





Vol. 12/ No. 48/Summer 2023

Research Article

# Frequency Regulation of Uncertain Isolated Hybrid Microgrids by Neuro-Fuzzy-Based Controllers

Abbas Aff, PhD Student <sup>1</sup>  | Mohsen Simab, Assistant Professor <sup>2\*</sup>  | Mehdi Nafar, Assistant Professor <sup>3</sup>  | Seyed Alireza Mirzaee, Assistant Professor <sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Fars, Iran  
[abbasaff@miau.ac.ir](mailto:abbasaff@miau.ac.ir)

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran  
[msimab@miau.ac.ir](mailto:msimab@miau.ac.ir)

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran  
[mnafar@miau.ac.ir](mailto:mnafar@miau.ac.ir)

<sup>4</sup>Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran  
[alireza.mirzaee@iau.ac.ir](mailto:alireza.mirzaee@iau.ac.ir)

**Correspondence**

Mohsen Simab, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran  
[msimab@miau.ac.ir](mailto:msimab@miau.ac.ir)

**Received:** 11 November 2022

**Revised:** 14 December 2022

**Accepted:** 9 January 2022

## Abstract

The capability of a neuro-fuzzy control approach for frequency fluctuation damping in an isolated hybrid microgrid (IHMG) system (DEG/WTG/PV/FC/ESSs) is investigated in this paper. Due to the intermittent behavior of renewable energy sources (RESs) like wind turbines and photovoltaic arrays and the time-varying nature of demands, frequency fluctuation is more likely, specifically in the grid-connected mode. Model parametric uncertainties as well as load changes, wind power, and solar irradiation variations are the main uncertainty sources of the IHMG system. In the suggested approach, a neuro-fuzzy output feedback controller with three inputs that are inspired by PID control is designed considering the power balance between demands and generations, by optimizing fuzzy membership functions' locations. The proposed controller is compared with two popular other methods on the investigated IHMG system in terms of time-domain characteristics. The outcome illustrates remarkable merit compared to the state-of-the-art methods in the presence of simultaneous disturbances and the model parametric uncertainties.

**Keywords:** Neuro-fuzzy, Frequency regulation, Hybrid power system, Isolated microgrid, Parametric uncertainties, Renewable resources.

## Highlights

- Designing an adaptive neuro-fuzzy control algorithm for frequency stability in an islanded hybrid microgrid.
- Selection of adaptive neuro-fuzzy controller inputs inspired by PID controller.
- Considering wind speed, amount of sunlight and output load as input disturbances to evaluate the robust performance of the proposed method.
- Considering parameter variations in the microgrid model as parametric uncertainties to evaluate the robustness of the proposed approach.

**Citation:** A. Aff, M. Simab, M. Nafar, and S. A. Mirzaee, "Frequency Regulation of Isolated Hybrid Microgrids In the Presence of Uncertainties By Neuro-Fuzzy Based Controllers," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 48, pp. 51–70, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1972541.1177, (in Persian).

## تنظیم فرکانس در ریزشبه‌های ترکیبی نامعین جزیره‌ای مبتنی بر کنترل کننده‌های عصبی-فازی تطبیقی

عباس آف<sup>۱</sup> | محسن سیماب\*<sup>۲</sup> | مهدی نفر<sup>۳</sup> | سید علیرضا میرزایی<sup>۴</sup> 

### چکیده:

به‌کارگیری استراتژی کنترل ترکیبی عصبی-فازی (ANFIS) الهام گرفته از کنترل PID برای میرا نمودن نوسانات فرکانس در سیستم ریزشبه هیبریدی جزیره‌ای (IHMG) در حضور اغتشاشات و نامعینی‌های پارامتری، در این مقاله بررسی شده است. با توجه به رفتار نامنظم منابع انرژی تجدید پذیر (RES) نظیر توربین بادی و آرایه‌های خورشیدی و همچنین ماهیت متغیر بازمان بارهای مصرفی، انحراف فرکانس ریزشبه از مقدار نامی به-خصوص در حالت جزیره‌ای اجتناب‌ناپذیر است. تغییرات ناخواسته در بار مصرفی، میزان تابش خورشید، سرعت باد و همچنین عدم قطعیت‌های پارامتری ناشی از ثابت‌های زمانی آن، منابع اصلی اغتشاش، در سیستم ریزشبه هیبریدی جزیره‌ای مورد بررسی است. در ساختار فازی کنترل‌کننده پیشنهادی، از خطا، مشتق و انتگرال خطای فرکانسی، جهت آموزش و آزمون شبکه عصبی بهره گرفته شده است. بر اساس معادله تعادل توان بین عرضه و تقاضا، سعی در حداقل نمودن اثر اغتشاش در فرکانس خروجی با بهینه‌سازی موقعیت توابع عضویت فازی ورودی‌ها و خروجی آن، نموده است. برای ارزیابی بهتر عملکرد روش پیشنهاد شده، رویکرد ANFIS با روش کنترل PID بهینه، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، نشان‌دهنده برتری قابل توجه روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش متداول دیگر از نظر مشخصه‌های حوزه زمان در حضور اغتشاشات هم‌زمان و عدم قطعیت‌های پارامتری سیستم است.

**کلید واژه‌ها:** تنظیم فرکانس، ریزشبه جزیره‌ای، کنترل عصبی-فازی تطبیقی، عدم قطعیت پارامتری، منابع تجدید پذیر، ریزشبه ترکیبی.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری/دکتری مهندسی برق، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، abbasaff@miau.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه برق، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، msimab@miau.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، mnaifar@miau.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، alireza.mirzaee@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

\*محسن سیماب، استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، msimab@miau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰ آبان ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۳ آذر ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۹ دی ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1972541.1177>

### ۱-مقدمه

در دو دهه گذشته، نفوذ روزافزون ریزشبه‌ها به سیستم‌های تولید برق سنتی، گویای این واقعیت است که منابع تجدید پذیر، نقش بارزی در تولید برق آینده ایفا خواهد نمود. افزایش به‌کارگیری طیف وسیع منابع تجدید پذیر، انرژی فراوان، پایدار، قابل‌اعتماد و ارزان را برای مصرف‌کنندگان خانگی و صنعتی به ارمغان می‌آورد. ادغام منابع انرژی تجدید پذیر نظیر آرایه‌های خورشیدی فتوولتائیک و مزارع بادی با سیستم‌های ذخیره انرژی مختلف به‌عنوان کنترل فرکانس اولیه [۱، ۲]، و با مولد دیزلی

به‌عنوان کنترل فرکانس ثانویه می‌تواند نقش مهمی در تأمین نیاز انرژی بارهای متصل در یک ریزشبکه هیبریدی جزیره‌ای (IHMG)<sup>۱</sup> ایفا نماید [۴،۳].

ریزشبکه‌های قدرت با ساختارهای متمایز می‌توانند در حالت متصل به شبکه و یا در حالت قطع اتصال با شبکه که حالت جزیره‌ای نامیده می‌شود، کار کنند [۵]. برخی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد پیوستن ریزشبکه‌ها به شبکه اصلی در سیستم‌های قدرت، ارائه برق باکیفیت برای بارهای حساس مانند سیستم‌های اضطراری و تولید برق از منابع انرژی پایدار سبز است. علاوه بر این، به دلیل قابلیت عملکرد حالت جزیره‌ای آن‌ها، احتمال خاموشی شبکه الکتریکی کاهش می‌یابد و ضریب قابلیت اطمینان نیز افزایش می‌یابد، زیرا ریزشبکه‌ها از منابع متعدد کوچک توزیع شده در سراسر شبکه برق تشکیل شده‌اند و احتمال تجربه کمبود تولید برق در یک زمان مشخص، به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۶،۷].

سه نوع ریزشبکه با توجه به ساختار و دینامیک ولتاژ آن‌ها وجود دارد: ریزشبکه‌های AC، DC و ریزشبکه‌های AC/DC هیبریدی که از ریزشبکه‌های DC و ریزشبکه‌های AC تشکیل شده‌اند. منابع AC مانند توربین بادی، مولد دیزلی، خودروهای برقی است. آرایه‌های خورشیدی فتوولتائیک، ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SEMS)<sup>۲</sup>، ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار (FESS)<sup>۳</sup>، سیستم‌های ذخیره انرژی باتری (BESS)<sup>۴</sup>، ابر خازن‌ها (UC)<sup>۵</sup>، و سلول‌های سوختی (FC)<sup>۶</sup> نمونه‌های آشکاری برای منابع DC هستند [۸]. به‌کارگیری توأمان این منابع، می‌تواند از طریق یک سیستم باس واحد انجام شود که انرژی پایدار، کارآمد و قابل اعتماد را برای مصرف‌کنندگان به‌همراه دارد. ریزشبکه AC/DC هیبریدی هم‌مزایای ریزشبکه AC نظیر استفاده از زیرساخت شبکه AC حاضر را دارا است و هم‌مزایای ریزشبکه DC مانند بهبود بازدهی، اندازه و هزینه انرژی را به دلیل مراحل کمتر تبدیل توان ارائه می‌کند [۹-۱۲]. علاوه بر این، ترکیب منابع و بارهای مختلف منجر به معماری انعطاف‌پذیرتر می‌شود و فضای جذابی برای تحقیقات مهندسی قدرت و کنترل ایجاد نموده است.

عملکرد پایدار رضایت‌بخش IHMG، توسعه استراتژی‌های بهبودیافته کنترلی برای تنظیم فرکانس ریزشبکه را می‌طلبد. از طرفی، ماهیت متغیر و نامشخص منابع تجدیدپذیر و بارهای مصرفی، منجر به تغییرات قابل توجه در مشخصه دینامیکی سیستم می‌گردد. یکی از اساسی‌ترین مسائل مربوط به IHMG، تغییرات توان باد است که به‌سرعت باد بستگی دارد و می‌تواند باعث انحراف شدید در فرکانس ریزشبکه و حتی منجر به قطعی شبکه شود. [۱۱، ۱۳]. بنابراین، الگوریتم‌های کنترلی کارآمد مبتنی بر محاسبات نرم، برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات و تغییرات دینامیکی سیستم، موردنیاز است.

نفوذ ریزشبکه‌ها به سیستم‌های قدرت دارای مزایای مشخصی است که شامل افزایش قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری، پاکیزگی محیطی و همچنین پایداری و مقاومت<sup>۷</sup> در برابر تغییرات ناخواسته در سیستم‌های قدرت متداول می‌شود [۱۴، ۱۵]. در یک سیستم ریزشبکه، برای داشتن فرکانس پایدار، لازم است بین مصرف برق و تولید آن، به‌طور پیوسته تا آنجا که ممکن است تعادل وجود داشته باشد. عوامل متعددی بر تعادل توان در ریزشبکه‌ها تأثیر می‌گذارد. اغتشاشات در یک ریزشبکه می‌تواند باعث انحراف فرکانس از مقدار مطلوب و کاهش کیفیت منبع تغذیه شود. برای عملکرد قابل قبول سیستم قدرت، فرکانس ریزشبکه باید نزدیک به مقدار مطلوب خود باقی بماند و هرگونه نوسانی باید به‌سرعت میرا شود.

