نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال سوم، شمارهٔ سوم/ پاییز 1392/ صفحه 34ـ41

پتانسیل‌سنجی انرژی بادی استان سیستان و بلوچستان و تحلیل اقتصادی برای احداث نیروگاه بادی

علی مینائیان[1]، احمد صداقت[2]، علی‌اکبر عالم رجبی[3*]

[1] دانشجوی دکتری دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
a.minaeian@me.iut.ac.ir
[2] استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
sedaghat@cc.iut.ac.ir
[3] دانشیاردانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
rajabi@cc.iut.ac.ir

چکیده: امروزه یکی از راه‌کارهایی که برای حل بحران انرژی پیشنهاد می‌شود، در کنار اصلاح مصرف، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. انرژی باد ازجمله انرژی‌های تجدیدپذیر است. تاریخچهٔ نصب اولین آسیاب‌های بادی جهان به استان سیستان و بلوچستان باز می‌گردد که به‌عنوان یکی از مناطق مهم انرژی بادی کشور می‌تواند مطرح باشد. متأسفانه درخصوص ارزیابی انرژی بادی این استان و برآورد اقتصادی نصب توربین بادی در آن، کاری صورت نگرفته است. پس از انگیزش استفاده از انرژی‌های نو با سازمان‌دهی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، توجه نوین به پتانسیل‌سنجی انرژی بادی مناطق مختلف ایران، به‌عنوان یکی از سرزمین‌های بادخیز جهان، فعالیت‌های فراوانی شروع شد که منجر به پتانسیل‌سنجی مناطق مختلفی نظیر استان خراسان، استان سمنان و سایر استان‌ها و احداث چندین واحد نیروگاه تولید برق، به‌خصوص در بینالود استان خراسان شد. در این مقاله، به پتانسیل‌سنجی انرژی باد در سه ایستگاه از استان سیستان و بلوچستان پرداخته شده است که نشان می‌دهد هر سه ایستگاه از نظر کیفیت وزش باد، برای نصب توربین بادی تجاری مناسب‌اند. سپس با انتخاب 6 توربین بادی با توان‌های مختلف، بین 1 تا 100 کیلووات و انجام یک تحلیل تقریبی محلی و اقتصادی، بهینه‌ترین توربین برای تأمین برق برای هر یک از سه شهر چابهار، دلگان و دهک، توربین‌های بادی 10 کیلوواتی در ارتفاع 40 متر پیشنهاد شده که با توجه به شرایط تولید بومی و سادگی و امکان ساخت، این توربین‌ها در ایران مناسب‌ترین هستند. سرمایهٔ اولیه نصب نیروگاه بادی 4 مگاواتی در این ایستگاه‌ها به‌ترتیب در مدت 17 ، 29 و 38 ماه بازگشت خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی باد، پتانسیل‌سنجی، تحلیل اقتصادی، توربین باد.

* نویسندهٔ مسئول

1. مقدمه

در جهان کنونی، نیاز به منابع انرژی جدید با توجه به تطابق‌نداشتن عرضه و تقاضای انرژی، بیش از پیش احساس می‌شود. اقتصاد جهانی در سی سال گذشته، رشد سالانه‌ای معادل 3/3% داشته؛ درحالی‌که در این مدت، مصرف برق سالانه 3/6% افزایش یافته است [1]. همچنین داده‌های آماری نشان می‌دهد که تولید برق در جهان، در سال 2007، برابر 16429 تراوات ساعت بوده است. بر همین اساس، میزان مصرف برق در سال 2030، برابر 28930 تراوات ساعت تخمین زده می‌شود [2]؛ از این رو، نیاز به نیروگاه‌های بیشتر برای تولید انرژی الکتریکی احساس می‌شود. از طرفی، محدودیت‌های فراوان نیروگاه‌های سوخت فسیلی، بشر را به‌سمت استفاده از انرژی‌های نو برای تولید برق سوق می‌دهد. با وجود تمام این محدودیت‌ها، تولید انرژی به‌وسیلهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر در سال 2007 تنها 3 % از نیازهای بشر را تأمین کرده است.

فناوری انرژی‌های خورشیدی و بادی در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی داشته است و کشورها متناسب با موقعیت و پتانسیل منطقهٔ خود، غالباً به یکی از این دو انرژی روی آورده‌اند؛ به‌طوری‌که در برخی مناطق جهان، درصد زیادی از برق مورد نیاز به‌کمک همین انرژی‌ها تأمین می‌شود.

استفاده از انرژی باد از قرن‌ها پیش مورد توجه بشر بوده است؛ به‌طوری‌که ایرانیان اولین آسیاب بادی را در سدهٔ نهم پس از میلاد ساختند [3 و 4]. با بروز بحران انرژی در دههٔ 1970، بهره‌مندی از انرژی باد، اهمیت بیشتری نسبت به قبل پیدا کرد [5] و همین موضوع موجب پیشرفت هرچه بیشتر فناوری‌های مرتبط با انرژی باد شد تا جایی که امروزه سریع‌ترین رشد در میان سایر فناوری‌های تولید برق در جهان، مربوط به انرژی باد است [6]. دسترسی آسان، ارزانی و آسیب‌نرساندن به محیط زیست، از دلایل اصلی این پیشرفت است [7].

