

ارزیابی اقتصادی انرژی باد و کارایی توربین‌های بادی در استان کرمانشاه با ملاحظات اقلیمی

سمیه رفعتی^{۱*}، احمد سام‌دلیری^۲، مصطفی کریمی^۳

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی

۲- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی

۳- استادیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

دریافت: ۹۸/۱/۲۱ پذیرش: ۹۸/۴/۴

چکیده

در این تحقیق، با محاسبه پتانسیل باد در محدوده ایستگاه‌های همدید استان کرمانشاه، کارایی و ارزیابی اقتصادی ۱۰ مدل توربین بادی برای بهره‌گیری از انرژی بادی بررسی شد. برای این منظور، از داده‌های سرعت باد در دوره آماری مشترک ۲۰۰۹-۲۰۱۳ در مقیاس زمانی ۳ ساعته و نرم‌افزارهای WAsP و Windographer بهره گرفته شد و پارامترهای احتمال تولید انرژی، ضریب ظرفیت و خروجی انرژی سالانه توربین‌های مختلف برآورد شد. سپس، ارزیابی اقتصادی هر یک از توربین‌ها انجام و اقتصادی‌ترین توربین و محدوده در استان کرمانشاه معرفی شد. با بررسی ضریب ظرفیت توربین‌ها روشن شد که توربین ۵۰۰ کیلوواتی در تمام ایستگاه‌ها بهترین کارایی را دارد. همچنین، بهترین کارایی این توربین در ایستگاه‌های گیلان‌غرب، تازه‌آباد و سومار برآورد شده است. میزان تولید انرژی سالانه توربین ۲۰۰۰ کیلوواتی، از ۲ گیگاوات ساعت در سال در ایستگاه کنگاور تا ۶/۷ گیگاوات ساعت در سال در ایستگاه گیلان‌غرب متغیر است. با محاسبه شاخص نسبت منفعت به هزینه مشخص شد که احداث نیروگاه در محدوده ایستگاه گیلان‌غرب در تمامی انواع مختلف توربین صرفه اقتصادی بیشتری درمقایسه با مناطق دیگر دارد. تولید برق با هیچ‌یک از توربین‌های بادی مورد بررسی در محدوده ایستگاه‌های اسلام‌آباد، کنگاور، سرپل‌ذهاب، روانسر، سنقر، هرسین، جوانرود و قصرشیرین اقتصادی نیست.

واژگان کلیدی: پتانسیل باد، توربین بادی، ارزیابی اقتصادی، استان کرمانشاه.



۱- مقدمه

امروزه، باتوجه به محدودیت منابع فسیلی، افزایش روزافزون تقاضای انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی، بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر اجتناب‌ناپذیر شده است (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۲۰). انرژی پایدار به معنی تأمین انرژی برای همه‌ی مردم به‌طور عادلانه و حفاظت از محیط‌زیست برای نسل آتی است (طالعی و همکاران، ۱۳۹۷: ۲). تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار تأمین انرژی، نیاز نداشتن به آب، نیاز نداشتن به زمین زیاد برای نصب، ایجاد اشتغال و نداشتن آلودگی زیست‌محیطی از مزایای مهم تولید برق توسط انرژی بادی است (وبگاه سازمان انرژی‌های نو ایران). همچنین، به این دلیل که انرژی باد بیشتر در نقاط دورافتاده و روستایی تولید می‌شود، توسعه‌ی این صنعت تحولات و پیشرفت‌های آشکاری را در مناطق روستایی به‌دنبال خواهد داشت. ایجاد شغل این صنعت در میان دیگر صنایع انرژی قابل توجه است؛ به‌گونه‌ای که در اروپا، یک مگاوات برق بادی برای ۱۵ تا ۱۹ نفر شغل ایجاد می‌کند و این رقم در کشورهای درحال توسعه بیشتر است (وبگاه سازمان انرژی‌های نو ایران). درمورد دورنمای آینده‌ی اقتصادی استفاده از انرژی باد در ایران، بیان این نکته اهمیت دارد که کاربرد این انرژی موجب صرفه‌جویی فرآورده‌های نفتی به‌عنوان سوخت می‌شود. صرفه‌جویی ایجادشده موجب حفظ فرآورده‌های نفتی می‌شود و امکان صادرات و تبدیل آن‌ها به مشتقات پالایشی و پتروشیمیایی با ارزش افزوده‌ی بالا را فراهم می‌کند.

مزارع بادی منجیل و بینالود سایت‌های بادی اصلی در ایران هستند. در ایران، در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳، به‌ترتیب ۴۷، ۸۲، ۹۱ و ۱۰۰ مگاوات ساعت^۱ (MWh) برق از انرژی بادی تولید شد. نتایج بررسی ده‌ساله‌ی وزش باد در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور نشان‌دهنده‌ی وجود توان تولید برق با استفاده از نیروی باد در بسیاری از نواحی کشور در فصل تابستان است (گندم‌کار، ۱۳۸۸: ۸۵).

از لحاظ بین‌المللی، سرعت مطلوب باد برای راه‌اندازی نیروگاه بادی بالای ۶/۵ متر بر ثانیه است؛ اما پیشرفت‌های فناوری فرصت بهره‌برداری از سرعت‌های پایین‌تر باد را نیز امکان‌پذیر ساخته است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۴). بسیاری از محققان حداقل میانگین سرعت باد سالیانه‌ی مناسب برای نصب نیروگاه بادی را ۴ تا ۵ متر بر ثانیه ذکر کرده‌اند (حقی‌فام و سلطانی، ۱۳۸۸: ۲). سازمان انرژی‌های نو مطرح کرد که استفاده از انرژی باد وقتی ممکن است که متوسط سرعت باد در محدوده‌ی ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه باشد (سازمان انرژی‌های نو، ۱۳۸۶:

1. Megawatt hour

۵). برای شرایط بادی متفاوت، توربین‌های بادی مختلفی طراحی شده‌اند؛ بنابراین، برای رسیدن به انرژی خروجی بیشینه در یک مزرعه بادی، انتخاب توربین مناسب بسیار مهم است. این توربین‌ها طوری طراحی شده‌اند که در یک سرعت حداقلی شروع به کار می‌کنند و در سرعت‌های زیاد برای جلوگیری از صدمه به دستگاه از کار بازمی‌ایستند.

شهید و همکاران (۲۰۱۴) امکان اقتصادی توسعه‌ی نیروگاه بادی ۱۵ مگاواتی را در غرب عربستان با آنالیز داده‌های سرعت باد بررسی کردند. آن‌ها تغییرات ماهانه‌ی سرعت باد، توزیع فراوانی تجمعی، نیمرخ سرعت باد، مقادیر ماهانه و سالانه‌ی انرژی تولیدشده از مزرعه‌ی بادی ۱۵ مگاواتی (با ارتفاع توربین ۵۰ متر)، هزینه‌ی تولید انرژی و فاکتور ظرفیت را با استفاده از نرم‌افزار HOMER محاسبه کردند. شامی و همکاران (۲۰۱۶) داده‌های سرعت باد را برای سه استان پاکستان آنالیز کردند. آن‌ها کوشیدند میزان انرژی بادی بهره‌بردار شده از این سه استان را برآورد کنند. بودای و گوئری (۲۰۱۵) داده‌های باد ده‌ساله‌ی ایستگاه هواشناسی را برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد در شمال غرب الجزایر به کار بردند و از نرم‌افزار WASP برای آنالیز اطلس باد منطقه استفاده کردند. آن‌ها هزینه‌ی هر کیلووات ساعت برق تولید شده را با استفاده از ۶ مدل توربین بررسی کردند. کاوازی و داتن (۲۰۱۶) سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (OWE-GIS) انرژی باد را برای بررسی منابع انرژی باد انگلستان توسعه دادند. این سامانه هزینه‌های انرژی حاصل از یک مزرعه‌ی بادی را با در نظر گرفتن مؤلفه‌های عمده‌ی شامل هزینه‌های توسعه‌ی وابسته به عمق آب و فاصله از نزدیک‌ترین نقاط ارتباط شبکه، پتانسیل تولید انرژی وابسته به میانگین سرعت سالانه‌ی باد، نوع توربین، هزینه‌های اجرا و نگهداری و نیز پارامترهای مالی مثل طول عمر پروژه و نرخ افت، برآورد می‌کند.