در یک ریزشبکه هیبریدی AC/DC، هدف اصلی کنترل، پایداری فرکانس است که با حذف اغتشاش، میسر می‌شود. نکته قابل توجه در حالت جزیره‌ای، آن است که برخلاف حالت متصل به شبکه، عدم تعادل توان توسط شبکه برق بالادست، حل نمی‌شود و ممکن است باعث ناپایداری فرکانسی و مشکل کیفیت توان شود [۱۶-۱۸]. ریزشبکه‌های هیبریدی AC/DC اساساً از عدم تعادل توان بارمصرفی-تولیدی رنج می‌برد و فرکانس آن‌ها ممکن است به دلیل ثابت‌های زمان کم و اینرسی کم منابع تجدیدپذیر مورد استفاده، دچار نوسانات ناگهانی شود [۱۹]. بنابراین، طراحی یک کنترل‌کننده هوشمند فرکانس مبتنی بر محاسبات نرم، به دلیل دینامیک متغیر منابع تجدیدپذیر و عدم قطعیت‌های پارامتری آن‌ها چالش‌برانگیز است.

<sup>1</sup> Islanded hybrid microgrid

<sup>2</sup> Superconducting magnetic energy storage

<sup>3</sup> Flywheel energy storage

<sup>4</sup> Battery energy storage systems

<sup>5</sup> Ultra-capacitors

<sup>6</sup> Fuel cells

<sup>7</sup> Robustness

تلفیق تعداد زیادی از منابع تجدید پذیر انرژی نظیر سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک، مولدهای بیوگاز، مولدهای توربین بادی و سیستم‌های ذخیره انرژی مانند FESS، BESS، SMES، UC و FC در معماری‌های مختلف، یک سیستم ذخیره‌سازی/تولید انرژی هیبریدی را تشکیل می‌دهد که به اصطلاح ریزشبه هیبریدی جزیره‌ای IHMG نامیده می‌شود [۸-۱۱]. توان موردنیاز برای بارهای متصل را می‌توان توسط IHMG با یک الگوریتم کنترل مناسب و هماهنگ مؤثر بین چندین مؤلفه برای به دست آوردن پایداری فرکانس و قابلیت اطمینان به دست آورد [۲۰].

مطالعات متعددی در مورد مدیریت عدم قطعیت‌ها برای تنظیم فرکانس و توان در ریزشبه‌های هیبریدی انجام شده است. رویکردهای به کار گرفته شده پیرامون طراحی کنترل‌کننده را می‌توان به دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: رویکردهای کنترل کلاسیک و هوشمند.

یکی از کاربردی‌ترین روش‌های کلاسیک تنظیم فرکانس، به رویکردهای کلاسیک کنترل تناسبی-انتگرال-مشتق<sup>۱</sup> (PID) و کنترل PI، P و PD اختصاص دارد که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با روش‌های دیگر ترکیب می‌شوند. مسئله اصلی کمینه‌سازی نوسانات فرکانس با استفاده از یک کنترل‌کننده PI در یک IHMG که شامل چندین سیستم ذخیره انرژی مانند SMES، BESS، FESS و UC است، در مرجع [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. در میان رویکردهای کنترل غیرخطی اعمال شده در IHMGها، کنترل حالت لغزشی برجسته‌تر است. کنترل‌کننده فرکانس بار لغزشی، برای سیستم مولد دیزلی طراحی شده است تا فرکانس سیستم را از طریق حلقه کنترل فرکانس ثانویه تنظیم کند [۲۲]. در مرجع [۲۳] سطح لغزش غیرخطی برای تضمین همگرایی حالت IHMG به مبدأ در زمان محدودی که بر اساس شرایط توان کسری در یک سطح تعریف شده، معرفی گردیده است. به‌عنوان یک روند موازی با روش‌های کلاسیک، تکنیک‌های کنترل هوشمند و مبتنی بر محاسبات نرم برای کنترل فرکانس ثانویه در IHMGها استفاده می‌شود. در مرجع [۲۴] برای یک IHMG با خودروی الکتریکی هیبریدی، یک کنترل‌کننده PI/PID معمولی توسط الگوریتم کرم شب‌تاب<sup>۲</sup> و الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۳</sup> طراحی شده است تا فرکانس را تنظیم نماید. در [۲۵]، تأثیر مولد توربین بادی<sup>۴</sup> در انحراف فرکانس IHMG مورد مطالعه قرار گرفته است.

ترکیب منطق فازی با روش‌های فرا ابتکاری متعدد به‌عنوان رویکردهای بهینه‌سازی در مقالات معتبر، متداول است. در مرجع [۲۶] با استفاده از یک استراتژی کنترل PI مبتنی بر منطق فازی، پایداری سیستم‌های HMG شامل FC، میکروتوربین<sup>۵</sup> و منابع ذخیره‌کننده انرژی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیق دیگری، یک کنترل‌کننده PI مبتنی بر بهینه‌سازی گرگ خاکستری<sup>۶</sup> با منطق فازی ارائه شده است [۲۷]. در تحقیقی مشابه که در مرجع [۲۸] به آن اشاره شده، نشان داده شده است که یک رویکرد PID مبتنی بر منطق فازی مقیاس‌بندی شده، عملکرد بهتری در مقایسه با سایر رویکردهای فرا ابتکاری دارد.

در پاره‌ای از مطالعات، کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری<sup>۷</sup> برای تنظیم فرکانس سیستم‌های ریزشبه هیبریدی جزیره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹، ۳۰]. مشابه با رویکرد کنترل بهینه PI مبتنی بر الگوریتم ژنتیک<sup>۸</sup> (GA) در مرجع [۳۱]، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>۹</sup> برای بهینه‌سازی پارامترهای سایر کنترل‌کننده‌ها بهره گرفته شده است [۳۲].

در تحقیقات اخیر، روش‌های مبتنی بر کنترل مبتنی بر محاسبات نرم در سیستم‌های ریزشبه جزیره‌ای مختلف ارائه گردیده است. در پاره‌ای از مقالات، تنها اغتشاش بار در نظر گرفته شده است و اغتشاشات توربین بادی و تابش خورشیدی نامنظم در روند طراحی نادیده گرفته شده است. یک رویکرد کنترل فرکانس ثانویه فازی FO-PID برای یک ریزشبه جزیره‌ای که شامل چندین منبع تجدید پذیر انرژی در حضور عدم قطعیت‌های مختلف مانند دینامیک بار، نوسانات باد و تغییرات تابش خورشید ارائه گردیده که توسط تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری-آموزش (TLBO)<sup>۱۰</sup> پارامترهای بهینه به دست می‌آید [۳۳].

<sup>1</sup> Proportional Integral Derivative

<sup>2</sup> Firefly algorithm

<sup>3</sup> Cuckoo Search Algorithm

<sup>4</sup> Wind turbine generator

<sup>5</sup> Micro turbine

<sup>6</sup> Gray wolf optimizer

<sup>7</sup> Fractional order

<sup>8</sup> Genetic algorithm

<sup>9</sup> Particle swarm optimization

<sup>10</sup> Teaching learning based optimization

در مرجع [۳۴]، از توابع عضویت تطبیقی فازی و کنترل کننده یادگیری عمیق به طور هم زمان برای کنترل فرکانس سرعت روتور و کنترل پالس در پانل خورشیدی با هدف تنظیم شکل موج خروجی و به منظور بهبود عملکرد سیستم قدرت بهره گرفته شده است. تابع عضویت کنترل کننده فازی پیشنهاد شده، توسط الگوریتم گرگ خاکستری مبتنی بر موقعیت مرتب شده، بهینه شده است.

در ریزشبه‌های AC از سیستم ANFIS<sup>۱</sup>، برای کنترل فرکانس و اشتراک توان بین واحدهای توزیع پراکنده استفاده گردیده است [۳۵]. در یک ریزشبه DC، برای کنترل سیستم ذخیره سازی انرژی هیبریدی، شامل باتری و ابر خازن، یک کنترل کننده ANFIS توسعه و ارائه گردیده است [۳۶]. سه نوع اغتشاش متمایز در نظر گرفته شده عبارتند از: توان توربین بادی، انرژی خورشیدی فتوولتائیک و تغییرات بار مصرفی. علاوه بر این، مدل IHMG نیز تقریب ساده شده‌ای از مدل واقعی آن است و پارامترهای آن دارای عدم قطعیت است. در نتیجه، ضرورت یک رویکرد کنترل هوشمند مقاوم با عملکرد رضایت بخش، در این سیستم به وضوح، احساس می گردد. در تحقیقات صورت گرفته روی ریزشبه‌های هیبریدی AC/DC، کمبود استراتژی ساماندهی کنترل هوشمند مقاوم در IHMGها برای مقابله مؤثر با این مسائل احساس می گردد. از نقطه نظر ویژگی مقاومت به تغییرات، روش‌های کنترل کلاسیک، به ندرت می توانند به یک مصالحه رضایت بخش بین عملکرد نامی و مقاوم دست یابند. همچنین، ارضای پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم برای طیف وسیعی از عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات پارامتری برای رویکردهای کنترل هوشمند، کار آسانی نیست. با توجه به این موارد، راهکار ارائه شده در این مقاله، با الهام گرفتن از کنترل PID با در نظر گرفتن سه نوع ورودی خطا، مشتق و انتگرال خطا برای سیستم استنتاج فازی و آموزش شبکه عصبی پیشرو بر اساس داده‌های آموزش و آزمون استخراج شده از سه ورودی، توانایی کنترل مقاوم فرکانس ریزشبه را در گستره وسیعی از تغییرات را دارا است. برای غلبه بر کاستی‌های مقالات بیان شده در تاریخچه مروری، این مقاله به یک رویکرد کنترل هوشمند مبتنی بر شبکه‌های عصبی-فازی تطبیقی می پردازد. این مقاله، به عنوان رویکردی جدید در ادامه مطالعات قبلی، استفاده از یک کنترل کننده مقاوم هوشمند برای IHMG به منظور دستیابی به حداقل انحراف فرکانس در ریزشبه را بررسی می نماید.

در ادامه به شرح ساختار مقاله با بیان بخش‌های مختلف تشکیل دهنده آن پرداخته شده است.

پس از بخش مقدمه، مدل غیرخطی دینامیک IHMG ارائه شده است. مدل فضای حالت معادل آن در بخش دوم بیان گردیده است. در بخش سوم با عنوان فرمول بندی مسئله کنترلی، الگوریتم پیشنهادی برای کنترل فرکانس همراه با جزئیات، بیان شده است. بخش چهارم به ارزیابی طرح کنترل ANFIS پیشنهادی در محیط شبیه سازی و بررسی عملکرد آن تحت چهار سناریو پرداخته شده است. در نهایت، در بخش پنجم، نکات پایانی برای مطالعات آینده مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- ساختار ریزشبه مورد بررسی و نمایش مدل فضای حالت آن

مفهوم IHMG ترکیبی از منابع تجدید پذیر متعدد را با استفاده از یک چارچوب کنترل هماهنگ برای تنظیم فرکانس خروجی کل سیستم تحت نقاط کاری و عدم قطعیت‌های مختلف القا می کند. شکل ۱، نمودار IHMG بررسی شده در این مقاله را نشان می دهد.