آلمان، آمریکا، دانمارک، هند و اسپانیا از فعال‌ترین کشورها در زمینهٔ استفاده از انرژی باد برای تولید برق هستند؛ به‌طوری‌که بیش از 83 % از توربین‌های بادی فقط در این پنج کشور نصب شده است [8]. با این حال، استراتژی انجمن جهانی انرژی باد بر این مبنا است که تا سال 2020 حدود 10% از انرژی مصرفی جهان از انرژی باد تأمین شود [9].

به همین منظور، محققان انرژی مراحلی چون پتانسیل‌سنجی مناطق مختلف، طراحی نیروگاه و تحلیل اقتصادی آن را در دستور کار خود قرار داده‌اند. ازآنجاکه برای ارزیابی اقتصادی هر مزرعه‌بادی، باید انرژی خروجی مورد انتظار پیش‌بینی شود [10]، توسعهٔ روش‌های ارزیابی دقیق پتانسیل انرژی باد یک منطقه، اهمیت روزافزونی یافته است [11]. در دنیا تحقیقات فراوانی در زمینهٔ پتانسیل‌سنجی باد در کشورهایی نظیر چین، برزیل، الجزایر، پاکستان و... انجام شده است؛ برای نمونه، ژو و همکاران در استان گوانگژوچین، این استان را منطقه‌ای مناسب از نظر منابع بادی می‌دانند [12]. در مقالهٔ ارائه‌شده توسط آن‌ها اشاره شده که سالانه 146 تراوات ساعت انرژی بادی از این استان به‌دست می‌آید. همچنین مونیرآکساس منطقهٔ باتنا در شمال شرق الجزایر را مورد ارزیابی قرار داده و آن را منطقه‌ای امیدبخش برای استفاده از انرژی باد معرفی کرده است. در این ناحیه، سرعت متوسط باد در ارتفاع 10 متری 4/5 متر بر ثانیه است و در برخی ایام سال تا 5 متر بر ثانیه نیز افزایش می‌یابد که نشان از پتانسیل مناسب منطقهٔ مذکور دارد [13].

در ایران نیز تاکنون مناطق بسیاری برای احداث نیروگاه بادی مورد بررسی قرارگرفته و چند نیروگاه نیز راه‌اندازی شده است. کاویانی در یک کار تحقیقاتی [14] با در نظر گرفتن سرعت لازم برای تولید برق از انرژی باد و به‌کمک داده‌های بادی از سال 1981 تا 1985 در ایستگاه‌های هواشناسی (سینوپتیک) کشور، پتانسیل انرژی باد در ایران را مورد بررسی قرار داده و منطقهٔ سیستان (ایستگاه زابل) را بهترین ناحیهٔ ایران برای احداث نیروگاه بادی معرفی کرده است. پس از سیستان، سواحل و جزایر جنوبی ایران را بهترین مناطق برای هدف مذکور دانسته است. وی برخی مناطق کوچک مانند دره منجیل را نیز مناطق مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی باد می‌داند.

در مقالهٔ حاضر، پس از پتانسیل‌سنجی سه منطقهٔ چابهار، دلگان و دهک در استان سیستان و بلوچستان، با انجام تحلیل اقتصادی، بهترین توربین از لحاظ هزینهٔ کمتر و بازگشت سریع‌تر سرمایه در بین توربین‌های استاندارد انتخاب شده است.

2. معرفی منطقهٔ مورد بررسی

استان سیستان و بلوچستان جنوب که در جنوب شرق ایران واقع شده، دارای جمعیتی بیش از 2500000 نفر و آب‌وهوایی گرم و خشک است. این منطقه از لحاظ وزش باد، یکی از غنی‌ترین مناطق ایران است و همین امر در پاره‌ای از اوقات، زندگی را برای مردم آن مشکل می‌کند. وزش بادهای شدید در بخش‌های ساحلی استان، موجب وقوع موج‌های سهمگینی می‌شود. جدول (1) مشخصات جغرافیایی و شکل (1) موقعیت سه منطقهٔ مورد بررسی در استان سیستان و بلوچستان را نشان می‌دهد.

جدول (1): مشخصات جغرافیایی برخی مناطق استان

ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (m)	طول جغرافیایی (°)	عرض جغرافیایی (°)
چابهار	7	60/37	25/17
دهک	1180	62/36	27/11
دلگان	574	59/8	27/8

تحلیل‌ها بر مبنای داده‌های بادی منطقه، از سال 2006 تا 2007 که توسط سازمان انرژی‌های نو ایران [15] اندازه‌گیری شده، انجام شده است. سرعت و جهت باد هر 10 دقیقه یک بار در سه ارتفاع 10، 30 و 40 متر از سطح زمین اندازه‌گیری شده است که برای هر مورد در هر سال، بالغ بر 52560 داده می‌شود. متأسفانه داده‌ها برای ارتفاع 10متر شهر دلگان ناقص است؛ لذا برای این شهر و این ارتفاع تحلیلی انجام نشده است.

