



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Optimal Control of Renewable Energy Turbine using PID Controller and ICACO Method by Blade Pitch System

Hamidreza Khosravi^a, Mehdi Raghebi^{a,*}, Mojtaba Sheikhi Azqandi^{a*} 

^a Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-12-27

Revised: 2025-04-11

Accepted: 2025-04-26

Keywords:

Wind turbine;
Hybrid meta-heuristic
optimization;
PID controller;
Renewable energy;
Blade pitch.

ABSTRACT

One of the major engineering challenges is the design of a wind turbine controller by adjusting the blade pitch angle of the wind turbine. This controller affects the reliability and safety of a wind turbine and maximizes its output power. In this research, a proportional-integral-derivative (PID) controller has been designed and optimized for a 5 MW renewable wind turbine. Given the complexity and nonlinearity of the problem and the high amount of time required to analyze it, an urgent need was felt to apply a robust optimization method with fast convergence. For this purpose, imperialist competitive ant colony optimization (ICACO), which is a hybrid metaheuristic optimization algorithm, was used to find the optimal controller coefficients to achieve the minimum deviation of the turbine's power output and maximum efficiency. In this study, the design variables are the controller coefficients and the control parameters of the turbine, and the blade pitch angles. All steps of the problem analysis, including the creation and modeling of three-dimensional wind in real conditions, turbine analysis under the mentioned wind conditions, applying the controller and the hybrid metaheuristic optimization algorithm, and the link between them, have been coded and performed in the MATLAB and Simulink software environments. The presented results indicate the power of the optimization method in finding the optimal coefficients and increasing the operational efficiency of the turbine. The proposed method has been able to reduce the deviation of the generated power from the initial generated power by about 85 percent.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36349.2776>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding authors.

E-mail address: raghebi@birjand.ac.ir, mojtabasheikhi@birjand.ac.ir

How to cite this article:

H. Khosravi, M. Raghebi and M. Sheikhi Azqandi, "Optimal Control of Renewable Energy Turbine using PID controller and ICACO method by Blade Pitch System," Journal of Modeling in Engineering, 23 83 (2025): 203-216, doi: 10.22075/jme.2025.36349.2776

کنترل بهینه توربین انرژی تجدید پذیر با استفاده از روش ICACO و PID با تغییر زاویه گام

پره

حمیدرضا خسروی^۱، مهدی راغبی^{۱*}، مجتبی شیخی ازغندی^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶	یکی از چالش‌های مهم مهندسی توربین بادی، طراحی کنترل کننده با کمک تنظیم زاویه پره‌ها یا زاویه گام توربین بادی است. قابلیت اطمینان، ایمنی و به حداکثر رساندن توان خروجی یک توربین بادی همگی تحت تاثیر این کنترل کننده قرار دارند. در این پژوهش، طراحی و بهینه‌سازی یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) برای توربین بادی پنج مگاواتی تجدیدپذیر انجام شده است. با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مسأله و بالا بودن مقدار زمان مورد نیاز برای تحلیل آن، نیاز مبرمی به استفاده از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند و در عین حال دارای همگرایی سریع احساس شد. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی رقابت استعماری-مورچه (ICACO) جهت یافتن ضرایب بهینه کنترل کننده برای رسیدن به حداقل انحراف توان تولیدی توربین و رسیدن به حداکثر بازده آن استفاده شد. در این پژوهش متغیرهای طراحی ضرایب کنترل کننده و پارامترهای کنترلی زاویه گام توربین است. تمامی مراحل تحلیل مسأله شامل ایجاد و مدل‌سازی باد در حالت سه بعدی، تحلیل توربین در اثر اعمال باد ذکر شده، به‌کارگیری کنترل کننده و الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی و ارتباط بین آنها در محیط نرم‌افزار MATLAB و سیمولینک، کدنویسی و اعمال شده است. نتایج ارائه شده حاکی از قدرت روش بهینه‌سازی در یافتن ضرایب بهینه و بالا بردن بازده عملیاتی توربین است. روش پیشنهادی توانسته حدود ۸۵ درصد میزان انحراف توان تولیدی از مقدار توان تولیدی اولیه را کاهش دهد.
واژگان کلیدی: توربین بادی، بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی، انرژی تجدیدپذیر، زاویه گام پره.	
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36349.2776	
© 2025 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)	

۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند نفت خام، گاز طبیعی و زغال‌سنگ به‌عنوان محرک‌های اقتصادی، نقش بسیار مؤثری ایفا می‌کنند و در بسیاری از کشورها به‌عنوان پایه و اساس توسعه اقتصادی شناخته می‌شوند. با این حال، این منابع برای محیط زیست و سلامتی عمومی خطرناک هستند. انرژی بادی در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های ذاتی آن که پاک است، بر خلاف سوخت‌های فسیلی مورد

توجه قرار گرفته است. توربین‌های بادی، سیستم‌های مکانیکی هستند که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. تجهیزات به‌کار رفته در توربین‌ها به دلیل نوسانات زیاد و نامنظم در سرعت و جهت باد، نمی‌توانند بدون یک سیستم کنترل کننده انرژی الکتریکی مناسبی تولید کنند، بنابراین، محققان بر روی پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های کنترلی تمرکز دارند. باد در طبیعت دارای تغییرات چشمگیری از نظر شدت و

* پست الکترونیک نویسندگان مسئول: mojtabasheikhi@birjand.ac.ir، raghebi@birjand.ac.ir

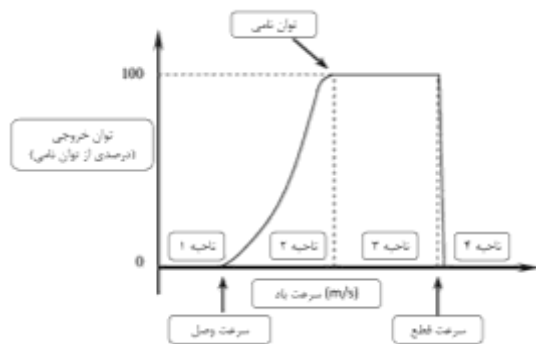
۱. دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

استناد به این مقاله:

حمیدرضا خسروی، مهدی راغبی و مجتبی شیخی ازغندی، "کنترل بهینه توربین با انرژی تجدید پذیر با استفاده از روش ICACO و PID با تغییر زاویه گام پره"، مدل

سازی در مهندسی، ۸۳ (۲۳)، ۲۱۶-۲۰۲ (۱۴۰۴)، doi: 10.22075/jme.2025.36349.2776

کنترل کننده در مقدار نامی ثابت نگه داشته شود تا امکان کار مداوم توربین به وجود آید.



شکل ۱- منحنی توان توربین بادی بر حسب سرعت باد

هنگامی که سرعت چرخش روتور ثابت نگه داشته می شود و سرعت باد از سرعت باد نامی تجاوز می کند، کنترل زاویه پره مورد نیاز است. تنظیم دقیق زاویه گام می تواند تاثیر قابل توجهی بر توان خروجی داشته باشد. سیستم کنترل زاویه پره سیستمی است که زاویه پره توربین بادی را کنترل و تنظیم می کند. این سیستم با تغییر توان آیرودینامیکی وارد بر پرها در سرعت های بالای باد، سرعت روتور را محدود می نماید. این کار به منظور تولید توان پایدار و همچنین حفظ توربین بادی در یک محیط عملیاتی ایمن انجام می شود.

هو و همکاران به طراحی و ارزیابی یک کنترلر PID2 برای تنظیم زاویه پره های توربین های بادی بزرگ پرداخته اند. کنترل کننده PID2 با داشتن دو عملکرد مشتق گیر، نوسانات زاویه پرها را کاهش داده و پایداری و پاسخ دهی سیستم را بهبود می بخشد. نتایج ارائه شده نشان دهنده این است که این کنترلر در مقایسه با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) معمولی، عملکرد بهتر و پایداری دارد و منجر به بهره وری بیشتر و عمر طولانی تر توربین های بادی می شود [۱].

