



طراحی کنترل کننده هوشمند به منظور ارتقای ایمنی و بهبود عملکرد توربین بادی

مهدی داودی^{1*}، محسن داودی²

1- استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران

2- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

* بوئین زهرا، 3451866391، Mehdi.Davoudi@bzte.ac.ir

چکیده

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توربین‌های بادی و بررسی روش‌های مختلف کنترلی آن در جهت ارتقای ایمنی و همچنین بهبود عملکرد آنها صورت پذیرفته است. به دلیل تأخیر در سیستم‌های کنترلی، توربین‌های بادی نمی‌توانند به صورت دقیق، به هنگام تغییر در سرعت و جهت باد، در راستای باد قرار گیرند که این موضوع باعث افت عملکرد و در برخی موارد کاهش ایمنی آنها می‌شود. در این مقاله، از کنترل کننده PID مرتبه صحیح و مرتبه کسری، برای کنترل زوایای پیچ و یابو به منظور بهبود ایمنی و توان خروجی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده PID مرتبه کسری از قابلیت بیشتری نسبت به کنترل کننده PID مرتبه صحیح برخوردار است و امکان بهبود سریع و دقیق تر پاسخ را فراهم می‌کند. بهینه‌سازی و تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند حرکت گروهی پرندگان و کلونی زنبور عسل، انجام شده است. برای محاسبه ی ضرایب بهینه کنترل کننده‌ها، یک تابع هزینه تعریف شده است و ضرایب مرتبه‌های کنترل کننده مرتبه کسری نیز توسط این روش بهینه‌سازی انتخاب شده اند که با روش‌های مذکور، نتایج مطلوب تری بدست آمده است. معیار انتخاب ضرائب، حداقل سازی تابع هزینه برای خطای ردیابی موقعیت زوایای پیچ و یابو است. با بکارگیری کنترل کننده PID مرتبه کسری با الگوریتم حرکت گروهی پرندگان یا ازدحام ذرات تابع هزینه برای زاویه پیچ 47 درصد و برای زاویه یابو 78 درصد کاهش یافته است.

کلیدواژه‌گان: انرژی تجدیدپذیر، توربین بادی، کنترل کننده هوشمند، کنترل کننده PID، سیستم کنترل، الگوریتم حرکت گروهی پرندگان، کلونی زنبور عسل.

Design of intelligent controller to improve safety and performance of wind turbine

Mehdi Davoudi^{1*}, Mohsen Davoudi²

1- Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

* P.O.B. 3451866391 Qazvin, Iran, Mehdi.Davoudi@bzte.ac.ir

Received: 21 August 2024 Accepted: 04 May 2025

Abstract

Up to now, extensive research has been done in the field of wind turbines and various control methods have been investigated to improve safety and their performance. Due to the delay in the control systems, wind turbines cannot be accurately aligned with the wind when the wind speed and direction change, which causes a decrease in performance and in some cases, a reduction in their safety. In this article, integer and fractional order PID controllers are used to control pitch and yaw angles to improve safety and output power. The results show that the fractional order PID controller is more capable than the integer order PID controller and provides the possibility of faster and more accurate response improvement. The optimization and adjustment of controller parameters has been done with the intelligent optimization algorithm of group movement of birds and bee colony. To calculate the optimal coefficients of the controllers, a cost function has been defined, and the coefficients of the fractional order controllers have also been selected by this optimization method, with the mentioned methods, more favorable results have been obtained. The criterion for selecting the coefficients is to minimize the cost function for the position tracking error of the pitch and yaw angles. By using a fractional order PID controller with the bird swarm algorithm, the cost function for pitch angle has been reduced by 47 percent and for yaw angle by 78 percent.

Keywords: Renewable Energy, Wind Turbine, Intelligent Controller, PID Controller, Control System, Bird Group Movement Algorithm, Bee Colony.

1- مقدمه

کننده برای کنترل توربین‌های بادی معرفی شده است [8, 9]. در هر حال در سیستم‌هایی همچون توربین بادی که برخوردار از عوامل غیرخطی و نامعینی هستند، قاعده‌تأ استفاده از کنترل کننده ساده PI پاسخ مطلوبی را به دنبال نخواهد داشت. این موضوع از این واقعیت ناشی می‌شود که پارامترهای سیستم کنترل با تغییر سرعت باد (و لذا تغییر نقطه کار سیستم) و یا پارامترهای سیستم، نیاز به تنظیم دوباره دارند. رفع نقیصه فوق به دو طریق ممکن است: استفاده از روش‌های کنترلی غیر خطی کلاسیک (تطبیقی/مقاوم) و یا کاربرد روش‌های کنترلی هوشمند. در تعداد دیگری از تحقیقات گزارش شده از روش کنترلی کلاسیک مد لغزشی (که از جمله قدیمی‌ترین و درعین حال معروف-ترین روش‌های کنترل غیرخطی مقاوم است) جهت کنترل سیستم توربین بادی استفاده شده است [10-12]. ذکر این نکته ضروری است که طراحی کنترل کننده‌های کلاسیک مقاوم و تطبیقی پیچیده بوده و نیاز به صرف زمان و ملزومات بسیار دارند. همچنین در پژوهش‌های دیگری از روش‌های هوشمند عصبی-فازی (استفاده از داده‌های آموزشی بر اساس اطلاعات ورودی و خروجی تعریف شده) برای رسیدن به جواب‌های مطلوب در طراحی سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی استفاده شده و نتایج نسبتاً مطلوبی حاصل شده است [13-15]. ولی قوام این روش‌ها در شرایط جدید (تغییرات ورودی، پارامترها و دینامیک‌های سیستم) مورد بررسی قرار نگرفته و تحقق این کنترل کننده‌ها به صورت روی-خط صورت نگرفته است.

در یک تقسیم‌بندی کلی توربین‌های بادی را می‌توان به دو دسته توربین-های سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم نمود. در توربین‌ها و در سرعت باد نامی، روتور توربین نیز با سرعت نامی می‌چرخد و این بدان معنا است که توان خروجی توربین نیز نامی می‌باشد. لازم به ذکر است که اگر سرعت روتور توربین بالاتر از سرعت نامی آن شود، مشکلات الکتریکی و مکانیکی برای توربین بوجود می‌آید. بنابراین در هر دو نوع توربین بایستی برای این که در سرعت‌های بالاتر از سرعت باد نامی نیز روتور با سرعت نامی بچرخد و در نتیجه توان خروجی نامی شود، از کنترل کننده زاویه پیچ استفاده نمود. برای کنترل زاویه پیچ، یک بار از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه³ (MLP) و بار دیگر از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی⁴ (RBF) استفاده شده است [16] که نتایج شبیه‌سازی مؤید عملکرد بهتر کنترل کننده RBF در تأمین توان نامی خروجی مطلوب است. در هر حال لازم به توضیح است که هیچ کدام از دو کنترل کننده فوق‌الذکر، علیرغم ساختار نسبتاً بزرگ و تنوع ورودی‌ها، توانایی حذف کامل اورشوت⁴ را ندارند. همچنین از یک کنترل کننده غیر خطی پیش‌خور (طراحی شده بر مبنای مشخصه آیرودینامیکی روتور) جهت جبران ضعف کنترل کننده کلاسیک PID استفاده شده است [17]. خروجی کنترل کننده غیر خطی پیش‌خور با خروجی کنترل کننده PID جمع و ورودی مطلوب سیستم زاویه پیچ را نتیجه می‌دهد. همچنین یک کنترل کننده خود-تنظیم زاویه پیچ بر پایه روش کنترل تطبیقی مدل مرجع استفاده شده است که در آن کنترل کننده مرکب از دو شبکه عصبی، یکی با هدف درک رفتار پلانت (سیستم زاویه پیچ) و دیگری برای درک رفتار

