تاریخ دریافت: ۷ اردیبهشت ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۴۰۲ صفحات ۱۹۴ الی ۲۱۶

بررسی آثار محیط‌زیستی توسعه استفاده از توربین‌های بادی و نیاز به سیاست‌گذاری‌های وابسته

مریم موذن
استادیار گروه مهندسی برق و انرژی دانشگاه بناب
moazen@ubonab.ac.ir

مهدی ثقفی*
استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه بناب
msaghafi@ubonab.ac.ir

چکیده: سهم انرژی‌های تجدیدپذیر علی‌الخصوص نیروگاه‌های بادی در سبد تأمین انرژی کشورها در حال افزایش روزافزون است. تولید توان الکتریکی در توربین‌های بادی با کمترین وابستگی به مصرف آب و انتشار کربن انجام می‌شود و به همین دلیل این نیروگاه‌ها در زمره صنایع سبز قرار می‌گیرند. ولی بایستی در نظر داشت که انجام هرگونه فعالیت صنعتی حتی در صنایع سبز نیز می‌تواند تأثیرات مخربی بر محیط‌زیست پیرامون خود داشته باشد. بررسی و شناسایی اثرات محیط‌زیستی می‌تواند نقش اساسی در وضع و اعمال قوانین و مقررات مرتبط با جایابی، احداث و بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها داشته باشد و منتج به هرچه سبزتر شدن این صنعت شود. این مقاله به اثرات گوناگون محیط زیستی نیروگاه‌های بادی و بروزترین روش‌های کاهش این اثرات که در مراجع علمی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند می‌پردازد. براین اساس مقدمات ساختاری برای کمی سازی تأثیرات نامطلوب و اتخاذ تصمیم مناسب برای جایابی مناسب توربین‌های بادی با توجه به شرایط هر منطقه فراهم آورده شده است. عمده‌ترین اثرات نامطلوب بررسی شده شامل: نیاز هم‌زمان به نیروگاه‌های فسیلی، آلودگی صوتی، تغییر منظره، برخورد پرندگان، چشمک زدن سایه، تغییرات در اکوسیستم منطقه در حین ساخت و بهره‌برداری نیروگاه، انتشار کربن و ایجاد سایر آلاینده‌ها در فرآیند ساخت، بازیافت در پایان عمر و از کار اندازی، و وقوع حوادث در نیروگاه‌های بادی بوده است. در خاتمه وضعیت فعلی قوانین و مقررات محیط زیستی ناظر بر این نوع از نیروگاه‌ها در ایران و میزان اثرگذاری این سیاست‌ها بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، آثار محیط زیستی، انرژی‌های تجدیدپذیر، تحلیل چرخه حیات، صنعت سبز

* نویسنده مسئول

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

مقدمه

ایجاد هر پروژه صنعتی در یک منطقه می‌تواند منجر به تغییرات عمده یا جزئی محیط زیستی، به صورت موقت یا دائمی گردد و نیروگاه‌های بادی از این امر مستثنی نیستند. بهره‌برداری از انرژی باد برای ایجاد توان الکتریکی مورد نیاز در جوامع انسانی در مقایسه با سایر انواع دیگر انرژی، تأثیر کمتری روی محیط‌زیست دارد و می‌توان با پرداختن به تأثیرات نامطلوب نیروگاه‌های بادی، به سبزتر شدن تولید انرژی از این طریق کمک کرد (Ledec et al., ۲۰۱۱). در این مقاله به تأثیرات نامطلوب ساخت این نیروگاه‌ها بر محیط‌زیست اطراف پرداخته شده است، تا بتوان با شناخت این تأثیرات و در نظر گرفتن آن‌ها در طول فرآیندهای طراحی، جایابی، ساخت، بهره‌برداری و جمع‌آوری نیروگاه‌های بادی، در کنار بهره بردن از مزایای این صنعت سبز، تأثیرات نامطلوب آن را نیز به حداقل ممکن کاهش داد.

در ادامه، تأثیرات مثبت محیط زیستی استفاده از توربین‌های بادی بر کاهش آلودگی هوا، مصرف آب و سطح اشغال شده زمین آورده شده است:

- تولید انرژی مورد نیاز الکتریکی از طریق توربین‌های بادی می‌تواند منجر به جایگزینی و کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی گردد و از این طریق از آزادسازی دی‌اکسید کربن در اتمسفر و به‌تبع آن از گرمایش زمین جلوگیری کند (Saidur et al., ۲۰۱۱). سوزاندن سوخت‌های فسیلی نظیر زغال‌سنگ در نیروگاه‌های حرارتی می‌تواند تا حدود ۸۷۰ gCO_2/kWh گاز دی‌اکسید کربن آزاد کند (H. Li et al., ۲۰۲۲; Hosseini et al., ۲۰۲۰) که در صورت جایگزینی با نیروگاه‌های بادی، به میزان قابل ملاحظه‌ای از تولید این گاز گلخانه‌ای کاسته می‌شود. میزان اثر ساخت نیروگاه‌های بادی بر گرمایش زمین از طریق آزادسازی دی‌اکسید کربن وابسته به محل احداث، اندازه و فناوری ساخت این نوع نیروگاه‌ها است که برای چرخه حیات (تمام فرآیندهای ساخت، نصب، بهره‌برداری، و از کار اندازی) این نیروگاه‌ها در مطالعات مختلف در حدود gCO_2/kWh ۵/۷ تا gCO_2/kWh ۸۶/۵ گزارش شده است (Vélez-Henao et al., ۲۰۲۱). جایگزینی سوخت فسیلی با انرژی باد، جدای از جلوگیری از آزادسازی کربن در اتمسفر، از آزادسازی سایر گازهای مضر تولید شده در فرآیند احتراق سوخت‌های فسیلی نظیر اکسیدهای گوگرد و نیتروژن نیز جلوگیری می‌کند (Mendecka et al., ۲۰۱۹) و از وقوع باران‌های اسیدی می‌کاهد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

- توربین‌های بادی علاوه بر اینکه هوا را آلوده نمی‌کنند، در مقایسه با انواع دیگر روش‌های تولید انرژی نظیر سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای، منجر به آلودگی آب و خاک نیز نمی‌شوند. نیروگاه‌های بادی در زمان بهره‌برداری جهت تولید توان الکتریکی منجر به آزادسازی مواد آلوده‌کننده آب نمی‌شوند. از طرفی مشابه نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای نیاز به مصرف آب جهت مصارف خنک‌سازی ندارند و منجر به گرمایش آب (آلودگی حرارتی آب) رودخانه‌ها و دریاچه‌های اطراف نمی‌شوند. همچنین در حین بهره‌برداری این نیروگاه‌ها برای تولید انرژی از باد، پسماند ماندگار نظیر مواد رادیواکتیو ایجاد نمی‌شود.
- نیروگاه‌های بادی در مقایسه با سایر منابع تولید انرژی، فضای کمتری را روی زمین اشغال می‌کنند ولی ایجاد فاصله مابین توربین‌های بادی متعدد در یک مزرعه بادی، نیاز به سطح بزرگ‌تری برای جایابی آن‌ها را ایجاد می‌کند. در مزارع بادی حدود ۹۶٪ تا ۹۹٪ از سطح زمین جهت فاصله‌گذاری مابین توربین‌ها برای تولید برق کاربرد ندارد (Msigwa et al., ۲۰۲۲). استفاده از نواحی فراساحلی برای نصب این توربین‌ها مشکل زمین را برای مناطق مجاور دریا تا حد زیادی مرتفع می‌کند. از طرفی، امکان استفاده هم‌زمان از زمین‌های مزارع بادی برای کاربری‌های دیگر نظیر کشاورزی نیز وجود دارد. این امکان در انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر نیروگاه‌های خورشیدی یا نیروگاه‌های آبی وجود ندارد. به‌خصوص که این نوع نیروگاه در مقایسه با نیروگاه‌های آبی منجر به زیر آب رفتن زمین‌های اطراف نمی‌شوند. از طرفی، نیروگاه‌های بادی با ایجاد آشفتگی در جریان هوای عبوری از روی سطح زمین در مزارع علی‌الخصوص در طول شب منجر به افزایش دمای سطح زمین در مزارع بادی نسبت به سایر زمین‌های کشاورزی می‌شوند، که با ماهواره‌های پایشی قابل تشخیص است (Rajewski et al., ۲۰۱٤). این افزایش دما و آشفتگی جریان هوا در نزدیکی سطح زمین منجر به جلوگیری از تشکیل شبنم و یا تبخیر سریع‌تر شبنم تشکیل شده روی گیاه می‌شود که تأثیر مثبتی روی کشت محصولاتی نظیر سویا و ذرت دارد (Takle, ۲۰۱۸).