شکل (1): موقعیت سه منطقه مورد بررسی در استان سیستان و بلوچستان

کمیت‌های مرتبط در پتانسیل‌سنجی انرژی باد عبارت‌اند از: متوسط سرعت ($\bar{U}$)، توان (P_{max}) و انرژی سالانه باد ($\bar{E}$) که به‌ترتیب، از روابط (1) تا (3) به‌دست می‌آیند:

$$\bar{U} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_i \quad (1)$$

$$P_{max}(\bar{U}) = \frac{1}{2}\rho A \bar{U}^3 \quad (2)$$

$$\bar{E} = N \times \bar{P} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2}\rho A U_i^3 \quad (3)$$

در این روابط، U_i سرعت اندازه‌گیری‌شده در هر لحظه در ایستگاه مورد نظر، N تعداد اندازه‌گیری‌ها در طول یک سال، ρ چگالی هوا و A مساحت منطقهٔ مورد بررسی است.

جدول‌های (2) تا (4) متوسط سرعت، توان و انرژی سالانه باد و شکل‌های (2) تا (4) متوسط سرعت ماهانهٔ باد را در این سه ایستگاه نشان می‌دهد. پتانسیل مناطق با سرعت متوسط سالانهٔ باد، کمتر از 4/5 متر بر ثانیه ضعیف، بین 4/5 تا 5/4 متر بر ثانیه مرزی، و در بازه 5/4 تا 6/7 خوب ارزیابی می‌شود و مناطق با سرعت‌های باد بیشتر از 6/7 متر بر ثانیه، وضعیتی عالی برای احداث مزرعه‌بادی دارند [15 و 16].

جدول (2): سرعت، توان و انرژی متوسط سالانه باد در چابهار

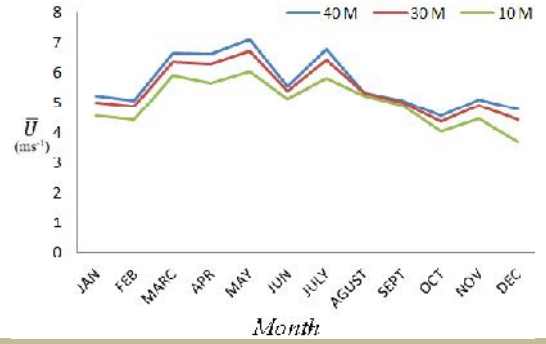
	10 متر	30 متر	40 متر
سرعت متوسط سالانه ($m.s^{-1}$)	4/97	5/41	64/5
توان متوسط سالانه $W.m^{-2}$	117/3	155/2	180/81
انرژی متوسط سالانه $J.m^{-2}$	87/3	115/5	134/5

جدول (3): سرعت، توان و انرژی متوسط سالانه باد در دلگان

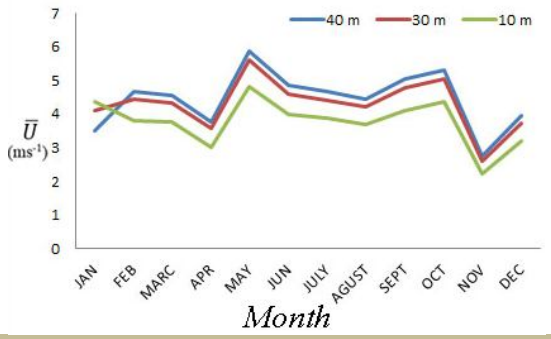
	10 متر	30 متر	40 متر
سرعت متوسط سالانه $m.s^{-1}$	-	4/08	4/46
توان متوسط سالانه $W.m^{-2}$	-	108/7	157/6
انرژی متوسط سالانه $J.m^{-2}$	-	80/9	117/2

جدول (4): سرعت، توان و انرژی متوسط سالانه باد در دهک

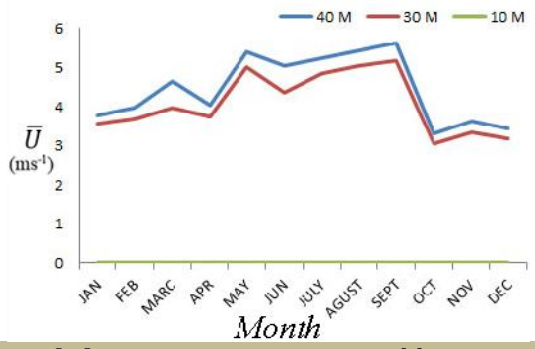
	10 متر	30 متر	40 متر
سرعت متوسط سالانه $m.s^{-1}$	3/77	4/29	4/45
توان متوسط سالانه $W.m^{-2}$	90	137/6	145/9
انرژی متوسط سالانه $J.m^{-2}$	70	102/3	108/5



شکل (2): سرعت متوسط ماهانه باد در چابهار [15]



شکل (3): سرعت متوسط ماهانه باد در دلگان [15]



شکل (4): سرعت متوسط ماهانه باد در دهک [15]

3. تابع توزیع ویبول[1]

تابع توزیع ویبول یک تابع آماری است که از رابطهٔ (4) محاسبه می‌شود:

$$f_{(\bar{U})} = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{\bar{U}}{c}\right)^{k-1} exp\left(-\left(\frac{\bar{U}}{c}\right)^{k}\right) \qquad (4)$$

که در آن، k و c به‌ترتیب ضرایب شکل و مقیاس و $\bar{U}$ سرعت متوسط باد است. روش‌های مختلفی برای محاسبه این ضرایب وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از رابطهٔ پیشنهادی جوستوس[2] است که در روابط (5) و (6) ارائه شده است [3]:

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1/086} \qquad (5)$$

که در آن، σ_U انحراف از معیار داده‌های بادی و $\bar{U}$ سرعت متوسط سالیانهٔ باد در منطقهٔ مورد نظر است.

$$\frac{c}{\bar{U}} = \left(0/568 + \frac{0/433}{k}\right)^{-\frac{1}{k}} \qquad (6)$$

لیسن[3] نیز رابطهٔ (7) را برای محاسبهٔ ضریب مقیاس ارائه داد:

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma(1+1/k)} \qquad (7)$$

که در آن، Γ معرّف تابع گاما بوده و از رابطهٔ (8) قابل محاسبه است:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1}e^{-t}dt \qquad (8)$$

4. انرژی تولیدی سالانه به‌وسیلهٔ توربین بادی

برای انجام تحلیل اقتصادی، باید ابتدا انرژی تولیدی سالانهٔ یک توربین به‌کمک معادلهٔ (9) محاسبه شود:

$$\bar{P}_{tot} = N \times \Delta t \times \int_0^\infty f(\bar{U})P(\bar{U})\,d\bar{U} \qquad (9)$$

که در آن، N تعداد کل اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در طول یک سال، Δt طول بازه‌های زمانی اندازه‌گیری‌ها، $f(\bar{U})$ تابع توزیع ویبول برای منطقهٔ مورد نظر و $P(\bar{U})$ معادلهٔ منحنی مشخصهٔ توان توربین بادی انتخاب‌شده برای سایت است. با محاسبهٔ انتگرال فوق، توان تولیدی کل یک توربین با توان مشخص در طول یک سال، بر حسب وات ساعت به‌دست خواهد آمد.

برای محاسبهٔ انرژی تولیدی سالانهٔ توربین، ابتدا باید یک توربین از توربین‌های استاندارد انتخاب و معادلهٔ منحنی مشخصهٔ توربین استخراج شود. این معادله از برازش منحنی بر داده‌هایی که در کاتالوگ هر توربین آمده، قابل محاسبه است.

5. معرفی توربین‌های انتخابی

در این مقاله، به‌منظور انتخاب توربین و انجام تحلیل اقتصادی از بین شرکت‌های سازنده توربین باد، شرکت European Urban Wind Turbine Manufacturers انتخاب شده است. این شرکت سازندهٔ انواع مختلف توربین محور عمودی و محور افقی در توان‌های مختلف است که در اینجا شش توربین با توان‌های نامی 1/6، 5، 10، 20، 30 و 100 کیلووات انتخاب و از کاتالوگ آن‌ها [17 و 18] با استفاده از برازش تابع چندجمله‌ای (به‌کمک نرم‌افزار تجاری متلب[4])، معادلهٔ منحنی مشخصهٔ توربین به‌دست آمده است. در جدول (5)، ضرایب چندجمله‌ای معادلهٔ مشخصهٔ هر توربین (رابطهٔ 10) و سرعت کاری آن و همچنین خطای برازش منحنی مشخصهٔ توان توربین ارائه شده است.

$$P_{(\bar{U})} = P_3\bar{U}^3 + P_2\bar{U}^2 + P_1\bar{U} + P_0 \qquad (10)$$

ضرایب به کار رفته در این معادله در جدول (5) داده شده است.

جدول (5): ضرایب چندجمله‌ای معادلهٔ مشخصهٔ توربین‌های انتخابی

	نام تجاری					
ضرایب معادله	Pitch wind 30 kW Grid	JonicaI mpianti /20kW	Aircon 10/ 10 kW	HAW T 5 kW	TI/2/3/ 1/6 1/6 kW	KCS56 100kW
P_0	4/22	0/4303	3/77	1/074	0/264	101/7
P_1	-4/33	-0/3274	-2/69	-0/81	-0/16	-46/7
P_2	1/13	0/0597	0/6138	0/188	0/029	6/5
P_3	-0/049	0/0087	-0/029	-0/01	4×10^{-18}	-0/23
SSE	14/58	0/0443	0/1348	0/015	0/001	2/24
R-square	0/993	0/9999	0/9989	0/999	0/999	0/9998
RSME	1/207	0/0859	0/1499	0/047	0/013	0/6112
cut-in speed ($m.s^{-1}$)	2	3	2/5	3	3	6
cut-out speed ($m.s^{-1}$)	37/5	37/5	32	60	60	20

1. Weibull Distribution Function
2. Justus
3. Lysen
4. MATLAB

6. نتایج

1.6. تحلیل فنی

از روابط (5)و (6) ضرایب k و c به‌سادگی برای هر منطقه قابل محاسبه است. با توجه به داده‌های بادی می‌توان تابع توزیع ویبول را محاسبه کرد. سپس از معادلهٔ منحنی مشخصهٔ توان توربین و رابطهٔ (9)، انرژی تولیدی سالانهٔ هر توربین قابل محاسبه خواهد بود.

در نهایت، مقدار انرژی تولیدی سالانه به‌وسیلهٔ هر توربین محاسبه و در جدول‌های (6) تا (8) نمایش داده شده است.

