



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:

Revised:

Accepted:

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/>

© 2024 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:

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

پره

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

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	یکی از چالش‌های مهم مهندسی توربین بادی، طراحی کنترل کننده با کمک تنظیم زاویه پره‌ها یا
بازنگری مقاله:	زاویه گام توربین بادی است. قابلیت اطمینان، ایمنی و به حداکثر رساندن توان خروجی یک توربین
پذیرش مقاله:	بادی همگی تحت تاثیر این کنترل کننده قرار دارند. در این پژوهش، طراحی و بهینه‌سازی یک
واژگان کلیدی:	کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) برای توربین بادی پنج مگاواتی تجدیدپذیر انجام
توربین بادی،	شده است. با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مسأله و بالا بودن مقدار زمان مورد نیاز برای
بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی،	تحلیل آن، نیاز مبرمی به استفاده از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند و در عین حال دارای همگرایی
کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی،	سریع احساس شد. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ترکیبی رقابتی استعماری-
انرژی تجدیدپذیر،	مورچه (ICACO) جهت یافتن ضرایب بهینه کنترل کننده برای رسیدن به حداقل انحراف توان
زاویه گام پره.	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.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 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/>)

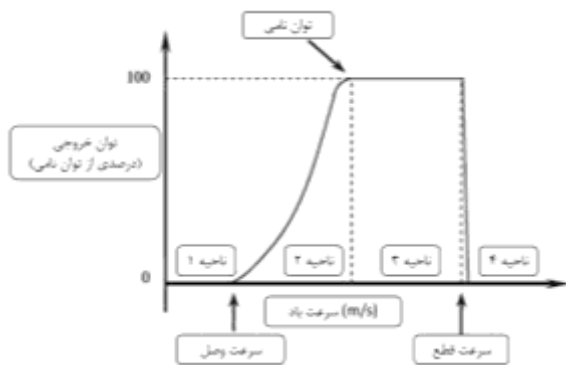
۱-مقدمه

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 به کار رفته در توربین‌ها به دلیل نوسانات زیاد و نامنظم در سرعت و جهت باد، نمی‌توانند بدون یک

منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند نفت خام، گاز طبیعی و زغال سنگ به عنوان محرک‌های اقتصادی، نقش بسیار مؤثری ایفا می‌کنند و در بسیاری از کشورها به عنوان پایه و اساس توسعه اقتصادی شناخته می‌شوند. با این حال، این منابع برای محیط زیست و سلامتی عمومی خطرناک

* پست الکترونیک نویسندگان مسئول: mojtabasheikhi@birjand.ac.ir، raghebi@birjand.ac.ir^۱ دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مقدار سرعت نامی توربین حالتی است که منجر به تولید حداکثر توان تولیدی یک توربین بادی یا همان توان نامی می‌شود. در سرعت‌های بادی که توربین بادی به حداکثر توان خود می‌رسد، ناحیه سوم می‌گویند. در این منطقه توان خروجی توربین بادی باید با استفاده از متغیرهای کنترل‌کننده 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 می‌شود و سرعت باد از سرعت باد نامی تجاوز می‌کند، کنترل زاویه پره مورد نیاز است. تنظیم دقیق زاویه گام می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر توان خروجی داشته باشد. سیستم کنترل زاویه پره سیستمی است که زاویه پره توربین بادی را کنترل و تنظیم می‌کند. این سیستم با تغییر توان آیرودینامیکی وارد بر پره‌ها در سرعت‌های بالای باد، سرعت روتور را محدود می‌نماید. این کار به منظور تولید توان پایدار و همچنین حفظ توربین بادی در یک محیط عملیاتی ایمن انجام می‌شود.

