

تحلیل بازدهی انرژی و بهینه‌سازی توان خروجی توربین بادی بوسیله الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها

ناصر کردانی^۱، رضا یزدان پرست^۲

naser.kordani@umz.ac.ir

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه مازندران
۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نور

چکیده

افزایش توان تولیدی و بازدهی انرژی برای توربین بادی با بهینه‌سازی سرعت های شروع چرخش، نامی و خاتمه ی چرخش توسط الگوریتم گروهی مورچه‌ها هدف نهایی در این مقاله است. در این مقاله ابتدا به مدلسازی ریاضی توربین بادی پرداخته شده و در نهایت تابع هدف بدست می‌آید. سپس با گرد آوری داده های آماری توربین مذکور توسط کد کامپیوتری شبکه عصبی، توربین بادی در نرم افزار متلب مدل سازی شده و نتایج آن بصورت جداول و دیاگرام هایی ارائه می‌گردد. با بررسی نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم مورچه‌گان و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات در مقاله تحلیل انرژی توربین بادی و همچنین مقاله تحلیل انرژی توربین بادی و بهینه‌سازی توربین باد توسط الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجو که توربین مذکور را بهینه‌سازی نموده اند، در نهایت افزایش ۶۵/۶۳ درصدی در توان خروجی و ۶۱/۵۴ درصد افزایش در بازدهی انرژی در الگوریتم مورچه‌گان مشاهده گردید.

واژگان کلیدی: توان خروجی، توربین بادی، بازدهی انرژی، الگوریتم کلونی مورچه‌گان.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۳/۳۱
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۷/۰۳

۱ - مقدمه

پارامترهای اندازه و طرح مزرعه توربین های بادی با توجه به منابع باد و جنبه های اقتصادی فعالیت کرده اند [۹]. عاشوری و همکاران در یک روش برای بهینه سازی طراحی چند رشته ای از توربین های بادی دریایی در سطح سیستم فعالیت کرده اند [۱۰].

مرتضوی و همکاران در یک مطالعه چند هدفه برای به دست آوردن یک مجموعه بهینه پارتو از راه حل، برای مشخصات هندسی مقاطع ایرفویل برای ۱۰ متر تیغه توربین بادی با محور افقی، الگوریتم ژنتیک را مورد استفاده قرار داده اند [۱۱]. فاکچی و همکاران از سیستم انرژی تجدید پذیر ترکیبی بر اساس باد، الکتروولایزر، PEM سلول سوختی از نظر مدل مفهومی، و همچنین، تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی استفاده کرده اند [۱۲].

شهابا و همکاران در خصوص مفهوم چاه توربین و استفاده از نوسانات تولیدی ستون هوا بیش از امواج دریایی به دریاو یک توربین را مورد بررسی قرار داده اند [۱۳]. ونگ و همکاران در خصوص تیغه های توربین بادی تحقیق کرده اند [۱۴]. احمدی و احیائی به بررسی و تحلیل انرژی و اکسرژی توربین بادی پرداخته اند. این تیم ابتدا به مدل سازی ریاضی توربین بادی پرداخته و سپس با آمارهای هواشناسی به آنالیز انرژی و اکسرژی بر اساس ۳ پارامتر اصلی سرعت باد، سرعت کاتین^۲ که مبین سرعت بادی است که می بایست وزش نموده تا توربین بادی شروع به حرکت نماید، سرعت ریتد^۳ که متناظر با ماکزیمم قدرت تولیدی توسط توربین بادی است و از سرعت های مهم دیگر سرعت فورلین^۴ است که اگر سرعت باد به آن مقدار برسد توربین بادی متوقف می گردد [۱۵]. این سه سرعت به عنوان سرعت های اساسی در کاتالوگ سازنده هر توربین بادی مشخص شده است و به عنوان پارامترهای طراحی مورد بررسی قرار می گیرند. در این مقاله با توجه به خاصیت الگوریتم مورچگان که به اصطلاح هوش جمعه گفته می شود به آنالیز انرژی و بهینه نمودن سرعت های توربین پرداخته شده است که در نهایت افزایش ۶۵/۶۳ درصدی در توان خروجی و ۶۱/۵۴ درصد افزایش در بازدهی انرژی حاصل شده است، که این نتایج با نتایج تحقیقات در مقاله های تحلیل انرژی توربین بادی و همچنین تحلیل انرژی و بهینه سازی توربین باد توسط الگوریتم ژنتیک و

توربین های بادی سیستم هایی هستند که به وسیله نیروی باد، باعث چرخش ژنراتور شده و برق تولید می کنند. معمولاً این سیستم ها بر روی برج های بلند قرار داده شده تا از موانع زمینی مانند ساختمان ها، تپه ها و درخت ها تأثیر نپذیرند. کاربرد توربین های بادی بیشتر در زمینه روش های تولید موضعی قدرت بوده که در محدوده های مختلف، برق تولید می کنند. این روش ها به علت جای زیادی که اشغال می کنند معمولاً در مناطق شهری کاربرد نداشته و بیشتر در مزارع به کار می روند. امروزه تحقیقات بسیاری در زمینه توربین های بادی انجام شده است و اکثر تحقیقات ذکر شده در زمینه افزایش بازدهی ژنراتور، پره ها، سرعت روتور، کنترل بار الکتروسیسته توربین های بادی، مزرعه توربین و آنالیز های انرژی و اکسرژی صورت می گیرد که در جهت کاستن قیمت برق تولیدی توسط این توربین ها است: فوجلسانگ و همکاران که روش های بهینه کردن روتور توربین بادی را بررسی و آنالیز کرده اند و روش های طراحی بر پایه بهینه سازی عددی و چندین مدل محاسباتی است [۱].

گریدی و همکاران مکان یابی یک توربین بادی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ مورد بررسی قرار دادند و مشخص گردید می توان پیش بینی دقیقی در مورد مکان مناسب توربین بادی بدست آورد [۲]. اوزگنر و همکاران، آنالیز اکسرژی و قابلیت اطمینان سیستم های توربین بادی را در دانشگاه از میر ترکیه برای یک موسسه خورشیدی مورد بررسی قرار دادند [۳]. امامی و همکاران، موقعیت بهینه نصب توربین بادی در مزارع بادی را با نوشتن یک کد جدید و همچنین استفاده از تابع هدف در الگوریتم ژنتیک به وسیله نرم افزار مطلب بدست آورده اند [۴].