جدول (6): انرژی تولیدیسالانهٔ توربین‌های انتخابی برای سایت چابهار

	توان توربین انتخابی	انرژی برق تولیدی سالانه (MWh)					
		40 m		30 m		10 m	
		Lysen	Justus	Lysen	Justus	Lysen	Justus
1	100kW	55/6	143	44/5	124	29/5	92/5
2	30 kW	45/6	80/9	40/6	74/6	32/4	62/6
3	20 kW	16/2	33	14/1	29/5	10/9	23/5
4	10 kW	19/4	32/1	17/6	30	14/5	25/7
5	5 kW	7/3	12/8	6/5	11/8	5/3	9/9
6	1/6 kW	2/3	4/3	2/1	3/9	1/6	3/2

جدول (7): انرژی تولیدی سالانهٔ توربین‌های انتخابی برای سایت دلگان

	توان توربین انتخابی	انرژی برق تولیدی سالیانه (MWh)				
		40 m		30 m		10 m
		Lysen	Justus	Lysen	Justus	
1	100kW	43	87/8	31/9	88/3	اندازه گیری انجام نشده است.
2	30 kW	30/9	49/7	25/5	49/8	
3	20 kW	11/7	20/7	9/4	20/8	
4	10 kW	13/1	20	11/1	20/1	
5	5 kW	5	7/9	4/1	7/9	
6	1/6 kW	1/6	2/6	1/3	2/6	

جدول (8): انرژی تولیدی سالانهٔ توربین‌های انتخابی برای سایت دهک

	توان توربین انتخابی	انرژی برق تولیدی سالانه (MWh)					
		40 m		30 m		10 m	
		Lysen	Justus	Lysen	Justus	Lysen	Justus
1	100kW	44/4	73/8	40/1	66/2	32/1	48/4
2	30 kW	26/3	37/5	24/2	34/4	19/8	26/6
3	20 kW	10/8	16/7	9/9	15/1	8/1	11/4
4	10 kW	10/7	14/7	10	13/6	8/2	10/7
5	5 kW	4/2	6	3/9	5/5	3/2	4/3
6	1/6 kW	1/4	2	1/3	1/8	1	1/4

2.6. تحلیل اقتصادی

به‌طور مشخص، یکی از عوامل مهم در طراحی یک نیروگاه، مباحث اقتصادی آن است. در این مقاله، با انتخاب توربین‌هایی با توان‌های نامی متفاوت، هزینهٔ تولید برق در هر سال، درآمد ناشی از فروش آن و مدت زمان بازگشت هزینه، محاسبه شده است. امروزه توربین‌های تجاری با قیمتی کمتر از 1000 دلار به‌ازای هر کیلووات (با در نظر گرفتن هر دلار معادل 25000 ریال، این مقدار برابر 25000000 ریال خواهد شد) فروخته می‌شود [19]. در یک تحقیق علمی، متیو [20] هزینهٔ تعمیر و نگهداری سالانهٔ یک توربین و همچنین حقوق کارگران را 1/5 تا 2 درصد هزینهٔ سالانه تولید برق آن در نظر گرفته است. هزینهٔ توربین باد برای n سال عمر آن از معادلهٔ (11) به‌دست خواهد آمد:

$$C_{OM} = mC_I \quad (11)$$

که در آن، C_I سرمایه‌گذاری اولیه، شامل هزینهٔ ساخت و نصب توربین و C_{OM} هزینهٔ تعمیر و نگهداری و m درصدی است که C_{OM} را به‌عنوان تابعی از C_I معرفی می‌کند و عواملی چون هزینه‌های تعمیر و نگهداری و همچنین اجارهٔ محوطهٔ تعیین‌کنندهٔ این ضریب است.

ارزش فعلی هزینهٔ کارکرد برای n سال به‌کمک رابطهٔ (12) محاسبه می‌شود:

$$PW(C_{OM})_{1-n} = mC_I\left[\frac{(1+I)^n-1}{I(1+I)^n}\right] \quad (12)$$

که در آن، I نرخ سود سالانه است که با توجه به نرخ سود سالیانهٔ اعلام‌شده توسط بانک ملی، در سال 1391 در این بررسی20% در نظر گرفته شده است [21].

ارزش فعلی هزینهٔ کل شامل تعمیر و نگهداری و سرمایه‌گذاری اولیه، از معادلهٔ (13) قابل محاسبه است:

$$NPW(C_A)_{1-n} = C_I\left[1 + m\left(\frac{(1+I)^n-1}{I(1+I)^n}\right)\right] \quad (13)$$

ارزش فعلی خالص هزینهٔ سالانهٔ عملکرد توربین را می‌توان از معادلهٔ (14) محاسبه کرد [22]:

$$NPW(C_A) = \frac{NPW(C_A)_{1-n}}{n} = \frac{C_I}{n}\left[1 + m\left(\frac{(1+I)^n-1}{I(1+I)^n}\right)\right] \quad (14)$$

همچنین انرژی تولیدی توربین در طول یک سال، از رابطهٔ (15) محاسبه می‌شود [22]:

$$E_I = 8760 \times P_R \times CF \quad (15)$$

که در آن، P_R و CF به‌ترتیب توان اسمی توربین انتخابی و ضریب ظرفیت هستند. ضریب ظرفیت از معادلهٔ (16) به‌دست می‌آید [22]:

$$CF = \frac{P\ MWh}{(۳۶۵days)\times\left(\frac{۲۴h}{day}\right)\times(P_R kW)\times ۱MW/۱۰۰۰kW} \quad (16)$$

