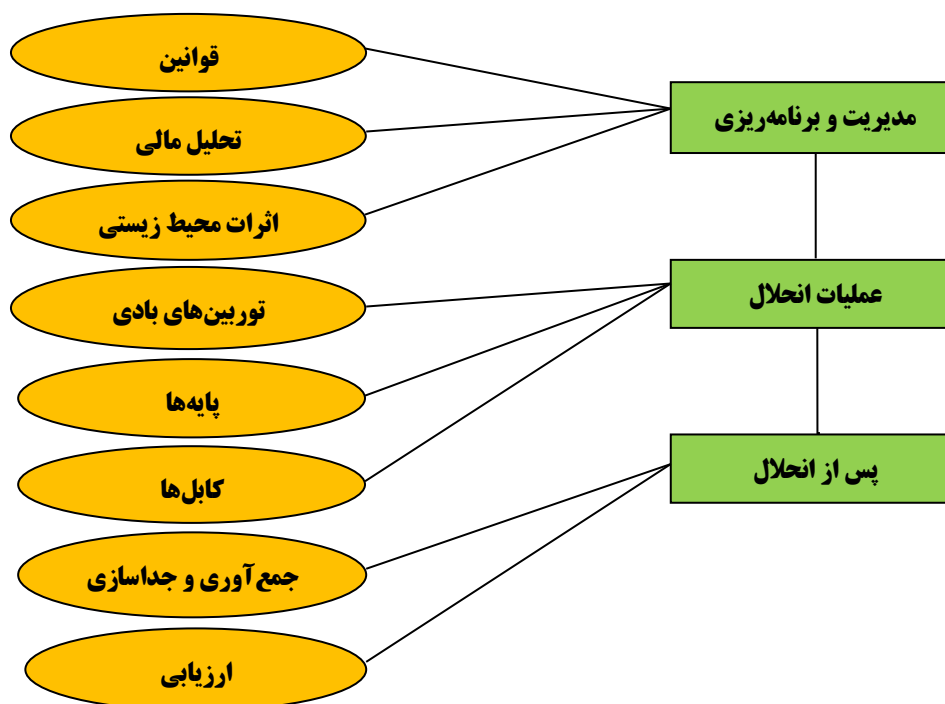


شکل ۸- اجزا اصلی توربین بادی

برای یک توربین بادی خاص به دست آید. به طور مشابه، از ۴ تحقیق منتشر شده از مطالعات چرخه عمر محصول استفاده شد که جرم مواد را در یک توربین بادی به طور کلی مشخص کردند. (Arden et al., 2008; Gomaa et al., 2019; Guezuraga et al., 2012; Wagner et al., 2013) تحقیقات باقی مانده از مطالعات چرخه عمر محصول منتشر شده که جرم مواد را در یک توربین بادی که به اجزای اصلی آن مانند روتور، ناسل و برج تقسیم شده است، مشخص می کند. (Chipindula et al., 2018; Crawford, 2009; Demir & Taşkın, 2013; Dones et al., 2007; Haapala & Prempreeda, 2014; Koltun & Tharumarajah, 2014; Lee & Tzeng, 2008; Lenzen & Munksgaard, 2002; Martínez et al., 2009; Weinzettel et al., 2009; Xie et al., 2020)

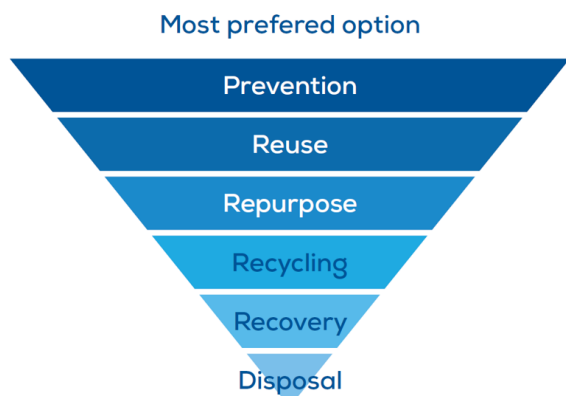
از رده خارج کردن آخرین مرحله در چرخه عمر پروژه است و به تمام اقدامات انجام شده برای بازگرداندن سایت به حالت اولیه آن اشاره دارد. از رده خارج کردن شامل چندین مرحله است که در شکل ۹ نشان داده شده است. ۳ مرحله اصلی به ترتیب با رنگ سبز مشخص شده و وظایف در آن مرحله با رنگ قرمز نشان داده شده است.