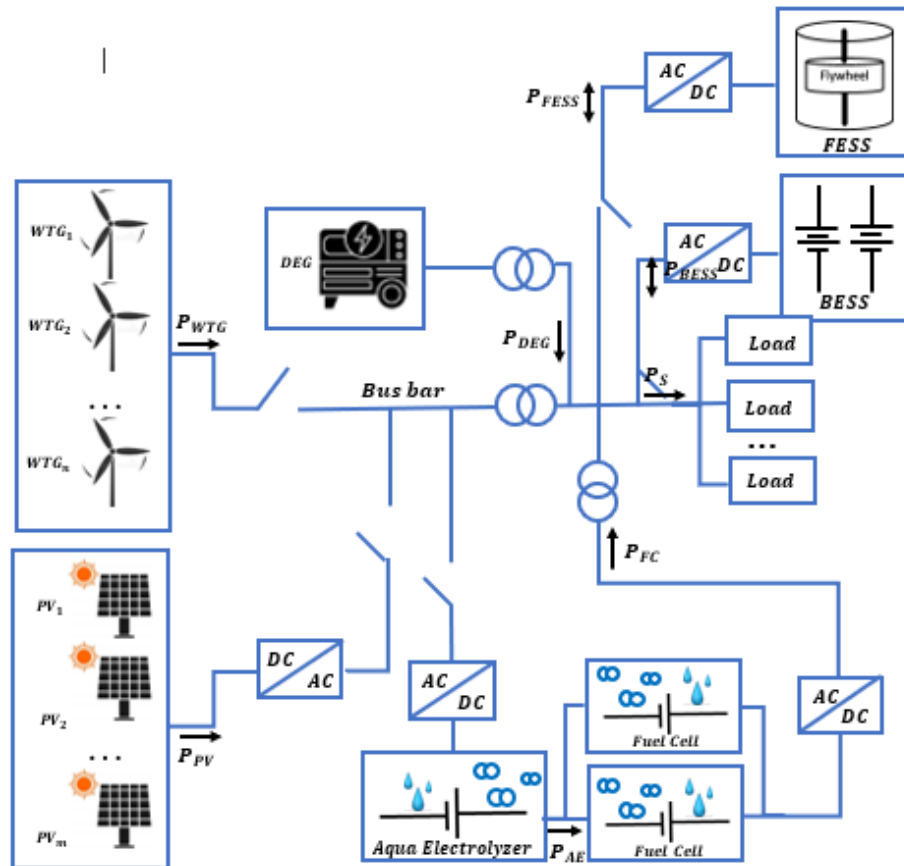
منابع تجدید پذیر در IHMG شامل مولد توربین بادی (WT<sup>۲</sup>)، سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV<sup>۳</sup>)، مولد موتور دیزلی (DEG<sup>۴</sup>)، پیل سوختی (FC)، سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS)، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار (FESS) و بارهای الکتریکی است که از طریق یک باس بار مشترک [۳۷، ۳۸] به یکدیگر متصل می شوند.

<sup>1</sup> Adaptive neural networks inference systems

<sup>2</sup> Wind turbine

<sup>3</sup> Photovoltaic

<sup>4</sup> Diesel engine generator



شکل ۱: ساختار کلی ریزشبه‌های مورد بررسی

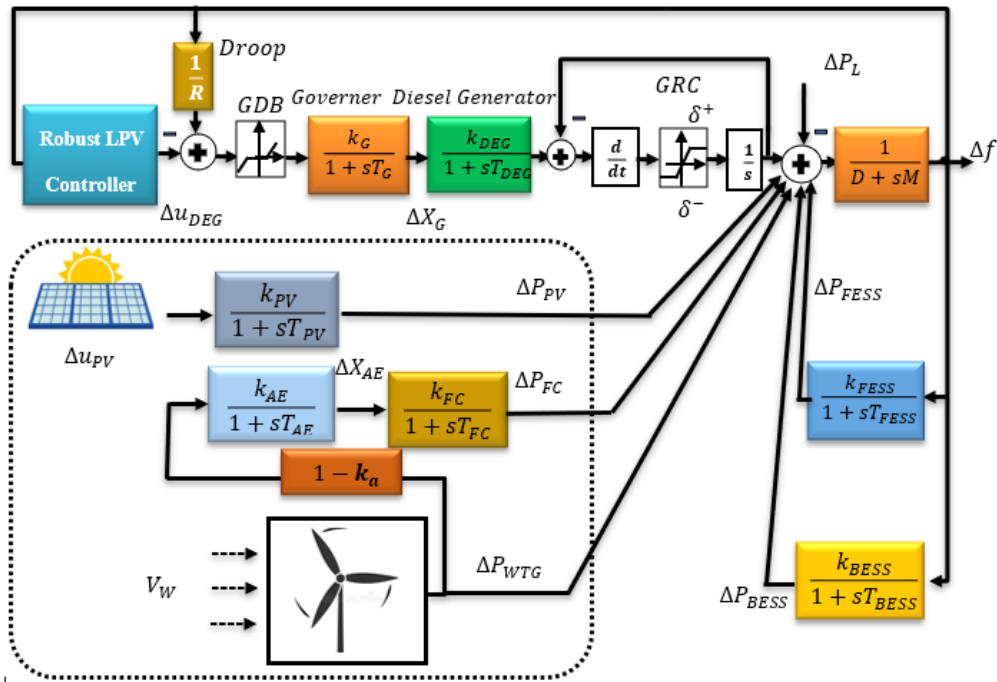
Figure 1. General structure of the islanded microgrid under study.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، منابع  $DEG$ ،  $PV$ ،  $WT$ ،  $FC$ ،  $BESS$  و  $FESS$  با استفاده از مبدل‌های  $AC/DC$  یا  $DC/AC$  به باس بار متصل می‌شوند. معادله توان بار  $P_L$  و توان تولیدی  $P_S$  که در شکل ۱ نشان داده شده است توسط رابطه ۱ تعیین شده است.

$$P_L = P_S = \sum_{i=1}^n P_{WTG_i} + \sum_{i=1}^n P_{PV_i} - P_{AE} + P_{DEG} + P_{FC} \pm P_{FESS} \pm P_{BESS}, \text{ for } t = t_i \quad (1)$$

که در آن  $P_{WTG_i}$  و  $P_{PV_i}$  به ترتیب توان خروجی از مولد توربین بادی و ارائه فتوولتائیک هستند.  $P_{AE}$  توان الکترولایزر آبی است.  $P_{FC}$  و  $P_{AE}$  توان خروجی مولدهای دیزلی و پیل‌های سوختی هستند. همچنین  $P_{FESS}$  و  $P_{BESS}$  به ترتیب، توان مبادله شده  $FESS$  و  $BESS$  هستند. قابل توجه است که زمان تعیین شده برای اتصال  $P_{PV_i}$  یا  $P_{WTG_i}$  به سیستم است.

سیستم IHMG بیان شده در بالا، دارای دینامیک غیرخطی و پیچیده با عدم قطعیت در بخش‌های گوناگون است. از آنجایی که معمولاً اکثر قسمت‌های سیستم، در طول زمان کار عادی سیستم، کمی تغییر می‌کنند، می‌توان از تکنیک خطی سازی برای ساده‌سازی دینامیک IHMG در شرایط عملیاتی عادی استفاده نمود. نمودار حلقه بسته کنترل فرکانس برای IHMG مورد بررسی در شکل ۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۲: سیستم حلقه بسته کنترل فرکانس ریزشکه هیبرید AC/DC  
 Figure 2. The closed-loop frequency control system for a hybrid AC/DC microgrid.

مدل IHMG از چندین زیرسیستم تشکیل شده است که همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به یک باس بار متصل هستند. ورودی کنترلی، وظیفه تنظیم فرکانس را با تغییر توان ورودی مولد دیزلی را به عهده دارد و به عنوان کنترل ثانویه عمل می‌نماید. پارامترهای ریزشکه IHMG در جدول ۱ فهرست شده است [۳۹].

جدول ۱: پارامترهای ریزشکه IHMG مورد بررسی

Table 1. The parameters of the IHMG microgrid under study.

مقدار	توضیح	نماد
۲ s	ثابت زمانی گاورنر	$T_G$
۱ s	ثابت زمانی مولد دیزلی	$T_{DEG}$
۳	تنظیم سرعت DG	$R$
۰/۰۱	محدودیت تغییرات شیب	$\delta$
۰/۰۱۲	ضریب میرایی	$D$
۰/۲	ثابت اینرسی	$M$
۰/۱ s	ثابت زمانی سیستم ذخیره انرژی Flywheel	$T_{BESS}$
۰/۱ s	ثابت زمانی سیستم ذخیره انرژی باتری	$T_{FESS}$
۴ s	ثابت پیل سوختی	$T_{FC}$
۰/۵ s	ثابت زمانی الکترولایزر آبی	$T_{AE}$
۱/۸ s	ثابت زمانی فتوولتائیک خورشیدی	$K_{PV}$
۱/۳۰۰	بهره مولد دیزلی	$K_{DEG}$
۱	ثابت زمانی فتوولتائیک خورشیدی	$K_{PV}$
۱/۵۰۰	بهره الکترولایزر آبی	$K_{AE}$
۰/۶	نسبت توان خالص به توان توربین بادی	$K_a$
-۱/۱۰۰	بهره سیستم ذخیره انرژی باتری	$K_{BESS}$
-۱/۳۰۰	بهره سیستم ذخیره انرژی Flywheel	$K_{FESS}$
۱/۱۰۰	به دست آوردن پیل سوختی	$K_{FC}$

به دلیل ماهیت متناوب تغییرات منابع تجدید پذیر و بار، طراحی کنترل‌کننده با پارامترهای ثابت، در حالات کاری مختلف، عملکرد رضایت‌بخشی برای سیستم‌های واقعی نداشته باشد، بنابراین مدل IHMG باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامتری، منجر به بهبود مقاوم عملکرد سیستم ریزشبه شود. در بخش بعدی، مدل غیرخطی یک مولد توربین بادی ارائه می‌گردد.

## ۲-۱-۱-۲ مدل مولد توربین بادی

در ناحیه کاری با سرعت کم، زاویه گام  $\beta$  ثابت است. متغیرهای حالت توربین بادی به صورت  $x = [\theta_s \ \omega_r \ \omega_g]^T$  تعریف می‌شود که در آن  $\theta_s$  زاویه پیچش،  $\omega_r$  سرعت روتور و  $\omega_g$  سرعت مولد است. ورودی کنترل  $u = \omega_z$  است که در آن  $\omega_z$  سرعت گشتاور صفر است. بنابراین، مدل توربین بادی به صورت رابطه ۲ تعریف شده است.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -\frac{K_s}{J_r} & -\frac{B_s + B_r}{J_r} & \frac{B_s}{J_r} \\ \frac{K_s}{J_g} & \frac{B_s}{J_r} & -\frac{B_g + B_s}{J_g} \end{bmatrix}, B_v = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_{r,v}}{J_r} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{B_g}{J_g} \end{bmatrix}^T, C_i = [K_s \ B_s \ -B_s], C = [0 \ 0 \ 1], D = 0.$$

که  $V_w$  سرعت باد و  $\omega$  سرعت چرخش توربین است. محدوده سرعت چرخش توربین در میدان کم‌سرعت  $1.36 \leq \omega \leq 2.25$  رادیان بر ثانیه و محدوده سرعت باد  $12 \leq V_w \leq 3$  متر بر ثانیه است پارامترهای مدل توربین در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای مدل توربین بادی

Table 2. The parameters of the wind turbine model.

