

بهینه‌سازی بازدهی اکسرژی و تولید آنتروپی توربین بادی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات

رضا یزدان پرست (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

ناصر کردانی* (استادیار)

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوره ۳ - ۳۴، شماره ۱، ص. ۱۱۷-۱۲۴

هدف این تحقیق افزایش اکسرژی و کاهش تولید آنتروپی برای توربین بادی نوع Excel-S Bergey با بهینه‌سازی سرعت‌های شروع چرخش، نامی و خاتمه‌ی چرخش در الگوریتم انبوه ذرات است. بدین منظور ابتدا تابع هدف با مدل‌سازی ریاضی اکسرژی توربین بادی به دست می‌آید. سپس با گردآوری داده‌های آماری توربین مذکور، توسط کد رایانه‌ی شبکه‌ی عصبی، توربین بادی در نرم‌افزار متلب^۱ مدل‌سازی شده و نتایج آن به صورت جداول و نمودارهایی ارائه می‌شود. این نتایج رابطه‌ی میان سرعت هوای ورودی، تولید آنتروپی و بازدهی قانون دوم ترمودینامیک را ارائه کرده است. با بررسی نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم انبوه ذرات، تولید آنتروپی به میزان ۲۴/۵ درصد کاهش و بازدهی اکسرژی ۴۱/۷ درصد افزایش پیدا می‌کند.

yazdanparast.r@gmail.com
naser.kordani@umz.ac.ir

واژگان کلیدی: آنتروپی، بازدهی اکسرژی، الگوریتم انبوه ذرات.

۱. مقدمه

برای یک مؤسسه‌ی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته،^[۳] موقعیت بهینه‌ی نصب توربین بادی در مزارع بادی با نوشتن یک رمز جدید و همچنین استفاده از تابع هدف^۲ در الگوریتم ژنتیک به وسیله‌ی نرم‌افزار مطلب محاسبه شده،^[۴] در خصوص ساده‌سازی و بهینه‌سازی ژنراتور توربین بادی کار شده،^[۵] بازده انرژی و اکسرژی در توربین بادی با محور عمودی و افقی مقایسه شده،^[۶] اثر تغییرات جوی هوا در بازده اکسرژی توربین بادی نیروگاه WTTPS بررسی شده،^[۷] توربین بادی توسط الگوریتم ژنتیک و جست‌وجو^۴ بهینه‌سازی شده،^[۸] مدلی برای بهینه‌سازی پارامترهای اندازه و طرح مزرعه‌ی توربین‌های بادی با توجه به منابع باد و جنبه‌های اقتصادی طراحی و بررسی شده،^[۹] فعالیت‌هایی برای بهینه‌سازی طراحی چندرشته‌ی از توربین‌های بادی دریایی در سطح سیستم فعالیت صورت گرفته،^[۱۰] در یک مطالعه‌ی چندمنظوره برای به دست آوردن مجموعه‌ی بهینه‌ی پارتو از راه حل، برای مشخصات هندسی مقاطع ایرفویل برای ۱۰ متر تیغه توربین بادی با محور افقی، الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته،^[۱۱] از سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی براساس باد، الکترولازر، PEM سلول سوختی از نظر مدل مفهومی، و همچنین، تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی استفاده شده،^[۱۲] در خصوص مفهوم چاه توربین و استفاده از نوسانات تولیدی ستون هوا بیش از امواج دریایی به درایو یک توربین مورد بررسی قرار گرفته،^[۱۳] در خصوص تیغه‌های توربین بادی تحقیق شده،^[۱۴] انرژی و اکسرژی توربین بادی بررسی و آنالیز شده است.^[۱۵] در بررسی انرژی و اکسرژی توربین بادی، ابتدا مدل‌سازی ریاضی توربین بادی انجام شده و سپس با استفاده از آمارهای هواشناسی، انرژی و اکسرژی براساس سه پارامتر اصلی محاسبه شده است؛ این سه پارامتر عبارت‌اند از: سرعت کاتین

توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را به توان مکانیکی تبدیل می‌کنند و این توان مکانیکی از طریق شفت به ژنراتور انتقال پیدا کرده و در نهایت انرژی الکتریکی تولید می‌شود. توربین‌های بادی براساس یک اصل ساده کار می‌کنند. انرژی باد دو یا سه پره‌ی را که به دور روتور توربین بادی قرار گرفته به چرخش درمی‌آورد که می‌توان با روش کمینه‌سازی تولید آنتروپی توربین را بهینه کرد. روتور به یک شفت مرکزی متصل است که با چرخش آن ژنراتور نیز به چرخش درآمده و الکتریسیته تولید می‌شود. توربین‌های بادی معمولاً در مزارع وسیع روی برج‌های بلندی نصب شده‌اند تا بیشترین انرژی ممکن را دریافت کنند. بلندی این برج‌ها به ۳۰ تا ۴۰ متر بالاتر از سطح زمین می‌رسد.

امروزه تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی توربین‌های بادی انجام شده که اکثرشان به بررسی افزایش بازدهی ژنراتور، پره‌ها، سرعت روتور، کنترل بار الکتریسیته توربین‌های بادی، مزرعه‌ی توربین و آنالیزهای انرژی و اکسرژی اختصاص یافته تا بتوان نهایتاً از قیمت برق تولیدی توسط این توربین‌ها کاست. در این خصوص، روش‌های بهینه‌سازی روتور توربین بادی با استفاده از روش‌های طراحی بر پایه‌ی بهینه‌سازی عددی و چندین مدل محاسباتی، بررسی و تجزیه و تحلیل شده،^[۱] یک توربین بادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۲ مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده که می‌توان پیش‌بینی دقیقی در مورد مکان مناسب توربین بادی به دست آورد،^[۲] آنالیز اکسرژی و قابلیت اطمینان سیستم‌های توربین بادی در دانشگاه ازمیر ترکیه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۶، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۲۳.