پوره و همکاران به تحلیل و طراحی کنترلرهای تنظیم بهره برای سیستم کنترل زاویه پره های توربین های تجدیدپذیر^۳ پنج مگاواتی (NREL) پرداخته اند. با توجه به غیرخطی بودن سیستم دینامیکی توربین بادی مدل NREL و استفاده از روش های تحلیل پایداری غیرخطی، کنترل کننده تنظیم بهره را طراحی و ارزیابی کردند. این کنترلرها به نحوی طراحی شده اند که عملکرد سیستم را در مواجهه با شرایط عملیاتی متغیر و اغتشاشات مختلف بهبود بخشند.

جهت وزش است. این تغییرات موجب می شود که توربین های بادی نیز به سرعت به این نوسانات واکنش نشان دهند و در نتیجه خروجی انرژی الکتریکی آنها دائماً دچار نوسان شود. این پدیده می تواند چالش هایی را در زمینه پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق ایجاد کند، به ویژه زمانی که سهم انرژی بادی در ترکیب انرژی یک منطقه قابل توجه باشد [۱].

زاویه گام یکی از کلیدی ترین پارامترهای کنترلی در عملکرد توربین بادی است. این زاویه به معنای میزان چرخش یا تغییر زاویه پره های توربین بادی نسبت به جریان باد بوده و نقش بسیار مهمی در کنترل توان خروجی و حفظ پایداری سیستم ایفا می کند. کنترل زاویه گام یکی از عوامل تاثیرگذار بر بازده تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی است. علاوه بر این کنترل درست توربین باعث کاهش نیروهای مکانیکی اعمالی به سازه توربین می شود. برای کنترل توربین باید زاویه گام توسط یک مکانیزم کنترل فعال در هر لحظه تعیین شود. برای این منظور این سیستم با استفاده از داده های دریافتی از حسگرهای باد، سرعت روتور و توان تولیدی توربین، زاویه مناسب را تعیین می کند. سپس با استفاده از موتورهای الکتریکی یا هیدرولیکی درون توربین، تغییر زاویه پرها اعمال می گردد.

در شکل (۱) منحنی توان تولیدی توربین ها بر اساس سرعت های مختلف باد نشان داده شده است. کنترل توربین بادی بر مبنای این که ناحیه کاری آن در کدامیک از نواحی چهارگانه است، انجام می پذیرد. سرعت بادی که در آن توربین شروع به تولید انرژی می کند را سرعت وصل^۲ می گویند. در سرعت های پایین باد، انرژی جنبشی موجود در جریان باد به اندازه ای نیست که بتواند بر تلفات انرژی ناشی از اصطکاک، مقاومت هوا و دیگر عوامل در توربین بادی غلبه کند. بنابراین امکان حرکت چرخشی پره های توربین نیست و در این شرایط، توربین بادی قادر به تولید انرژی الکتریکی نخواهد بود. در ناحیه دوم، سرعت باد بیشتر از سرعت وصل است، اما کمتر از سرعت نامی می باشد. مقدار سرعت نامی توربین حالتی است که منجر به تولید حداکثر توان تولیدی یک توربین بادی یا همان توان نامی می شود. در سرعت های بادی که توربین بادی به حداکثر توان خود می رسد، ناحیه سوم می گویند. در این منطقه توان خروجی توربین بادی باید با استفاده از متغیرهای

^۳ National Renewable Energy Laboratory (NREL)

^۲ Cut in

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که کنترلرهای تنظیم بهره باعث کاهش نوسانات و افزایش پایداری سیستم می‌شوند [۲].

الکوداما و همکاران به بررسی روش‌های کنترل توربین‌های بادی محور افقی پرداخته‌اند. در این تحقیق انواع استراتژی‌های کنترل شامل کنترل زاویه‌ی پره، کنترل گشتاور و کنترل جهت را بررسی کرده‌اند. آن‌ها تکنیک‌های کلاسیک مانند کنترل‌کننده‌های PI/PID را بررسی کرده‌اند. همچنین، تکنیک‌های مدرن و محاسبات نرم از جمله کنترل منطق فازی، کنترل حالت لغزنده و ردیابی نقطه حداکثر توان را به‌عنوان روش‌هایی با عملکرد بهبود یافته نسبت به کنترل‌کننده‌های کلاسیک بیان کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این روش‌های مدرن می‌تواند تا پنج درصد عملکرد توان توربین‌های بادی کوچک و تا دو درصد توربین‌های بزرگ را بهبود دهد [۳].

گورول و عبدی یک روش پیشرفته برای کنترل زاویه گام توربین‌های بادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات را توسعه دادند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات برای پیدا کردن متغیرهای بهینه استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش بهینه‌سازی نقش مهمی در تنظیم ضرایب دارد. در این تحقیق الگوریتم ژنتیک باعث بهبود یک درصدی در کاهش بارهای مکانیکی در توربین بادی شد. این در حالی است که الگوریتم ازدحام ذرات باعث بهبود ۴۴ درصدی گردید [۴].

ماگش و همکاران از الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی در ژنراتورهای بادی متصل به شبکه استفاده کرده‌اند. معیار خطای مربعی به عنوان تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش باعث بهبود عملکرد ژنراتور، افزایش پایداری سیستم، کاهش نوسانات ولتاژ و بهبود پاسخ دینامیکی شده است. نتایج نشان داد که کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی بهینه‌سازی شده با الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی بهره‌وری بیشتری دارد و هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش می‌دهد. به طور کلی در این تحقیق، پایداری سیستم، پاسخ دینامیکی و بهره‌وری ژنراتورهای بادی بهبود یافته‌اند و نوسانات ولتاژ در حالت گذرا کاهش یافته است [۵].

شاوکران و همکاران از دو الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PI تطبیقی در

توربین‌های بادی استفاده کرده‌اند. این الگوریتم‌ها شامل بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی (HS) و الگوریتم ژنتیک (GA) است. آن‌ها کنترل‌کننده PI تطبیقی را طراحی کردند تا بتواند به طور خودکار و در شرایط مختلف کاری بهینه‌سازی شود. نتایج این تحقیق نشان داد که محدودیت اصلی کنترل‌کننده تطبیقی تنها می‌تواند نوسانات جزئی در پروفایل سرعت باد را مدیریت کند. برای نوسانات شدیدتر یا بادهای طوفانی لازم است پارامترها مجدداً ارزیابی شوند [۶].

لارا و همکارانش یک کنترل‌کننده تطبیقی زاویه گام برای توربین‌های بادی بزرگ‌مقیاس طراحی کردند. آن‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه شامل الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه، پارامترهای کنترل‌کننده را برای کاهش نوسانات توان خروجی و بارهای مکانیکی و افزایش بهره‌وری انرژی استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این کنترل‌کننده توانسته نوسانات توان خروجی را کاهش دهد، بارهای مکانیکی روی برج توربین را کم کند و بهره‌وری انرژی را افزایش دهد. همچنین، پایداری این کنترل‌کننده را در شرایط باد شبیه‌سازی کردند [۷].

خو و همکاران یک کنترل‌کننده جدید ترکیبی فازی PI برای توربین‌های بادی طراحی کرده‌اند که در آن از منطق فازی و کنترل‌کننده PI استفاده شده است. این کنترل‌کننده برای بهبود دقت و کارایی در تنظیم زاویه گام توربین بادی طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این کنترل‌کننده می‌تواند بارهای مکانیکی را تا ۲۱/۵۳ درصد تحت شرایط باد آشفته معمول و تا ۱۸/۱۴ درصد تحت شرایط باد آشفته شدید کاهش دهد [۸].

سوله و همکاران بهینه‌سازی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) برای یک توربین بادی با سرعت ثابت را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری، ازدحام ذرات و ژنتیک استفاده کردند و نشان دادند کنترل‌کننده PI تنظیم‌شده با بهینه‌ساز گرگ خاکستری، بیشترین میانگین توان خروجی توربین بادی را همراه با خطای میانگین توان پایین‌تر نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ثبت کرده است [۹].