پس از اشاره به تأثیرات مثبت استفاده از توربین‌های بادی برای تولید انرژی در این بخش، در بخش ۲ این مقاله، به تأثیرات نامطلوب مختلف توربین‌های بادی بر محیط‌زیست نظیر نیاز هم‌زمان به نیروگاه‌های فسیلی، آلودگی صوتی، تغییر منظره، برخورد پرندگان، چشمک زدن سایه، تغییرات در اکوسیستم منطقه در حین ساخت و بهره‌برداری نیروگاه، انتشار کربن و ایجاد سایر آلاینده‌ها در فرآیند

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

ساخت، بازیافت در پایان عمر و از کار اندازی، و وقوع حوادث در نیروگاه‌های بادی پرداخته شده است. در بخش ۳ نیز تأثیر محدودیت‌های محیط زیستی بر سایر معیارهای مؤثر در تصمیم‌گیری جهت جانمایی توربین‌های بادی در ایران بررسی شده است. در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش ۴ انجام شده است.

مقایسه جدیدترین راه‌حل‌های ارائه شده در مراجع اخیر برای کاهش اثرات محیط زیستی نامطلوب توربین‌های بادی از نقاط قوت این مقاله نسبت به سایر مقالات مشابه است (Aqajani et al., ۲۰۱۵; Bairamvand et al., ۲۰۲۲Nowroozipour et al., ۲۰۲۲;). با جمع‌بندی اثرات محیط زیستی گوناگون نیروگاه‌های بادی که در مراجع اخیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، می‌توان مقدمات ایجاد ساختاری برای کمی سازی این تأثیرات نامطلوب و اتخاذ تصمیم مناسب برای جایابی مناسب توربین‌های بادی با توجه به شرایط هر منطقه را فراهم آورد. همچنین، بررسی وضعیت فعلی قوانین و مقررات محیط زیستی ناظر بر نیروگاه‌های بادی در ایران و میزان اثرگذاری این سیاست‌ها دیگر نقطه قوت این مقاله است. از محدودیت‌های این مقاله، عدم امکان ورود به تک‌تک تأثیرات محیط زیستی با توجه به اقلیم‌های متفاوت ایران است که بعضاً نیازمند انجام پژوهش‌های آماری و تجربی در محل‌های پیشنهادی برای نصب توربین‌های بادی است.

اثرات نامطلوب محیط زیستی

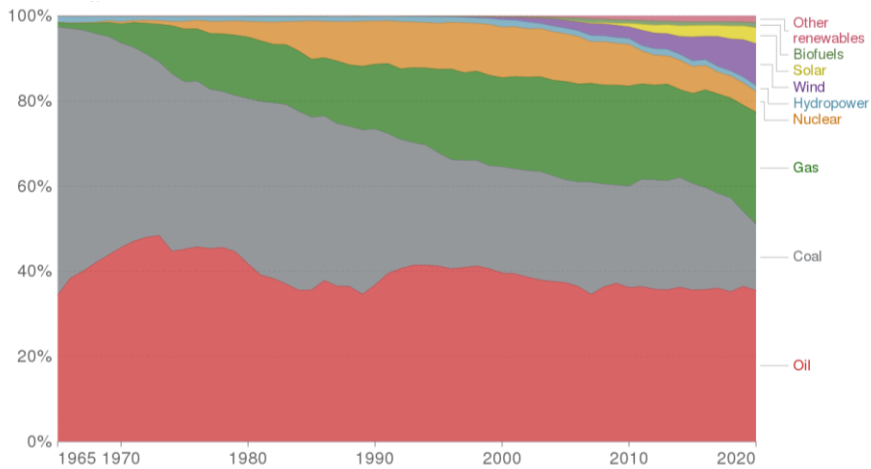
در این قسمت تأثیرات نامطلوب مطالعه شده در مراجع مختلف در ۱۰ دسته کلی جمع‌بندی شده است. هدف از این دسته‌بندی، ارائه ساختاری جهت مطالعه و کمی سازی این تأثیرات نامطلوب، و در نهایت اخذ تصمیم مناسب برای جایابی و ساخت توربین‌های بادی در هر منطقه با توجه به خصوصیات و محدودیت‌های ذاتی آن منطقه است.

الف) نیاز هم‌زمان به نیروگاه‌های فسیلی (عدم تولید پایدار و یکنواخت)

استفاده از نیروگاه‌های بادی برای جایگزینی برق تولیدی از سوخت‌های فسیلی، منجر به کاهش تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن می‌شود، ولی به دلیل ماهیت ناپایدار انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر باد و نور خورشید، استفاده یکنواخت از این منابع در طول زمان مقدور نیست. ازاین‌رو

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

هم‌زمان با توسعه نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌هایی با قابلیت سریع روی کار آمدن در مواقع کاهش تولید انرژی از باد، نظیر نیروگاه‌های گازی نیز باید توسعه یابند که به نوعی هزینه پنهان توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند و خود سهمی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. البته به‌هرحال حتی استفاده مقطعی از نیروگاه‌های بادی جهت جایگزینی سوخت‌های فسیلی (علی‌الخصوص زغال‌سنگ)، سهم تولید گازهای گلخانه‌ای از این منشأ را کاهش می‌دهد، ولی کاملاً حذف نمی‌کند. توسعه سهم استفاده از نیروگاه‌های بادی در تولید انرژی کشور آلمان در شکل ۱ دیده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش سهم تولید انرژی تجدیدپذیر باد و نور خورشید، سهم انرژی حاصل از گاز طبیعی نیز افزایش یافته است. راهکار دیگر ارائه شده برای جبران عدم تولید پایدار نیروگاه‌های بادی، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی است. فناوری‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی طولانی مدت در مقیاس نیروگاهی وجود دارد: از قبیل پمپاژ آب به مخازن مرتفع، ذخیره هوای فشرده، ذخیره انرژی گرمایی و استفاده از پیل‌های سوختی (Simla et al., ۲۰۲۰). ولی باید در نظر داشت که استفاده از این ذخیره‌سازها علاوه بر افزایش هزینه انرژی تولیدی از باد، منجر به ساخت‌وساز بیشتر و در نتیجه انتشار بیشتر کربن و سایر تأثیرات محیط زیستی خاص این ذخیره‌سازها خواهد شد.



شکل ۱: سهم هر یک از انواع انرژی در تولید الکتریسیته در کشور آلمان (Wikipedia, ۲۰۲۳)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

ب) آلودگی صوتی

صدای ناشی از کارکرد نیروگاه‌های بادی می‌تواند ناشی از حرکت تجهیزات مکانیکی یا جریان هوا باشد. جعبه‌دنده و یاتاقان‌های محور توربین تجهیزات متحرکی هستند که عمده تولید صدا در نیروگاه‌های بادی را موجب می‌شوند. عبور جریان هوا از روی پره‌های توربین‌های بادی عامل دیگر تولید صدا در این نوع از نیروگاه‌ها است (شکل ۲). توربین‌های محور افقی در مقایسه با توربین‌های محور عمودی به علت سرعت خطی بالاتر نوک پره، صدای بیشتری در اثر عبور جریان هوا ایجاد می‌کنند و در صورت نصب توربین‌های بادی در مجاورت مناطق پرجمعیت، استفاده از توربین‌های بادی با محور عمودی پیشنهاد می‌شود (S. Li et al., ۲۰۲۲). بنا به جدیدترین بررسی‌های میدانی و آماری، صدای ناشی از توربین‌های بادی افقی در صورت نصب در نزدیکی مناطق مسکونی، می‌تواند برای برخی افراد (تا ۳۰٪ جمعیت در برخی مطالعات) علی‌الخصوص در سکوت شب و زمان خواب آزاردهنده باشد و یا در طول روز منجر به کاهش توانایی تمرکز آن‌ها شود (Gaßner et al., ۲۰۲۲). حرکت متناوب توربین‌های بادی بزرگ علاوه بر ایجاد امواج صوتی، امواج حرکت (لرزه) زمین نیز ایجاد می‌کند ولی عموماً این لرزه‌ها در حد احساس انسان قرار نمی‌گیرند و موجب نارضایتی افراد ساکن در محل نمی‌شود. هرچند که لازم است تا تجهیزات حساس به لرزه، نظیر سامانه‌های هشدار رانش زمین و لرزه‌نگاری به اندازه کافی از این نیروگاه‌ها دور باشند.