جایگزینی منابع فسیلی با انرژی‌های نو و تجدیدپذیر راهکاری است که مدت هاست مورد توجه کشورهای پیشرفته جهان قرار گرفته است. در بین منابع انرژی‌های نو، انرژی باد به دلیل پاک و پایان ناپذیر بودن، داشتن قابلیت تبدیل به انرژی الکتریکی و رایگان بودن گزینه مناسبی برای این منظور می‌باشد. باد طبیعی، پدیده‌ای تصادفی است و توسط سرعت و جهت آن مشخص می‌شوند که آنها هم به صورت تصادفی و با تغییر همراه هستند. انرژی باد از اقتصادی ترین روش‌های تولید برق در بین انرژی‌های تجدیدپذیر است که پایان ناپذیر بوده و آلودگی محیط زیست را در پی ندارد. در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی، تولید هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی از طریق باد می‌تواند از انتشار حدود یک کیلوگرم CO₂ جلوگیری نموده و به کاهش قابل توجه مقادیر SO₂ و اکسیدهای نیتروژن و آلاینده‌های هوایی معروف در ایجاد دود و مشکلات تنفسی و تحریک حملات آسم کمک می‌کند [11]. ایده فعلی تولید برق از جریان‌های باد با استفاده از درایوهای چرخ دنده و یک ژنراتور الکتریکی جدا از سایر سیستم‌های ثانویه انجام می‌شود [2] که با استفاده از یک مبدل الکترونیکی، این الکترونیسته ممکن است مستقیماً به شبکه تزریق یا برای تأمین برق یک ایستگاه شارژ عمل کند [3]. پیش بینی می‌شود که ۳۵ درصد از کل تولید انرژی جهانی، تا سال ۲۰۵۰ توسط انرژی باد تأمین شود [4]. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توربین‌های بادی و بررسی روش‌های مختلف کنترلی آن در جهت بهبود توان خروجی صورت پذیرفته است تا از آسیب به توربین بادی جلوگیری کرده و از تلفات مکانیکی کاهش یابد. سرعت باد ذاتاً متغیر است، بنابراین برای حفاظت توربین بادی از آسیب، سیستم کنترل پیچ طراحی می‌شود. جهت نیز متغیر است، بنابراین برای رسیدن به حداکثر انرژی، کنترل کننده‌ی یو طراحی شده است. به دلیل تأخیر در سیستم‌های کنترلی و یو، توربین‌های بادی، نمی‌توانند به صورت دقیق، به هنگام تغییر در سرعت و جهت باد، در راستای باد قرار بگیرند. بنابراین، توربین‌های بادی اغلب از یک سری از مسائل مهندسی در طول عملیات، شامل یو، خطاهای نوسانی و خرابی مکرر رنج می‌برند. کنترل پیچ و یو در این تحقیق، با توجه به نیروهای مکانیکی وارد بر پرها و ناسل طراحی شده است. استفاده از روش‌های کنترلی هوشمند می‌تواند تا حد زیادی کنترل زاویه پیچ و یو و در نتیجه توان خروجی توربین بادی را بهبود بخشد. در زمینه کنترل سیستم‌ها می‌توان کنترل کننده‌هایی با کارایی بسیار بالا، چه برای سیستم‌های با مرتبه کسری و چه برای سیستم‌های با مرتبه صحیح طراحی نمود. از میان کنترل کننده‌های با مرتبه کسری، کنترل کننده PID¹ با مرتبه کسری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است و روش‌های عددی مختلفی برای طراحی آن از جمله روش Ziegler-Nichols، فضای حالت، استفاده از الگوریتم ژنتیک و ... می‌توان نام برد [5, 6].

یکی از کنترل کننده‌های متداول در سیستم‌های صنعتی، کنترل کننده PI است که علیرغم سادگی ساختار آن از عملکرد قابل قبولی (به ویژه در حوزه سیستم‌های خطی) برخوردار است [7] و دو نمونه از کاربردهای این کنترل-

3 Radial Basis Function
4 Overshoot

1 Proportional-Integral-Derivative Controller
2 Multilayer Perceptron

در این مقاله ما یک تابع هزینه مناسب تعریف و کنترل کننده های PID مرتبه صحیح و کسری، برای کنترل زوایای پیچ و یاب استفاده کردیم که پارامترهای این کنترل کننده ها با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی هوشمند حرکت گروهی پرندگان و کلونی مصنوعی زنبور عسل به صورت جداگانه محاسبه شده است.

همانطور که مشاهده کردید، تاکنون تحقیقات گسترده ای در زمینه توربین های بادی و بحث کنترل پیچ و یاب صورت گرفته است. اما روشی که در این تحقیق انجام شده است کمتر مورد توجه بوده است. در این تحقیق، از روش PID مرتبه کسری برای کنترل زوایای پیچ و یاب استفاده شده است و بهینه سازی ضرایب و مراتب کنترل کننده با استفاده از روش های بهینه سازی حرکت گروهی پرندگان^۲ (PSO) و نیز کلونی مصنوعی زنبور عسل (ABC) انجام شده است.

نوآوری های این مقاله شامل موارد زیر می باشد:

- 1- تعریف تابع هزینه ترکیبی جدید (که با اضافه شدن ضریبی از ماکزیمم سرعت باد باعث افزایش سرعت بهینه سازی و کاهش نوسانات گردیده است)
- 2- شبیه سازی و مقایسه نتایج در چهار حالت زیر (برای زاویه های یاب و پیچ بصورت جداگانه):
 - کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO
 - کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم ABC
 - کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم PSO
 - کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم ABC
- 3- انتخاب مرتبه های کنترل کننده مرتبه کسری توسط روش های بهینه سازی فوق.
- 4- کاهش خطای ردیابی موقعیت زوایا هم زمان با تغییر ملایم سیگنالهای کنترلی بر اساس حداقل سازی تابع هزینه ترکیبی جدید.

2- اجزا و مدل توربین بادی

2-1- اجزای توربین بادی

شکل ها، جدول ها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می شوند. در صورتی که نتوان آن ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می شوند. شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می دهد. اجزای اصلی توربین بادی شامل روتور، ناسل، سیستم قدرت، سیستم یاب، سیستم کنترل و برج می باشد. هر یک از این اجزا خود شامل زیر سیستم هایی می باشد. پره های توربین بادی با استفاده از مکانیزمی به نام پیچ (گام) به هاب متصل می شوند که به پره ها این امکان را می دهد تا در شرایط گوناگون و سرعت های مختلف باد، حول محور خود چرخیده و در بهترین وضعیت از نظر کارایی توربین قرار گیرند. همچنین تمام توربین های بادی از سیستمی به نام سیستم یاب جهت حفظ موقعیت صحیح روتور نسبت به جهت وزش باد استفاده می کنند. سیستم یاب از یک موتور الکتریکی یا هیدرولیکی که بر روی ناسل قرار گرفته است برای به حرکت در آوردن دنده پینیون نصب شده بر روی یک محور

معکوس آن (در راستای تحقق استراتژی کنترلی معکوس پلانت) است [18]. شیناس و همکاران کنترل زاویه پیچ با استفاده از یک کنترل کننده فازی پیا سازی کردند [19]. همچنین تاکایی و همکاران از جهت همراهی با نامعینی- های سیستمی (تغییر دینامیک های توربین بادی متأثر از تغییر سرعت باد)، کنترل زاویه پیچ را به کمک یک کنترل کننده مقاوم انجام داده اند [20]. عبدالکافی و همکاران زاویه پیچ را به کمک یک کنترل کننده غیر خطی زاویه پیچ، پیاده سازی کردند [21]. همچنین جوو و همکاران برای کنترل زاویه پیچ به ازای یک پروفایل سرعت باد مشخص، ضرایب کنترل کننده PID را تعیین کرده و نتایج را نشان داده و نیز عملکرد کنترلی مبتنی بر رونیتر اغتشاش^۱ فقط به ازای همین پروفایل سرعت باد نشان داده شده است [22].