اقبال و همکاران یک توربین بادی پنج مگاواتی را در نرم‌افزار Bladed شبیه‌سازی کردند و پارامترهای بهینه را برای یک کنترل‌کننده PID در سرعت‌های باد مختلف به کمک

تأثیر زیادی بر عملکرد توربین و کنترل کننده دارد. در این پژوهش، باد به صورت نوسانی در نظر گرفته شده و توسط برنامه‌ای که در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده، تولید می‌گردد. علاوه بر این، در تحقیق حاضر تغییرات جهت باد در هر سه جهت مختصات نسبت به پره‌های توربین، به‌عنوان یک متغیر مهم در عملکرد سیستم مدنظر بوده و مدل‌سازی شده است. مشخصات آیرودینامیکی پره‌ها، اینرسی روتور و گشتاور ژنراتور از جمله عوامل حیاتی هستند که بر توان تولیدی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند. این پارامترها با دقت در مدل اعمال شده تا پاسخ‌های گرفته شده از تحلیل توربین دارای کمترین انحراف از رفتار واقعی توربین بادی باشد. در جدول ۱ مشخصات هندسی توربین پنج مگاواتی NREL ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی توربین بادی تجدیدپذیر پنج مگاواتی

جهت‌گیری روتور	رو به باد
ساختار	سه پره
قطر روتور	۱۲۶ متر
قطر هاب	۳ متر
ارتفاع هاب	۹۰ متر
سرعت باد شروع به کار	۳ متر بر ثانیه
سرعت باد نامی	۱۱/۴ متر بر ثانیه
سرعت باد قطع کار	۲۵ متر بر ثانیه
سرعت شروع کار به روتور	۹/۶ دور در دقیقه
سرعت روتور نامی	۱۲/۱ دور در دقیقه

مدل ریاضی گشتاور روتور یک توربین بادی را می‌توان به صورت رابطه (۱) تعریف کرد [۴].

$$T_i = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} V_\omega^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V_ω نمایانگر سرعت باد در مقطع روتور توربین و T_i گشتاور تولیدی روتور است که مستقیماً به توان مکانیکی منتقل شده به ژنراتور مرتبط است. چگالی هوای آزاد ρ تحت تأثیر شرایط محیطی مانند دما و فشار بوده که نقش مهمی در بهره‌وری انرژی ایفا می‌کند. شعاع روتور R به دلیل تأثیر مکعبی‌اش در این رابطه، یکی از عوامل کلیدی در طراحی توربین است. ضریب توان C_p که تابعی از نسبت سرعت نوک λ و زاویه گام تیغه‌ها β است،

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات تعیین نمودند. این کار می‌تواند منجر به افزایش توان تولیدی شود و سرعت چرخش روتور و گشتاور مکانیکی را محدود کند [۱۰]. ناوارته و همکارانش یک کنترل کننده جدید زاویه گام بر اساس تنظیم خودکار ضرایب PI پیشنهاد کردند. تغییر سرعت باد توسط الگوریتم آموزش یادگیری (TLBO) برای تعیین ضرایب مناسب PI استفاده شد. اثربخشی روش ارائه شده در این تحقیق با نتایج آزمایشی بر روی یک توربین بادی ۱۴ کیلوواتی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم واقع در دانشگاه خودمختار کرتارو (UAQ) مکزیک، مورد تأیید قرار گرفت [۱۱].

با توجه به مرور تحقیقات گذشته مشخص شد که به دلیل پیچیده بودن تحلیل مسئله و زیاد بودن متغیرهای دخیل برای کنترل سیستم توربین‌های بادی تجدیدپذیر، نیاز به استفاده از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند وجود دارد. علاوه بر این پارامترهای کنترل کننده PID معمولاً ناشناخته‌اند و تعیین آن‌ها به صورت تحلیلی فرآیندی دشوار و غیرقابل انجام محسوب می‌شود. بر این اساس در پژوهش حاضر از یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی برای کنترل عملکرد توربین بادی پنج مگاواتی NREL با تغییرات دقیق زاویه گام در هر لحظه استفاده شده است. مدل‌سازی و تحلیل توربین به کمک برنامه نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB با عنوان FAST انجام پذیرفته است. در شبیه‌سازی سعی شده است، ابتدا دیاگرام واقعی پروفیل باد به صورت سه بعدی به برنامه اعمال گردد و پاسخ‌های توربین در هر لحظه مورد ارزیابی قرار گیرد و سپس با ارتباط بین برنامه کنترل کننده PID و الگوریتم بهینه‌سازی ICACO ضرایب بهینه کنترل کننده را تعیین می‌نماید.

۲- تعریف مسئله

در این مطالعه، یک الگوریتم کنترل کننده بهینه برای یک توربین بادی پنج مگاواتی طراحی شده است. برای توسعه این کنترل کننده و ارزیابی عملکرد آن، سیستم توربین بادی به صورت جامع و با عملکرد واقعی مدل‌سازی شده است. مدل ریاضی این سیستم با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB و به کارگیری از محیط سیمولینک آن تولید شده است و توانایی محاسبه پاسخ‌های توربین از جمله توان و گشتاور خروجی، نیروهای اعمالی به پره‌ها و اثرات کنترل کننده را دارا است. یکی از عوامل کلیدی در تعیین پاسخ‌های توربین بادی، شرایط باد اعمالی به آن است که

بازده تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی را تعیین می‌کند. این مدل نشان می‌دهد که گشتاور روتور با مربع سرعت باد و مکعب شعاع روتور نسبت مستقیم دارد. بهینه‌سازی ضریب توان با کنترل پارامترهای λ و β یکی از چالش‌های اصلی در طراحی سیستم‌های کنترل توربین بادی است. همچنین، توان باد یا انرژی جنبشی موجود در باد به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$P = 0.5\rho AV_{\omega}^3 \quad (2)$$

در این رابطه، A ناحیه‌ای است که توسط پرها جاروب می‌شود. به عبارت دیگر A سطح مقطع برخورد باد با پره‌های توربین بادی است. یک توربین بادی تنها می‌تواند بخشی از توان باد را استخراج کند که به قانون بتز معروف است. این کسر با ضریب توان توربین توصیف می‌شود و تابعی از زاویه گام پره و نسبت سرعت نوک پره است. با توجه به رابطه (۱) و (۲)، توان مکانیکی استخراج شده از باد توسط پره‌های توربین بادی به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$P_{wt} = 0.5\rho AV_{\omega}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3)$$

نحوه تغییرات C_p بسیار غیرخطی است و به سرعت باد، سرعت چرخش توربین و پارامترهای پره توربین مانند زاویه گام وابسته است. نسبت سرعت نوک پره به عنوان نسبت بین سرعت نوک پره و سرعت باد با رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\lambda = \frac{\omega_{wt} R}{V_{\omega}} \quad (4)$$

در رابطه فوق ω_{wt} سرعت روتور توربین است. هر تغییری در سرعت روتور یا سرعت باد باعث تغییر ضرایب توان می‌شود. با افزایش سرعت باد توان استخراج شده توسط توربین افزایش می‌یابد. در سرعت نامی باد، توان تولیدی به مقدار نامی خود خواهد رسید. اگر سرعت باد به افزایش خود ادامه دهد، توان خروجی نیز افزایش می‌یابد، بنابراین سیستم کنترلی باید توان آیرودینامیکی دریافت شده از باد را در مقدار توان نامی ثابت نگه دارد. در غیر این صورت برای جلوگیری از آسیب رساندن به توربین و تجهیزات آن باید، توربین از مدار تولید خارج شود.