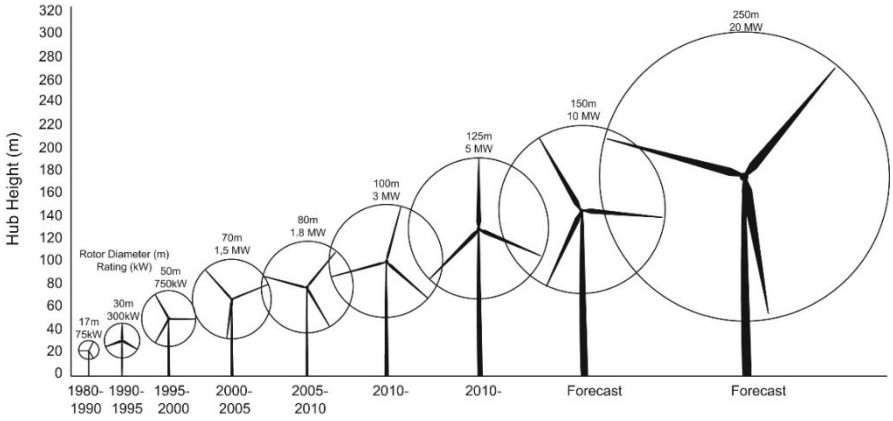
شکل ۲: نویز ایجاد شده یک توربین بادی در صفحه چرخش پره (Sedaghatizadeh et al., ۲۰۱۷)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

صدای ایجاد شده از چرخش توربین‌های بادی، علاوه بر تأثیر بر انسان می‌تواند بر اکوسیستم محل نصب نیروگاه‌های بادی نیز مؤثر باشد و برخی از پرندگان یا پستانداران حساس به صدا را مجبور به ترک آن مناطق کند. بررسی کمی این اثر نیازمند مطالعات روی گونه‌های حساس و مهم از جانداران قبل و پس از احداث نیروگاه‌های بادی است (Coppes et al., ۲۰۲۰).

ج) تغییر منظره

هر سازه مصنوعی به‌هرحال موجب تغییر منظره محیط اجرا خواهد شد ولی نیروگاه‌های بادی به علت ارتفاع بلند، از فواصل دور نیز مشاهده شده و شعاع بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. توربین‌های بادی نسل‌های جدید معمولاً با ظرفیت تولید انرژی بالاتر و به‌تبع آن با ابعاد بسیار بزرگ‌تر ساخته می‌شوند و این امر منجر می‌شود تا از فواصل دورتر نیز دیده شوند (شکل ۳). میزان مورد پسند بودن ظاهر توربین‌های بادی و خوشایند بودن بصری نصب آن‌ها، مسئله‌ای بسیار سلیقه‌ای است. مرجع (Msigwa et al., ۲۰۲۲) با جمع‌بندی ۶ پژوهش انجام شده در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰، نشان می‌دهد که لااقل ۳۶٪ از ساکنان این مناطق از تغییر منظر ایجاد شده توسط توربین‌های بادی ناراضی هستند. نارضایتی از تغییر منظره حتی در برخی از جوامع می‌تواند موجب کاهش ارزش املاک مسکونی شود که منظر آن‌ها به طور عمده توسط توربین‌های بادی تحت تأثیر قرار گرفته است (Sunak et al., ۲۰۱۶).

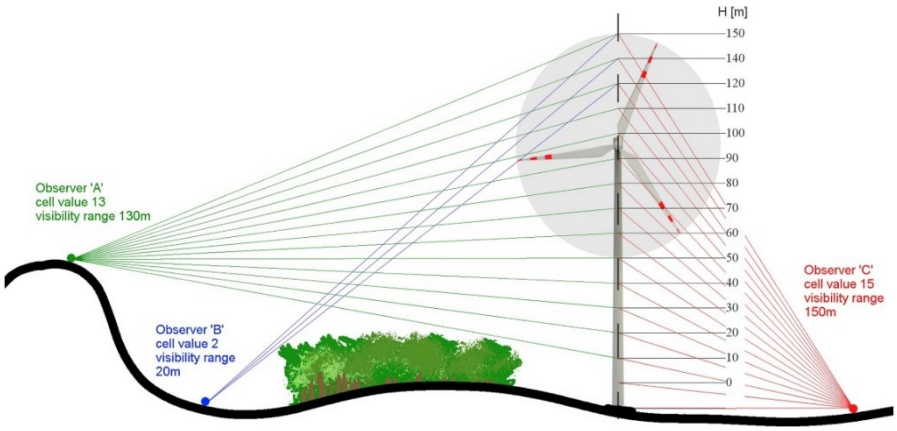


شکل ۳: اندازه‌های مختلف پره‌ها و پایه توربین‌های بادی (Abbasi et al., ۲۰۱٤)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

استفاده از روش‌های محاسباتی در جایابی توربین‌های مزارع بادی باعث می‌شود تا بتوان تعداد و ظرفیت بیشتری از توربین‌های بادی را در یک فضای محدود با همان میزان تأثیر در منظره نصب کرد (Manchado et al., ۲۰۱۹). استفاده از نرم‌افزارهای توسعه داده شده بر مبنای پارامتر قابلیت دید به عنوان بخشی از فرآیندهای طراحی و جایابی مزارع بادی می‌تواند به کاهش اثر منظره توربین‌های بادی کمک کند (Manchado et al., ۲۰۱۳). استفاده از داده‌های مربوط به عوارض طبیعی نظیر پستی و بلندی‌ها، جنگل‌ها و ... در این نرم‌افزارها می‌تواند ارزیابی دقیقی از میزان پارامتر قابلیت دید در نواحی مختلف مجاور توربین بادی ارائه دهد (شکل ۴) (Wróżyński et al., ۲۰۱٦). با اینکه نصب فراساحلی توربین‌های بادی از تأثیر محیط زیستی آن‌ها بر خشکی می‌کاهد، ولی هنوز می‌توانند از دید تغییر منظره بر سواحل مجاور مؤثر باشند (Cronin et al., ۲۰۲۱; Gkeka-Serpetsidaki et al., ۲۰۲۲).

توربین‌های بادی باید به اندازه کافی از مناطق با قدمت تاریخی و گردشگری دور باشند تا منجر به تغییر منظر از دیدگاه تاریخی یا طبیعی نشوند. معیارهای جایابی توربین‌های بادی در مجاورت این‌گونه مناطق با معیارهای تغییر منظره در مناطق عادی باید متفاوت باشد (Diego et al., ۲۰۲۲).



شکل ٤: قابلیت دید در نواحی مختلف مجاور توربین بادی (Wróżyński et al., ۲۰۱٦)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

د) برخورد پرندگان

احداث نیروگاه‌های بادی معمولاً در نواحی با میزان وزش باد زیاد، نظیر دشت‌ها، کوهپایه‌ها و یا سایر نواحی دور از عوارض شهری و صنعتی انجام می‌شود. در این نواحی به علت عدم گسترش ساختمان‌های شهری و صنعتی، هنوز اکوسیستم دچار دگرگونی نشده و این مناطق محل زندگی گونه‌های مختلف حیوانات هستند. مهم‌ترین گونه حیوانات که بیشترین تلفات را در اثر کارکرد توربین‌های بادی دارند، پرندگان هستند (Ferreira et al., ۲۰۱۹). پرندگان در اثر عدم دید مناسب، با قسمت‌های مختلف این توربین‌ها برخورد کرده و دچار آسیب می‌شوند. رنگ سفید اجزای مختلف توربین‌های بادی تشخیص آن‌ها را از رنگ زمینه آسمان، بعضاً برای پرندگان سخت می‌کند و منجر به برخورد مستقیم پرنده با سطح می‌گردد. از طرفی، حرکت چرخشی پره‌ها می‌تواند منجر به غافلگیری پرنده‌ها و برخورد جانبی به آن‌ها گردد. هرچند که سرعت دورانی چرخش پره‌ها کند به نظر می‌رسد، ولی سرعت خطی در نوک پره می‌تواند قابل توجه بوده و پره قبل از برخورد در خارج از ناحیه دید افقی پرنده قرار گرفته باشد. این نوع برخورد جانبی، برای خفاش‌ها که موانع در مسیر حرکتشان را از طریق بازتاب امواج صوتی تشخیص می‌دهند، می‌تواند محتمل‌تر باشد (Ledec et al., ۲۰۱۱).

تعداد و سطح مقطع توربین‌های بادی در مقایسه با سایر سازه‌های صنعتی و مسکونی ساخته دست بشر نظیر دکل‌های انتقال برق، دکل‌های مخابراتی، وسایل نقلیه، ساختمان‌های مرتفع (معمولاً شیشه‌ها)، و ... محدودتر هستند و ازاین‌رو در آمار کلی تلفات پرندگان در اثر برخورد با عوارض غیرطبیعی، نیروگاه‌های باد سهم بسیار پایینی دارند (Wang et al., ۲۰۱۵). ولی جایابی توربین‌های بادی با ارتفاع بلند در نواحی دور از شهرها و بعضاً مناطق مرتفع نظیر کوه‌ها، منجر می‌شود که تلفات پرندگان نادر و کمیاب در مقایسه با گونه‌های معمول و پرجمعیت پرندگان مهم‌تر تلقی شود. همچنین، نیروگاه‌های بادی مشابه سایر انواع نیروگاه‌های تولید برق، جهت اتصال به شبکه نیاز به خطوط و دکل‌های انتقال قدرت دارند که برخورد پرندگان با این خطوط نیز می‌تواند منجر به تلفات شود. با توجه به احداث نیروگاه‌های بادی در نواحی دوردست، طول خطوط اتصال این نوع نیروگاه‌ها معمولاً طولانی‌تر از انواع دیگر بوده و احتمال برخورد پرندگان نیز به‌تبع آن، افزایش خواهد یافت.

