

لحاظ کردن اثر wake در مکان یابی بهینه توربین های بادی یک مزرعه بادی

سعید نژاد فرد جهرمی^۱ احسان محرمی^۱ روح ا... فدایی نژاد^۲
^۱ دانشجوی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
^۲ استادیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
کرمان - ایران

واژه های کلیدی: اثر wake، مزرعه بادی، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک

چکیده

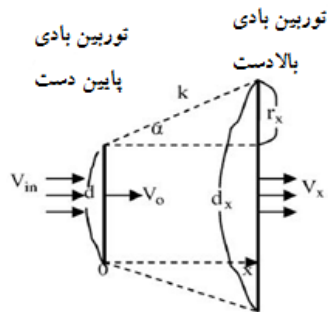
مربوط به طراحی و تولید توربین های بادی، افزایش قیمت و کاهش منابع سوخت های فسیلی، نگرانی های زیست محیطی مثل افزایش دمای جو و افزایش حمایت های نهادهای مختلف در سطح ملی و بین المللی از طرح های نیروگاهی بادی. با توجه به کمتر بودن توان تولیدی هر توربین بادی نسبت به یک واحد نیروگاهی سنتی، نیاز است تا مزارع بادی بوجود آیند. یک مزرعه بادی شامل چندین توربین بادی می باشد که این افزایش تعداد علاوه بر افزایش توان تولیدی، مزایای دیگری مانند تقسیم شدن بعضی از هزینه های ثابت روی تعداد بیشتری از توربین ها را در پی دارد [۱].

در مراجع [۲] و [۳] که جزو اولین مقاله ها در این بحث می باشند، یک روش برای بهینه سازی مکان توربین ها در مزرعه بادی که از مدل wake ارائه شده توسط آقای Jensen استفاده شده، ارائه گردیده است. در مقالات دیگری که بعد از مقالات فوق ارائه گردیده معمولا از مدل wake یاد شده و مدل قیمت مزرعه بادی ارائه شده توسط آقای Mosseti استفاده شده و عمده تحقیقات در مورد روش های بهینه سازی صورت گرفته است. روش های مختلفی مانند انواع الگوریتم های هیوریستیک و روش های دیگر

افزایش روز افزون مزارع توربین بادی و گسترش آن ها، ضرورت روش هایی برای بهینه سازی مسائل فنی و اقتصادی آن ها را بیش از پیش نمایان می سازد. یکی از چالش های پیش رو برای طراحی مزارع بادی تعیین موقعیت توربین ها نسبت به یکدیگر می باشد. این مقاله روشی را برای بهینه سازی چیدمان توربین ها در یک مزرعه بادی و تعداد آن ها با در نظر گرفتن دو عامل اثر wake و تغییر جهت و سرعت باد ارائه می کند. در قسمت بعد این روش بهینه سازی با استفاده از داده های واقعی بر روی منطقه میل نادر واقع در استان سیستان و بلوچستان اجرا شده و نتایج بدست آمده با چند چیدمان دیگر مقایسه شده است. علت انتخاب این منطقه وزش بادهای با سرعت مناسب و تقریبا مداوم در این ناحیه می باشد. در این بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

۱- مقدمه

امروزه سهم انرژی باد در تولید برق مورد نیاز جوامع در حال افزایش بوده و دلایل مختلفی در این امر تاثیرگذار می باشد که از جمله می توان به این موارد اشاره کرد: بهبود تکنولوژی های



شکل ۱: شمای کلی مدل Jensen [۱۱]

گوناگون استفاده شده که عبارتند از: مدل Jensen [۸]، مدل Ainslie [9] و مدل G.c.Larsen [۱۰]. در این مقاله از مدل Jensen که یک مدل تحلیلی ساده می باشد برای محاسبه کاهش سرعت باد ناشی از اثر wake در توربین های بادی پایین دست مورد استفاده می گردد. این مدل ابتدا توسط N.O.Jensen در سال ۱۹۸۳ ارائه شد. شکل (۱) مدل Jensen پایه، را نشان می دهد [۱۱].