مقدار	توضیح	نماد
$1.566 \times 10^6 \text{ N/m}$	سختی انتقال	$K_s$
$3.0295 \text{ Nms/rad}$	میرایی انتقال	$B_s$
$59 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	اینرسی مولد	$J_g$
$15.993 \text{ Nms/rad}$	میرایی ذاتی مولد	$B_g$
$830000$	اینرسی روتور	$J_r$
$1.225 \text{ kg/m}^3$	چگالی جرم هوا	$\rho$
$30.3 \text{ m}$	طول پره‌های روتور	$R$
$1.8 \text{ s}$	گشتاور روتور - بهره سرعت باد	$k_{r,v}$
$1.566 \times 10^6 \text{ W}$	توان اسمی خروجی مکانیکی توربین	$P_{nom}$
$500 \mu\text{s}$	زمان تأخیر	$\tau$
$1.66 \times 10^6$	توان مبنای مولد الکتریکی	$P_{elec\_base}$
$0.73 \text{ p.u.}$	مقدار مبنای سرعت باد	$P_{wind\_base}$
$1.2 \text{ p.u.}$	سرعت چرخشی در حداکثر توان برای سرعت مبنای باد	$Speed_{nom}$
.	زاویه گام تیغه	$\beta$
$c_1 = 0.51763$	ضریب بازدهی توربین	$c_{iS}$
$c_2 = 116$		
$c_3 = 0.4$		
$c_4 = 5$		
$c_5 = 21$		
$c_6 = 0.006795$		



مدل فضای حالت حاصل از IHMG، از پنج متغیر حالت تشکیل شده است که به صورت زیر تعریف می‌شوند،

$$G: \begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_u & B_i & B_o \\ C_2 & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{u} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_G} & 0 & -\frac{K_G}{RT_G} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{DG}}{T_{DG}} & -\frac{1}{T_{DG}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} & -\frac{D}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{BESS}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{FESS}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{PV}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_s}{J_r} & -\frac{B_r + B_s}{J_r} & \frac{B_s}{J_r} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_s}{J_g} & \frac{B_s}{J_g} & -\frac{B_s + B_g}{J_g} \end{pmatrix},$$

$$B_u = \begin{bmatrix} \frac{K_G}{T_G} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_{r,v}}{J_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_g}{J_g} \end{bmatrix}, B_o = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M} \\ \frac{K_{BESS}}{T_{BESS}} \\ \frac{K_{FESS}}{T_{FESS}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

جایی که  $\bar{u} = [\Delta u_{DEG} \quad d_i \quad d_o]^T, x = [\Delta X_G \quad \Delta P_{DEG} \quad \Delta f \quad \Delta P_{BESS} \quad \Delta P_{FESS} \quad \Delta P_{PV} \quad \Delta \theta_s \quad \Delta \omega_r \quad \Delta \omega_g]^T$  ورودی کنترل است. اولین عنصر  $\bar{u}$ ،  $d_i$  نشان‌دهنده اغتشاشات ورودی غیرقابل کنترل  $[\Delta u_{PV} \quad \Delta V_W \quad \Delta \omega_Z]$  است و  $d_o = \Delta P_L$  یک تغییر بار تصادفی با تابع توزیع احتمال نرمال را نشان می‌دهد؛ بنابراین، سه ماتریس  $B_u, B_i, B_o$  به ترتیب با سیگنال کنترل  $\Delta u_{DEG}$  اغتشاش ورودی  $d_i = [\Delta u_{WTG} \quad \Delta u_{PV}]^T$  و اغتشاش خروجی  $d_o$  مرتبط هستند. بخش بعدی، رویکرد کنترل مقاوم عصبی-فازی تطبیقی با اعمال سیگنال کنترل به مولد دیزلی، جهت تنظیم فرکانس IHMG از طریق مدیریت عدم قطعیت‌های پارامتریک نشان می‌دهد.

### ۳- رویکرد کنترل عصبی-فازی تطبیقی

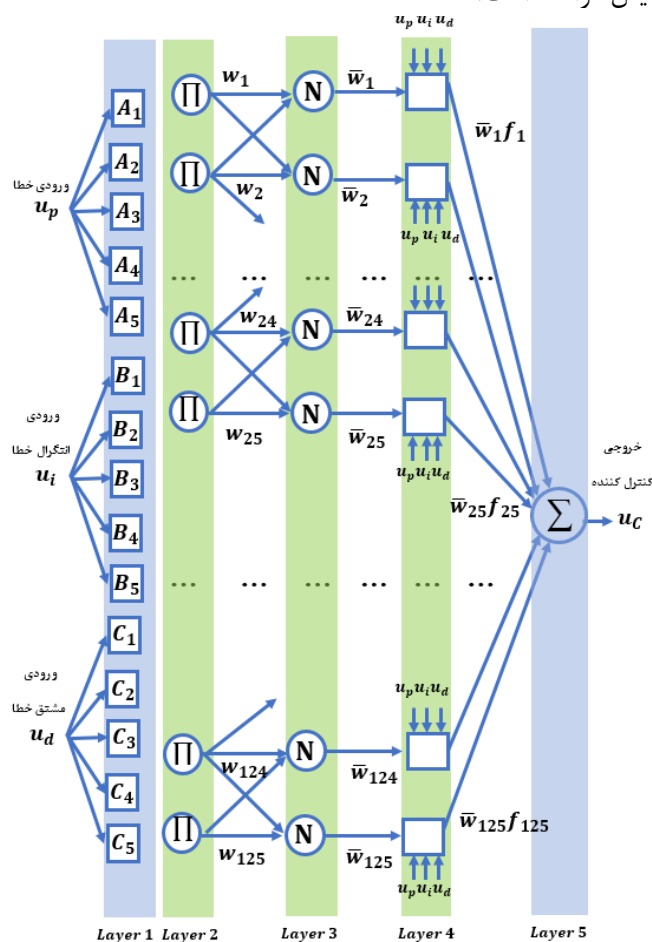
رویکرد کنترل عصبی-فازی تطبیقی، یکی از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم است که برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰]. این روش از مزایای سیستم‌های هوشمند شبکه عصبی و فازی بهره می‌برد. شبکه‌های عصبی که به سیستم‌های جعبه سیاه معروف هستند، یعنی فقط بر پایه داده استوارند و اطلاعاتی از درون سیستم نمی‌دهند، با داده ورودی و خروجی به شناسایی سیستم می‌پردازند. حال الگوریتم فازی به توصیف سیستم بر پایه توابع عضویت می‌پردازد. این

توابع، کیفی بوده و توسط دانش فرد خبره از رفتار سیستم به دست می‌آید و زمان زیادی نیز برای طراحی سیستم نیاز است. با ترکیب این دو روش هوشمند، می‌توان از مزایای هر دو استفاده کرد. از طرفی به دلیل دارا بودن توابع عضویت فازی، الگوریتم از انعطاف خوبی برخوردار است و از سوی دیگر به دلیل بر پایه داده بودن، از داشتن دانش فرد خبره بی‌نیاز است. از این رو، استفاده از این روش در کنترل‌کننده‌ها می‌تواند باعث بهبود عملکرد و افزایش قابلیت مقاوم بودن آن‌ها به تغییرات ناخواسته و نامعینی‌های موجود در سیستم باشد.

استراتژی کنترل پیشنهادی این مقاله، روش ترکیبی عصبی-فازی است که به دلیل وجود چندین عدم قطعیت متناوب در ریزشبکه موردبررسی، رویکرد مناسبی برای مدیریت عدم قطعیت‌ها است. شبکه ترکیبی عصبی-فازی پیشنهادی، یک سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو با سه نوع ورودی خطا ( $u_p$ )، انتگرال خطا ( $u_i$ ) و مشتق خطا ( $u_d$ ) است که در قالب شبکه‌های عصبی چندلایه پیشرو، پیاده‌سازی می‌شود. الگوریتم آموزش مورداستفاده، روش ترکیبی بر اساس نگاهت ورودی-خروجی مبتنی بر دانش انسان (در شکل قوانین اگر-آنگاه) بر اساس زوج داده‌های ورودی-خروجی است. ورودی‌های خطا، انتگرال و مشتق خطای انحراف فرکانسی ریزشبکه، طبق رابطه ۴ تعریف شده است.

$$\begin{cases} u_p = e(t) = f_{meas}(t) - f_r(t) \\ u_i = \int_0^{T_{sim}} e(t) dt \\ u_d = \frac{de(t)}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

فرکانس مطلوب ریزشبکه ( $f_r$ ) و مقدار فرکانس اندازه‌گیری شده ( $f_{meas}$ ) تعریف می‌شود. در شکل ۳، ساختار شبکه ترکیبی عصبی-فازی پیشنهادی به نمایش درآمده است.



شکل ۳: ساختار ترکیبی عصبی-فازی پیشنهادی جهت کنترل فرکانس ریزشبکه موردبررسی [۱].

Figure 3. The proposed ANFIS-based hybrid control structure for frequency control in the investigated microgrids [1].

با توجه به هدف این مقاله که کنترل فرکانس در حضور عدم قطعیت‌ها است، این ساختار ۵ لایه در نقش کنترل‌کننده سیستم ریزشبکه جدا از شبکه مورد بررسی، قابل‌بیان است:

همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، ساختار این شبکه، دارای ۵ لایه به شرح زیر است:

لایه ۱: در این لایه ورودی‌ها از توابع عضویت فازی عبور می‌کنند.

$$\begin{aligned} O_{1,k} &= \mu_{A_k}(u_p), \text{ for } k = 1, 2, 3, 4, 5 \\ O_{1,k} &= \mu_{B_k}(u_p), \text{ for } k = 1, 2, 3, 4, 5 \\ O_{1,k} &= \mu_{C_k}(u_p), \text{ for } k = 1, 2, 3, 4, 5 \end{aligned} \quad (5)$$

که توابع عضویت مورد استفاده، از نوع توابع گاوسی، انتخاب شده است:

$$\mu_{(N_i)}(x) = \exp\left(-\frac{x - c_{Ni}}{a_{Ni}}\right)^{2b_{Ni}}, N = A, B, C \quad (6)$$

که مجموعه پارامترهای تنظیم تابع عضویت متناظر با ورودی‌های شبکه عصبی-فازی پیشنهادی هستند.

لایه ۲: خروجی این لایه، حاصل ضرب سیگنال‌های ورودی است که در واقع، معادل قسمت اگر قوانین هستند.

$$O_{2,k} = w_k = \mu_{A_k}(u_p)\mu_{B_k}(u_p)\mu_{C_k}(u_d), \text{ for } k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

لایه ۳: در این لایه، خروجی لایه دوم، نرمالیزه شده است:

$$O_{3,k} = \bar{w}_k = \frac{w_k}{w_1 + w_2 + w_3}, k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (8)$$

لایه ۴: در این لایه خروجی هر گره برابر است با:

$$O_{4,k} = \bar{w}_k f_k = \bar{w}_k (p_k u_p + q_k u_i + r_k u_d + s_k), k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (9)$$

که  $\{p_k, q_k, r_k, s_k\}$  پارامترهای طراحی است که در فاز آموزش، تعیین می‌گردد.