هو و همکاران به طراحی و ارزیابی یک کنترلر PID2 برای تنظیم زاویه پره‌های توربین‌های بادی بزرگ پرداخته‌اند. کنترل‌کننده PID2 با داشتن دو عملگر مشتق‌گیر، نوسانات زاویه پره‌ها را کاهش داده و پایداری و پاسخ‌دهی سیستم را بهبود می‌بخشد. نتایج ارائه شده نشان دهنده این است که این کنترلر در مقایسه با کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) معمولی، عملکرد بهتر و پایداری بیشتری دارد و منجر به بهره‌وری بیشتر و عمر طولانی‌تر توربین‌های بادی می‌شود [۱].

پوره و همکاران به تحلیل و طراحی کنترلرهای تنظیم بهره

سیستم کنترل‌کننده 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 جهت وزش است. این تغییرات موجب می‌شود که توربین‌های بادی نیز به سرعت به این نوسانات واکنش نشان دهند و در نتیجه خروجی انرژی الکتریکی آن‌ها دائماً دچار نوسان شود. این پدیده می‌تواند چالش‌هایی را در زمینه پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق ایجاد کند، به‌ویژه زمانی که سهم انرژی بادی در ترکیب انرژی یک منطقه قابل توجه باشد [۱].

زاویه گام یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای کنترلی در عملکرد توربین بادی است. این زاویه به معنای میزان چرخش یا تغییر زاویه پره‌های توربین بادی نسبت به جریان باد بوده و نقش بسیار مهمی در کنترل توان خروجی و حفظ پایداری سیستم ایفا می‌کند. 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 می‌شود. برای کنترل توربین باید زاویه گام توسط یک مکانیزم کنترل فعال در هر لحظه تعیین شود. برای این منظور این سیستم با استفاده از داده‌های دریافتی از حسگرهای باد، سرعت روتور و توان تولیدی توربین، زاویه مناسب را تعیین می‌کند. سپس با استفاده از موتورهای الکتریکی یا هیدرولیکی درون توربین، تغییر زاویه پره‌ها اعمال می‌گردد.

در شکل (۱) منحنی توان تولیدی توربین‌ها بر اساس سرعت‌های مختلف باد نشان داده شده است. کنترل توربین بادی بر مبنای این که ناحیه کاری آن در کدامیک از نواحی چهارگانه است، انجام می‌پذیرد. سرعت بادی که در آن توربین شروع به تولید انرژی می‌کند را سرعت وصل^۲ می‌گویند. در سرعت‌های پایین باد، انرژی جنبشی موجود در جریان باد به اندازه‌ای نیست که بتواند بر تلفات انرژی ناشی از اصطکاک، مقاومت هوا و دیگر عوامل در توربین بادی غلبه کند. بنابراین امکان حرکت چرخشی پره‌های 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 می‌باشد.

² Cut in

ولتاژ و بهبود پاسخ دینامیکی شده است. نتایج نشان داد که کنترل کننده تناسبی-انتهای بهینه سازی شده با الگوریتم بهینه سازی 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 کنترل کننده PI تطبیقی در توربین‌های بادی استفاده کرده‌اند. این الگوریتم‌ها شامل بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی (HS) و الگوریتم ژنتیک (GA) است. آن‌ها کنترل کننده 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 کنترل کننده 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 کنترل کننده تطبیقی زاویه گام برای توربین‌های بادی بزرگ مقیاس طراحی کردند. آن‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه شامل الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه، پارامترهای کنترل کننده را برای کاهش نوسانات توان خروجی و بارهای مکانیکی و افزایش بهره‌وری انرژی استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این کنترل کننده توانسته نوسانات توان خروجی را کاهش دهد، بارهای مکانیکی روی برج توربین را کم کند و بهره‌وری انرژی را افزایش دهد. همچنین، پایداری این کنترل کننده را در شرایط باد شبیه‌سازی کردند [۷].

خو و همکاران یک کنترل کننده جدید ترکیبی فازی PI برای توربین‌های بادی طراحی کرده‌اند که در آن از منطق فازی و کنترل کننده PI استفاده شده است. این کنترل کننده برای بهبود دقت و کارایی در تنظیم زاویه گام توربین بادی طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این کنترل کننده 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].

