

بررسی چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی جهت افزایش توان تولیدی مزرعه بادی به کمک یک مدل تحلیلی

پیمان اسد ایوبی^۱، محمد افتخاری یزدی^{۲*} و ایرج هرسینی^۳

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>روش‌های بهره‌برداری حداکثری از پتانسیل‌های مزارع بادی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها و استفاده از توربین‌های بادی با ارتفاع هاب متفاوت. بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها در مزارع عموماً با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود. از معایب این الگوریتم‌ها عدم امکان ارائه یک جواب مشخص به عنوان بهینه‌ترین جواب است. در این پژوهش، با استفاده از یک مدل تحلیلی برای توزیع سه بعدی سرعت جریان باد در ناحیه یک و با در نظر گرفتن برهمکنش چند ویک روی یکدیگر، مدلی جهت تخمین توان تولیدی توربین‌ها در مزارع ارائه شده است. با ادغام این مدل با مدل هزینه‌های جانمایی توربین‌ها، تابعی برای چیدمان بهینه توربین‌ها ارائه شده است. با محاسبه این تابع برای حالت‌های مختلف چیدمان توربین‌ها در مزارع بادی، چیدمان بهینه توربین‌ها قابل محاسبه است. در پژوهش حاضر، محاسبه چیدمان بهینه توربین‌ها با استفاده از یک کد در نرم افزار متلب انجام شده است. با شبکه‌بندی فضای حل و با در نظر گرفتن حداقل فاصله بهینه جانمایی توربین‌ها از بعد اقتصادی و انرژی تولید شده، مقدار تابع بهینه چیدمان توربین‌ها برای حالت‌های مختلف چیدمان محاسبه شده است. در انتها، چیدمان توربین‌های کیلوواتی میان توربین‌های مگاواتی مزرعه بادی Rev Horns برای افزایش توان تولیدی این مزرعه مدل‌سازی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از چیدمان بهینه (به ازای ۱۵ توربین) و حداکثری (به ازای ۲۶ توربین) توربین‌های کیلوواتی، توان تولیدی مزرعه به ترتیب ۷٪ (۳/۲۲۶ مگاوات) با راندمان ۳۵/۷۰٪ و ۹/۳۵٪ (۴/۷۱۲ مگاوات) با راندمان ۳۴/۰۶٪ افزایش یافته است.</p>	<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹</p> <p>واژگان کلیدی: انرژی‌های تجدید پذیر، بهینه‌سازی چیدمان توربین- های بادی، مدل‌سازی تحلیلی، افزایش توان تولیدی مزرعه بادی.</p>

۱-مقدمه

بیشتری در آن ایجاد می‌شود. این جریان آشفته باد انرژی کمتری در مقایسه با حالت پیش از برخورد با روتور توربین داشته و ناحیه‌ای در پشت توربین ایجاد می‌کند که به نام ویک شناخته می‌شود. سرعت کم جریان باد و شدت بالای آشفته‌گی دو ویژگی مهم ویک هستند که سبب می‌شوند چگونگی قرار گرفتن توربین‌های باد در ناحیه ویک در مزارع بادی از اهمیت بسزایی برخوردار باشد [۴]. این از آن رو

امروزه استفاده از انرژی باد با توجه به مزیت اقتصادی و زیست محیطی آن در تأمین انرژی مورد نیاز، با افزایش چشمگیری همراه بوده [۱] تا حدی که بیشترین رشد را در میان سایر منابع تجدیدپذیر انرژی به خود اختصاص داده است [۲، ۳]. جریان باد در برخورد با روتور توربین باد مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد و آشفته‌گی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: moh.eftekhari_yazdi@iauctb.ac.ir

۱. کاندیدای دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

است که اثرات و یک می‌تواند انرژی تولیدی را در حالت چیدمان ایده آل تا ۲۰٪ [۵، ۶] و برای حالت چیدمان غیر بهینه توربین‌ها تا ۷۰٪ [۷] کاهش داده و بر طول عمر و خستگی توربین‌های بادی تأثیر گذار باشد [۸-۱۱]. لذا بررسی دقیق و یک در تعیین چیدمان بهینه توربین‌ها، تخمین توان تولیدی مزارع بادی، تأثیرات مزارع بادی بر محیط زیست و بهینه‌سازی بخش کنترل توربین‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند [۱۲-۱۷].

به طور کلی و یک توربین‌های بادی را می‌توان با سه روش عددی، تجربی و تحلیلی بررسی نمود [۴، ۱۸-۲۲]. روش‌های عددی در بررسی و یک توربین‌های بادی از دقت بالایی برخوردار هستند ولی از نقطه نظر محاسباتی و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات هزینه‌بر محسوب می‌شوند. لذا به سبب هزینه بالای روش‌های عددی، از این روش‌ها در مباحث مربوط به بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها در مزارع بادی استفاده نمی‌شود، زیرا در حل چنین مسائلی لازم است حالات کثیری از چیدمان توربین‌ها مورد تحلیل قرار گیرند [۷، ۲۰]. روش تجربی یکی دیگر از روش‌های بررسی ناحیه و یک می‌باشد و به کمک آن می‌توان و یک ایجاد شده در پشت یک (و یا در مواردی چند) توربین باد را مورد بررسی قرار داد. با این وجود، استفاده از این روش نیز به دلیل محدودیت پیاده‌سازی در مزارع بادی و بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها محدود می‌باشد [۱۰، ۲۰]. در روش‌های تحلیلی بررسی ناحیه و یک، با استفاده از مفاهیم و معادلات پایه‌ای می‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت [۱۰، ۲۰]. نتایج به دست آمده از بررسی تحلیلی و یک توربین‌های بادی در تحلیل و طراحی مزارع بادی کاربردی بوده [۲۳] و به حدی دقیق و قابل قبول هستند که بسیاری از نرم افزارهای تجاری مانند Wasp، WindPRO، WindFarmer و OpenWind از مدل‌های تحلیلی جهت حل مسائل استفاده می‌کنند [۲۲]. همچنین مدل‌های تحلیلی و یک به طور عمومی قابل استفاده برای انواع توربین‌های بادی محور افقی می‌باشند، در صورتی که مدل‌های عددی و تجربی برای هر توربین باد منحصر به فرد بوده و با توجه به ابعاد هندسی هر توربین مدل‌سازی می‌شوند. با توجه به مزیت استفاده از روش تحلیلی در مدل‌سازی و یک توربین باد و بررسی مزارع بادی، این روش در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

با بررسی پژوهش‌های انجام شده عموماً دو روش برای

کاهش تأثیرات و یک بر روی عملکرد توربین‌ها و افزایش توان تولیدی توربین‌ها در مزارع ارائه شده است. روش اول استفاده از چیدمان توربین‌ها با ارتفاع هاب متفاوت در مزارع است که به کمک آن می‌توان انرژی تولیدی کل مزرعه را افزایش داد [۲۴]. روش دیگر، استفاده از چیدمان بهینه توربین‌ها در مزارع می‌باشد. هدف از این روش به حداقل رساندن نسبت هزینه‌ها به توان تولیدی توربین‌ها در یک مزرعه بادی بوده که تابعی از فواصل چیدمان توربین‌ها از یکدیگر می‌باشد. غالباً در مدل‌سازی توان تولیدی توربین‌ها جهت بهینه‌سازی چیدمان آن‌ها از مدل تحلیلی یک بعدی جنسن در مدل‌سازی و یک استفاده شده است [۲۵] (برای مثال در مراجع [۱۲، ۱۳، ۲۶، ۲۷]) تا معادلات حاکم ساده شده و با سهولت قابل حل باشند. امروزه مطالعات انجام شده بر روی توزیع سرعت در ناحیه و یک نشان می‌دهند که توزیع سرعت در این ناحیه به صورت یک بعدی نبوده و به صورت سه بعدی و بر اساس تابع گوسی می‌باشد [۲۲، ۲۳]. تعداد مطالعاتی که در آن‌ها از مدل تحلیلی گوسی و یک جهت بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها استفاده شده است اندک می‌باشد. برای مثال می‌توان به پژوهش ارائه شده در مرجع [۲۸] اشاره کرد که در آن ارتفاع هاب تمام توربین‌ها برابر می‌باشند. در بخشی دیگر از بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها، لازم است فواصل چیدمان توربین‌ها در مزارع بادی مشخص شود که این کار بیشتر با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی صورت گرفته است [۱۳، ۲۴، ۲۹-۳۲]. نقطه قوت الگوریتم‌های بهینه‌سازی سرعت بالای حل مسئله آن‌ها در مدت زمانی کوتاه است و نقطه ضعف آن‌ها عدم قابلیتشان در ارائه یک جواب به عنوان جواب بهینه است. به عبارتی دیگر، الگوریتم‌های بهینه‌سازی همواره مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه را ارائه می‌دهند [۳۱، ۳۳]. هدف از این پژوهش، بررسی چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی به منظور افزایش توان تولیدی مزارع بادی احداث شده بوده است. توربین‌های کیلوواتی ارتفاع هاب متفاوتی در مقایسه با توربین‌های مگاواتی دارند و لذا همان طور که پیش‌تر عنوان شد می‌توان توان تولیدی مزرعه را با استفاده از آن‌ها افزایش داد. برای انجام مدل‌سازی‌های مورد نیاز، بر خلاف روش‌های پیشین که از مدل خطی یک بعدی برای توزیع سرعت در ناحیه و یک استفاده کرده‌اند، از یک مدل تحلیلی بر پایه تابع گوسی برای توزیع سه بعدی سرعت در و یک استفاده شده است

نوشته شده است که با حل مدل تحلیلی سه بعدی ویک می‌تواند توان تولیدی توربین‌ها، تعیین فواصل چیدمان، هزینه‌های اولیه چیدمان توربین‌ها و حالت بهینه چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی را ارائه دهد.

۲-۱- مدل‌سازی تحلیلی سه بعدی ویک

برای محاسبه انرژی تولیدی توربین‌ها با در نظر گرفتن تأثیرات ویک، در ابتدا لازم است منحنی توزیع سرعت جریان باد به صورت سه بعدی $(u_{w,z,y,x})$ در مزرعه بادی محاسبه گردد. جهت محاسبه $u_{w,z,y,x}$ در مزرعه بادی، از مدل تحلیلی ویک ارائه شده در پژوهش قبلی [۳۴] استفاده شده است که در ادامه به صورت خلاصه بیان می‌گردد.