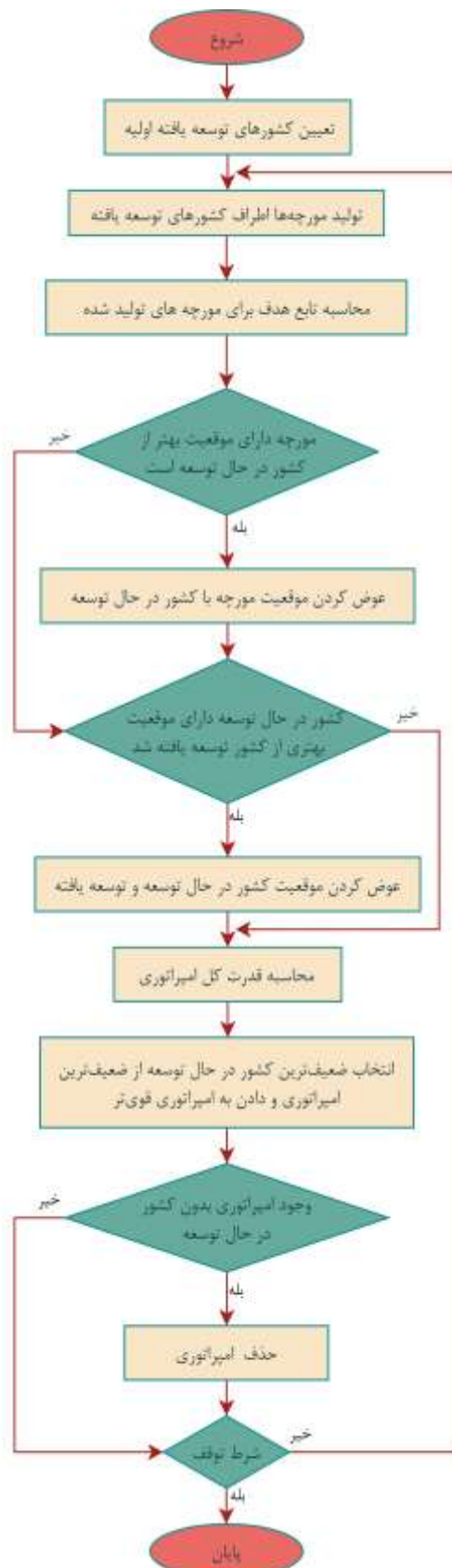
۳- الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-

مورچه برای کنترل کننده PID

الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه

(ICACO)، یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری است که از تکامل اجتماعی-سیاسی انسان‌ها الهام گرفته شده است [۱۲]. این الگوریتم سعی در بهبود نقاط قوت هر یک از دو روش رقابت استعماری و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها داشته و توانسته نقطه ضعف روش رقابت استعماری در گرفتار شدن در دام بهینه محلی را تا حد زیادی از بین ببرد. جمعیت اولیه در این روش بهینه‌سازی به طور تصادفی ایجاد می‌شود و هر یک از آنها کشور نامیده می‌شود. سپس جمعیت به دو گروه، شامل استعمارگران و مستعمرات طبقه‌بندی می‌شود [۱۳]. هدف اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه، یافتن راه حل بهینه سراسری با سرعت همگرایی بهتر نسبت به استفاده از هر یک از الگوریتم‌ها به صورت مجزا است. الگوریتم رقابت استعماری یک روش بهینه‌سازی است که از مفهوم استعمار و رقابت بین امپراتوری‌ها برای تسلط بر مستعمرات استفاده می‌کند. در این الگوریتم، هر یک از امپراتوری‌ها که در ابتدای اجرای الگوریتم با استفاده از راه‌حل‌های ممکن ساخته می‌شوند، تلاش می‌کنند تا با تصاحب مستعمرات دیگر امپراتوری، قدرت خود را بهبود بخشند. این روند تا زمانی که یک امپراتوری تمام مستعمرات را به خود جذب کند، ادامه می‌یابد. از سوی دیگر، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها بر اساس رفتار جستجوی غذا توسط مورچه‌ها در طبیعت است. این الگوریتم از یک مکانیزم مبتنی بر انتشار فرومون برای هدایت جستجوی مسیر بهینه استفاده می‌کند. مورچه‌ها با گذشت زمان و با تبادل اطلاعات، مسیرهای کوتاه‌تر و بهینه‌تر را شناسایی و تقویت می‌کنند. در الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری-مورچه، تلاش می‌شود که نقاط ضعف هر یک از الگوریتم‌ها با استفاده از ویژگی‌های مثبت دیگری پوشش داده شود. الگوریتم رقابت استعماری به دلیل ساختار جهانی و رقابتی خود، برای جستجوی اولیه و یافتن مناطق مناسب در فضای جستجو بسیار مناسب است. با این حال، در مسائل دارای مینیمم محلی زیاد، در فازهای پایانی در همگرایی به سمت بهینه سراسری دچار مشکل شده و امکان فرار از دام بهینه محلی را ندارد. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها در این مواقع با استفاده از مکانیزم فرومونی و جستجوی محلی دقیق‌تر وارد عمل می‌شود و می‌تواند فرآیند جستجو را بهبود بخشد.

در الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری-کلونی مورچه‌ها، ابتدا



شکل ۲- نمودار جریان‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه

امپراتوری‌ها به طور تصادفی در فضای جستجو ایجاد می‌شوند که هر امپراتوری شامل یک امپراتور و چند مستعمره است. سپس امپراتوری‌ها از طریق فرآیند رقابت برای جذب مستعمرات بیشتر تلاش می‌کنند. برخلاف الگوریتم رقابت استعماری معمولی، در این مرحله از اطلاعات فرومونی الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای بهبود تصمیم‌گیری‌ها در انتخاب مسیر استفاده می‌شود. هنگامی که امپراتوری‌ها به یک حالت نسبتاً پایدار می‌رسند، الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای جستجوی محلی دقیق‌تر وارد عمل شده و مورچه‌ها با استفاده از فرومون‌های تجمع یافته در امپراتوری‌ها بهترین مسیرها را شناسایی می‌کنند. علاوه بر این، تبادل فرومون‌ها بین امپراتوری‌ها صورت می‌گیرد و این امر سبب اشتراک‌گذاری تجربیات در فرآیند رقابت می‌شود. در نهایت، با گذر زمان و تقویت مسیرهای بهینه توسط الگوریتم کلونی مورچه‌ها و کاهش تعداد امپراتوری‌ها از طریق الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم به یک راه حل بهینه می‌شود. به طور کلی، همان طور که در شکل (۲) نمودار جریان‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-کلونی مورچه‌ها نمایش داده شده است، الگوریتم ترکیبی ارائه شده تاکنون در حل مسائل پیچیده و غیرخطی از جمله بهینه‌سازی سازه‌ها [۱۲-۱۳]، شکل دهی فلزات [۱۴-۱۵]، طراحی بهینه دمپر به منظور مستهلک کردن ارتعاشات اعمالی به سیستم [۱۶-۱۷] و همچنین مدل‌سازی و محاسبه نیروی تماس بین دو جسم در حال برخورد [۱۸] مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- تحلیل مسئله

در جدول شماره ۲، پارامترهای عملکردی مربوط به توربین بادی پنج مگاواتی ارائه شده است. میانگین سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده که بیشتر از سرعت نامی توربین است. بنابراین، توربین بادی در این شرایط در ناحیه بهره‌برداری ۳ ارائه شده در شکل (۱) قرار دارد. در این ناحیه، سرعت چرخش روتور باید برابر با سرعت نامی باشد. از این رو، سرعت ثابت مورد نیاز توربین بادی در ناحیه سوم معادل ۱۲/۱ دور بر دقیقه است. در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی باد، توان خروجی بهینه توربین بادی با استفاده از طرح‌های کنترل گشتاور برای یک توربین بادی با سرعت متغیر به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید.