DOI:10.24200/J40.2018.6395

$$(\dot{e}_{kinetic})_{in} = \frac{1}{\gamma} \rho A_1 u_1^2 \quad (5)$$

$$(\dot{e}_{kinetic})_{out} = \frac{1}{\gamma} \rho A_2 u_2^2 \quad (6)$$

که در آن، A_2 سطح جاروشده‌ی هوا توسط پره‌های توربین (m^2) است. دبی جرمی هوایی که توربین بادی را می‌چرخاند برابر است با: [15]

$$\dot{m} = \rho A_1 u_1 \quad (7)$$

با توجه به معادله‌ی ۴، دبی جرمی برابر است با: [15]

$$\dot{m} = \frac{2}{\gamma} \rho A_2 u_1 \quad (8)$$

با تقسیم معادله‌ی ۵ و ۶ به معادله‌ی ۸، آکسرژی جنبشی ورودی و خروجی توربین چنین به دست می‌آید. [15]

$$(e_{kinetic})_{in} = \frac{1}{\gamma} u_1^2 \quad (9)$$

$$(e_{kinetic})_{out} = \frac{1}{18} u_1^2 \quad (10)$$

۲.۱.۲. آکسرژی فیزیکی

آکسرژی فیزیکی توربین بادی چنین محاسبه می‌شود: [15]

$$e_{ph} = (c_{p,a} + c_{p,v}) T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + (1 + 1/6 \cdot 78) R_a T_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (11)$$

عبارت اول رابطه‌ی ۱۱ بیان‌گر دما، و عبارت دوم بیان‌گر فشار است؛ دیگر پارامترها نیز چنین تعریف می‌شوند:

$c_{p,a}$: حرارت مخصوص هوا (kJ/kg.k)؛

$c_{p,v}$: حرارت مخصوص بخار آب (kJ/kg.k)؛

T_0 : دمای مرجع که برابر است با ۲۹۸/۱۵ k؛

T : دما (K)؛

ω : رطوبت هوا (kg_{water}/kg_{air})؛

R_a : ثابت گازها (kJ/kg.k)؛

P : فشار هوا (kPa)؛

P_0 : فشار مرجع که برابر است با ۱۰۱/۳۲۵ (kPa).

برای محاسبه‌ی فشار ورودی و خروجی توربین بادی از رابطه‌ی ۱۲ استفاده می‌شود. [15]

$$P = P_{at} \pm \frac{u^2}{\gamma} \quad (12)$$

P_{at} معرف فشار اتمسفر است. در شکل ۱ مناطق مختلف توربین بادی ایده‌آل و توزیع سرعت و فشار در آن نشان داده شده است. جریان آزاد هوا با سرعت u_1 و فشار P_1 وارد توربین می‌شود. [15] با توجه به شکل ۱ و رابطه‌ی ۱۱، آکسرژی فیزیکی ورودی و خروجی در توربین بادی برابر است با: [15]

$$(e_{ph})_{in} = (c_{p,a} + c_{p,v}) T_0 \left[\frac{T_1}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \right] + (1 + 1/6 \cdot 78) R_a T_0 \ln \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (13)$$

که مبین سرعت بادی است که باید ضمن وزش، توربین بادی را شروع به حرکت اندازد، سرعت ریتد^۵ که متناظر با بیشینه قدرت تولیدی توسط توربین باد است، و سرعت فورلین که اگر سرعت باد به آن مقدار برسد توربین بادی متوقف می‌شود. [15] این سه سرعت به‌عنوان سرعت‌های اساسی در کاتالوگ سازنده‌ی هر توربین بادی مشخص شده است و به‌عنوان پارامترهای طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مقاله از طریق آنالیز آکسرژی، تولید آنتروپی برای توربین به دست می‌آید. سپس براساس محاسبه‌ی آکسرژی‌های ورودی و خروجی توربین بادی و مقدار کمینه‌ی تولید آنتروپی، بهینه‌سازی توربین بادی انجام می‌شود. اکثر داده‌ها و نتایج به دست آمده براساس توربین نوع Bergey Excel-S ساخت آمریکاست. محدوده‌ی قدرت این توربین‌ها بین چند کیلو وات تا ۵ مگاوات است. تمامی تجزیه و تحلیل‌های این مقاله برای شهر تهران صورت پذیرفته است؛ آمار و اطلاعات سرعت باد نیز در سال‌های اخیر از سایت هواشناسی^۶ گرفته شده است. [15]

۲. مدل‌سازی آکسرژی

۲.۱.۲. مدل‌سازی آکسرژی در توربین بادی^۷

برای به دست آوردن آکسرژی توربین بادی باید آکسرژی جنبشی، فیزیکی و شیمیایی را محاسبه کنیم. در نتیجه آکسرژی کل هوایی که توربین بادی را می‌چرخاند برابر است با: [15]

$$e_t = e_{ph} + e_{ch} + e_{kinetic} \quad (1)$$

که در آن e_{ph} ، e_{ch} و $e_{kinetic}$ به ترتیب معرف آکسرژی فیزیکی، آکسرژی شیمیایی و آکسرژی جنبشی هستند.