مواد مختلف موجود در ساخت مزارع بادی نقطه شروع این تحقیق را تشکیل می دهد. مواد اصلی مورد استفاده در ساخت اجزای توربین بادی و فونداسیون ها و کابل ها در نظر گرفته شده است. برای این تحقیق تصمیم به انتخاب مواد زیر گرفته شد: فولاد، چدن، آلومینیوم، مس، فایبر گلاس، اپوکسی، آهنربا. این مواد تا ۹۸ درصد از جرم کل مواد در توربین بادی را تشکیل می دهند. همچنین مواد مذکور نمایانگر مصالحی با اثرات اقتصادی و زیست محیطی قابل توجه است. چندین مطالعه منتشر شده چرخه عمر محصول برای جمع آوری مقادیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در مجموع ۳۲ مطالعه چرخه عمر محصول با جزئیات کافی در داده های جرم موادی که می توان در این مقاله استفاده کرد مرتبط بودند. از این مطالعات ارزیابی شده، چرخه عمر محصول منتشر شده شرکت Vestas استفاده شد. (Garrett & Ronde, 2014; Razdan & Garrett, 2015, 2017a, 2017b) این مطالعات منتشر شده توسط Vestas، و مطالعات مدارک و مستندات، جرم مواد مورد استفاده در یک مزرعه بادی با توربین های بادی مختلف را مشخص می کند. این مطالعات نشان دهنده مجموع مواد مورد استفاده برای تمام توربین های بادی در مزرعه بادی در نظر گرفته شده است، بنابراین با تقسیم آن بر تعداد توربین ها، تبدیلی به دست آمد تا جرم مواد مورد استفاده



شکل ۹- مراحل پایان عمر توربین بادی

به پردازش بیشتری دارد. به عنوان مثال در صورت بازیافت یک محصول پس از عمر آن، مواد موجود در محصول برای به دست آوردن مواد اولیه بازیافت می شود. با این حال، تعمیر محصول یا استفاده مجدد از آن با حفظ قابلیت استفاده با حداقل تلاش بسیار سودمند است.



شکل ۱۰- رویکرد بهینه اصل اقتصاد چرخشی

همانطور که قبلاً بحث شد، با دفع مناسب اجزاء، می توان مزایای مالی و زیست محیطی را به دست آورد. در حال حاضر بازیافت مواد تنها تمرکز اصلی صنعت بادی است. اما اصول اقتصاد چرخشی پیشنهاد می کند که دامنه را گسترش داده و پتانسیل را در دفع اجزای از کار افتاده به حداکثر برساند. هدف اصل اقتصاد چرخشی این است که اطمینان حاصل شود که محصولات یا مواد دوباره با بالاترین کیفیت ممکن وارد سیستم می شوند. شکل ۱۰ رویکرد بهینه را طبق اصول اقتصاد چرخشی در دفع قطعات نشان می دهد. جلوگیری از مصرف منابع یا کاهش مقدار مواد مورد استفاده، گزینه برتر برای کاهش ضایعات در دسترس است. شکل ۱۰ نقاط ورود متفاوتی به سیستم مانند نگهداری (تعمیر)، استفاده مجدد، ساخت مجدد و بازیافت محصول در پایان عمر آن را نشان می دهد. هر یک از این مراحل در مقایسه با مرحله قبل نیاز