سارنی و همکاران، بر روی ساده سازی و بهینه سازی ژنراتور توربین بادی کار کرده اند [۵]. دینسر و همکاران بازده انرژی و اکسرژی را در توربین بادی با محور عمودی و افقی با هم مقایسه کرده اند [۶]. اوزگنر و همکاران اثر تغییرات جوی هوا در بازده اکسرژی توربین بادی نیروگاه WTPPS را بررسی نموده اند [۷]. عسگری و احیائی به بهینه سازی توربین بادی توسط الگوریتم ژنتیک و جستجو پرداخته اند [۸]. رضایی و همکاران در خصوص توسعه یک مدل برای بهینه سازی

³ Rated

⁴ Furling

¹ Genetic Algorithm

² Cut-in

سرعت u_1 و فشار P_1 وارد توربین می‌شود [۶ و ۱۵]. مطابق با شکل (۱)، هوا در ناحیه (۱) توربین به قطر اولیه d_1 ، سرعت u_1 و فشار P_1 که تغییر شکل ندارد، وارد می‌شود. به علت بزرگ شدن قطر توربین در ناحیه (۲)، سرعت هوا کاهش پیدا کرده و فشار هوا در جلوی توربین به حد ماکزیمم خود می‌رسد، در حالی که در پشت توربین کمتر از فشار اتمسفر می‌شود. افزایش فشار در جلوی توربین سبب می‌شود که توربین قسمتی از انرژی جنبشی را به انرژی پتانسیل تبدیل کند. در شرایط ایده آل هنگامی که ماکزیمم توان انتقال پیدا می‌کند روابط زیر در توربین باید برقرار باشد [۶ و ۱۵].

$$\begin{cases} u_2 = u_3 = \frac{2}{3}u_1 \\ u_4 = \frac{1}{3}u_1 \\ A_2 = A_3 = \frac{3}{2}A_1 \quad A_4 = 3A_1 \end{cases} \quad (۶)$$

اگر قدرت باد ورودی به توربین را P_1 و قدرت باد خروجی از توربین را P_4 فرض کنیم در نتیجه تفاوت بین قدرت باد ورودی و خروجی که همان قدرت مکانیکی ایده آل^۳ توربین می‌باشد برابر است با [۶ و ۱۵]:

$$P_{m,ideal} = (P_1 - P_4) = \frac{1}{2} \rho (A_1 u_1^3 - A_4 u_4^3) \quad (۷)$$

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{8}{9} A_1 u_1^3 \right)$$

اگر بخواهیم قدرت مکانیکی توربین بر اساس سطح مقطع جارو شده توسط پره های توربین بادی بیان گردد با توجه به شکل (۱) و رابطه شماره (۷) داریم [۶ و ۱۵]:

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left[\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 \right) u_1^3 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} A_2 u_1^3 \right) \quad (۸)$$

فاکتور $\frac{16}{27} = 0.593$ در معادله (۸) ضریب بتز^۴ نامیده می‌شود. این ضریب نشان می‌دهد که در توربین های واقعی نمی‌توان بیشتر از ۵۹/۳ درصد توان خروجی دریافت نمود و معمولاً در توربین‌ها توان خروجی به دلیل افت های مکانیکی کمتر از ۵۹/۳ درصد است. این ضریب را معمولاً با C_p نشان می‌دهند و به آن ضریب عملکرد می‌گویند. حال اگر بخواهیم قدرت مکانیکی توربین را بر اساس ضریب عملکرد بیان کنیم خواهیم داشت [۶ و ۱۵]:

جستجو^۱ مقایسه و درصد های پیشرفت آن نیز مشخص شده است. اکثر داده‌ها و نتایج بدست آمده بر اساس توربین نوع برجی اکسل- اس ساخت امریکا است. محدوده قدرت این توربین‌ها بین چند کیلو وات تا ۵ مگاوات است. کلیه تحلیل‌ها در این مقاله برای شهر تهران صورت پذیرفته است که آمار و اطلاعات سرعت باد برای شهر تهران در سالهای اخیر از سایت هواشناسی گرفته شده است [۱۷ و ۱۵].

۲- مدل سازی انرژی

۲-۱- مدل سازی انرژی در توربین بادی

انرژی جنبشی ذره ای از هوا به جرم m و سرعت u در راستای χ برابر است با [۶ و ۱۵]:

$$U = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} (\rho A x) u^2 \quad (۱)$$

که A سطح مقطع عبور هوا بر حسب (m^2) ، ρ دانسیته هوا بر حسب $(\frac{kg}{m^3})$ ، χ طول جریان هوای عبوری از توربین بر حسب (m) و u سرعت هوا بر حسب (m/s) است [۶ و ۱۵].

نسبت مشتق انرژی جنبشی به زمان، قدرت باد^۲ نامیده می‌شود که آن را با P_w نشان می‌دهند. قدرت باد برابر است با:

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (۲)$$

ρ دانسیته هوا را می‌توان از فرمول زیر بدست آورد.

$$\rho = 3.485 \frac{P}{T} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) فشار بر حسب kPa و T دما بر حسب K است. در نتیجه با استفاده از روابط شماره (۲) و (۳) قدرت باد برابر است با:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u^3 = \frac{1.742}{T} p A u^3 \quad (۴)$$

