Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 10-22

Vol. 15/ No. 1/ Spring 2026
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Electric vehicle speed control using an improved 2DOF-PIDF controller

Farhad Amiri[1], Sajad Sadr[2]*

[1] *Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran, f.amiri@tafreshu.ac.ir*

[2] *Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran, sadr@tafreshu.ac.ir*

Abstract:
Due to the reduction of greenhouse gas emissions and higher energy efficiency, the tendency from conventional vehicles to electric vehicles has increased. One of the most important issues related to electric vehicles is its speed control. To effectively control the speed of electric vehicles, it is necessary to design an accurate and highly reliable controller. In this paper, a 2DOF-PIDF controller is designed for electric vehicle speed control due to its good performance in speed tracking, robustness against disturbances and uncertainty of system parameters. Also, to improve the performance of the 2DOF-PIDF controller in electric vehicle speed control, the grey wolf algorithm is used to adjust the parameters of the proposed controller. The proposed algorithm has a simple structure and high convergence speed. In order to investigate the performance of the proposed control method in several scenarios, it is compared with Arc tan PID, PID and NL-PID controllers. According to the results, the improved 2DOF-PIDF controller has a favorable performance compared to other controllers and was able to quickly track the speed of the electric vehicle, and also had better performance in terms of indicators such as maximum overshoot and deflection settling time, improving these two indicators by 100% and 40%, respectively.

1-Introduction:

The innovation of the paper includes the following:

1) The problem of electric vehicle speed control is investigated considering disturbances and uncertainty of its parameters.

2) Design of improved 2DOF-PIDF controller for electric vehicle speed control and adjustment of its parameters with Gray Wolf Algorithm (GWO).

3) Comparison of the performance of the proposed algorithm (GWO) with algorithms such as BAT, AOA to optimize the parameters related to the 2DOF-PIDF controller in the structure of electric vehicle speed control considering the ITAE objective function and the square of the control signal.

4) Comparison of the proposed control method (2DOF-PIDF-GWO) with Arc tan PID, PID and NL-PID control methods in controlling the speed of electric vehicles according to different scenarios considering disturbances.

5) Sensitivity analysis of the proposed control method (2DOF-PIDF-GWO) in the face of uncertainties of various parameters related to electric vehicles.

2- Electric vehicle model:

In an electric vehicle, because there is no internal combustion engine, it will also cause pollution and help the environment. In the overall structure of an electric car, there is a battery, an electric motor (usually a DC type) and a controller to control the speed of the electric car. In this structure, the controller is responsible for regulating the speed of the electric motor, which converts the input voltage of the motor into the speed of the vehicle by the electric vehicle system. High reliability, low maintenance cost and maintenance are among the reasons for the widespread use of DC motors in the structure of electric vehicles.

3-Design of the proposed control method (2DOF-PIDF-GWO) for electric vehicle speed control:

The design of the proposed control method (2DOF-PIDF-GWO) for electric vehicle speed control consists of

Vol. 15/ No. 1/ Spring 2026
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

three parts: 1) 2DOF-PIDF controller 2) Gray Wolf algorithm 3) Design steps of the proposed controller for electric vehicle speed control.

4-Conclusion:

Given the increasing importance of electric vehicles, research and development on them is of great importance. To effectively control the speed of electric vehicles, it is necessary to design an accurate and highly reliable controller. In this paper, the 2DOF-PIDF controller was designed for electric vehicle speed control due to its good performance in speed tracking, robustness against disturbances and uncertainty of system parameters, and to improve the performance of the 2DOF-PIDF controller in electric vehicle speed control, the gray wolf algorithm was used to adjust its parameters. The proposed algorithm has a simple structure and high convergence speed. In order to investigate the performance of the proposed control method in several scenarios, it was compared with Arc tan PID, PID and NL-PID controllers. According to the results, the improved 2DOF-PIDF controller has a favorable performance compared to other controllers and was able to track the speed of electric vehicles quickly, and also has better performance in terms of indicators such as maximum overshoot and settling time, and improves these two indicators by 100% and 40%, respectively.

Keywords: Electric vehicle, 2DOF-PIDF controller, Speed control, Maximum overshoot.