سرعت باد برای توربین های پایین دست بعد از عبور باد آزاد از توربین های بالا دست، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V_x = V_{in} \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_t} \right) \left(\frac{d}{d_x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در آن $V_{in} (m/s)$ ، سرعت باد آزاد که همان سرعت باد در هنگام عبور از توربین بالادست و $V_x (m/s)$ سرعت باد بعد از عبور آن از توربین های پایین دست می باشد. پارامترهای مشخص شده در شکل (۱) عبارتند از: d قطرصفحه چرخش توربین بالادست و d_x قطر توربین پایین دست می باشد که به صورت تقریبی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$d_x = d + 2r_x = d + 2kx \quad (2)$$

که در آن r_x ، k و x در شکل (۱) مشخص شده اند. k ضریبی است که میزان تاثیر wake بر کاهش سرعت باد را نشان می دهد. عموماً مقدار k برای توربین های نصب شده بر روی خشکی برابر $۰/۰۷۵$ و برای توربین های واقع در دریا برای $۰/۰۵$ در نظر گرفته می شود. که با توجه به محل مورد مطالعه، مقدار آن $۰/۰۷۵$ در نظر گرفته شده است.

مانند مونت کارلو و الگوریتم حریصانه^۱ استفاده شده است. ولی در اکثر مقالات جهت و سرعت باد به طور کامل و پیوسته مدل نشده و تنها به جهت و سرعت غالب باد اکتفا شده است.

در مرجع [۴] برای حل مساله جایابی توربین ها در یک مزرعه بادی از الگوریتم مونت کارلو استفاده شده است و در مرجع [۵] یک روش جدید برای جایابی توربین ها با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات^۲ ارائه شده است.

در مرجع [۶] یک نوع بهینه سازی برای جایابی توربین ها در یک مزرعه بادی مطرح شده که بسیار ساده بوده و بر مبنای آن فاصله هر توربین تا سایر توربین ها باید حداقل ۵ تا ۹ برابر قطر روتور باشد اما همانگونه که در مرجع [۷] اشاره شده، این روش کارآمد نبوده و مناسب نمی باشد. علت این امر غیر اقتصادی بودن نتایج می باشد؛ با توجه به اینکه طول قطر روتور توربین های مورد استفاده در این مقاله $۹۳/۴$ متر بوده باید مساحتی به شعاع تقریبی ۶۵۰ متر اطراف هر توربین خالی باشد که مساحتی بالغ بر $۱/۳$ کیلومتر مربع را شامل می شود و با در نظر گرفتن هزینه زمین و کابل کشی های لازم نیاز به سرمایه گذاری بسیار زیادی خواهد بود و کاهش فاصله توربین ها هر چند موجب کاهش توان تولیدی می شود اما باز به صرفه خواهد بود.

۲- مدل کردن اثر Wake

توان تولیدی یک توربین بادی تابعی از مکعب سرعت باد اعمال شده به توربین می باشد و بالطبع هر گونه کاهش در سرعت باد، توان تولیدی را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. سرعت باد در هنگام عبور از توربین بادی و جذب قسمتی از انرژی آن کاهش می یابد. این کاهش در سرعت باد در پشت توربین تابعی از فاصله، ابعاد توربین، سرعت باد و ... بوده که به آن اثر wake اطلاق می گردد (مطابق شکل ۱). البته این تاثیر با فاصله گرفتن از توربین تضعیف و باصطلاح سرعت وزش باد بهبود می یابد که ناشی از اثر جریانات عمومی هوا در منطقه می باشد. در مراجع مختلف برای مدلسازی اثر wake از سه مدل

¹ greedy algorithm

² Particle Swarm Optimization (PSO)

۳- تابع هدف:

در این مقاله هدف، حداکثر کردن توان تولیدی مزرعه بادی و مینیمم کردن هزینه مربوط به توربین ها می باشد. مدل زیر برای هزینه توربین ها (هزینه خرید، نصب و...) استفاده شده است [۱۲]:

$$\text{cost} = N_t [2/3 + 1/3 e^{-0.0074 N_t^2}] \quad (8)$$

که در آن N_t تعداد توربین ها بوده و همانطور که ملاحظه می شود، ترم دوم معادله با افزایش N_t کاهش می یابد. در این رابطه N_t متغیر می باشد.