لایه ۵: خروجی این لایه، یک میانگین‌گیری وزنی است که خروجی کلی سیستم را شامل می‌شود:

$$O_{5,k} = \sum_{k=1}^{125} w_i f_i = \frac{\sum_{k=1}^{125} w_i f_i}{\sum_{k=1}^{125} w_i}, k = 1, 2, \dots, 125 \quad (10)$$

لازم به ذکر است که قوانین فازی تاکاگی-سوگنو به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} \text{Rule}_{(1)} &= \text{if } x \text{ is } A_1 \text{ and if } y \text{ is } B_1 \text{ if } z \text{ is } C_1 & \text{then } u_{C_1} &= p_1 u_p + q_1 u_i + r_1 u_d + s_1 \\ \text{Rule}_{(2)} &= \text{if } x \text{ is } A_2 \text{ and if } y \text{ is } B_1 \text{ if } z \text{ is } C_1 & \text{then } u_{C_2} &= p_2 u_p + q_2 u_i + r_2 u_d + s_2 \\ & \dots & & \dots \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{Rule}_{(125)} = \text{if } x \text{ is } A_5 \text{ and if } y \text{ is } B_5 \text{ if } z \text{ is } C_5 \quad \text{then } u_{C_{125}} = p_{125} u_p + q_{125} u_i + r_{125} u_d + s_{125}$$

باتوجه به انتخاب فازی‌زادای میانگین مراکز، خروجی به صورت زیر خواهد بود:

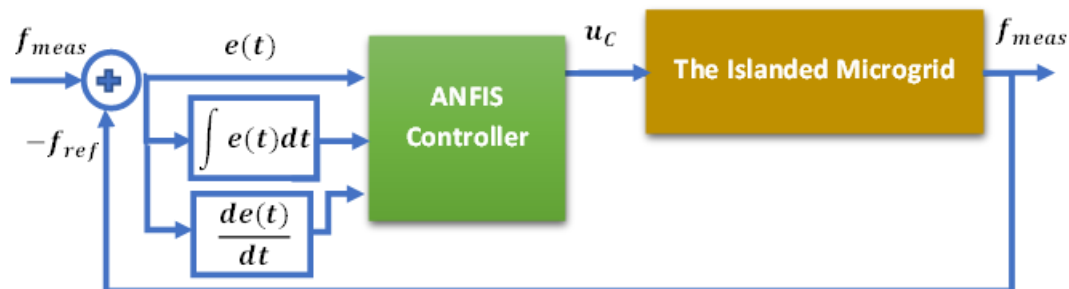
$$u_C = \frac{w_1 u_{C_1} + w_2 u_{C_2} + \dots + w_{125} u_{C_{125}}}{w_1 + w_2 + \dots + w_{125}} = \bar{w}_1 u_{C_1} + \bar{w}_2 u_{C_2} + \dots + \bar{w}_{125} u_{C_{125}} \quad (12)$$

که در آن:

$$\bar{w}_k = \frac{w_k}{w_1 + \dots + w_{125}} \quad (13)$$

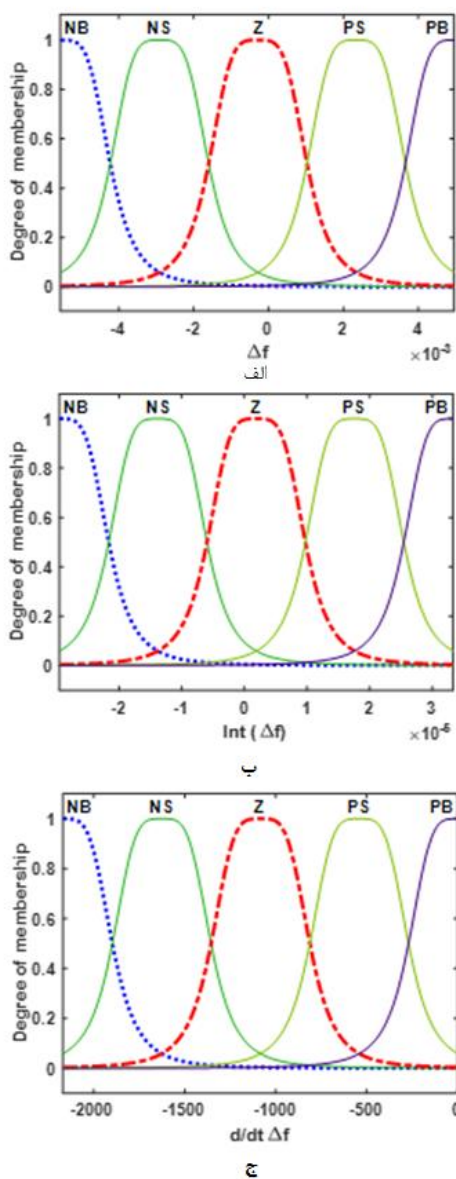
بدین ترتیب، شبکه ۵ لایه حاصل، بر اساس سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو تعریف می‌شود. پس از بیان معماری شبکه، در فاز آموزش، لازم است داده‌های آموزش به صورت بردارهای ستونی ورودی-خروجی به شبکه ترکیبی عصبی-فازی اعمال گردد و این الگوریتم ۵ مرحله‌ای این‌قدر تکرار شود که شبکه بتواند الگوی داده‌شده را فراگیرد.

جهت آموزش وزن‌های شبکه عصبی پیشرو، روش هابرید که ترکیبی از روش گرادیان نزولی و حداقل مربعات خطا است، استفاده شده است. حلقه کنترل کلی برای مسئله کنترل فرکانس در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: ساختار حلقه بسته رویکرد پیشنهادی.  
Figure 4. The closed-loop structure of the proposed approach.

شکل ۵، توابع عضویت گاوسی ورودی‌های سه‌گانه کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برای هر ورودی پنج حالت در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: توابع عضویت گاوسی ورودی‌های سه‌گانه کنترل‌کننده پیشنهادی: (الف) ورودی خطا، (ب) ورودی انتگرال و (ج) ورودی مشتق خطا.  
Figure 5. The functions for the Gaussian membership inputs of the proposed three-input controller from top to bottom: (a) error input, (b) integral input, and (c) derivative of error input.

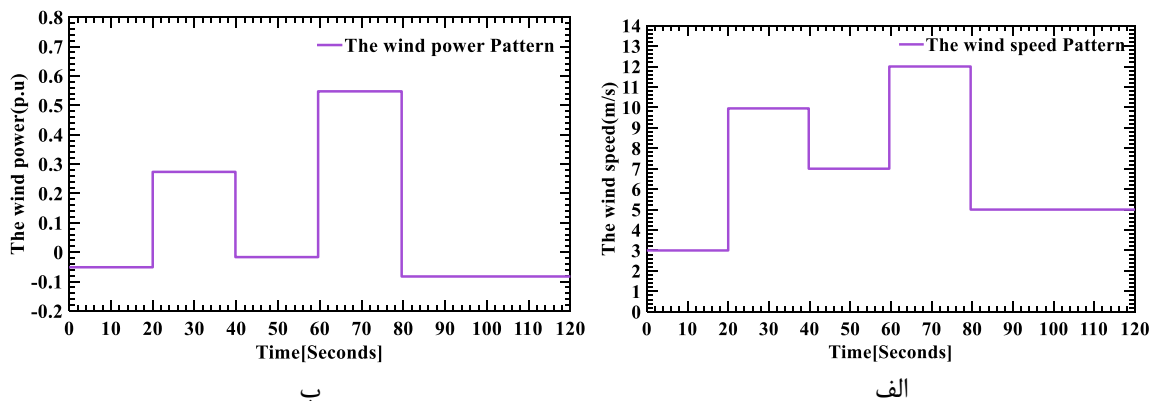
همانطور که بیان گردید، هدف نهایی کنترل پیشنهادی، به حداقل رساندن اثر اغتشاشات ورودی روی فرکانس خروجی ریزشبهه و اطمینان از پایداری سیستم حلقه بسته است. در بخش بعدی، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی، عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را بر روی سیستم IHMG مورد بررسی از طریق اجرای چندین سناریو مطالعه می‌کنیم.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، سناریوهای مختلفی، ترتیب داده‌شده است. جهت مقایسه و ارزیابی جامع، روش پیشنهادی با دو روش کنترل فازی تاکاگی-سوگنو [۴۱] و کنترل PID بهینه تنظیم‌شده با روش جستجوی سیمپلکس [۴۲]، از نظر توانایی در کاهش نوسانات فرکانس و مقاوم بودن به اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها، مورد مقایسه قرار گرفته است. سیستم IHMG که در شکل ۴ نشان داده‌شده، به‌عنوان مبنای شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته در این بخش، لحاظ گردیده است. زمان شبیه‌سازی ۱۲۰ ثانیه، در نظر گرفته‌شده و سیستم حلقه بسته در مواجهه با تغییر سرعت باد برای سیستم توربین بادی، تغییر تابش برای آرایه‌های PV و تغییر بار DC در سه مرحله جداگانه و در نهایت در حضور هر سه نامعینی در مرحله چهارم، مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- نوسانات توان توربین بادی

در سناریوی اول، بر اساس محدودیت‌های پارامتر زمان‌بندی، محدوده عملیاتی برای سرعت باد  $3 \leq V_w \leq 12$  متر بر ثانیه است. پروفایل تغییرات سرعت باد چند پله‌ای و توان توربین بادی از روی الگوی سرعت باد چند پله‌ای به ترتیب در شکل ۶ الف و ب، نشان داده‌شده است.

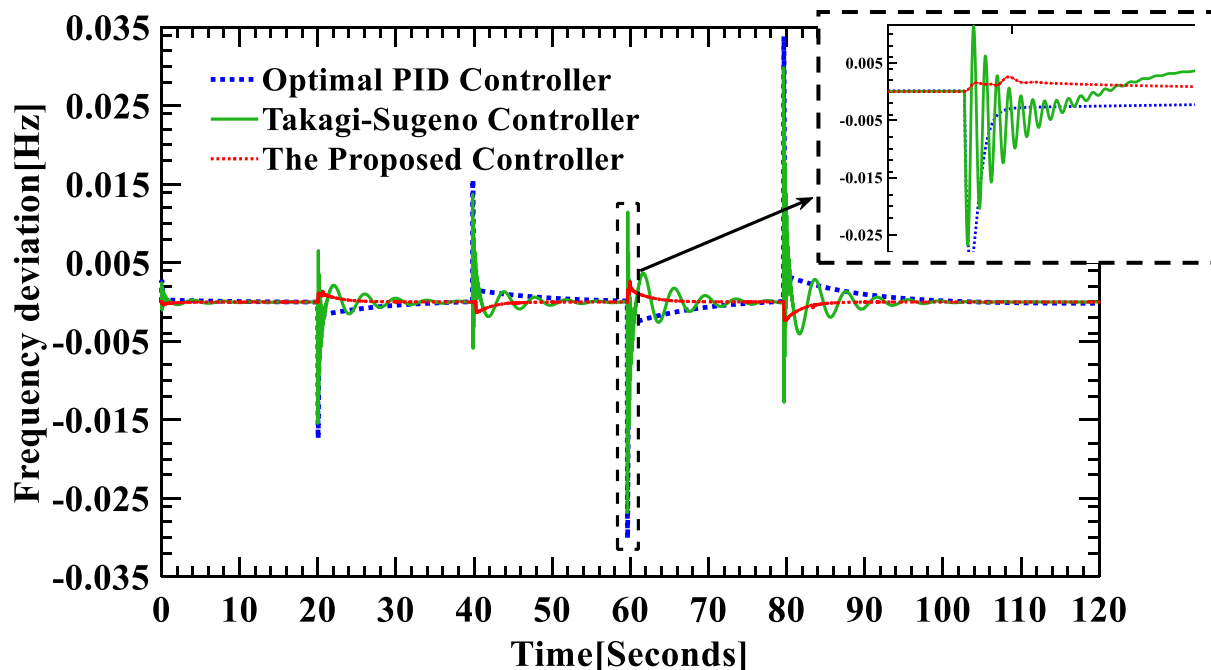


شکل ۶: (الف) پروفایل تغییرات سرعت باد و (ب) توان حاصل از آن در توربین بادی.