Date of sending the article: 2026/01/27
Acceptance date of the article: 2026/06/09

Name of the Corresponding Author: Farhad Amiri
Corresponding Author's Address: Iran, Tafresh, Tafresh University, Department of Electrical Engineering

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۲۲-۱۰

Vol. 15 / No. 1/ Spring 2026
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

کنترل سرعت خودرو برقی با استفاده از کنترل کننده 2DOF-PIDF[1] بهبود یافته

نوع مطالعه: پژوهشی

فرهاد امیری*[۱]، سجاد صدر[۲]

*۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، ایران، *f.amiri@tafreshu.ac.ir*
۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، ایران،*sadr@tafreshu.ac.ir*

چکیده: به دلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بازده انرژی بالاتر، تمایل از خودروهای مرسوم به سمت خودروهای برقی افزایش یافته است. یکی از مهمترین مسائل مربوط به خودرو برقی، کنترل سرعت آن می‌باشد. برای کنترل موثر سرعت خودرو برقی، طراحی یک کنترل کننده دقیق و با قابلیت اطمینان بالا لازم است. در این مقاله، کنترل کننده 2DOF-PIDF برای کنترل سرعت خودرو برقی به دلیل عملکرد مناسب در ردیابی سرعت، مقاوم بودن در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم طراحی شده است. همچنین برای بهبود عملکرد کنترل کننده 2DOF-PIDF در کنترل سرعت خودرو برقی از الگوریتم گرگ خاکستری برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی دارای ساختار ساده و سرعت همگرایی بالا می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی در چندین سناریو با کنترل کننده های Arc tan PID ، PID و NL-PID مقایسه شده است. مطابق نتایج، کنترل کننده 2DOF-PIDF بهبود یافته نسبت به سایر کنترل کننده‌ها، عملکرد مطلوبی دارد و توانسته سرعت خودرو برقی را سریع ردیابی کند، همچنین از لحاظ شاخص‌هایی مانند بیشینه فراجهش و زمان نشست انحرافات عملکرد بهتری داشته باشد و این دو شاخص را به میزان ۱۰۰٪ و ۴۰٪ به ترتیب بهبود دهد.

واژگان کلیدی: خودرو برقی، کنترل کننده 2DOF-PIDF، کنترل سرعت، بیشینه فراجهش

تاریخ ارسال مقاله:۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله:۱۴۰۵/۰۳/۱۹

نام نویسنده مسئول:فرهاد امیری

آدرس نویسنده مسئول: ایران، تفرش، دانشگاه تفرش، گروه مهندسی برق

[1] 2-Degree-of-Freedom PID controller with filter (2-DOF-PIDF)

۱-مقدمه: با توجه به اهمیت کاهش گازهای گلخانه‌ای و نگرانی در مورد آلاینده‌های زیستی، تمایل به سمت خودروهای برقی گسترش یافته است (Kesseler et al.,2026; Chakraborty el al., 2025; Daisy et al., 2023). به دلیل استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر در ساختار خودروهای الکتریکی، این وسیله محبوب صنعت حمل و نقل می‌باشد. با توجه به مقررات سختگیرانه مربوط به صنعت حمل و نقل و همچنین استفاده مطلوب از انرژی، تمایل به توسعه و تحقیق در مورد خودروهای برقی گسترش پیدا کرده است(Shaik et al.,2025). عملکرد و کارایی یک خودرو برقی وابسته به طول عمر تجهیزات و قابلیت اطمینان این سیستم است. در خودرو برقی، معمولا از موتور DC به دلیل قابلیت اطمینان بالا، هزینه پایین و نگهداری راحت استفاده می شود (Alnaib et al.,2025; Abdelwanis et al., 2025). در خودرو برقی نیرو محرکه چرخ ها به وسیله موتور DC تامین می‌شود (Ma et al., 2023; Kosuru et al.,2023). در واقع در خودرو برقی با کنترل سرعت موتور DC، سرعت خودرو برقی کنترل خواهد شد. کنترل سرعت خودرو برقی به چندین دلیل اهمیت دارد از جمله:۱) ایمنی و پایداری خودرو ۲) بهبود مصرف انرژی در خودرو ۳)افزایش طول عمر قطعات خودرو ۴) آسایش رانندگان و سرنشینان خودرو (Turcian el al., 2023; Rind et al., 2018; Gheisarnejad et al.,2022).