تابع هدف مورد استفاده در این مقاله به صورت رابطه (۹) می باشد.

$$F = \frac{\text{cost}}{P_{tot}} \quad (9)$$

که در آن P_{tot} توان تولیدی کل مزرعه بادی در سال می باشد. بدلیل حداقل کردن هزینه ها و بالا بردن توان تولیدی، هدف مینیمم کردن تابع شایستگی است.

۴- مشخصات توربین بادی مورد مطالعه

توربین بادی استفاده شده در این مقاله از نوع XC93-2000 بوده که برخی از مشخصات آن در جدول (۱) آمده است. جدول (۲) رابطه بین C_t و سرعت باد را نشان می دهد. مطابق این جدول و نمودار شکل (۳) مشاهده می شود که برای سرعت های باد بین ۳ m/s تا ۱۱ m/s، C_t مقداری ثابت و حداکثر خود را دارا می باشد.

جدول ۱: مشخصات توربین بادی مورد مطالعه

Rated Wind Speed	m/s	11
Cut-out Wind Speed	m/s	22
Cut-in Wind Speed	m/s	3
Blade Length	m	45
Rated Power	kW	2156
Rated Voltage	V	690
Hub Height	m	80
Rotor Diameter	m	93.4
Rated Line Voltage	V	660

C_t ضریب نیروی پیشران^۱ نام دارد و برای هر توربین بادی از رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$C_t = \frac{F_t}{\rho \pi r^2 V_{in}^2} \quad (3)$$

در جایکه $F_t (kg \frac{m}{s^2})$ نیروی پیشران، $\rho (kg/m^3)$ چگالی هوا و $r (m)$ شعاع صفحه چرخش توربین می باشد. اگر مقدار x که در شکل (۱) نشان داده شده است صفر قرار داده شود؛ رابطه بین سرعت باد در جلو و پشت یک توربین بادی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$V_o = V_{in} \sqrt{1 - C_t} \quad (4)$$

ارتفاع توربین ها در مزرعه بادی نیز در اثر wake تاثیر گذار می باشد. در ارتفاع بیش از یک کیلومتر، بدلیل تاثیر نپذیرفتن سرعت باد از اصطکاک زمین، ارتفاع تاثیری بر سرعت باد نخواهد داشت. اما در لایه های پایین تر، سرعت باد با افزایش ارتفاع افزایش می یابد^۲. بنابراین اگر ارتفاع توربین ها در یک مزرعه بادی متفاوت باشد، این اثر توسط رابطه (۵) در نظر گرفته می شود.

$$V = V_{ref} \frac{\ln(h/h_0)}{\ln(h_{ref}/h_0)} \quad (5)$$

که $V_{ref} (m/s)$ سرعت باد مرجع، h_{ref} ارتفاع هاب و h_0 بسته به موقعیت جغرافیایی محل تغییر می کند^۳. حال با لحاظ کردن اثر ارتفاع، رابطه (۱) برای یک مزرعه بادی به رابطه (۶) تبدیل می شود:

$$V_x = V_{in} \left[1 - \left(1 - \sum_i^n \sqrt{1 - C_{t_i}} \right) \left(\frac{d}{d_{xi}} \right)^2 \right] \frac{\ln(h/h_0)}{\ln(h_{ref}/h_0)} \quad (6)$$