با استفاده از روابط فوق، در نهایت هزینهٔ تولید یک کیلووات ساعت برق، از رابطهٔ (17) قابل محاسبه خواهد بود:

$$C = \frac{NPW(C_A)}{E_I} = \frac{C_I}{8760n}\left(\frac{1}{P_R CF}\right)\left[1 + m\left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n}\right)\right] \quad (17)$$

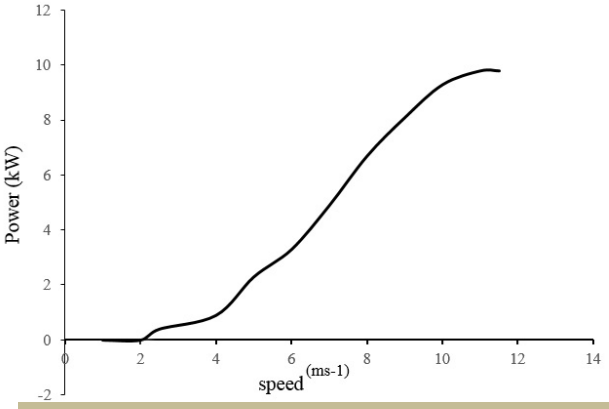
هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه شامل هزینهٔ ساخت و نصب توربین است. طبق آنچه در قسمت‌های قبلی گفته شد، هزینهٔ ساخت توربین 25000000 ریال به‌ازای هر کیلووات توربین انتخابی است [19]. دیگر هزینه‌های اولیه شامل نصب، انتقال و... را می‌توان 40 % هزینهٔ توربین در نظر گرفت. عمر مفید یک توربین بادی معمولاً 15 سال در نظر گرفته می‌شود. هزینهٔ عملکرد سالانه، تعمیر و نگهداری و همچنین اجارهٔ محوطه برابر 6% هزینهٔ توربین خواهد بود [22]. در صورتی که قیمت خرید برق تولیدی را 27 سنت یورو به‌ازای هر کیلووات ساعت [23] در نظر بگیریم، با تقسیم هزینهٔ اولیه بر سود سالیانه، زمان بازگشت سرمایهٔ اولیه به‌دست خواهد آمد.

بر مبنای سرشماری سال 1390، تعداد خانوارهای سه شهرستان چابهار، دلگان و دهک به‌ترتیب 58084، 13596 و 17880 بوده است [24]. با فرض مصرف برق سالانه، متوسط هر خانوار معادل 2/5 مگاوات ساعت، مصرف سالانه هر شهر به‌دست می‌آید. تعداد توربین مورد نیاز برای تأمین کل انرژی الکتریکی سالانه، در هر حالت، از تقسیم مصرف کل بر برق تولیدی سالانهٔ هر توربین محاسبه می‌شود.

نتایج محاسبات اقتصادی در جداول (9) تا (11) برای هر سه شهر ارائه شده است. با توجه به نایکنواختی مصرف در ساعت‌های مختلف روز مسلماً برق تولیدشده به‌وسیلهٔ نیروگاه بادی که با فرض مصرف متوسط خانواده‌ها در طی سال طراحی شده، در ساعت‌های پرمصرف جوابگوی مصرف‌کنندگان نخواهد بود. به‌علاوه با توجه به تغییرات سرعت باد، در برخی ساعت‌ها نیز تولید نیروگاه بادی بیشتر از مصرف خواهد بود؛ لذا لازم است نیروگاه بادی با شبکهٔ سراسری برق در ارتباط باشد تا امکان مبادلهٔ کمبود یا مازاد تولید فراهم باشد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه در برخی ساعت‌ها ممکن است سرعت وزش باد در حدی نباشد که توربین بادی تولید کافی داشته باشد، منطقی نیست که تأمین برق یک شهر فقط توسط توربین بادی تأمین شود. بر این مبنا می‌توان تعداد توربین‌هایی را که در هر ایستگاه نصب می‌شود، متناسب با شرایط خاص هر ایستگاه و سرمایهٔ در دسترس انتخاب کرد.

نصب توربین با توان زیاد در مناطق کم‌استعداد یا نصب توربین پرتوان در ارتفاع کم، می‌تواند موجب کاهش سود یا حتی ضرر شود. چنانچه زمان بازگشت سرمایه طولانی‌تر از عمر مفید پیش‌بینی شده برای توربین باشد، پذیرفتنی نیست.

نتایج نشان می‌دهند که توربین 10 کیلووات مدل Aircon برای هر سه ایستگاه، در هر سه ارتفاع (به‌جز ارتفاع 10 متر ایستگاه دلگان که داده‌های بادی برای آن در دسترس نیست) مناسب است. منحنی توان این توربین در شکل (5) نمایش داده شده است.