اسماعیل‌نیا و سجادیان (۱۳۸۹) احداث نیروگاه بادی با ملاحظات مکانیسم پاک را در ایران بررسی کردند. روش به‌کاررفته در این مطالعه تحلیل هزینه‌ی فایده است. نتایج نشان داد که در حال حاضر و با توجه به محدودیت‌های موجود بر سر راه پروژه‌های توسعه‌ی پاک در بخش نیروگاه بادی در ایران، تولید برق بادی چندان مقرون‌به‌صرفه نیست. براساس مطالعه‌ی امکان‌سنجی نوراللهی و همکاران (۱۳۹۰) در منطقه‌ی برق باختر، با فرض استفاده از توربین Gamesa G58، امکان تولید تا ۱۸۹۷ مگاوات برق توسط نیروی باد وجود دارد که این مقدار تأمین‌کننده‌ی ۲۶ درصد برق منطقه‌ای در افق ۱۴۰۴ است. کیهانی و همکاران (۲۰۱۰) پتانسیل انرژی بادی را در تهران بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که پتانسیل باد این منطقه برای کاربرد انرژی بادی در بزرگ‌مقیاس مناسب نیست؛ اما ممکن است برای کاربردهای الکتریکی و مکانیکی غیرشبکه‌ای، مثل ژنراتورهای بادی برای مصرف محلی، شارژ باتری و پمپاژ



آب، مناسب باشد. مصطفایی پور (۲۰۱۰) سرعت باد سالانه و ماهانه در ارتفاع‌های مختلف را برای اطمینان از انتخاب بهینه‌ی توربین بادی برای ایستگاه‌های یزد بررسی کرد. مطهری و همکاران (۱۳۹۳) بهره‌گیری از نیروگاه‌های بادی در ایران را با در نظر گرفتن اثر سیاست آزادسازی قیمت انرژی، از نظر اقتصادی بررسی کردند. آن‌ها برای محاسبه‌ی هزینه‌ی تمام‌شده‌ی تولید برق، از روش هزینه‌ی هم‌تراز شده استفاده کردند. نتایج نشان داد که در اقتصاد ایران، با هدفمند کردن قیمت سوخت در کشور، احداث نیروگاه بادی کاملاً به‌صرفه است. آن‌ها همچنین، با توجه به تغییرات نرخ ارز پیشنهاد دادند که سیاست کلان باید به‌سمت بومی‌سازی صنعت توربین بادی با اولویت قطعات و بخش‌های ارزش‌بر آن برود. محمدی و مصطفایی پور (۲۰۱۳) امکان اقتصادی تولید برق با کاربرد ۶ توربین بادی مختلف از ۲۰ تا ۱۵۰ کیلووات را در شهر الیگودرز بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که در منطقه توان متوسطی برای کاربرد انرژی بادی وجود دارد و همچنین، توربین مدل E-3120 به‌عنوان یک توربین مناسب در منطقه معرفی شد. مصطفایی پور و همکاران (۲۰۱۴) پتانسیل انرژی بادی و امکان اقتصادی کاربرد آن را در شهر زاهدان ارزیابی کردند. آن‌ها داده‌های باد پنج‌ساله را برای پتانسیل انرژی باد تحلیل کردند. همچنین کاربرد چهار توربین بادی را از لحاظ اقتصادی بررسی و نصب توربین Proven 2.5 Kw را توصیه نمودند. فاضل پور و همکاران (۲۰۱۵) پتانسیل انرژی باد را در شهرهای شمال‌غربی، تبریز و اردبیل، بررسی کردند. آن‌ها در این بررسی، از داده‌های سه‌ساعته‌ی سازمان هواشناسی طی دوره‌ی شش‌ساله استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشترین پتانسیل توان باد در ماه‌های آگوست و جولای در تبریز و در ماه‌های اکتبر و سپتامبر در اردبیل وجود دارد. همچنین مشخص شد که میانگین قیمت ماهانه‌ی الکتریسیته‌ی تولیدشده از توربین 25 Kw در تبریز و اردبیل برای بیشتر ماه‌های سال کمتر یا تقریباً برابر با تعرفه‌ی خرید جاری انرژی تجدیدپذیر در ایران است. دباغیان و همکاران (۲۰۱۶) پتانسیل انرژی بادی را برای چهار مکان (عسلویه، دلوار، هفت‌چاه و بردخان) در استان بوشهر بررسی کردند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که منطقه‌ی بردخان پتانسیل بیشتری برای کاربرد انرژی بادی در مقایسه با مکان‌های مورد بررسی دیگر استان دارد. آن‌ها همچنین، دوازده توربین بادی پارامترها، توربین Proven 15 بیشترین فاکتور ظرفیت را دارد و از لحاظ اقتصادی، به‌عنوان بهترین توربین انتخاب شد.

با وجود نیاز روزافزون به تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، تاکنون بررسی جامعی از پتانسیل باد و ارزیابی اقتصادی کاربرد انرژی بادی در سطح استان کرمانشاه انجام نشده است؛

بنابراین، هدف این بررسی ارزیابی اقتصادی تولید برق از انرژی بادی در سطح استان کرمانشاه برای پاسخ به این نیاز بوده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- ارزیابی اقتصادی

یکی از روش‌های ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی، از جمله نیروگاه‌های تولید برق، روش خالص ارزش حال پروژه^۱ (NPV) و استفاده از شاخص نسبت منفعت (B) به هزینه (C) است (B/C). در این روش، تمامی هزینه‌های احداث و نگهداری نیروگاه طی سال‌های عمر مفید و همچنین درآمدهای حاصل از فروش برق به ارزش حال تنزیل داده می‌شود. سپس، از تفاضل ارزش حال درآمدها^۴ (PVB) از ارزش حال هزینه‌ها^۵ (PVC)، خالص ارزش حال پروژه محاسبه می‌شود. اگر NPV کوچک‌تر از صفر باشد، پروژه غیراقتصادی و چنانچه مثبت باشد، پروژه اقتصادی است. با محاسبه شاخص نسبت منفعت به هزینه نیز ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها ممکن می‌شود. چنانچه نسبت مذکور بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشد، پروژه اقتصادی و در غیر این صورت، انجام پروژه اقتصادی نیست (اسکونژاد، ۱۳۹۰: ۱۲۴).

چنانچه دو یا چند طرح دارای هزینه‌های اولیه متفاوت با یکدیگر مقایسه شوند، باید از اصول روش تجزیه و تحلیل سرمایه‌گذاری اضافی^۶ (EIA) استفاده شود و از طریق تشکیل نسبت تفاوت (B/C)، طرح‌ها از نظر اقتصادی بررسی شوند (همان: ۱۶۸). در این تحقیق، برای انتخاب بهترین پروژه از میان پروژه‌های منتخب اولیه، از روش EIA استفاده کردیم. برای این کار، پروژه‌ها را برحسب ارزش حال هزینه‌ها با ترتیب صعودی مرتب کردیم و سپس با محاسبه نسبت منفعت به هزینه برای تفاوت دو پروژه، ارزیابی اقتصادی را به صورت دوه‌دو (با شروع از پروژه‌های با کمترین هزینه اولیه) انجام دادیم. چنانچه نسبت تفاوت ارزش حال منافع به تفاوت ارزش حال هزینه‌ها (برای مقایسه دو پروژه) بزرگ‌تر از یک باشد، پروژه با هزینه اولیه بیشتر اقتصادی‌تر است و چنانچه این نسبت کوچک‌تر از یک باشد، پروژه با هزینه اولیه کمتر اقتصادی‌تر است.

1. Net Present value
2. Benefit
3. cost
4. Present value of benefit
5. Present value of cost
6. Extra Investment Analysis



روابط ۱ تا ۳ شاخص‌های ارزیابی اقتصادی به کاررفته در این تحقیق و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن‌ها را نشان می‌دهند:

$$NPV = PVB - PVC \quad .1$$

$$B/C = PVB/PVC \quad .2$$

$$NPV = (AEP \times P) \left(\frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \right) + S \times \left(\frac{1}{(1+i)^N} \right) - ICC - OMRC \quad .3$$

$$\left(\frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \right)$$

AEP: تولید سالانه‌ی انرژی توسط یک توربین برحسب کیلووات ساعت

P: قیمت هر کیلووات ساعت برق

i: نرخ بهره

N: سال‌های عمر مفید توربین

ICC: هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه

OMRC: هزینه‌های بهره‌برداری حفظ و تعمیرات

PWB: ارزش حال منافع ناشی از احداث پروژه

PWC: ارزش حال هزینه‌های ناشی از احداث پروژه

NPW: ارزش فعلی خالص

در برآورد هزینه‌های تولید انرژی با یک سیستم توربین بادی، باید هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، عمر مفید سیستم و ارزش اسقاط در نظر گرفته شوند.

هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه^۱ (ICC): این هزینه شامل قیمت اولیه‌ی خرید توربین^۲ به علاوه‌ی ۲۰ درصد از قیمت اولیه به عنوان هزینه‌های عمرانی^۳ موردنیاز اولیه است (Boudia & Guerri, 2015: 84). هزینه‌های عمرانی شامل هزینه‌های زیربنایی نصب، مانند فونداسیون، کارهای ساختمانی، مهندسی و هزینه‌های اتصال به شبکه است. مقدار این هزینه‌ها در

1. Initial Capital Costs
2. turbine price
3. costs civil work

مکان‌های مختلف به‌وضوح متفاوت است و به عوامل مختلفی مانند شرایط خاک، فاصله تا شبکه و ... بستگی دارد.

هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات^۱ (OMRC): هزینه‌های OMR سالیانه اغلب به‌صورت درصدی از کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می‌شوند (Ibid). در این مطالعه، این هزینه را به‌صورت ۲۵ درصد از هزینه‌ی سالیانه‌ی توربین محاسبه کردیم. هزینه‌ی سالیانه‌ی توربین از تقسیم قیمت خرید بر سال‌های عمر مفید به‌دست آمده است.

عمر مفید سیستم^۲: برای بررسی‌های اقتصادی توربین‌ها، اغلب یک عمر مفید اقتصادی (از ۱۵ تا ۲۵ سال) در نظر گرفته می‌شود (Ibid) که با عمر مفید طراحی سیستم برابر است.

ارزش اسقاط^۳: ارزش اسقاط به‌صورت درصدی (در این مطالعه، ۱۰ درصد) از مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری توربین در نظر گرفته می‌شود (Ibid).

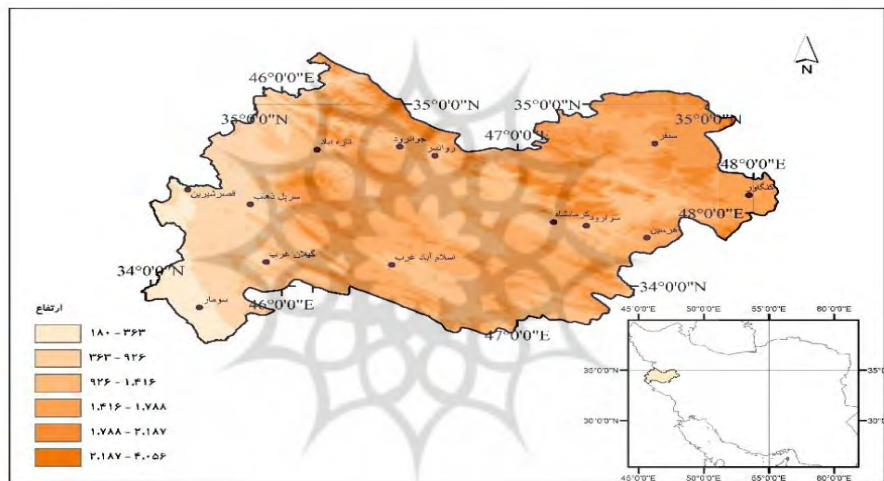
۲-۲- داده‌ها و پارامترهای فنی به‌کاررفته

برای ارزیابی کارایی توربین‌های بادی مختلف و اقتصادی بودن کاربرد آن‌ها برای تولید برق در شهرستان‌های مختلف استان کرمانشاه، داده‌های ۵ ایستگاه همدید و ۸ ایستگاه همدید تکمیلی را در دوره‌ی آماری مشترک ۲۰۰۹-۲۰۱۳ در مقیاس زمانی ۳ ساعته، از سازمان هواشناسی به‌دست آوردیم (شکل ۱). پس از بررسی‌های کیفی، همگنی داده‌ها و اصلاح آن‌ها (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷) با کاربرد نرم‌افزارهای WASP و Windographer تابع ویبول به داده‌ها برازش داده شد و با استفاده از داده‌های توپوگرافی، زبری سطح و موانع ایستگاه‌ها و محاسبه‌ی اطلس و نیمرخ باد (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷)، احتمال تولید انرژی، ضریب ظرفیت و خروجی انرژی سالانه‌ی توربین‌های مختلف در شرایط زبری سطحی $0.3m$ را برآورد کردیم. برای محاسبه‌ی تولید سالانه‌ی انرژی (AEP) توربین‌ها و ضریب ظرفیت، از مدل احتمالاتی بر مبنای توزیع احتمالی ویبول استفاده کردیم (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷). توربین‌ها با دو پارامتر سرعت باد ویژه (سرعت کات‌این و کات‌اوت) توصیف می‌شوند. سرعت کات‌این کمینه‌ی سرعت بادی است که توربین شروع می‌کند به تولید انرژی مفید و کات‌اوت سرعت بادی است که توربین برای جلوگیری از آسیب دیدن، خاموش می‌شود. برای اغلب توربین‌ها، سرعت کات‌این حدود ۳ تا ۵

1. operation, maintenance & Repair costs
2. Life time
3. Salvage Value



متر بر ثانیه است و سرعت کاتاوت ممکن است تا ۲۵ متر بر ثانیه باشد. فراوانی سرعت باد بین این دو مقدار آستانه برای بررسی عملکرد و امکان‌سنجی اقتصادی توربین بادی در یک مکان خاص، بسیار مهم است. احتمال تولید انرژی توربین‌های بادی به‌وسیله‌ی توزیع ویبول تجمعی محاسبه می‌شود (Shu & et-al, 2015: 645). انرژی خروجی توربین‌های بادی اطلاعات مفیدی را برای انتخاب کارآمدترین توربین بادی برای هر منطقه فراهم می‌کند. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بهره‌وری توربین بادی فاکتور ظرفیت است (Cf). فاکتور ظرفیت نسبت خروجی واقعی انرژی (Eout) به خروجی نظری بیشینه (Erated) است؛ با این فرض که توربین بادی با توان ۱۰۰ درصد کار کند (Dabbaghiyan & et-al, 2016: 458).



شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه و ایستگاه‌های همدید
(مدل رقومی ارتفاع از سایت NASA SRTM)

Figure 1 Location of synoptic stations in the study area
(Digital Elevation Model from NASA SRTM site)

۳- یافته‌های تحقیق

۳-۱- ارزیابی پارامترهای فنی

به‌دلیل کاهش دقت برآوردها در ارتفاعات بالاتر از سطح زمین در مناطقی با توپوگرافی پیچیده (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۷۶)، کوشیدیم توربین‌هایی با ارتفاع برجی کمتر (ارتفاعی برابر ۴۰ تا حدود ۶۰ متر) را برای بررسی انتخاب کنیم. همچنین، به‌دلیل بالا نبودن سرعت باد

منطقه در ارتفاعات نزدیک به سطح زمین، تنها توربین‌های نوع محور افقی را در نظر گرفتیم. در نهایت، تلاش کردیم انواع مختلفی از توربین‌های محور افقی را از نظر توان تولید انرژی انتخاب کنیم.

مشخصات ۱۰ توربین انتخاب شده با ارتفاع برج بین ۴۰ تا ۵۹ متر را در جدول ۱ ارائه کردیم. توربین‌های منتخب را برحسب قدرت در این جدول مرتب کردیم و به هر یک شماره‌ی ردیفی اختصاص دادیم که در متن، آن‌ها را با آن شماره معرفی خواهیم کرد (به توربین با بیشترین قدرت شماره‌ی ردیف ۱ و به توربین با کمترین قدرت شماره‌ی ردیف ۱۰ را اختصاص دادیم). توان تولید انرژی در توربین‌های انتخاب شده از ۵۰۰ کیلووات (توربین ۱۰) تا ۲۰۰۰ کیلووات (توربین ۱) متغیر است. سرعت شروع به کار توربین‌ها بین ۳ تا ۴ متر بر ثانیه و سرعت توقف کار آن‌ها برای جلوگیری از آسیب، بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه است. قطر روتور توربین‌های انتخاب شده از ۴۷ متر در توربین ۹ تا ۸۲ متر در توربین ۱ متغیر است. همچنین، کمینه‌ی سرعت بادی که به بیشینه‌ی تولید انرژی می‌رسد، بین ۱۰ متر بر ثانیه برای توربین ۱۰ تا ۱۷ متر بر ثانیه برای توربین ۲ تغییر می‌کند.