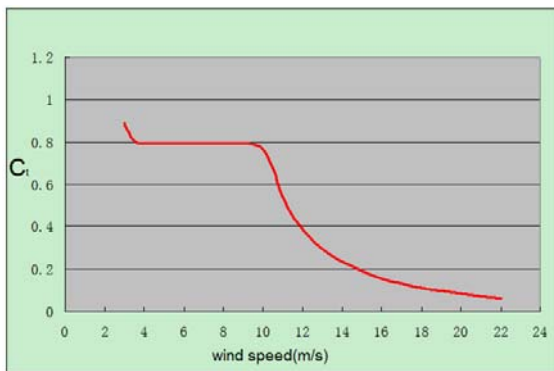
هر چه توربین های موجود در یک مزرعه بادی متراکم تر باشند، اغتشاشات باد در توربین پایین دست افزایش یافته و باد فرصت کافی برای بهبود پیدا نمی کند و در نتیجه توان خروجی توربین پایین دست بیشتر کاهش می یابد.

ارتباط توربین های پایین دست و بالا دست بدلیل تغییرات طبیعی جهت باد، با زمان دستخوش تغییر می شود. در نتیجه جهت باد به عنوان عامل موثر دیگری در اثر wake خواهد بود.

¹ Thrust coefficient

² wind shear effect

³ roughness length



شکل ۲: نمودار C_t بر حسب سرعت باد

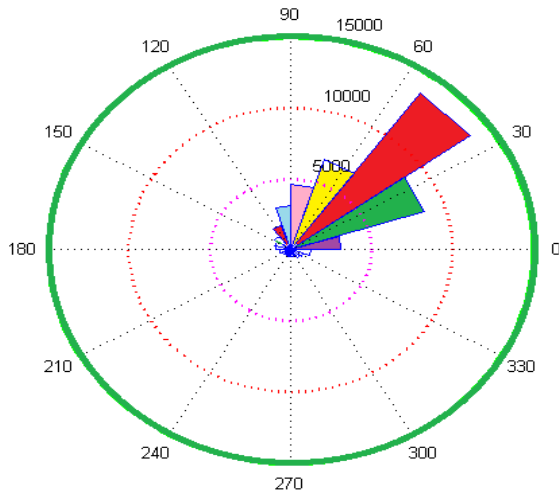
در این ناحیه با افزایش سرعت باد توان تولیدی توربین بادی زیاد شده و در صورت افزایش سرعت باد به بیش از 11 m/s ، C_t شروع با کاهش می کند تا از افزایش توان تولیدی توربین بادی به بیش از توان نامی جلوگیری کند و در این ناحیه توان توربین، برابر توان نامی خواهد بود. با استفاده از جداول و نمودارهای زیر توان تولیدی توربین بادی و C_t برای سرعت های مختلف باد محاسبه شده و برای شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۳) رابطه بین قدرت توربین بادی و سرعت باد را نشان می دهد.

جدول ۳: قدرت توربین بادی بر حسب سرعت باد

Wind speed (m/s)	Power (kW)
$\rho=1.010\text{kg/m}^3$	
3	40.571
3.5	61.248
4	94.733
4.5	136.542
5	188.646
5.5	252.117
6	328.237
6.5	418.086
7	522.6
7.5	643.459
8	780.952
8.5	938.001
9	1114.77
9.5	1312.379
10	1531.959
10.5	1766.195
11	1943.342
11.5	2024.861
12	2042.67
13	2042.67
14	2042.67
15	2042.67
16	2042.67
17	2042.67
18	2042.67
19	2042.67
20	2042.67
21	2042.67
22	2042.67

