بررسی روش های مورد استفاده در بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی

امین قبادپور[۱*]، مجید خانعلی[۲]، مصطفی جعفریان[۳]، قاسم نجفی[۴]

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران و مدرس دانشگاه فنی حرفه‌ای- آموزشکده فنی پسران شیروان

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: amin.ghobadpour@ut.ac.ir

چکیده

افزایش روز افزون مزارع توربین بادی و گسترش آن ها، ضرورت استفاده از روش‌هایی برای بهینه سازی مسائل فنی و اقتصادی آن ها را بیش از پیش نمایان می‌سازد. یکی از چالش‌های اصلی برای طراحی مزارع بادی تعیین موقعیت توربین‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. نحوهٔ چیدن و نصب توربین‌های بادی با توجه به محدود بودن زمین و مورفولوژی منطقه به محاسبات دقیقی نیاز دارد که تداخل جریان باد بین توربین‌ها به صورت بهینه انجام گیرد و برق تولیدی حداکثر شود. یکی از مراحل مهم طراحی مزرعه بادی حل مساله بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی می باشد، که شامل قرار گیری بهینه توربین ها در مزرعه بادی به طوری که اثرات ویک به حداقل و در نتیجه تولید برق به حداکثر مورد انتظار برسد. به عنوان یک دستورالعمل معمولا در مزارع توربین بادی بین توربین ها فاصله ای به اندازه ۵ تا ۹ برابر قطر توربین در جهت باد غالب و ۳ تا ۵ برابر قطر روتور در جهت عمود بر جریان باد در نظر گرفته می شود. در این مقاله به توصیف مساله بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی، مرور کلی بر روی تحقیقات انجام شده و بررسی چالش های موجود به منظور یافتن مناسب‌ترین نحوه استقرار توربین های بادی در یک مزرعه بادی با استفاده از روش‌های بهینه سازی پرداخته شد. با توجه به مطالعات انجام شده هنوز بسیاری از مسائل مانند: ساخت توابع هدف کارآمد تر و واقع بینانه تر، استفاده از روش بهینه سازی چند هدفه کارآمد تر و توسعه الگوریتم های بهره وری نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.

واژه‌های کلیدی: اثر ویک، انرژی باد، الگوریتم بهینه سازی، چیدمان توربین بادی.

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 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. بشر از زمان های بسیار دور انرژی باد را به شیوه های مختلف بکار گرفته است. در ایران با توجه به وجود مناطق بادخیز طراحی و ساخت آسیاب های بادی از ۲۰۰ سال پیش از میلاد مسیح رایج بوده و هم اکنون نیز بستر مناسبی جهت گسترش بهره‌برداری از توربین های بادی فراهم می‌باشد. بر اساس پیش بینی های صورت گرفته توسط انجمن جهانی انرژی بادی[1] ، انرژی بادی تا سال ۲۰۲۰ قادر به تامین حداقل ۱۲٪ از برق مصرفی جهان خواهد بود و همچنین ظرفیت نصب شده جهانی در این سال به حداقل ۱۵۰۰ گیگاوات خواهد رسید (REN21).

برای تولید برق به مقدار زیاد که بتوان در شبکه سراسری برق را تغذیه نماید، نیاز به ایجاد مزرعه توربین های بادی[2] است که از مجموعه ای از توربین های بادی تشکیل شده که به آن نیروگاه بادی نیز گفته می شود. 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. از مسائل مهم فاصله بهینه بین توربین های نصب شده و نحوه آرایش آن ها می باشد تا از زمین و باد موجود منطقه حداکثر استفاده شود. در مزارع بادی که بیش از یک ردیف توربین نصب می شود، جریان باد بعد از عبور از یک توربین به توربین بعدی می وزد.

اما با وجود کاهش هزینه ها، گروه بندی توربین ها ممکن است به دلیل وجود اثر ویک منجر به کاهش توان در مزرعه بادی شود. هنگامی که یک توربین توان باد را استخراج می کند، موجب ایجاد تلاطم در مسیر باد می گردد، به طوری که سرعت باد و در نتیجه توان استخراج شده توسط توربین های بعدی تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می یابد. در مزارع بادی بزرگ اثر ویک منجر به اتلاف توان قابل توجهی می شود [۱]، در نتیجه به حداقل رساندن آن ها به منظور افزایش توان خروجی مطلوب است. بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی به منظور تامین موقعیت توربین (طرح مزرعه بادی) برای تولید توان حداکثر می باشد. دستیابی به راه حل مناسب در نهایت منجر به سود بیشتر برای توسعه دهندگان مزرعه بادی خواهد شد. در حال حاضر، توربین ها معمولا با استفاده از قوانین بسیار ساده با طرح بندی خطی، که اغلب در ردیف های یکسان با فاصله زیاد از هم، نصب می شوند. اخیرا در چند مقاله گزارش شده است که طرح بندی نامنظم ممکن است منجر به تولید انرژی بالاتر نسبت به شبکه های منظم شود.

تعدادی از نرم افزاری تجاری در صنعت انرژی باد به منظور تسهیل در فرایند طراحی مزرعه بادی در دسترس هستند. با وجود این دخالت انسان هنوز هم ممکن است در طول فرایند طراحی مورد نیاز باشد. بنابراین، محققان از تکنیک های مختلف هوش محاسباتی برای حل

[1] . Word Wind Energy Association
[2] . Wind Farm

مسایل مزرعه بادی استفاده می کنند. با توجه به پیچیدگی های طراحی مزرعه بادی، روش های بهینه سازی دقیق مانند برنامه ریزی خطی، برنامه نویسی پویا، و غیره نمی تواند استفاده شود. در مقابل، الگوریتم های تقریبی معمولا به عنوان فن آوری هوشمند برای حل برای این گونه مسایل شناخته شده است. در بسیاری از موارد، الگوریتم های تقریبی قادر به پیدا کردن راه حل نزدیک به بهینه می باشند. الگوریتم های مختلفی برای بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرند که مهم ترین آن ها عبارتند از: روش شبیه سازی آنیلینگ[1] (SA) ، الگوریتم ژنتیک (GA) ، تکامل دیفرانسیلی[2] (DE) ، بهینه سازی ازدحام ذرات[3] (PSO) و بهینه سازی جامعه زنبور عسل. در طول دو دهه گذشته، توجه زیادی به استفاده از الگوریتم های غیر قطعی تکراری در زمینه انرژی باد داده است. محققان زیادی از این روش ها برای بهینه سازی چیدمان توربین های بادی استفاده کرده اند که نمونه هایی از آن ها در ادامه آورده شده است.