۲.۱.۲.۱. آکسرژی جنبشی

نرخ آکسرژی جنبشی ورودی توربین بادی برابر است با: [15]

$$(\dot{e}_{kinetic})_{in} = \frac{1}{\gamma} \rho A_1 u_1^2 \quad (2)$$

نرخ آکسرژی جنبشی خروجی توربین بادی برابر است با: [15]

$$(\dot{e}_{kinetic})_{out} = \frac{1}{\gamma} \rho A_2 u_2^2 \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳ تعریف بعضی از پارامترها عبارت است از:

u_1 : سرعت هوای آزاد (m/s)؛

A_1 : سطح مقطع هوای ورودی به توربین (m^2)؛

A_2 : سطح مقطع هوای خروجی از توربین (m^2)؛

ρ : چگالی هوا (kg/m^3).

با توجه به معادلات ۲ تا ۴، نرخ آکسرژی جنبشی ورودی و خروجی برابر است با: [15]

$$\begin{cases} u_2 = u_1 = \frac{2}{3} u_1 \\ u_2 = \frac{1}{3} u_1 \\ A_2 = A_1 = \frac{2}{3} A_1 \\ A_2 = 3 A_1 \end{cases} \quad (4)$$

۲.۲. بازدهی اکسرژی

نسبت کار واقعی به اکسرژی باد را بازدهی اکسرژی^۸ یا بازدهی قانون دوم گویند. [۱۶]

$$P_{e,ave} = P_{er} \left\{ \frac{\exp\left(-\left(\frac{u_c}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{u_f}{c}\right)^k\right)}{\left(\frac{u_f}{c}\right)^k - \left(\frac{u_c}{c}\right)^k} - \exp\left(-\left(\frac{u_f}{c}\right)^k\right) \right\} \quad (19)$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{OUT}}{EXFLOW} = \frac{P_{e,ave}}{m^{\circ} (\bar{e}_{tin} - \bar{e}_{tout})} \quad (20)$$

η_{II} معرف بازدهی اکسرژی (بازدهی قانون دوم) است.

۳. مشخصات توربین بادی

توربین‌های بادی براساس توان خروجی مشخصات متفاوتی دارند. معمولاً مهم‌ترین داده‌های توربین‌های بادی که در کاتالوگ آنها، توسط کارخانه‌ی سازنده ارائه می‌شود شامل سرعت شروع چرخش، سرعت و توان نامی، سرعت خاتمه‌ی چرخش و ارتفاع توربین بادی است. با مراجعه به سایت هواشناسی اطلاعاتی درخصوص سرعت وزش باد (جدول ۱)، و سایت کارخانه‌ی سازنده‌ی توربین بادی^۹ می‌توان مشخصات توربین بادی مدل Bergey Excel-S را مشاهده کرد که در جدول ۲ تعدادی از پارامترهای مهم آن ارائه شده است.

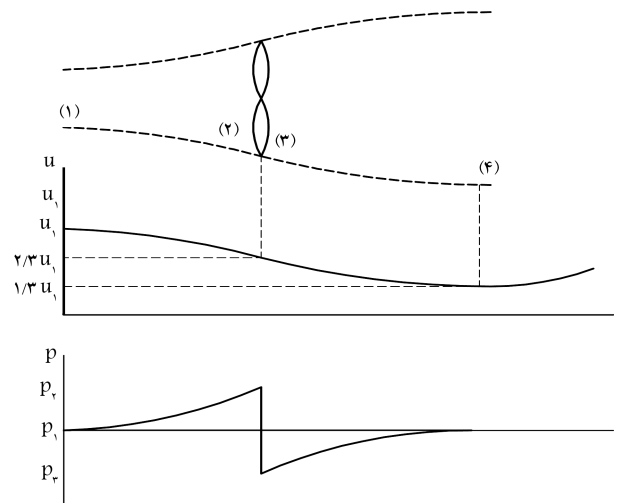
با توجه به آمار ارائه شده در جدول ۱ و ۲، و نیز روابط ارائه شده در این مقاله برای محاسبه‌ی قدرت تولیدی، بازدهی انرژی، در جدول ۳ این مقادیر برای ماه‌های دی، اردیبهشت، شهریور و نیز مجموع سالیانه نشان داده شده است.

جدول ۱. اطلاعات آماری تعداد مشاهدات وزش‌های باد در سرعت‌های مختلف برای شهر تهران.

| سرعت باد (m/s) | تعداد مشاهدات | | |
|-------------------|---------------|----------|--------|
| | دی | اردیبهشت | شهریور |
| بین ۱-۳ | ۵۹ | ۷۱ | ۱۱۹ |
| بین ۴-۶ | ۲۵ | ۵۳ | ۴۲ |
| بین ۷-۱۰ | ۱۵ | ۲۷ | ۶ |
| بین ۱۱-۱۶ | ۰ | ۱۲ | ۰ |
| بیشتر از ۱۶ | ۰ | ۰ | ۰ |

جدول ۲. مشخصات توربین بادی نصب شده در شهر تهران.

| مشخصات توربین بادی | علامت اختصاری | مقدار | واحد |
|-------------------------|---------------|----------------|-------------------|
| سرعت شروع چرخش | u_c | ۳٫۱ | (m/s) |
| سرعت نامی | u_r | ۱۳٫۸ | (m/s) |
| قدرت نامی | P_{er} | ۱۰ | (KW) |
| سرعت خاتمه چرخش | u_f | ۱۵٫۶ | (m/s) |
| تعداد پره | - | ۳ | - |
| سطح جاروشده توسط توربین | A_r | ۳۸٫۴۷ | (m ^۲) |
| بازه دمایی کارکرد | T | $-40 < T < 60$ | (°C) |
| ارتفاع برج توربین | H | ۲۴ | (m) |



شکل ۱. توزیع فشار و سرعت توربین بادی. [۱۷]

T_r دمای هوای سرد ورودی، و P_r فشار باد ورودی به توربین است. [۱۵]

$$(e_{ph})_{out} = (c_{p,a} + c_{p,v}) T_r \left[\frac{T_r}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T_r}{T_0} \right) \right] + (1 + 1/6078) R_a T_r \ln \left(\frac{P_r}{P_0} \right) \quad (14)$$

T_r دمای هوای سرد خروجی و P_r فشار باد خروجی از توربین است.