جدول ۲: C_t بر حسب سرعت باد

Wind speed (m/s)	Thrust Coefficient
$\rho=1.010\text{kg/m}^3$	
3	0.885924
3.5	0.809509
4	0.796002
4.5	0.796176
5	0.796144
5.5	0.796165
6	0.796216
6.5	0.796167
7	0.79624
7.5	0.7962
8	0.796223
8.5	0.796204
9	0.796214
9.5	0.790729
10	0.763537
10.5	0.677244
11	0.539533
11.5	0.452917
12	0.388139
13	0.296481
14	0.234055
15	0.189211
16	0.155889
17	0.130542
18	0.110751
19	0.095081
20	0.082426
21	0.072114
22	0.0636



شکل ۴: شکل گلباد برای جهات مختلف باد منطقه

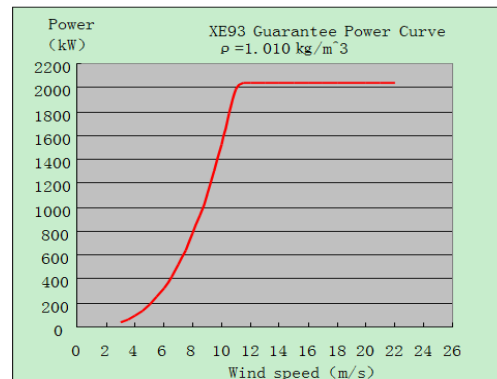
همبری^۲ روی آنها اعمال می گردد که در این مقاله نرخ جهش برابر ۰/۰۵ و نرخ همبری برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. سپس تابع شایستگی مجددا محاسبه شده و جواب های برتر انتخاب می شوند و این مراحل تا زمانی که یکی از دو شرط زیر برآورده شوند ادامه می یابد:

- رسیدن به جوابی که شرط توقف را ارضاء کند.
- رسیدن به حداکثر تعداد تکرارها که در این جا مقدار ۵۰ برای آن در نظر گرفته شده است.

در انتها بهترین جواب به عنوان خروجی الگوریتم ارائه می شود. در هر گام از الگوریتم، بعد از اینکه مقادیر هر ژن تعیین گردید، مکان توربینهای بادی و در نتیجه وضعیت توربین ها نسبت به یکدیگر مشخص می شود و مشخص می گردد که کدام توربین در wake سایر توربین ها قرار داشته و همچنین تعداد توربین ها شده و مقدار تابع شایستگی محاسبه می شود تا در پایان کار جواب بهینه بدست آید.

در این چیدمان تعداد توربین ها ۴۷ می باشد. برای نشان دادن بهینه بودن چیدمان ارائه شده، آن را با چند چیدمان ممکن دیگر با همین تعداد توربین مقایسه می کنیم.

نتایج شبیه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن کامل سرعت و جهت باد در طول سال به صورت شکل (۵) در می آید.



شکل ۳: نمودار قدرت توربین بادی بر حسب سرعت باد

۵- نتایج شبیه سازی:

در این تحقیق با بکارگیری اطلاعات ده دقیقه ای سرعت و جهت وزش باد منطقه در طول سال و مشخصه توان-سرعت هر توربین بادی و لحاظ اثر wake، توان تولیدی کل مزرعه بادی (P_{tot}) محاسبه می شود.

شکل گلباد برای جهات مختلف باد در منطقه میل نادر در شکل (۴) نشان داده شده است. بر طبق این شکل مشخص می شود که جهت باد بیشتر به کدام سمت بوده است.

برای شبیه سازی جهت تعیین چیدمان بهینه، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای اینکار منطقه مربع شکل به مساحت ۴ کیلومتر مربع را به ۴۰۰ قسمت مساوی تقسیم کرده، که هر قسمت یک مربع به ضلع ۱۰۰ متر می شود. هر مربع کوچک را یک سلول می نامیم. در نتیجه طول هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک برابر ۴۰۰ می شود. در صورت وجود توربین در سلول مورد نظر عدد یک و در صورت نبود، عدد صفر برای آن در نظر گرفته می شود.