در این مقاله روند ساخت یک مزرعه باد و مشکلات ناشی از اثرات ویک و تاثیر آن در هزینه های تولید انرژی، تعمیر و نگهداری توربین ها بحث خواهد شد. همچنین منابع موجود در مورد بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی، مزایا و معایب روش های موجود و زمینه های پژوهشی قابل توسعه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف از این مقاله معرفی تکنیک های مختلف مورد استفاده توسط محققان در زمینه بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی است.

۲. تئوری مساله

۲.۱. ساختار مزرعه بادی

گام اول در توسعه یک پروژه مزرعه بادی تعیین محلی نصب توربین ها به گونه ای که از سودآوری اقتصادی پروژه اطمینان حاصل گردد. سایت ها معمولا در ۷ کلاس مختلف انرژی باد طبقه بندی می شوند که بر اساس ۷ سرعت متوسط باد مختلف طبقه بندی شده اند. معمولا، سایت های با کلاس انرژی باد ۴ یا بالاتر به طور بالقوه برای پروژه های بزرگ سودآور در نظر گرفته می شوند. در واقع، برخی از سایت ها ممکن است بسیار دور از شبکه برق بوده و دسترسی به آن ها مشکل باشد. در مورد اول، سایت به دلیل هزینه های بالا اتصال به شبکه برق و در مورد دوم، به دلیل هزینه های بالای احداث جاده، پروژه سود آور نیست.

هنگامی که یک سایت مناسب پیدا شد و هماهنگی لازم با مالکان زمین اتجام شد. در این حین، توسعه دهنده نیروگاه بادی با نصب برج های اندازه گیری به منظور ارزیابی توزیع باد (یا رز باد) از تمام قطعات سایت اقدام می کند. این اندازه گیری برای سایت های که جهت باد در آن شناخته شده و در تمام طول سال یکسان است معمولا کوتاه بوده (مثلا یک ماه) ولی برای سایت هایی که در آن بادهای فصلی از جهات مختلف می وزد ممکن است طولانی گردد. دقت این اندازه گیری به دلیل استفاده از این داده ها برای پیدا کردن طرح بهینه و ارزیابی سود سالانه مورد انتظار از پروژه مزرعه بادی بسیار مهم است. با این وجود، اندازه گیری در ارتفاعات پایین تر از ارتفاع هاب توربین های بادی انجام می گیرد، زیرا هزینه های نصب برج ها بالا می باشد. در این موارد، به منظور تخمین سرعت باد در ارتفاع هاب روش های اندازه

[1] . Simulated Annealing
[2] . Differential Evolution
[3] . Particle Swarm Optimization

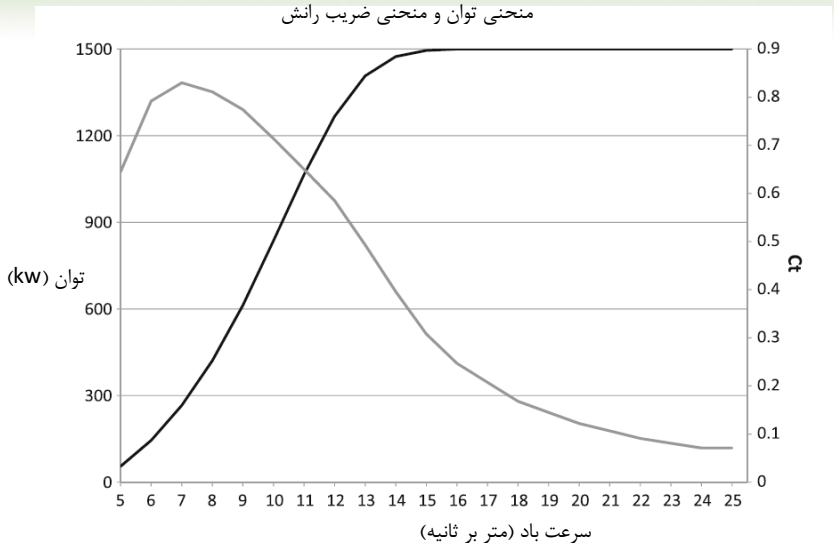
گیری SODARs داپلر و LIDARs داپلر استفاده می گردد. SODARs داپلر برای اندازه گیری سرعت باد از انرژی صوتی کاهش یافته برگشتی از نوسانات آشفته ذرات استفاده می کند، در حالی که داپلر LIDARs با استفاده از انرژی نور متفرق از ذرات میکروسکوپی و یا ذرات معلق در هوا که توسط باد جابجا می شوند، سرعت باد را اندازه گیری می کند. هر دو فناوری دارای مزیت دقت محاسبه توزیع باد در همه بخش های سایت بدون نیاز به نصب برج های اندازه گیری می باشند. مطابق توضیح فرلیچ[1] و همکاران، LIDAR به دلیل دقت بالاتر در حال تبدیل شدن به ابزار محبوب توسعه دهندگان مزرعه بادی است.