در شرایط استاندارد برای هوا، فشار برابر $101.3 kPa$ و دما برابر $273 K$ است. در نتیجه قدرت باد در شرایط استاندارد برابر است با:

$$P_w = 0.647 A u^3 \quad (۵)$$

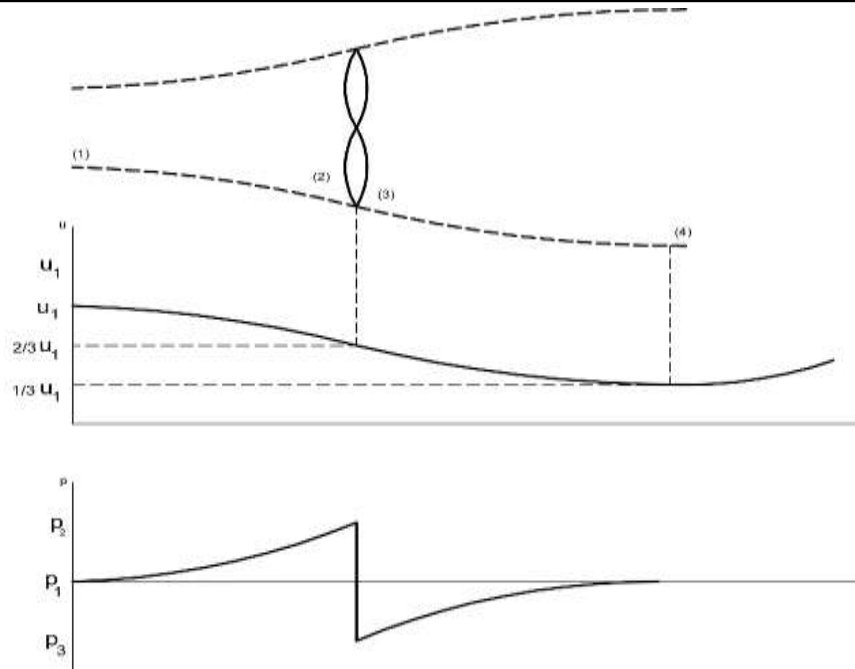
شکل (۱) مناطق مختلف توربین بادی ایده آل و توزیع سرعت و فشار را در آن نشان می‌دهد. جریان آزاد هوا با

³ Actual Mechanical Power

⁴ Betz Coefficient

¹ Searching Algorithm

² Power in the Wind



شکل (۱) توزیع فشار و سرعت توربین بادی [۱۶].

$$P_e = \eta_g P_t \quad (11)$$

با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) می‌توان معادله‌ای نوشت که توان خروجی از ژنراتور را بر حسب قدرت باد بیان می‌کند و این معادله برابر است با:

$$P_e = C_{pr} \eta_{mr} \eta_{gr} \frac{\rho}{2} A u_r^3 \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، C_{pr} ضریب عملکرد، η_{mr} بازدهی انتقال دهنده‌ها و η_{gr} بازدهی ژنراتور است. همچنین مقدار η_o نشان می‌دهیم.

$$\eta_o = C_{pr} \eta_{mr} \eta_{gr} \quad (13)$$

همانطور که می‌دانیم در توربین بادی سه سرعت اساسی وجود دارد که عبارتند از:

۱- سرعت شروع چرخش (Cut-in wind speed) : u_c

۲- سرعت نامی (Rated wind speed) : u_r

۳- سرعت خاتمه چرخش (Furling wind speed) : u_f

با فرض اینکه سرعت باد ورودی به توربین u باشد می‌توان گفت:

(۱) اگر سرعت باد ورودی به توربین کمتر از سرعت شروع چرخش باشد توربین به حرکت در نمی‌آید و در نتیجه توان خروجی از ژنراتور صفر است.

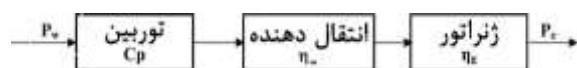
(۲) اگر سرعت باد ورودی به توربین بین سرعت شروع چرخش و سرعت نامی باشد توان خروجی از ژنراتور برابر خواهد بود با:

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) = C_p P_w \quad (9)$$

معمولاً ضریب عملکرد ثابت نیست و تغییرات آن به سرعت باد، سرعت چرخش توربین و پارامترهای پره‌های توربین بادی همچون زاویه راس پره و زاویه نصب بستگی دارد. در توربین‌های بادی اجزایی مثل شفت‌ها و گیربکس‌ها نیرو را از قسمتی به قسمت دیگر انتقال می‌دهند که این انتقال می‌تواند با افزایش یا کاهش سرعت و قدرت همراه باشد. اگر توان خروجی انتقال دهنده‌ها را با P_t نشان دهیم، مقدار آن برابر است با حاصل ضرب توان مکانیکی توربین در بازدهی انتقال دهنده‌ها. توان مکانیکی توربین را با P_m و بازدهی انتقال دهنده‌ها را با η_m نشان می‌دهیم [۱۵ و ۶].

$$P_t = \eta_m P_m \quad (9)$$

جهت درک بهتر مطالب بالا شکل (۲) ترسیم شده که توان خروجی ژنراتور را بر حسب قدرت باد نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲) توان خروجی ژنراتور، P_e است که مقدار آن برابر است با حاصل ضرب توان خروجی انتقال دهنده‌ها در بازدهی ژنراتور. توان خروجی انتقال دهنده‌ها را با P_t و بازدهی ژنراتور را با η_g نشان می‌دهیم [۱۵ و ۶].



شکل (۲) توان خروجی ژنراتور بر حسب قدرت باد [۱۶].

ویبال یک تابع دو پارامتری و تابع توزیع سرعت ریلی یک تابع تک پارامتری است. دو پارامتر تابع توزیع سرعت ویبال k ، c نام دارند که c ضریب اندازه و k ضریب شکل است. در روابط (۲۱) و (۲۲) این دو پارامتر به شرح زیر تعریف می‌گردند که عبارتند از [۱۶ و ۱۵]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{u}} \right)^{-1.086} \quad (21)$$

$$c = \frac{\bar{u}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (22)$$

$$\Gamma = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{y-1} dx \quad (23)$$

$$y = 1 + \frac{1}{k} \quad (24)$$

که در آن Γ تابع گاما است. برای محاسبه وزش باد در فاصله های غیر از ده متر از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۵ و ۱۶]:

$$u_{(z_2)} = u'_{(z_1)} \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^{\beta} \quad (25)$$

$u_{(z_2)}$: سرعت باد در ارتفاع z_2 بر حسب (m/s)

$u'_{(z_1)}$: سرعت باد در ارتفاع z_1 بر حسب (m/s)

z_1, z_2 : ارتفاع اندازه گیری سرعت باد بر حسب (m)