جدول ۲- مشخصات عملکردی توربین بادی

مقدار	پارامتر	توضیحات
۵ مگاوات	P_n	قدرت نامی
۵۵ متر	R	شعاع پره توربین
۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب	ρ	چگالی هوا
۵ متر بر ثانیه	V_{in}	سرعت وصل
۲۵ متر بر ثانیه	V_{out}	سرعت قطع

عملیاتی و ویژگی‌های مکانیکی توربین دچار تغییر می‌شوند. همچنین رابطه (۷) نشان می‌دهد که گشتاور مرجع $T_{e(ref)}$ به صورت مربعی نسبت به سرعت زاویه‌ای موتور ω_m افزایش می‌یابد. در این رابطه، ضریب K_{opt} به عنوان یک فاکتور بهینه‌سازی ایفای نقش می‌کند و نقش کلیدی در تنظیم و دستیابی به عملکرد مطلوب سیستم دارد.

۴-۱- پارامترهای مهم در کنترل کننده PID

سیگنال خروجی کنترل کننده PID را می‌توان به صورت رابطه (۹) بیان کرد.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

سیگنال خروجی کنترل کننده PID با نماد $u(t)$ نشان داده می‌شود و $e(t)$ بیانگر خطای سیستم است که تفاوت بین مقدار مطلوب و مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. ضریب تناسبی با K_p ، ضریب انتگرالی با K_i و ضریب مشتق‌گیر با K_d نمایش داده می‌شوند. در رابطه (۹) مقدار خطا e به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$e = \omega_{m_ref} - \omega_m \quad (10)$$

ω_{m_ref} نشان‌دهنده مقدار مطلوب یا مرجع است و ω_m مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. در نتیجه، زاویه گام β_d در کنترل کننده PID به شکل رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

$$\beta_d = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، ضریب K_p نسبت به K_i معمولاً بسیار بزرگ‌تر است و تغییرات ضریب مشتق‌گیر K_d نیز به سرعت واکنش کنترل کننده نسبت به تغییرات خطا کمک می‌کند. همان‌طور که گفته شد برای محاسبه نرخ بهره‌های کنترل کننده نیاز به محاسبات تحلیلی است و با توجه به این که توربین بادی سیستمی غیرخطی است، به دست آوردن ضرایب کنترل کننده از طریق حل تحلیلی غیرممکن است. به همین منظور برای تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده توربین بادی از مدل‌سازی آن در محیط نرم افزار مطلب و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اقدام شده است.

۴-۲- مقادیر بهره برای کنترل کننده PID

برای دستیابی به عملکرد بهینه در یک کنترل کننده PID برای دستیابی به عملکرد بهینه باید مقادیر بهره‌های تناسبی (K_p)، انتگرالی (K_i) و مشتق‌گیر (K_d) به طور دقیق

$$T_{e(ref)} = \frac{P_{wt(max)}}{\omega_m} \quad (5)$$

در رابطه فوق $T_{e(ref)}$ گشتاور مرجع الکتریکی است، همچنین می‌توان با استفاده از رابطه (۵) مقدار توان خروجی حداکثر را محاسبه کرد.

$$T_{e(ref)} = \frac{0.5 \rho \pi R^2 C_{p_max} \left(\frac{R \omega_{wt}}{\lambda_{opt}} \right)^3}{\omega_m} \quad (6)$$

در رابطه (۶) C_{p_max} حداکثر ضریب توان است. از آنجایی که در حالت پایا $\omega_m = n g \omega_{wt}$ است، بنابراین مقدار بهینه را می‌توان به صورت رابطه (۷) تعریف کرد.

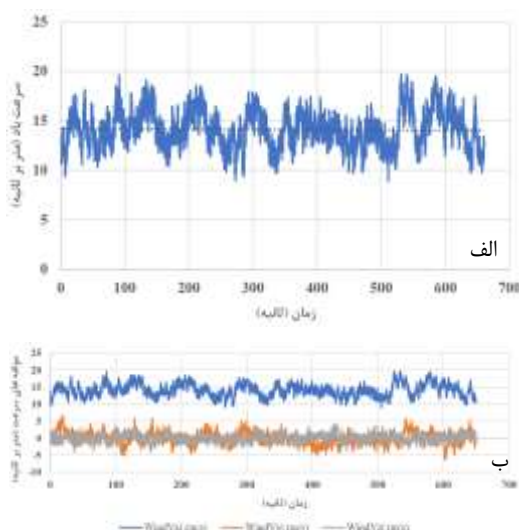
$$K_{opt} = \frac{0.5 \rho \pi R^5 C_{p_max}}{\lambda_{opt}^3 n g^3} \quad (7)$$

بنابراین قانون کنترل مربعی را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$T_{e(ref)} = K_{opt} \omega_m^2 \quad (8)$$

طبق رابطه (۸)، تلفات اصطکاک در نظر گرفته نمی‌شود. هدف این رابطه، نشان دادن ارتباط مستقیم میان گشتاور تولیدی و سرعت زاویه‌ای روتور است. افزودن اصطکاک به معادله موجب پیچیدگی محاسباتی می‌شود، درحالی‌که اثر آن معمولاً کوچک بوده و قابل جبران است. از رابطه (۷) می‌توان نتیجه گرفت که نرخ بهره‌های بهینه در توربین‌های بادی مختلف متفاوت است. طراحی پره، قطر روتور و زاویه حمله از جمله عوامل تأثیرگذار بر حداکثر توان استخراج شده از باد است. حتی اگر دو توربین دارای توان نامی یکسان باشند، این عوامل می‌توانند باعث تفاوت در کنترل آن‌ها شوند. علاوه بر این، نرخ بهره‌ها ممکن است در طول عمر توربین تغییر کنند، چرا که با گذشت زمان شرایط

قدرتمند برای تولید بردارهای سرعت باد در یک سری زمانی در کل ناحیه جاروب شده روتور است. در این صورت یک مدل کامل از رفتار باد در سه بعد با سرعت‌های مختلف متغیر با در نظر گرفتن تمام شرایط محیطی و فیزیکی در طبیعت است. با استفاده از توربسیم، مهندسان و محققان می‌توانند داده‌های دقیقی از جریان باد تولید کنند که شامل تغییرات سرعت و جهت باد در طول زمان است. این اطلاعات برای ارزیابی عملکرد توربین‌ها در شرایط مختلف جوی بسیار حیاتی است و به بهینه‌سازی طراحی و عملکرد سیستم‌های انرژی بادی کمک می‌کند. در این تحقیق برای تولید جریان باد از میانگین سرعت ۱۴ متر بر ثانیه در طول ۶۵۰ ثانیه شبیه‌سازی استفاده شده است. ناحیه جاروب روتور به یک شبکه 23×23 که سرعت و جهت باد توسط برای هر سلول شبکه محاسبه شده تقسیم می‌گردد. شکل (۳) سرعت باد ورودی تولید شده توسط این زیر برنامه برحسب متر بر ثانیه در طول زمان را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی، سه مؤلفه اصلی سرعت باد WindVxi، WindVyi، WindVzi به ترتیب سرعت باد را در راستاهای x، y و z نشان می‌دهند. این مؤلفه‌ها تأثیر مستقیمی بر نیروهای وارد بر توربین دارند. به‌ویژه WindVxi، که نشان‌دهنده سرعت باد در راستای ورودی به توربین است، بیشترین تأثیر را بر نیروی وارده به پره‌ها و تولید توان دارد. نتایج شبیه‌سازی مؤلفه‌های سرعت باد در شکل (۳-الف) و (۳-ب) قابل مشاهده است. در قسمت الف مقادیر سرعت باد و در قسمت ب مقادیر مؤلفه‌های بردار سرعت در سه جهت مختصات نشان داده شده است.