جدول ۱ مشخصات توربین‌ها (<https://en.wind-turbine-models.com>)

Table 1 Turbines properties

ردیف	مدل توربین	ارتفاع برج توربین (m)	قدرت توربین (kW)	کمینه‌ی سرعت باد بیشینه‌ی تولید انرژی (m/s)	قطر روتور (m)	سرعت شروع به چرخش (کات این) (m/s)	سرعت توقف چرخش (کات اوت) (m/s)
۱	REpower MM82	۵۹	۲۰۰۰	۱۳	۸۲	۳/۵	۲۵
۲	Nordex N60/1300kw	۴۶	۱۳۰۰	۱۷	۶۰	۴	۲۵
۳	Suzlon S64-1.25 MW	۵۶/۵	۱۲۵۰	۱۵	۶۴	۳/۵	۲۵
۴	Gamesa G58-850kw	۴۴	۸۵۰	۱۲	۵۸	۳	۲۳
۵	Enercon E-48/800kW	۵۰	۸۰۰	۱۴	۴۸	۳	۲۵
۶	Hyosung HS50	۵۰	۷۵۰	۱۴/۵	۵۰	۴	۲۵
۷	Unison U50	۵۰	۷۵۰	۱۲/۵	۵۰	۳	۲۵
۸	Aeronautica 54-750	۵۰	۷۵۰	۱۳	۵۴	۴	۲۰
۹	RRB Energy PS 600	۴۸/۱	۶۰۰	۱۵	۴۷	۴	۲۵
۱۰	EWT DW54-500	۴۰	۵۰۰	۱۰	۵۴	۳	۲۵



در این بخش، ابتدا به‌طور مختصر ویژگی‌های توربین‌های منتخب برای بررسی را بیان و سپس، نتایج بررسی ارزیابی اقتصادی آن‌ها را ارائه می‌کنیم.

در بین توربین‌ها، در تمام ایستگاه‌ها باتوجه به ویژگی‌های اقلیم باد منطقه، بیشترین میزان احتمال تولید انرژی به توربین ۵ و ۷ کیلوواتی مربوط است و توربین‌هایی که سرعت کات‌این بیشتری دارند در تمامی ایستگاه‌های منطقه، کمترین احتمال تولید انرژی را دارند (جدول ۶). همچنین، در ایستگاه تازه‌آباد، با تولید انرژی توربین‌ها در ۸۰ تا ۸۹ درصد از مواقع بیشترین و در ایستگاه کنگاور، با تولید انرژی توربین‌ها تنها در ۳۰ تا ۴۰ درصد از مواقع کمترین احتمال تولید انرژی وجود دارد. با بررسی ضریب ظرفیت توربین‌ها، روشن شد که توربین ۱۰ کیلوواتی بهترین کارایی را در تمام ایستگاه‌ها دارد (جدول ۴). همچنین، در بین مناطق مختلف استان، بهترین کارایی توربین‌ها (به‌عنوان نمونه، توربین ۵۰۰ کیلوواتی) در محدوده‌ی ایستگاه‌های گیلان‌غرب (۴۶/۴ درصد)، تازه‌آباد (۴۴/۲ درصد) و سومار (۳۹/۲ درصد) و کمترین کارایی در محدوده‌ی ایستگاه‌های کنگاور (۱۴ درصد)، سرپل‌ذهاب (۱۸/۲ درصد) و جوانرود (۱۹/۵ درصد) برآورد شده است. بیشترین خروجی انرژی سالانه در تمامی ایستگاه‌ها طبیعتاً به توربین ۱ مربوط است که به‌دلیل توان یا قدرت بالای این توربین است. میزان تولید انرژی سالانه‌ی این توربین از ۱۹۶۳۹۱۴ کیلووات ساعت در سال در ایستگاه کنگاور تا ۶۶۸۸۸۰۹ کیلووات ساعت در سال در ایستگاه گیلان‌غرب متغیر است (جدول ۵). مقدار تولید انرژی سالانه‌ی توربین ۱۰ که بیشترین ضریب ظرفیت را دارد، از ۲۰۳۰۸۳۷ کیلووات ساعت در سال در محدوده‌ی ایستگاه گیلان‌غرب تا ۶۱۴۱۷۴ کیلووات ساعت در سال در محدوده‌ی ایستگاه کنگاور متغیر است. به‌طور کلی، ایستگاه‌های موردبررسی به‌ترتیب تولید انرژی سالانه عبارت‌اند از: گیلان‌غرب، تازه‌آباد، سومار، سرارود، کرمانشاه، سنقر، اسلام‌آباد، هرسین، روانسر، قصرشیرین، جوانرود، سرپل‌ذهاب و کنگاور.

جدول ۶ میزان احتمال تولید انرژی یا فراوانی سرعت باد بین دو مقدار کات‌این و کات‌اوت توربین‌های مختلف را در محدوده‌ی ایستگاه‌های موردبررسی نشان می‌دهد. توربین‌ها در ایستگاه تازه‌آباد با تولید انرژی در ۸۰ تا ۸۹ درصد از مواقع بیشترین و در ایستگاه کنگاور با تولید انرژی تنها در ۳۰ تا ۴۰ درصد از مواقع کمترین احتمال تولید انرژی را دارند.

۲-۳- ارزیابی اقتصادی

جدول ۷ پارامترهای مالی موردنیاز برای انجام ارزیابی اقتصادی انواع توربین‌های بادی را در محدوده‌ی ایستگاه‌های مختلف استان کرمانشاه نشان می‌دهد.

برای تبدیل قیمت‌ها از دلار به تومان از نرخ تبدیل ارز اعلام‌شده از سوی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران استفاده کردیم. این نرخ در تاریخ ۲۱ فروردین سال ۱۳۹۷ برابر ۴۲۰۰

تومان به‌ازای هر دلار آمریکا بوده است. هزینه‌های توربین بادی به توان توربین بستگی دارد؛ اگرچه تغییراتی بین قیمت کارخانه‌های مختلف نیز وجود دارد (جدول ۲).

جدول ۲ دامنه‌ی هزینه‌ی توربین بر مبنای قدرت موتور (Adaramola & et-al, 2011: 3365)

Table 2 Turbine cost range based on engine power

متوسط هزینه (\$/KW)	هزینه (\$/KW)	اندازه‌ی توربین بادی (KW)
۲۶۰۰	۳۰۰۰-۲۲۰۰	<۲۰
۱۷۷۵	۲۳۰۰-۱۲۵۰	۲۰-۲۰۰
۱۱۵۰	۱۶۰۰-۷۰۰	>۲۰۰

مبنای قیمت فروش برق تولیدشده توسط توربین‌های بادی، استفاده از نرخ خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های بادی اعلام‌شده از سوی وزارت نیرو است. این قیمت در سال ۱۳۹۴ و برای مزرعه‌ی بادی با ظرفیت بیش از ۵۰ مگاوات، برابر ۴۹۷ تومان بر کیلووات ساعت است (وبگاه سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق).

جدول ۳ تعرفه‌ی خرید تضمینی برق (سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر، ۱۳۹۴)

Table 3 Electricity guaranteed purchase tariff (Renewable Energy Organization, 2015)

نوع فناوری	تعرفه‌ی خرید تضمینی برق (تومان بر کیلووات ساعت)
مزرعه‌ی بادی با ظرفیت بیش از ۵۰ مگاوات	۴۰۶
مزرعه‌ی بادی با ظرفیت ۵۰ مگاوات و کمتر	۴۹۷
بادی با ظرفیت ۱ مگاوات و کمتر (مختص مشترکان برق و محدود به ظرفیت انشعاب)	۵۹۳

جدول ۸ نتایج ارزیابی اقتصادی توربین‌های موردبررسی را به تفکیک در شهرستان‌های استان کرمانشاه نشان می‌دهد. همچنین، جدول ۹ خلاصه‌ای از نتایج تحلیل اقتصادی را به صورت نسبت شاخص منفعت به هزینه در پروژه‌های دارای توجیه اقتصادی ارائه می‌کند. از آنجا که هزینه‌های سرمایه‌گذاری یک توربین خاص در تمامی شهرستان‌ها مشابه است، اقتصادی‌ترین مکان برای احداث مزرعه‌ی بادی با یک توربین خاص، از طریق حداکثر مقدار نسبت منافع به هزینه مشخص می‌شود (اسکونزاد، ۱۳۹۰: ۱۶۷). این موضوع در ستون آخر



جدول ۹، مشخص شده است. همان‌طور که می‌بینیم، از نظر مکان احداث، محدوده‌ی ایستگاه گیلان غرب اقتصادی‌ترین مکان احداث نیروگاه بادی است. استفاده از تمامی انواع توربین‌های موردبررسی در این محدوده درمقایسه با مناطق دیگر بیشترین توجیه اقتصادی را دارد. تنها استفاده از توربین ۲ با اختلاف بسیار جزئی در محدوده‌ی ایستگاه تازه‌آباد، اقتصادی‌تر از گیلان غرب است. احداث نیروگاه بادی با توربین‌های موردبررسی در محدوده‌ی ایستگاه‌های اسلام‌آباد، کنگاور، سرپل‌ذهاب، روانسر، سنقر، هرسین، جوانرود و قصرشیرین توجیه اقتصادی ندارد. در محدوده‌ی ایستگاه کرمانشاه، تنها استفاده از توربین ۱۰ توجیه اقتصادی دارد.