تعداد توربین ها و انتخاب مدل نصب بستگی به عوامل مختلفی دارد. اولا، اینکه معمولا یک توربین قوی تر به توربین با توان کمتر ترجیح داده می شود، زیرا نسبت هزینه به انرژی تولیدی در توربین بزرگ تر کمتر می باشد. سود خالص تولید شده توسط توربین متناسب با توان اسمی آن است، با این حال ممکن است توربین های بزرگتر گران تر و هزینه های نگهداری بالاتری داشته باشند. تولید کنندگان توربین ممکن است تخفیف ها را بر روی توربین های کوچک به منظور کاهش موجودی خود ارائه دهد. با فرض مشخص بودن زمین پروژه، توزیع باد، نوع و تعداد توربین ها مساله بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی را می توان حل کرد.

۲,۲. توربین های بادی و اثر ویک[2]

پارامترهای های مربوط به بهینه سازی چیدمان توربین های مزرعه بادی عبارتند از: سرعت برش ورودی c_i ، سرعت برش خروجی c_o ، سرعت اسمی، توان اسمی، منحنی قدرت، منحنی ضریب رانش، قطر روتور d، ارتفاع هاب z. هنگامی که سرعت باد از c_i بزرگتر شود، پره های توربین شروع به گردش و در نتیجه توربین تولید توان می کند. توان تولیدی تقریبا با مکعب سرعت باد تا سرعت اسمی باد افزایش می یابد، پس از آن سیستم کنترل توربین زاویه پیچ پره را به گونه ای تغییر می دهد که توان تولیدی ثابت و با توان اسمی برابر باشد. هنگامی که سرعت به c_o می رسد، برای جلوگیری از آسیب رسیدن به پره ها و قطعات، توربین خاموش می شود. از دیگر ویژگی های مهم منحنی توان و منحنی ضریب رانش می باشد، که به ترتیب توان تولیدی و مقدار ضریب محوری (c_t) در سرعت های بین c_i و c_o می باشند. به طور کلی، ضریب رانش نسبت انرژی دریافتی را در زمان عبور باد از پره های توربین نشان می دهد. تولید کنندگان معمولا هر دو منحنی توان و ضریب رانش را در چند سرعت اعلام می کنند با استفاده از درون یابی نقاط میانی قابل دسترس است. به عنوان مثال، شکل ۱ دو منحنی از توربین Vestas V63 (متر بر ثانیه $c_i = 5$ و متر بر ثانیه $c_o = 25$ و توان اسمی برابر ۱/۵ مگاوات، سرعت اسمی ۱۶ متر بر ثانیه) را نشان می دهد. داده ها برای سرعت های ۲۵–۱ متر بر ثانیه ارائه شده و به صورت خطی درون یابی شده است.

[1] . Frehlich
[2] . wake effect

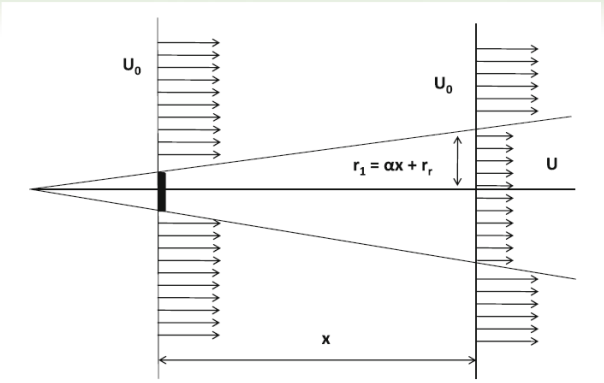


شکل۱. منحنی توان (خط سیاه) و منحنی ضریب رانش (خط خاکستری) در توربین Vestas V63 (https://www.vestas.com).

با توجه به اینکه توربین های بادی از انرژی مکانیکی موجود در باد برای تولید برق استفاده می کنند، جریان باد خروجی از توربین نسبت به باد ورودی از انرژی کمتری برخوردار است. با استخراج انرژی از باد، مخروطی (ویک) از هوای آهسته تر و آشفته تر در پشت سر توربین ایجاد می گردد. برای جلوگیری از تاثیر پدیده ویک پشت توربین بر عملکرد توربین های بادی در ردیف های بعدی، معمولا در مزارع بادی بین توربین ها حداقل به اندازه چند برابر قطر روتور توربین فاصله در نظر می گیرند. برای جلوگیری از افت کارکرد توربین ها در اثر پدیده ویک، بهتر است فاصله آن ها از یکدیگر در جهت باد غالب تا حد ممکن زیاد در نظر گرفته شود، ولی به دلیل هزینه های تملک زمین و همچنین اتصال توربین ها به شبکه برق تلاش می شود فاصله بهینه ای در عمل لحاظ گردد.

ورمیر و همکاران[1] [۲۰۰۳] در مطالعات خود آزمایشاتی با هدف معرفی مدل ریاضی برای تخمین اثر ویک انجام دادند، که هر دو موضوع کاهش سرعت باد و شدت تلاطم در آن لحاظ شد. برخی از این مدل ها تنها در نزدیک (مدل های ویک نزدیک) و برخی دیگر در فاصله دور تر (مدل های ویک دور) از توربین معتبر هستند. برای فاصله های بیشتر از سه برابر قطر روتور، ورمیر و همکاران استفاده از مدل های ویک دور را پیشنهاد کردند. در ویک نزدیک، شدت اغتشاش آنقدر بزرگ است که برای جلوگیری از آسیب پره ها، توربین باید خاموش گردد. برای توصیف اثر ویک در مزارع بادی، معمولا از مدل جنسن[2] استفاده می‌شود.

[1] . Vermeer *et al*
[2] Jensen Model



شکل۲ . نمایش شماتیک اثر ویک (مازتی و همکاران).