برای سیستم کنترل زاویه پره‌های توربین‌های تجدیدپذیر^۳ پنج مگاواتی (NREL) پرداخته‌اند. با توجه به غیرخطی بودن سیستم دینامیکی توربین بادی مدل NREL و استفاده از روش‌های تحلیل پایداری غیرخطی، کنترل کننده تنظیم بهره را طراحی و ارزیابی کردند. این کنترلرها به نحوی طراحی شده‌اند که عملکرد سیستم را در مواجهه با شرایط عملیاتی متغیر و اغتشاشات مختلف بهبود بخشند. 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 زاویه پره، کنترل گشتاور و کنترل جهت را بررسی کرده‌اند. آن‌ها تکنیک‌های کلاسیک مانند کنترل کننده‌های 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 به عنوان روش‌هایی با عملکرد بهبود یافته نسبت به کنترل کننده‌های 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 کنترل کننده تناسبی-انتهای بهینه سازی 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

³ National Renewable Energy Laboratory (NREL)

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 مدل سازی شده است. مدل ریاضی این سیستم با استفاده از برنامه نویسی در نرم افزار MATLAB و به کارگیری از محیط سیمولینک آن تولید شده است و توانایی محاسبه پاسخ های توربین از جمله توان و گشتاور خروجی، نیروهای اعمالی به پره ها و اثرات کنترل کننده را دارا است. یکی از عوامل کلیدی در تعیین پاسخ های توربین بادی، شرایط باد اعمالی به آن است که تأثیر زیادی بر عملکرد توربین و کنترل کننده دارد. در این پژوهش، باد به صورت نوسانی در نظر گرفته شده و توسط برنامه ای که در نرم افزار MATLAB نوشته شده، تولید می گردد. علاوه بر این، در تحقیق حاضر تغییرات جهت باد در هر سه جهت مختصات نسبت به پره های توربین، به عنوان یک متغیر مهم در عملکرد سیستم مدنظر بوده و مدل سازی شده است. مشخصات آیرودینامیکی پره ها، اینرسی روتور و گشتاور ژنراتور از جمله عوامل حیاتی هستند که بر توان تولیدی و پایداری سیستم تأثیر می گذارند. این پارامترها با دقت در مدل اعمال شده تا پاسخ های 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

جهت گیری 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

سوله و همکاران بهینه سازی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی (PI) برای یک توربین بادی با سرعت ثابت را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، از الگوریتم های بهینه سازی گرگ خاکستری، ازدحام ذرات و ژنتیک استفاده کردند و نشان دادند کنترل کننده PI تنظیم شده با بهینه ساز گرگ خاکستری، بیشترین میانگین توان خروجی توربین بادی را همراه با خطای میانگین توان پایین تر نسبت به سایر الگوریتم های بهینه سازی ثبت کرده است [۹].

اقبال و همکاران یک توربین بادی پنج مگاواتی را در نرم افزار Bladed شبیه سازی کردند و پارامترهای بهینه را برای یک کنترل کننده PID در سرعت های باد مختلف به کمک روش بهینه سازی ازدحام ذرات تعیین نمودند. این کار می تواند منجر به افزایش توان تولیدی شود و سرعت چرخش روتور و گشتاور مکانیکی را محدود کند [۱۰].

ناوآرته 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 توربین های بادی تجدیدپذیر، نیاز به استفاده از یک روش بهینه سازی قدرتمند وجود دارد. علاوه بر این پارامترهای کنترل کننده PID معمولاً ناشناخته اند و تعیین آنها به صورت تحلیلی فرآیندی دشوار و غیرقابل انجام محسوب می شود. بر این اساس در پژوهش حاضر از یک روش بهینه سازی فراابتکاری ترکیبی برای کنترل عملکرد توربین بادی پنج مگاواتی NREL با تغییرات دقیق زاویه گام در هر لحظه استفاده شده است. مدل سازی و تحلیل توربین به کمک برنامه نوشته شده در نرم افزار MATLAB با عنوان FAST انجام پذیرفته است. در شبیه سازی سعی شده است، ابتدا دیاگرام واقعی پروفیل باد به صورت سه بعدی به برنامه اعمال گردد و پاسخ های توربین در هر لحظه مورد ارزیابی قرار گیرد و سپس با ارتباط بین برنامه کنترل کننده PID و الگوریتم بهینه سازی ICACO ضرایب بهینه کنترل کننده را تعیین می نماید.