جدول شماره ۱۰ احداث توربین بادی در محدوده‌ی ایستگاه‌های استان کرمانشاه برحسب ارزش حال هزینه‌ها را با ترتیب صعودی به‌منظور مقایسه‌ی دوه‌دو و انتخاب اقتصادی‌ترین پروژه نشان می‌دهد. چنانچه دو یا چند طرح دارای هزینه‌های اولیه‌ی متفاوت با یکدیگر مقایسه شوند، باید از اصول روش سرمایه‌گذاری اضافی استفاده شود و از طریق تشکیل نسبت تفاوت (B/C)، طرح‌ها از نظر اقتصادی بررسی شوند (اسکونژاد، ۱۳۹۰: ۱۶۸).

از میان پروژه‌های منتخب در جدول ۹، برای انتخاب بهترین پروژه، از روش تجزیه و تحلیل سرمایه‌گذاری اضافی استفاده کردیم. با این روش درنهایت، احداث نیروگاه بادی در محدوده‌ی ایستگاه گیلان غرب با توربین ۱ اقتصادی‌ترین حالت به‌منظور احداث نیروگاه بادی در استان کرمانشاه است.

جدول ۴ ضریب ظرفیت توربین‌های مختلف در ایستگاه‌های موردبررسی (%)

Table 4 Capacity factor of different turbines at stations (%)

ردیف	مدل توربین	کرمانشاه	سلام‌آباد	کنگاور	سرپل‌ذهاب	روانسر	سنقر	هرسین	سرارود	جوانرود	قصرشیرین	گیلان غرب	سومار	تازه‌آباد
۱	REpower MM82	۲۲/۷	۲۲/۱	۱۰/۹	۱۴/۳	۱۸/۵	۲۲/۵	۱۹/۸	۲۹/۹	۱۵	۱۶/۹	۳۷/۲	۳۰/۸	۳۴/۹
۲	Nordex N60/1300kw	۱۶/۷	۱۶/۴	۸	۱۰/۸	۱۳/۸	۱۶/۱	۱۴/۱	۲۱/۹	۱۰/۷	۱۲/۳	۲۷/۳	۲۵	۲۷/۶
۳	Suzlon S64-1.25 MW	۲۰/۸	۲۰/۶	۱۰/۱	۱۳/۱	۱۷/۴	۲۰/۸	۱۸/۱	۲۷/۷	۱۳/۷	۱۵/۳	۳۴/۳	۲۸	۳۱/۹
۴	Gamesa G58-850kw	۲۴/۴	۲۳/۵	۱۱/۹	۱۵/۵	۱۹/۵	۲۴/۱	۲۱/۵	۳۱/۷	۱۶/۴	۱۸/۵	۳۹/۷	۳۳/۱	۳۷/۴
۵	Enercon E-48/800kW	۲۰/۶	۲۰/۶	۱۰/۱	۱۳/۱	۱۷/۵	۲۰/۷	۱۸	۲۷/۶	۱۳/۶	۱۵/۱	۳۴	۲۷/۷	۳۱/۶
۶	Hyosung HS50	۲۰/۷	۲۰/۷	۱۰	۱۳	۱۷/۵	۲۰/۸	۱۸	۲۷/۸	۱۳/۶	۱۵/۲	۳۴/۴	۲۸/۱	۳۲
۷	Unison U50	۲۲/۵	۲۲/۲	۱۱	۱۴/۳	۱۸/۷	۲۲/۵	۱۹/۷	۲۹/۸	۱۴/۹	۱۶/۷	۳۶/۹	۳۰/۳	۳۴/۴
۸	Aeronautica 54-750	۲۲/۳	۲۱	۱۰/۵	۱۳/۹	۱۷/۲	۲۱/۷	۱۹/۵	۲۹	۱۴/۸	۱۶/۷	۳۷	۳۰/۷	۳۴/۹
۹	RRB Energy PS 600	۲۱/۴	۲۱/۲	۱۰/۴	۱۳/۵	۱۷/۹	۲۱/۴	۱۸/۷	۲۸/۴	۱۴/۱	۱۵/۸	۳۵/۱	۲۸/۹	۳۲/۸
۱۰	EWT DW54-500	۲۸/۷	۲۷/۴	۱۴	۱۸/۲	۲۲/۸	۲۸/۱	۲۵/۳	۳۶/۹	۱۹/۵	۲۲/۱	۴۶/۴	۳۹/۲	۴۴/۲

جدول ۵ خروجی انرژی سالانه برای توربین‌های مختلف در ایستگاه‌های موردبررسی (kWh/yr)

Table 5 Annual power output for different turbines at the stations (kWh / yr)

ردیف	مدل توربین	کرماتشاه	سلام‌آباد	کنگاور	سرپل‌ذهاب	روانسر	سنقر	هرسین	سررود	جواترود	نصرشیرین	گیلان‌غرب	سومار	تازه‌آباد
۱	REpower MM82	۸۱۱۲۱۰۴	۴۶۴۰۸۶	۴۱۳۴۶۱	۰۰۱۱۲۶۲	۱۳۵۷۳۱۱	۱۷۷۱۸۸۱	۳۵۵۷۶۰	۵۳۸۶۳۸	۲۷۰۴۰۳	۴۳۴۷۳۰۳	۹۰۷۷۷۶۶	۵۵۳۷۳۰۰	۶۳۳۳۸۱۶
۲	Nordex N60/1300kw	۷۰۱۶۶۷۱	۰۳۴۰۸۶	۴۱۳۴۶۱	۵۱۱۰۳۱۵	۷۲۰۳۸۵۱	۱۸۳۴۳۸۵	۴۴۱۰۶۰	۲۱۸۸۹۱۰	۶۰۱۷۱۷۱	۱۴۰۵۳۳۴	۶۶۶۱۱۱۲	۶۵۳۴۳۵۸	۱۰۶۴۹۱۱۳
۳	Suzlon S64-1.25 MW	۷۵۳۶۸۱	۸۶۴۴۵۸۷	۴۱۳۴۶۱	۱۱۱۰۳۱۵	۷۰۷۱۰۵۱	۲۲۷۳۳۸۷	۱۴۱۱۴۱۱	۲۳۳۳۳۳۳	۱۴۰۵۳۳۴	۸۷۶۴۴۸۷	۳۸۱۱۳۸۱	۶۶۶۱۱۱۲	۶۴۷۴۴۴۴
۴	Gamesa G58-850kw	۸۵۱۶۱۵۱	۱۷۴۰۰۰۱	۸۸۴۴۴۵	۱۱۵۱۴۵۸	۸۱۶۴۹۲۷	۱۸۱۱۱۷۱	۱۵۹۲۳۸۵	۲۳۳۳۳۳۵	۱۲۴۴۴۵۴	۱۳۷۱۰۲۵	۲۵۳۳۳۵۶	۲۴۳۴۳۴۶	۲۷۸۵۲۳۲
۵	Enercon E-48/800kW	۱۷۴۳۴۳۱	۱۱۷۱۷۱۴	۷۱۴۴۴۳	۶۷۳۴۴۶	۱۰۰۶۷۲۲۱	۱۴۷۱۸۵۳	۱۲۷۳۴۹۸	۱۹۵۷۱۱۰	۷۰۴۴۴۶	۴۴۴۴۴۶	۶۷۸۱۱۴۱	۱۶۳۴۳۴۶	۷۵۰۰۲۲۱
۶	Hyosung HS50	۱۳۸۱۶۸۱	۳۱۳۴۳۳۳	۶۸۳۳۳۶	۶۸۳۳۳۶	۸۸۸۶۷۲۷	۱۰۰۳۴۹۰۱	۱۱۸۵۵۳۳	۱۸۳۴۳۴۶	۸۷۱۳۹۷	۳۱۳۴۳۳۳	۲۳۳۳۳۵۰	۱۸۳۴۳۴۶	۸۷۴۴۴۴۱
۷	Unison U50	۷۵۳۶۸۱	۱۴۵۸۷۲۰	۷۲۱۲۸۱	۹۳۳۴۳۶	۸۱۴۴۴۷	۱۴۷۱۸۵۳	۱۲۱۱۲۵۵	۱۵۵۳۳۴۰	۹۱۰۵۶۷	۷۶۶۸۶۰	۲۳۳۳۳۵۰	۱۹۴۹۳۴۱	۱۵۵۱۶۲۱
۸	Aeronautica 54-750	۱۴۳۴۳۴۶	۶۷۸۱۷۱۴	۶۴۳۳۳۳	۹۱۰۱۱۱	۱۱۲۷۰۹۳	۱۴۳۴۳۴۶	۱۲۸۰۵۰۳	۱۹۰۵۸۳۳	۶۷۷۳۳۳۶	۱۰۰۹۷۷۶	۲۳۳۳۳۳۳	۲۰۱۵۰۸۴	۷۶۷۰۶۲۱
۹	RRB Energy PS 600	۱۱۱۴۳۵۸	۱۱۱۴۳۵۸	۵۳۳۳۳۶	۷۱۰۹۱۵	۹۳۴۳۴۵	۱۱۳۵۳۳۱	۹۸۱۷۳۴	۱۴۴۳۳۳۴	۷۴۳۳۳۸۵	۸۳۳۳۳۵۰	۱۸۳۳۳۳۳	۱۵۱۷۱۴۳	۱۷۳۰۳۳۱
۱۰	EWT DW54-500	۱۱۱۴۳۵۸	۱۱۱۴۳۵۸	۵۳۳۳۳۶	۷۱۰۹۱۵	۹۳۴۳۴۵	۱۱۳۵۳۳۱	۹۸۱۷۳۴	۱۴۴۳۳۳۴	۷۴۳۳۳۸۵	۸۳۳۳۳۵۰	۱۸۳۳۳۳۳	۱۵۱۷۱۴۳	۱۹۳۴۳۴۶