با توجه به روند رو به رشد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، اگر در آینده سهم قابل توجهی از انرژی از طریق نیروگاه‌های بادی استحصال شود، سهم تلفات پرندگان نیز در صورت عدم پیش‌بینی‌های لازم،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

افزایش خواهد یافت. به‌خصوص اگر مزارع بادی متعدد در مسیرهای پرواز پرندگان مهاجر احداث شده باشند. برای جلوگیری از برخورد پرندگان با توربین‌های بادی روش‌های مختلفی پیشنهاد و پیاده‌سازی شده است. برخی کاهش ضخامت پره‌ها، افزایش فاصله مابین توربین‌ها، رنگ‌آمیزی متفاوت پره‌ها و پخش صدا در مسیر منتهی به توربین‌های بادی را پیشنهاد داده‌اند (Hekmatnia et al., ۲۰۲۰; Sarbasi et al., ۲۰۲۲). همچنین، قابلیت فرستنده‌های فراصوتی نیز برای کاهش تلفات برخی از گونه‌های خفاش‌ها حداقل به میزان ۵۰٪ گزارش شده است، ولی این فرستنده‌ها روی تلفات سایر گونه‌ها تأثیر نداشته‌اند (Weaver et al., ۲۰۲۰). نصب فرستنده‌های صوتی و فرا صوتی خود می‌توانند تبعات دیگری برای سایر جانداران در آن محیط به دنبال داشته باشند، نظیر ترک محل، اختلال در مسیریابی و ... . جدیداً برخی از مراجع نیز پیشنهادهایی با هزینه بیشتر و تبعات کمتر محیط زیستی ارائه کرده‌اند، نظیر متوقف کردن توربین‌های بادی در زمان‌های مهاجرت پرندگان و یا نصب حس‌گرهای تشخیص نزدیک شدن خفاش‌ها جهت خاموشی خودکار توربین‌های بادی (Msigwa et al., ۲۰۲۲; Wind Energy Technologies Office, ۲۰۲۱).

هـ) چشمک زدن سایه (ایجاد سایه‌روشن متناوب)

چرخش توربین‌های بادی در مقابل مسیر نور خورشید ایجاد سایه‌روشن متناوب بر روی زمین‌های پایین‌دست مجاور نیروگاه‌های بادی می‌کند (شکل ۵) (Nazir et al., ۲۰۲۰). تابش مایل‌تر نور خورشید در نواحی با عرض جغرافیایی زیاد، موجب می‌شود تا فواصل دورتری از نیروگاه‌های بادی تحت تأثیر سایه‌روشن باشند و عملاً در این مناطق برای دوری از اثر سایه‌روشن متناوب، باید فاصله مابین مناطق مسکونی و صنعتی مجاور نیروگاه‌های بادی افزایش یابد. همین امر می‌تواند در مقدار هزینه زمین و در نتیجه هزینه تمام‌شده برای برق تولیدی بسیار مؤثر باشد. ارتفاع توربین بادی، جهت غالب وزش باد، ارتفاع نسبی محل سکونت و محل نصب توربین، متوسط روزهای بدون ابر در سال، و قرارگیری محل سکونت نسبت به توربین و خورشید، از عواملی هستند که در تعیین مدت زمان بروز پدیده چشمک زدن سایه مؤثرند و باید در مدل‌سازی این پدیده (شکل ۶) لحاظ گردند (Haac et al., ۲۰۲۲). در برخی از کشورها برای این اثر استانداردهایی تعریف شده است، برای مثال: در کشور هلند حداکثر مدت زمان مجاز بروز پدیده چشمک زدن سایه برای نواحی مجاور توربین‌های بادی،

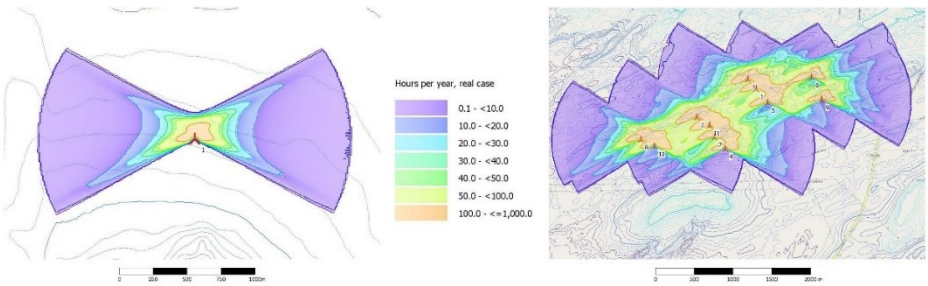
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

"حداکثر ۱۷ روز" برای "بیشتر از ۲۰ دقیقه در روز" در طول تمام سال است (در حدود ۶ ساعت در تمام سال) (Flanderijn, ۲۰۲۳) یا در کشور آلمان معیار حداکثر ۸ ساعت در تمام طول سال در نظر گرفته شده است (Haac et al., ۲۰۲۲). برای مزارع بادی در حال بهره‌برداری نیز می‌توان از راهکارهایی نظیر استفاده از حس‌گرهای نوری تشخیص چشمک زدن سایه و قطع چرخش توربین بادی در صورتی که زمان این پدیده از حد مجاز فراتر رود، بهره گرفت (Saidur et al., ۲۰۱۱).

سایه‌روشن ناشی از چرخش توربین‌های بادی علاوه بر نور خورشید می‌تواند در سایر انواع امواج الکترومغناطیسی نظیر امواج رادار، رادیویی و تلفن همراه نیز اتفاق بیافتد و کیفیت اطلاعات منتقل شده در مناطق اطراف نیروگاه‌ها را دچار مشکل کند (Pinto et al., ۲۰۱۰). ازاین‌رو در جایابی مزارع بادی در صورت مجاورت با فرستنده‌های رادیویی و یا رادارها، باید فواصل نصب توربین‌ها به نحوی انتخاب شود که تأثیرات سایه‌روشن متناوب بر روی این امواج نیز حداقل شود.



شکل ۵: اثر چشمک زدن سایه (Flanderijn, ۲۰۲۳)

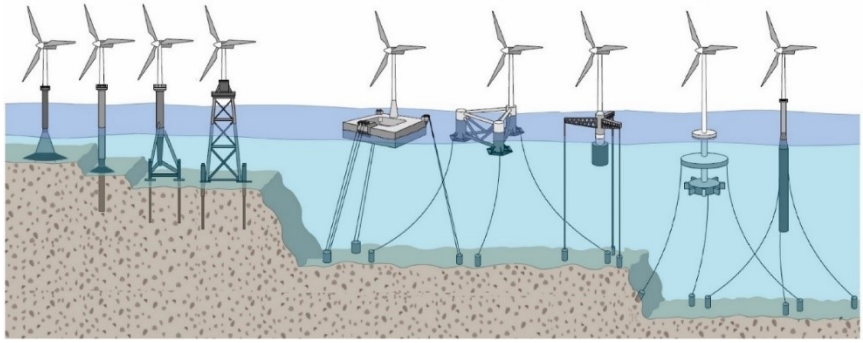


شکل ٦: مدت چشمک زدن سایه در سال برای (A) یک توربین بادی و (B) یک مزرعه بادی (Haac et al., ۲۰۲۲)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

و) تغییرات در اکوسیستم منطقه در حین ساخت نیروگاه

توربین‌های بادی با توان‌های تولیدی بالا، سازه‌های عظیمی هستند که قسمت‌هایی نظیر پره‌ها و ژنراتور آن‌ها در مناطق غیر از محل نصب ساخته شده و به مزارع بادی حمل می‌شوند. همچنین جرثقیل‌های لازم برای نصب قسمت‌های مرتفع توربین بادی نیز جز ماشین‌آلات سنگینی هستند که به تعداد بسیار محدود در برخی کشورها موجود هستند و برای ساخت مزارع بادی مختلف، نیاز به جابجایی آن‌ها بین مناطق مختلف یک یا چند کشور وجود دارد. حمل این تجهیزات بعضاً نیاز به ساخت راه‌های جدید یا تعریض قسمت‌هایی از راه‌های موجود دارد. این تغییرات موقت، گاهی می‌تواند برای دسترسی گونه‌های غیر پرنده به مناطق مختلف اکوسیستم مشکل ایجاد کرده و برای یک یا چندین نسل، اکوسیستم را دچار مشکل کند. این موارد بهتر است در جایابی محل‌های مناسب برای مزارع بادی در نظر گرفته شود تا حداقل تغییرات موقت در منطقه ایجاد گردد. در توربین‌های بادی فراساحلی نیز فناوری‌های مختلف ساخت و نصب پایه‌های نگه‌دارنده توربین بادی (شکل ۷) می‌تواند بر شدت اثرات محیط زیستی بر جانداران دریایی مؤثر باشد (Bailey et al., ۲۰۱٤). توربین‌های بادی فراساحلی شناور به علت عدم ساخت پایه ثابت و عدم نیاز به ساخت در محل نصب، تأثیرات کمتری را بر جانداران زیر آب خواهند داشت (Tsarknias et al., ۲۰۲۲).