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، 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.

$$P = 0.5 \rho A V_\omega^3 \quad (2)$$

در این رابطه، A ناحیه‌ای است که توسط پره‌ها 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.

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

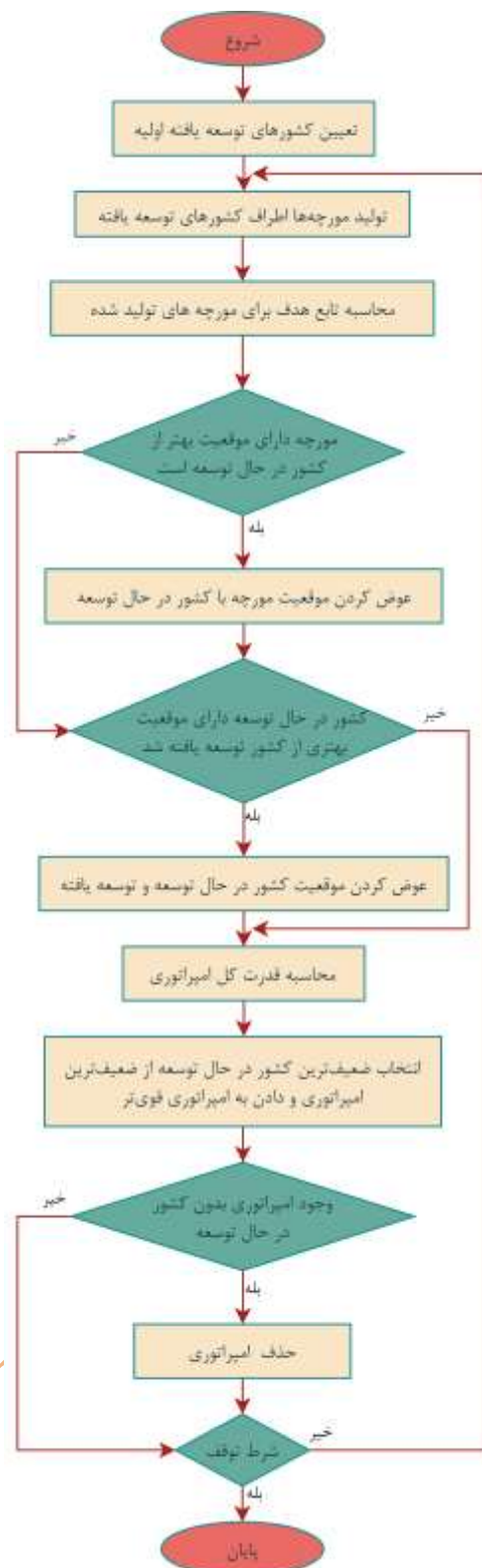
نحوه تغییرات C_p بسیار غیرخطی است و به سرعت باد، سرعت چرخش توربین و پارامترهای پره توربین مانند زاویه گام وابسته است. نسبت سرعت نوک پره به عنوان نسبت بین سرعت نوک پره و سرعت باد با رابطه (۴) تعریف می‌شود.

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

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



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

۴- تحلیل مسئله

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 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 [۱۳-۱۲]، شکل دهی فلزات [۱۵-۱۴]، طراحی بهینه دمپر به منظور مستهلک کردن ارتعاشات اعمالی به سیستم [۱۷-۱۶] و همچنین مدل‌سازی و محاسبه نیروی تماس بین دو جسم در حال برخورد [۱۸] مورد استفاده قرار گرفته است.