در مدل تحلیلی سه بعدی مورد استفاده، منحنی توزیع سه بعدی سرعت جریان باد $(u_{w,z,y,x})$ از رابطه (۱) محاسبه می‌شود که جهت حل رابطه (۱) ابتدا لازم است منحنی توزیع دو بعدی سرعت جریان باد در ارتفاع هاب توربین در فاصله x $(u_{w,r,x})$ محاسبه شود تا مقادیر مجهول f و C به دست آمده و در رابطه (۱) مورد استفاده قرار گیرند. $u_{w,r,x}$ به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود و حل آن در فاصله x با در نظر گرفتن شرایط مرزی حاکم (رابطه (۳))، معادله ممنتوم (رابطه (۴))، ضریب اصلاح شده رشد ویک که نرخ رشد قطر این ناحیه را مشخص می‌کند (رابطه (۵))، شدت آشفستگی ویک (رابطه (۶))، شعاع ناحیه ویک (رابطه (۷))، معادله بقا (رابطه (۸)) و رابطه (۹) و سرعت متوسط جریان باد در ویک (رابطه (۱۰)) انجام می‌شود (جهت اطلاعات بیشتر رجوع شود به [۳۴]).

$$u_{w,z,y,x} = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha - fe^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_h - z}{c} \right)^2} \quad (1)$$

$$u_{w,r,x} = u_\infty - fe^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{c} \right)^2} \quad (2)$$

$$f = 0.01 u_\infty e^{\frac{1}{2} \left(\frac{r_{w,x}}{c} \right)^2} \quad (3)$$

$$\int_{-r_{w,x}}^{+r_{w,x}} u_{w,r,x} dr = \int_{-r_{w,x}}^{+r_{w,x}} \left(u_\infty - fe^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{c} \right)^2} \right) dr \quad (4)$$

$$= 2 u_w \bar{r}_x r_{w,x}$$

$$k_{w,rev} = k_w \frac{I_{wake}}{I_\infty} \quad (5)$$

که شرح آن در پژوهش قبلی نویسندگان این مقاله آمده است [۳۴]. علاوه بر این در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن لایه مرزی سرعت جریان باد بر حسب ارتفاع از سطح زمین، ارتفاع توربین‌ها، شدت آشفستگی جریان باد و اثرات ناحیه ویک مد نظر قرار گرفته‌اند. با استفاده از مدل سه بعدی ویک، یک مدل برای تخمین توان تولیدی توربین‌ها در مزارع بادی ارائه شده است که با در نظر گرفتن اثرات ویک توربین‌های بالادست می‌تواند توان تولیدی توربین‌های پایین دست را محاسبه کند. به سبب ضعف الگوریتم‌های بهینه‌سازی، از آن‌ها برای تعیین چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی در پژوهش حاضر استفاده نشده است و بهینه‌ترین چیدمان برای توربین‌ها با شبکه‌بندی فضای حل و تعیین حداقل فاصله توربین‌ها از یکدیگر به دست آمده است. اعتبارسنجی مدل ارائه شده در زمینه تخمین انرژی تولیدی توربین‌ها با استفاده از داده‌های عددی، داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های خروجی از نرم افزار Flowstar و همچنین داده‌های حاصل از بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها در مزرعه بادی به کمک داده‌های تحلیلی حاصل از پژوهش‌های پیشین انجام گرفته است. پس از انجام اعتبارسنجی، چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی در مزرعه Horns Rev مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. تمامی محاسبات مربوط به انرژی تولیدی توربین‌ها و چیدمان بهینه توربین‌ها با کد نوشته شده در نرم افزار متلب انجام شده است.

۲- مدل‌سازی

در این بخش برای ارائه مدلی جهت تخمین انرژی تولیدی توربین‌ها در مزارع بادی، از یک مدل تحلیلی سه بعدی برای توزیع سرعت باد در ویک استفاده شده است. این مدل تحلیلی این قابلیت را دارد که با در نظر گرفتن تابع گوسی برای منحنی توزیع سرعت باد در ناحیه ویک، با دقت قابل قبولی منحنی توزیع سرعت جریان باد در ویک را محاسبه کند [۳۴]. در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از این مدل توزیع سرعت، مدلی جهت تخمین انرژی تولیدی توربین‌ها در مزارع بادی ارائه شده است. نحوه تعیین حداقل فواصل چیدمان توربین‌ها از یکدیگر و روش تعیین هزینه‌های اولیه چیدمان توربین‌های کیلوواتی نیز در قسمت مربوط به خود شرح داده شده‌اند. در انتها کد مربوطه در نرم افزار متلب

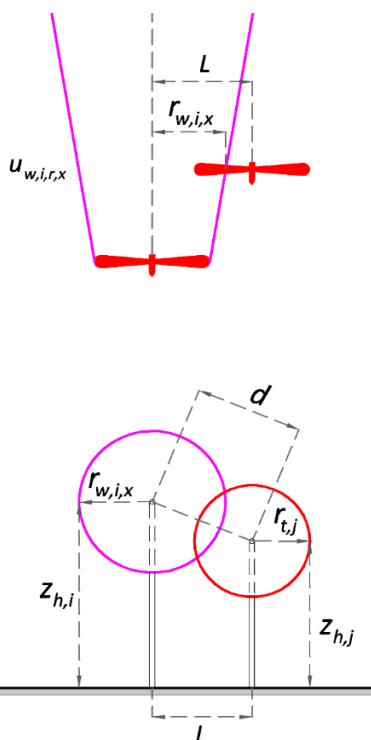
در یک مزرعه بادی، یک مدل سه بعدی جدید ارائه شده است که در آن از مقدار سرعت تأثیرگذار (u_{eff}) بر روی هاب توربین استفاده می‌شود. با مشخص شدن مقدار u_{eff} و مراجعه به منحنی توان تولیدی توربین بر حسب سرعت جریان باد، می‌توان تخمین مناسبی از توان تولیدی توربین‌ها با در نظر گرفتن اثرات ویک توربین‌های بالادستی در یک مزرعه بادی به دست آورد (شکل ۱). u_{eff} با در نظر گرفتن روش جذر مجموع مربعات (رابطه (۱۴)) به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$\left(1 - \frac{u_{eff}}{u_{\infty,z}}\right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\bar{u}_{i,j}}{u_{\infty,z}}\right)^2 \quad (15)$$

که در آن $\bar{u}_{i,j}$ عبارت است از میانگین سرعت باد روی هاب توربین پایین دست $\bar{u}_{i,j}$ با در نظر گرفتن اثرات ویک توربین بالادست $\bar{u}_{i,j}$ به کمک رابطه (۱۶) و رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\bar{u}_{i,j} = \frac{\int_{d-r_{t,j}}^{d+r_{t,j}} u_{w,i,z,y,x} \cdot dr}{2r_{t,j}} \quad (16)$$

$$d = \sqrt{L^2 + (z_{h,i} - z_{h,j})^2} \quad (17)$$



شکل ۱- نحوه تخمین توان تولیدی توربین‌ها با در نظر گرفتن ویک توربین‌های بالادست

$$I_{wake} = \left((k_n \frac{C_T}{x/d_t})^{3/4} + I_{\infty}^{3/4} \right)^{4/3} \quad (6)$$

$$k_n = 0.4$$

$$r_{w,x} = k_{w,rev} x + r_{w,0} \quad (7)$$

$$r_{w,0} = r_t \left(\frac{u_{\infty}}{u_{w,0}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$\left(\frac{u_{\infty}}{u_{w,0}} \right)^{0.5} = (1 - C_p)^{-0.25} \quad (9)$$

$$u_{w,\bar{r},x} = u_{\infty} \left(1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{(1 + k_{w,rev} x / r_{w,x})^2} \right) \quad (10)$$

مدل ارائه شده در رابطه (۱) برای ویک حاصل از یک توربین قابل استفاده می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثرات حاصل از برهمکنش چند ویک روی یکدیگر، چهار روش جمع هندسی (رابطه (۱۱))، سوپروپوزیشن خطی (رابطه (۱۲))، انرژی تعادل (رابطه (۱۳)) و جذر مجموع مربعات (رابطه (۱۴)) ارائه شده است [۳۵] که در این روابط $u_{w,i,z,y,x}$ منحنی توزیع سه بعدی سرعت جریان باد توربین بالادستی $\bar{u}_{i,j}$ در فواصل x ، y و z می‌باشد. بر اساس پژوهش انجام شده توسط تیان و همکاران [۱۹] روش جذر مجموع مربعات (رابطه (۱۴)) دارای بیشترین دقت محاسباتی می‌باشد. لذا این مدل برای در نظر گرفتن اثرات حاصل از برهمکنش چند ویک روی یکدیگر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\frac{u}{u_{\infty,z}} = \prod_{i=1}^n \frac{u_{w,i,z,y,x}}{u_{\infty,z}} \quad (11)$$

$$1 - \frac{u}{u_{\infty,z}} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{u_{w,i,z,y,x}}{u_{\infty,z}} \right) \quad (12)$$

$$u_{\infty,z}^2 - u^2 = \sum_{i=1}^n (u_{\infty,z}^2 - u_{w,i,z,y,x}^2) \quad (13)$$

$$\left(1 - \frac{u}{u_{\infty,z}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{u_{w,i,z,y,x}}{u_{\infty,z}} \right)^2 \quad (14)$$

۲-۲- تخمین توان تولیدی مزرعه بادی با ارتفاع متفاوت هاب توربین‌ها

برای تخمین توان تولیدی توربین‌ها با ارتفاع هاب متفاوت

(۱۸) تعریف می‌شود که بدون بعد و مستقل از ابعاد و توان تولیدی توربین می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر از این مدل جهت مدل‌سازی هزینه‌های جانمایی توربین‌های کیلوواتی به صورت زیر استفاده شده است:

$$(18) \quad \text{هزینه های اولیه} = N \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174 N^2} \right)$$

که در رابطه فوق N برابر است با تعداد کل توربین‌ها. بر اساس رابطه (۱۸)، اگر تعداد زیادی توربین در مزرعه مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان هزینه هر توربین را تا میزان حداکثر یک سوم کاهش داد [۱۲، ۱۳]. در پژوهش حاضر، در قسمت بهینه‌سازی چیدمان توربین‌های کیلوواتی میان توربین‌های مگاواتی یک مزرعه، تنها هزینه چیدمان توربین‌های کیلوواتی در بهینه‌سازی مد نظر می‌باشد چرا که پیش‌تر توربین‌های مگاواتی در مزرعه جانمایی و احداث شده‌اند. لذا هزینه‌ها در مدل‌سازی تنها برای یک نوع توربین (توربین کیلوواتی) مدل شده‌اند.

مدل‌سازی تابع چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی به صورت نسبت هزینه‌های اولیه به انرژی تولیدی (رابطه ۱۹) به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۵]:

$$(19) \quad \text{هزینه های اولیه} = \frac{\text{هزینه های اولیه}}{\text{انرژی تولیدی}} = \text{تابع چیدمان بهینه}$$

بهینه‌ترین حالت چیدمان توربین‌ها در یک مزرعه بادی زمانی رخ می‌دهد که مقدار مینیمم تابع بهینه در رابطه (۱۹) در بین چیدمان‌های مورد بررسی به دست آید.