Figure 6. (a) The profile of changes in wind speed and (b) the resulting power output of a wind turbine.

در واقع، با در نظر گرفتن پارامترهای مدل توربین بادی غیرخطی که در جدول ۲ نشان داده‌شده است، پروفایل توان توربین بادی از روی الگوی سرعت باد چند پله‌ای به‌دست آمده است.

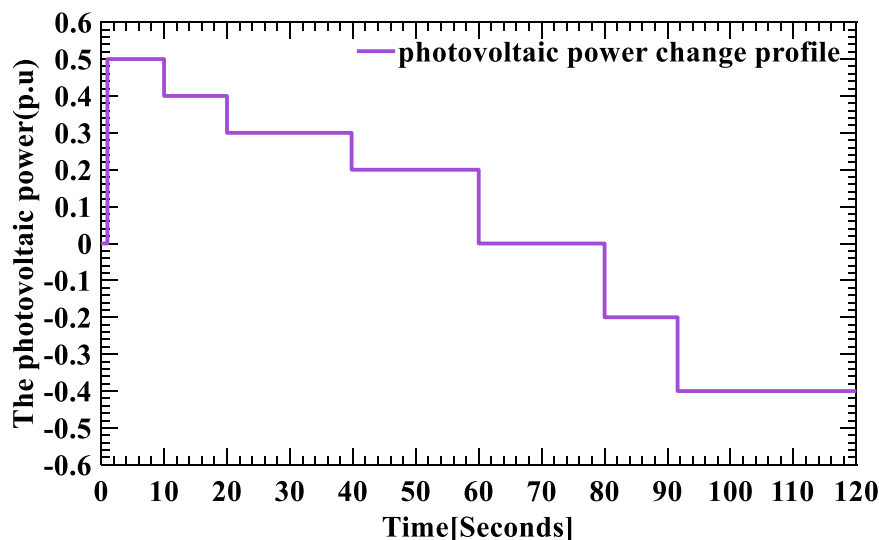
در شکل ۷، عملکرد کنترل‌کننده‌ها از نظر انحراف فرکانسی مقایسه‌شده است. برتری کنترل‌کننده ترکیبی عصبی-فازی نسبت به کنترل فازی تاکاگی-سوگنو و کنترل‌کننده بهینه PID از نظر حداکثر بالازدگی، زمان نشست و زمان صعود نشان داده‌شده است. قابل توجه است که خروجی فرکانس به ازای کنترل فازی تاکاگی-سوگنو، نسبت به کنترل PID بهینه، از نظر حداکثر بالا و پایین زدگی، کوچک‌تر است، اما از نظر پایداری نسبی، کنترل PID بهینه، عملکرد بهتری نسبت به کنترل فازی تاکاگی-سوگنو دارد.



شکل ۷: خروجی فرکانس HMG در حضور پروفایل تغییر توان باد.  
Figure 7. The output frequency of HMG in the presence of a wind power output profile.

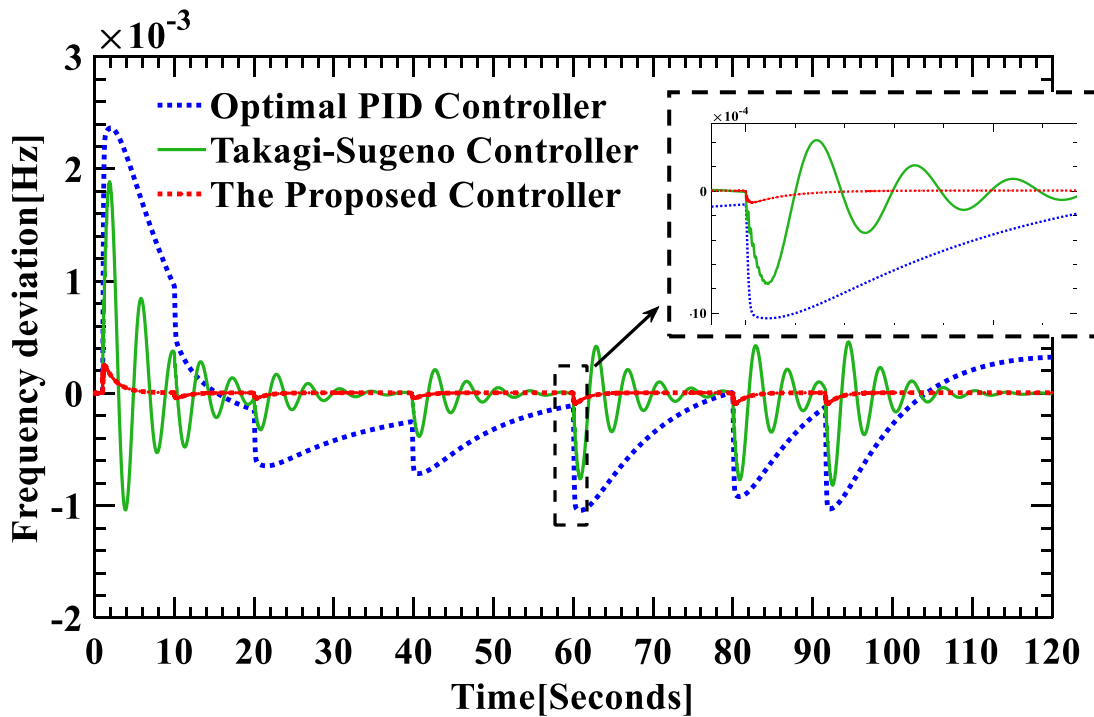
#### ۴-۲-نوسانات توان ارائه فتوولتائیک

شکل ۸، پروفایل تغییرات پله‌ای توان مولد فتوولتائیک متصل به ریزشبه جزیره‌ای مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۸: پروفایل تغییرات پله‌ای توان مولد فتوولتائیک مورد استفاده در شبیه‌سازی.  
Figure 8. The output frequency of HMG in the presence of a photovoltaic power output profile.

شکل ۹، پاسخ حوزه زمان را فقط برای سناریوهای اغتشاش توان PV نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی تحت تغییرات پله‌ای توان PV، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. عملکرد کنترل‌کننده‌ها در بعد توانایی کنترل فرکانس با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده ترکیبی عصبی-فازی نسبت به کنترل فازی تاکاگی-سوگنو و کنترل‌کننده بهینه PID، در حداکثر بالادگی، زمان نشست و زمان صعود عملکرد بهتری دارد.

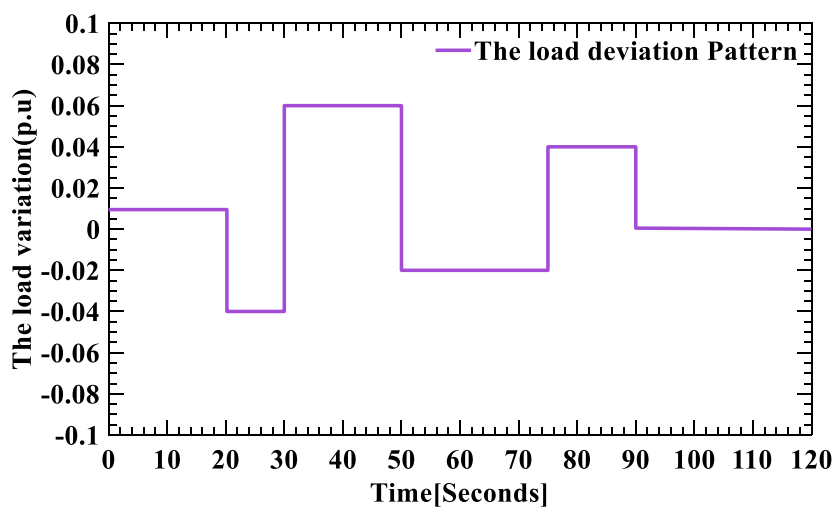


شکل ۹: خروجی فرکانس HMG در حضور پروفایل تغییر توان فتوولتائیک.  
 Figure 9. The output frequency of HMG in the presence of a load power output profile.

این شکل نشان می‌دهد که رفتار پاسخ انحراف فرکانس IHMG برای رویکرد پیشنهادی نرم‌تر و با نوسانات کم است و خروجی فرکانس به ازای کنترل فازی تاکاگی-سوگنو، نسبت به کنترل PID بهینه، از نظر حداکثر بالازدگی و پایین زدگی، کمتر است. با این حال، از نظر پایداری نسبی، به دلیل نوسانات کمتر، کنترل‌کننده بهینه PID، عملکرد بهتری نسبت به کنترل فازی تاکاگی-سوگنو دارد.

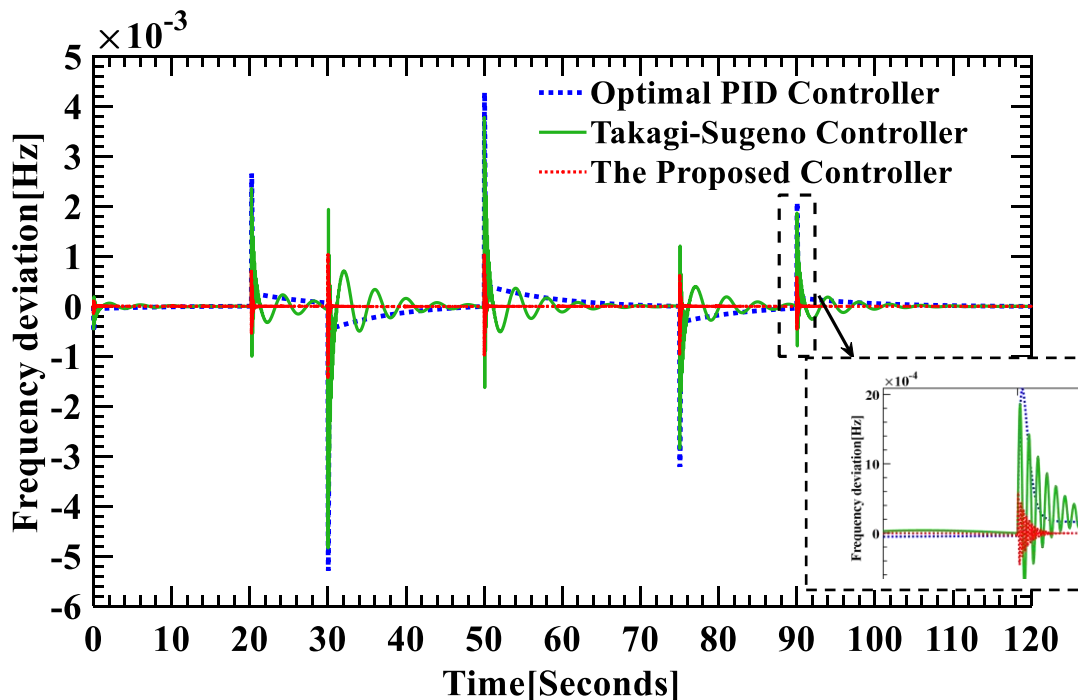
#### ۳-۴- نوسانات تغییر بار DC

در این سناریو، تغییر بار DC چند پله‌ای به‌عنوان یک اغتشاش در IHMG استفاده می‌گردد. الگوی بار چند پله‌ای در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: پروفایل تغییرات پله‌ای بار خروجی مورد استفاده در شبیه‌سازی.  
 Figure 10. The Output frequency of IHMG in the presence of all three types of disturbances.