۳.۱.۲. اکسرژی شیمیایی

اکسرژی شیمیایی توربین بادی مطابق رابطه‌ی ۱۵ محاسبه می‌شود. [۱۵]

$$e_{ch} = R_a T_0 \left\{ (1/6078 \omega) \ln \left[\frac{(1+1/6078 \omega)}{(1+1/6078 \omega)} \right] + 1 \right\} + 1/6078 \ln \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (15)$$

اکسرژی شیمیایی ورودی و خروجی هم مثل اکسرژی فیزیکی و شبیه روابط ۱۳ و ۱۴ در محاسبات ورودی و خروجی لحاظ می‌شود. براساس داده‌های میانگین سالیانه باد، متوسط اکسرژی کل برابر است با: [۱۵]

$$\bar{e}_t = \bar{e}_{ph} + \bar{e}_{ch} + \bar{e}_{kinetic} \quad (16)$$

که در آن:

\bar{e}_{ph} : متوسط اکسرژی فیزیکی (kJ/kg);

\bar{e}_{ch} : متوسط اکسرژی شیمیایی (kJ/kg);

$\bar{e}_{kinetic}$: متوسط اکسرژی جنبشی (kJ/kg);

\bar{e}_t : متوسط اکسرژی کل (kJ/kg) است.

نرخ گرمای از دست رفته در توربین بادی از رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود. [۱۵]

$$Q_{loss} = (m^{\circ} c_{pa} (T_r - T_0)) \quad (17)$$

و در نهایت تولید آنتروپی از رابطه‌ی ۱۸ محاسبه می‌شود. [۱۵]

$$\dot{S}_{gen,ave} = \frac{1}{T_0} \left[(m^{\circ} (\bar{e}_{tin} - \bar{e}_{tout})) - P_{e,ave} + Q_{loss} \right] \quad (18)$$

که در آن، $\dot{S}_{gen,ave}$ متوسط نرخ تولید آنتروپی (W/K) است.

جدول ۳. مقادیر تولید آنتروپی، بازدهی اکسرژی برای توربین بادی براساس اطلاعات وزش باد و داده‌های سازنده توربین.

| η_{II} | $\dot{S}_{gen,ave}$ (m/s) | C (m/s) | k (m/s) | \bar{u} (m/s) | u_i (m/s) | m_i | u'_i (m/s) | |
|-------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------------|----------------|-------|-----------------|----------|
| ۰٫۳۷ | ۶٫۱۵ | ۴٫۸۲ | ۱٫۷۳ | ۴٫۲۹ | ۲٫۳۹ | ۵۹ | ۲ | دی |
| | | | | | ۵٫۷ | ۲۵ | ۵ | |
| | | | | | ۹٫۴۴ | ۱۵ | ۸٫۵ | |
| ۰٫۰۰۵ | ۱۴٫۳۸ | ۶٫۱۷ | ۱٫۵۹ | ۵٫۵۳ | ۱۴٫۶۳ | ۰ | ۱۳٫۵ | اردیبهشت |
| | | | | | ۲٫۳۹ | ۷۱ | ۲ | |
| | | | | | ۵٫۷ | ۵۳ | ۵ | |
| ۰٫۰۰۵ | ۱۴٫۳۸ | ۶٫۱۷ | ۱٫۵۹ | ۵٫۵۳ | ۹٫۴۴ | ۲۷ | ۸٫۵ | اردیبهشت |
| | | | | | ۱۴٫۶۳ | ۱۲ | ۱۳٫۵ | |
| | | | | | ۲٫۳۹ | ۱۱۹ | ۲ | |
| ۰٫۳ | ۳٫۶۷ | ۳٫۹۲ | ۲ | ۳٫۴۸ | ۵٫۷ | ۴۲ | ۵ | شهریور |
| | | | | | ۹٫۴۴ | ۶ | ۸٫۵ | |
| | | | | | ۱۴٫۶۳ | ۰ | ۱۳٫۵ | |
| ۰٫۳۶ | ۷٫۴۹ | ۵٫۱ | ۱٫۷۱ | ۴٫۵۵ | ۲٫۳۹ | ۷۵۲ | ۲ | سالانه |
| | | | | | ۵٫۷ | ۴۷۳ | ۵ | |
| | | | | | ۹٫۴۴ | ۱۶۱ | ۸٫۵ | |
| | | | | | ۱۴٫۶۳ | ۲۹ | ۱۳٫۵ | |

m_i تعداد دفعات وزش باد با یک سرعت معین.

\bar{u} متوسط سرعت باد (m/s).

σ انحراف معیار داده‌های سرعت باد در یک منطقه.

u_i سرعت باد معین اندازه‌گیری شده در ارتفاع ده متری زمین (m/s).