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 استخراج‌شده 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 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 روتور ω_m افزایش می‌یابد. در این رابطه، ضریب K_{opt} به‌عنوان یک فاکتور بهینه‌سازی ایفای نقش می‌کند و نقش کلیدی در تنظیم و دستیابی به عملکرد مطلوب سیستم دارد.

۴-۱- پارامترهای مهم در کنترل‌کننده PID

سیگنال خروجی کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده PID با نماد $u(t)$ نشان داده می‌شود و $e(t)$ بیانگر خطای سیستم است که تفاوت بین مقدار مطلوب و مقدار اندازه‌گیری‌شده 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 به‌صورت 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 اندازه‌گیری‌شده می‌باشد. در نتیجه، زاویه گام β_d در کنترل‌کننده 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

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 این‌رو، 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) به‌دست 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

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

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 $\omega_m = ng\omega_{wt}$ است، بنابراین مقدار بهینه را می‌توان به صورت رابطه (۷) تعریف کرد.

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

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

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

حداقل می‌رساند. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، فرایند تنظیم کنترل‌کننده PID را کارآمدتر و قابل‌اعتمادتر 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، تورسیم است. این زیر برنامه یک ابزار 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 تورسیم، 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

واکنش کنترل‌کننده نسبت به تغییرات خطا کمک می‌کند. همان‌طور که گفته شد برای محاسبه نرخ بهره‌های کنترل‌کننده نیاز به محاسبات تحلیلی است و با توجه به این که توربین بادی سیستمی غیرخطی است، به‌دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده از طریق حل تحلیلی غیرممکن است. به همین منظور برای تعیین ضرایب بهینه کنترل‌کننده توربین بادی از مدل‌سازی آن در محیط نرم افزار مطلب و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اقدام شده است.

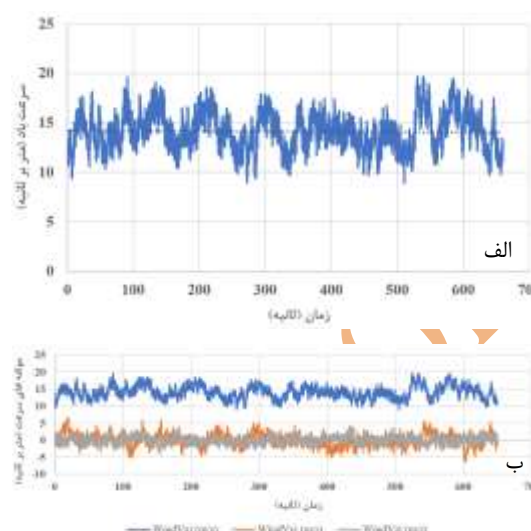
۲-۴-۲ مقادیر بهره برای کنترل‌کننده PID

برای دستیابی به عملکرد بهینه در یک کنترل‌کننده PID برای دستیابی به عملکرد بهینه باید مقادیر بهره‌های تناسبی (Kp)، انتگرالی (Ki) و مشتق‌گیر (Kd) به‌طور دقیق 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 بهره 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 بهره 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

مقادیر سرعت باد و در قسمت ب مقادیر مولفه‌های بردار سرعت در سه جهت مختصات نشان داده شده است.



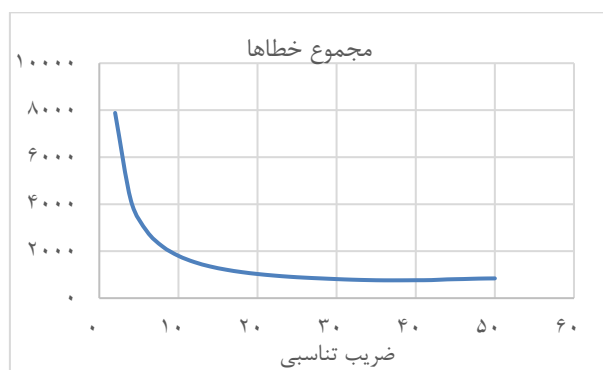
شکل ۳- الف) مقادیر سرعت باد بر حسب زمان ب) مقادیر مولفه‌های بردار سرعت باد در سه جهت مختصات (m/s)

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.