پاسخ انحراف فرکانسی به کنترل عصبی-فازی، کنترل تاکاگی-سوگنو و کنترل PID بهینه در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است.



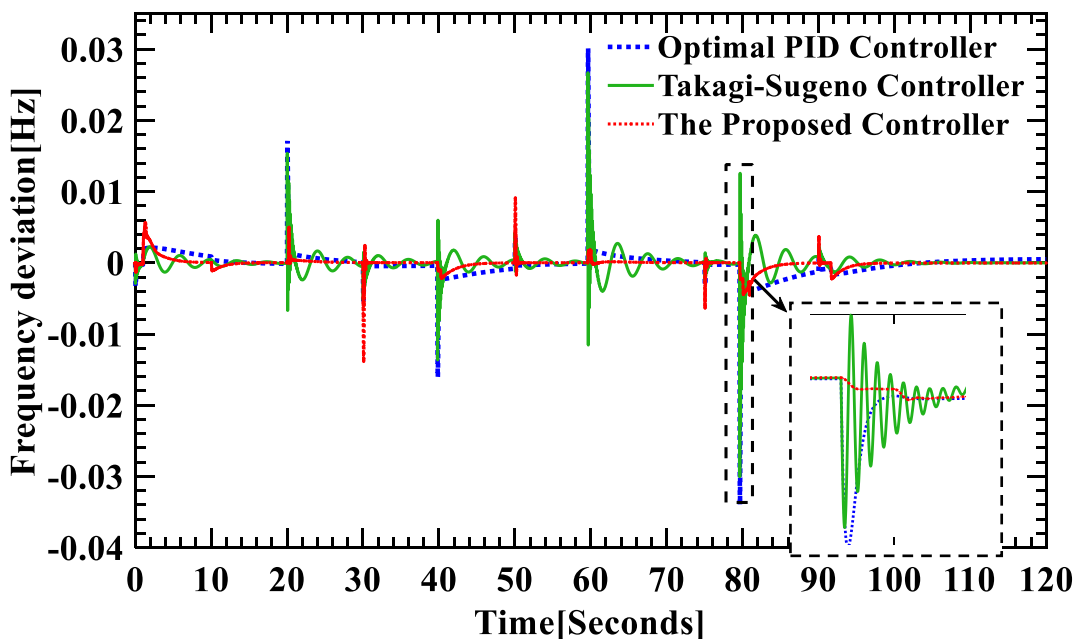
شکل ۱۱: خروجی فرکانس IHMG در حضور پروفایل تغییر بار.

Figure 11. The ITAE objective function of the output frequency of IHMG in the presence of all three types of disturbances.

همانطور که مشخص است، کنترل کننده عصبی-فازی پیشنهادی، از نظر حداکثر بالازدگی، زمان اوج، زمان نشست و خطای حالت ماندگار، عملکرد بهتر با پاسخ گذرای رضایت‌بخش تری را نشان می‌دهد.

#### ۴-۴- هر سه نوع اغتشاش

در این سناریو، اغتشاشات چند پله‌ای هم‌زمان در سرعت باد، انرژی خورشیدی و بار DC ظاهر شده است. خروجی فرکانس IHMG در حضور هر سه نوع اغتشاش در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: خروجی فرکانس IHMG در حضور هر سه نوع اغتشاش.

Figure 12. IHMG frequency output in the presence of all three types of disturbances.



از شکل ۱۲ مشخص است که با اعمال کنترل کننده عصبی-فازی بر روی IHMG، اندازه پیک انحراف فرکانس در کمترین زمان در مقایسه با کنترل تاکاگی-سوگنو و PID بهینه، کاهش یافته است. در زیر بخش بعدی، عملکرد مقاوم کنترل کننده در مواجهه با عدم قطعیت پارامتری طی سه سناریو تحلیل می گردد.

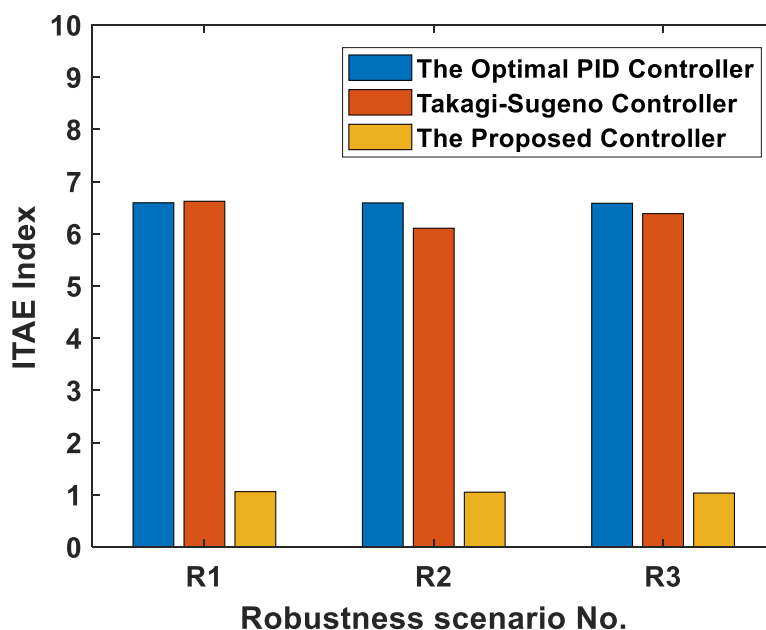
#### ۴-۵- تغییر پارامترها برای ارزیابی مقاوم بودن الگوریتم عصبی-فازی

در بخش پایانی، مقاوم بودن سه الگوریتم کنترلی بیان شده در برابر تغییرات پارامترهای مدل ریزشبهه مورد ارزیابی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن جدول ۳، سه سناریوی ارزیابی مقاوم بر اساس تغییرات هفت پارامتر  $R, D, T_{DEG}, T_g, M, T_{BESS}, T_{FESS}$  مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳: تغییرات پارامترهای مدل ریزشبهه مورد بررسی  
Table 3. The changes in the model parameters of the microgrid under study.

سناریوی R3 (%)	سناریوی R2 (%)	سناریوی R1 (%)	پارامتر
+۶۰	+۳۵	+۳۰	$R$
-۷۰	-۴۰	-۲۲	$D$
+۵۸	+۵۰	+۲۵	$T_{DEG}$
-۷۵	-۴۵	-۲۰	$T_g$
+۶۰	+۵۵	+۳۰	$M$
-۷۵	-۵۰	-۲۵	$T_{BESS}$
+۶۵	+۴۰	+۳۰	$T_{FESS}$

به منظور نمایش کمی مقاوم بودن الگوریتم به تغییرات پارامترها، در شکل ۱۳، خطای مطلق وزنی زمانی ITAE<sup>۱</sup>، به عنوان یک تابع هدف، برای سه سناریوی بیان شده در جدول ۳ رسم شده است.



شکل ۱۳: تابع هدف ITAE خروجی فرکانس IHMG در حضور هر سه نوع اغتشاش.

Figure 13. The ITAE objective function of the IHMG frequency output in the presence of all three types of disturbances.

<sup>1</sup>. Integral time absolute error

همانطور که مشاهده شد، ITAE محاسبه شده برای کنترل کننده عصبی-فازی پیشنهادی نه تنها تقریباً بدون تغییر است، بلکه کاهش قابل توجهی در مقایسه با روش‌های دیگر دارد. روش تاکاگی-سوگنو کمی بیشتر از کنترل کننده PID بهینه در برابر تغییرات مقاومت نشان می‌دهد. جدول ۴ به مقایسه مشخصه‌های زمانی روش پیشنهادی با دو روش مورد بررسی از نظر حداکثر بالازدگی  $M_p$ ، زمان نشست  $t_s$ ، خطای حالت ماندگار  $e_{ss}$  و زمان اوج  $t_p$  پرداخته است.

جدول ۴: مقایسه مشخصه‌های زمانی روش‌های کنترل فرکانس در نظر گرفته شده.  
Table 4. The time characteristics of the considered frequency control methods.

روش کنترلی	$M_p$ (%)	$t_s$ (sec)	$e_{ss} (10^{-6})$	$t_p$ (sec)	سناریو
روش PID بهینه [۴۲]	۰.۰۵۳	۹۴.۵۵	۳.۳۹	۵۹.۴۹	سناریوی R1
روش فازی تاکی-سوگنو [۴۱]	۰.۰۴۹	۸۲.۴	۰.۰۱۹	۵۹.۱۱	
روش کنترلی پیشنهادی	۰.۰۱۱	۴۳	۰	۵۸.۲۳	
روش PID بهینه [۴۲]	۰.۰۰۴۷	۱۵۶.۵۴	۶.۴۶	۲.۰۶	سناریوی R2
روش فازی تاکی-سوگنو [۴۱]	۰.۰۰۳۲	۱۰۴.۱۵	۰.۰۲۵	۲.۳۴	
روش کنترلی پیشنهادی	۰.۰۰۰۷	۷۳.۲۳	۰	۱.۳۸	
روش PID بهینه [۴۲]	۰.۰۰۶۳	۹۷.۲	۲۷.۶	۵۰.۰۵	سناریوی R3
روش فازی تاکی-سوگنو [۴۱]	۰.۰۰۶۱	۹۸.۵۲	۰.۰۳۱	۴۹.۹۸	
روش کنترلی پیشنهادی	۰.۰۰۲۲	۹۷.۲۳	۰	۴۸.۹۳	

همانطور که مشخص است، روش هوشمند پیشنهادی در تمامی ویژگی‌های زمانی، برتری دارد. روش فازی تاکاگی-سوگنو نیز به جز مواردی معدود نظیر زمان نشست در سناریوی R3، نسبت به روش PID بهینه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در بخش نهایی، به بیان نتیجه‌گیری و جهت‌بندی آینده این مطالعه پرداخته شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

علاوه بر اغتشاشات مختلف، پارامترهای سیستم قدرت به طور مداوم در حال تغییر هستند و ممکن است عملکرد سیستم حلقه بسته به طور جدی کاهش یابد. از آنجایی که کنترل کننده‌های کلاسیک و هوشمند عمدتاً هیچ تضمینی برای ارائه عملکرد قابل قبول در طیف گسترده‌ای از شرایط کاری ندارند، در پاسخ به این چالش‌ها، یک الگوریتم مقاوم سامانمند برای تنظیم فرکانس در حضور عدم قطعیت‌ها ارائه گردیده است.