با توجه به شکل ۲ وزش باد از چپ به راست در سرعت u_0 و با توربین (مستطیل سیاه و سفید سمت چپ) با شعاع روتور r_r بر خورد می کند. در فاصله x در مسیر باد، سرعت باد u است و شعاع ویک برابر $r_1 = \alpha x + r_r$. پارامتر اسکالر α تعیین می کند که سرعت ویک چگونه با فاصله گسترش می یابد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\propto = \frac{0.5}{ln\frac{z}{z_0}} \qquad (۱)$$

که در آن z ارتفاع هاب توربین و z_0 ثابت زبری سطح می باشند. اگر i موقعیت توربین تولید کننده ویک، j موقعیت متاثر از آن، u_0 سرعت باد محیط و u_j سرعت باد در j باشد. سپس:

$$u_j = u_o(1 - vd_{ij}) \qquad (۲)$$

که در آن vd_{ij} کاهش سرعت اتفاق افتاده در موقعیت j توسط ویک تولید شده در i می باشد. vd_{ij} به صورت زیر محاسبه:

$$vd_{ij} = \frac{2a}{1+\propto(\frac{x_{ij}}{r_d})^2} \qquad (۳)$$

عبارت X_{ij} فاصله بین موقعیت های i و j است. عبارت a در صورت کسر را فاکتور القاء محوری نامیده و توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$a = 0.5(1 - \sqrt{1 - C_T}) \qquad (۴)$$

عبارت r_d که در مخرج مشاهده می شود، شعاع روتور پایین دستی می باشد و برابر است با:

$$r_d = r_r \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \qquad (۵)$$

در مدل جنسن، کل کاهش سرعت در موقعیت j در اثر ویک $v_{def}(j)$ از رابطه زیر بدست می آید:

$$v_{def}(j) = \sqrt{\sum_{i\in w(j)}^{\infty} vd_{ij}^2} \qquad (۶)$$

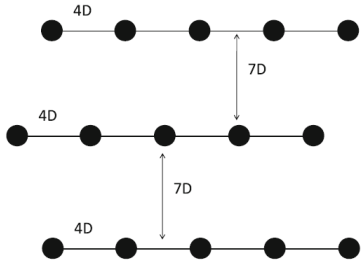
که در آن w(j) مجموعه ای از توربین موثر بر موقعیت j است. از آنجا که توربین بسیاری در یک مزرعه بادی نصب شده است، اثر ویک توربین ها ممکن است باهم تداخل داشته باشند و همدیگر را تحت تاثیر قرار دهند. بنابراین با مشخص بودن جهت وزش و سرعت باد، توان تولید شده توسط مزرعه باد را می توان با محاسبه سرعت باد v_j^s در هر مکان توربین به دست آورد. توان کل تولید از جمع سهم هر توربین مطابق رابطه زیر بدست می آید:

$$T = \sum_{s\in S} r_s \sum_{j\in L} P(v_j^s) = \sum_{s\in S} r_s \sum_{j\in L} P\left[U_s\left(1-\sqrt{\sum_{i\in W^s(j)} vd_{ij}^2}\right)\right] \quad (۷)$$

که در آن $W^s(j)$ مجموعه ای از توربین موثر بر موقعیت j در اثر ویک، r_s مجموع شعاع موثر، U_s متوسط سرعت باد می باشد.

۳. بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی

بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی تا حد زیادی توسط پژوهشگران تحقیق در عملیات نادیده گرفته شده است. در ادامه به بررسی آثار برجسته منتشر شده در مورد ویک، با تاکید بر روی کاستی ها و فرصت های تحقیقاتی که می تواند بیشتر مورد بررسی قرار گیرد می پردازیم. به عنوان یک دستورالعمل معمولا در مزارع توربین بادی بین توربین ها فاصله ای به اندازه ۵ تا ۹ برابر قطر توربین در جهت باد غالب و ۳ تا ۵ برابر قطر روتور در جهت عمود بر جریان باد در نظر گرفته می شود. این پدیده، که به عنوان اثر ویک اشاره شده است، که توسط محققان زیادی در زمینه آئرودینامیک سیالات مورد مطالعه قرار گرفته است. (شکل ۳).



شکل۳ . سه ردیف با پنج توربین، نصب شده با توجه به قاعده کلی مزارع بادی

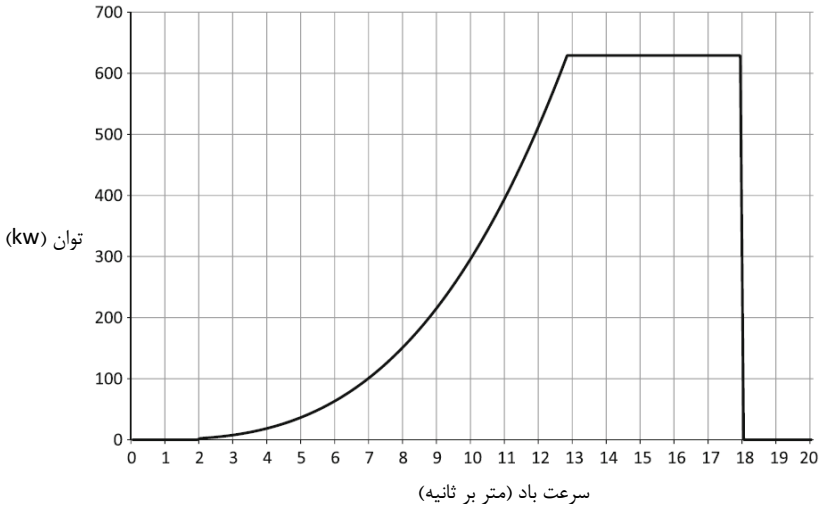
این روش ساده تمام جهات باد به جز یکی که غالب است را نادیده می گیرد، از این رو به احتمال زیاد منجر طرح بندی مزرعه بادی کمتر از حد مطلوب می گردد. علاوه بر این، نمی تواند توان تولید شده برای هنگامی که باد از جهت عمود می وزد را محاسبه نماید، زیرا در این صورت فاصله بین توربین عامل ویک و توربین متاثر از آن خیلی کوتاه بوده و مدل جنسن معتبر نیست.