شکل ۷: انواع پایه‌های نگه‌دارنده توربین‌های بادی فراساحلی (Jahani et al., ۲۰۲۲)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

ز) انتشار کربن و ایجاد سایر آلاینده‌ها در فرآیند ساخت

انتشار کربن ناشی از فرآیندهای ساخت تجهیزات نیروگاه بادی نظیر پره‌ها، ژنراتور، ستون توربین بادی، خود می‌تواند بر محیط‌زیست تأثیر بگذارد. فرآیندهای ساخت، حمل‌ونقل، نصب، و تعمیرات و نگه‌داری نیروگاه‌های بادی می‌تواند گاز دی‌اکسید کربنی در حدود gCO_2/kWh ۵ تا gCO_2/kWh ۸۶/۵ وابسته به عوامل متعددی نظیر فناوری ساخت، محل نصب، نوع و اندازه توربین بادی آزاد کند، که البته در صورت جایگزینی نیروگاه‌های فسیلی با نیروگاه‌های بادی، در سال‌های اولیه بهره‌برداری جبران خواهد شد (Gao et al., ۲۰۱۹; Vélez-Henao et al., ۲۰۲۱Xu et al., ۲۰۲۲;). از این رو انتشار کربن ناشی از فرآیندهای ساخت در مقابل جلوگیری از انتشار کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی، عامل قوی در تأثیرات محیط زیستی محسوب نمی‌شود. تحلیل‌های مبتنی بر چرخه حیات علاوه بر تعیین میزان کربن آزاد شده به شکل دی‌اکسید کربن که منجر به گرمایش زمین می‌شود، می‌توانند سایر اثرات محیط زیستی نظیر انتشار مواد سرطان‌زا، آلودگی آب، آلودگی زمین، تخریب لایه ازن و ... را نیز به صورت کمی در تمام فرآیندهای ساخت تا نگه‌داری توربین‌های بادی در محل مشخص تعیین کنند. جهت سهولت مقایسه نتایج حاصل، تحلیل‌های چرخه حیات باید مبتنی بر استاندارد ISO ۱۴۰۴۴ باشند (Kylili, ۲۰۲۲). محل نصب توربین‌های بادی، تأثیر عمده‌ای بر نتایج تحلیل چرخه حیات دارد، این نوع تحلیل برای برخی از نیروگاه‌های بادی نصب شده در ایران نیز انجام شده است (Nowroozipour et al., ۲۰۲۲). بیشترین سهم از کربن آزاد شده در طول چرخه حیات یک توربین بادی، مربوط به مرحله ساخت است (حدود ۷۷٪)، در حالی که سهم مراحل بهره‌برداری و از کار اندازی تقریباً به ترتیب برابر ۱۵٪ و ۸٪ است (Ji et al., ۲۰۱۶). لازم به ذکر است که انتشار کربن در طی فرآیند ساخت نیروگاه‌های بادی در مقایسه با فرآیند ساخت سایر انواع نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر نظیر سلول‌های فتولتائیک، زیست توده، و مبدل انرژی امواج دریا به طور قابل توجهی کمتر است (Saidur et al., ۲۰۱۱).

ح) بازیافت در پایان عمر و از کار اندازی

عمر توربین‌های بادی به طور معمول بین ۲۰ تا ۲۵ سال است (Kylili, ۲۰۲۲). اکثر مواد استفاده شده در ساختار توربین‌های بادی به راحتی قابلیت بازیافت و استفاده مجدد را دارند، به جز پوشش سطح

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

پره‌های توربین‌های بادی که دارای ساختار کامپوزیتی از فیبرهای شیشه و رزین‌های ترموست پلیمری هستند. پیش‌بینی می‌شود روند رو به رشد توسعه انرژی بادی در سراسر جهان تا سال ۲۰۵۰ میلادی منجر به تولید ۴۳ میلیون تن پسماند پره توربین شود (Liu et al., ۲۰۱۷). سابقاً به علت توجه کم به مسائل محیط زیستی، در فرآیندهای انتخاب مواد و ساخت این پوشش‌ها، بازیافت و استفاده مجدد آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شد و عموماً پس از اتمام عمر با سوزاندن، صرفاً از انرژی گرمایی آن‌ها استفاده می‌شد. ولی افزایش روزافزون توجه به مسائل محیط زیستی در تولید انرژی، حتی در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر، موجب شد تا ایده‌های متفاوتی برای بازیافت پره‌های توربین بادی در پایان عمر آن‌ها نظیر موارد زیر پیشنهاد شود (Jani et al., ۲۰۲۲; Beauson et al., ۲۰۲۲):

- بازیافت مکانیکی: با خرد کردن پره‌ها در اندازه‌های بسیار ریز و استفاده مجدد در کامپوزیت‌های پلیمری و بتن به منظور افزایش استحکام آن‌ها انجام می‌شود.
- بازیافت حرارتی در مجاورت اکسیژن: با حرارت دادن کامپوزیت‌ها به منظور جداسازی فیبرهای شیشه از رزین‌ها انجام می‌شود. در این فرآیند رزین‌ها اکسید شده و از بین می‌روند و فیبرهای شیشه باقی می‌مانند.
- بازیافت حرارتی بدون اکسیژن: با حرارت دادن کامپوزیت‌ها بدون وجود اکسیژن انجام می‌گیرد، رزین‌ها به شکل بخار خارج می‌شوند و فیبرهای شیشه بر جای می‌مانند.
- بازیافت شیمیایی: با حل کردن رزین‌ها در یک حلال شیمیایی در دما و فشار بالا انجام می‌شود و در آن فیبرهای شیشه به صورت تمیز و رزین‌ها به صورت محلول بازیافت می‌شوند.

بازیافت با روش‌های فوق، مستلزم مصرف انرژی بیشتر (تولید CO_2 و سایر آلاینده‌ها) و افزایش هزینه‌ها هست و در تمام موارد، مواد بازیافت شده علاوه بر قیمت بالا، کیفیت کمتری در مقایسه با مواد نو دارند (تا ۵۰٪ افت مقاومت مکانیکی (Liu et al., ۲۰۱۹)). از این رو، استفاده مجدد از برش‌هایی از پره‌های توربین‌های بادی به عنوان بخشی از سازه در پل‌های کوچک، زمین‌های بازی، پوشش‌های سقف، در و پنجره ساختمان‌ها، و ساخت سازه‌های شهری نظیر ایستگاه‌های اتوبوس می‌تواند به عنوان یک راه‌حل کم هزینه و کم آلاینده مطرح باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

ط) تغییرات در اکوسیستم منطقه در حین بهره‌برداری نیروگاه

ساخت راه‌های مواصلاتی برای مزارع بادی احداث شده در نواحی دوردست و همچنین راه‌های دسترسی به تمام توربین‌های بادی مستقر در یک مزرعه بادی می‌تواند منجر به قطع درختان و تخریب سایر گونه‌های گیاهی موجود در مسیر شود. از طرفی ساخت راه‌های جدید می‌تواند مسیرهای جابجایی گونه‌های جانوری داخل یک اکوسیستم را قطع یا دچار تغییرات دائمی کند. ترک یک‌گونه در یک اکوسیستم می‌تواند موجب تأثیرات دائمی بر جمعیت سایر گونه‌های مستقر در آن ناحیه شود و تعادل پیشین را به سمت تعادل جدید منحرف سازد. گاهی نیز ساخت راه‌های جدید به مناطق صعب‌العبور موجب دسترسی آسان‌تر شکارچیان، قاچاقچیان چوب، و گردشگران عادی شده و تغییر اکوسیستم را سرعت می‌بخشد. با انتقال توربین‌های بادی از خشکی به دریا به نظر می‌رسد این تأثیرات کاهش یابد، ولی مطالعات نشان می‌دهد که حتی توربین‌های بادی فراساحلی نیز می‌توانند بر زندگی و مهاجرت مرغ‌های دریایی، پستانداران دریایی، لاک‌پشت‌های دریایی، و ماهی‌ها مؤثر باشند (Xu et al., ۲۰۲۲). برای مثال چراغ‌های هشدار نصب شده روی این تأسیسات جهت جلوگیری از برخورد شناورها و بالگردها می‌تواند در مهاجرت گونه‌های مختلف اختلال ایجاد کرده و یا صدای ایجاد شده از توربین‌های بادی موجب ترس و عدم نزدیک شدن به این سواحل گردد (Orr et al., ۲۰۱۳). جهت کاهش اثرات محیط زیستی ناشی از افزایش عبور و مرور جهت انجام بازرسی‌های حین بهره‌برداری یا تعمیرات و نگه‌داری، می‌توان با توجه به نوع اکوسیستم منطقه، زمان‌های انجام امور مربوطه را به بازه‌های زمانی به دور از فصل لانه گزینی، تولیدمثل و مهاجرت گونه‌های جانوری آن منطقه منتقل کرد.