نوایی و همکاران کلیه پارامترهای کنترل کننده PID فازی مرتبه کسری، شامل ضرایب اصلاح در ورودی ها و خروجی کنترل کننده فازی، مرتبه عملگرهای مشتق گیر و انتگرال گیر، پارامترهای توابع تعلق و جدول قوانین فازی را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده و به طور هم زمان بهینه سازی را انجام دادند [23]. آنها همچنین از کنترل کننده PID مرتبه کسری برای کنترل سه فرآیند مرتبه کسری، مرتبه صحیح و تاخیردار بهره برده و ضرایب آنها با استفاده از الگوریتم های تکاملی محاسبه کردند.

یک استراتژی برای کنترل یاب و پیچ توربین بادی معرفی شده است که با در نظر گرفتن سرعت متفاوت برای باد مبتنی بر جلوگیری از آسیب به توربین بادی، اجتناب از تلفات مکانیکی و دستیابی به حداکثر انرژی تولیدی در آن است [24]. همچنین مطالعه ای در رابطه با اثرات خطای یاب بر مشخصات توربین بادی در سرعت های مختلف باد و استراتژی کنترل آن بوسیله یک مدل توربین باد، مدل خطای یاب و مدلی برای سرعت باد صورت پذیرفته است [25] که نتایج شبیه سازی های انجام شده در آن نشان می دهد که اثرات گشتاور آیرودینامیکی، سرعت روتور و توان خروجی ناشی از خطای یاب در مراحل مختلف اجرایی متفاوت هستند. ویدال و همکاران کنترل توان تولیدی در توربین های بادی با سرعت و پیچ متغیر محور عمودی که در سرعت های بالای باد بکار گرفته می شوند، را در نظر گرفتند [26]. آنها یک کنترل چترینگ گشتاور و یک استراتژی کنترل PI برای پیچ نیز معرفی کردند. با توجه به اینکه شبکه بادی موجب بروز مشکلاتی نظیر نوسانات ولتاژ و اعوجاج هارمونیک می گردد، جیدوانی و همکاران راهی برای دستیابی کارآمد به توان تولیدی توربین های بادی با استفاده از سیستم یکپارچه تبدیل انرژی باد با بکارگیری ژنراتور القایی دوسویه ارائه کردند [27]. آنها یک رابط الکترونیک قدرت غیر مرسوم را به منظور کاهش اعوجاج هارمونیک کل و افزایش کیفیت توان در طول اختلالات معرفی کردند. همچنین طراحی کنترل کننده های PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل متغیر، که به عنوان الگوریتم کوشی جهش یافته مصنوعی کلونی زنبور عسل شناخته می شود، تشریح شده است [28]. پارامترهای کنترلی، ترکیبی از ثابت تناسبی، ثابت مشتق، مرتبه مشتق و مرتبه انتگرالی هستند و طراحی آن پیچیده تر از کنترل کننده های متداول PID است. مختار و همکاران کاربرد کنترل کننده PID مرتبه کسری برای بهبود کارایی سیستم توربین بادی را بررسی کرده و برای تأیید عملکرد آن شبیه سازی برای مقادیر مختلف زمان مرده^۲ انجام دادند [29] در صورتیکه

3 Particle Swarm Optimization

1 Disturbance Observer
2 Dead Time

دارد. اثر سایه برج، به کاهش جریان هوا به دلیل حضور برج اشاره دارد. برای توربین بادی سه پره، گشتاور آیرودینامیکی $3P$ (3 تعداد پرها و P فرکانس زاویه‌ای چرخش روتور است) مؤلفه‌ی موج ناشی از برش باد و سایه برج است. معادلات تحلیلی سرعت معادل باد در این مقاله بدست آمده است و به صورت مختصر ارائه شده است.

بر اساس این مدل، سرعت معادل باد در سرتاسر ناحیه روتور v_{eq} شامل سه مؤلفه است: سرعت باد در ارتفاع هاب (توبی پره) v_{eq0} ، مؤلفه‌ی برشی باد v_{eqws} و مؤلفه‌ی سایه برج v_{eqts} .

سرعت معادل باد و معادلات تحلیلی آن در روابط (4) تا (9) آمده است:

$$v_{eq} = v_{eq0} + v_{eqws} + v_{eqts} \quad (4)$$

$$v_{eq0} = V_H \quad (5)$$

$$v_{eqws} = V_H \cdot \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \left(\frac{R}{H}\right)^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \left(\frac{R}{H}\right)^3 \cos 3\beta \right] \quad (6)$$

$$v_{eqts} = \frac{MV_H}{3R^2} \sum_1^3 \left[\frac{a^2}{\sin^2 \beta_b} \ln \left(\frac{R^2 \sin^2 \beta_b}{x^2} + 1 \right) - \frac{2a^2 R^2}{R^2 \sin^2 \beta_b + x^2} \right] \quad (7)$$

$$\beta_1 = \beta$$

$$\beta_2 = \beta + \frac{2\pi}{3}$$

$$\beta_3 = \beta + \frac{4\pi}{3} \quad (8)$$

$$V_0 = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha-1)R^2}{8\pi^2} \right] V_H = M \cdot V_H \quad (9)$$

که V_H سرعت باد در ارتفاع مرکز هاب (متر بر ثانیه) است؛ α توان برش باد است که مقدار تجربی آن تحت تأثیر سطح است؛ H ارتفاع مرکز هاب (متر)؛ β زاویه سمتی پره (درجه) و از 0 تا 360 درجه تغییر می‌کند؛ β_b زاویه سمتی پره از هر سه پره (درجه) که از صفر تا 360 درجه متغیر است و توسط رابطه‌ی (5)، برای هر سه پره توربین بادی تعریف شده است؛ a شعاع برج (متر) است؛

استفاده می‌کند. همچنین سیستم یا از یک ترمز به منظور نگه داشتن توربین در موقعیت مناسب و حفظ عملکرد طبیعی آن بهره می‌گیرد. توان خروجی توربین متناسب با سرعت باد تغییر می‌کند. بنابراین هر توربین باد یک منحنی مشخصه تولید توان دارد که به وسیله این منحنی و بدون در نظر گرفتن جزئیات فنی مربوط به قسمت‌های مختلف می‌توان میزان تقریبی انرژی تولیدی را به دست آورد. توان تولید شده به وسیله توربین بادی با رابطه (1) تعریف می‌شود و رابطه (3) معرف توان مکانیکی خروجی می‌باشد.

$$P_{wind} = 0.5 * \rho \pi R^2 u^3 \quad (1)$$

$$P_{mech} = C_p P_{wind} \quad (2)$$

$$P_{m(u)} = 0.5 * C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 u^3 \quad (3)$$