مازتی[1] و همکاران [۱۹۹۴] برای اولین بار مساله بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی را مطرح کردند. آن ها مزرعه بادی مربع شکل با شبکه 10×10 را مدلسازی کردند، که در آن مراکز ۱۰۰ مربع به دست آمده می توانست موقعیت ممکن برای توربین ها باشد. توربین استفاده شده

[1] . Mosetti

با ارتفاع هاب ۶۰ متر، قطر ۴۰ متر، و ضریب ثابت رانش C_t = ۰/۸۸ . منحنی قدرت نشان داده شده در شکل ۴ که در آن سرعت باد u برحسب متر بر ثانیه و توان برحسب کیلو وات بیان شده است، توسط روابط زیر توضیح داده شده است:

$$P(U) = \begin{cases} 0 & \text{for } U < 2 \\ 0.3U^3 & \text{for } 2 \le U < 12.8 \\ 629.1 & \text{for } 12.8 \le U < 18 \\ 0 & \text{for } 18 \le U \end{cases}$$



شکل ٤ . منحنی توان استفاده شده توسط مازتی و همکاران (۱۹۹٤).

مازتی و همکاران ، تعداد توربین نصب شده را از پیش تعریف نکردند و هدف خود را به حداکثر رساندن توان تولیدی P_{tot} در مقابل حداقل هزینه نصب و راه اندازی $cost_{tot}$ در نظر گرفتند. توان تولید کل در بخش قبلی توضیح داده شد، کل هزینه نصب و راه اندازی به صورت زیر تعریف می شود:

$$cost_{tot} = N_t \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174 N_t^2}\right) \quad (۸)$$

که در آن N_t تعداد توربین نصب شده، با کاهش هزینه یک توربین که معادل عبارت داخل پرانتز در فرمول بالا، موجب افزایش N_t می گردد، که نشان دهنده تاثیر ملاحظات اقتصادی در تابع هدف می باشد و در نهایت تابع هدف مورد استفاده به شکل زیر می باشد:

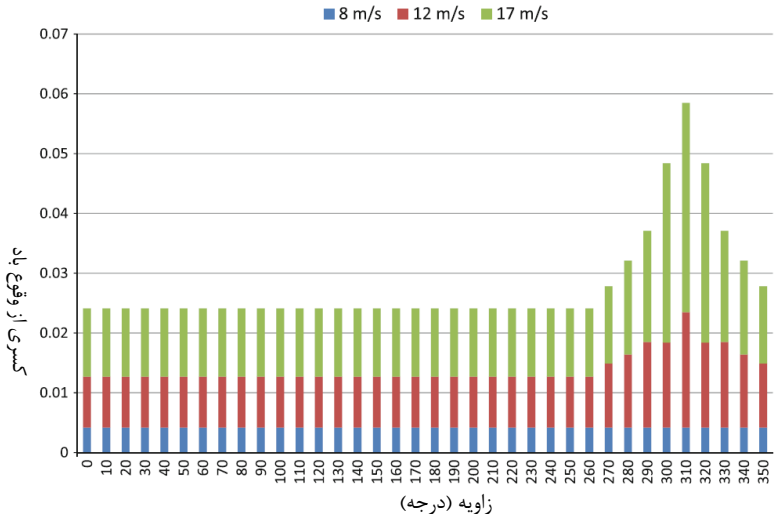
$$Obj_{MOS} = \frac{1}{P_{tot}} w_1 + \frac{cost_{tot}}{P_{tot}} w_2 \quad (۹)$$

که در آن وزن W_1 در مقایسه با W_2 کوچک نگه داشته شده است.

مازتی و همکاران از الگوریتم های ژنتیک با تعداد جمعیت ۲۰۰ نفر و ۴۰۰ تکرار استفاده کردند. آن ها سه مساله نمونه معرفی کردند: A، B و C. در A باد به طور مداوم از شمال با سرعت ۱۲ متر بر ثانیه می وزید؛ در B سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه و بطور یکنواخت در جهت ۳۶

زاویه توزیع شده است (هر بخش زاویه ی یکسان ۱۰ درجه عرض دارد) و در C وزش باد در سه سرعت ممکن مختلف (۸، ۱۲ و ۱۷ متر بر ثانیه) از یکی از ۳۶ جهت توصیف شده بالا می باشد. توزیع احتمال وقوع هر سرعت و جهت باد توصیف شده در شکل ۵ گزارش شده است. نتایج نشان داد که راه حل بدست آمده با الگوریتم ژنتیک مقادیر تابع هدف و بهره وری بالاتری نسبت به از راه حل های به دست آمده با نصب توربین در موقعیت های تصادفی دارد.

گریدی[1] و همکاران (۲۰۰۵) به بهینه کردن محل قرارگیری توربین برای دست‌یابی به ماکزیمم ظرفیت تولید با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد توربین‌ها، پرداختند. گریدی با در نظر گرفتن همان سه فرض مازتی برای بهینه کردن انرژی خروجی کل، بازده، توان خروجی و تعداد توربین های هر پیکربندی به مطالعه پرداخت. وی در مطالعه ی خود به دنبال بررسی تاثیر الگوریتم ژنتیک در شناسایی بهینه کردن پیکربندی مطلوب بود. نتایج او درباره فرض اول، یعنی جهت و شدت ثابت، با نتایج مازتی در تضاد بود. وی احتمال داد که شاید مشکل تعداد نمونه های ناکافی برای همگرایی باشد. به طور خاص، آن ها نشان دادند که برای ۲۰ زیر گروه جمعیتی با ۳۰۰۰ تکرار می توان به راه حل های بهتری دست یافت.