ی) وقوع حوادث در نیروگاه‌های بادی

وقوع حوادث در نیروگاه‌های بادی علاوه بر تحمیل هزینه مضاعف بر سرمایه‌گذار، می‌تواند تهدیدهایی نیز برای محیط‌زیست ایجاد کند. وقوع آتش‌سوزی در توربین‌های بادی می‌تواند شدیدترین خسارت را در بین حوادث این نیروگاه به محیط‌زیست تحمیل کند. اگر نیروگاه‌های بادی در مجاورت جنگل‌ها، علفزارها، زمین‌های کشاورزی و ... باشند، توسعه حریق می‌تواند به سرعت انجام شده و مناطق وسیعی دچار آسیب شوند. ژنراتور و سیم‌ها مهم‌ترین منشأ آتش‌سوزی داخلی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

توربین‌های بادی هستند که در فرآیند ساخت و نصب باید ملاحظات ایمنی مربوطه رعایت گردد. همچنین برخورد صاعقه با توربین‌های بادی می‌تواند منجر به آتش‌سوزی با منشأ خارجی در این نیروگاه‌ها شود. برخورد وسایل پرنده با توربین‌های بادی نیز می‌تواند منجر به آتش‌سوزی شده و محیط‌زیست را تهدید کند. ازاین‌رو، جایابی نیروگاه‌های بادی باید به اندازه کافی به دور از فرودگاه‌ها باشد تا هواپیماها در حین برخاستن یا نزدیک شدن به فرودگاه و کاهش ارتفاع دارای فاصله ایمنی مناسبی از توربین‌های بادی باشند. پرتاب یخ و شکست پره از جمله سایر حوادثی هست که می‌توانند با سقوط اجسام سنگین منجر به آسیب به گیاهان، درختان و یا حیوانات شود.

تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن معیارهای محیط زیستی

عامل صرفه اقتصادی به عنوان پیشران رشد و گسترش استفاده از انرژی باد، مهم‌ترین نقش را در جذب سرمایه و جایگزینی سوخت‌های فسیلی ایفا می‌کند. هزینه برق تولید شده نیروگاه‌های بادی با پیشرفت علوم و فناوری‌های مربوطه، در حال کاهش است. به عنوان مثال این هزینه برای توربین‌های بادی نصب شده در خشکی در سال ۲۰۲۰ ۴۴ $/MWh بوده که نسبت به سال ۲۰۱۹ دارای ۹٪ کاهش است. همچنین، هزینه برق تولیدی از توربین‌های فراساحلی نیز از ۹۰ $/MWh در سال ۲۰۱۹ به ۷۸ $/MWh در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است (Msigwa et al., ۲۰۲۲). وارد کردن سایر عوامل در انتخاب محل استقرار توربین‌های بادی و اعمال محدودیت بر آن یقیناً هزینه برق تولید شده از این منبع را افزایش خواهد داد. ولی باید در نظر داشت که عدم توجه به عوامل محیط زیستی در طول زمان می‌تواند هزینه‌های بسیار بیشتر و شاید لطمات جبران ناپذیری را به نسل‌های حال حاضر و آینده وارد کند. از این رو هم‌زمان با عامل صرفه اقتصادی باید عوامل محیط زیستی نیز در تصمیم‌سازی در نظر گرفته شوند و به نوعی مصالحه مابین چندین عامل کلیدی برای بهترین انتخاب صورت گیرد. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌توانند در جایابی محل استقرار نیروگاه‌های بادی ارتباط مابین عوامل مختلف را با درجه‌های اهمیت متفاوت برقرار کنند و جمع‌بندی را در یک مقدار ارائه دهند (Sayadi et al., ۲۰۱۷; Bairamvand et al., ۲۰۲۲; Fallahghalhari, ۲۰۱۵; Aqajani et al., ۲۰۲۲). در این روش‌ها میزان تأثیر هر عامل در تصمیم نهایی توسط خبرگان و با استفاده از توابع پیوسته‌ای نظیر توابع فازی تعیین می‌شود (Sadeqi et al., ۲۰۱۳; Mahdi et al., ۲۰۲۲). با توجه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

به اینکه، نظر خبرگان می‌تواند تابع عوامل مختلف اجتماعی و فرهنگی نیز باشد، از این رو لازم به نظر می‌رسد که علاوه بر شناخت تمامی جوانب رشد و گسترش استفاده از انرژی باد، نهادهای متولی امر نظیر سازمان محیط‌زیست نیز با تدوین استانداردهای لازم از مقدار عدم قطعیت این تصمیم‌گیری بکاهند. در ایران، با توجه به مصوبه شورای عالی حفاظت محیط‌زیست در خصوص تعیین طرح‌ها و پروژه‌های مشمول انجام مطالعات ارزیابی محیط زیستی، فقط نیروگاه‌های بادی با ظرفیت بالاتر از ۱۰۰ MW مشمول ارزیابی محیط زیستی هستند (Department of Environment, ۲۰۲۳). با توجه به توان نامی ۲/۵ MW توربین‌های تولید شرکت مپنا (MAPNA Group, ۲۰۲۳)، مزارع با ۴۰ توربین بادی و کمتر شامل این ارزیابی نخواهند شد، که در صورت استفاده از توربین‌های بادی با توان نامی کمتر، این تعداد نیز افزایش خواهد یافت. البته لازم به ذکر است که تا زمان نگارش این مقاله هنوز دستورالعمل تخصصی مطالعات ارزیابی آثار و پیامدهای محیط زیستی این نوع از نیروگاه‌ها در دسترس نبود (Department of Environment, ۲۰۲۳). از طرفی به علت عدم وجود استاندارد اختصاصی در این زمینه، ضوابطی از سوی سازمان برنامه و بودجه که با همکاری سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، برای نیروگاه‌های بادی با عنوان "دستورالعمل محیط‌زیست، بهداشت و ایمنی نیروگاه‌های بادی" (Planning and Budget Organization, ۲۰۱۸) تدوین شده است. با توجه به روند رو به رشد پژوهش‌ها و یافته‌های جدید در زمینه تأثیرات محیط زیستی نیروگاه‌های بادی، و روش‌ها و فناوری‌های جدید کاهش و مدیریت این تأثیرات، لازم به نظر می‌رسد که این ضوابط نیز با اعمال محدودیت‌های کمی، به‌روزرسانی شوند و استانداردهای لازم تدوین گردد.

نتیجه‌گیری

جایابی نیروگاه‌های بادی در یک منطقه نیازمند وزش بادهای با سرعت مناسب و طولانی مدت است تا احداث این نوع از نیروگاه دارای صرفه اقتصادی مناسب برای سرمایه‌گذاری باشد. نیروگاه‌های بادی با جایگزینی سهم سوخت‌های فسیلی در تولید انرژی، به میزان قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین جلوگیری خواهند کرد. در این مقاله اشاره گردید که احداث نیروگاه‌های بادی علاوه بر صرفه اقتصادی و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، دارای تأثیرات محیط زیستی نامطلوب هم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

هستند، تا در آینده گسترش این صنعت، تمامی جوانب در انتخاب مناطق مناسب برای احداث این نیروگاه‌ها در نظر گرفته شود.

در این مقاله، اثرات نامطلوب محیط زیستی استفاده از توربین‌های بادی و بروزترین روش‌های کاهش این اثرات بر مبنای آخرین یافته‌ها که در مراجع بین‌المللی مورد مطالعه قرار گرفته بودند، در ۱۰ دسته کلی جمع‌بندی گردید تا مقدمات ایجاد ساختاری برای کمی سازی این تأثیرات نامطلوب و اتخاذ تصمیم مناسب برای جایابی مناسب توربین‌های بادی با توجه به شرایط هر منطقه فراهم آورد. اثرات نامطلوب بررسی شده عبارت‌اند از: (۱) نیاز هم‌زمان به نیروگاه‌های فسیلی، (۲) آلودگی صوتی، (۳) تغییر منظره، (۴) برخورد پرندگان، (۵) چشمک زدن سایه، (۶) تغییرات در اکوسیستم منطقه در حین ساخت نیروگاه، (۷) انتشار کربن و ایجاد سایر آلاینده‌ها در فرآیند ساخت، (۸) بازیافت در پایان عمر و از کار اندازی، (۹) تغییرات در اکوسیستم منطقه در حین بهره‌برداری نیروگاه، و (۱۰) وقوع حوادث در نیروگاه‌های بادی.