این مقاله، رویکرد کنترل عصبی-فازی جهت کنترل فرکانس را بر اساس شبیه‌سازی‌های حوزه زمان، برای یک ریزشبه جزیره‌ای هیبریدی ارائه کرده است. سیستم مورد بررسی، شامل یک مولد دیزلی به عنوان منبع اصلی تولید برق است. یک سیستم مولد توربین بادی، آرایه‌های فتوولتائیک، BESS، AE و FESS نیز در مدل در نظر گرفته شده است. مدل توربین بادی، غیرخطی در نظر گرفته شده و به منظور کاهش پیچیدگی‌های مدل نهایی، برای AE، PV، DEG، FC، BESS و FESS از مدل‌های خطی استفاده شده است.

این مقاله برای یک ریزشبه جدا از شبکه بررسی شده و یک الگوریتم طراحی کنترل عصبی-فازی را پیشنهاد می‌کند که پایداری فرکانسی مناسبی را برای IHMG در شرایط نامعینی‌های گوناگون ارائه می‌نماید. از خطا فرکانس و انتگرال خطا به عنوان ورودی‌های سیستم بهره گرفته و وزن‌های شبکه بر اساس داده‌های آموزش به روش ترکیبی، محاسبه می‌شود. ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی را می‌توان از پاسخ‌های انحراف فرکانس پس از بستن حلقه کنترل ثانویه مشاهده نمود. بر این اساس، ارزیابی عملکرد برای چندین سناریوی همراه با اغتشاش صورت گرفته است و نتایج با کنترل تاکاگی-سوگنو و کنترل بهینه PID، در قالب نمودارهای انحراف فرکانس جهت ارزیابی مقاوم بودن الگوریتم مقایسه گردیده است. همچنین از معیار کمی خطای مطلق وزنی (ITAE) نیز به منظور بررسی مقاوم بودن به تغییرات پارامتری بهره گرفته شده است. الگوریتم کنترل عصبی-فازی پیشنهادی، قادر است تمامی اغتشاشات و تغییر پارامترها را در طیف وسیعی از تغییرات، کنترل نموده و فرکانس را در ریزشبه جزیره‌ای تحت شرایط کاری مختلف، به طور مؤثر تنظیم نماید.

## مراجع

- [1] S. Rajamand, "Load frequency control and dynamic response improvement using energy storage and modeling of uncertainty in renewable distributed generators," *Journal of Energy Storage*, vol. 37, p. 102467, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102467.
- [2] U. Datta, A. Kalam, and J. Shi, "The relevance of large-scale battery energy storage (BES) application in providing primary frequency control with increased wind energy penetration," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 9-18, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.02.013.
- [3] M. S. Javed, T. Ma, J. Jurasz, and M. Y. Amin, "Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives," *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 176-192, 2020.
- [4] D. Ribó-Pérez, P. Bastida-Molina, T. Gómez-Navarro, and E. Hurtado-Pérez, "Hybrid assessment for a hybrid microgrid: A novel methodology to critically analyse generation technologies for hybrid microgrids," *Renewable Energy*, vol. 157, pp. 874-887, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.095.
- [5] A. Sefidgar-Dezfouli, M. Joorabian, and E. Mashhour, "Optimal Scheduling of Smart Microgrid for Stable and Economic Islanding using Demand as the Spinning Reserve," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 25-40, 2019.
- [6] A. Rahman, L. C. Saikia, and N. Sinha, "Automatic generation control of an interconnected two-area hybrid thermal system considering dish-stirling solar thermal and wind turbine system," *Renewable energy*, vol. 105, pp. 41-54, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.048.
- [7] J. Uche, A. Muzás, L. Acevedo, S. Usón, A. Martínez, and A. Bayod, "Experimental tests to validate the simulation model of a Domestic Trigeneration Scheme with hybrid RESs and Desalting Techniques," *Renewable Energy*, vol. 155, pp. 407-419, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.03.147.
- [8] C. S. A. Nandar, "Robust PI control of smart controllable load for frequency stabilization of microgrid power system," *Renewable Energy*, vol. 56, pp. 16-23, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.032.
- [9] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, and T. Funabashi, "A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 406-414, 2005, doi: 10.1109/TEC.2004.837275.
- [10] D.-J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: Time-domain simulations," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 311-320, 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914309.
- [11] I. Hussain, S. Ranjan, D. C. Das, and N. Sinha, "Performance analysis of flower pollination algorithm optimized PID controller for wind-PV-SMES-BESS-diesel autonomous hybrid power system," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 7, no. 2, pp. 643-651, 2017.
- [12] J. Li, P. Liu, and Z. Li, "Optimal design and techno-economic analysis of a solar-wind-biomass off-grid hybrid power system for remote rural electrification: A case study of west China," *Energy*, vol. 208, p. 118387, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118387.
- [13] M. Ranjan and R. Shankar, "A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects," *Journal of Energy Storage*, vol. 45, p. 103717, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103717.
- [14] M. Eslami, "Low-Frequency Stability Based on Optimal Design of Proportional Integral-Differential-Fractional Order Fuzzy Controller Based on Intelligent Hybrid Algorithm," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 103-120, 2022.
- [15] M. A. Jirdehi, V. S. Tabar, S. Ghassemzadeh, and S. Tohidi, "Different aspects of microgrid management: A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101457, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101457.

- [16] X. Yang, J. Su, M. Ding, and D. Yan, "Research on frequency control for microgrid in islanded operation," *Power System Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 164-168, 2010.
- [17] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, pp. 38-50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [18] R. Carli and M. Dotoli, "Decentralized control for residential energy management of a smart users' microgrid with renewable energy exchange," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 6, no. 3, pp. 641-656, 2019, doi: 10.1109/JAS.2019.1911462.
- [19] H. Bevrani, H. Golpîra, A. R. Messina, N. Hatziargyriou, F. Milano, and T. Ise, "Power system frequency control: An updated review of current solutions and new challenges," *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107114, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107114.
- [20] M. Rahmani, F. Faghihi, and B. Mozafari, "Analysis and Evaluation of Hybrid Cooperative Frequency Control for Micro Grids in Islanding Mode in Case of Solar Panel Outage and Load Variation," *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, no. 7, pp. 49-61, 2019, doi: 10.22034/JEST.2019.22825.3229.
- [21] P. K. Ray, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "Proportional-integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 4, pp. 1943-1954, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.11.011.
- [22] C. Wang, Y. Mi, Y. Fu, and P. Wang, "Frequency control of an isolated micro-grid using double sliding mode controllers and disturbance observer," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 923-930, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2571439.
- [23] A. Bagheri, A. Jabbari, and S. Mobayen, "An intelligent ABC-based terminal sliding mode controller for load-frequency control of islanded micro-grids," *Sustainable Cities and Society*, vol. 64, p. 102544, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102544.
- [24] A. Latif, A. Pramanik, D. C. Das, I. Hussain, and S. Ranjan, "Plug in hybrid vehicle-wind-diesel autonomous hybrid power system: frequency control using FA and CSA optimized controller," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 9, no. 5, pp. 1147-1158, 2018, doi: 10.1007/s13198-018-0721-1.
- [25] S. Ganguly, C. K. Shiva, and V. Mukherjee, "Frequency stabilization of isolated and grid connected hybrid power system models," *Journal of Energy Storage*, vol. 19, pp. 145-159, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.07.014.
- [26] X. Li, Y.-J. Song, and S.-B. Han, "Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller," *Journal of Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 468-475, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.01.092.
- [27] A. Annamraju and S. Nandiraju, "Robust frequency control in an autonomous microgrid: a two-stage adaptive fuzzy approach," *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 83-94, 2018, doi: 10.1080/15325008.2018.1432723.
- [28] T. Mahto and V. Mukherjee, "A novel scaling factor based fuzzy logic controller for frequency control of an isolated hybrid power system," *Energy*, vol. 130, pp. 339-350, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.155.
- [29] M. I. Alomoush, "Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers," *Electrical Engineering*, vol. 91, no. 7, pp. 357-368, 2010, doi: 10.1007/s00202-009-0145-7.
- [30] T. Mahto, H. Malik, V. Mukherjee, M. A. Alotaibi, and A. Almutairi, "Renewable generation based hybrid power system control using fractional order-fuzzy controller," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 641-653, 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.01.022.

- [31] D. Rerkpreedapong, A. Hasanovic, and A. Feliachi, "Robust load frequency control using genetic algorithms and linear matrix inequalities," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 855-861, 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.811005.
- [32] M. Dashtdar *et al.*, "Improving the power quality of island microgrid with voltage and frequency control based on a hybrid genetic algorithm and PSO," *IEEE Access*, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3201819.
- [33] D. Mishra, P. C. Sahu, R. C. Prusty, and S. Panda, "A fuzzy adaptive fractional order-PID controller for frequency control of an islanded microgrid under stochastic wind/solar uncertainties," *International Journal of Ambient Energy*, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1080/01430750.2021.1914163.
- [34] D. Sharma, "Fuzzy with adaptive membership function and deep learning model for frequency control in PV-based microgrid system," *Soft Computing*, vol. 26, no. 19, pp. 9883-9896, 2022, doi: 10.1007/s00500-022-07342-y.
- [35] H. Karimi, M. T. Beheshti, A. Ramezani, and H. Zareipour, "Intelligent control of islanded AC microgrids based on adaptive neuro-fuzzy inference system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 133, p. 107161, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107161
- [36] D. Gamage, X. Zhang, A. Ukil, C. Wanigasekara, and A. Swain, "Design of ANFIS Controller for a DC Microgrid," in *International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404439.
- [37] L. Wang, D.-J. Lee, W.-J. Lee, and Z. Chen, "Analysis of a novel autonomous marine hybrid power generation/energy storage system with a high-voltage direct current link," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1284-1292, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.08.037.
- [38] H. Bevrani, M. R. Feizi, and S. Ataei, "Robust frequency control in an islanded microgrid:  $H_{\infty}$   $\mu$ -synthesis approaches," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 7, no. 2, pp. 706-717, March 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2446984.
- [39] F. A. Inthamoussou, F. D. Bianchi, H. De Battista, and R. J. Mantz, "LPV wind turbine control with anti-windup features covering the complete wind speed range," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 1, pp. 259-266, 2014, doi: 10.1109/TEC.2013.2294212.
- [40] M. I. Guerra, F. M. de Araújo, J. T. de Carvalho Neto, and R. G. Vieira, "Survey on adaptative neural fuzzy inference system (ANFIS) architecture applied to photovoltaic systems," *Energy Systems*, pp. 1-37, 2022, doi: 10.1007/s12667-022-00513-8.
- [41] J. Zhao, R. Gorez, and V. Wertz, "Synthesis of fuzzy control systems based on linear Takagi-Sugeno fuzzy models," in *Multiple Model Approaches to Modelling and Control*: CRC Press, 2020, pp. 307-336.
- [42] L. Fu, L. Zhou, J. Liang, and M. Lin, "PID parameters self-tuning based on simplex method," in *Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018, pp. 4769-4774, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407956.

---

#### COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

---