جدول ۵- نرخ بازیافت مواد توربین بادی

نتیجه

در مورد توربین‌های بادی، تمرکز اولیه باید بر کاهش میزان ضایعات تولیدی باشد، این امر می‌تواند با کاهش انبوه قطعات و به حداقل رساندن ضایعات در طول تولید به دست آید. در مرحله بهره‌برداری، توربین بادی باید به درستی نگهداری شود و تعمیرات مورد نیاز برای افزایش طول عمر آن انجام شود. هنگامی که کار تعمیر بیشتر غیرممکن می‌شود، اجزای محصول می‌توانند مستقیماً برای سایر توربین‌های بادی مجدداً استفاده شوند. اگر برخی از اجزای اصلی نیاز به جایگزینی داشته باشند، باید بازسازی انجام شود. قطعات عملکردی سایر توربین‌ها می‌توانند برای بازسازی یک توربین بادی در حال کار استفاده شوند. همچنین، قطعات پس از برخی فرایندها حتی می‌توانند برای کاربردهایی غیر از یک توربین بادی تغییر کاربری دهند. اگر جزء به عنوان یک کل نتواند کاربردی باشد، مواد موجود در آن برای به‌دست آوردن ماده خام بازیافت می‌شوند. اگر بازیافت امکان پذیر نباشد، انرژی حاصل از جزء را می‌توان با سوزاندن مواد برای استفاده در سایر فرایندها به کار برد. در نهایت، دفن زباله یا سوزاندن مواد بدون هیچ گونه بازیافتی کمترین مزیت را در هنگام دفع زباله دارد. توانایی اجرای این مراحل بستگی به نحوه از کار انداختن و جداسازی توربین‌های بادی دارد.

برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (UNEP) میانگین جهانی نرخ بازیافت فلزات مختلف را تجزیه و تحلیل کرد. نرخ بازیافت پایان عمر فولاد بین ۷۰ تا ۹۰ درصد و آلومینیوم بین ۴۰ تا ۷۰ درصد و مس حدود ۵۰ درصد متغیر است. (Graedel et al., 2011) نرخ با توجه به کیفیت فلز، غلظت در یک جزء و زیرساخت‌های موجود متفاوت است. در مورد توربین‌های بادی، به دلیل مقادیر زیاد مواد در اجزای آن، نرخ بازیافت در مقایسه با میانگین جهانی بالاست. جدول ۵ نرخ بازیافت مواد را در یک مزرعه بادی بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده در گزارش بازیافت توربین‌های بادی نشان می‌دهد. (Andersen, Bonou, Beauson, & Brøndsted, 2014) در حال حاضر بیشتر پره‌ها برای سوزاندن به کوره‌های سیمان ریخته می‌شوند که در این مقاله به عنوان بازیافت معرفی نشده است. بنابراین فرض می‌شود که ۱۵٪ از فایبرگلاس و اپوکسی به مواد الیاف مشابه بازیافت می‌شود.

ردیف	ماده	نرخ بازیافت
۱	آهن	۹۲٪
۲	چدن	۹۸٪
۳	فایبرگلاس	۱۵٪
۴	اپوکسی	۱۵٪
۵	آلومینیوم	۹۵٪
۶	مس	۹۸٪
۷	آهنربا	۵٪
۸	فوندانسیون	۵۰٪
۹	کابل	۹۰٪

منابع

- Andersen, P. D., Bonou, A., Beauson, J., & Brøndsted, P. (2014). Recycling of wind turbines *DTU International Energy Report 2014: Wind energy—drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix* (pp. 91-97): Technical University of Denmark.
- Ankrah, P. P. T. (2022). *Technical Feasibility of Decomtools Vessel Monopile Extraction System*. Høgskulen på Vestlandet .
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Brano, V. L. (2008). Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 200-217 .
- Bech, N. M. (2017). *A Circular Economy and Ecosystem Service approach to offshore wind power installations*. Retrieved from https://ecoeffective.biz/wp-content/uploads/2020/08/NIRAS-background-report_FINAL.pdf
- BLADE, A. SUSTAINABLE DECOMMISSIONING: WIND TURBINE BLADE RECYCLING .
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The emergence of circular economy: a new framing around prolonging resource productivity. *Journal of industrial ecology*, ۶۰۳-۶۱۴, (۳)۲۱ ,
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU. A Foresight Study .
- Bocken, N. M., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of industrial and production engineering*, 33(5), 308-320 .
- Cao, Z., O'sullivan, C., Tan, J., Kalvig, P., Ciacci, L., Chen, W., . . . Liu, G. (2019). Resourcing the fairytale country with wind power: a dynamic material flow analysis. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11313-11322 .
- Chipindula, J., Botlaguduru, V. S. V., Du, H., Kommalapati, R. R., & Huque, Z. (2018). Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in Texas. *Sustainability*, 10(6), 2022 .
- Commission, E. (2020). *Circular Economy Action Plan* .
- Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carreón, J. R., & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, conservation and recycling*, 151, 104498 .
- Crawford, R. H. (2009). Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2653-2660 .
- Curran, M. A. (2008). Life-Cycle Assessment. *Encyclopedia of Ecology*, 2016(4), 7 .
- Davidsson, S., Höök, M., & Wall, G. (2012). A review of life cycle assessments on wind energy systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 729-742 .