رعایت فاصله مناسب نیروگاه‌های بادی از مناطق حساس محیط زیستی می‌تواند تا حد زیادی از تبعات نامطلوب بهره‌برداری از این نوع انرژی را بکاهد. با توجه به ساختمان متفاوت انواع توربین‌های بادی محور عمودی و محور افقی و همچنین سایز متفاوت توربین‌ها، تأثیرات محیط زیستی هر یک از انواع این توربین‌ها دارای درجات مختلفی است و باید به همراه ملاحظات اقتصادی در انتخاب نوع توربین‌های بادی در مناطق مختلف در نظر گرفته شود. در کل، مناطق محیط زیستی مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی عبارت‌اند از زمین‌های کشاورزی یکپارچه و وسیع، مراتع، و صحراها که فاصله قابل توجهی از مسیرهای مهاجرت پرندگان، مناطق تاریخی و تفریحی، زیستگاه حیوانات در معرض انقراض و مناطق مسکونی پرجمعیت داشته باشند. با توجه به ماهیت این نوع مسئله، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی چند معیاره می‌تواند بسیار سودمند باشد.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در حال حاضر ضوابط سخت‌گیرانه‌ای در ایران برای رعایت مسائل محیط زیستی در مزارع بادی مقیاس کوچک وجود ندارد و این عامل می‌تواند در آینده منجر به ایجاد مشکلاتی برای محیط اطراف این نیروگاه‌ها شود. از این رو بهتر است که مطالعات محیط زیستی به عنوان بخشی از فرآیند اخذ مجوز نصب توربین‌های بادی به هر تعداد و مقیاس در مزارع بادی در نظر گرفته شود. جهت نیل به این هدف لازم به نظر می‌رسد که در آینده، پژوهش‌های

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

تخصصی بیشتری در زمینه تأثیرات محیط زیستی متناسب با اقلیم ایران در محل‌های مورد نظر برای نصب توربین‌ها انجام شود. در صورتی که این مطالعات شامل بررسی‌ها قبل و بعد از نصب توربین‌های بادی شود، می‌توان تأثیر مستقیم نصب این توربین‌ها در اقلیم‌های متفاوت ایران را بررسی نمود.

منابع

Abbasi, T., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (۲۰۱٤). "Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31*, ۲۷۰-۲۸۸. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۳,۱۱,۰۱۹

Aqajani, H., Fattahi Moghaddam, M., Akbari, H., & Fattahi, R. (۲۰۱٥). "Site Selection of Wind Turbines Based on Space Environmental Assessment (Case study: Khorasan Razavi)". *Iranian Journal of Energy, 18*(۱), ۰-۰.

Bailey, H., Brookes, K. L., & Thompson, P. M. (۲۰۱٤). "Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future". *Aquatic Biosystems, 10*(۱), ۸. doi: ۱۰,۱۱۸٦/۲۰٤٦-۹۰٦۳-۱۰-۸

Bairamvand, R., Motevalli, S., Janbaz Ghobadi, G. R., & Derafshi, K. (۲۰۲۲). "Evaluated the location of wind power plants based on spatial assessment of environmental factors Mazandaran Province, Iran". *Physical Geography Research Quarterly, 54*(۲), ۲۰۳-۲۲٥. doi: ۱۰,۲۲۰٥۹/jphgr.۲۰۲۲,۳۳۸۷۹۳,۱۰۰۷٦۷۸

Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Pagh Jensen, J. (۲۰۲۲). "The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 155*, ۱۱۱۸٤۷. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۲۱,۱۱۱۸٤۷

Coppes, J., Braunisch, V., Bollmann, K., Storch, I., Mollet, P., Grünschachner-Berger, V., . . . Nopp-Mayr, U. (۲۰۲۰). "The impact of wind energy facilities on grouse: a systematic review". *Journal of Ornithology, 161*(۱), ۱-۱٥. doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۳۳٦-۰۱۹-۰۱٦۹٦-۱

Cronin, Y., Cummins, V., & Wolsztynski, E. (۲۰۲۱). "Public perception of offshore wind farms in Ireland". *Marine Policy, 134*, ۱۰٤۸۱٤. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.marpol.۲۰۲۱,۱۰٤۸۱٤

Department of Environment. (۲۰۲۳). . Retrieved ۲/۱۸/۲۰۲۳, ۲۰۲۳, from https://eia.doe.ir

Diego, J. C., Bonete, S., & Chías, P. (۲۰۲۲). "VIA-۷ Method: A seven perceptual parameters methodology for the assessment of visual impact caused by wind and solar facilities on the landscape in cultural heritage sites". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 165*, ۱۱۲٥۲۸. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۲۲,۱۱۲٥۲۸

Fallahghalhari, G. (۲۰۱۷). "Identification of Suitable Regions for Wind Power Construction Case Study: Fars Province". *Environmental Researches, 8*(۱٥), ۳-۱٦.

Ferreira, D., Freixo, C., Cabral, J. A., & Santos, M. (۲۰۱۹). "Is wind energy increasing the impact of socio-ecological change on Mediterranean mountain ecosystems? Insights from a modelling study relating wind power boost options with a

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

declining species". *Journal of Environmental Management, 238*, ۲۸۳-۲۹۵. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jenvman.۲۰۱۹,۰۲,۱۲۷

Flanderijn, S. (۲۰۲۳). Shadow flicker assessments. Retrieved ۲/۲/۲۰۲۳, from https://ponderaconsult.com/en/services-for-developers/noise-and-shadow-flicker-assessments/

Gao, C.-k., Na, H.-m., Song, K.-h., Dyer, N., Tian, F., Xu, Q.-j., & Xing, Y.-h. (۲۰۱۹). "Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102*, ۳۰۷-۳۱۷. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۸,۱۲,۰۱۸

Gaßner, L., Blumendeller, E., Müller, F. J. Y., Wigger, M., Rettenmeier, A., Cheng, P. W., . . . Pohl, J. (۲۰۲۲). "Joint analysis of resident complaints, meteorological, acoustic, and ground motion data to establish a robust annoyance evaluation of wind turbine emissions". *Renewable Energy, 188*, ۱۰۷۲-۱۰۹۳. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۲۲,۰۲,۰۸۱

Gkeka-Serpetsidaki, P., Papadopoulos, S., & Tsoutsos, T. (۲۰۲۲). "Assessment of the visual impact of offshore wind farms". *Renewable Energy, 190*, ۳۵۸-۳۷۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۲۲,۰۳,۰۹۱

Haac, R., Darlow, R., Kaliski, K., Rand, J., & Hoen, B. (۲۰۲۲). "In the shadow of wind energy: Predicting community exposure and annoyance to wind turbine shadow flicker in the United States". *Energy Research & Social Science, 87*, ۱۰۲٤۷۱. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.erss.۲۰۲۱,۱۰۲٤۷۱

Hekmatnia, H., Fatahi Ardakani, A., Mashayekhan, A., & Akbari, M. (۲۰۲۰). "Assessing Economic, Social, and Environmental Impacts of Wind Energy in Iran with Focus on Development of Wind Power Plants". *Journal of Renewable Energy and Environment, 7*(۳), ٦۷-۷۹. doi: ۱۰,۳۰۵۰۱/jree.۲۰۲۰,۲۱٦٤۰۱,۱۰۷٤

Hosseini, S. M., Aslani, A., & Kasaeian, A. (۲۰۲۲). "Energy, water, and environmental impacts assessment of electricity generation in Iran". *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52*, ۱۰۲۱۹۳. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.seta.۲۰۲۲,۱۰۲۱۹۳

Jahani, K., Langlois, R. G., & Afagh, F. F. (۲۰۲۲). "Structural dynamics of offshore Wind Turbines: A review". *Ocean Engineering, 251*, ۱۱۱۱۳٦. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.oceaneng.۲۰۲۲,۱۱۱۱۳٦

Jani, H. K., Singh Kachhwaha, S., Nagababu, G., & Das, A. (۲۰۲۲). "A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials". *Materials Today: Proceedings,* ٦۲, ۷۱۲٤-۷۱۳۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.matpr.۲۰۲۲,۰۲,۰٤۹

Ji, S., & Chen, B. (۲۰۱٦). "Carbon footprint accounting of a typical wind farm in China". *Applied Energy, 180*, ٤۱٦-٤۲۳.

Kylili, A. (۲۰۲۲). Chapter ٤ - Environmental assessment of wind turbines and wind energy. In P. A. Fokaides, A. Kylili & P.-z. Georgali (Eds.), *Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies* (pp. ۵۵-۸۳): Elsevier.