سرعت‌های داده شده، نرم‌افزار متلب سرعت‌های بهینه‌شده را چنین محاسبه می‌کند:

$$u_{c(optimom)} = 2.66 \text{ (m/s)} \quad u_{r(optimom)} = 11.57 \text{ (m/s)}$$

$$u_{f(optimom)} = 13.08 \text{ (m/s)}$$

۲.۴. نمایش پارامترهای بهینه با الگوریتم انبوه ذرات

با توجه به داده‌های جدول ۴ و همچنین ارائه‌ی سرعت‌های بهینه توسط الگوریتم انبوه ذرات مقادیر بهینه شده تولید آنتروپی و بازده قانون دوم ترمودینامیک توسط نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده می‌شود.

در نمودار ۱ محدوده‌ی سرعت نامی مطابق با رابطه‌ی ۲۲ در نظر گرفته شده است. در این نمودار سه بعدی براساس محدوده‌ی سه سرعت u_c ، u_r ، u_f و مقادیر تولید آنتروپی موجود در جدول ۴ از 3.95 (W/K) تا 9.59 (W/K) ترسیم شده است. با توجه به این که نرم‌افزار متلب با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات مقدار سرعت نامی بهینه را $u_{r(optimom)} = 11.57 \text{ (m/s)}$ به دست آورده، در پایین‌ترین نقطه از نمودار مذکور مقدار تولید آنتروپی بهینه برابر $\dot{S}_{gen(optimom)} = 5.66 \text{ W/K}$ به دست می‌آید.

در نمودار ۲ محدوده‌ی سرعت نامی مطابق با رابطه‌ی ۲۲ در نظر گرفته شده است. در این نمودار سه بعدی براساس محدوده‌ی سه سرعت u_c ، u_r ، u_f و مقادیر بازدهی اکسرژی موجود در جدول ۴ از 0.66% تا 1.9% ترسیم شده است. با توجه به این که مقدار سرعت نامی بهینه، با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات و در نرم‌افزار

در ادامه، بهینه‌سازی توربین بادی براساس آمار سالیانه توسط الگوریتم انبوه ذرات انجام خواهد شد. با توجه به این که شرایط محیط از عهده‌ی طراح خارج است، متوسط قدرت خروجی تابع پارامترهای زیر است:

$$p_{e,ve} = f(u_c, u_r, u_f, P_{er}) \quad (21)$$

۴. بهینه‌سازی توربین بادی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات

در این قسمت با استفاده از رمز نوشته شده در نرم‌افزار متلب برای الگوریتم انبوه ذرات، تولید آنتروپی و بازده قانون دوم ترمودینامیک به دست می‌آید که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. محدوده‌ی سرعت‌ها به منظور حل مسئله عبارت است از: [۱۸]

$$\begin{aligned} 0 < u_c < 5 \\ 10 < u_r < 20 \\ 10 < u_f < 25 \end{aligned} \quad (22)$$

۱.۴. سرعت‌های بهینه با الگوریتم انبوه ذرات

با کدنویسی به وسیله‌ی نرم‌افزار متلب و استفاده از الگوریتم انبوه ذرات در محدوده‌ی

جدول ۴. مقادیر تولید آنتروپی و بازدهی اکسرژی برای توربین بادی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات برای سه سرعت.

| $\eta_{\Pi u_c}$ | $\eta_{\Pi u_r}$ | $\eta_{\Pi u_f}$ | $\dot{S}_{gen,ave} u_c$ (W/K) | $\dot{S}_{gen,ave} u_r$ (W/K) | $\dot{S}_{gen,ave} u_f$ (W/K) | u_r (m/s) |
|------------------|------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| ۰٫۵۵ | ۰٫۶۶ | ۰٫۴۳ | ۳٫۹۵ | ۳٫۹۵ | ۴٫۹۲ | ۱۰ |
| ۰٫۵۶ | ۰٫۵۷ | ۰٫۴۹ | ۳٫۹۲ | ۵٫۱۱ | ۴٫۹۸ | ۱۱ |
| ۰٫۵۷ | ۰٫۴۹ | ۰٫۵۲ | ۴٫۰۳ | ۶٫۰۶ | ۴٫۸۷ | ۱۲ |
| ۰٫۵۷ | ۰٫۴۲ | ۰٫۵۳ | ۴٫۱۹ | ۶٫۸۴ | ۵٫۱۴ | ۱۳ |
| ۰٫۵۹ | ۰٫۳۷ | ۰٫۵۴ | ۴٫۳۸ | ۷٫۴۷ | ۵٫۴۷ | ۱۴ |
| ۰٫۶۰ | ۰٫۳۲ | ۰٫۵۴ | ۴٫۶۱ | ۸٫۰۰ | ۵٫۴۵ | ۱۵ |
| ۰٫۵۹ | ۰٫۲۸ | ۰٫۵۴ | ۴٫۸۷ | ۸٫۴۴ | ۵٫۴۴ | ۱۶ |
| ۰٫۵۶ | ۰٫۲۵ | ۰٫۵۴ | ۵٫۱۴ | ۸٫۸۱ | ۵٫۴۴ | ۱۷ |
| ۰٫۵۴ | ۰٫۲۳ | ۰٫۵۴ | ۵٫۴۳ | ۹٫۱۲ | ۵٫۴۴ | ۱۸ |
| ۰٫۵۱ | ۰٫۲۰ | ۰٫۵۴ | ۵٫۷۳ | ۹٫۳۹ | ۵٫۴۴ | ۱۹ |
| ۰٫۴۹ | ۰٫۱۹ | ۰٫۵۴ | ۶٫۰۱ | ۹٫۵۹ | ۵٫۴۴ | ۲۰ |

جدول ۵. مقادیر قبل و بعد از بهینه‌سازی و درصد پیشرفت سرعت‌ها، تولید آنتروپی و بازدهی اکسرژی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات.