و β نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۵ و ۱۶]:

$$\beta = a - b \log_{10} u'_{(z_1)} \quad (26)$$

که در آن a, b در طول روز دارای مقادیر ۰/۱۱ و ۰/۰۶۱ و در طول شب دارای مقادیر ۰/۳۸ و ۰/۲۱ می‌باشند [۱۵ و ۱۶]. حال اگر بخواهیم مهمترین پارامتر یک سیستم بادی در قسمت مدلسازی انرژی را حساب کنیم باید متوسط توان خروجی آن را که با Pe, ave نشان می‌دهند، محاسبه گردد. برای این کار باید از تابع توان خروجی ژنراتور بر حسب سرعت باد انتگرال گرفت. در نتیجه متوسط توان خروجی برابر است با:

$$Pe, ave = \int P_e f(u) du \quad (27)$$

که $f(u)$ تابع توزیع سرعت باد است و مقدار آن برابر است با [۱۵ و ۱۶]:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \quad (28)$$

با توجه به روابط (۲۰) تا (۲۲) و همچنین رابطه (۲۷)، متوسط توان خروجی توربین بادی برابر است با [۱۵ و ۱۶]:

$$P_e = a + bu^k \quad (14)$$

(۳) اگر سرعت باد ورودی به توربین بین سرعت نامی و سرعت خاتمه چرخش باشد توان خروجی از ژنراتور برابر است با:

$$P_e = P_{er} \quad (15)$$

(۴) اگر سرعت باد ورودی به توربین بیشتر از سرعت خاتمه چرخش باشد به علت سرعت زیاد و خطرات آن حرکت توربین متوقف شده و در نتیجه توان خروجی از ژنراتور صفر است.

با توجه به موارد بالا برای توان خروجی ژنراتور در توربین بادی داریم:

$$\begin{cases} (u < u_c) & P_e = 0 \\ (u_c < u < u_f) & P_e = a + bu^k \\ P_e = P_{er} & (u_c < u < u_f) \\ P_e = 0 & (u > u_f) \end{cases} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، P_{er} قدرت نامی بر حسب (kW)، u_c سرعت شروع چرخش بر حسب (m/s)، u_f سرعت نامی بر حسب (m/s) و k ضریب شکل ویبال هستند. ضرایب a و b نیز برابرند با [۱۵ و ۱۶]:

$$a = \frac{P_{er} u_c^k}{u_c^k - u_r^k} \quad (17)$$

$$b = \frac{P_{er}}{u_r^k - u_c^k} \quad (18)$$

برای بدست آوردن متوسط توان خروجی نیازمند روابط دیگری می‌باشیم که عبارتند از [۱۵ و ۱۶]

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^w m_i u_i \quad (19)$$

\bar{u} : متوسط سرعت باد بر حسب (m/s)

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^w m_i u_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^w m_i u_i \right)^2 \right] \quad (20)$$

σ : انحراف معیار داده های سرعت باد در یک منطقه،

m_i : تعداد دفعات وزش باد با یک سرعت معین،

w : کل دفعات وزش باد با یک سرعت معین،

n : کل تعداد داده ها،

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

برای منحنی سرعت باد چندین تابع دانسیته وجود دارد که متداول ترین آنها تابع ویبال و ریلی است. تابع توزیع سرعت

جدول (۱) مشخصات توربین بادی نصب شده در شهر تهران.

واحد	مقدار	علامت اختصاری	مشخصات توربین بادی
(m/s)	۳/۱	u_c	سرعت شروع چرخش
(m/s)	۱۳/۸	u_r	سرعت نامی
(kW)	۱۰	P_{er}	قدرت نامی
(m/s)	۱۵/۶	u_f	سرعت خاتمه چرخش
-	۳	-	تعداد پره
(m ²)	۳۸/۴۷	A_2	سطح جارو شده توسط توربین
(°C)	$-۴۰ < T < ۶۰$	T	دامنه دمای کارکرد
(m)	۲۴	H	ارتفاع برج توربین

جدول (۲) اطلاعات آماری تعداد مشاهدات وزش های باد در سرعت های مختلف برای شهر تهران [۱۹].

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

۴- بهینه سازی توربین با الگوریتم مورچگان^۱

جهت استفاده از الگوریتم مورچگان [۱۸-۲۰] و از خاصیت موجود در حرکت مورچگان بهره برده شده است که به اصطلاح به این نوع رفتار هوش جمعی گفته می شود. هوش جمعی به این منظور است که تمام تصمیمات مسیریابی و جمع آوری آذوقه از یک مورچه به مورچه دیگر انتقال پیدا می کند و تعداد آنها در یک گروه می تواند به ۳۰ میلیون نیز برسد. حال جهت رسیدن به جواب بهینه و حل مسئله، محدوده ای را بعنوان بازه سرعتها تعریف می نماییم. لازم به ذکر است هدف از دادن محدوده سرعت، جستجو و بدست آوردن جواب های بهینه در این بازه است:

$$\begin{aligned} 0 < u_c < 5 \\ 10 < u_r < 20 \\ 10 < u_f < 25 \end{aligned} \quad (32)$$

$$P_{e,ave} = P_{er} \left\{ \frac{\exp\left(-\left(\frac{u_c}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{u_r}{c}\right)^k\right)}{\left(\frac{u_r}{c}\right)^k - \left(\frac{u_c}{c}\right)^k} - \exp\left(-\left(\frac{u_f}{c}\right)^k\right) \right\} \quad (29)$$

۲-۲- بازدهی انرژی

نسبت کار واقعی به انرژی باد ورودی را بازدهی انرژی یا بازدهی قانون اول گویند [۱۵و۱۶].

$$\eta_I = \frac{W_{OUT}}{W_{IN}} = \frac{P_{e,ave}}{P_{er}} \quad (30)$$

که η_I بازدهی انرژی (بازدهی قانون اول) است.