در ابتدا این الگوریتم اقدام به تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی می کند، اندازه جمعیت اولیه در این مقاله برابر ۵۰ می باشد. در ادامه مقدار تابع شایستگی برای هر یک از جواب های تولید شده، محاسبه شده و جواب هایی که بیشترین شایستگی را دارند انتخاب می گردند. در گام بعد، عملگرهای جهش^۱ و

² crossover

¹ mutation

در چیدمان نوع (الف)، سعی شده نسبت به چیدمان اصلی، توربین هایی که در کنار هم قرار گرفته اند و فواصل آن ها کوتاه است، به صورت تصادفی در کل مزرعه پراکنده شوند. در چیدمان نوع (ب) چیدمان توربین ها در جهت عمود بر وزش باد غالب و به صورت منظم قرار داده شده اند. در چیدمان نوع (ج) توربین ها در جهت عمود بر وزش باد غالب قرار داده شده و پراکندگی آن ها نسبت به حالت (ب) بیشتر است.

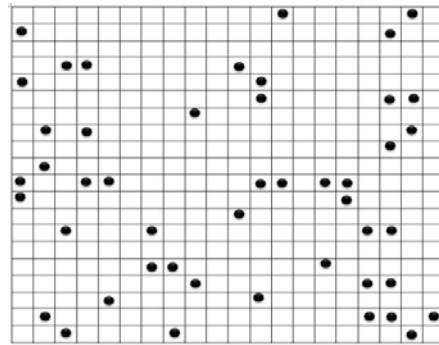
در اینجا تابع شایستگی هرچقدر مقدار کمتری را به خود بگیرد مطلوب تر است و نشان از آن دارد که چیدمان ارائه شده بهینه خواهد بود. همانطور که در جدول نشان داده شده است برای چیدمان ارائه شده در این مقاله مقدار تابع شایستگی کمترین خود را داشته و توان تولیدی بیشترین مقدار را دارد.

جدول ۴: مقایسه چیدمان های متفاوت توربین ها در مزرعه بادی

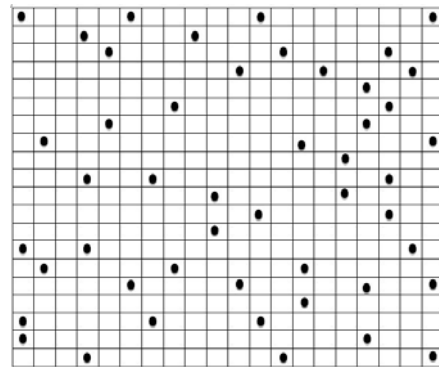
	مجموع انرژی تولیدی مزرعه بادی در تمام طول سال	مقدار محاسبه شده برای تابع شایستگی
الف	$1/6288 \times 10^5$ MWh	0/00025059
ب	$1/1242 \times 10^5$ MWh	0/00028171
ج	$1/055 \times 10^5$ MWh	0/00030019
چیدمان ارائه شده در این مقاله	$1/1813 \times 10^5$ MWh	0/00010109

۶- نتیجه گیری:

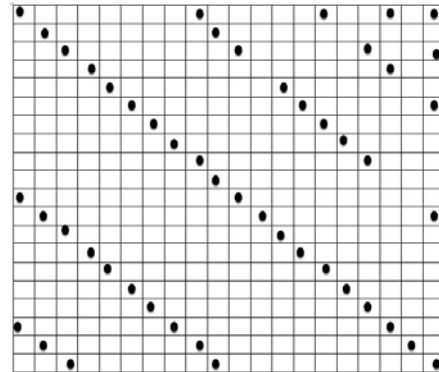
برای چیدمان بهینه توربین ها در یک مزرعه بادی عوامل گوناگونی از جمله اثر wake و هزینه توربین ها بایستی در نظر گرفته شود. در این مقاله با مدلسازی اثر wake و هزینه توربین ها سعی بر حداکثر کردن توان تولیدی مزرعه و کاهش هزینه های آن شده است. و با تعریف تابع هدف مورد نظر و مینیمم کردن آن سعی بر نیل به این اهداف شده است. در این مقاله شبیه سازی ها بر روی منطقه ای واقع در استان سیستان و بلوچستان به نام میل نادر صورت پذیرفته است. در این منطقه جهت و سرعت باد کاملاً متغیر بوده و بر اساس اطلاعات واقعی که از ایستگاه هواشناسی