شکل ۵ . توزیع باد در C، گزارش شده توسط مازتی و همکاران [٦]

امامی[2] و همکاران (۲۰۱۰) طرح تابع هدف جدیدی در الگوریتم ژنتیک را مطرح کردند. آن ها اجرای تنها یکبار الگوریتم ژنتیک را برای هر نمونه کافی دانستند؛ و با این کار کنترل بیشتری روی هزینه، توان و بازده‌ی مزرعه‌ی بادی داشتند. آن ها نیز با استفاده از سه فرض مازتی و گریدی، به بهینه سازی برازش، توان کل خروجی، بازده توان خروجی، تعداد توربین و ضریب تابع هدف برای هر پیکربندی پرداختند؛ که به نتایج موثرتر با بکارگیری تابع هدف و کدنویسی جدید با توجه به قابلیت ماتریسی نرم افزار متلب دست پیدا کردند. آن ها با استفاده از قابلیت ماتریسی این نرم‌افزار کروموزوم ماتریس دوتایی را جایگزین کروموزوم عددی دوتایی کردند. ضمناً با استفاده از تابع هدف جدید، هزینه‌ی ساخت‌وساز مزرعه‌ی بادی را کنترل کردند. در واقع گاهی محدودیت منابع مالی قابل توجه است، از این رو این تابع هدف با ضرایب

[1] Grady
[2] Alireza Emami

قابل تنظیم آن نیازمند ابزار برای حل مشکلات توربین بادی با هر محدودیت مالی است. در مطالعات قبلی و توابع هدفشان تنها پیکربندی توربین‌های بادی در یک مزرعه بادی را بدون در نظر گرفتن محدودیت هزینه منظور کردند.

مورا[1] نیز بهینه سازی توسط روش الگوریتم ژنتیک را برای طراحی مزرعه‌ی بادی استفاده کرد. ایده‌ی جدید او استفاده‌ی کروموزوم با اندازه‌های مختلف، بر خلاف اندازه‌ی ثابتی که در تحقیقات گذشته مورد استفاده قرار گرفته بود. دلیل وی برگرفته ازین واقعیت است که می‌توان از تعداد مختلف توربین‌ها برای هر راه حل استفاده کرد. در این تحقیق از روش بهینه سازی یک هدفه[2] و به منظور حداکثر کردن عملکرد اقتصادی ارزش فعلی خالص[3] برای حداکثر تعداد ژنراتورها استفاده شد. سه آزمون با شبکه بندی ۲۰×۲۰ در نظر گرفته می‌شود. دو مورد اول با در نظر گرفتن سرعت باد ثابت روی زمین است، و حالت سوم، سرعت باد مختلف در زمین پر از تپه فرض می‌شود. آزمایشات نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک توانایی سودآوری در این روش را دارد.

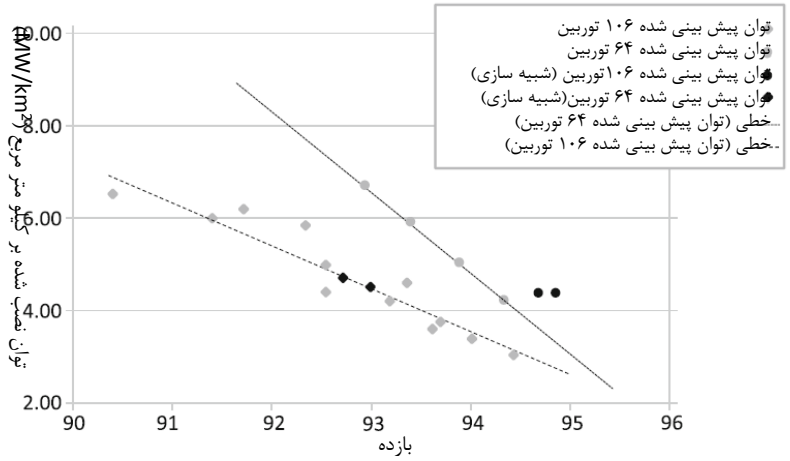
هونگ[4] از الگوریتم ژنتیک توزیع شده برای بهینه‌سازی تعداد و موقعیت توربین‌ها در یک مزرعه‌ی بادی استفاده کرد. الگوریتم ژنتیک توزیع شده، یک استراتژی قوی برای جستجوی بهینه‌ی جهانی است که توسط تقسیم بندی کردن مجموعه‌ی بزرگ به چند زیرمجموعه، هنگامی‌که یک مکانیزم تبادل ضمنی تعدادی فرد در بین زیرمجموعه‌ها بکار گرفته شود. هونگ از مدل ویک کتیک[5] استفاده کرد؛ مربع را به ۱۰۰ قسمت تقسیم‌بندی و مساحت سلول را 50D در نظر گرفت (به اندازه‌ی 50 برابر قطر روتور یک توربین بادی)، توربین در مرکز سلول واقع می‌شود. همان سه سناریو مازتی و گریدی برای شدت و جهت باد در نظر گرفته شده و موضوع به عنوان یک مسئله بهینه سازی یک هدفه فرمول نویسی شد که در آن هدف حداکثر کردن سود سالیانه از مزرعه‌ی بادی بود.

همه روش های مبتنی بر GA یک ضعف مشترک دارند: فضای راه حل گسسته است. به عبارت دیگر، مجموعه ای موقعیت از پیش تعریف شده – مراکز سلول ها– که زیر مجموعه باید به عنوان موقعیت نصب و راه اندازی توربین های انتخاب شود وجود دارد.