۳- مشخصات توربین بادی

توربین های بادی بر اساس توان خروجی مشخصات متفاوتی دارند. معمولاً مهمترین داده های توربین های بادی که توسط کارخانه سازنده در کاتالوگ آنها ارائه می گردد، شامل سرعت شروع چرخش، سرعت و توان نامی، سرعت خاتمه چرخش و ارتفاع توربین بادی است. در نتیجه با مراجعه به سایت کارخانه سازنده توربین بادی می توان مشخصات توربین بادی مدل برجی اکسل- اس را مشاهده نمود. برای درک بهتر توسط خواننده در جدول (۱) تعدادی از پارامتر های مهم آن ارائه شده است.

با توجه به آمار ارائه شده در جدول (۱) و (۲) همچنین روابط ارائه شده در این مقاله برای قدرت تولیدی و بازدهی انرژی، جدول (۳) که در صفحه بعد نمایش داده شده است، مقادیر آنها را برای ماه های دی، اردیبهشت، شهریور و سالیانه نشان می دهد.

در جدول (۳) m_i تعداد دفعات وزش باد با یک سرعت معین، \bar{u} متوسط سرعت باد بر حسب (m/s)، σ انحراف معیار داده های سرعت باد در یک منطقه، u_i سرعت باد معین اندازه گیری شده در ارتفاع ده متری زمین است.

در ادامه بهینه سازی توربین بادی بر اساس آمار سالیانه توسط الگوریتم کلونی مورچه ها انجام خواهد شد. با توجه به اینکه شرایط محیط، از عهده طراح خارج می باشد، متوسط قدرت خروجی تابع پارامتر های زیر می باشد.

$$P_{e,ve} = f(u_c, u_r, u_f, P_{er}) \quad (31)$$

¹ Ant Algorithm

جدول (۳) مقادیر توان خروجی و بازدهی انرژی برای توربین بادی بر اساس اطاعات وزش باد و داده های سازنده توربین.

η_1	$P_{e,ave}$	C	\bar{u}	u_i	m_i	u_i'	ماه
	(kW)			(m/s)		(m/s)	
۰/۱۱	۱/۰۹	۴/۸۲	۴/۲۹	۲/۳۹	۵۹	۲	دی
				۵/۷		۵	
				۹/۴۴		۸/۵	
				۱۴/۶۳		۱۳/۵	
۰/۲	۱/۹۸	۶/۱۷	۵/۵۳	۲/۳۹	۷۱	۲	اردیبهشت
				۵/۷		۵	
				۹/۴۴		۸/۵	
				۱۴/۶۳		۱۳/۵	
۰/۰۵	۰/۴۶	۳/۹۲	۳/۴۸	۲/۳۹	۱۱۹	۲	شهریور
				۵/۷		۵	
				۹/۴۴		۸/۵	
				۱۴/۶۳		۱۳/۵	
۱۳/۰	۱/۲۷	۵/۱	۴/۵۵	۲/۳۹	۷۵۲	۲	سالانه
				۵/۷		۵	
				۹/۴۴		۸/۵	
				۱۴/۶۳		۱۳/۵	

جدول (۴) مقادیر قدرت خروجی، تولید انرژی و بازدهی قانون اول را بر اساس سرعت های نامی u_c ، u_r ، u_f برای توربین بادی مدل برجی اکسل-اس، نصب شده در شهر تهران، برای آمار سالیانه با کد نویسی الگوریتم مورچگان را نشان می دهد. لازم به ذکر است محدوده سرعت نامی در نظر گرفته شده مطابق با رابطه (۳۰) است.

۵- ارائه سرعت های بهینه با الگوریتم مورچگان

با کد نویسی و استفاده از الگوریتم مورچگان در محدوده سرعت نامی $10 < u_r < 20$ ، نرم افزار متلب سرعت های بهینه شده را به شرح زیر ارائه می نماید:

$$u_{c(optimum)} = 3/18 \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$u_{r(optimum)} = 10/15 \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$u_{f(optimum)} = 13/83 \left(\frac{m}{s} \right)$$

۵-۱- نمایش پارامتر های بهینه با الگوریتم مورچگان

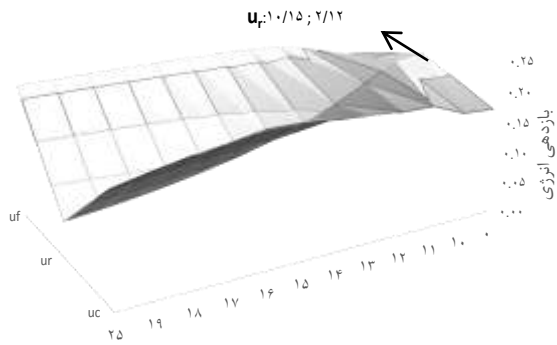
با توجه به داده های جدول (۴) و همچنین ارائه سرعت های بهینه توسط الگوریتم مورچگان، مقادیر بهینه شده قدرت خروجی، و بازده قانون اول ترمودینامیک توسط شکل های (۳) و (۴) نشان داده می شود.

با توجه به اینکه اطلاعات آماری وزش و سرعت باد بر روی نقطه بهینه توربین بادی اثر دارد، از متوسط اطلاعات سالیانه هوا استفاده می شود. در این قسمت با استفاده از کد متلب برای الگوریتم مورچگان و نیز با دادن بازه سرعت نامی به برنامه، قدرت خروجی بازده قانون اول ترمودینامیک بدست می آید که نتایج آن در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴) مقادیر توان خروجی، بازدهی انرژی برای توربین

بادی با استفاده از الگوریتم مورچگان برای سه سرعت.