شکل ۳- الف) مقادیر سرعت باد بر حسب زمان ب) مقادیر مؤلفه‌های بردار سرعت باد در سه جهت مختصات (m/s)

انتخاب شوند. به‌ویژه در سیستم‌های پیچیده که در آن‌ها تعاملات بین متغیرهای کنترلی می‌تواند غیرخطی یا متغیر با زمان باشد، روش‌های تنظیم دستی در اکثر موارد نمی‌توانند نتایج قابل قبولی را ارائه دهند. از این رو، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، رویکردی سیستماتیک برای تعیین مقادیر بهینه بهره‌ها فراهم می‌کند. در این روش، یک تابع هدف تعریف می‌شود که معمولاً نشان‌دهنده خطای بین خروجی سیستم و نقطه مطلوب است. توابع هدف رایج شامل انتگرال خطای مطلق (IAE)، انتگرال خطای مربعی (ISE) یا انتگرال خطای مطلق زمان وزن‌دار (ITAE) می‌باشند. در این تحقیق هدف الگوریتم بهینه‌سازی، کمینه‌سازی تابع هدف که همان خطای مطلق است را از طریق تعیین مقادیر بهینه مقادیر بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر فراهم می‌کند. در رابطه (۱۲) نحوه محاسبه تابع خطای مطلق ارائه شده است.

$$IAE = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (12)$$

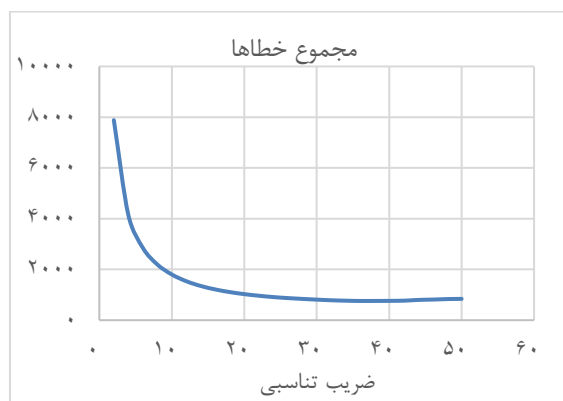
در این تحقیق خطای مطلق بر اساس اختلاف میزان توان تولیدی توربین در هر لحظه با توان تولیدی نامی محاسبه می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی ICACO مجموعه‌های مختلفی از بهره‌ها را بر اساس الگوریتم ارائه شده در بخش قبل ارزیابی کرده و عملکرد آن‌ها را بر اساس تابع هدف مقایسه می‌کند. از طریق تکرارهای متوالی، الگوریتم به بهترین مقادیر کنترل‌کننده همگرا می‌شود که بهترین عملکرد کنترلی را ارائه خواهد داد و خطای سیستم را به حداقل می‌رساند. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، فرایند تنظیم کنترل‌کننده PID را کارآمدتر و قابل اعتمادتر می‌کند و اطمینان می‌دهد که کنترل‌کننده تحت شرایط مختلف عملیاتی می‌تواند به‌صورت بهینه کار می‌کند.

۳-۴- شبیه‌سازی باد

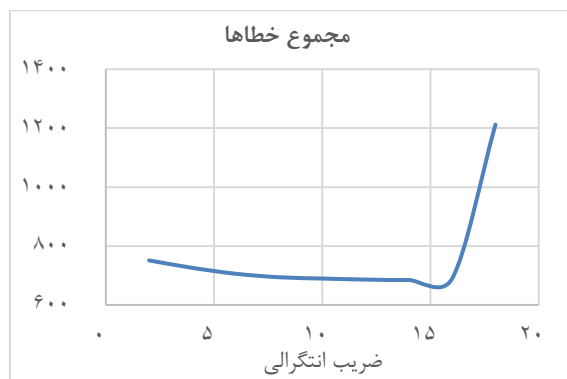
این مقاله به تحلیل نتایج شبیه‌سازی توربین بادی با برنامه نوشته در نرم‌افزار مطلب می‌پردازد. داده‌های ورودی به برنامه از پروفیل سرعت واقعی باد و در شرایط متنوع سرعت باد ورودی است. هدف این مطالعه علاوه بر کنترل توان تولیدی توربین، بررسی تأثیرات نیروهای باد بر سازه توربین بادی و تحلیل تغییرات نیروهای دینامیکی در سیستم‌های آن نیز می‌باشد.

یکی از زیر برنامه به کارگرفته شده در نرم‌افزار MATLAB در این پژوهش، توربسیم است. این زیر برنامه یک ابزار

مقادیر مختلف ضریب انتگرالی نشان می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شود که در ابتدا، با افزایش مقدار ضریب انتگرالی از ۲ تا حدود ۱۵، مجموع خطاها کاهش نسبتاً پایدار و ثابتی دارد. این روند نشان‌دهنده این است که افزایش ضریب انتگرالی باعث کاهش خطا شده است. این امر به دلیل توانایی ضریب انتگرالی در جبران خطاهای پایدار و افزایش دقت تنظیم‌کننده است. اما پس از نقطه کمینه حدود ۱۵، مجموع خطاها به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. این افزایش خطاها ناشی از تأخیر بیش از حد انتگرالی و نوسانات بیش از اندازه است.



شکل ۴- تغییرات ضریب تناسبی



شکل ۵- تغییرات ضریب انتگرالی

۵-۳- تغییرات ضریب مشتقی

در شکل (۶)، مجموع خطاهای مطلق برای مقادیر مختلف ضریب مشتقی نمایش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که مقادیر ضریب مشتقی تا حدود ۲، مجموع خطاها به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش نشان‌دهنده بهبود عملکرد سیستم است. با این حال، پس از مقدار ضریب مشتقی بزرگ‌تر از ۲، مجموع خطاها به آرامی شروع به افزایش می‌کند که نشان‌دهنده افزایش بیش از حد ضریب مشتقی است.

۵- تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده

از روی مقادیر سرعت نشان داده شده در شکل (۳) می‌توان متوجه شد که سرعت باد در برخی مواقع از سرعت نامی بیشتر است و برای امکان تداوم تولید توان توربین نیاز به یک کنترل کننده است. کنترل کننده PID شامل سه مؤلفه اصلی عبارت تناسبی P ، انتگرالی I و مشتقی D است. هر یک از این اجزا نقش مجزایی در تنظیم و بهبود عملکرد سیستم ایفا می‌کنند. هدف اصلی از این بخش، بررسی تأثیر تغییرات ضرایب کنترل کننده PID بر روی عملکرد مدل شبیه‌سازی شده است. در این راستا، تغییراتی در ضرایب کنترل کننده اعمال شده و تأثیر آن‌ها در سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا ضریب تناسبی P در یک بازه مشخص تغییر داده شده و تأثیر آن بر پارامتر عملکرد سیستم، مقدار مجموع خطاها نسبت به مرجع در زمان شبیه‌سازی، مورد تحلیل قرار گرفته است. سپس با ثابت نگه داشتن مقدار بهترین ضریب P ، ضریب انتگرالی I در مقادیر مختلف تغییر داده شده و نتایج حاصل بررسی شده‌اند. در نهایت، ضریب مشتقی D نیز برای دستیابی به بهترین عملکرد و کمترین خطای سیستم انتخاب شده است.

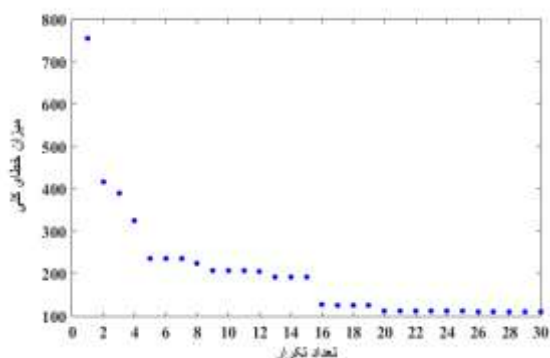
۵-۱- تغییرات ضریب تناسبی

ضریب تناسبی به عنوان اولین بخش از کنترل کننده، نقشی مهم در واکنش سریع سیستم به تغییرات خطا دارد. برای بررسی تأثیر این ضریب، مقادیر مختلف ضریب تناسبی از ۲ تا ۵۰ تغییر داده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۴) نشان داده شده است. نمودار ارائه شده تغییرات مجموع خطاها را نسبت به ضریب تناسبی نشان می‌دهد. در این نمودار، با افزایش مقدار از ۲ تا ۳۸، مجموع خطاها به‌طور پیوسته کاهش یافته و سیستم به تدریج به پاسخ بهینه نزدیک می‌شود. مقدار ضریب تناسبی ۳۸ به عنوان نقطه بهینه شناسایی شده که در آن مجموع خطاها به کمترین مقدار خود رسیده و عملکرد سیستم بهبود یافته است. اما با افزایش بیشتر ضریب تناسبی پس از این نقطه، مجموع خطاها مجدداً افزایش می‌یابد. بنابراین، مقدار کمینه خطا برابر با ۳۸ انتخاب شد تا دستیابی به حداقل خطا حفظ شود. این نتایج حاکی از اهمیت تنظیم صحیح ضریب تناسبی است، به‌طوری‌که انتخاب مقدار نامناسب می‌تواند منجر به کاهش کارایی و حتی ناپایداری سیستم شود.