تحقیقاتی مختلفی بر روی سرعت خودرو برقی و دینامیک مربوط به آن صورت گرفته است. در (Naqvi et al., 2024)، سرعت خودرو برقی با استفاده از کنترل کننده PI بهینه شده با الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات-تکاملی-تفاضلی کنترل شده است. این کنترل کننده در ردیابی سرعت سیستم بدون حضور اغتشاشات و عدم قطعیت های مربوط به پارامترهای سیستم مطلوب عمل می کند، اما در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم و همچنین عدم قطعیت مربوط به پارامترهای خودرو برقی عملکرد مناسبی ندارد. در (Intidam et al., 2023; Subbarao et., 2023)، سرعت خودرو برقی با استفاده از کنترل کننده PI همراه با سیستم عصبی-فازی، کنترل شده است. این کنترل کننده در ردیابی سرعت سیستم با حضور اغتشاشات و عدم قطعیت های مربوط به پارامترهای سیستم مطلوب عمل می‌کند، اما در برابر اغتشاشات شدید عملکرد مناسبی نخواهد داشت. در (Jassim et al., 2023)، سرعت خودرو برقی با استفاده از کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات-بهینه سازی چند جهانی کنترل شده است. این کنترل کننده در ردیابی سرعت سیستم بدون حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای سیستم مطلوب عمل می‌کند، اما در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم و همچنین عدم قطعیت مربوط به پارامترهای خودرو برقی عملکرد مناسبی ندارد. در (Chantoufi et al.,2025; Veysi et al., 2020)، کنترل کننده فازی برای کنترل سرعت خودرو برقی طراحی شده است. این روش به دلیل چالشهایی همانند پیچیدگی محاسباتی، چالش تنظیم پارامترها و عدم یادگیری خودکار درکنترل سرعت خودرو برقی مواجهه است. در (Baidya et al., 2023)، کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم قاصدک به منظور کنترل سرعت خودرو برقی طراحی شده است. این روش نیز در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم و همچنین عدم قطعیت مربوط به پارامترهای خودرو برقی عملکرد مناسبی ندارد. در (WU et al., 2022)، کنترل کننده PID مرتبه کسری فازی برای کنترل سرعت خودرو برقی طراحی شده است. این روش، ردیابی سرعت مطلوبی دارد همچنین در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای سیستم مقاوم است اما به دلیل پیچیدگی بالا و بار محاسبات زیاد، چالش در پیاده سازی سخت افزاری چندان مطلوب نمی باشد. در (Dantas et al., 2018)، از کنترل کننده PID با زمان بندی بهره برای کنترل سرعت خودرو برقی استفاده شده است. این کنترل کننده در برابر عدم قطعیت مربوط به پارامترهای خودرو برقی عملکرد مناسبی ندارد و ردیابی مطلوبی از سرعت خودرو برقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها ندارد. در (George et al., 2021) ، کنترل کننده PID مرتبه کسری فازی بهینه شده با الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه ها برای کنترل سرعت خودرو برقی طراحی شده است. این روش کنترلی به دلیل پیچیدگی بالا و بار محاسبات زیاد، چالش در پیاده سازی سخت افزاری نیز چندان مطلوب نمی باشد. در (Kumar et al., 2016)، از کنترل کننده آبشاری PID فازی مرتبه کسری-PD برای کنترل سرعت خودرو برقی استفاده شده است. این روش کنترلی ردیابی مطلوبی از سرعت دارد اما همچنان مشکلاتی همانند پیچیدگی بالا و بار محاسبات زیاد، چالش در پیاده سازی سخت افزاری دارد. در (Oleiwi et al., 2024)، برای کنترل سرعت خودرو برقی، کنترل کننده NL-PID طراحی شده است. این کنترل کننده در ردیابی سرعت خودرو برقی عملکرد مطلوبی دارد

همچنین در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای سیستم مقاوم می باشد اما در معایبی همچون پیچیدگی محاسباتی بالا به دلیل تنظیم تعداد زیاد پارامترهای آن و پیاده سازی سخت افزاری پیچیده می‌باشد. بنابراین برای کنترل سرعت خودرو برقی نیاز به یک کنترل کننده می باشد که بتواند ردیابی مطلوبی از سرعت خودرو داشته باشد همچنین در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم مقاوم باشد. همچنین روش کنترلی پیشنهادی باید نسبت به روشهای قبل، پیچیدگی محاسباتی کمتری داشته باشد و پیاده سازی سخت افزاری ساده تری داشته باشد.