۲-۵- کدنویسی

برای انجام محاسبات، کد مربوطه در نرم افزار متلب نوشته شده است. این کد مشخصات جریان باد، مشخصات ابعادی و عملکردی توربین‌ها، مختصات چیدمان توربین‌ها، سختی سطح زمین مزرعه و ابعاد مزرعه را به عنوان اطلاعات اولیه دریافت می‌کند و سپس با انجام محاسبات لازم، نحوه چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی را به همراه توان تولیدی توربین‌ها ارائه می‌دهد. به منظور تعیین محل بهینه چیدمان توربین‌های کیلوواتی در این مدل‌سازی، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نشده است و با تعیین محل‌های مجاز به قرار گیری توربین‌های کیلوواتی، مدل‌سازی به ازای تمام حالات ممکن انجام شده تا جواب بهینه به دست آید. مراحل مدل‌سازی در کد متلب

۲-۳- مدل‌سازی چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی

طبق یک رابطه کلی، فواصل چیدمان توربین‌ها از یکدیگر حداقل ۱/۵ برابر قطر روتور در جهت عمود بر جریان باد و حداقل ۸ برابر قطر روتور در جهت موازی با جریان باد (یعنی جهت موافق با جریان باد) در نظر گرفته می‌شود [۳۶]. لذا، در پژوهش حاضر از همین مقادیر برای حداقل فاصله اولیه چیدمان توربین‌های کیلوواتی از یکدیگر استفاده است. برای مدل‌سازی مزرعه، فضای مزرعه مورد نظر با سلول‌های مربعی شکل شبکه‌بندی شده است و سلول‌های مجاز به جانمایی توربین‌های کیلوواتی به نحوی تعیین شده‌اند که حداقل فاصله ۱/۵ و ۸ برابری قطر روتور توربین کیلوواتی را پوشش دهند تا توربین‌ها در هر نقطه‌ای از سلول‌های شبکه بدون نقض کردن حداقل فاصله مجاز قابل جانمایی باشند. در مرحله بعد، لازم است حداقل فاصله بهینه جانمایی توربین‌ها در بالادست و پایین‌دست یکدیگر در نظر گرفته شود.

حداقل فاصله بهینه در جانمایی توربین‌ها از نظر اقتصادی معادل ۸ تا ۱۲ برابر قطر روتور [۳۶] و از نظر انرژی تولیدی معادل بیش از ۱۰ برابر قطر روتور در نظر گرفته می‌شود [۳۷]. در پژوهش حاضر، مقدار ۱۰ برابر قطر روتور به منظور تعیین حداقل فاصله مجاز توربین‌های کیلوواتی و مگاواتی از یکدیگر در نظر گرفته شده است تا هر دو بعد اقتصادی و انرژی تولیدی لحاظ شده باشند (در این حالت بسته به اینکه توربین کیلوواتی در بالادست یا پایین‌دست توربین مگاواتی قرار می‌گیرد، قطر توربین کیلوواتی و یا مگاواتی مبنای فاصله گذاری قرار می‌گیرد). با در نظر گرفتن حداقل فاصله توربین‌های کیلوواتی و مگاواتی از یکدیگر، تعدادی از سلول‌های مزرعه که پیش‌تر مجاز به جانمایی توربین کیلوواتی در خود بوده‌اند حذف می‌شوند. نتیجه آنکه در نهایت تعداد سلول‌های مجاز به جانمایی توربین کیلوواتی کمتر می‌شود.

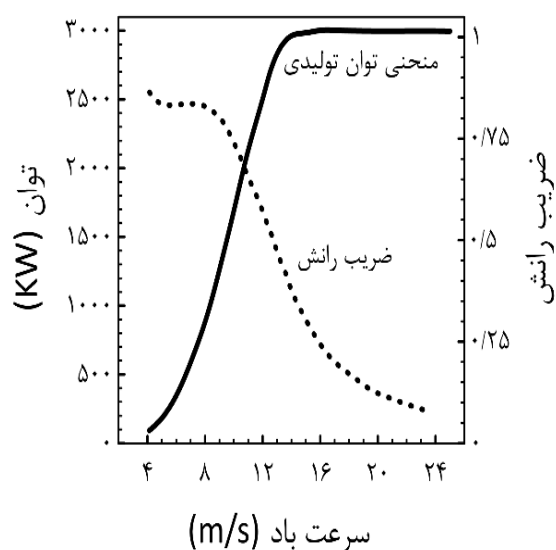
۲-۴- مدل‌سازی هزینه‌های جانمایی و بهینه توربین‌های کیلوواتی

جهت مدل‌سازی هزینه‌ها در مزرعه بادی، عموماً از مدل موزتی و همکاران [۳۲] در پژوهش‌ها استفاده می‌شود [۱۳، ۲۴، ۲۷، ۳۰، ۳۸-۴۴]. در این مدل، هزینه‌های اولیه بر حسب تعداد توربین‌های مورد استفاده به صورت رابطه

مرجع [۴۶، ۴۷] مورد مقایسه قرار گرفته است. در بخش دوم، توانایی مدل ارائه شده با داده‌های حاصل از یک پژوهش عددی به صورت LES که چیدمان توربین‌ها با ارتفاع برابر و متفاوت هاب را مورد مطالعه قرار داده [۴۸]، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۱-۱- نمونه ۱، ۲ و ۳ اعتبارسنجی: اندازه‌گیری میدانی در مزرعه بادی Noordzee

در نمونه ۱، ۲ و ۳ اعتبارسنجی، از اطلاعات میدانی به دست آمده از مزرعه Noordzee استفاده شده است. این مزرعه از نوع فراساحلی بوده و مجهز به ۳۶ توربین ۳ مگاواتی شرکت Vestas با ارتفاع و قطر روتور به ترتیب ۷۰ و ۹۰ متر می‌باشد. منحنی ضریب رانش (C_T) و توان تولیدی توربین‌های به کار رفته در این مزرعه در شکل (۳) نشان داده شده است. سایر خصوصیات جریان باد در جدول ۱ ارائه شده است (برای اطلاعات بیشتر رجوع شود به [۴۶، ۴۷]). آرایش توربین‌ها در مزرعه بادی در شکل (۴) نشان داده شده است. در مدل‌سازی این مزرعه، زاویه جریان باد برابر با 139° برای نمونه‌های اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- منحنی ضریب رانش و توان تولیدی توربین مورد استفاده در مزرعه بر حسب سرعت باد

جدول ۱- خلاصه خصوصیات توربین و مزرعه در اعتبارسنجی

اعتبارسنجی	u_∞ (ms ⁻¹)	α	I_∞	k_w
نمونه ۱	۱۰	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۵۶
نمونه ۲	۸	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۵۶
نمونه ۳	۶	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۵۶

در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- مراحل محاسبات در کد نوشته شده در متلب

۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

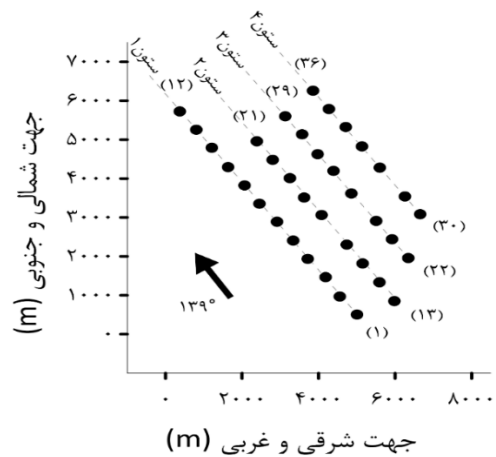
این قسمت از مقاله به بررسی و ارائه نتایج به دست آمده اختصاص یافته است. در بخش اول به ارزیابی مدل سه بعدی ارائه شده در تخمین توان تولیدی توربین‌ها در مزارع پرداخته شده است که برای این منظور از داده‌های میدانی، عددی و خروجی حاصل از یک نرم افزار استفاده شده است. در بخش دوم، با استفاده از داده‌های تحلیلی پژوهش‌های پیشین اقدام به ارزیابی توانایی کد نوشته شده و مدل ارائه شده در محاسبه چیدمان بهینه توربین‌ها در یک مزرعه بادی شده است. پس از اعتبارسنجی مدل و کد ارائه شده در دو بخش ابتدایی، در انتهای این قسمت (بخش سوم) با استفاده از مدل ارائه شده، بهینه‌سازی چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی در یک مزرعه انجام گرفته است.

۳-۱- تخمین توان تولیدی مزرعه بادی

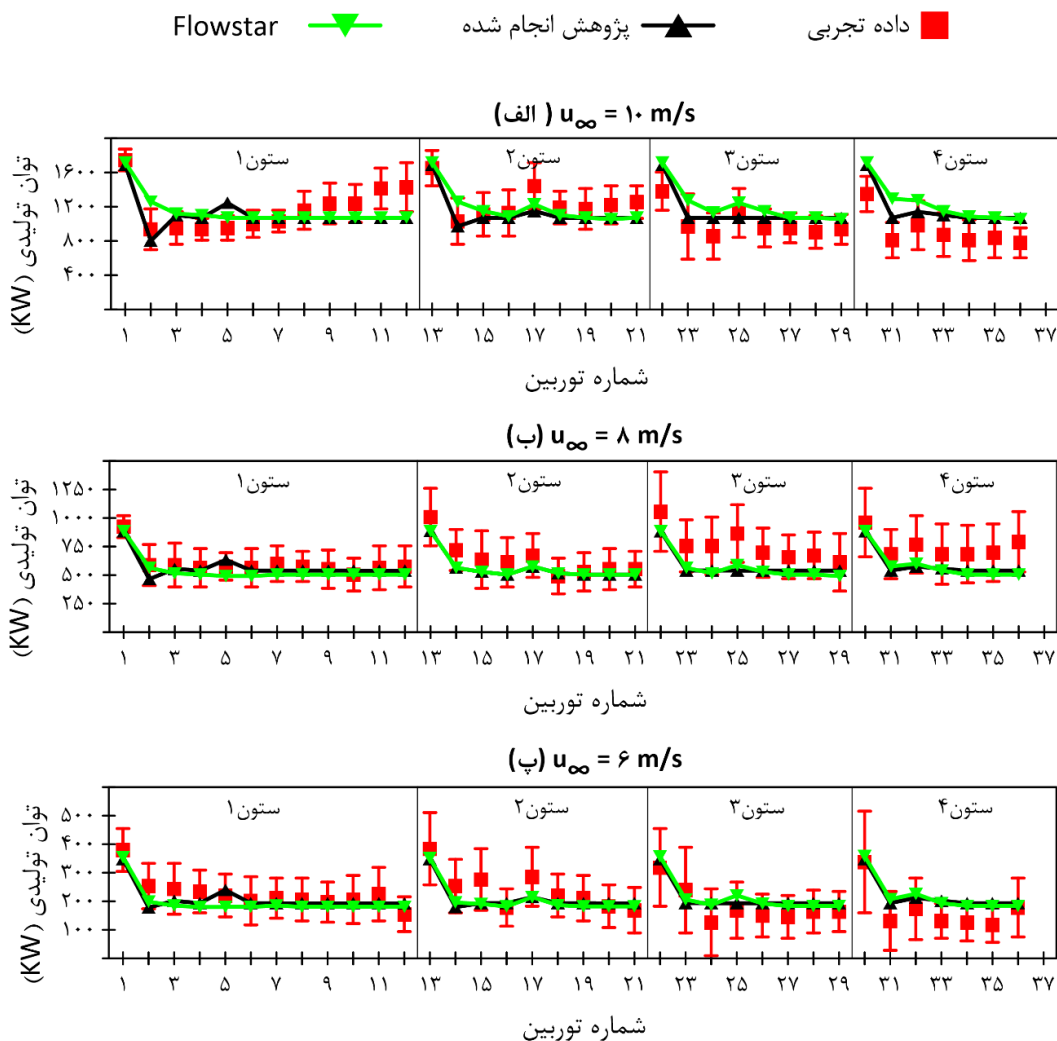
در بخش اول از این قسمت، توان تولیدی توربین‌های مزرعه بادی Noordzee که ارتفاع هاب برابری دارند، با استفاده از مدل ارائه شده محاسبه شده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از نرم افزار Flowstar و داده‌های میدانی