شکل ۴- تغییرات ضریب تناسبی

۵-۲ تغییرات ضریب انتگرالی

شکل (۵) تغییرات مجموع خطاهای مطلق را نسبت به 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

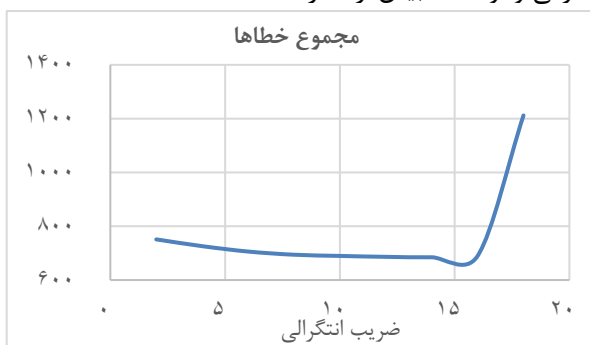
جدول ۳- تأثیر تنظیم ضرایب کنترل کننده PID بر مجموع خطای سیستم در سه حالت مختلف

پارامترهای کنترلی			مجموع خطای کلی
Kp	Ki	Kd	
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 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.

می‌یابد. این افزایش خطاها ناشی از تأخیر بیش از حد انتگرالی و نوسانات بیش از اندازه است.



شکل ۵- تغییرات ضریب انتگرالی

۳-۵- تغییرات ضریب مشتقی

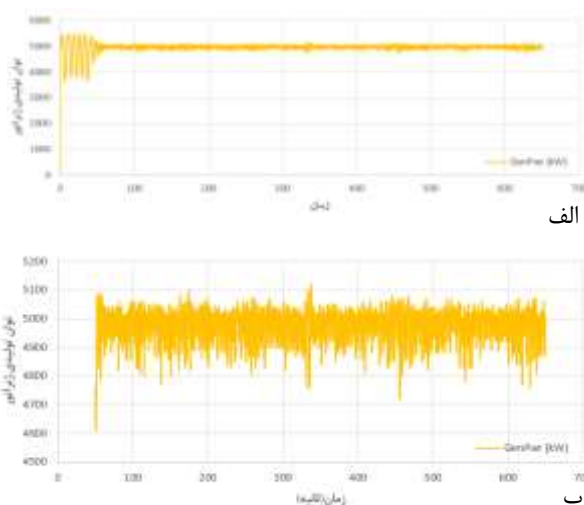
در شکل (۶)، مجموع خطاهای مطلق برای مقادیر مختلف ضریب مشتقی نمایش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که مقادیر ضریب مشتقی تا حدود ۲، مجموع خطاها به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش نشان‌دهنده بهبود عملکرد سیستم است. با این حال، پس از مقدار ضریب مشتقی بزرگ‌تر از ۲، مجموع خطاها به آرامی شروع به افزایش می‌کند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



شکل ۶- تغییرات ضریب مشتقی

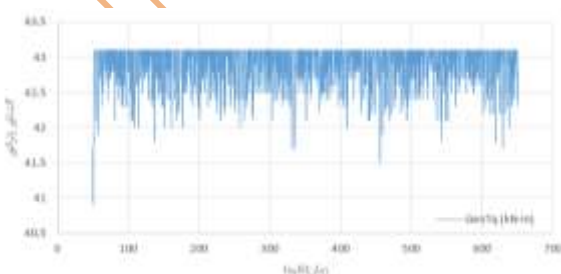
جدول (۳) نشان‌دهنده تا حدودی تأثیر مقادیر پارامترهای کنترل کننده PID شامل ضرایب تناسبی (K_p)، انتگرالی (K_i) و مشتقی (K_d) به همراه مجموع خطای سیستم در سه حالت مختلف تنظیم این پارامترها است. این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم مناسب ضرایب کنترل کننده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش خطای سیستم داشته باشد.

این نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً پایدار ژنراتور است، اما نوساناتی در برخی نقاط به وضوح قابل مشاهده است.

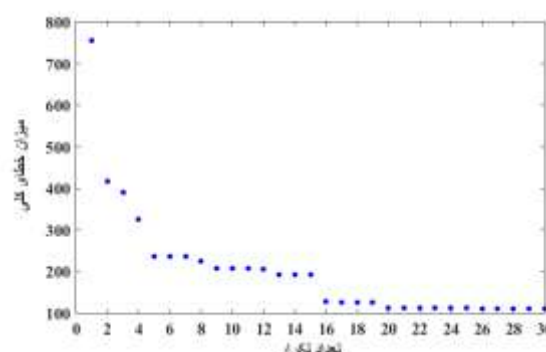


شکل ۸- نمودار توان تولیدی ژنراتور با کنترل کننده تناسبی-
انتگرالی-مشتقی (الف) در کل بازه زمانی مورد بررسی (ب) با حذف ۵۰ ثانیه اول شروع کار توربین

شکل (۹) مربوط به گشتاور ژنراتور در توربین بادی است. این نمودار نشان‌دهنده تغییرات گشتاور در واحد کیلو نیوتن‌متر در طول زمان است. گشتاور در محدوده ۴۱/۵ تا ۴۳/۲ کیلو نیوتن‌متر نوسان دارد. نوسانات کوچک در گشتاور نشان‌دهنده تغییرات سرعت باد است. وجود قله‌ها و دره‌ها در نمودار بیانگر این است که گشتاور به حداکثر و حداقل‌های مشخصی می‌رسد. به طور کلی، این نمودار نشان‌دهنده گشتاور در محدوده‌ای 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.



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



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 مرحله‌ای 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 که این داده‌ها برای بهینه‌سازی استفاده نشده‌اند. 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 واضح‌تر شدن نوسانات سیستم، ۵۰ ثانیه ابتدای تحلیل حذف شده است. با بررسی نمودار، می‌توان مشاهده کرد که توان تولیدی در محدوده‌ای بین ۴۵۰۰ تا ۵۲۰۰ کیلووات نوسان دارد. این نوسانات نشان‌دهنده 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.

۶- نتیجه‌گیری

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 می‌دهد. علاوه بر این روش پیشنهادی توانست با تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده در سرعت‌های 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 می‌توان علاوه بر بالا بردن میزان بهره‌وری توربین، میزان طول عمر آن را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

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 نرم‌افزار MATLAB مدل‌سازی گردد. سپس با استفاده روابط حاکم و شبیه‌سازی سیستم، پاسخ توربین بادی به باد ورودی به دست آورده شود. با توجه به پیچیدگی زیاد تحلیل مسئله و از طرفی زمان‌بر بودن طراحی بهینه کنترل کننده توربین، از یک روش بهینه‌سازی ترکیبی متاهیورستیک قدرتمند به نام ICACO بهره گرفته شد. نتایج به دست آمده، میزان