در این مقاله، کنترل کننده 2DOF-PIDF برای کنترل سرعت خودرو برقی به دلیل عملکرد مناسب در ردیابی سرعت، مقاوم بودن در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم طراحی شده است. همچنین برای بهبود عملکرد کنترل کننده 2DOF-PIDF در کنترل سرعت خودرو برقی از الگوریتم گرگ خاکستری برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی دارای ساختار ساده و سرعت همگرایی بالا می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی در چندین سناریو با کنترل کننده های Arc tan PID، PID و NL-PID مقایسه شده است. مطابق نتایج، کنترل کننده2DOF-PIDF بهبود یافته نسبت به سایر کنترل کننده‌ها، عملکرد مطلوبی دارد و توانسته سرعت خودرو برقی را سریع ردیابی کند، همچنین از لحاظ شاخص‌هایی مانند بیشینه فراجهش و زمان نشست انحرافات عملکرد بهتری داشته باشد و این دو شاخص را به میزان ٪۱۰۰ و ٪۴۰ به ترتیب بهبود دهد. نوآوری مقاله شامل موارد زیر می باشد:

۱)مسئله کنترل سرعت خودرو برقی با در نظر گرفتن اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای آن بررسی شده است.

۲) طراحی کنترل کننده 2DOF-PIDF بهبود یافته برای کنترل سرعت خودرو برقی و تنظیم پارامترهای آن با الگوریتم گرگ خاکستری (GWO[1])

۳) مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی (GWO) با الگوریتمهای مانند BAT[2]، AOA[3] برای بهینه کردن پارامترهای مربوط به کنترل کننده 2DOF-PIDF در ساختار کنترل سرعت خودروالکتریکی با در نظر گرفتن تابع هدف ITAE و مربع سیگنال کنترلی

۴) مقایسه روش کنترلی پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) با روشهای کنترلی Arc tan PID، PID و NL-PID در کنترل سرعت خودرو برقی مطابق سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن اغتشاش

۵)تحلیل حسایت روش کنترلی پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) در موجهه با عدم قطعیت پارامترهای مختلف مربوط به خودرو برقی

در ادامه مقاله شامل چندین بخش است: در بخش دوم به بیان مدل خودرو برقی پرداخته شده است. در بخش سوم به بیان طراحی روش کنترلی پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) برای کنترل سرعت خودرو برقی پرداخته شده است. در بخش چهارم، شبیه سازی و در بخش پنجم نتایج بیان شده است.

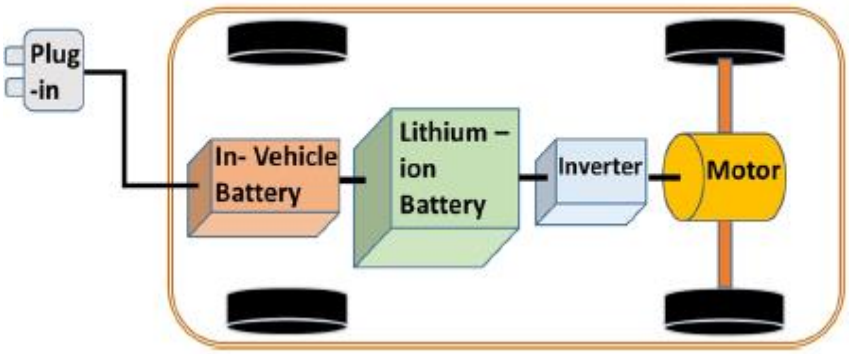
۲- مدل خودرو برقی

در خودرو برقی به دلیل اینکه موتور احتراق داخلی وجود ندارد، در نتیجه آلودگی و سبب کمک به محیط زیست هم خواهد شد. در ساختار کلی خودرو برقی، باتری، موتور الکتریکی (معمولا از نوع DC) و کنترل کننده برای کنترل سرعت خودرو برقی وجود دارد. در این ساختار، کنترل کننده وظیفه تنظیم سرعت موتور الکتریکی را بر عهده دارد که ولتاژ ورودی موتور به وسیله سیستم خودرو برقی به سزعت چرخش خودرو تبدیل می‌شود. قابلیت اطمینان بالا، هزینه نگهداری پایین و نگهداری از جمله دلایل استفاده گسترده موتورهای DC در ساختار خودروهای برقی می‌باشد. ساختار خودرو برقی در شکل (۱) نشان داده شده است (Oleiwi et al., 2024).