نتایج به دست آمده از مدل‌سازی نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ اعتبارسنجی به ترتیب در شکل (۵-الف)، شکل (۵-ب) و شکل (۵-پ) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۵) می‌توان این نتیجه را گرفت که نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی ارائه شده عمدتاً در بازه انحراف از معیار نقاط داده مرجع قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، بر اساس میانگین درصد خطای مطلق^۱ محاسبات انجام شده که در شکل (۶) نشان داده شده است، در حالت کلی خطای محاسباتی مدل ارائه شده کمتر از خطای محاسباتی نرم افزار Flowstar بوده است.



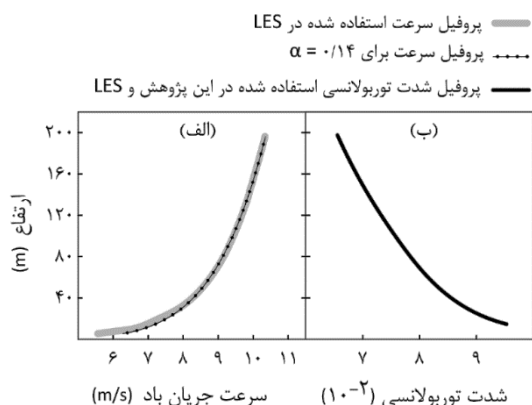
شکل ۴- آرایش توربین‌های مورد بررسی در مزرعه Noordzee برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ اعتبارسنجی. جهت جریان باد با پیکان در شکل نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه داده تجربی مرجع با نتایج حاصل از نرم افزار Flowstar و مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش برای نمونه‌های ۱ (الف) نمونه‌های ۲ و ۳ (ب) اعتبارسنجی. مقدار انحراف از معیار داده مرجع با خطوط عمودی در شکل نشان داده شده است.

¹ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

خصوصیات توربین و جریان باد در جدول ۲ ارائه شده است (برای اطلاعات بیشتر رجوع شود به [۱۹، ۴۸]).

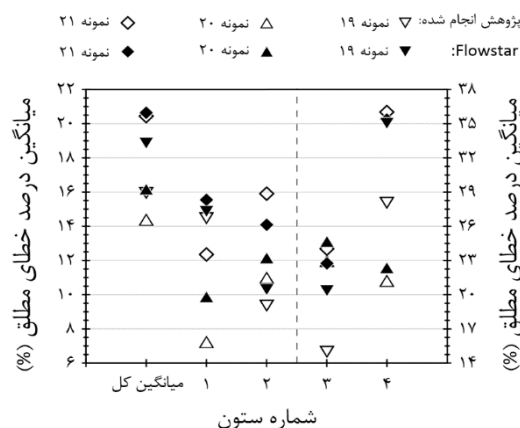


شکل ۸- مشخصات جریان باد در مدل‌سازی، (الف) منحنی سرعت و (ب) منحنی شدت آشفتگی

جدول ۲- خلاصه خصوصیات توربین و مزرعه در اعتبارسنجی

اعتبارسنجی	α	z_0	d_t (m)	z_h (m)
نمونه ۴	۰/۱۴	۰/۰۵	۸۰	۱۰۰
نمونه ۵	۰/۱۴	۰/۰۵	۸۰	۹۰
نمونه ۶	۰/۱۴	۰/۰۵	۸۰	۱۲۰
نمونه ۷	۰/۱۴	۰/۰۵	۸۰	۶۰
			۸۰	۱۴۰

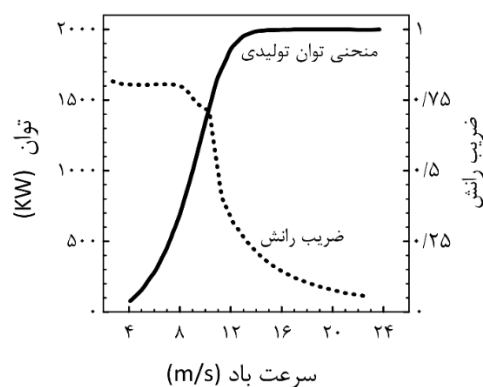
نتایج به دست آمده از مدل‌سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده است که در آن محور افقی بیانگر شماره ردیف توربین‌ها بوده و محور عمودی نشان دهنده توان نرمالایز می‌باشد (نسبت مجموع توان تولیدی تمام توربین‌های همان ردیف به مجموع توان تولیدی تمام توربین‌های ردیف اول در حالتی که ارتفاع توربین‌ها برابر باشد). بر اساس نتایج به دست آمده برای توربین‌های هم ارتفاع، مقدار نرخ تغییرات توان تولیدی در این توربین‌ها از ردیف دوم به بعد ناچیز بوده است. در نتایج به دست آمده از نمونه ۵ تا ۷ اعتبارسنجی که در آن‌ها ارتفاع توربین‌ها برابر نبوده است، همان طور که انتظار می‌رود توان تولیدی در هر ردیف با نوسانات همراه بوده است. از طرف دیگر به دلیل اینکه در نمونه ۵ تا ۷ اعتبارسنجی، توربین‌های ردیف اول ارتفاع بیشتری نسبت به توربین‌های ردیف اول در نمونه ۴ اعتبارسنجی دارند، لذا توان تولیدی توربین‌های ردیف اول در این سه نمونه بیشتر از توان تولیدی توربین‌های ردیف اول در نمونه ۴ اعتبارسنجی بوده و مقدار آن از ۱ بیشتر



شکل ۶- میانگین درصد خطای مطلق برای نتایج پژوهش انجام شده و نرم افزار Flowstar

۳-۱-۲- نمونه ۴، ۵، ۶ و ۷ اعتبارسنجی: داده‌های عددی مدل LES

در نمونه ۴ تا ۷ اعتبارسنجی، نتایج به دست آمده از نتایج یک مدل‌سازی عددی LES به عنوان مرجع مقایسه استفاده شده است [۴۸]. مهمترین ویژگی این مدل‌سازی عددی، مدل‌سازی مزرعه باد با ارتفاع هاب متفاوت در توربین‌ها می‌باشد که با توجه به موضوع پژوهش حاضر می‌تواند مرجع مناسبی جهت مقایسه مدل‌سازی تحلیلی صورت گرفته باشد. توربین‌های مدل شده از نوع Vestas- 80 2MW بوده که منحنی توان تولیدی و ضریب رانش آن بر حسب سرعت جریان باد در شکل (۷) نشان داده شده است.

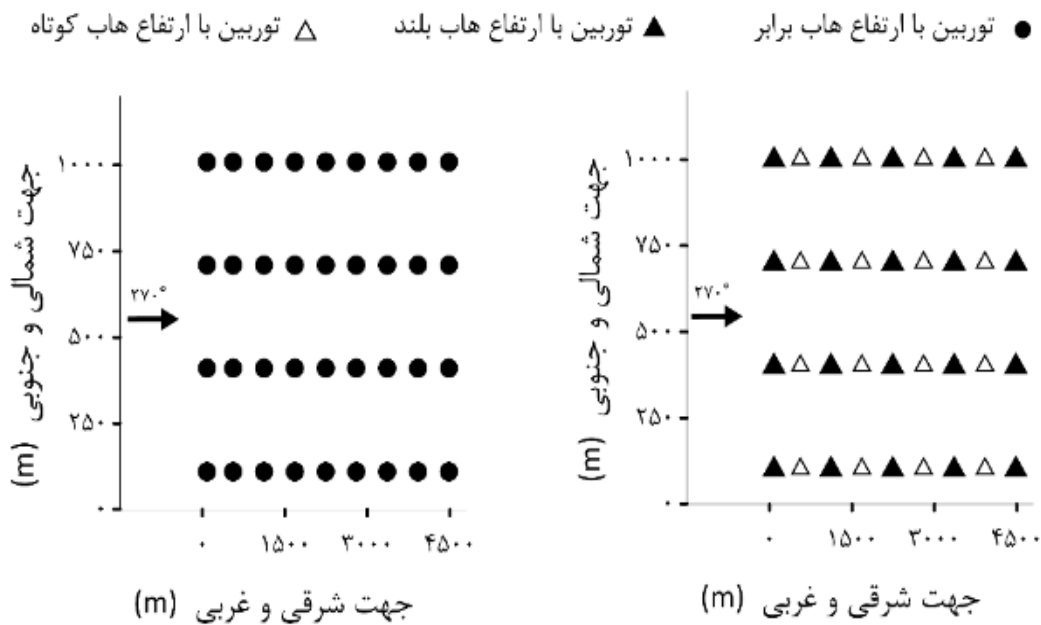


شکل ۷- منحنی ضریب رانش و توان تولیدی توربین مورد استفاده در مزرعه بر حسب سرعت باد