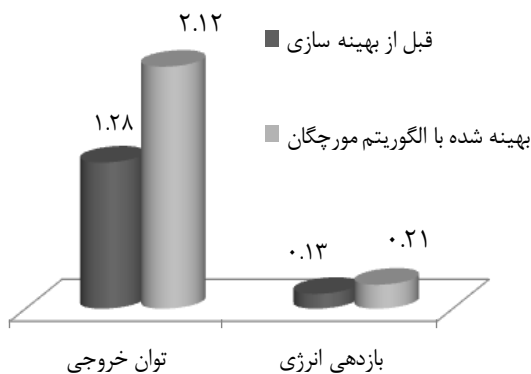
η_1	η_1	η_1	$P_{e,ave}$	$P_{e,ave}$	$P_{e,ave}$	u_r
			u_c	u_r	u_f	
u_c	u_r	u_f	(kW)	(kW)	(kW)	(m/s)
۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۱۸	۱/۶۳	۲/۱۷	۱/۷۷	۱۰
۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۰	۱/۸۱	۱/۸۵	۱/۹۸	۱۱
۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۱/۹۹	۱/۵۸	۲/۰۹	۱۲
۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۲۱	۲/۱۸	۱/۳۷	۲/۱۴	۱۳
۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۲۲	۲/۳۶	۱/۱۹	۲/۱۵	۱۴
۰/۲۲	۰/۱	۰/۲۲	۲/۵۲	۱/۰۴	۲/۱۶	۱۵
۰/۲۲	۰/۰۹	۰/۲۲	۲/۶۷	۰/۹۲	۲/۱۶	۱۶
۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۲۲	۲/۸۰	۰/۸۲	۲/۱۶	۱۷
۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۲۲	۲/۸۹	۰/۷۴	۲/۱۶	۱۸
۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۲۲	۲/۹۳	۰/۶۶	۲/۱۶	۱۹
۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۲۲	۲/۹۳	۰/۶۱	۲/۱۶	۲۰



شکل (۴) بازدهی بهینه انرژی توربین بادی برجی اکسل-اس، براساس متوسط سالیانه داده های آماری شهر تهران، نسبت به سرعت نامی بهینه باد توسط الگوریتم مورچگان.

جدول (۵) مقادیر قبل و بعد از بهینه سازی و درصد پیشرفت سرعت، توان خروجی و بازدهی انرژی با استفاده از الگوریتم مورچگان.

η_1	$P_{e,ave}$ (kW)	u_r (m/s)	شرح
۰/۱۳	۱/۲۸	۱۳/۸	قبل از بهینه سازی
۰/۲۱	۲/۱۲	۱۰/۱۵	بهینه سازی با الگوریتم مورچگان
۶۱/۵۴	۶۵/۶۳	-۲۶/۴۵	درصد پیشرفت



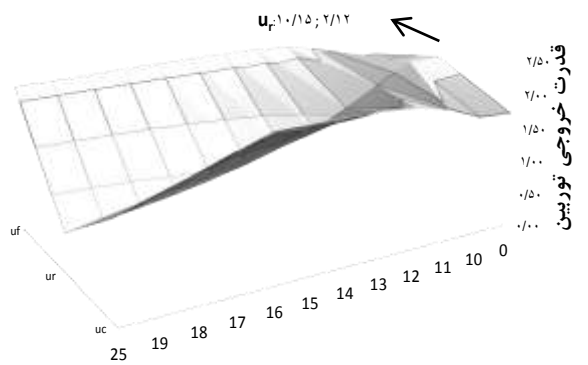
شکل (۵) مقادیر قبل و بعد از بهینه سازی برای توان خروجی و بازدهی انرژی با استفاده از الگوریتم مورچگان.

در نهایت درصد اختلاف بین حالت قبل از بهینه سازی با حالت بعد از بهینه سازی با الگوریتم مورچگان محاسبه شده است. همانطور که در جدول مشخص است در بهینه سازی با الگوریتم مورچگان نسبت به قبل از بهینه سازی، سرعت نامی به میزان ۲۶/۴۵ درصد کاهش پیدا کرده اند. همچنین توان خروجی به میزان ۶۵/۶۳ درصد افزایش و بازدهی انرژی به میزان ۶۱/۵۴ درصد افزایش پیدا کرده است.

در شکل (۳) محدوده سرعت نامی مطابق با رابطه (۳۰) در نظر گرفته شده است. در این نمودار سه بعدی براساس محدوده سه سرعت u_f ، u_r ، u_c و مقادیر توان خروجی موجود در جدول (۴) از ۲/۹۳ (kW) تا ۰/۶۱ (kW) ترسیم شده است. با توجه به اینکه مقدار سرعت نامی بهینه در نرم افزار متلب با الگوریتم مورچگان $u_{r(optiomom)} = 10/15 \frac{m}{s}$ بدست آمده است، در بالاترین نقطه از نمودار مذکور مقدار توان خروجی بهینه $P_{e(optiomom)} = 2/12$ (kW) حاصل می شود. در شکل (۴) محدوده سرعت نامی مطابق با رابطه (۳۰) در نظر گرفته شده است. در این نمودار سه بعدی براساس محدوده سه سرعت u_f ، u_r ، u_c و مقادیر بازدهی انرژی موجود در جدول (۴) از ۰/۲۲ تا ۰/۰۶ ترسیم شده است. با توجه به اینکه نرم افزار متلب با استفاده از الگوریتم مورچگان مقدار سرعت نامی بهینه را $u_{r(optiomom)} = 10/15 \frac{m}{s}$ بدست آورده است، در بالاترین نقطه از نمودار مذکور مقدار بازدهی انرژی بهینه $\eta_{1(optiomom)} = 0/21$ بدست می آید.

۲-۵ مقادیر قبل و بعد از بهینه سازی با استفاده از الگوریتم مورچگان

جدول (۵) و شکل (۵) مقادیر قبل و بعد از بهینه سازی به وسیله الگوریتم مورچگان و درصد پیشرفت آنها را در توربین بادی برجی اکسل-اس، نصب شده در شهر تهران، برای آمار سالیانه نشان می دهد. در جدول (۵) و شکل (۵)، مقادیر قبل از بهینه سازی از جدول شماره (۳) و مقادیر بعد از بهینه سازی با الگوریتم مورچگان از نمودارهای شماره (۳) و (۴) بدست آورده شده است.



شکل (۳) قدرت خروجی بهینه توربین بادی برجی اکسل-اس، براساس متوسط سالیانه داده های آماری شهر تهران، نسبت به سرعت بهینه نامی باد توسط الگوریتم مورچگان.