۵-۲- تغییرات ضریب انتگرالی

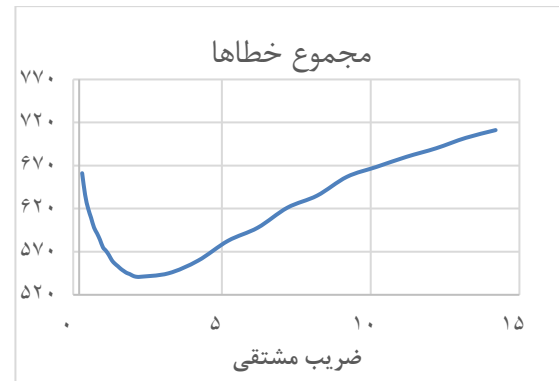
شکل (۵) تغییرات مجموع خطاهای مطلق را نسبت به

انحراف نهایی بهینه به دست آمده با روش ارائه شده برابر ۱۱۰/۲۱ به ازای متغیرهای طراحی بهینه به صورت ضریب تناسبی ۳۹/۶۷، ضریب انتگرالی ۱۶/۴۴ و ضریب مشتقی ۱/۰۵ به دست آمدند. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، میزان انحراف کلی توان توربین از مقدار حدودی ۷۵۵ به مقدار حدودی ۱۱۰ کاهش پیدا کرده است. درصد کاهش انحراف توان تولیدی توربین در اثر کنترل با ضرایب بهینه نسبت به طرح اولیه ضرایب کنترلی در حدود ۸۵ درصد است. این نتایج حاکی از کارایی بالای الگوریتم بهینه‌سازی ICACO را به حداقل رسیدن انحراف از توان نامی و بالا بردن بازده توربین تا بالاترین حد ممکن است.



شکل ۷- نمودار همگرایی به طرح بهینه کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی

در ادامه، به نتایج برنامه نوشته شده برای ضرایب بهینه به دست آمده کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی پرداخته می‌شود. در این شبیه‌سازی، ۵۰ ثانیه اول از داده‌ها حذف شد تا نتایج دقیق‌تری از عملکرد پایدار توربین بادی به دست آید. در شروع شبیه‌سازی، سیستم معمولاً در حال گذار از شرایط ناپایدار به وضعیت پایدار است. در این دوره زمانی، داده‌ها ممکن است شامل نوسانات زیادی باشند که به دلیل عدم همگرایی سیستم به وضعیت پایدار می‌باشد. این نوسانات موقتی که ناشی از فرآیند گذار سیستم است، به‌ویژه در شروع شبیه‌سازی مشاهده می‌شوند. بنابراین، حذف ۵۰ ثانیه اول کمک می‌کند تا نتایج نهایی بیشتر نمایانگر رفتار پایدار و واقعی سیستم باشد. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های دینامیکی معمولاً با یک مرحله انتقال شروع می‌شوند که در آن سیستم به تدریج از یک وضعیت اولیه به وضعیت پایدار می‌رسد. داده‌های این دوره انتقال اغلب نمایانگر عملکرد واقعی سیستم نبوده و تأثیرات ناپایدار آن‌ها ممکن است تحلیل‌ها را مختل کنند. باید دقت شود



شکل ۶- تغییرات ضریب مشتقی

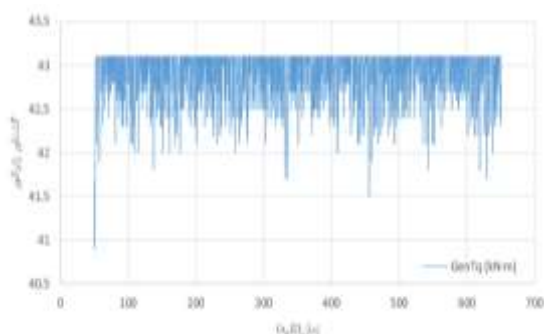
جدول ۳ نشان‌دهنده تا حدودی تأثیر مقادیر پارامترهای کنترل کننده PID شامل ضرایب تناسبی (K_p)، انتگرالی (K_i) و مشتقی (K_d) به همراه مجموع خطای سیستم در سه حالت مختلف تنظیم این پارامترها است. این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم مناسب ضرایب کنترل کننده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش خطای سیستم داشته باشد.

جدول ۳- تأثیر تنظیم ضرایب کنترل کننده PID بر مجموع خطای سیستم در سه حالت مختلف

پارامترهای کنترلی			مجموع خطای کلی
K_p	K_i	K_d	
۳۸	۰	۰	۷۵۸/۱۲
۳۸	۱۴	۰	۶۸۴/۵۸
۳۸	۱۴	۲	۵۴۰/۷۵

۴-۵- بهینه‌سازی ضرایب کنترل کننده با روش بهینه‌سازی

قبل از آغاز فرآیند بهینه‌سازی، ابتدا با توجه به مقادیر به دست آمده در مرحله قبل، مقادیر حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی یا همان ضرایب کنترل کننده در روش بهینه‌سازی تعیین گردید. باید دقت داشت که زمان اجرای الگوریتم بهینه‌سازی برای رسیدن به جواب به دلیل زیاد بودن حجم محاسبات، طولانی بود و برای کاهش این زمان تا حدود یک هفته از سیستم محاسبات سنگین دانشگاه بیرجند بهره برده شد. با سیستم‌های الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی رقابت استعماری-مورچه با هدف یافتن حداقل مقدار انحراف انحرافات توان توربین از مقدار نامی تنظیم و پیاده‌سازی شده است. شکل (۷)، نمودار همگرایی به جواب بهینه با استفاده از روش ICACO ارائه شده است. تنظیمات مورد استفاده در این حالت در ابتدای شروع حل برای ۲۰ کشور و پنج امپراطوری در نظر گرفته شد. مقدار



شکل ۹- نمودار گشتاور ژنراتور برای کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر طراحی بهینه یک کنترل کننده برای یک توربین بادی پنج مگاواتی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که سرعت و جهت باد و نوسانات آن تأثیر بسزایی بر عملکرد و بازدهی توربین بادی دارد، سعی شد در ابتدا حالت واقعی باد اعمالی به توربین در یک بازه زمانی ۶۵۰ ثانیه‌ای با برنامه نوشته شده در نرم افزار MATLAB مدل سازی گردد. سپس با استفاده روابط حاکم و شبیه سازی سیستم، پاسخ توربین بادی به باد ورودی به دست آورده شود. با توجه به پیچیدگی زیاد تحلیل مسئله و از طرفی زمان بر بودن طراحی بهینه کنترل کننده توربین، از یک روش بهینه سازی ترکیبی متاهیورستیک قدرتمند به نام ICACO بهره گرفته شد. نتایج به دست آمده، میزان کارایی توربین بادی را تا حد زیادی بالا برد و میزان انحراف از مقدار توان تولیدی توربین در حالت کنترل بهینه را نسبت به یک حالت اولیه تا ۸۵ درصد کاهش می دهد. علاوه بر این روش پیشنهادی توانست با تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده در سرعت های بالای باد مانع رسیدن به از مدار خارج شدن توربین شود و از آسیب رسانده به تجهیزات آن جلوگیری نماید. در نتیجه با استفاده از روش کنترل دقیق توربین می توان علاوه بر بالا بردن میزان بهره وری توربین، میزان طول عمر آن را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