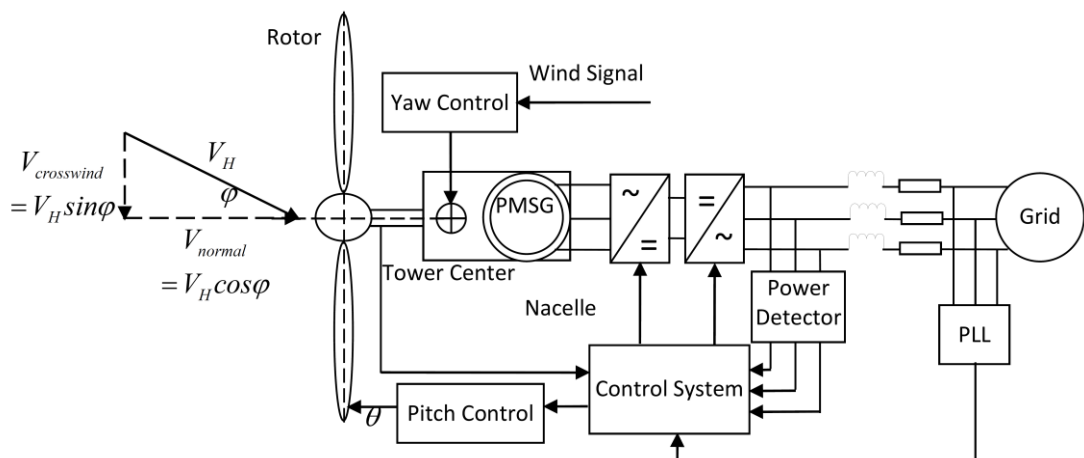
که در روابط فوق ρ چگالی هوا، R شعاع روتور و u سرعت باد می‌باشد. در ضمن C_p ضریب تولید توان توربین می‌باشد که در واقع نسبت توان خروجی به توان باد است و مشخصه مناسبی برای نشان دادن توانایی توربین بادی در ذخیره انرژی باد می‌باشد. بیشترین مقدار قابل دسترسی این ضریب حد بتز نام دارد [5] و برابر است با: $C_{\frac{16}{27P_{Max}}}$. این حد بالا برای انواع توربین‌های بادی به کار گرفته می‌شود. ضریب توان معمولاً توسط سازنده‌ها در اختیار قرار می‌گیرد و تابعی از زاویه پیچ و نسبت سرعت نوک می‌باشد. تا کنون ضریب توان بهینه توربین‌های پیشرفته سه تیغه ای تا حد 0/52-0/55 نیز گزارش شده است [30].

2-2- مدل سیستم توربین بادی

یک مدل کامل از سیستم توربین بادی به همراه $PMSG$ شامل یک مدل سرعت باد، مدل روتور، مدل شفت و گیربکس (که اصطلاحاً $drive\ train$ نامیده می‌شود)، سیستم کنترل، یک مدل انتقال و مبدل، و غیره است. $PMSG$ توسط دو مبدل پشت به پشت به شبکه AC متصل است. طراحی از مدل سیستم توربین بادی در شکل 1 نشان داده شده است.

2-3- مدل معادل سرعت باد

مدل معادل سرعت باد اولین بار توسط Dale [31] ارائه شد و اثرات ناشی از برش باد (wind shear) و سایه برج (tower shadow) را لحاظ می‌کند. برش باد به افزایش سرعت باد با ارتفاع به دلیل اصطکاک بین سطح زمین و باد اشاره



شکل 1 مدل سیستم توربین بادی به همراه ژنراتور دائم مغناطیسی (PMSG) [25]

در اینجا V_{normal} مؤلفه‌ی مؤثر در جهت مخالف محور روتور است و تضمین می‌کند که توربین بادی به طور عادی کار می‌کند. $V_{crosswind}$ مؤلفه جانبی است و به مؤلفه‌ی عرضی باد اشاره دارد که هیچ اثری روی عملکرد عادی توربین بادی ندارد ولی بارهای جانبی ایجاد می‌کند. نوسانات در سرعت باد یا تغییرات ناگهانی در جهت باد هر دوی این مؤلفه‌ها را تغییر می‌دهد [26]. که بارهای باد و مشخصه‌های در حال اجرای توربین بادی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

6-2- کنترل زاویه پیچ

کنترل پیچ، از اهمیت زیادی در یک توربین بادی برخوردار است. طراحی کنترل کننده پیچ بر اساس مکانیزم پیشنهادی در مرجع [32] انجام شده است. در روش پیشنهادی، یک تابع انتقالی از یک مکانیزم ساده پیچ بوسیله‌ی موتور AC بدست می‌آید. معادله دیفرانسیل این سیستم به صورت زیر است:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = kv(t) + m\dot{\theta} + Q_p \quad (16)$$

که J اینرسی کل پره و موتور، B ضریب اصطکاک ویسکوزیته سیستم پیچ، K ثابت فنر سیستم پیچ، k شیب منحنی گشتاور-ولتاژ برای سیستم مکانیزم موتور-پیچ، $v(t)$ ولتاژ اعمالی به موتور، m شیب منحنی سرعت-گشتاور برای مکانیزم موتور-پیچ و Q_p تکانه پیچ شدگی ناشی از نیروهای آیرودینامیکی که سیستم را دچار اختلال می‌کنند، است. اگر سیستم در حالت پایدار باشد، آنگاه مشتقات زاویه پیچ صفر هستند و ولتاژ اعمالی به موتور مقدار ثابت v است. در این حالت معادله دیفرانسیل به صورت زیر می‌شود:

$$\theta = \frac{k}{K}v + \frac{Q_p}{K} \quad (17)$$

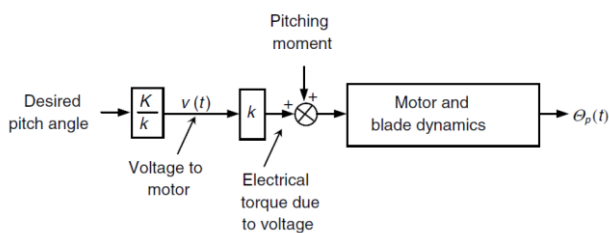
از معادله دیفرانسیل فوق، تابع تبدیل زیر، بدست می‌آید:

$$\theta(s) = \frac{1}{Js^2 + (B-m)s + K_{refp}} \quad (18)$$

به ازای پارامترهای ورودی در مرجع [32]: $J = \frac{1}{16}$, $B - m = \frac{1}{4}$, $K = 1$. $Q_p = 1$ تابع تبدیل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\theta(s) = \frac{1}{s^2/16 + s/4 + 1} \quad (19)$$

شکل 3 مکانیزم کنترل پیچ را نشان می‌دهد. یکی از محدودیت‌های اصلی این نوع از کنترل کننده‌های پیچ، کند بودن این نوع از مکانیزم است.



شکل 3 مکانیزم کنترلی پیچ

به همین دلیل، یک محدوده کننده نرخ معمولاً اضافه می‌شود که نرخ زاویه پره را بین $\pm 5 \text{ deg/s}$ محدود می‌کند [33]. در نتیجه زاویه پره، بین 1 تا 25 درجه خواهد بود. کنترل کننده‌های پیچ معمولاً از نوع PI یا PID هستند که در این تحقیق از PID با مرتبه کسری استفاده شده است.

7-2- الگوریتم حرکت گروهی پرندگان یا ازدحام ذرات (PSO)

α ، فاصله از وسط برج تا پره است (متر) که در شکل 5 نشان داده شده است؛ V_0 سرعت میانگین باد است و M ضریب تبدیل سرعت باد است.

4-2- معادلات توربین بادی

یک مدل ساده ریاضی با استفاده از آیرودینامیک، بر اساس توان و گشتاور آیرودینامیکی به صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{eq}^3 C_p(\theta, \lambda) \quad (10)$$

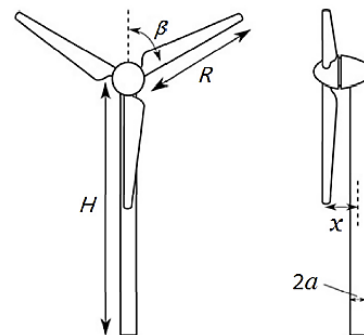
$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_{eq}^2 \frac{C_p(\theta, \lambda)}{\lambda} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_{eq}} \quad (12)$$

رابطه‌ی بین T_w و P_w به صورت زیر است:

$$P_w = T_w \cdot \omega_r \quad (13)$$

که P_w توان خروجی توربین بادی است (W)؛ T_w گشتاور آیرودینامیک روتور (Nm)؛ ρ چگالی هوا (kg/m^3)؛ R شعاع روتور (m)؛ θ زاویه پیچ پره (درجه)؛ λ نسبت سرعت نوک؛ $C_p(\theta, \lambda)$ ضریب توان روتور و ω_r سرعت زاویه‌ای روتور (rad/s) است. شکل 2 تعریف برخی از پارامترهای توربین بادی را نشان می‌دهد. این مدل ممکن است برای بررسی بارهای دینامیکی بیش از اندازه ساده باشد ولی به دلیل مدل سرعت معادل باد به وضوح به پارامترهای ابعادی نظیر H ، α ، R و a یک پارامتر وابسته به زمان β متکی است. این مدل برای تحلیل واقعی زمان شبیه‌ساز توربین بادی مناسب است.