شکل (5): منحنی توان توربین انتخابی

جدول (9): پارامترهای اقتصادی محاسبه‌شده برای سایت چابهار

تعداد توربین‌ها	زمان بازگشت سرمایه (سال)	سود سالانه (میلیون ریال)	C (میلیون ریال $(kw.h^{-1})$)	C_F	P_t (MWh)	ارتفاع (m)	P (kW)
33769	1/7	32/9	1/2	0/277	4/3	40	1/6
37233	1/91	29/3	1/3	0/251	3/9	30	1/6
45378	2/42	23/1	1/6	0/206	3/2	10	1/6
11344	1/8	97/2	1/3	0/264	12/8	40	5
12305	1/98	88/3	1/4	0/243	11/8	30	5
14667	2/45	71/3	1/7	0/204	9/9	10	5
4523	1/39	252/3	1/0	0/331	32/1	40	10
4840	1/5	233/6	1/1	0/309	30	30	10
5650	1/79	195/2	1/3	0/265	25/7	10	10
4400	3/09	226/6	2/0	0/170	33	40	20
4922	3/58	195/4	2/2	0/152	29/5	30	20
6179	4/93	141/9	2/8	0/121	23/5	10	20
1794	1/69	619/6	1/2	0/278	80/9	40	30
1946	1/86	563/5	1/3	0/256	74/6	30	30
2319	2/3	456/6	1/6	0/215	62/6	10	30
1013	3/73	939/5	2/3	0/148	143/3	40	100
1172	4/57	766/6	2/7	0/128	123/9	30	100
1569	7/19	486/8	3/6	0/095	92/5	10	100

جدول (10): پارامترهای اقتصادی محاسبه‌شده برای سایت دلگان

P (kW)	ارتفاع (m)	P_t (MWh)	C_F	C (میلیون ریال kwh^{-1})	سود سالانه (میلیون ریال)	زمان بازگشت سرمایه (سال)	تعداد توربین‌ها
1/6	40	2/6	0/186	1/85	18/3	3/06	2307
1/6	30	2/6	0/186	1/85	18/3	3/06	2307
5	40	7/9	0/180	1/90	55/1	3/17	759
5	30	7/9	0/180	1/90	55/1	3/17	759
10	40	20	0/228	1/50	147/7	2/37	300
10	30	20/1	0/229	1/50	148/6	2/36	298
20	40	20/7	0/118	2/87	123/4	5/67	289
20	30	20/8	0/119	2/87	123/3	5/63	288
30	40	49/7	0/189	1/80	351/4	2/99	120
30	30	49/8	0/189	1/80	352/3	2/98	120
100	40	87/8	0/100	3/40	477/5	7/33	68
100	30	88/3	0/100	3/40	482/0	7/26	67

جدول (11): پارامترهای اقتصادی محاسبه‌شده برای سایت دهک

P (kW)	ارتفاع (m)	P_t (MWh)	C_F	C (میلیون ریال $kw.h^{-1}$)	سود سالانه (میلیون ریال)	زمان بازگشت سرمایه (سال)	تعداد توربین‌ها
1/6	40	2	0/223	1/52	14/7	3/81	2500
1/6	30	1/8	0/200	1/70	12/9	4/34	2777
1/6	10	1/4	0/156	2/20	9/35	5/99	3571
5	40	6	0/214	1/60	43/7	4/01	833
5	30	5/5	0/196	1/75	39/2	4/46	909
5	10	4/3	0/153	2/22	28/5	6/13	1162
10	40	14/7	0/262	1/30	111/4	3/14	340
10	30	13/6	0/242	1/40	101/6	3/44	367
10	10	10/7	0/191	1/80	75/8	4/62	467
20	40	16/7	0/149	2/30	109/7	6/38	299
20	30	15/1	0/134	2/52	95/5	7/33	331
20	10	11/4	0/101	3/35	62/5	11/2	438
30	40	37/5	0/223	1/52	275/5	3/81	133
30	30	34/4	0/204	1/67	247/9	4/24	145
30	10	26/6	0/158	2/15	178/4	5/89	187
100	40	73/8	0/131	2/60	462/2	7/57	67
100	30	66/2	0/118	2/90	394/4	8/87	75
100	10	48/4	0/086	3/95	235/8	14/84	103

7. نتیجه‌گیری

بررسی پتانسیل انرژی باد برای سه ایستگاه از استان سیستان و بلوچستان، نشان می‌دهد که این منطقه برای احداث مزرعه‌بادی بسیار مناسب است. اما آنچه در کنار داشتن پتانسیل مناسب، برای یک مزرعه‌بادی ضروری به‌نظر می‌رسد، مقرون‌به‌صرفه‌بودن آن از لحاظ اقتصادی است. نتایج این‌گونه نشان می‌دهند که از نقطه‌نظر اقتصادی و با در نظر گرفتن زمان بازگشت سرمایهٔ اولیه، (به‌جز ارتفاع 10 متر سایت دلگان که داده‌های بادی برای آن در دسترس نیست) برای هر سه شهر چابهار، دلگان و دهک توربین‌های 10 کیلووات در هر سه ارتفاع مناسب است؛ به‌طوری‌که برای چابهار در ارتفاع 40 متر به 4523، در ارتفاع 30 متر به 4840 یا در ارتفاع 10 متر به 5650 توربین 10 کیلووات نیاز است. در دلگان نیز به 300 توربین 10 کیلووات در ارتفاع 40 متر یا 298 توربین در ارتفاع 30 متر نیاز است. همچنین برای تأمین برق شهرستان دهک، به‌ترتیب340، 367 یا 467 توربین 10 کیلووات در ارتفاع 40، 30 یا 10 متر مورد نیاز است. با به‌کار بردن این تعداد توربین در ارتفاع‌های 10، 30 و 40 متر شهرستان چابهار، هزینهٔ انجام‌شده به‌ترتیب در مدت 22، 18 و 17 ماه باز خواهد گشت. همچنین این مدت زمان برای ارتفاع‌های 30 و 40 متر شهرستان دلگان 29 ماه و برای ارتفاع‌های 10، 30 و 40 متر شهرستان دهک برابر 56، 42 و 38 ماه خواهد بود.