جدول ۶ احتمال تولید انرژی برای توربین‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد بررسی (برحسب درصد)

Table 6 Power generation probability for different turbines at the Stations (%)

ردیف	مدل توربین	کرمانشاه	اسلام‌آباد	کنگاور	سرپل‌ذهاب	روانسر	سنقر	هرسین	سرارود	جواهرود	قصرشیرین	گیلان‌غرب	سومار	تازه‌آباد
۱	REpower MM82	۶۹	۵۷	۳۷	۴۶	۴۶	۶۲	۶۴	۷۵	۵۴	۶۱	۸۶	۸۲	۸۶
۲	Nordex N60/1300kw	۶۰	۵۰	۳۰	۳۹	۴۰	۵۴	۵۵	۶۷	۴۵	۵۰	۷۹	۷۴	۸۰
۳	Suzlon S64-1.25 MW	۶۹	۵۷	۳۶	۴۶	۴۶	۶۱	۶۴	۷۴	۵۴	۶۰	۸۵	۸۱	۸۶
۴	Gamesa G58-850kw	۷۱	۶۰	۳۹	۴۹	۴۸	۶۴	۶۷	۷۷	۵۷	۶۴	۸۷	۸۴	۸۸
۵	Enercon E-48/800kW	۷۳	۶۱	۴۰	۵۱	۵۰	۶۶	۶۸	۷۸	۵۹	۶۶	۸۸	۸۵	۸۹
۶	Hyosung HS50	۶۱	۵۱	۳۰	۴۰	۴۱	۵۵	۵۶	۶۸	۴۶	۵۲	۸۰	۷۵	۸۱
۷	Unison U50	۷۳	۶۱	۴۰	۵۱	۵۰	۶۶	۶۸	۷۸	۵۹	۶۶	۸۸	۸۵	۸۹
۸	Aeronautica 54-750	۶۱	۴۹	۳۰	۳۹	۳۹	۵۴	۵۶	۶۷	۴۶	۵۲	۷۹	۷۵	۸۰
۹	RRB Energy PS 600	۶۱	۵۱	۳۰	۳۹	۴۱	۵۴	۵۵	۶۸	۴۶	۵۱	۷۹	۷۴	۸۰
۱۰	EWT DW54-500	۷۱	۶۰	۳۹	۴۹	۴۸	۶۴	۶۶	۷۶	۵۶	۶۳	۸۷	۸۳	۸۷

جدول ۷ پارامترهای مالی مورد استفاده در ارزیابی اقتصادی توربین‌های بادی

Table 7 Financial parameters used in economic evaluation of turbines

	EWT DW54- 500	RRB Energy PS 600	Aeronautica ۷۵۰-۵۴	Unison U50	Hyosung HS50	Enercon E- 48/800kW	Gamesa G58- 850kw	Suzlon S64- 1.25 MW	Nordex N60/1300kw	REpower MM82	
هزینه‌ها (میلیون)	۳۷۵۶	۴۵۰۷	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۶۰۱۰	۵۷۸۵	۶۳۹۰	۶۷۶۶	۱۵۴۰۰	توربین (۷۱۱)
ارزش‌ها (میلیون)	۶۸۴۶۷	۱۰۰۷۳۱۹۱	۱۳۴۱۴۸۹	۱۳۴۱۴۸۹	۱۳۴۱۴۸۹	۱۴۳۰۳۲۲	۱۵۲۰۲۵۴	۲۲۳۵۸۱۵	۲۳۲۵۲۴۸	۶۶۶۶۲۶	توربین (۷۱۱)
ارزش اسقاط	۱۶۷۴۷	۱۰۰۱۱۳۴	۱۲۲۲۲	۱۲۲۲۲	۱۲۲۲۲	۱۳۵۸۸۱	۱۴۴۲۶۴	۲۱۲۱۵۳	۲۲۰۶۳۹	۳۴۷۹۲۱	توربین (۷۱۱)
سرمایه‌گذار	۳۱۶۷۴۷	۱۰۱۱۳۳۶	۶۱۶۲۸۱۹	۶۱۶۲۸۱۹	۶۱۶۲۸۱۹	۱۷۸۷۸۱۱	۱۴۴۲۶۴۴	۱۲۱۲۱۵۳۲	۲۲۰۶۳۹۴	۳۴۷۹۲۱۳	توربین (۷۱۱)
هزینه‌های حفاظ و نگهداری	۸۸۰۷	۶۷۴۶	۷۰۶۰۱	۷۰۶۰۱	۷۰۶۰۱	۱۱۳۱۵	۱۲۰۲۲	۱۷۶۷۹	۱۸۳۸۱	۴۶۶۷۸	توربین (۷۱۱)
هزینه‌های عمومی	۵۲۴۱۴۱	۱۶۹۷۲۳	۲۱۱۶۱۵۳	۲۱۱۶۱۵۳	۲۱۱۶۱۵۳	۲۲۶۲۸۷	۲۴۰۴۴۰	۳۵۳۵۵۹	۳۸۷۷۲۲	۵۷۷۶۸۶	توربین (۷۱۱)
سالیانه	۸۷۸۷۱	۵۴۶۳۱	۱۴۴۲۴	۱۴۴۲۴	۱۴۴۲۴	۱۵۲۵۹	۱۷۷۰۸۴	۲۱۷۸۰	۲۳۵۴۶	۸۸۶۵۱۱	توربین (۷۱۱)
توربین	۸۸۱۸۰۸	۳۱۶۷۴۷	۶۶۷۶۳۰۱	۶۶۷۶۳۰۱	۶۶۷۶۳۰۱	۱۱۳۱۴۸۴	۱۲۰۲۰۲۱	۱۶۶۸۴۴	۱۸۳۸۶۶۱	۷۸۴۶۶۷۸	توربین (۷۱۱)



جدول ۸ نتایج محاسبات تحلیل اقتصادی توربین نوع UNISON U50 در ایستگاه‌های مورد بررسی (میلیون تومان)

Table 8 Results of economic analysis of UNISON U50 Turbine at the stations (Million Tomans)