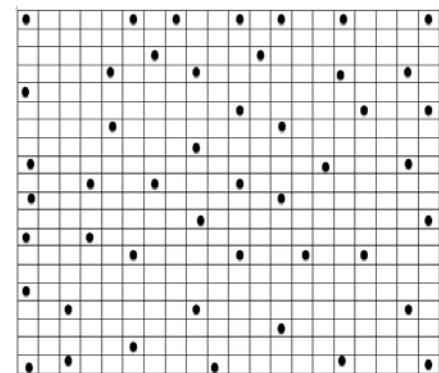
شکل ۵: نتایج شبیه سازی



شکل ۶: چیدمان (الف)



شکل ۷: چیدمان (ب)



شکل ۸: چیدمان (ج)

- Wind Power and Energy Conference, p.p. 1-5, 2009.
- [8] X. Zhang and W. Wang, "Wind farm and wake effect modeling for simulation of a studied power system," in Proceeding IEEE Power Systems Conference Exposition (PSCE), pp. 1-6, 2009.
- [9] J. F. Ainslie, "Calculating the flowfield in the wake of wind turbines," *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, vol. 27, no. 1-3, pp. 213-224, January 1988.
- [10] G. C. Larsen, A Simple Wake Calculation Procedure RISO National Laboratory, Roskilde, DK-4000, Denmark, Dec. 1988.
- [11] Hagkwen Kim, Chanan Singh, Alex Sprintson, "Simulation and Estimation of Riliability in a wind farm considering the wake effect ," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 2, April 2012.
- [12] Anshul mittal, "optimization of the layout of large wind farms using a genetic algorithm," MASTER thesis, case western reserve university, 24 February 2010.

منطقه برای هر ۱۰ دقیقه ثبت گردیده، استفاده شده است. در صورتی که اطلاعات واقعی به طور کامل در دست نباشد می توان از نرم افزارهای مرتبط مانند WASP برای مدل سازی باد و تخمین سرعت و جهت باد استفاده کرد. برای نشان دادن صحت مدلسازی فوق، بین نتایج بدست آمده و سایر نتایج ممکن مقایسه صورت گرفته است.

پیشنهاد می شود در تحقیقات آینده در مدل هزینه یاد شده، هزینه راه ها و یا هزینه کابل های موجود در مزرعه بادی را نیز لحاظ شود.

مراجع:

- [1] Javier Serrano-Gonzalez, Angel G. Gonzalez-Rodriguez, Jose Castro-Mora, Jesus Riquelme-Santos, and Manuel Burgos-Payan, " Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 8, p.p. 1671-1681, August 2010.
- [2] N.O.Jensen, "A note on wind generator interaction," Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Report M-2411, November 1983.
- [3] I. Katic, J. Høstrup, and N.O.Jensen, "A simple model for cluster efficiency," in *EWEC'86*, Rome, 1986.
- [4] Marmidis. G., Lazarou S., etc. "Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1455-1460, 2008.
- [5] Rasoul Rahmani, A. Khairuddin, Sam M. Cherati, Mahmoud Pesaran H. A, "A novel method for optimal placing wind turbines in a wind farm using particle swarm optimization (PSO)," *IPEC, Conference Proceedings*, pp. 134-139, 2010.
- [6] W.chen-xi, Z. yuan. *Wind Power*, China Electric Power PRESS: Beijing, 2002, pp131.
- [7] Feng Wang, Deyou Liu, Lihua Zeng, "Modeling and simulation of optimal wind turbine configurations in wind farms" *World Non-Grid-Connected*