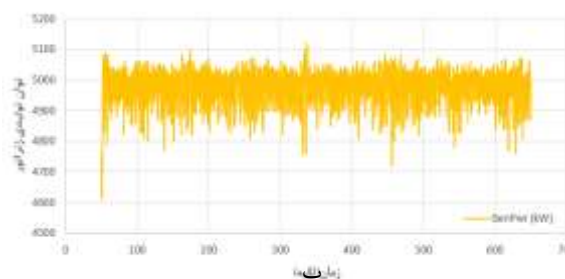
تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

که این داده ها برای بهینه سازی استفاده نشده اند. در شکل (۸-الف) توان تولیدی ژنراتور برحسب کیلووات در طول یک بازه زمانی مشخص نشان داده شده است. در شکل (۸-ب) به خاطر واضح تر شدن نوسانات سیستم، ۵۰ ثانیه ابتدای تحلیل حذف شده است. با بررسی نمودار، می توان مشاهده کرد که توان تولیدی در محدوده ای بین ۴۵۰۰ تا ۵۲۰۰ کیلووات نوسان دارد. این نوسانات نشان دهنده تغییرات مکرر در بار و شرایط عملیاتی ژنراتور است. به طور خاص، میانگین توان تولیدی در مدت زمان تولید ۴۹۷۸/۳۸۸ کیلووات است و نوساناتی در اطراف این مقدار وجود دارد. این نشان دهنده عملکرد نسبتاً پایدار ژنراتور است، اما نوساناتی در برخی نقاط به وضوح قابل مشاهده است.



الف



شکل ۸- نمودار توان تولیدی ژنراتور با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (الف) در کل بازه زمانی مورد بررسی (ب) با حذف ۵۰ ثانیه اول شروع کار توربین

شکل (۹) مربوط به گشتاور ژنراتور در توربین بادی است. این نمودار نشان دهنده تغییرات گشتاور در واحد کیلو نیوتن متر در طول زمان است. گشتاور در محدوده ۴۱/۵ تا ۴۳/۲ کیلو نیوتن متر نوسان دارد. نوسانات کوچک در گشتاور نشان دهنده تغییرات سرعت باد است. وجود قله ها و دره ها در نمودار بیانگر این است که گشتاور به حداکثر و حداقل های مشخصی می رسد. به طور کلی، این نمودار نشان دهنده گشتاور در محدوده ای نزدیک به مقدار مرجع است که نتیجه تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده و عدم تغییرات شدید سرعت روتور و در نتیجه کاهش انحرافات از مقدار نامی است. در این صورت پایداری سیستم بهبود یافته و به حالت بهینه رسیده است.

مشارکت‌های نویسندگان

مجتبی شیخی ازغندی: بازبینی علمی، بررسی و اصلاح

برنامه نوشته شده، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله،
ارزیابی و تفسیر نتایج

منابع مالی

نویسندگان هیچ‌گونه حمایت مالی برای این پژوهش
دریافت نکرده‌اند.

حمیدرضا خسروی: جمع‌آوری داده‌ها، انجام

شبیه‌سازی‌ها و نوشتن برنامه تحلیل، تحلیل نتایج، نگارش
و تهیه پیش‌نویس مقاله

مهدی راغبی: بازبینی علمی، بررسی و اصلاح برنامه نوشته
شده، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، ارزیابی و تفسیر
نتایج.

مراجع

- [1] Hu, Xingqi, Wen Tan, Guolian Hou. "PID2 Control of Large Wind Turbines' Pitch Angle." *Energies* 16, no. 13 (2023): 5096.
- [2] Poureh, Ali, Mohammad Chamani, Abbas Bahri. "Nonlinear Analysis of Gain Scheduled Controllers for the NREL 5-MW Turbine Blade Pitch Control System." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 145 (2023): 108578
- [3] Elkodama, Amira, Amr Ismaiel, A. Abdellatif, S. Shaaban, Shigeo Yoshida, Mostafa A. Rushdi. "Control Methods for Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT): State-of-the-Art Review." *Energies* 16, no. 17 (2023): 6394.
- [4] Gorel, Goksu, Mahdi O. Abdi. "Advanced Pitch Angle Control Based on Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimisation on FAST Turbine Systems." *Elektronika ir Elektrotechnika* 29, no. 4 (2023): 11–18.
- [5] Magesh, T., G. Devi, and T. Lakshmanan. "Improving the performance of grid connected wind generator with a PI control scheme based on the metaheuristic golden eagle optimization algorithm." *Electric Power Systems Research* 214 (2023): 108944.
- [6] Shawqran, Ahmed M., Abdallah El-Marhomy, and Mahmoud A. Attia. "Pitch angle Adaptive PI controller based on heuristics optimization algorithms." In *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications*, pp. 674-687. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [7] Lara, Manuel, Juan Garrido, Mario L. Ruz, and Francisco Vázquez. "Adaptive pitch controller of a large-scale wind turbine using multi-objective optimization." *Applied Sciences* 11, no. 6 (2021): 2844.
- [8] Xu, Bofeng, Yue Yuan, Haoming Liu, Peng Jiang, Ziqi Gao, Xiang Shen, and Xin Cai. "A pitch angle controller based on novel fuzzy-PI control for wind turbine load reduction." *Energies* 13, no. 22 (2020): 6086.
- [9] Sule, A. H., A. S. Mokhtar, JJ Bin Jamian, U. U. Sheikh, and A. Khidrani. "Grey wolf optimizer tuned PI controller for enhancing output parameters of fixed speed wind turbine." In *2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, pp. 118-122. IEEE, 2020.
- [10] Iqbal, Atif, Deng Ying, Adeel Saleem, Muhammad Aftab Hayat, and Muhammad Mateen. "Proposed particle swarm optimization technique for the wind turbine control system." *Measurement and Control* 53, no. 5-6 (2020): 1022-1030.
- [11] Chavero-Navarrete, Ernesto, Mario Trejo-Perea, Juan-Carlos Jáuregui-Correa, Roberto-Valentín Carrillo-Serrano, and José-Gabriel Rios-Moreno. "Pitch angle optimization by intelligent adjusting the gains of a PI controller for small wind turbines in areas with drastic wind speed changes." *Sustainability* 11, no. 23 (2019): 6670.
- [12] Sheikhi, Mojtaba, and Ali Ghoddosian. "A hybrid imperialist competitive ant colony algorithm for optimum geometry design of frame structures." *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal* 46, no. 3 (2013): 403-416.
- [13] Sheikhi, Mojtaba, Ali Ghoddosian, and Morteza Sheikhi. "Optimal Design of Structural Support Positions Using Imperialist Competitive Algorithm and Modified Finite Element." *Modares Mechanical Engineering* 12, no. 3 (2012): 50–59.
- [14] Azqandi, Mojtaba Sheikhi, Navid Nooredin, and Ali Ghoddosian. "Optimization of spring back in U-die bending process of sheet metal using ANN and ICA." *Structural Engineering and Mechanics* 65, no. 4 (2018):

447-452.

[15] Sheikhi, Azqandi Mojtaba, and Mahdi Hassanzadeh. "Optimum Shape Design of Axisymmetric Extrusion Die by using Hybrid Meta-Heuristic Optimization (ICACO)." (2023): 107-117.

[16] Sheikhi Azqandi, Mojtaba, and H. Safaeifar. "Performance Optimization of Three-Mass Nonlinear Rigid Impact Damper by Hybrid Metaheuristic Method in Free Vibration." *Journal of Mechanical Engineering* 52, no. 3 (2022): 105–113.

[17] Safaeifar, H., and Mojtaba Sheikhi Azqandi. "Optimal Design of the Impact Damper in Free Vibrations of SDOF System Using ICACO." *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 11, no. 3 (2021): 461–479.

[18] Safaeifar, H., and Mojtaba Sheikhi Azqandi. "Optimal Model of the Contact Force for the Collision between Two Solid Bodies by ICACO." *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 14, no. 1 (2024): 17–35.