فهرست علائم

$\bar{P}_{tot}$	انرژی تولیدی سالانه به‌وسیلهٔ توربین بادی	$\bar{U}$	متوسط سرعت باد ($m.s^{-1}$)
C_{OM}	هزینهٔ تعمیر و نگهداری	U_i	سرعت اندازه‌گیری‌شدهٔ باد در هر لحظه ($m.s^{-1}$)
m	درصدی از سرمایه‌گذاری اولیه برای هزینهٔ تعمیر و نگهداری	N	تعداد اندازه‌گیری‌ها در طول یک سال
C_I	سرمایه‌گذاری اولیه	P_{max}	توان سالانهٔ باد
n	عمر در نظر گرفته شده برای توربین	$\bar{E}$	انرژی سالانهٔ باد
$PW(C_{OM})_{1-n}$	ارزش فعلی هزینهٔ کارکرد برای n سال	ρ	چگالی هوا
I	نرخ سود سالانه	A	مساحت منطقه
$NPW(C_A)_{1-n}$	ارزش فعلی هزینهٔ کل	$f_{(\bar{U})}$	تابع توزیع ویبول
$NPW(C_A)$	ارزش فعلی خالص هزینهٔ سالانه عملکرد توربین	k	ضریب شکل
E_I	انرژی تولیدی توربین در طول یک سال	c	ضریب مقیاس
P_R	توان اسمی توربین انتخابی	σ_U	انحراف معیار داده‌های بادی
CF	ضریب ظرفیت	Δt	طول بازه‌های زمانی اندازه‌گیری‌ها
C	هزینهٔ تولید یک کیلووات ساعت برق از توربین	$P(\bar{U})$	معادلهٔ منحنی مشخصهٔ توان توربین بادی

■

مراجع

[1] IEA, International Energy Agency, In *World Energy Outlook 2008*, Paris, IEA, 2008.

[2] IEA, International Energy Agency, In *World Energy Outlook 2009*, Paris: IEA, 2009.

[3] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., "*Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*", John Wiley & Sons, 2002.

[4] Stover, D, "*The Forecast for Wind Power"*, Pop Sci., Vol. 247, pp. 65–72, 1995.

[5] "*Assessment of Distributed Generation Technology Applications"*, Resource Dynamics Corporation, February 2001.

[6] Meishen, L., Xianguo, L., *"Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Energy Potential for Waterloo Region Canada"*, Energy Conversion and Management, Vol. 46, pp. 3014–3033, 2005.

[7] Kiranoudis, C.T., Voros, N.G., Maroulis, Z.B., "*Short-Cut Design of Wind Farms*", Energy Policy, Vol. 29, pp. 567–578, 2001.

[8] Patel, M. R., *Wind and Solar Power Systems*, USA, New York: Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1999.
"*Global Strategy for Wind Energy*", World Wind Energy Association Website: http//www.wwindea.org, 2002

[9] Barthelmie, R.J., Palutikof, J.P., "*Coastal Wind Speed Modeling for Wind Energy Applications*", J. Wind England Aerodynamic, Vol. 62, pp.213–236, 1996.

[10] Jangamshetti, S.H., Rau, V.G., "*Optimum Sitting of Wind Turbine Generators*", IEEE Transact Energy Conversion, Vol. 16, No.1, pp. 8–13, March 2001.

[11] Y. Zhou, W.X.Wu, G.X. Liu, "*Assessment of Onshore Wind Energy Resource and Wind Generated Electricity Potential in Jiangsu, China*", Energy Procedia, Vol. 5, pp. 418–422, 2011.

[12] Aksas, M., Gama, A., "*Assessment of Wind and Solar Energy Resources in Batna, Algeria*", Energy Procedia 6, 459–466, 2011.

[13] کاویانی، محمدرضا، «*توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران*»، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شمارهٔ 36، 1374.

[14] سازمان انرژی‌های نو ایران: http://www.suna.org.ir

[15] Mirhosseini, M., Sharifi, F.,Sedaghat, A., "*Assessing the Wind Energy Potential Locations in Province of Semnan in Iran*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 449-459, 2010.

[16] Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers: http://www.urbanwind.net.

[17] Hau, E.,"*Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*", Berlin: 2nd ed., Springer, 2006.

[18] Mathew, S.,"*Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*", Berlin (Heidelberg), 2006.

[۱۹] بانک ملی ایران: .[accessed July 2012] <http://www.bmi.ir>

[20] Lu, L., Yang, H., Burnet, J., "*Investigation on Wind Power Potential on Hong Kong Islands: an Analysis of Wind Power and Wind Turbine Characteristics*", Renewable Energy,Vol. 27, pp. 1–12, 2002.

[21] Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A., Kalantar, V., "*Wind Energy Feasibility Study for City of Shahrbabak in Iran*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 2545–56, 2011

[22] http://www.asriran.com/fa/news/240079

[۲۳] مرکز آمار ایران: http://www.amar.org.ir