ریواس[6] و همکاران، از یک روش (SA) [7](اضافه کردن، حذف، انتقال) استفاده کردند. آن ها به منظور ارزیابی کیفیت راه حل خود اقدام به مقایسه آن با کیفیت راه حل های به دست آمده از قاعده کلی کردند. آن ها دو مساله مختلف بررسی را کردند که شامل یکی نصب ۱۰۶ توربین ۳ مگاواتی و دیگری نصب ۶۴ توربین ۵ مگاواتی بود. توان کل برای دو مساله یکسان بود. هر مساله باشرایط جغرافیایی یکسان مزرعه و تراکم از پیش تعریف شده حل شد. آن ها این دو مساله را برای همه مناطق سایت با استفاده از روش ارائه شده و قاعده کلی حل کردند. شکل ۶ خلاصه ی گزارش بازده به دست آمده برای هر دو مساله در مناطق سایت را نشان می دهد. نقاط روشن نشان دهنده نتایج به دست آمده توسط قاعده کلی، در حالی که نقاط تیره نتایج به دست آمده توسط شبیه سازی را نشان می دهد، در هنگام استفاده از قاعده کلی برای حل مشکل (۱۰۶ یا ۶۴ توربین)، اگر مساحت منطقه افزایش یابد، بازده مزرعه بادی نیز افزایش می یابد. این روند با دو خط در

[1] Mora
[2] Single objective optimization (SOO)
[3] Net present value (NPV)
[4] Huang
[5] Katic’s wake
[6] . Rivas
[7] . simulated annealing

شکل ۶ مشخص شده است. باتوجه به شکل بهره وری توان در استفاده از توربین های کمتر و بزرگ تر مشهودتر است (به عنوان مثال ۶۴ توربین ۵ مگاواتی).



شکل ٦ . تاثیر مساحت مزرعه و تعداد توربین بر بازدهی (ریواس و همکاران).

در یک تحقیق صلواتی پور و همکاران(۲۰۱۳) تلفیقی از روش های CFD [1] و BEM [2] را برای شبیه سازی میدان جریان برای روتور توربین بادی برای پیش بینی عملکردهای آیرودینامیکی نظیر منحنی توان و نیرو و مومنتوم وارده بر پره روتور استفاده کردند که در ساختار و یا طراحی آیروالاستیک مهم هستند. این تحقیق به طور قابل توجهی زمان و حافظه کامپیوتری کمتری از روش شبیه سازی سه بعدی روتور توربین بادی با روش محض CFD می گیرد، در حالیکه بطور مطلوبی دقیق می باشد. کار ایشان از دو بخش تشکیل شده است: ۱- محاسبه ضرایب آیرودینامیک دو بعدی در چند مقطع در راستای طولی پره با استفاده از روش CFD. ۲- شبیه سازی سه بعدی میدان جریان سراسر روتور توربین بادی با استفاده از تکنیک BEM. برای اعتبار سنجی این تحقیق، آزمایشات ترکیبی توربین بادی محور افقی فاز ۲ استفاده شده است. مقایسه های ایشان نشان دادند که تلفیق روش های CFD و BEM بسیار سریع تر از روش محض CFD جواب دادند در حالی که دارای دقت کافی برای به کار گیری در روش های مهندسی بودند.

عبدالسلام و همکاران (۲۰۱۴) مشخصات ویک توربین بادی محور افقی را با هر دو روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داده اند. حل عددی کامپیوتری به صورت فول روتور انجام شده و با استفاده از حلگر ناویر-استوکس و با به کارگیری مدل K-ε برای جریان اتمسفریک متناسب شده است. آزمایش ها برای یک توربین بادی دو مگاوات، که برای اندازه گیری جریان بالادست پروفیل سرعت باد با استفاده از روش صوتی [3] و برای پروفیل جریان ویک با استفاده از روش نوری [4] در فواصل متفاوت در جریان پایین دست توربین بادی، انجام گرفته اند. اعتبار سنجی روش کامپیوتری توسط مقایسه سرعت های پیش بینی شده و اندازه گیری شده در جریان پایین دست (با سرعت های بالادست

[1] . Computational Fluid Dynamics
[2] . Block Element Modifier
[3] SODAR
[4] LIDAR

متفاوت) انجام شده است. با به کار گیری مدل مذکور برای حل عددی و با حل مش بندی کامل، روتور تطابق خوبی با اندازه گیری ها نمایش داده است. مدل برای پیدا کردن رابطه بین سرعت باد و ریکاوری ویک استفاده شده است.

همچنین برای پروسه بهینه کردن مزرعه بادی، معمولا یک روش خطی ساده برای تعیین اثر ویک توربین بادی در پایین دست جریان مورد توجه می باشد. در این مدل، سرعت ویک به عنوان تابعی از شاخص محوری[1] توربین محاسبه شده و مقدار شاخص ۰/۳۲۴ لحاظ می شود. در حالی که این شاخص تابعی از هندسه پره و شرایط عملکرد می باشد. در یک تحقیق (قدیریان و همکاران۲۰۱۴) یک مدل جدید معرفی کرده اند که شاخص محوری برای توربین بادی بر اساس روش تئوری BEM محاسبه می شود. توسط این روش، اثر پروفیل پره، سرعت باد و سرعت زاویه ای توربین بادی در شاخص محوری می تواند به سهولت لحاظ شود. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که برای پروفیل پره و شرایط کاری متفاوت، شاخص تغییرات زیادی دارد و این تفاوت اثرات خیلی مهمی در توان محاسبه شده از یک توربین بادی دارد. توجه به روش جدید برای محاسبه شاخص مناسب بر روی کل توان تولید شده در مزرعه بادی موثر بوده و بر پروسه بهینه کردن نقشه مزرعه اثر گذار است.