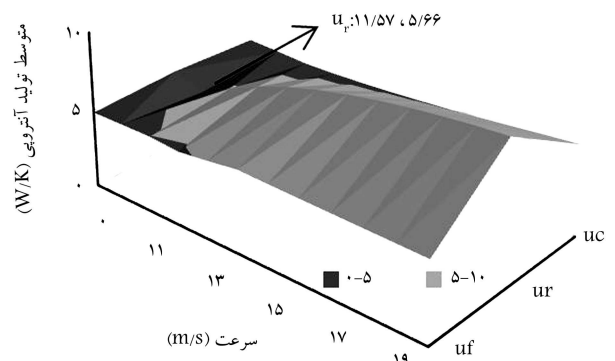
| η_{Π} | $\dot{S}_{gen,ave}$ (W/K) | u_r (m/s) | شرح |
|--------------|------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| ۰٫۳۶ | ۷٫۵ | ۱۳٫۸ | قبل از بهینه‌سازی |
| ۰٫۵۱ | ۵٫۶۶ | ۱۱٫۵۷ | بهینه‌سازی با الگوریتم انبوه ذرات |
| ۴۱٫۷ | -۲۴٫۵ | -۱۶٫۲ | درصد پیشرفت |

متلب معادل $u_{r(optimum)} = 11.57 \text{ (m/s)}$ به دست آمده، در بالاترین نقطه از نمودار مذکور مقدار بازدهی اکسرژی بهینه برابر $\eta_{\Pi(optimum)} = 0.51$ به دست می‌آید.

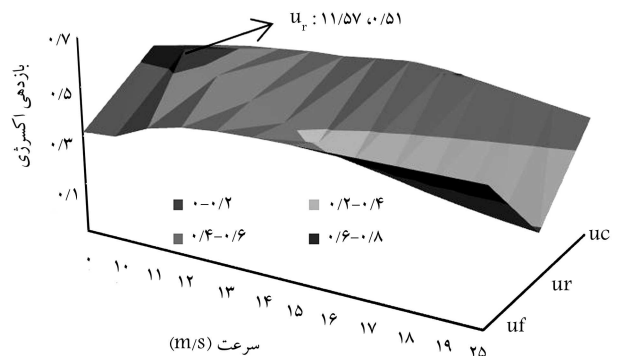
۳.۴. مقادیر قبل و بعد از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات

در جدول ۵ مقادیر قبل و بعد از بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم انبوه ذرات و درصد پیشرفت آنها در توربین بادی Bergey Excel-S، نصب شده در شهر تهران، برای آمار سالیانه ارائه شده است.

در جدول ۵ و نیز در نمودار ۳، مقادیر قبل از بهینه‌سازی از جدول ۳ و مقادیر بعد از بهینه‌سازی با الگوریتم انبوه ذرات از نمودارهای ۱ و ۲ به دست آورده شده است. در نهایت درصد اختلاف بین حالت قبل از بهینه‌سازی با حالت بعد از بهینه‌سازی با الگوریتم انبوه ذرات محاسبه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در بهینه‌سازی با الگوریتم انبوه ذرات نسبت به قبل از بهینه‌سازی، سرعت نامی به میزان ۱۶٫۲ درصد کاهش یافته است. همچنین تولید آنتروپی به میزان ۲۴٫۵ درصد کاهش، بازدهی اکسرژی به میزان ۴۱٫۷ درصد افزایش پیدا کرده است.



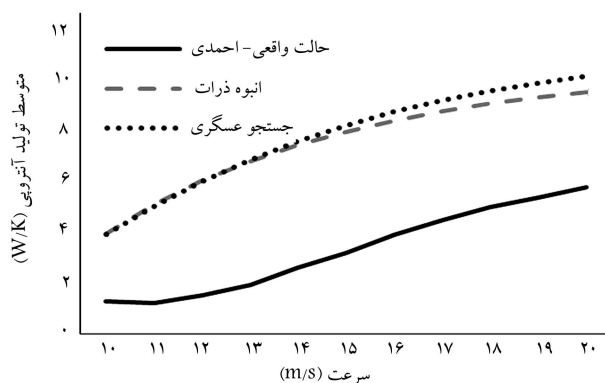
نمودار ۱. متوسط تولید آنتروپی بهینه توربین بادی Bergey Excel-S، براساس متوسط سالیانه داده‌های آماری شهر تهران، نسبت به سرعت بهینه نامی باد توسط الگوریتم انبوه ذرات.



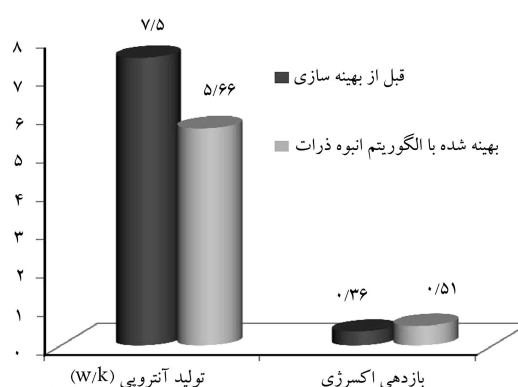
نمودار ۲. بازدهی بهینه اکسرژی توربین بادی Bergey Excel-S، براساس متوسط سالیانه داده‌های آماری شهر تهران، نسبت به سرعت نامی بهینه باد توسط الگوریتم انبوه ذرات.