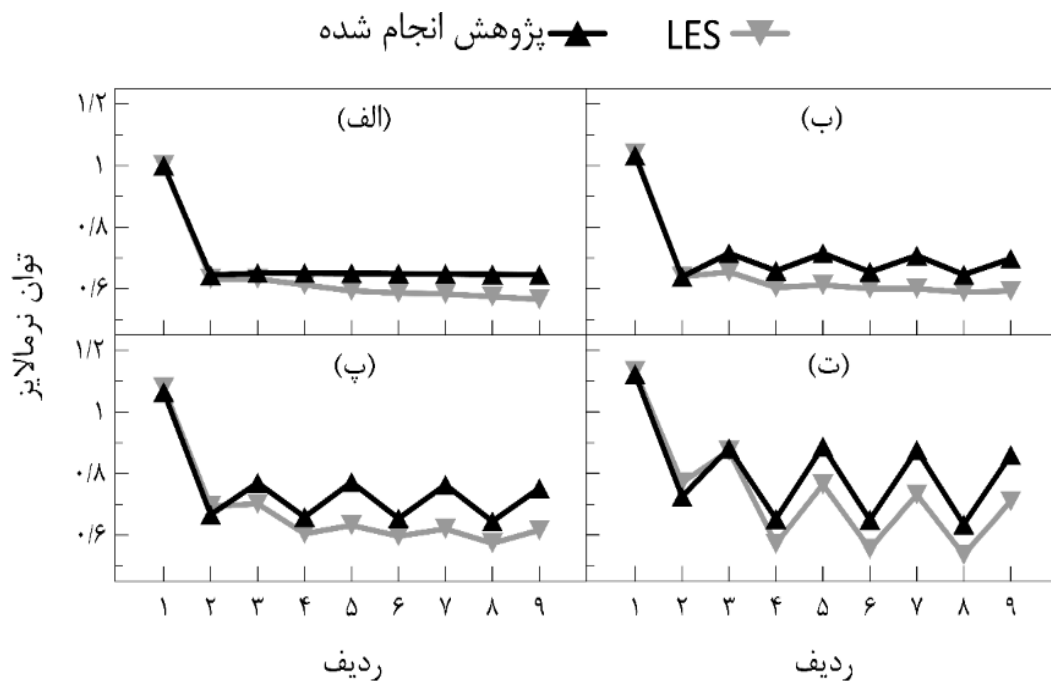
منحنی‌های مدل شده برای سرعت و شدت آشفتگی جریان آزاد باد در شکل (۸) و آرایش توربین‌ها در چهار نمونه ۴ تا ۷ اعتبارسنجی در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. در نمونه ۴ اعتبارسنجی، ارتفاع توربین‌ها ثابت بوده و در نمونه ۵ تا ۷ اعتبارسنجی ارتفاع هاب توربین‌ها متفاوت می‌باشد.

درصد خطای مطلق به ترتیب مربوط به نمونه ۴ و نمونه ۷ اعتبارسنجی بوده و مقادیر آن به ترتیب ۷/۷٪ و ۱۲/۷۵٪ برای نمونه‌های عنوان شده می‌باشد.

می‌باشد. میانگین درصد خطای مطلق محاسباتی برای مدل تحلیلی ارائه شده در مقایسه با داده‌های عددی در شکل (۱۱) ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقدار میانگین



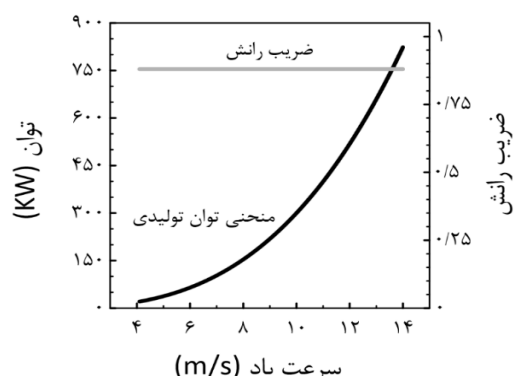
شکل ۹- آرایش توربین‌های مورد بررسی (شکل سمت چپ) نمونه ۴ اعتبارسنجی و (شکل سمت راست) نمونه ۵، ۶ و ۷ اعتبارسنجی. جهت جریان باد با پیکان در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نتایج به دست آمده از مدل عددی LES و مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش

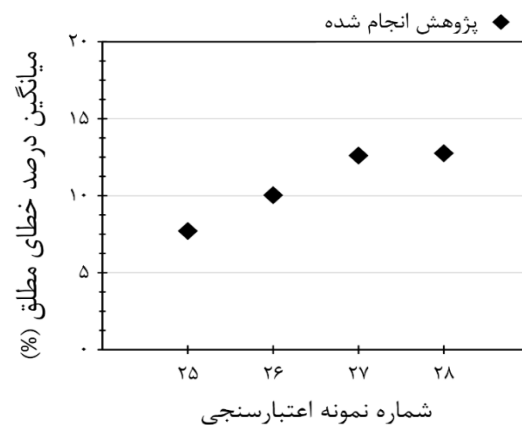
جدول ۳- خلاصه خصوصیات مزرعه در نمونه مورد بررسی

اعتبارسنجی	u_{∞} (m s ⁻¹)	I_{∞}	z_0
نمونه ۲۹	۱۲	۰/۰۸	۰/۳



شکل ۱۲- منحنی ضریب رانش و توان تولیدی توربین مورد استفاده در مزرعه بر حسب سرعت باد

بهینه‌سازی‌های انجام شده توسط گردی و همکاران و پارادا و همکاران در فواصل پنج برابری توربین‌ها از یک دیگر صورت گرفته است و نتایج یکسانی را در چیدمان بهینه توربین‌ها ارائه کرده‌اند که در شکل (۱۳-الف) نشان داده شده است. نسبت توان تولیدی در چیدمان بهینه توربین‌ها به توان کل مزرعه که به کمک مدل جنسن توسط گردی و همکاران و با استفاده از مدل گوسی توسط پارادا و همکاران محاسبه شده است، به ترتیب برابر با ۰/۹۲/۰۱ و ۰/۰۷/۰۹۵ می‌باشد (جدول ۴). همین چیدمان نیز در مدل توان تولیدی ارائه شده در این پژوهش وارد شده و این مدل نسبت توان تولیدی توربین‌ها به توان کل مزرعه را برابر با ۰/۹۴/۰۴ محاسبه نموده است. سپس به کمک مدل ارائه شده در این پژوهش چیدمان بهینه توربین‌ها در فاصله پنج برابری قطر روتور از یکدیگر محاسبه شده و همان چیدمان محاسبه شده در پژوهش‌های قبلی به دست آمده است (نتایج آن در شکل (۱۳-الف) نشان داده شده است). در این حالت، مدل ارائه شده در پژوهش حاضر نسبت توان تولیدی در چیدمان بهینه توربین‌ها به توان کل مزرعه را طبق انتظار برابر با ۰/۹۴/۰۴ محاسبه کرده است (طبق جدول ۴). بار دیگر چیدمان توربین‌ها بر اساس حداقل فاصله سه برابر قطر روتور به کمک مدل ارائه شده محاسبه گردیده است و چیدمان بهینه به دست آمده در شکل (۱۳-ب) نشان داده شده است. در این حالت، نسبت توان تولیدی در چیدمان بهینه توربین‌ها به توان کل مزرعه به کمک مدل ارائه شده برابر با ۰/۹۶/۰۶ محاسبه گردیده است (جدول ۴).



شکل ۱۱- میانگین درصد خطای مطلق برای نتایج پژوهش انجام شده

۳-۲- چیدمان بهینه توربین‌ها در مزرعه

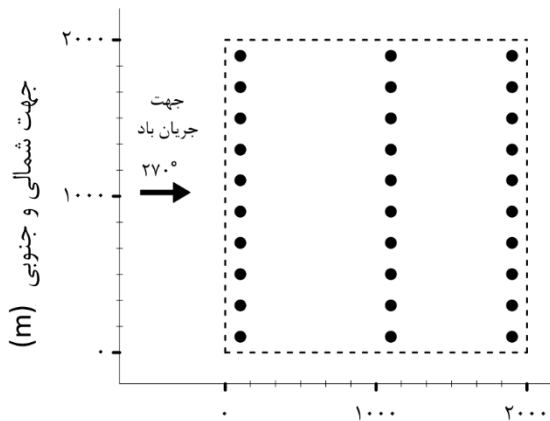
در این بخش، به منظور بررسی توانایی کد نوشته شده در انجام محاسبات بهینه‌سازی، چیدمان توربین‌ها در یک مزرعه مورد بهینه‌سازی قرار گرفته و نتایج به دست آمده با نتایج دو پژوهش گردی و همکاران [۲۶] و پارادا و همکاران [۲۸] مورد مقایسه قرار گرفته است. در پژوهش گردی و همکاران [۲۶]، ایشان با استفاده از مدل یک بعدی ویک ارائه شده توسط جنسن و الگوریتم ژنتیک اقدام به بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها در مزرعه نموده‌اند. در پژوهش پارادا و همکاران [۲۸]، ایشان با استفاده از مدل دو بعدی گوسی ارائه شده توسط باستانخواه و پورته آخل [۲۲] و با الگوریتم ژنتیک اقدام به بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها کرده‌اند.

در این مدل‌سازی، ابعاد مزرعه مورد نظر عبارت است از یک مربع به ابعاد ۲۰۰۰ متر در ۲۰۰۰ متر که در آن ۳۰ دستگاه توربین با ارتفاع ۶۰ متر و قطر ۴۰ متر جانمایی شده است. حداقل فواصل چیدمان توربین‌ها از یکدیگر در بهینه‌سازی‌های انجام شده توسط گردی و همکاران و پارادا و همکاران برابر با ۵ برابر قطر روتور بوده و لذا این فاصله نیز علاوه بر حداقل فاصله ۳ برابری قطر روتور به عنوان حداقل فواصل توربین‌ها از یکدیگر، مبنای چیدمان در پژوهش حاضر قرار گرفته است. مشخصات مزرعه و توربین مورد استفاده در جدول ۳ و شکل (۱۲) ارائه شده است. لازم به توضیح است که در محاسبات انجام شده مقدار C_T توربین باد به صورت ثابت برابر با ۰/۸۸ در نظر گرفته شده است تا مشابه با محاسبات گردی و همکاران و پارادا و همکاران بوده و نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده توسط ایشان قابل مقایسه باشد.