شکل 2 تعریف برخی از پارامترهای توربین بادی

5-2- مدل خطای یاو

سنسور بادی نصب شده در بالای توربین بادی شامل دو قسمت است: سرعت سنج و جهت نما. سرعت سنج برای اندازه‌گیری سرعت باد و ارسال سیگنال‌های زمان واقعی برای سیستم کنترل به منظور تنظیم توان استفاده می‌شود. جهت نما برای اندازه‌گیری جهت باد استفاده می‌شود و برای کنترل یاو مطابق با استراتژی کنترل یاو ایجاد شده بعد از پردازش توسط سیستم کنترل یاو، استفاده می‌شود. در شروع یک تغییر در جهت باد یا یک تأخیر تراز یاو، زاویه‌ای بین جهت باد و محور روتور شکل می‌گیرد. این زاویه خطای یاو نامیده می‌شود. به دلیل اینکه باد پدیده‌ای تصادفی با تغییرات سریع و مکرر در سرعت و جهت است، توربین‌های بادی اغلب اوقات تحت حالت خطای یاو کار می‌کنند. در مدل خطای یاو، باد به دو مؤلفه‌ی زیر تقسیم می‌شود:

$$V_{normal} = V_H \cos \varphi \quad (14)$$

$$V_{crosswind} = V_H \sin \varphi \quad (15)$$

اولیه، جمعیت موقعیت‌ها (راه حل‌ها) در معرض تکرار چرخه است، $C = I$ ، $2, \dots, Cmax$ ؛ که C فرایندهای جستجوی زنبورهای کارگر و جستجوگر و پلایه دار است. زنبور تماشاچی یک منبع غذایی را با توجه به مقدار احتمال مرتبط با آن منبع غذایی انتخاب می‌کند، pi که با عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (24)$$

که در آن fit_i میزان مناسب بودن راه حل i است که توسط زنبور کارگر ارزیابی شده است که ارزیابی متناسب با مقدار شهد منبع غذایی در موقعیت i است و SN تعدادی از منابع غذایی که برابر با تعداد زنبورهای کارگر (BN) است. در این روش، زنبورهای کارگر اطلاعات خود را با زنبورهای تماشاچی تبادل می‌کنند.

2-9- تابع هزینه

در این مقاله از معیار $ITAE$ ¹ برای بهینه سازی کنترل کننده استفاده می‌کنیم. استفاده از $ITAE$ به عنوان معیار سنجش تناسب یا عملکرد تضمین می‌کند که فرآیند بهینه‌سازی بر بهبود عملکرد کنترل تمرکز می‌کند و منجر به تنظیمات پارامتر مؤثرتر و کارآمدتر می‌شود [23].

$ITAE$ یک معیار عملکرد است که برای تعیین مقادیری که مناسب برای بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، PSO و کلنی مورچه‌ها هستند، استفاده می‌شود و نتایج بهتری را برای یک مدل سیستم تبدیل انرژی باد به دست می‌دهد. تنظیم یک PI و کنترل کننده مرتبه کسری با الگوریتم ژنتیک و روش‌های بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها نیازمند انتخاب یک $ITAE$ مناسب برای نتایج ایده‌آل است.

استفاده از این تابع هزینه، به معنی حداقل شدن انحراف وزن دار شده با زمان می‌باشد که در واقع باعث افزایش سرعت سیستم، و همچنین کاهش اندازه خطا می‌باشد. همچنین با اضافه کردن یک جمله به تابع هزینه $ITAE$ میزان حداکثر دامنه خروجی کنترل کننده را نیز بهینه سازی می‌کنیم، به صورت زیر و با آزمون و خطا این تابع هزینه انتخاب شده است و اثر کوچکی از ماکزیمم u نیز به آن افزوده شده است:

$$ITAE = \int_0^T t|e|dt + \max(u) \times 10^{-4} \quad (25)$$

اضافه شدن ماکزیمم u باعث افزایش سرعت بهینه سازی و کاهش نوسانات گردیده است.

3- نتایج

در این بخش، به منظور کنترل زوایای پیچ و یاو، پارامترهای کنترل کننده PID کلاسیک با استفاده از این الگوریتم‌ها بهینه‌سازی شده است. در ادامه سیستم با کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شبیه سازی شده و نتایج با سیستم شبیه‌سازی شده با کنترل کننده PID کلاسیک مقایسه می‌شود. با توجه به مقالات مورد اشاره در بخش مقدمه، در بخش شبیه سازی این مقاله نیز از دو الگوریتم PSO و ABC برای بهینه سازی طراحی کنترل کننده استفاده می‌گردد تا نتایج قابلیت مقایسه با سایر منابع موجود را داشته باشد. نقش تنظیم این پارامترها، از دو جنبه قابل توجه است: اول آنکه پارامترهای کنترل کننده‌ها، عملکرد حلقه بسته سیستم را تغییر می‌دهند. دوم آنکه این پارامترها، وزنه‌ها یا ضرایبی هستند که نشان می‌دهند چه نسبتی از این فرمان‌ها باید با یکدیگر جمع و سپس به ورودی فرآیند اعمال شوند.

بهینه‌سازی دسته‌ای ذرات یک الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس هوش دسته جمعی پرندگان یا ذرات است و تشابه زیادی با حرکت گروهی پرندگان دارد. در این روش هر ذره سعی می‌کند که رفتارش در هر تکرار، نسبت به رفتار کل گروه و نسبت به وضعیت قبلی خود ذره موافق باشد [28]. هر ذره دارای d بعد است که در واقع برابر با تعداد متغیرهای موجود در تابع هزینه است.

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}) \quad (20)$$

در این الگوریتم بهترین وضعیتی که ذره تا لحظه i داشته است با $pbest$ نمایش داده می‌شود، همچنین موقعیت ذره ای که بهترین وضعیت را در سرتاسر جمعیت داشته است با $gbest$ نشان داده می‌شود. نرخ تغییرات و یا سرعت ذره هم برابر است با:

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}) \quad (21)$$

در تکرار اول، یک نسل اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود. سرعت و موقعیت هر ذره در تکرار $k+1$ ام بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}(k)) + \quad (22)$$

$$c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}(k))$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (23)$$

در روابط فوق $i = 1, 2, 3, \dots, n$ بوده که n تعداد ذرات است. بردار d بعدی $x_{id}(k)$ مقدار سرعت ذره i ام در تکرار k ام است. بردار d بعدی $v_{id}(k)$ موقعیت ذره i ام در تکرار k ام است. بردار d بعدی p_{id} مقدار بهترین محل یا $pbest$ برای ذره i ام در تکرار k ام است. بردار d بعدی p_{gd} مقدار بهترین محل تمام ذرات یا $gbest$ در تکرار k ام است. c_1 و c_2 فاکتورهای آموزش هستند. ω نیز فاکتور اینرسی و مقداری مثبت است. دو پارامتر r_1 و r_2 نیز اعداد تصادفی در بازه $(0,1)$ هستند. روابط (22) و (23) نشان می‌دهند که هر ذره چگونه سرعت و موقعیت خود را تعیین می‌کند. پارامترهای قابل تنظیم در الگوریتم PSO تعداد ذرات m ، فاکتور اینرسی ω ، فاکتورهای آموزش c_1 و c_2 و حداکثر تعداد تکرار N می‌باشند. طبق روابط ذکر شده، هر ذره حرکت خود را در جهت ثابت تا زمانی ادامه می‌دهد که از محدوده وضعیت ذره خارج شود، بنابراین الگوریتم تنها در صورتی پاسخ قابل قبولی ارائه می‌دهد که در مسیر حرکت ذره پاسخ مناسبی موجود باشد.