۶- مقایسه نتایج

نتایج بدست آمده در این تحقیق را میتوان با نتایج تحقیقات احمدی و احیایی که به مدل سازی ریاضی توربین بادی مقادیر واقعی توربین و همچنین نتایج تحقیقات عسگری و احیایی که با الگوریتم های ژنتیک و جستجو به بهینه سازی توربین پرداخته اند مقایسه نمود.

در شکل های (۶) و (۷) بازه سرعت نامی بین $10 < u_r < 20$ در نظر گرفته شده است. در نمودار (۶) منحنی هایی وجود دارند که مربوط به قدرت خروجی بهینه شده توسط الگوریتم های مورچگان، جستجو، ژنتیک و حالت واقعی محاسبه شده توسط احمدی و احیایی است که هر کدام از آنها نیز دارای یک سرعت بهینه می باشند که در جدول (۶) که در پایین صفحه آمده ایت مشاهده می گردد.

۷- نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به جداول موجود در این مقاله می توان به این نتایج در تحقیقات انجام شده رسید. هدف از انجام این پروژه بدست آوردن سرعت های بهینه u_c ، u_r ، u_f بوده است و با استفاده از معادلات انرژی و الگوریتم های انتخابی رسیدن به بهترین توان خروجی و بازدهی انرژی بوده است. لذا از شکل های (۵) تا (۷) و همچنین جداول (۵) و (۶) می توان به این نتیجه رسید:

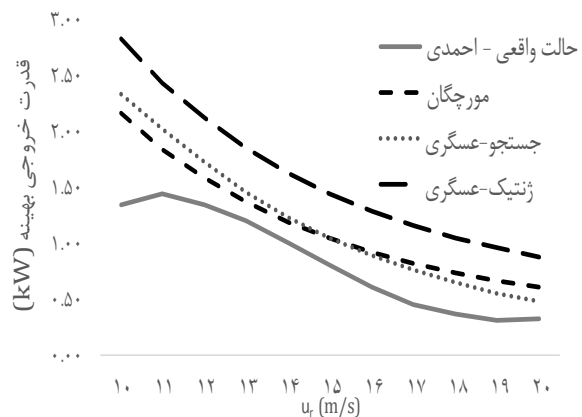
سرعت های بهینه حاصل از الگوریتم مورچگان عبارتند از:

$$u_{c(\text{optimom})} = 3/18 \left(\frac{m}{s} \right)$$

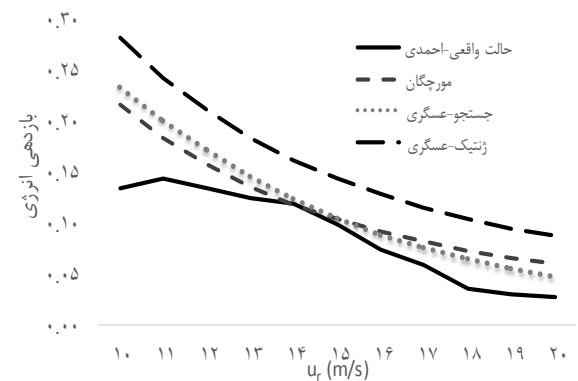
$$u_{r(\text{optimom})} = 10/15 \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$u_{f(\text{optimom})} = 13/83 \left(\frac{m}{s} \right)$$

که در آیتم توان خروجی مقدار $2/12$ (KW) بدست آمده است که مقدار $65/63$ درصد نسبت به قبل از بهینه سازی افزایش مشاهده می شود که این درصد افزایش از دیگر الگوریتم ها نیز بالاتر بوده و به حالت واقعی که در نمودار (۶) مشاهده می شود نیز نزدیکتر است، همچنین در بازدهی انرژی مقدار $0/21$ بدست آمده است که افزایش بیشتری نسبت به قبل از بهینه سازی و به مقدار $61/54$ درصد داشته ایم که این درصد افزایش در بازدهی باز هم از دیگر الگوریتم ها بالاتر بوده و به حالت واقعی که در شکل (۷) مشاهده می شود نزدیکتر است.



شکل (۶) قدرت خروجی بهینه توربین بادی بر جی اکسل-اس، نسبت به سرعت نامی باد در مقاله های احمدی- احیایی، عسگری احیایی و الگوریتم مورچگان [۸ و ۱۵].



شکل (۷) بازدهی بهینه انرژی توربین بادی بر جی اکسل-اس، نسبت به سرعت نامی باد در مقاله احمدی- احیایی، عسگری- احیایی و الگوریتم مورچگان [۸ و ۱۵].

جدول (۶) مقادیر قبل و بعد از بهینه‌سازی و درصد پیشرفت سرعت ها، قدرت خروجی و بازدهی انرژی با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان، ژنتیک و جستجو.

η_I	$P_{e,ave}$	u_f	u_c	u_r	نوع فرایند	ردیف
	(kW)	(m/s)	(m/s)	(m/s)		
۰/۱۳	۱/۲۸	۱۵/۶	۱۳/۸	۳/۲	قبل از بهینه‌سازی [۱۵]	۱
۰/۲۱	۲/۱۲	۱۳/۸۱	۱۰/۱۵	۳/۱۸	بهینه‌سازی با الگوریتم مورچگان	۲
۰/۱۴	۱/۳۹	۱۵/۰۵	۱۳/۳۱	۲/۹۹	بهینه‌سازی با الگوریتم جستجو [۸]	۳
۰/۲	۲/۰۶	۱۵/۷۳	۱۲/۱۹	۱/۲۷	بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک [۸]	۴
۶۱/۵۴	۶۵/۶۳	-۱۱/۴۷	-۲۶/۴۵	۲/۵۸	درصد مقایسه بین ردیف ۲ و ۱	۵
۷/۶۹	۸/۵۹	-۳/۵۳	-۳/۵۵	-۳/۵۵	درصد مقایسه بین ردیف ۳ و ۱	۶
۵۳/۸۵	۶۰/۹۴	۰/۸۳	-۱۱/۶۷	-۵۹/۰۳	درصد مقایسه بین ردیف ۴ و ۱	۷
-۳۳/۳۳	-۳۴/۴۳	۸/۹۸	۳۱/۱۳	-۵/۹۷	درصد مقایسه بین ردیف ۳ و ۲	۸
-۴/۷۶	-۲/۸۳	۱۳/۹	۲۰/۱	-۶۰/۰۶	درصد مقایسه بین ردیف ۴ و ۲	۹
۴۲/۸۶	۴۸/۲	۴/۵۲	-۸/۴۱	-۵۷/۵۳	درصد مقایسه بین ردیف ۴ و ۳	۱۰