در این مقاله، سیستم محرکه به وسیله موتور DC به حرکت درآورده خواهد شد و سرعت خودرو برقی به وسیله کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) تنظیم خواهد شد. مدل اصلی

[1] grey wolf optimizer
[2] Bat algorithm
[3] Aquila Optimization algorithm

خودرو برقی به وسیله رابطه (۱) نشان داده شده است که این مدل با در نظر گرفتن پارامترهای موتور DC، اصطکاک جاده و مقاومت هوا به صورت تابع انتقال مرتبه دوم تعریف شده است (Oleiwi et al., 2024).



شکل (۱): ساختار خودرو برقی (Oleiwi et al., 2024)

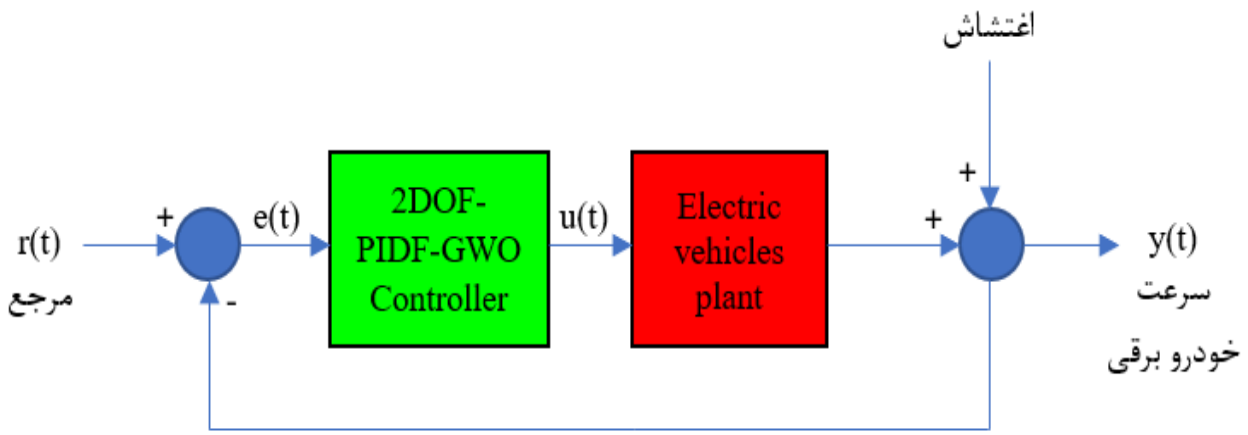
$$G(s)=\frac{k}{T^2s^2+2\varepsilon Ts+1} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، ε :ضریب میرایی، k: بهره سیستم و T ثابت زمانی سیستم است. مدل خودرو برقی در نهایت بر اساس روابط (۲) و (۳) نمایش داده شده است که یک مدل پایدار برای این سیستم است و طراحی روش کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) بر اساس این مدل خواهد بود

$$G(s)=\frac{0.913242}{1.39s^2+1.215s+0.913242} \quad (۲)$$

$$G(s)=\frac{0.657}{s^2+0.8741s+0.657} \quad (۳)$$

در شکل (۲)، بلوک دیاگرام کنترل سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) نشان داده شده است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام کنترل سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO)

۳-طراحی روش کنترلی پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) برای کنترل سرعت خودرو برقی

طراحی روش کنترل پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) برای کنترل سرعت خودرو برقی شامل سه بخش است: ۱)کنترل کننده 2DOF-PIDF ۲)الگوریتم گرگ خاکستری ۳) مراحل طراحی کنترل کننده پیشنهادی برای کنترل سرعت خودرو برقی

۳-۱- کنترل کننده 2DOF-PIDF

یکی از ساختارهای پیشرفته کنترل کننده PID، کنترل کننده 2DOF-PIDF است که دارای دو درجه آزادی (2DOF) است. درجه اول به منظور آزادی برای پاسخ به مرجع است و درجه دیگر به منظور رد اغتشاش و بهبود عملکرد در برابر عدم قطعیت پارامترها کاربرد دارد. همچنین از فیلتر در قسمت مشتقگیر مربوط به کنترل کننده PID به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده در برابر نویز کاربرد دارد. به طور کلی کنترل کننده 2DOF-PIDF شامل دو بخش است (Nivolianiti et al., 2025):

۱) بخش 2DOF:

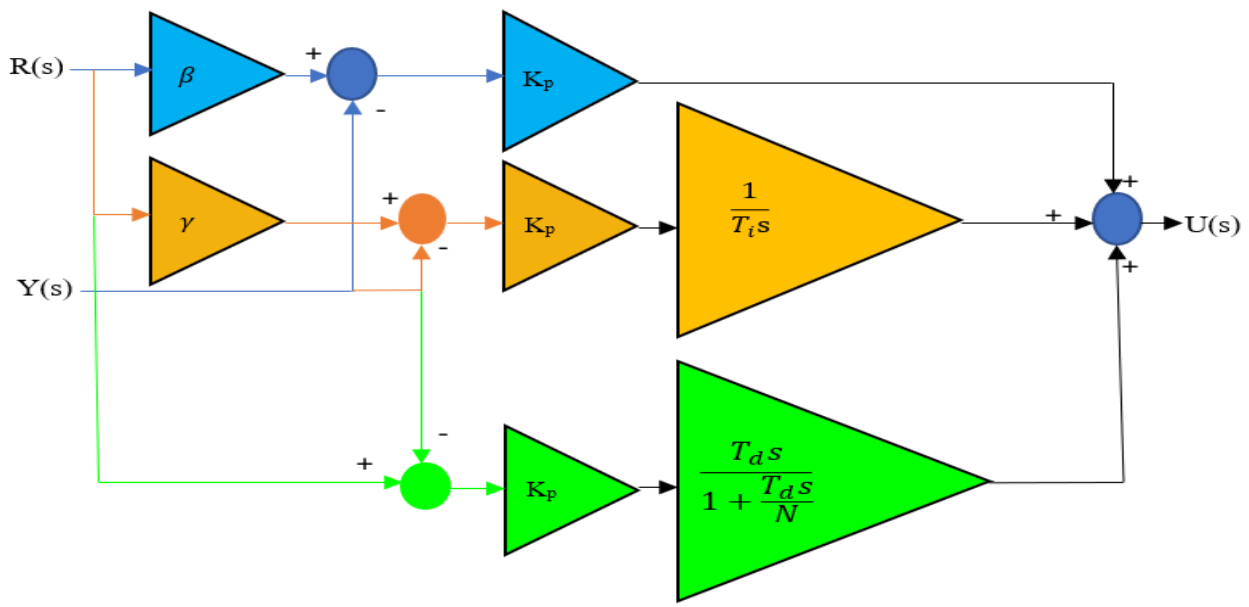
۱-۱)درجه آزادی اول (β) که ضریب تاثیر مرجع روی بخش تناسبی مربوط به کنترل کننده پیشنهادی می باشد.

۱-۲) درجه آزادی دوم (γ) که ضریب تاثیر مرجع روی بخش انتگرال گیر مربوط به کنترل کننده پیشنهادی می باشد.

۲)بخش PIDF:

این بخش شامل بهره تناسبی (K_p)، زمان انتگرال گیری (T_i)، زمان مشتقگیری (T_d) و ضریب فیلتر مشتق (N) است. رابطه کنترل کننده پیشنهادی در حوزه لاپلاس به صورت رابطه (۴) نشان داده شده است. در رابطه (۴)، R(s) مرجع سرعت خودرو برقی است و Y(s) سرعت خودرو برقی می‌باشد. بلوک دیاگرام کنترل کننده پیشنهادی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

$$U(s)=K_p\left[\beta R(s)-Y(s)+\frac{1}{T_i s}(\gamma R(s)-Y(s))+\frac{T_d s}{1+\frac{T_d s}{N}}(R(s)-Y(s))\right] \quad (۴)$$



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده پیشنهادی

به منظور عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی در کنترل سرعت خودرو برقی از الگوریتم گرگ خاکستری برای تنظیم پارامترهای این کنترل کننده بهره گرفته شده است.

۳-۲- الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری از جمله الگوریتم های فراابتکاری که از رفتار اجتماعی در طبیعت الهام گرفته است که این الگوریتم بر اساس ساختار سلسله مراتبی گرگها و مکانیزم شکار انها شکل گرفته است. این الگوریتم به دلیل سرعت همگرایی بالا، سادگی و کارایی بالا در این مقاله به منظور تنظیم پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF به کار برده شده در کنترل سرعت خودرو برقی استفاده شده است (Amiri et al., 2024; Amiri et al., 2021) . در این الگوریتم، گرگهای خاکستری به چهار دسته مختلف تقسیم بندی میشوند:۱)گرگ α(رهبر گروه) ۲)گرگ β (کمک دهنده به رهبر گروه) ۳)گرگ δ : اعضای میانی گروه ۴) ω : اعضای با رتبه پایین (Mirjalili et al., 2014).