مراجع

- [1] X. Hu, W. Tan, and G. Hou, "PID2 Control of Large Wind Turbines' Pitch Angle," *Energies* 2023, Vol. 16, vol. 16, no. 13, p. 5096, 2023, doi: 10.3390/EN16135096.
- [2] A. Poureh, M. Chamani, and A. Bahri, "Nonlinear analysis of gain scheduled controllers for the NREL 5-MW turbine blade pitch control system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 145, p. 108578, 2023, doi: 10.1016/J.IJEPES.2022.108578.
- [3] A. Elkodama, A. Ismaiel, A. Abdellatif, S. Shaaban, S. Yoshida, and M. A. Rushdi, "Control Methods for Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT): State-of-the-Art Review," *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6394, 2023, doi: 10.3390/EN16176394.
- [4] G. Gorel and M. O. Abdi, "Advanced Pitch Angle Control Based on Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimisation on FAST Turbine Systems," *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 29, no. 4, pp. 11–18, 2023, doi: 10.5755/J02.EIE.34205.
- [5] T. Magesh, 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," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, p. 108944, 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.108944.
- [6] A. M. Shawqran, A. El-Marhomy, and M. A. Attia, "Pitch Angle Adaptive PI Controller Based on Heuristics Optimization Algorithms," *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 1339, pp. 674–687, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-69717-4_63.
- [7] M. Lara, J. Garrido, M. L. Ruz, and F. Vázquez, "Adaptive Pitch Controller of a Large-Scale Wind Turbine Using Multi-Objective Optimization," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6, p. 2844, 2021, doi: 10.3390/APP11062844.
- [8] B. Xu *et al.*, "A Pitch Angle Controller Based on Novel Fuzzy-PI Control for Wind Turbine Load Reduction," *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 6086, 2020, doi: 10.3390/EN13226086.
- [9] A. H. Sule, A. S. Mokhtar, J. J. Bin Jamian, U. U. Sheikh, and A. Khidrani, "Grey Wolf Optimizer Tuned PI Controller for Enhancing Output Parameters of Fixed Speed Wind Turbine," *IEEE Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst.*, pp. 118–122, 2020, doi: 10.1109/I2CACIS49202.2020.9140171.
- [10] A. Iqbal, D. Ying, A. Saleem, M. A. Hayat, and M. Mateen, "Proposed particle swarm optimization technique for the wind turbine control system," *Meas. Control (United Kingdom)*, vol. 53, no. 5–6, pp. 1022–1030, 2020, doi: 10.1177/0020294020902785.
- [11] Ernesto Chavero-Navarrete, M. Trejo-Perea, J.-C. Jáuregui-Correa, R.-V. Carrillo-Serrano, and J.-G. Rios-Moren, "Pitch Angle Optimization by Intelligent Adjusting the Gains of a PI Controller for Small Wind

- Turbines in Areas with Drastic Wind Speed Changes,” *Sustainability*, vol. 11, no. 23, p. 6670, 2019, doi: 10.3390/SU11236670.
- [12] M. Sheikhi Azqandi, A. Ghoddosian, “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, doi: 10.12989/SEM.2013.46.3.403.
- [13] M. Sheikhi Azqandi, A. Ghoddosian, M. Sheikhi “Optimal design of structural support positions using imperialist competitive algorithm and modified finite element,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 12, no.3, pp. 50-59, 2012, (in Persian).
- [14] M. Sheikhi. Azqandi, N. Nooredin, A. Ghoddosian, “Optimization of spring back in U-die bending process of sheet metal using ANN and ICA,” *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 65, no. 4, p. 447, 2018, doi: 10.12989/SEM.2018.65.4.447.
- [15] M. Sheikhi Azqandi, M. Hassanzadeh, “Optimum Shape Design of Axisymmetric Extrusion Die by using Hybrid Meta-Heuristic Optimization (ICACO),” *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 13, no. 4, pp. 107-117, 2023. doi:10.22044/JSFM.2023.13213.3749, (in Persian).
- [16] M. Sheikhi Azqandi, H. Safaeifar, “Performance Optimization of Three-Mass Nonlinear Rigid Impact Damper by Hybrid Metaheuristic Method in Free Vibration,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 3, pp. 105–113, 2022. doi: 10.22034/jmeut.2022.48328.2996, (in Persian).
- [17] H. Safaeifar and M. Sheikhi Azqandi, “Optimal design of the impact damper in free vibrations of SDOF system using ICACO,” *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 461–479, 2021.
- [18] H. Safaeifar and M. Sheikhi Azqandi, “Optimal model of the contact force for the collision between two solid bodies by ICACO,” *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 17–35, 2024.