2-8- الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل (ABC)

برای بهینه‌سازی توابع چند متغیره، کارابوگا الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) را بیان کرده است. دسته‌بندی گروه زنبورها به خاطر استقلال داخل کلونی، عملکرد توزیع شده و سیستم درون سازمانی، یکی از بهترین کلونی‌ها برای حل جامع مسائل پیچیده است. الگوریتم کلونی زنبورهای عسل، الگوریتم شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای زنبور عسل است [34]. در الگوریتم ABC ، موقعیت یک منبع غذایی یک راه حل مسئله بهینه سازی را نشان می‌دهند و مقدار شهد از منبع غذا نشان‌دهنده مناسب بودن راه حل است. تعداد زنبورهای کارگر یا زنبورهای تماشاچی برابر با تعداد راه حل‌ها در جامعه است. در اولین قدم، ABC جمعیت اولیه را به صورت تصادفی توزیع می‌کند $P(G = \theta)$ (راه حل‌های SN (مواضع منبع غذایی)، که در آن SN نشان دهنده اندازه جمعیت است. هر راه حل (منبع غذایی) $(i = 1, 2, \dots, SN)$ بردار $D - D$ بعدی است. در اینجا، D ، تعداد پارامترهای بهینه سازی است. پس از مقداردهی

¹ Integral Time Absolute Error

K_p	[0.001;20]	6.3031
K_i	[0.01;5]	2.1973
K_d	[0.001;5]	0.027805

3-1-3- شبیه‌سازی کنترل کننده PID برای زیرسیستم یاو با استفاده از الگوریتم PSO

نتایج شبیه سازی برای مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO در جدول 3 نشان داده شده است. مقدار تابع هزینه بعد از 50 تکرار به مقدار 3483/645 می‌رسد.

جدول 3 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID به روش PSO برای کنترل زاویه یاو

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
5	[0.001;5]	K_p
0.01	[0.01;100]	K_i
8.38	[0.001;50]	K_d

3-1-4- شبیه‌سازی کنترل کننده PID برای زیرسیستم یاو با استفاده از الگوریتم ABC

جدول 4 نتایج شبیه سازی و مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID را با استفاده از الگوریتم ABC را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 100 تکرار به مقدار 433/582 می‌رسد.

جدول 4 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID به روش ABC برای کنترل زاویه یاو

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
141.706	[0.001;150]	K_p
295.1395	[0.01;300]	K_i
43.0438	[0.001;50]	K_d

3-2-2- بهینه سازی طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم PSO و ABC

به طور کلی معادله کنترل کننده PID مرتبه کسری به صورت زیر است:

$$u = k_p e + k_i D^{-\nu} e + k_d D^{\nu} e \quad (28)$$

3-2-1- شبیه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای زیرسیستم پیچ با استفاده از الگوریتم PSO

شبیه سازی‌ها شامل چندین کد نوشته شده متلب است که توسط یک کد متلب فراخوانده می‌شود. جدول 5 نتایج شبیه سازی و مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری را با استفاده از الگوریتم PSO را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 50 تکرار به مقدار 20/3148 می‌رسد.

از لحاظ محاسباتی، پیاده سازی سیستم مبتنی بر کنترل کننده PID مرتبه صحیح محاسبات بسیار اندکی (کمتر از 10 عمل ریاضی) در هر سیکل کنترلی به سیستم پردازشی در حالت زمان واقعی تحمیل می‌نماید در حالیکه بخش زیادی از محاسبات در سیستم های مبتنی بر یادگیری بصورت آفلاین انجام می‌گردد و محاسبات متوسطی (کمتر از 100 عمل ریاضی) بصورت زمان واقعی به سیستم پردازشی تحمیل می‌نماید. با توجه به قدرت بالای پردازشی کنترل کننده های صنعتی هر دو این روشها قابلیت پیاده سازی روی یک کنترل کننده صنعتی (PLC) اقتصادی را دارند.

3-1-1- بهینه سازی طراحی کنترل کننده PID مرتبه صحیح با استفاده از الگوریتم PSO و ABC

به طور کلی معادله کنترل کننده PID مرتبه صحیح به صورت زیر است:

$$u = k_p e + k_i \int e + k_d \dot{e} \quad (26)$$

طراحی کنترل کننده PID مرتبه صحیح نیازمند تعیین سه مشخصه بهره تناسبی K_p ، بهره انتگرالی K_i و بهره مشتقی K_d است. در این قسمت بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده‌های PID مرتبه صحیح با الگوریتم بهینه‌سازی PSO و ABC برای کنترل زوایای پیچ و یا ارائه شده است. در هر قسمت ضرایب مربوط به کنترل کننده‌ها در قالب جداول آمده است.

3-1-1- شبیه‌سازی کنترل کننده PID برای زیرسیستم پیچ با استفاده از الگوریتم PSO

شبیه سازی‌ها شامل چندین کد نوشته شده متلب است که توسط یک کد متلب فراخوانده می‌شود. قسمت سیمولینک مربوط به کنترل زاویه پیچ نیز توسط این کد فراخوانده می‌شود. شکل 4 نتایج شبیه سازی و جدول 1 مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID را با استفاده از الگوریتم PSO را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 50 تکرار به مقدار 38/8617 می‌رسد.

جدول 1 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID به روش PSO برای کنترل زاویه پیچ

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
20	[0.001;20]	K_p
5	[0.01;5]	K_i
4.4153	[0.001;5]	K_d

3-1-2- شبیه‌سازی کنترل کننده PID برای زیرسیستم پیچ با استفاده از الگوریتم ABC

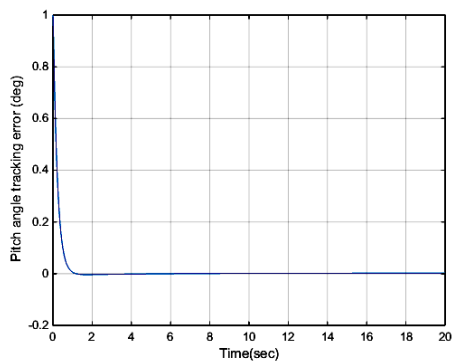
سیستم یاو مشخصه‌های غیرخطی زیادی دارد و بدست آوردن یک مدل ریاضی دقیق از آن، مشکل است. برای کنترل یاو از یک تابع تبدیل و یک مدل ساده شده استفاده شده است [35]:

$$G(s) = 65/500s^2 + s \quad (27)$$

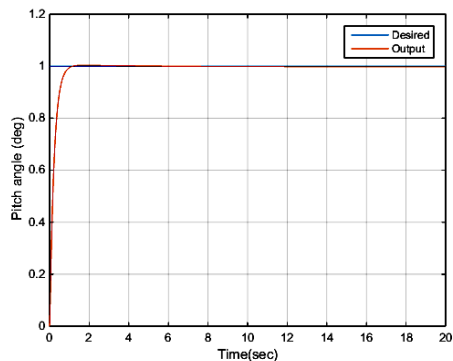
شکل 5 و جدول 2 نتایج شبیه سازی و مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID را با استفاده از الگوریتم ABC را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 50 تکرار به مقدار 10/7935 می‌رسد.