- Demir, N., & Taşkın, A. (2013). Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri. *Journal of Cleaner Production*, 54, 253-263 .
- Dones, R., Bauer, C., Bolliger, R., Burger, B., Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R., . . . Tuchschnid, M. (2007). *Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries*. Retrieved from
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of cleaner production*, 142, 2741-2751 .
- Europar, W. (2017). Discussion Paper on Managing Composite Blade Waste .
- Fehrer, J. A., & Wieland, H. (2021). A systemic logic for circular business models. *Journal of Business Research*, 125, 609-620 .
- Garrett, P., & Ronde, K. (2014). Life cycle assessment of electricity production from an onshore V126-3.3 MW wind plant. *Vestas Wind Systems A/S*, 116 .
- Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P., Pigosso, D. C., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of cleaner production*, 277, 123741 .
- Ghisellini, P., & Ulgiati, S. (2020). Managing the transition to the circular economy *Handbook of the circular economy* (pp. 491-504): Edward Elgar Publishing.
- Gomaa, M. R., Rezk, H., Mustafa, R. J., & Al-Dhaifallah, M. (2019). Evaluating the environmental impacts and energy performance of a wind farm system utilizing the life-cycle assessment method: A practical case study. *Energies*, 12(17), 3263 .
- Gonzalez, E., Ortego, A., Topham, E., & Valero, A. (2018). *Is the future development of wind energy compromised by the availability of raw materials?* Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Graedel, T., Allwood, J., Birat, J., Reck, B., Sibley, S., Sonnemann, G . . . , Hagelüken, C. (2011). UNEP Recycling rates of metals-A Status Report. *A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel* .
- Guezuraga, B., Zauner, R., & Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1), 37-44 .
- Guldmann, E., Bocken, N. M., & Brezet, H. (2019). A design thinking framework for circular business model innovation. *Journal of Business Models*, 7(1), 39-70 .
- Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (۲۰۱۴) . Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), 170-185 .
- Hao, S., Kuah, A. T., Rudd, C. D., Wong, K. H., Lai, N. Y. G., Mao, J., & Liu, X. (2020). A circular economy approach to green energy: Wind turbine, waste, and material recovery. *Science of the Total Environment*, 702, 135054 .
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment* (Vol. 2018): Springer.
- ISO, I. (2006). 14040. *Environmental management—life cycle assessment—principles and framework*, 578, 235-248 .
- Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 165-176 .

- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232 .
- Koltun, P., & Tharumarajah, A. (2014). Life cycle impact of rare earth elements. *International Scholarly Research Notices*, 2014(1), 907536 .
- Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., & Birkie, S. E. (2018). Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of cleaner production*, 175, 544-552 .
- Lee, Y.-M., & Tzeng, Y.-E. (۲۰۰۸) . Development and life-cycle inventory analysis of wind energy in Taiwan. *Journal of Energy Engineering*, 134(2), 53-57 .
- Lenzen, M., & Munksgaard, J. (2002). Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. *Renewable energy*, 26(3), ۳۳۹-۳۶۲ .
- Linder, M., & Williander, M. (2017). Circular business model innovation: inherent uncertainties. *Business strategy and the environment*, 26(2), 182-196 .
- Macarthur, E., & Heading, H. (2019). How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Found*, 1, 1-71 .
- Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E., & Blanco, J. (2009). Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable energy*, 34(3), 667-673 .
- Marylise Schmid, W. (2020). *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. Retrieved from [https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-](https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf)
- [Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf](https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf)
- Naqvi, S., Prabhakara, H. M., Bramer, E., Dierkes, W., Akkerman, R., & Brem, G. (2018). A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resources, conservation and recycling*, 136, 118-129 .
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39, 191-199 .
- Parliament, E. (2019). *EU Critical raw materials in the circular economy and strategic value chains and EU R&D funding*. Retrieved from <https://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2019/01/The-Periodic-Table-and-us-Handley-European-Commission.pdf>
- Psomopoulos, C. S., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G. C., & Pachos, P. (2019). A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials. *Recycling*, 4, ۷ .
- Razdan, P., & Garrett, P. (2015). Life cycle assessment of electricity production from an onshore V110-2.0 MW Wind Plant. *Vestas Wind Systems A/S* .
- Razdan, P., & Garrett, P. (2017a). Life cycle assessment of electricity production from an onshore V112 ۳,۴۵-MW wind plant. *Aarhus: vestas wind systems A/S* .
- Razdan, P., & Garrett, P. (2017b). Life Cycle Assessment of electricity production from an onshore V136-3.45 MW Wind Plant. *Vestas Wind Systems A/S, Aarhus, Denmark* .