در صورتی که اطلاعات واقعی به طور کامل در دست نباشد می توان از نرم افزارهای مرتبط مانندWAsP برای مدل سازی باد و تخمین سرعت و جهت باد استفاده کرد. این مشکل تنها فنی نیستند بلکه ناشی از فقدان انتشار آثار چگونگی پیاده سازی می باشد. بسته های نرم افزاری مانند ©WaSP، که می تواند مقدار تابع هدف را با در نظر گرفتن عناصر توپوگرافی خشکی محاسبه کند وجود دارد. ©WaSP یک برنامه طراحی با کمک کامپیوتر به منظور استفاده به صورت دستی در طراحی مزارع بادی است. کاربر ©WaSP توزیع باد، نوع توربین، اطلاعات مربوط به منطقه (که عبارتند از: وجود عناصر طبیعی) و موقعیت توربین را تعریف می کند. سپس برنامه محاسبات مورد انتظار را با در نظر گرفتن تمام ورودی ها انجام می دهد. جزئیات اجرای برنامه در وب سایت برنامه[2] در دسترس است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی به عنوات یک مساله بسیار مهم طراحی مزرعه بادی توصیف شد. پیدا کردن یک طرح بهتر منجر به تولید انرژی و سود بیشتر خواهد شد. بهینه سازی چیدمان مزارع بادی یک مسئله پیچیده است که نیاز به بهینه سازی یک یا چند هدف طراحی مانند هزینه، توان تولیدی و غیره دارد. بر اساس مطالعات ارائه شده در این مقاله، الگوریتم های غیر قطعی تکراری مانند الگوریتم ژنتیک، تکامل دیفرانسیل، بهینه سازی ازدحام ذرات، برخی از روش های مناسب برای حل مشکل چیدمان مزارع بادی می باشند. با این حال، هنوز بسیاری از مسائل مانند: ساخت توابع هدف کارآمد تر و واقع بینانه تر، استفاده از روش بهینه سازی چند هدفه کارآمد تر، توجه بیشتر به توسعه الگوریتم های بهره وری، قرار دادن تمرکز بیشتر بر روی مطالعات تطبیقی الگوریتم و همچنین طبیعت غیر قطعی الگوریتم ها نیاز به بررسی بیشتر دارد.

[1] Induction factor
[2] . http://www.wasp.dk

برای چیدمان بهینه توربین ها در یک مزرعه بادی عوامل گوناگونی از جمله اثر ویک و هزینه توربین ها بایستی در نظر گرفته شود. کارهایی که تا به امروز انجام شده است شروع خوبی برای انجام تحقیقات بیشتر در مورد راه حل موثرتر است، اما آن ها به چند دلیل نمی توانند رضایت بخش باشند. اول اینکه، هیچ کدام از راه حل های پیشنهاد شده قادر به ارزیابی کیفیت نیستند. به عبارت دیگر، روش های موجود در محاسبه توان تولیدی محدود بالایی را تخمین می زنند. الگوریتم های ارائه شده احتمالا یک راه حل خوب هستند، اما هیچ یک از آن ها نمی توانند میزان فاصله بهینه را نشان دهند. دوم، الگوریتم های پیشنهادی اکتشافی هستند.

یکی از جنبه های که باید در نظر گرفته شود توپوگرافی منطقه برای محاسبه سرعت باد و اثرات ویک است. در آثار موجود معمولا یک منطقه مسطح در نظر گرفته شده و فرض بر این بوده که توزیع باد در سراسر سایت یکسان است. فرض منطقه مسطح برای سایت های دریایی صادق بوده، اما برای سایت های خشکی، که در آن زمین به ندرت صاف و یکنواخت است، غیره واقعی می باشد. وجود تپه، رودخانه، جنگل، جاده و ساختمان ها به طور قابل توجهی اثرات توزیع باد و رفتار ویک را تغییر می دهد. همه این عناصر تاکنون در نظر گرفته نشده است. یکی از دلایل نادیده گرفتن آن ها این است که پیاده سازی یک تابع هدف با در نظر گرفتن این اطلاعات سخت است.

٦. منابع

صلواتی پور، ع. ۱۳۹۰. شبیه سازی عددی رژیم های مختلف جریان حول توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی V-47 با در نظر گرفتن اثرات لایه مرزی زمین. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.

Abdelsalam, A.M., Boopathi, K., Gomathinayagam, S., Kumar, S.S.H.K., Ramalingam, V., 2014. Experimental and numerical studies on the wake behavior of a horizontal axis windturbine. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 128(2014)54–65

El-shimy., Optimal site matching of wind turbine generator: case study of the Gulf of Suez region in Egypt, renewable energy ,vol.35, pp. 1870-1878, 2010

Emami. A, P. Noghreh. New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. Renewable Energy 35 (2010) 1559-1564

Frehlich R, Kelley N (2010) Applications of scanning Doppler Lidar for the wind energy industry. The 90th American meteorological society annual meeting. Atlanta, GA

Grady SA, Hussaini MY, abdullah MM. Placement of wind turbines using genetic algorithms. Renew Energy 2005;30:259-70

Huang H.distributed genetic algorithm for optimization of wind farm annual profits. In:proceeding of the IEEE international conference intelligence system applied to power systems;2007.p. 1-6

Jensen NO (1983) A note on wind generator interaction. Risø DTU national laboratory forsustainable energy

Mora J, Baron J, Santos J, Payan M. An evolution algorithm for wind farm optimal design. Neurocomputing 2007;70:2651-8

Mosetti G, Poloni C, Diviacco B, Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm. J wind Eng Ind Aerodyn 1994;51(1):105-116

Rivas RA, Clausen J, Hansen KS et al (2009) Solving the turbine positioning problem forlarge offshore wind farms by simulated annealing. Wind Eng 33:287–297

Vermeer LJ, Sørensen JN, Crespo A (2003) Wind turbine ویک aerodynamics. Prog AerospSci 39:467–510

www.suna.org.ir