Ledec, G. C., Rapp, K. W., & Aiello, R. G. (۲۰۱۱). *Greening the wind: environmental and social considerations for wind power development*: World Bank Publications.

Li, H., Jiang, H.-D., Dong, K.-Y., Wei, Y.-M., & Liao, H. (۲۰۲۰). "A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

from China". *Journal of Cleaner Production, 248*, ۱۱۹۱۹۲. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jclepro.۲۰۱۹,۱۱۹۱۹۲

Li, S., Chen, Q., Li, Y., Pröbsting, S., Yang, C., Zheng, X., . . . Ke, S. (۲۰۲۲). "Experimental investigation on noise characteristics of small scale vertical axis wind turbines in urban environments". *Renewable Energy, 200*, ۹۷۰-۹۸۲. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۲۲,۰۹,۰۹۹

Liu, P., & Barlow, C. Y. (۲۰۱۷). "Wind turbine blade waste in ۲۰۵۰". *Waste Management, 62*, ۲۲۹-۲٤۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.wasman.۲۰۱۷,۰۲,۰۰۷

Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (۲۰۱۹). "Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison". *Journal of Cleaner Production, 212*, ۱۲٦۸-۱۲۸۱. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jclepro.۲۰۱۸,۱۲,۰٤۳

Mahdi, M., abdollahpour, J., Vahidinasab, V., & Ghazizadeh, M. S. (۲۰۲۲). "The evaluation and prioritization framework of renewable energy sources and sustainable development in Iran, based on the multi-criteria decision-making method". *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research, 8*(۲), ۰-۰.

Manchado, C., Gomez-Jauregui, V., Lizcano, P. E., Iglesias, A., Galvez, A., & Otero, C. (۲۰۱۹). "Wind farm repowering guided by visual impact criteria". *Renewable Energy, 135*, ۱۹۷-۲۰۷. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۸,۱۲,۰۰۷

Manchado, C., Otero, C., Gómez-Jáuregui, V., Arias, R., Bruschi, V., & Cendrero, A. (۲۰۱۳). "Visibility analysis and visibility software for the optimisation of wind farm design". *Renewable Energy, 60*, ۳۸۸-٤۰۱. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۳,۰۵,۰۲٦

MAPNA Group. (۲۰۲۳). . Retrieved ۲/۱۸/۲۰۲۳, ۲۰۲۳, from https://www.mapnagenerator.com

Mendecka, B., & Lombardi, L. (۲۰۱۹). "Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 111*, ٤٦۲-٤۸۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۹,۰۵,۰۱۹

Msigwa, G., Ighalo, J. O., & Yap, P.-S. (۲۰۲۲). "Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives". *Science of The Total Environment, 849*, ۱۵۷۷۵۵. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۲۲,۱۵۷۷۵۵

Nazir, M. S., Ali, N., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (۲۰۲۰). "Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective". *Current Opinion in Environmental Science & Health, 13*, ۸۵-۹۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.coesh.۲۰۲۰,۰۱,۰۰۲

Nowroozipour, M., Tabatabaei koloor, R., & Motevali, A. (۲۰۲۲). "Environmental Impact Assessment of Electricity Generation in Wind Power Plants with Indigenous Technologies (Case Study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh)". *Journal of Agricultural Machinery*, -. doi: ۱۰,۲۲۰٦۷/jam.۲۰۲۲,۷٦۱۸۰,۱۱۰۲

Orr, T., Herz, S., & Oakley, D. (۲۰۱۳). "Evaluation of lighting schemes for offshore wind facilities and impacts to local environments". *US Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs: Herndon, VA, USA*.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

Pinto, J., Matthews, J. C. G., & Sarno, G. C. (۲۰۱۰). Stealth technology for wind turbines. *IET Radar, Sonar and Navigation, 4*(۱), ۱۲۶-۱۳۳. https://digital-library.theiet.org/content/journals/۱۰,۱۰۴۹/iet-rsn.۲۰۰۹,۰۰۳۱

Planning and Budget Organization. (۲۰۱۸). Environmental, Health and Safety Guideline for Wind Power Plants.

Rajewski, D. A., Takle, E. S., Lundquist, J. K., Prueger, J. H., Pfeiffer, R. L., Hatfield, J. L., . . . Doorenbos, R. K. (۲۰۱٤). "Changes in fluxes of heat, H۲O, and CO۲ caused by a large wind farm". *Agricultural and Forest Meteorology, 194*, ۱۷۵-۱۸۷. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.agrformet.۲۰۱٤,۰۳,۰۲۳

Sadeqi, Z., Dalalbashi Esfahani, Z., & Horri, H. R. (۲۰۱۳). "Prioritize the Factors Affecting the Location of Renewable Energy Plants (Solar and Wind Energy) in Kerman Province Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making Techniques". *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research, 0*(۲), ۹۳-۱۱۰.

Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., & Solangi, K. H. (۲۰۱۱). "Environmental impact of wind energy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(۵), ۲٤۲۳-۲٤۳۰. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۱,۰۲,۰۲٤

Sarbasi, F. M., & Keshavarz, S. M. (۲۰۲۲). "Investigating and analyzing the effects of the consequences of wind turbines on the environment". *Environmental sciences and geography knowledge, 2*(٤), -.

Sayadi, M., & Bigdeli, R. (۲۰۲۲). "Simulation-Base Multi- Objective Risk Management for Optimal Wind Turbines Placement: Case of Khodabandeh City". *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research, 8*(۲), ۰-۰.

Sedaghatizadeh, N., Arjomandi, M., Cazzolato, B., & Kelso, R. (۲۰۱۷). "Wind farm noises: Mechanisms and evidence for their dependency on wind direction". *Renewable Energy, 109*, ۳۱۱-۳۲۲. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۷,۰۳,۰٤٦

Simla, T., & Stanek, W. (۲۰۲۰). "Reducing the impact of wind farms on the electric power system by the use of energy storage". *Renewable Energy, 145*, ۷۷۲-۷۸۲. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۹,۰٦,۰۲۸

Sunak, Y., & Madlener, R. (۲۰۱٦). "The impact of wind farm visibility on property values: A spatial difference-in-differences analysis". *Energy Economics, 55*, ۷۹-۹۱. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.eneco.۲۰۱۵,۱۲,۰۲۵

Takle, G. (۲۰۱۸). Iowa State University Research Finds Wind Farms Positively Impact Crops. Retrieved ۱/۲۸/۲۰۲۳, from https://www.cals.iastate.edu/news/releases/iowa-state-university-research-finds-wind-farms-positively-impact-crops

Tsarknias, N., Gkeka-Serpetsidaki, P., & Tsoutsos, T. (۲۰۲۲). "Exploring the sustainable siting of floating wind farms in the Cretan coastline". *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 54*, ۱۰۲۸٤۱. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.seta.۲۰۲۲,۱۰۲۸٤۱

Vélez-Henao, J.-A., & Vivanco, D. F. (۲۰۲۱). "Hybrid life cycle assessment of an onshore wind farm including direct and indirect services: A case study in Guajira, Colombia". *Journal of Environmental Management, 284*, ۱۱۲۰۵۸. doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jenvman.۲۰۲۱,۱۱۲۰۵۸

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]

Wang, S., & Wang, S. (۲۰۱۵). "Impacts of wind energy on environment: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49*, ٤٣٧-٤٤٣. doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.rser.٢٠١٥,٠٤,١٣٧

Weaver, S. P., Hein, C. D., Simpson, T. R., Evans, J. W., & Castro-Arellano, I. (۲۰۲۰). "Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines". *Global Ecology and Conservation, 24*, e٠١٠٩٩. doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.gecco.٢٠٢٠.e٠١٠٩٩

Wikipedia. (۲۰۲۳, ۱۵/۱/۲۰۲۳). Energy in Germany. Retrieved ۲/۲/۲۰۲۳, from https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Germany#/media/File:Energy_mix_in_Germany.svg

Wind Energy Technologies Office. (۲۰۲۱, ۲/٦/۲۰۲۱). New Tool Protects Bats While Increasing Energy Production. Retrieved ۲/۲/۲۰۲۳, from https://www.energy.gov/eere/wind/articles/new-tool-protects-bats-while-increasing-energy-production

Wróżyński, R., Sojka, M., & Pyszny, K. (۲۰۱٦). "The application of GIS and ٣D graphic software to visual impact assessment of wind turbines". *Renewable Energy, 96*, ٦٢٥-٦٣٥. doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.renene.٢٠١٦,٠٥,٠١٦

Xu, K., Chang, J., Zhou, W., Li, S., Shi, Z., Zhu, H., . . . Guo, K. (۲۰۲۲). "A comprehensive estimate of life cycle greenhouse gas emissions from onshore wind energy in China". *Journal of Cleaner Production, 338*, ١٣٠٦٨٣. doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jclepro.٢٠٢٢,١٣٠٦٨٣

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-07]