- Sakellariou, N. (2018). Current and potential decommissioning scenarios for end-of-life composite wind blades. *Energy Systems*, 9, 981-1023 .
- Sillanpää, M., & Ncibi, C. (2019). *The circular economy: Case studies about the transition from the linear economy*: Academic Press.
- Spyroudi, A & .Catapult, O. (2021). Carbon footprint of offshore wind farm components. *Catapult Offshore Wind Energy* .
- Standard, I. (2006). *Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines* (Vol. 14044): ISO.
- Thomson, C., & Harrison, G. (۲۰۱۵). Life cycle costs and carbon emissions of wind power: executive summary .
- Topham, E., & McMillan, D. (2017). Sustainable decommissioning of an offshore wind farm. *Renewable energy*, 102, 470-480 .
- Vogtlander, J. G. (2010). *A practical guide to LCA, for students, designers and business managers; Cradle-to-Grave and Cradle-to-Cradle: VSSD*.
- Wagner, H.-J., Mathur, J., Wagner, H.-J., & Mathur, J. (2013). Life Cycle Assessment of a Wind Farm. *Introduction to Wind Energy Systems: Basics, Technology and Operation* . ۸۵-۹۲ ,
- Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., & Hertwich, E. G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy*, 34(3), 742-747 .
- Xie, J.-b., Fu, J.-x., Liu, S.-y., & Hwang, W.-s. (2020). Assessments of carbon footprint and energy analysis of three wind farms. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120159 .
- انرژی (م. ا. ص. و. م. گ. (۱۴۰۲). مسائل راهبردی بخش انرژی در برنامه هفتم توسعه: توسعه انرژی Retrieved from <https://rc.majlis.ir/fa/report/download/1783285>
- آمار، د. ب. ر. و. ت. م. گ. ب. ر. و. (۱۴۰۳). گزارش آماری ماهانه انرژی های تجدیدپذیر. Retrieved from <https://www.satba.gov.ir/fa/satba/monthlystatisticalreportofrenewableenergies-%DA%AF%D8%B2%D8%A7%D8%B1%D8%B4-%D8%A2%D9%85%D8%A7%D8%B1%DB%8C-%D9%85%D8%A7%D9%87%D8%A7%D9%86%D9%87-%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D9%87%D8%A7%DB%8C-%D8%AA%D8%AC%D8%AF%DB%8C%D8%AF%D9%BE%D8%B0%DB%8C%D8%B1>

Circular Economy in Wind Turbine Supply Chain; Requirements and Strategies

Farzad Yavari

Department of Management and Economics, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Nazanin Pilevari

Department of Management, WN.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Reza Radfar

Department of Management and Economics, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

In this article, the requirements and strategies of the circular economy concept in order to create sustainable value in the supply chain of the wind turbine industry have been discussed. In fact, the purpose of the circular economy concept is the highest possible value of a product or a material over time, as well as reducing the consumption of raw materials and increasing the productivity of resources. In this research, the application of the circular economy with the approach of reducing waste, reducing the environmental effects of production and consumption, increasing the productivity and efficiency of resources, and addressing the emerging concerns related to the security and lack of resources in the production of wind turbines, as well as their end of life, are examined. It is expected that wind energy will go through a growing trend in production, installation and commissioning in the world. In the supply chain for wind generators, the highest risk is related to raw materials. Most of the materials used in the production of wind turbines, such as among the critical and strategic materials. In Iran, the capacity of renewable power plants has grown significantly. After wind turbines are decommissioned, materials from wind turbines must be disposed of effectively. In this article, the separation and disposal of these components and materials and the environmental effects and recycling potential of wind farms are evaluated. This paper deals with the relationship between end-of-life, circular economy and life cycle assessment of wind turbines.

Keywords: Circular economy, wind turbine, renewable energy, supply chain, resource efficiency