جدول 2 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID به روش ABC برای کنترل زاویه پیچ

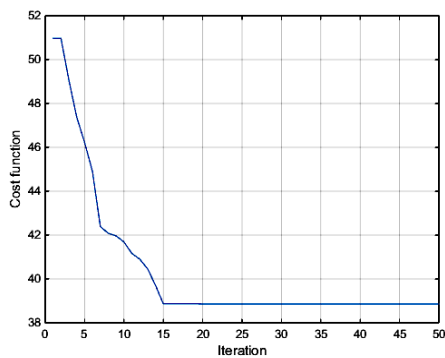
مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
-------------	----------------	-------



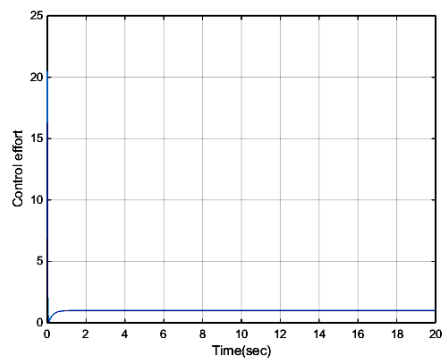
ب



الف

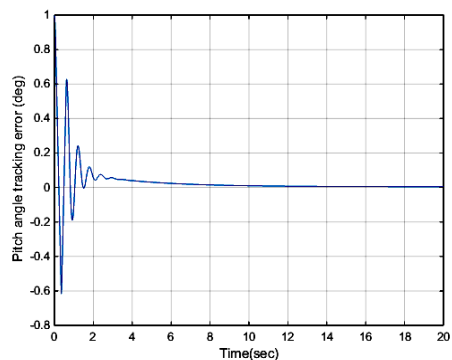


د

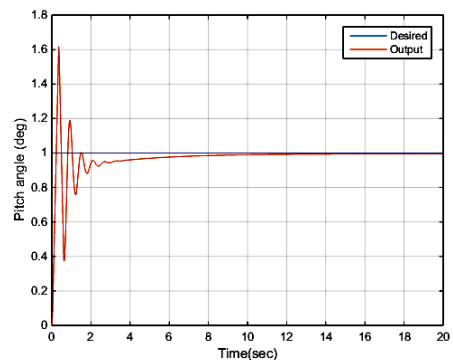


ج

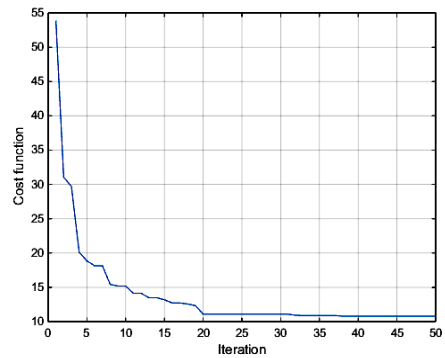
شکل 4 الف زاویه پیچ بر حسب زمان (PID-PSO). ب) نمودار خطای ردیابی موقعیت زاویه پیچ بر حسب زمان (PID-PSO). ج) نمودار تلاش کنترلی پیچ بر حسب زمان (PID-PSO). د) نمودار تابع هزینه پیچ بر حسب تعداد تکرار (PID-PSO).



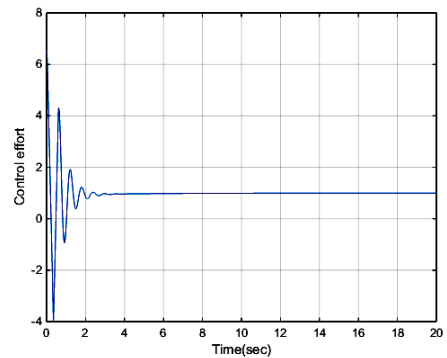
ب



الف



د



ج

شکل 5 الف زاویه پیچ بر حسب زمان (PID-ABC). ب) نمودار خطای ردیابی موقعیت زاویه پیچ بر حسب زمان (PID-ABC). ج) نمودار تلاش کنترلی پیچ بر حسب زمان (PID-ABC). د) نمودار تابع هزینه پیچ بر حسب تعداد تکرار (PID-ABC).

جدول 8 نتایج شبیه سازی و مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری را با استفاده از الگوریتم ABC را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 100 تکرار به مقدار 442/3529 می‌رسد.

جدول 8 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری به روش ABC برای کنترل زاویه یاو

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
13.0966	[0.001;5]	K_p
12.9283	[0.01;100]	K_i
29.9261	[0.001;50]	K_d
0.090808	[0.01;1.2]	v_i
00.78166	[0.01;1.2]	v_d

4- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از معرفی اجزای توربین بادی به خصوص سیستم کنترل یاو و پیچ و سیستم‌های تبدیل انرژی و روش‌های کنترلی آن، بررسی شد. سپس، روابط مربوط به کنترل زوایای پیچ و یاو و نیز توان خروجی توربین بادی بررسی شد. همچنین راجع به الگوریتم‌های بهینه‌سازی حرکت گروهی پرندگان و کلونی مصنوعی زنبور عسل توضیحاتی ارائه شد. در نهایت، با تعریف یک تابع هزینه مناسب و با بکارگیری کنترل کننده‌های PID مرتبه صحیح و PID مرتبه کسری، برای کنترل زوایای پیچ و یاو استفاده شد که پارامترهای این کنترل-کننده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند حرکت گروهی پرندگان و کلونی مصنوعی زنبور عسل به صورت جداگانه، بدست آمد. مرتبه-های کنترل کننده مرتبه کسری نیز توسط این روش‌های بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. در مقایسه کلی بین کنترل کننده PID مرتبه صحیح با PID مرتبه کسری می‌توان گفت که با در نظر گرفتن کنترل کننده PID مرتبه کسری، کنترل زوایای پیچ و یاو در مدت زمان کمتر و با سرعت بیشتری به مقدار ثابتی رسیده است. با توجه به اینکه، معیار انتخاب ضرائب، حداقل سازی تابع هزینه برای خطای ردیابی موقعیت زوایای پیچ و یاو است، با بکارگیری کنترل کننده PID مرتبه کسری به خصوص در مورد زاویه یاو، این خطا تا حد زیادی کاهش یافته است. به طور کلی در حالتی که از کنترل کننده PID مرتبه کسری استفاده شده است، منحنی‌های کنترلی به نرمی تغییر می‌کنند و در مدت زمان کمتر و سریعتری، پایدار می‌شوند. در مقایسه کلی بین دو الگوریتم بهینه‌سازی PSO و ABC به نظر الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم ABC از کارایی بیشتری در این مورد برخوردار است و با تعداد تکرارهای کمتری به نتیجه مطلوب رسیده است. البته، تصمیم‌گیری در این مورد در مورد هر کنترل کننده جای تأمل و نیاز به بررسی بیشتر دارد اما چیزی که مسلم است الگوریتم ABC با تعداد تکرار بیشتر و جمعیت بیشتری از زنبورهای عسل به نتیجه می‌رسد و همچنین تابع هزینه در برخی موارد مقدار بالایی دارد. در مورد خطای ردیابی زوایای پیچ و یاو در حالتی که از الگوریتم PSO برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌ها استفاده می‌شود، مقدار ماکزیمم خطای ردیابی کمتر از حالتی است که از الگوریتم ABC برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌ها استفاده شده است.

6- مراجع

جدول 5 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری به روش PSO برای کنترل زاویه پیچ

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
14.3759	[0.001;20]	K_p
2.8222	[0.01;5]	K_i
2.2916	[0.001;5]	K_d
1.1096	[0.01;1.99]	v_i
1.19	[0.01;1.99]	v_d

3-2-2- شبیه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای زیرسیستم پیچ با استفاده از الگوریتم ABC

جدول 6 نتایج شبیه سازی و مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری را با استفاده از الگوریتم ABC را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 50 تکرار به مقدار 13/1804 می‌رسد.