جدول ۶. مقادیر قبل و بعد از بهینه‌سازی و درصد پیشرفت سرعت‌ها، تولید انرژی و بازدهی اکسرژی با استفاده از الگوریتم‌های جست‌وجو^[۸] و انبوه ذرات.

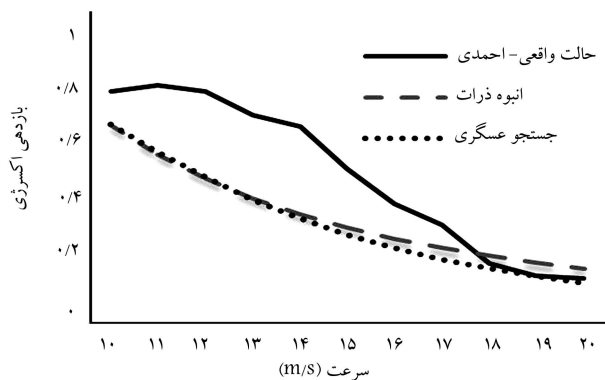
| ردیف | نوع فرایند | u_c (m/s) | u_r (m/s) | u_f (m/s) | $\dot{S}_{gen,ave}$ (W/K) | η_{II} |
|------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------|
| ۱ | قبل از بهینه‌سازی | ۳٫۲ | ۱۳٫۸ | ۱۵٫۶ | ۷٫۵ | ۰٫۳۶ |
| ۲ | بهینه‌سازی با الگوریتم انبوه ذرات | ۲٫۶۶ | ۱۱٫۵۷ | ۱۳٫۰۸ | ۵٫۶۶ | ۰٫۵۱ |
| ۳ | بهینه‌سازی با الگوریتم جست‌وجو | ۲٫۹۹ | ۱۳٫۳۱ | ۱۵٫۰۵ | ۷٫۱۴ | ۰٫۳۹ |
| ۴ | درصد مقایسه بین ردیف ۲ و ۱ | -۱۴٫۲ | -۱۶٫۱۶ | -۱۶٫۱۵ | -۲۴٫۵۳ | ۴۱٫۶۷ |
| ۵ | درصد مقایسه بین ردیف ۳ و ۱ | -۳٫۵۵ | -۳٫۵۵ | -۳٫۵۳ | -۴٫۸ | ۸٫۳۳ |
| ۷ | درصد مقایسه بین ردیف ۳ و ۲ | ۱۲٫۴۱ | ۱۵٫۰۴ | ۱۵٫۰۶ | ۲۶٫۱۵ | -۲۳٫۵ |



نمودار ۴. تولید انرژی و بازدهی بهینه توربین بادی Bergey Excel-S، نسبت به سرعت بهینه‌ی نامی باد^[۸] و انبوه ذرات.



نمودار ۳. مقادیر قبل و بعد از بهینه‌سازی برای تولید انرژی، بازدهی اکسرژی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات.



نمودار ۵. بازدهی اکسرژی توربین بادی Bergey Excel-S، نسبت به سرعت نامی باد^[۸] و انبوه ذرات.

می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

در الگوریتم انبوه ذرات که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است سرعت‌های بهینه آن عبارت است از:

$$u_{c(optimum)} = 2.66 \text{ (m/s)}$$

$$u_{r(optimum)} = 11.57 \text{ (m/s)}$$

$$u_{f(optimum)} = 13.08 \text{ (m/s)}$$

۵. مقایسه نتایج

نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان با نتایج تحقیقات احمدی و احیایی^[۱۵] که به مدل‌سازی ریاضی توربین بادی و همچنین نتایج تحقیقات عسگری و احیایی^[۸] که با الگوریتم جست‌وجو به بهینه‌سازی توربین پرداخته‌اند مقایسه کرد.

در نمودارهای ۴ و ۵ محدودی سرعت نامی بین $10 < u_r < 20$ در نظر گرفته شده است. در این نمودارها مشحنی‌های موجود مربوط به تولید انرژی و بازدهی اکسرژی بهینه شده توسط الگوریتم‌های انبوه ذرات، جست‌وجو^[۸] و حالت واقعی محاسبه شده در مطالعات قبلی^[۱۵] است و در محدوده‌ی سرعت u_r مقادیر تولید انرژی و بازدهی بین 1.25 (W/K) تا 10.20 (W/K) و بازدهی اکسرژی موجود بین 0.15 تا 0.78 ترسیم شده است. حال می‌توان مقادیر قبل از بهینه‌سازی و درصد پیشرفت تولید انرژی و بازدهی اکسرژی را با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات و جست‌وجو، نسبت به هم در جدول ۶ مشاهده کرد.

۶. نتیجه‌گیری

هدف از معادلات اکسرژی و الگوریتم انتخابی، دست‌یابی به بهترین بازدهی اکسرژی و همچنین کاهش تولید انرژی بوده است. لذا از نمودارهای ۳ تا ۵ و نیز جداول ۵ و ۶

$\dot{S}_{gen,ave}$: نرخ تولید آنتروپی (W/K)؛
 T : دما (K)؛
 T_0 : دمای مرجع (K)؛
 P_{at} : فشار اتمسفر (kPa)؛
 P : فشار (kPa)؛
 P_0 : فشار مرجع (kPa)؛
 U : انرژی جنبشی ذره (J)؛
 $u_{(z1)}$: سرعت باد در ارتفاع z_1 (m/s)؛
 $u_{(z2)}$: سرعت باد در ارتفاع z_2 (m/s)؛
 u_c : سرعت شروع چرخش (m/s)؛
 u_f : سرعت خاتمه چرخش (m/s)؛
 u_i : سرعت باد (m/s)؛
 u_r : سرعت نامی باد (m/s)؛
 \bar{u} : سرعت متوسط باد (m/s)؛
 z_1 : ارتفاع مرجع (m)؛
 z_2 : ارتفاع توربین (m).