جدول ۴- خلاصه نتایج به دست آمده در بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها

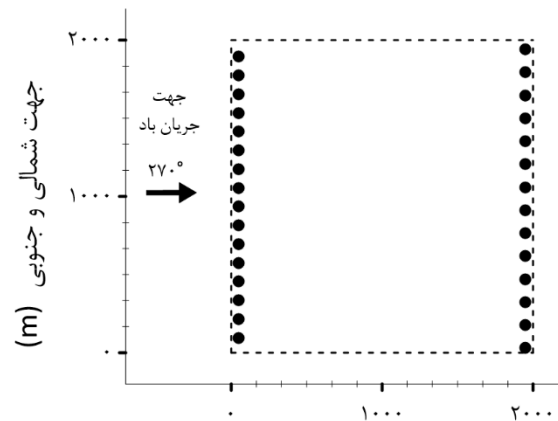
ردیف	پژوهش	توان کل مزرعه (MW)	توان محاسبه شده (MW) (%)	توضیحات
۱	گردی و همکاران	۱۵/۵۵۲	۱۴/۳۱۰	بهینه‌سازی چیدمان انجام شده توسط گردی و همکاران
۲	پارادا و همکاران	۱۵/۵۵۲	۱۴/۷۸۵	بهینه‌سازی چیدمان انجام شده توسط پارادا و همکاران
۳	پژوهش حاضر	۱۵/۵۵۲	۱۴/۶۲۵	بر اساس چیدمان بهینه توربین‌ها در پژوهش‌های قبلی
۴	پژوهش حاضر	۱۵/۵۵۲	۱۴/۶۲۵	حداقل فواصل توربین‌ها برابر با پنج برابر قطر روتور
۵	پژوهش حاضر	۱۵/۵۵۲	۱۴/۹۳۵	حداقل فواصل توربین‌ها برابر با سه برابر قطر روتور

(الف)



جهت شرقی و غربی (m)

(ب)



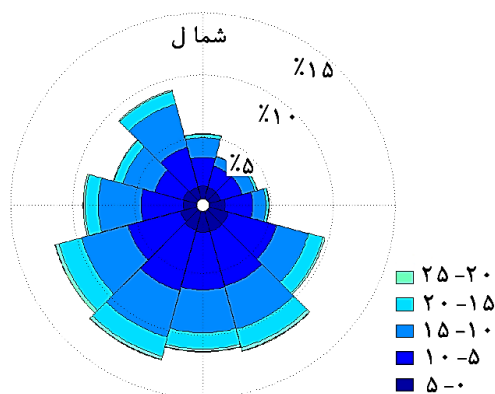
جهت شرقی و غربی (m)

شکل ۱۳- چیدمان بهینه توربین‌ها در مزرعه، (الف) به ازای فاصله توربین‌ها برابر با حداقل پنج برابر قطر روتور در پژوهش انجام شده، پژوهش گردی و همکاران و پارادا و همکاران. (ب) به ازای فاصله توربین‌ها برابر با حداقل سه برابر قطر روتور در پژوهش انجام شده

۳-۳- بهینه‌سازی چیدمان توربین‌های کیلوواتی میان توربین‌های مگاواتی

در این بخش، از مدل‌سازی مزرعه Horns Rev برای بررسی چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی استفاده شده است تا افزایش توان تولیدی این مزرعه بادی مورد بررسی قرار گیرد. این مزرعه از نوع فراساحلی بوده و مجهز به ۸۰ توربین ۲ مگاواتی ساخت شرکت Vestas می‌باشد که برای ۸ ستون اول این توربین‌ها انرژی تولیدی اندازه‌گیری شده موجود می‌باشد. فاصله چیدمان توربین‌ها در تمامی ستون‌ها و ردیف‌ها برابر با ۷ برابر قطر روتور توربین می‌باشد. نحوه چیدمان این توربین‌ها در ۸ ستون اول در شکل (۱۸-الف) و منحنی توان تولیدی و ضریب رانش این توربین‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است (برای اطلاعات بیشتر پیرامون مزرعه Horns Rev، انرژی تولیدی توربین‌ها و عملکرد توربین‌های به کار رفته در آن رجوع شود به [۱۹، ۴۹،

[۵۰]). با توجه به مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده در مزرعه بادی Horns Rev، بیشترین سرعت جریان باد مربوط به بادی است که با سرعت ۹ متر بر ثانیه (در ارتفاع هاب توربین‌های مگاواتی مزرعه) و با زاویه ۲۱۰ درجه نسبت به جهت غرب-شرق در جریان است [۵۱] (شکل (۱۶) و شکل (۱۷)). لذا این سرعت و این جهت جریان باد ملاک مدل‌سازی در پژوهش حاضر قرار گرفته است. توربین‌های کیلوواتی مورد نظر جهت مدل‌سازی از نوع ۶۰۰ کیلوواتی و ساخت شرکت Vestas بوده و منحنی توان تولیدی و ضریب رانش این توربین در شکل (۱۵) نشان داده شده است (جهت اطلاعات بیشتر پیرامون این توربین رجوع شود به [۵۲]). سختی زمین در مزرعه مورد بررسی برابر با ۰/۰۵ [۱۹، ۴۹، ۵۰] بوده و در محاسبه شدت آشفستگی و سرعت جریان باد در ارتفاع توربین‌های کیلوواتی از نتایج ارائه شده در پژوهش مرجع [۵۰] استفاده شده است. خصوصیات جریان باد و توربین‌ها در مدل‌سازی انجام

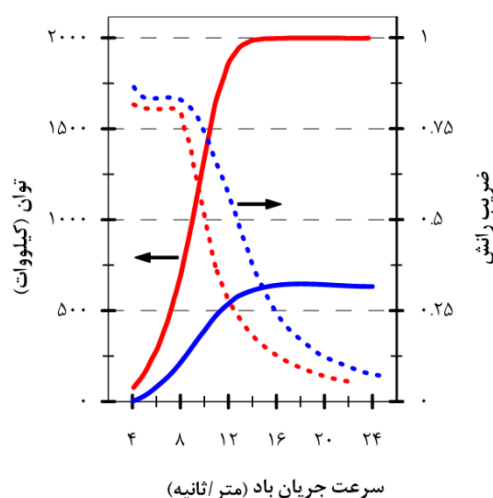


شکل ۱۷- گلباد مزرعه Horns Rev

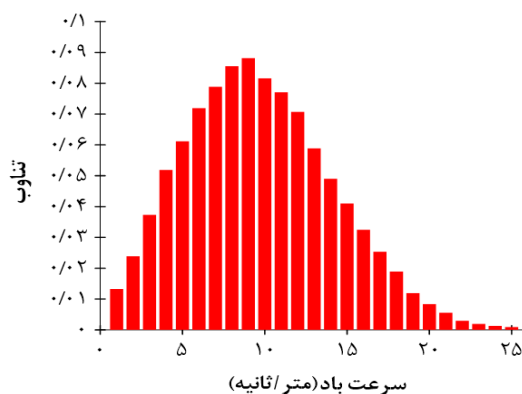
با ورود اطلاعات و شرایط اولیه به کد نوشته شده در نرم افزار متلب، مدل‌سازی انجام شده و تعداد ۲۶ محل جهت جانمایی توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی تعیین شده است. سپس انرژی تولیدی و هزینه‌های چیدمان توربین‌های کیلوواتی برای تمامی حالات ممکن توسط کد متلب محاسبه شده و تابع چیدمان بهینه (برای بهترین حالت چیدمان به ازای تعداد توربین‌های کیلوواتی برابر) برای توربین‌های کیلوواتی به دست آمده است. بر اساس تابع چیدمان بهینه به دست آمده در شکل (۱۹)، بهترین چیدمان مربوط به جانمایی ۱۵ توربین (۱۸-ب) نشان داده شده و به عنوان چیدمان بهینه انتخاب شده است. در شکل (۲۰)، توان تولیدی نرمالایز هر یک از ستون‌های توربین‌های مزرعه بدون تجهیز با توربین‌های کیلوواتی و همچنین توان تولیدی مزرعه مجهز به چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی جهت مقایسه نشان داده شده است. مقادیر توان نرمالایز نشان داده شده در شکل (۲۰)، نسبت مجموع توان تولیدی هر یک از ستون‌های توربین‌های مزرعه به مجموع توان تولیدی ستون اول توربین‌های مزرعه در حالت بدون تجهیز به توربین‌های کیلوواتی می‌باشد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۲۰)، همان‌طور که انتظار می‌رفت در ستون‌های اول تا هفتم که در آن‌ها توربین‌های کیلوواتی جانمایی شده‌اند، افزایش توان تولیدی مشاهده گردیده است در حالی که در ستون هشتم تغییری در توان تولیدی (به صورت کاهشی و یا افزایشی) مشاهده نشده است، زیرا در این ستون هیچ توربین کیلوواتی جانمایی نشده و از طرف دیگر بهینه‌سازی چیدمان توربین‌های کیلوواتی بر حسب حداقل فاصله مجاز توربین‌ها از یکدیگر به نحوی بوده که ویک آن‌ها بر توان

شده در جدول ۵ ارائه شده است. ابعاد مزرعه مدل‌سازی شده در جهت شمال-جنوب و غرب-شرق به ترتیب ۴۰۰۰ متر و ۴۵۰۰ متر می‌باشد. برای مدل‌سازی مزرعه به کمک کد نوشته شده در متلب، مزرعه با سلول‌هایی با طول و عرض برابر با ۲۰۰ متر شبکه‌بندی شده و حداقل فاصله چیدمان توربین‌های کیلوواتی از یک دیگر در جهت موازی و عمود بر جریان باد به ترتیب ۱۰ و ۱/۵ برابر قطر روتور این نوع توربین در نظر گرفته شده است.

- منحنی توان تولیدی توربین مگاواتی
- منحنی توان تولیدی توربین کیلوواتی
- ... منحنی ضریب رانش توربین مگاواتی
- ... منحنی ضریب رانش توربین کیلوواتی



شکل ۱۵- منحنی توان تولیدی و ضریب رانش توربین‌های مورد استفاده در مدل‌سازی



شکل ۱۶- تناوب سرعت جریان باد در مزرعه Horns Rev

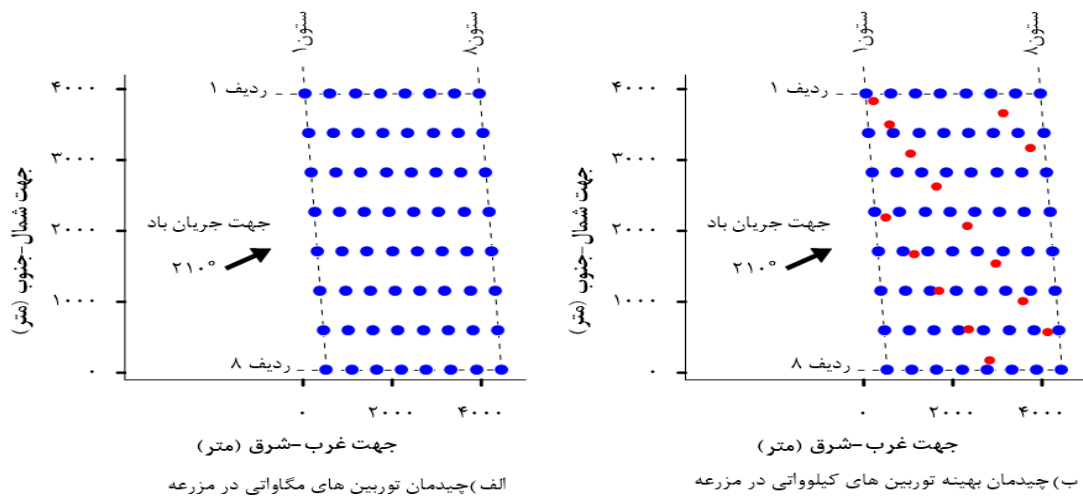
جدول ۵- خلاصه خصوصیات توربین‌ها و مزرعه

نوع توربین	$u_{\infty@hub}$ (m/s)	α	I_{∞}	d_t (m)	z_h (m)
مگاواتی	۹/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۷۷	۸۰	۷۰
کیلوواتی	۸/۴۰	۰/۱۲	۰/۰۸۲	۴۴	۴۰