نوع توربین	کرماتشاه	اسلام‌آباد	کنگاور	سرپل‌ذهاب	روانسر	سنقر	هرسین	سررود	جوآرود	قصرشیرین	گیلان‌غرب	سومار	تازه‌آباد
AEP (GW/year)	۱۴۷۷۹۵۸	۱۴۵۸۷۲۰	۷۲۱۲۸۱	۹۳۶۸۲۵	۱۳۰۴۲۷	۱۴۷۵۶۶۷	۱۲۹۱۲۵۵	۱۹۵۶۸۲۰	۹۸۰۵۶۷	۱۰۹۷۹۹۸	۲۴۲۱۷۱۳	۱۹۸۹۲۴۱	۲۴۶۱۵۵۱
PVB	۴۷۴۸	۴۶۸۶	۲۳۱۷	۳۰۱۰	۳۹۵۲	۴۷۴۱	۴۱۴۸	۶۲۸۷	۳۱۵۰	۲۵۲۸	۷۷۸۰	۶۳۹۱	۷۲۶۶
PVC	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴	۵۶۳۴
NPW	-۸۸۶	-۹۴۸	-۳۳۱۷	-۲۶۲۵	-۱۶۸۱	-۸۹۳	-۱۴۸۶	۶۵۲	-۲۴۸۴	-۲۱۰۷	۲۱۴۶	۷۵۷	۱۶۳۱
BC	۰/۸۴	-۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۷۰	۰/۸۴	۰/۷۴	۱/۱۲	۰/۵۶	۰/۶۳	۱/۳۸	۱/۱۳	۱/۲۹

جدول ۹ نسبت شاخص منفعت به هزینه در پروژه‌های دارای توجیه اقتصادی

Table 9 Benefit to Cost ratio in economic projects

اقتصادی‌ترین مکان	شاخص (B/C)												نوع توربین	ردیف	
	تازه‌آباد	سومار	گیلان‌غرب	قصرشیرین	جوآرود	سررود	هرسین	سنقر	روانسر	سرپل‌ذهاب	کنگاور	اسلام‌آباد			کرماتشاه
گیلان‌غرب	۱/۳۱	۱/۱۵	۱/۴۰	-	-	۱/۱۲	-	-	-	-	-	-	-	REpower MM82	۱
تازه‌آباد	۱/۰۳	-	۱/۰۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Nordex N60/1300kw	۲
گیلان‌غرب	۱/۲	۱/۰۵	۱/۲۸	-	-	۱/۰۴	-	-	-	-	-	-	-	Suzlon S64-1.25 MW	۳
گیلان‌غرب	۱/۴	۱/۲۴	۱/۴۹	-	-	۱/۱۹	-	-	-	-	-	-	-	Gamesa G58-850KW	۴
گیلان‌غرب	۱/۲	۱/۰۵	۱/۲۹	-	-	۱/۰۵	-	-	-	-	-	-	-	Enercon E48/800kw	۵
گیلان‌غرب	۱/۲	۱/۰۵	۱/۲۹	-	-	۱/۰۴	-	-	-	-	-	-	-	Hyosung HS50	۶
گیلان‌غرب	۱/۲۹	۱/۱۳	۱/۳۸	-	-	۱/۱۲	-	-	-	-	-	-	-	U50 Unison	۷
گیلان‌غرب	۱/۳۱	۱/۱۵	۱/۳۹	-	-	۱/۰۹	-	-	-	-	-	-	-	Aeronautica 54-۷۵۰	۸
گیلان‌غرب	۱/۲۳	۱/۰۸	۱/۳۲	-	-	۱/۰۶	-	-	-	-	-	-	-	RRB Energy PS 600	۹
گیلان‌غرب	۱/۶۶	۱/۴۷	۱/۷۴	-	-	۱/۳۸	-	-	-	-	-	-	۱/۰۸	EWT DW54-500	۱۰

جدول ۱۰ انتخاب اقتصادی‌ترین توربین و شهرستان (میلیون تومان)

Table 10 Choosing the most economical turbine and station (Million Tomans)

PVB	PVC	شهرستان منتخب	نوع توربین منتخب	ردیف
۲۱۴۸۹	۱۵۴۰۰	گیلان غرب	REpower MM82	۱
۱۰۰۸۷	۹۷۶۶	تازةآباد	Nordex N60/1300kw	۲
۱۲۰۵۵	۹۳۹۰	گیلان غرب	Suzlon S64-1.25 MW	۳
۹۴۸۸	۶۳۸۵	گیلان غرب	Gamesa G58-850kw	۴
۷۷۴۹	۶۰۱۰	گیلان غرب	Enercon E48/800kW	۵
۷۱۶۹	۵۶۳۴	گیلان غرب	Hyosung HS50	۶
۷۷۸۰	۵۶۳۴	گیلان غرب	Unison U50	۷
۷۸۱۹	۵۶۳۴	گیلان غرب	Aeronautica 54-750	۸
۵۹۳۴	۴۵۰۷	گیلان غرب	RRB Energy PS 600	۹
۶۵۲۴	۳۷۵۶	گیلان غرب	EWT DW54-500	۱۰

۴ - نتیجه‌گیری

برای ارزیابی کارایی توربین‌های بادی مختلف و اقتصادی بودن کاربرد توربین‌های بادی برای تولید برق در مناطق مختلف استان کرمانشاه، احتمال تولید انرژی، ضریب ظرفیت و خروجی انرژی سالانه‌ی توربین‌های مختلف را در شرایط زبری سطحی $0.3m$ برآورد کردیم. سپس،



هریک از توربین‌ها را از نظر اقتصادی ارزیابی کردیم و از بین ۱۰ توربین منتخب، اقتصادی‌ترین توربین و محدوده را در استان کرمانشاه برای کاربرد انرژی بادی معرفی نمودیم. نتایج نشان داد که در بین توربین‌ها، در همه‌ی ایستگاه‌ها با توجه به ویژگی‌های اقلیم باد منطقه، بیشترین میزان احتمال تولید انرژی به توربین ۷۵۰ و ۸۰۰ کیلوواتی مربوط است. توربین‌هایی که سرعت کاتاین بیشتری دارند در تمامی ایستگاه‌های منطقه، کمترین احتمال تولید انرژی را دارند. همچنین، در ایستگاه تازه‌آباد با تولید انرژی توربین‌ها در ۸۰ تا ۸۹ درصد از مواقع بیشترین و در ایستگاه کنگاور با تولید انرژی توربین‌ها تنها در ۳۰ تا ۴۰ درصد از مواقع کمترین احتمال تولید انرژی وجود دارد. بررسی ضریب ظرفیت توربین‌ها نشان داد که توربین ۵۰۰ کیلوواتی بهترین کارایی را در همه‌ی ایستگاه‌ها دارد. همچنین، در بین مناطق مختلف استان، بهترین کارایی توربین‌ها (به‌عنوان نمونه، توربین ۵۰۰ کیلوواتی) در محدوده‌ی ایستگاه‌های گیلان غرب (۴۶/۴ درصد)، تازه‌آباد (۴۴/۲ درصد) و سومار (۳۹/۲ درصد) و کمترین کارایی در محدوده‌ی ایستگاه‌های کنگاور (۱۴ درصد)، سرپل‌ذهاب (۱۸/۲ درصد) و جوانرود (۱۹/۵ درصد) برآورد شده است.

بهترین کارایی توربین‌ها در محدوده‌های ایستگاه گیلان غرب، سومار و تازه‌آباد به دلیل شرایط اقلیمی باد در این سه ایستگاه است که تا اندازه‌ی زیادی با مناطق دیگر متفاوت است. در محدوده‌ی این ایستگاه‌ها، برخلاف ایستگاه‌های دیگر منطقه، میانگین سرعت باد تنها تحت تأثیر رژیم گرمایش روزانه نیست و به نظر می‌رسد با توجه به جهت وزش بادها از سمت ارتفاعات منطقه، بیشتر تحت تأثیر شکل زمین باشد. به عبارت دیگر، سرعت وزش باد در طول شب نیز در این ایستگاه‌ها میانگین قابل توجهی دارد. از آنجا که در این ساعات، معمولاً جهت بادها از سمت ارتفاعات منطقه (شمال شرق، شرق یا جنوب شرقی) است، احتمالاً تکوین نسیم کوه که قبل از طلوع آفتاب به بیشینه‌ی شدت خود می‌رسد، دلیل افزایش فراوانی رخداد و میانگین سرعت باد است. نکته‌ی جالب دیگر در مورد دو ایستگاه تازه‌آباد و سومار این است که دامنه‌ی نوسان رژیم روزانه‌ی میانگین سرعت باد به‌طور کلی در این دو ایستگاه کم است. در ایستگاه‌های سومار و گیلان غرب (واقع در جنوب غرب منطقه)، برخلاف بیشتر ایستگاه‌های منطقه، بادهای شرقی یا شمال شرقی علاوه بر بادهای غربی و شمال غربی فراوانی قابل توجهی دارند. همچنین، میانگین سرعت و پتانسیل باد نظم مکانی مشخصی در این منطقه نشان نمی‌دهد و به عبارت دیگر، گاه ایستگاه‌هایی با فواصل کم تفاوت‌های زیادی در ویژگی‌های باد دارند (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷) که این مسئله از اهمیت تأثیر عوامل محلی و ریزمقیاس در تعیین مقدار سرعت باد و پیچیدگی‌های منطقه نشئت می‌گیرد.