علائم یونانی

ρ : چگالی (kg/m^3)؛
 σ : انحراف استاندارد؛
 η_{PI} : بازدهی اکسرژی.

که در آیتم بازدهی اکسرژی در الگوریتم انبوه ذرات مقدار 0.51 به دست آمده است که 41.7 درصد افزایش مشاهده می‌شود. همچنین در تولید آنتروپی نیز در الگوریتم انبوه ذرات مقدار آن (W/K) 5.66 به دست آمده که در این پارامتر نیز مقدار 24.5 درصد نسبت به قبل از بهینه‌سازی کاهش مشاهده می‌شود.

فهرست علائم

A_2 : سطح مقطع ورودی هوا (m^2)؛
 $c_{p,a}$: ضریب انتقال حرارت (kJ/kg.K)؛
 $c_{p,v}$: ضریب انتقال حرارت آب (kJ/kg.K)؛
 $e_{kinetic}$: اکسرژی جنبشی (kJ/kg.K)؛
 e_{ch} : اکسرژی شیمیایی (kJ/kg.K)؛
 e_{ph} : اکسرژی فیزیکی (kJ/kg.K)؛
 \bar{e}_t : اکسرژی کل (kJ/kg.K)؛
 m : جرم هوا (kg)؛
 m_i : تعداد مشاهدات سرعت باد؛
 \dot{m} : دبی جرمی (kg/sec)؛
 $P_{e,ave}$: متوسط توان خروجی ژنراتور (KW)؛
 Q_{los} : نرخ گرمای از دست رفته؛
 R_a : ثابت گازها (kJ/kg.K)؛

پانویسها

1. Matlab
2. genetic algorithm
3. objective function
4. search algorithm
5. rated
6. www.weather.i
7. exergy modeling of wind turbine
8. exergy efficiencies
9. www.Bergey.com
10. particle swarm algorithm (PSO)

منابع (References)

1. Fuglsang, P. and Madsen, H. "Optimization method for wind turbine rotors", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **80**(1-2), pp. 191-206 (1999).
2. Grady, S.A., Hussaini, M.Y. and Abdullah, M.M. "Placement of wind turbines using genetic algorithms", *Renewable Energy*, **30**(2), pp. 259-270 (2005).
3. Ozgener, O. and Ozgener, L. "Exergy and reliability analysis of wind turbine systems: A case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**(8), pp. 1811-1826 (2007).

4. Emami, A. and Noghreh, P. "New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithm", *Renewable Energy*, **35**(7), pp. 1559-1564 (2010).
5. Sareni, B., Abdelli, A., Roboam, X. and Tran, D.H. "Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator", *Renewable Energy*, **34**(12), pp. 2640-2650 (2009).
6. Pope, K., Dincer, I. and Naterer, G.F. "Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbine", *International Journal of Renewable Energy*, **35**(9), pp. 2103-2113 (September 2010).
7. Baskut, O., Ozgener, O. and Ozgener, L. "Effects of meteorological variables on exergetic efficiency of wind turbine power plants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(9), pp. 3237-3241 (2010).
8. Asgari, E. and Ehyaei, M.A. "Exergy and optimization analysis of wind turbine by genetic & searching algorithm", M.SC Thesis, Dezfoul, iran (2012).
9. Rezaei Mirghaed, M. and Roshandel, R. "Site specific optimization of wind turbines energy cost", *Energy Conversion and Management*, **73**, pp. 167-175 (2013).

10. Ashuri, T., Zaaijer, M.B., Martins, J.R.R.A., van Bussel, G.J.W. and van Kuik, G.A.M. "Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum levelized cost of energy", *Renewable Energy*, **68**, pp. 893-905 (2013).
11. Mortazavi, M., Soltani, M. and Motieyan, H. "A pareto optimal multiobjective optimization for a horizontalaxis wind turbine blade airfoil sections utilizing exergy analysis and neural networks", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **136**, pp. 62-72 (2015).
12. Fakehi, A., Ahmadi, S. and Mirghaed, M.R. "Optimization of operating parameters in a hybrid wind-hydrogen system using energy and exergy analysis: Modeling and case study", *Journal of Energy Conversion and Management*, **106**, pp. 1318-1326 (2015).
13. Shehata, A., Saqr, K., Xiao, O., Shehadeh, M. and Day, A. "Performance analysis of wells turbine blades using the entropy generation minimization method", *Renewable Energy*, **86**, pp. 1123-1133 (2016).
14. Wang, L., Kolios, H., UmiNishino, T.A., LucDelafin, P.L. and Bird, T. "Structural optimisation of verticalaxis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm", *Composite Structures*, **153**, pp. 123-138 (2016).
15. Ahmadi, A. and Ehyaei, M.A. "Exergy analysis of a wind turbine", *International Journal of Exergy*, **6**(4), pp. 457-475 (January 2009).
16. Eslami, E. "Exergy analysis of wind energy in Iran", *Proceedings of the Global Conference on Global Warming*, Lisbon, Portugal, pp. 1-6 (July 2011).
17. Johnson, G.L., *Wind Energy Systems, Electronic Edition*, Manhattan, KS, 449 p. (2001).
18. Motie Ghader, H., lotfi, S. and Seyed esfahlan, M., *An Overview of Some Intelligent Optimization Methods*, Islamic Azad University of Shabestar Branch, Chap. 4, 210 p., (in persian) (2010).