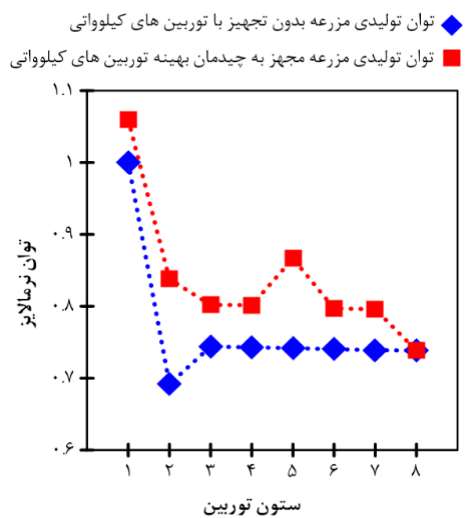
مزرعه در چیدمان حداکثری توربین‌های کیلوواتی (که در این حالت ۲۶ توربین کیلوواتی در مزرعه قرار می‌گیرند) برابر با ۵۰/۳۹۲ مگاوات بوده (شکل (۱۹)) که با ۹/۳۵٪ افزایش توان تولیدی کل همراه بوده است. راندمان عملکردی کل مزرعه در این حالت برابر با ۳۴/۰۶٪ محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی، راندمان عملکردی کل مزرعه تقریباً ثابت مانده، اما توان تولیدی کل مزرعه با افزایش همراه بوده است. لذا با این چیدمان می‌توان جهت افزایش توان تولیدی مزارع بادی احداث شده بدون نیاز به افزایش مساحت مزرعه اقدام نمود.

تولیدی توربین‌های مگاواتی اثری نداشته باشد. توان تولیدی کل در مزرعه بادی مدل شده در صورت عدم تجهیز و تجهیز به چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی به ترتیب برابر با ۴۵/۶۸۰ و ۴۸/۹۰۶ مگاوات بوده و لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تجهیز مزرعه با چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی توان تولیدی کل را به مقدار ۷٪ افزایش داده است. با توجه به تعداد ۶۴ توربین ۲ مگاواتی، ۱۵ توربین ۶۰۰ کیلوواتی و توان تولیدی کل مزرعه، راندمان عملکردی کل مزرعه در صورت عدم تجهیز و تجهیز به چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی به ترتیب برابر با ۳۵/۶۹٪ و ۳۵/۷۰٪ محاسبه شده است. توان تولیدی کل

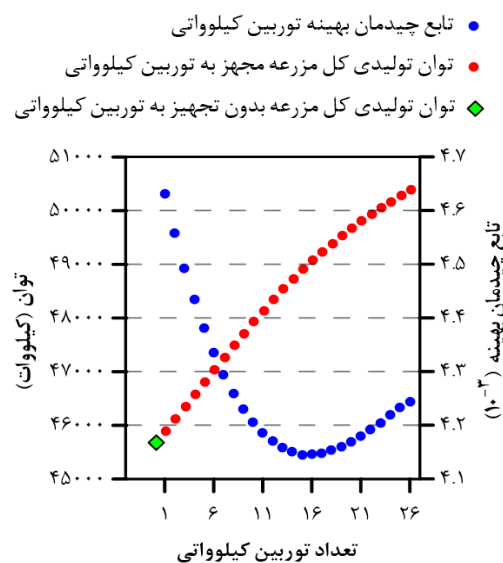
● توربین باد مگاواتی ● توربین باد کیلوواتی



شکل ۱۸- چیدمان توربین‌ها در مزرعه Horns Rev



شکل ۲۰- توان تولیدی نرمالایز ستون‌های توربین‌های مزرعه در دو حالت بدون تجهیز و مجهز به چیدمان بهینه ۱۵ توربین کیلوواتی



شکل ۱۹- تابع چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی و توان تولیدی مزرعه بر حسب تعداد توربین‌های کیلوواتی

۴- نتیجه گیری

هدف پژوهش حاضر بررسی چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی بوده است تا بتوان افزایش توان تولیدی مزارع بادی احداث شده را مورد مطالعه قرار داد. در مدل‌سازی پژوهش حاضر، بر خلاف روش‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین، از یک مدل تحلیلی سه بعدی بر پایه تابع گوسی برای توزیع سرعت در ویک استفاده شده است. همچنین لایه مرزی سرعت جریان باد بر حسب ارتفاع از سطح زمین، ارتفاع توربین‌ها، شدت آشفتگی جریان باد و اثرات ناحیه ویک نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از مدل تحلیلی ویک، یک مدل تحلیلی جهت تخمین توان تولیدی توربین‌ها در مزارع بادی ارائه شده است تا با در نظر گرفتن اثرات ویک توربین‌های بالادست، توان تولیدی توربین‌های پایین دست محاسبه شود. از طرف دیگر با توجه به ضعف الگوریتم‌های بهینه‌سازی در ارائه یک جواب به عنوان بهینه‌ترین جواب به دست آمده، برای تعیین چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی، از هیج الگوریتم بهینه‌سازی در این پژوهش استفاده نشده است. لذا محل‌های ممکن برای جانمایی توربین‌ها با شبکه‌بندی فضای حل مشخص شده و سپس با تعیین حداقل فاصله توربین‌ها از یکدیگر، تعداد محل‌های جانمایی توربین‌ها به شدت کاهش یافته است. در نهایت با محاسبه مقدار تابع بهینه (بر حسب انرژی تولیدی و هزینه‌های اولیه) به ازای هر یک از محل‌های ممکن جهت جانمایی توربین‌ها، بهینه‌ترین چیدمان برای توربین‌ها به دست آمده است. در این پژوهش، تمامی محاسبات به کمک کد نوشته شده در متلب انجام شده است.

در بخش اعتبارسنجی، ابتدا مدل و محاسبات کد ارائه شده جهت تخمین انرژی تولیدی توربین‌ها به کمک داده‌های عددی، اندازه گیری شده و خروجی نرم افزار Flowstar ارزیابی شده است. در مرحله بعدی، کد نوشته شده جهت بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها در مزرعه بادی به کمک داده‌های تحلیلی حاصل از پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی شده است. سپس چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی در مزرعه Horns Rev مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. در نتایج به دست آمده از چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی در مزرعه Horns Rev، توان تولیدی

کل مزرعه بادی مدل شده در صورت عدم تجهیز و تجهیز به چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی به ترتیب برابر با ۴۵/۶۸۰ و ۴۸/۹۰۶ مگاوات بوده است. لذا می‌توان عنوان نمود که تجهیز مزرعه با چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی توان تولیدی کل را به مقدار ۷٪ افزایش داده است. با توجه به تعداد ۶۴ توربین ۲ مگاواتی، ۱۵ توربین ۶۰۰ کیلوواتی و توان تولیدی کل مزرعه، راندمان عملکردی کل مزرعه در صورت عدم تجهیز و تجهیز به چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی به ترتیب برابر با ۳۵/۶۹٪ و ۳۵/۷۰٪ محاسبه شده است. توان تولیدی کل مزرعه در چیدمان حداکثری توربین‌های کیلوواتی (که در این حالت ۲۶ توربین کیلوواتی در مزرعه قرار می‌گیرند) برابر با ۵۰/۳۹۲ مگاوات محاسبه شده که با ۹/۳۵٪ افزایش توان تولیدی کل همراه بوده است. راندمان عملکردی کل مزرعه در این حالت برابر با ۳۴/۱۰۶٪ محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از چیدمان بهینه توربین‌های کیلوواتی، راندمان عملکردی کل مزرعه تقریباً ثابت مانده، اما توان تولیدی کل مزرعه با افزایش همراه بوده و لذا با چیدمان توربین‌های کیلوواتی در میان توربین‌های مگاواتی می‌توان جهت افزایش توان تولیدی مزارع بادی احداث شده بدون نیاز به افزایش مساحت مزرعه اقدام نمود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_p	ضریب راندمان توربین باد
C_T	ضریب رانش توربین باد
d	فاصله مستقیم جانبی هاب دو توربین باد از یک دیگر، m
d_t	قطر توربین باد، m
I_{∞}	شدت آشفتگی جریان آزاد باد
I_{wake}	شدت آشفتگی باد در ناحیه ویک
k_w	ضریب رشد ناحیه ویک
$k_{w.rev}$	ضریب اصلاح شده رشد ناحیه ویک
L	فاصله جانبی دو توربین باد، m
r	فاصله از محور ویک، m
r_t	شعاع روتور توربین باد، m
$r_{w.0}$	شعاع ناحیه ویک در محل شکل گیری، m

$r_{w.i.x}$	شعاع ناحیه ویک توربین باد بالادست \bar{u}_m در فاصله x ، m	$u_{w.\bar{r}.x}$	میانگین سرعت جریان باد در ناحیه ویک در فاصله x ، m/s
$r_{w.x}$	شعاع ناحیه ویک در فاصله x ، m	$u_{w.i.z.y}$	منحنی توزیع سه بعدی سرعت جریان باد توربین بالادستی \bar{u}_m در فواصل x ، y و z ، m/s
u	منحنی سرعت سه بعدی باد در مزرعه، m/s	$u_{w.z.y.x}$	منحنی توزیع سه بعدی سرعت جریان باد در فواصل x ، y و z ، m/s
u_{eff}	سرعت تأثیرگذار، m/s	x	فاصله پایین دست توربین با در نظر گرفتن ویک توربین بالادست \bar{u}_m ، m/s
$\bar{u}_{i,j}$	میانگین سرعت باد روی هاب توربین پایین دست \bar{u}_m با در نظر گرفتن ویک توربین بالادست \bar{u}_m ، m/s	y	فاصله جانبی از توربین باد در جهت عمود بر جریان باد، m
u_{∞}	سرعت جریان باد در محل هاب توربین باد، m/s	z	ارتفاع از سطح زمین، m
$u_{\infty,z}$	منحنی سرعت جریان آزاد باد بر حسب ارتفاع از سطح زمین، m/s	z_h	ارتفاع هاب توربین باد، متر
u_{ref}	سرعت جریان باد اندازه گیری شده در ارتفاع مرجع، m/s	$z_{h,i}$	ارتفاع هاب توربین باد بالادست \bar{u}_m ، m
$u_{w,0}$	میانگین سرعت باد در ناحیه ویک در محل شکل گیری ویک، m/s	$z_{h,j}$	ارتفاع هاب توربین باد پایین دست \bar{u}_m ، m
$u_{w.r.x}$	منحنی توزیع دو بعدی سرعت جریان باد در ارتفاع هاب توربین در فاصله x ، m/s	z_{ref}	ارتفاع مرجع اندازه گیری سرعت جریان باد، m
		علائم یونانی	
		α	ضریب برشی سرعت جریان باد