بیشترین خروجی انرژی سالانه در تمامی ایستگاه‌ها نیز طبیعتاً به توربین ۲۰۰۰ کیلوواتی به دلیل قدرت بالایش مربوط است. میزان تولید انرژی سالانه‌ی این توربین از ۱۹۶۳۹۱۴ کیلووات ساعت در سال در ایستگاه کنگاور تا ۶۶۸۸۸۰۹ کیلووات ساعت در سال در ایستگاه گیلان غرب متغیر است. مقدار تولید انرژی سالانه‌ی توربین ۵۰۰ کیلوواتی که بیشترین ضریب ظرفیت را دارد، از ۲۰۳۰۸۳۷ کیلووات ساعت در سال در محدوده‌ی ایستگاه گیلان غرب تا ۶۱۴۱۷۴ کیلووات ساعت در سال در محدوده‌ی ایستگاه کنگاور متغیر است.

هزینه‌های لازم برای سرمایه‌گذاری در احداث و نگهداری یک نیروگاه بادی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (خرید و نصب توربین)، هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات سالانه است. از سوی دیگر، درآمدهای ناشی از فروش برق تولیدشده باید پاسخگوی هزینه‌های انجام‌شده باشد. از بین ۱۰ مدل متفاوت از توربین‌های بادی مورد بررسی در این طرح، توربین ۵۰۰ کیلوواتی با قیمت ۷۰۷ هزار دلار ارزان‌ترین توربین و توربین ۲۰۰۰ کیلوواتی با قیمت ۲۹۰۰ هزار دلار گران‌ترین توربین بوده است. محاسبه‌ی شاخص نسبت منفعت به هزینه نشان داد که احداث نیروگاه در محدوده‌ی ایستگاه گیلان غرب در تمامی انواع مختلف توربین صرفه‌ی اقتصادی بیشتری در مقایسه با دیگر مناطق دارد. تنها احداث ایستگاه با توربین ۱۳۰۰ کیلوواتی در محدوده‌ی ایستگاه تازه‌آباد اقتصادی‌تر از دیگر مناطق است. همچنین، نتایج نشان داد که در محدوده‌ی ایستگاه گیلان غرب، احداث مزرعه‌ی بادی با توربین ۲۰۰۰ کیلوواتی بیشترین صرفه‌ی اقتصادی را دارد. ارزش حال مجموع هزینه‌های احداث یک نیروگاه بادی با یک عدد از این نوع توربین برابر ۱۵/۴ میلیارد تومان بوده است؛ در حالی که ارزش حال منافع ناشی از فروش برق تولیدشده در طول عمر مفید توربین برابر ۲۱/۴۹ میلیارد تومان است. بنابراین، این پروژه با داشتن نسبت منافع به هزینه‌ی برابر ۱/۴، بیشترین صرفه‌ی اقتصادی را در بین سایر پروژه‌ها دارد. همچنین، نتایج نشان داد که تولید برق توسط هیچ‌یک از توربین‌های بادی مورد بررسی در محدوده‌ی ایستگاه‌های اسلام‌آباد، کنگاور، سرپل ذهاب، روانسر، سنقر، هرسین، جوانرود و قصرشیرین، اقتصادی نیست. بدیهی است با تغییر قیمت‌های مورداستفاده در تجزیه و تحلیل اقتصادی (قیمت فروش توربین، قیمت فروش برق تولیدشده و یا نرخ ارز)، نتایج تحلیل اقتصادی نیز متفاوت خواهد بود.

۵. قدرتانی

در پایان، از حمایت مالی شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه در این تحقیق (در قالب طرح پژوهشی) تقدیر می‌کنیم.



۶. فهرست منابع

- Adaramola, M. S., Paul, S. S., Oyedepo, S. O., "Assessment of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in north-central Nigeria," *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 12, pp: 3363-3368, 2011.
- Boudia M., Guerri, o., "Investigation of wind power potential at Oran, northwest of Algeria", *Energy Conversion and Management*.105, pp: 81-92, 2015.
- Cavazzi, S., Dutton, A.G., "An Offshore Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential", *Renewable Energy*, Vol. 87, pp: 212-228, 2016.
- Dabbaghiyan, A., Fazelpour, F., Dehghan Abnavi, M., Rosen, M. A., "Evaluation of wind energy potential in province of Bushehr, Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp: 455-466, 2016.
- Fazelpour F, Soltani N, Soltani S, Rosen, M.A., "Assessment of wind energy potential and economics in the north-western Iranian cities of Tabrizand, Ardabil", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp: 88-99, 2015.
- Gandomkar, A., "Evaluation of wind energy potential in Iran", *Geography and Environment planning*, Vol. 20, N. 4, pp: 85-100, 1388.
- Haghi Pham, M. and Soltani, S., "Investigating the effect of wind power on power system reliability", *Seventh National Energy Conference*, Tehran, Iran, 1388.
- Jafari, H., Azizi, A., Nasiri, H., Abedi, S., "Land suitability analysis for the establishment of wind power plants in Ardebil province using the AHP and SAW model in GIS environment", *Journal of Environment Science and Technology*, Vol. 15, N. 2, pp: 23-41, 1392.
- Ismail Nia A., Sajadian, F., "Economic appraisal of wind power plant construction with Clean Development Mechanism", *Energy Economic Studies*, Vol. 7, N. 25, pp: 143-172, 1389.

- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M., Abbaszadeh, R., "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran", *Tehran, Energy*, Vol. 35, pp: 188–201, 2010.
- Mohammadi, K., Mostafaeipour, A., "Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran", *Energy Convers Manag.*, Vol. 65, pp: 463–70, 2013.
- Mostafaeipour, A., "Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.14, pp: 93– 111, 2010.
- Mostafaeipour, A, Jadidi, M., Mohammadi, K., Sedaghat, A., "An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 30, pp: 641–50, 2014.
- Motahhari, A., Ahmadian, M., Abedi, Z., Ghaffarzadeh, H., "Economic appraisal of using wind farms in Iran considering the effect of the policy of liberalizing energy prices", *Iranian Energy Economics*, N. 10, pp: 179-200, 1393.
- Noorollahi, Y., Ashraf, A., Zamani, M., "Wind Energy Resources Assessment Using Geographical Information Systems (GIS) (Case Study: West Iran)", *Iranian Journal of Energy*, Vol. 14, N. 1, pp: 2-22. 1390.
- Rafati, S., Karimi, M., Samdaliri, A., *Evaluation of wind energy potential and economic assessment for establishment of a wind power plant in Kermanshah province*, Research project of Kermanshah Electric distribution company, 1397.
- Renewable Energy and Energy Efficiency Organization, Vol. 1, N.1, pp: 5, 2007.
- Sconjahad, M., *Engineering Economics (Economic Assessment of Industrial Projects)*, Tehran, Amir Kabir university, 1390.
- Shaahid, S. M., Al-Hadhrami, L, M., and Rahman, M. K., "Potential of Establishment of Wind Farms in Western Province of Saudi Arabia", *Energy Procedia*, Vol. 52, pp: 497-505, 2014.
- Shami, S.H., Ahmad, J., Zafar, R., Haris, M., Bashir, S., "Evaluating wind energy potential in Pakistan's three provinces, with proposal for integration into



national power grid”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp: 408-421, 2016.

- Shu, Z.R., Li, Q.S., Chan, P.W., “Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp: 644-657, 2015.
- Taleai, M., Safarpour, M., Javadi, Gh., “Potential Evaluation for Establishment of Solar Power Plants Using Multi-Criteria Decision Making OWA and TOPSIS Methods (Case Study: Qazvin-Iran)”, *Journal of Spatial Planning*, Vol. 22, N. 4, pp: 1-28, 1397.
- Yousefi H., Hafezniya, H., Razi, F., “Identifying optimal sites for gridconnected photovoltaic power plants in Birjand County”. *Journal of Spatial Planning*, Vol. 21, N. 2, pp: 219-242, 1396.