جدول 6 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری به روش ABC برای کنترل زاویه پیچ

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
32.1727	[0.001;35]	K_p
2.0754	[0.01;5]	K_i
2.9606	[0.001;5]	K_d
1.2617	[0.01;1.99]	v_i
1.2116	[0.01;1.99]	v_d

3-2-3- شبیه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای زیرسیستم یاو با استفاده از الگوریتم PSO

جدول 7 نتایج شبیه سازی و مقادیر بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری را با استفاده از الگوریتم PSO را نشان می‌دهد. مقدار تابع هزینه بعد از 50 تکرار به مقدار 759/4385 می‌رسد.

جدول 7 ضرایب بهینه شده کنترل کننده PID مرتبه کسری به روش PSO برای کنترل زاویه یاو

مقدار نهایی	محدوده‌ی اولیه	ضرایب
1.5738	[0.001;5]	K_p
27.176	[0.01;100]	K_i
30.1351	[0.001;50]	K_d
0.07193	[0.01;1.99]	v_i
0.80225	[0.01;1.99]	v_d

3-2-4- شبیه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای زیرسیستم یاو با استفاده از الگوریتم ABC

- [20] H. Takaai, Y. Chida, K. Sakurai, and T. Isobe, Pitch angle control of wind turbine generator using less conservative robust control, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 46, No. 8, pp. 486-492, 2010.
- [21] A. Abdelkafi, and L. Krichen, New strategy of pitch angle control for energy management of a wind farm, *Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 1470-1479, 2011.
- [22] Y.-J. Joo, and J.-H. Back, Power regulation of variable speed wind turbines using pitch control based on disturbance observer, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 273-280, 2012.
- [23] H. a. M. Nouraei Chaleshteri, Seyed Mohammad Ali, A new method in designing optimal fractional-order fuzzy PID controller with simultaneous adjustment of membership functions and fuzzy rule table, *Tabriz Journal Of Electrical Engineering*, Vol. 48, No. 1, pp. 393-404, 2018. (in Persian)
- [24] P. Rajesh Kumar Reddy, K. Maheshwara Rao, and P. Bala Kishore, Wind turbine pitch and yaw control, *International Journal of Science, Technology & Management*, Vol. 04, No. 01, pp. 618-623, 2015.
- [25] S. Wan, L. Cheng, and X. Sheng, Effects of yaw error on wind turbine running characteristics based on the equivalent wind speed model, *Energies*, Vol. 8, No. 7, pp. 6286-6301, 2015.
- [26] Y. Vidal, L. Acho, N. Luo, M. Zapateiro, and F. Pozo, Power control design for variable-speed wind turbines, *Energies*, Vol. 5, No. 8, pp. 3033-3050, 2012.
- [27] L. Gidwani, H. Tiwari, and R. Bansal, Improving power quality of wind energy conversion system with unconventional power electronic interface, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 445-453, 2013.
- [28] A. Rajasekhar, V. Chaitanya, and S. Das, Fractional-order PI λ D μ controller design using a modified artificial bee colony algorithm, *Lecture Notes in Computer Science*, vol 7076, pp. 670-678, 2011.
- [29] A. Mukhtar, P. M. Tiwari and H. P. Singh, Performance Improvement of Wind Turbine Control using Fractional Order PID Controller with PSO Optimized gains, *International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*, 2020.
- [30] F. D. Bianchi, H. De Battista, and R. J. Mantz, Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design, *Springer Science & Business Media*, 2006.
- [31] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, pp. 717-724, Sept. 2006.
- [32] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*, John Wiley & Sons, 2010.
- [33] L. Dusonchet, F. Massaro and E. Telaretti, Transient stability simulation of a fixed speed wind turbine by Matlab/Simulink, *2007 International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, pp. 651-655, 2007.
- [34] D. Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical report-tr06*, Erciyes university, engineering faculty, 2005.
- [35] Yang F, Yang T, Yang XH, Fuzzy PID Control and Simulation of Wind Power Generation Yaw System, *Advanced Materials Research*, Vol. 953-954, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 353-356, June 2014.
- [1] Sakineh Safayi Mehr, and M. R. Banafsheh, Capabilities of northwestern Iran for the use of small and home wind turbines in the production of clean energy, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 11, No. 1, pp. 24-35, 2024. (in Persian)
- [2] H. Seifi, M. S. Davary, and S. Kouravand, A review of Darriues Hrotor vertical axis wind turbine with porous blades, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 11, No. 1, pp. 139-147, 2024. (in Persian)
- [3] D. W. Zhenzhou Zhao, Tongguang Wang, Wenzhong Shen, Huiwen Liu, Ming Chen, A review: Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 49, 2022.
- [4] M. Borvayeh, A. Azizpanah, and N. Rostami, Wind energy potential measurement in the Karun city, for installing wind turbines, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 11, No. 1, pp. 118-124, 2024. (in Persian)
- [5] F. Padula, and A. Visioli, Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers, *Journal of process control*, Vol. 21, No. 1, pp. 69-81, 2011.
- [6] C. A. Monje, Y. Chen, B. M. Vinagre, D. Xue, and V. Feliu-Batlle, Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications, *Springer Science & Business Media*, 2010.
- [7] K. J. Åström, and T. Hägglund, PID controllers: theory, design, and tuning, *Instrument society of America Research Triangle Park*, 1995.
- [8] G. Tapia, A. Tapia, and J. X. Ostolaza, Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances, *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 21, No. 4, pp. 909-920, 2006.
- [9] M. Hand, and M. Balas, Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable-speed wind turbines, *ASME Wind Energy Symposium*, pp. 31-38, 1998.
- [10] B. Beltran, T. Ahmed-Ali, and M. E. H. Benbouzid, Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems, *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 23, No. 2, pp. 551-558, 2008.
- [11] V. I. Utkin, Sliding mode control design principles and applications to electric drives, *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 40, No. 1, pp. 23-36, 1993.
- [12] C. Lascu, I. Boldea, and F. Blaabjerg, Direct torque control of sensorless induction motor drives: a sliding-mode approach, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 2, pp. 582-590, 2004.
- [13] J. P. Vieira, M. V. Nunes, U. H. Bezerra, and W. Barra Jr, Novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor do DFIG para melhoria da estabilidade transitória em sistemas eólicos, *IEEE Latin America Trans.*, Vol. 5, No. 3, pp. 143-150, 2007.
- [14] Xin-yan Zhang, Jing Cheng and Wei-qing Wang, The Intelligent Control Method Study of Variable Speed Wind Turbine Generator, *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Singapore, pp. 173-177, 2008.
- [15] L. Jerbi, L. Krichen, and A. Ouali, A fuzzy logic supervisor for active and reactive power control of a variable speed wind energy conversion system associated to a flywheel storage system, *Electric power systems research*, Vol. 79, No. 6, pp. 919-925, 2009.
- [16] A. S. Yilmaz, and Z. Özer, Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks, *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 6, pp. 9767-9775, 2009.
- [17] G. Peng, Nonlinear feed forward pitch controller for wind turbine based on rotor's aerodynamic characteristic, *2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Qingdao, China, pp. 879-883, 2010.
- [18] A. F. Bati and S. K. Leabi, NN Self-Tuning Pitch Angle Controller of Wind Power Generation Unit, *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, GA, USA, pp. 2019-2029, 2006.
- [19] N. Schinas, N. Vovos, and G. Giannakopoulos, An autonomous system supplied only by a pitch-controlled variable-speed wind turbine, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 325-331, 2007.