مراجع

- [۱] سامان احمدی، ایمان پورفر و امین ساکی، "مدل سازی مزرعه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسوتغذیه با معادل سازی بخش مکانیکی با استفاده از خوشه بندی بر اساس ضریب جذب توان" نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۰، سال ۱۳۹۹، صفحه ۱۶۹-۱۸۲.
- [۲] آرش حاتمی و بهنام معتکف ایمانی، "کنترل توربین بادی محور افقی دارای ژنراتور سنکرون به منظور جذب بیشینه انرژی باد" نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، سال ۱۳۹۷، صفحه ۴۰۳-۴۱۳.
- [۳] جاماسب پیرکندی و رضا حربی منفرد، "شبه سازی ترمودینامیکی یک سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی با کاربرد در یک سیستم مستقل از شبکه" نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، سال ۱۳۹۷، صفحه ۲۵-۳۷.
- [4] M. Ge, Y. Wu, Y. Liu, and X. I. Yang, "A two-dimensional Jensen model with a Gaussian-shaped velocity deficit", *Renewable Energy*, vol. 141, 2019, pp. 46-56.
- [5] R. J. Barthelmie and S. T. Frandsen, "Flow and wakes in large wind farms in complex terrain and offshore", *Applied Energy*, vol. 226, 2018, pp. 110-127..
- [6] P. Sorensen and T. Nielsen, "Recalibrating wind turbine wake model parameters—validating the wake model performance for large offshore wind farms", *European Wind Energy Conference and Exhibition, EWEA*, 2006.
- [7] C. L. Archer et al., "Review and evaluation of wake loss models for wind energy applications", *Applied Energy*, vol. 226, 2018, pp. 1187-1207.
- [8] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [9] I. Katic, J. Højstrup, and N. O. Jensen, "A simple model for cluster efficiency", *European wind energy association conference and exhibition*, 1987.
- [10] J. K. Kaldellis, P. Triantafyllou, and P. Stinis, "Critical evaluation of Wind Turbines' analytical wake models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, 2021, p. 110991.

- [11] R. Krishnamurthy, J. Reuder, B. Svardal, H. J. S. Fernando, and J. B. Jakobsen, "Offshore wind turbine wake characteristics using scanning doppler lidar", *Energy Procedia*, vol. 137, 2017, pp. 428-442.
- [12] G. Marmidis, S. Lazarou, and E. Pyrgioti, "Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation", *Renewable energy*, vol. 33, no. 7, 2008, pp. 1455-1460.
- [13] A. Emami and P. Noghreh, "New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms", *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, 2010, pp. 1559-1564.
- [14] R. Saidur, N. Rahim, M. Islam, and K. Solangi, "Environmental impact of wind energy", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 5, 2011, pp. 2423-2430.
- [15] K. Siler-Evans, I. L. Azevedo, M. G. Morgan, and J. Apt, "Regional variations in the health, environmental, and climate benefits of wind and solar generation", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, no. 29, 2013, pp. 11768-11773.
- [16] P. M. Gebraad et al., "Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects—a CFD simulation study", *Wind Energy*, vol. 19, no. 1, 2016, pp. 95-114.
- [17] J. Goit and J. Meyers, "Optimal control of energy extraction in wind-farm boundary layers", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 768, 2015, pp. 5-50.
- [18] J. M. S. Bartl et al., "Wind tunnel experiments on wind turbine wakes in yaw: effects of inflow turbulence and shear", *Wind Energy Science Discussions*, vol. Volume: 3, Issue: 1, 2018, pp 329-343.
- [19] L. Tian, W. Zhu, W. Shen, Y. Song, and N. Zhao, "Prediction of multi-wake problems using an improved Jensen wake model", *Renewable energy*, vol. 102, 2017, pp. 457-469.
- [20] S. Naderi and F. Torabi, "Numerical investigation of wake behind a HAWT using modified actuator disc method", *Energy Conversion and Management*, vol. 1, 2017, pp. 1346-1357.
- [21] L. Tian, W. Zhu, W. Shen, N. Zhao, and Z. Shen, "Development and validation of a new two-dimensional wake model for wind turbine wakes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 137, 2015, pp. 90-99.
- [22] M. Bastankhah and F. Porté-Agel, "A new analytical model for wind-turbine wakes", *Renewable Energy*, vol. 70, 2014, pp. 116-123.
- [23] T. Ishihara, A. Yamaguchi, and Y. Fujino, "Development of a new wake model based on a wind tunnel experiment", *Global wind power*, vol. 105, no. 1, 2004, pp. 33-45.
- [24] Y. Chen, H. Li, K. Jin, and Q. Song, "Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines", *Energy Conversion and Management*, vol. 70, 2013, pp. 56-65.
- [25] N. O. Jensen, "A note on wind generator interaction", Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory for Sustainable Energy, 1983.
- [26] S. Grady, M. Hussaini, and M. M. Abdullah, "Placement of wind turbines using genetic algorithms", *Renewable energy*, vol. 30, no. 2, 2005, pp. 259-270.
- [27] S. Pookpant and W. Ongsakul, "Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients", *Renewable energy*, vol. 55, 2013, pp. 266-276.
- [28] L. Parada, C. Herrera, P. Flores, and V. Parada, "Wind farm layout optimization using a Gaussian-based wake model", *Renewable energy*, vol. 107, 2017, pp. 531-541.
- [29] K. Chen, M. Song, X. Zhang, and S. Wang, "Wind turbine layout optimization with multiple hub height wind turbines using greedy algorithm", *Renewable Energy*, vol. 96, 2016, pp. 676-686.
- [30] A. Mittal, "Optimization of the layout of large wind farms using a genetic algorithm", Master's thesis, Case Western Reserve University, 2010.
- [31] K. Deb, "Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization in engineering design", *Evolutionary algorithms in engineering and computer science*, vol. 2, 1999, pp. 135-161.
- [32] G. Mosetti, C. Poloni, and B. Diviacco, "Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 51, no. 1, 1994, pp. 105-116.

- [33] S. Rodrigues, P. Bauer, and P. A. Bosman, "Multi-objective optimization of wind farm layouts—Complexity, constraint handling and scalability", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, 2016, pp. 587-609.
- [34] P. Asad Ayoubi, M. Eftekhari Yazdi, and I. Harsini, "A 3D analytical model for predicting horizontal-axis wind turbines wake based on a 2D analytical wake model", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 41, no. 5, 2022, pp. 500-522.
- [35] D. J. Renkema, "Validation of wind turbine wake models, Master of Science Thesis," Delft University of Technology, vol. 19, 2007, p. 590.
- [36] P. Mukund, "Wind and solar power systems", 1st ed: CRC Press, 1999.
- [37] R. J. Stevens, B. F. Hobbs, A. Ramos, and C. Meneveau, "Combining economic and fluid dynamic models to determine the optimal spacing in very large wind farms", *Wind Energy*, vol. 20, no. 3, 2017, pp. 465-47
- [38] J. S. González, A. G. G. Rodriguez, J. C. Mora, J. R. Santos, and M. B. Payan, "Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm", *Renewable energy*, vol. 35, no. 8, 2010, pp. 1671-1681.
- [39] M. Song, K. Chen, Z. He, and X. Zhang, "Optimization of wind farm micro-siting for complex terrain using greedy algorithm", *Energy*, vol. 67, 2014, pp. 454-459.
- [40] Y. Chen, H. Li, B. He, P. Wang, and K. Jin, "Multi-objective genetic algorithm based innovative wind farm layout optimization method", *Energy Conversion and Management*, vol. 105, 2015, pp. 1318-1327.
- [41] X. Gao, H. Yang, L. Lin, and P. Koo, "Wind turbine layout optimization using multi-population genetic algorithm and a case study in Hong Kong offshore", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 139, 2015, pp. 89-99.
- [42] J. Hazra, S. Mitra, S. Mathew, and F. Zaini, "3D layout optimization for large wind farms", in 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT) 2015.
- [43] A. M. Abdelsalam and M. El-Shorbagy, "Optimization of wind turbines siting in a wind farm using genetic algorithm based local search", *Renewable energy*, vol. 123, 2018, pp. 748-755.
- [44] S. Tao, Q. Xu, A. Feijóo, G. Zheng, and J. Zhou, "Wind farm layout optimization with a three-dimensional Gaussian wake model", *Renewable Energy*, vol. 159, 2020, pp. 553-569.
- [45] K. Balasubramanian, S. B. Thanikanti, U. Subramaniam, N. Sudhakar, and S. Sichelalu, "A novel review on Optimization Techniques used in Wind Farm Modelling", *Renewable Energy Focus*, vol. 35, 2020, pp. 84-96.
- [46] A. Stidworthy and D. Carruthers, "FLOWSTAR-Energy: a high resolution wind farm wake model", *Wind Energy Science Discussions*, 2016, pp. 1-24.
- [47] G. C. Larsen and H. A. Madsen, "TOPFARM-next generation design tool for optimisation of wind farm topology and operation", *Renewable Energy Focus*, vol. 11, 2011, pp. 71-82..
- [48] Y.-T. Wu, T.-L. Liao, C.-K. Chen, C.-Y. Lin, and P.-W. Chen, "Power output efficiency in large wind farms with different hub heights and configurations", *Renewable Energy*, vol. 132, 2019, pp. 941-949.
- [49] S. Naderi, S. Parvanehmasiha, and F. Torabi, "Modeling of horizontal axis wind turbine wakes in Horns Rev offshore wind farm using an improved actuator disc model coupled with computational fluid dynamic", *Energy Conversion and Management*, vol. 171, 2018, pp. 953-968.
- [50] Y.-T. Wu and F. Porté-Agel, "Modeling turbine wakes and power losses within a wind farm using LES: An application to the Horns Rev offshore wind farm", *Renewable Energy*, vol. 5, 2015, pp. 945-955.
- [51] J. Feng and W. Z. Shen, "Modelling wind for wind farm layout optimization using joint distribution of wind speed and wind direction", *Energies*, vol. 8, no. 4, 2015, pp. 3075-3092.
- [52] P. Pinson, "Wind energy: Forecasting challenges for its operational management", *Statistical Science*, vol. 28, no. 4, 2013, pp. 564-585.