علائم یونانی

ρ	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)
σ	انحراف استاندارد
η_{mr}	بازدهی قدرت انتقال دهنده ها
η_m	بازدهی انتقال دهنده ها
η_{gr}	بازدهی ژنراتور
η_o	بازده کلی توربین بادی

۹- مراجع

- [1] Fuglsang, P., Madsen, H., "Optimization Method for Wind Turbine Rotors", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, DK-4000R Oskilde, Denmark, pp.191-206, 1998.
- [2] Grady, S, Hussaini, M, Abdullah, M., "Placement of Wind Turbines using Genetic Algorithms", The Florida State University, 400 Dirac Science Library, Tallahassee, FL 32306-4120 USA, pp.259-270, 2004.
- [3] Ozgenera, O., Ozgener, L., "Exergy and Reliability Analysis of Wind Turbine", Renewable and Sustainable Energy Reviews, TR-45140, Muradiye, Manisa, Turkey, pp.1811-1826, 2006.
- [4] Emami, A., Noghreh, P., "New Approach on Optimization in Placement of Wind Turbines Within Wind Farm by Genetic Algorithm", Renewable Energy, Mazandaran University, Islamic Republic of Iran, pp.1559-1564, 2009.

۸- فهرست علائم و اختصارات

P_e	توان خروجی ژنراتور (kW)
$P_{e,ave}$	متوسط توان خروجی ژنراتور (kW)
P_{er}	قدرت نامی (kW)
P_m	قدرت مکانیکی (kW)
P_o	فشار مرجع (kPa)
P_t	قدرت خروجی انتقال دهنده‌ها (kW)
P_w	قدرت باد (kW)
R_a	ثابت گازها ($\frac{kJ}{kg.k}$)
T	دما (K)
T_0	دمای مرجع (K)
U	انرژی جنبشی ذره (J)
$u_{(z_1)}$	سرعت باد در ارتفاع z1 (m/s)
$u_{(z_2)}$	سرعت باد در ارتفاع z2 (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)
x	ضخامت ذره (m)
z_1	ارتفاع مرجع (m)
z_2	ارتفاع توربین (m)

- [17] Eslami, E., "Exergy Analysis of Wind Energy in Iran", proceedings of the Global Conference on Global Warming, Lisbon, Portugal, pp.1-6, 2011.
- [18] Motee, H., Lotfi, S.H., Seyed sfahlan. M. M. "An Overview of Some Intelligent Optimization Methods", Islamic Azad University of Shabestar Branch, Chap. 4, pp.55-73, 2010.
- [19] Arjmand, M., Sheikhi Azqandi, M., Delavar, M., "Hybrid Improved Dolphin Echolocation and Ant Colony Optimization for Optimal Discrete Sizing of Truss Structures", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, Vol.6, No.1, pp.61-70, 2018.
- [20] Sheikhi, M., Ghoddosian, A., "A Hybrid Imperialist Competitive Ant Colony Algorithm for Optimum Geometry Design of Frame Structures", Structural Engineering and Mechanics, Vol.46, No.3, pp.403-416, 2013.
- [21] WWW.WEATHER.IR (For wind data see).
- [5] Sareni, B., Abdelli, A., Roboam, X., "Model Simplification and Optimization of A passive Wind Rurbine Generator", Renewable Energy, 31071 Toulouse Cedex 7, France, pp.2640-2650, 2009.
- [6] Pope, K, Dincer, I., Naterer, G., "Energy and Exergy Efficiency Comparison of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbine", International Journal of Renewable Energy, Vol.35, No.9, pp.2103-2113, 2010.
- [7] Baskut, O., Ozgener, O., Ozgener, L., "Effects of Meteorological Variables on Exergetic Efficiency of Wind Turbine Power Plants", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, No.9, pp.3237-3241, 2010.
- [8] Asgari, E., Ehyaei, M.A., "Exergy and Optimization Analysis of Wind Turbine by Genetic & Searching Algorithm", M.SC Thesis, Dezfoul, Iran, 2012.
- [9] Rezaei Mirghaed, M., Roshandel, R., "Site Specific Optimization of Wind Turbines Energy Cost", Energy Conversion and Management, Vol.73, pp.167-175, 2013.
- [10] Ashuri, T., Zaaijer, M.B., Martins, J.R.R.A., VanBussel, G.J.W., VanKuik, G.A.M., "Multi Disciplinary Design Optimization of Offshore Wind Turbines for Minimum Levelized Cost of Energy", Renewable Energy, Vol.68, pp.893-905, 2013.
- [11] Mortazavi.M, Soltani.M., Motieyan.H, "A Pareto Optimal Multi-objective Optimization for a Horizontalaxis Wind Turbine Blade Airfoil Sections Utilizing Exergy Analysis and Neural Networks", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.136, pp.62-72, 2015.
- [12] Fakehi, A., Ahmadi, S., 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, Vol.106, pp.1318-1326, 2015.
- [13] Shehata, A., Saqr, K., Xiao, O., Shehadeh, A., Day, "Performance Analysis of Wells Turbine Blades using the Entropy Generation Minimization Method", Renewable Energy, Vol.86, pp.1123-1133, 2016.
- [14] Wang, L., Kolios, H., umiNishino, T.A, Luc Delafin, P.L, Bird, T., "Structural Optimisation of Vertical-Axis Wind Turbine Composite Blades based on Finite Element Analysis and Genetic Algorithm", Composite Structures, Vol.153, pp.123-138, 2016.
- [15] Ahmadi, A, Ehyaei, M.A, "Exergy Analysis of a Wind Turbine", International Journal of Exergy, Vol.6, No.4, pp 457-475, 2016.
- [16] Johnson, G.L., "Wind Energy Systems", Electronic Edition, pp.286-391, 2001.