بر اساس این الگوریتم، سه گرگ برتر (α,β,δ) موقعیت طعمه (جواب بهینه) را هدایت خواهند کرد و دیگر گرگها (ω) موقعیت خود را نسبت به این گرگها به روز خواهند کرد. ابتدا گرگها به شناسایی طعمه خواهند پرداخت که معادل همان جستجوی اولیه در این الگوریتم می باشد، سپس گرگها به محاصره طعمه با بروز رسانی موقعیت خود خواهند پرداخت و به طعمه حمله خواهند کرد که همان جستجوی موضعی می باشد.

ابتدا طعمه توسط گرگ خاکستری محاصره خواهد شد و فاصله بین موقعیت طعمه و گرگ خاکستری به وسیله رابطه (۵) نشان داده شده است.

$$\vec{D} = |\vec{C}\cdot\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، $\vec{C}$: بردار ضرایب، $\vec{X}_p(t)$: موقعیت طعمه، $\vec{X}(t)$: موقعیت گرگ خاکستری می باشد. در رابطه (۶)، نشان دهنده چگونگی حرکت گرگ به سمت طعمه است و در ان گرگ به سمت موقعیت جدید حرکت میکند

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}\cdot\vec{D} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، $\vec{A}$: بردار ضرایب و $\vec{X}(t+1)$:موقعیت جدید گرگ خاکستری می باشد. بردار ضرایب $\vec{C}$ به وسیله رابطه (۷) محاسبه خواهد شد.

$$\vec{C} = 2\cdot\vec{r}_2 \qquad (۷)$$

در آن $\vec{r}_2$ بردار تصادفی در بازه [0,1] است. بردار ضرایب $\vec{A}$ نیز به وسیله رابطه (۸) نشان داده شده است.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \tag{۸}$$

در رابطه (۸)، $\vec{r}_2$ بردار تصادفی در بازه [0,1] است و $\vec{a}$ از ۲ تا ۰ در طول تکرارها به صورت خطی کاهش پیدا خواهد کرد. کاهش مقدار $\vec{a}$ از طریق رابطه (۹) بدست خواهد آمد.

$$a = 2 - t \cdot \frac{2}{MaxIter} \tag{۹}$$

در رابطه (۹)، $MaxIter$ حداکثر تعداد تکرارها است. موقعیت طعمه (بهینه) نامعلوم است، بنابراین فرض می‌شود که سه گرگ برتر (α, β, δ) بهترین دانش را خواهند داشت. فاصله ها از گرگهای α، βو δ با استفاده از روابط (۱۰)،(۱۱) و (۱۲) بدست خواهد آمد.

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}\right| \tag{۱۰}$$

$$\vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}\right| \tag{۱۱}$$

$$\vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}\right| \tag{۱۲}$$

در معادلات (۱۰)،(۱۱) و (۱۲)، $\vec{D}_\alpha$: فاصله از گرگ α، $\vec{D}_\beta$: فاصله از گرگ β، $\vec{D}_\delta$: فاصله از گرگ δ ، $\vec{X}_\alpha$: موقعیت گرگ α، $\vec{X}_\beta$: موقعیت گرگ βو $\vec{X}_\delta$ موقعیت گرگ δ است. بردارهای $\vec{C}_1$،$\vec{C}_2$ و $\vec{C}_3$ از طریق رابطه (۷) برای هر کدام از گرگهای رهبر به صورت مستقل محاسبه می‌شوند. موقعیت پیشنهادی موقت برای حرکت گرگ جاری به سمت گرگ α از طریق رابطه (۱۳) بدست آمده است (بهترین راه حل). موقعیت پیشنهادی موقت برای حرکت گرگ جاری به سمت گرگ β از طریق رابطه (۱۴) بدست آمده است (دومین راه حل). موقعیت پیشنهادی موقت برای حرکت گرگ جاری به سمت گرگ δ از طریق رابطه (۱۵) بدست آمده است (سومین راه حل).

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \tag{۱۳}$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \tag{۱۴}$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \tag{۱۵}$$

در معادلات (۱۳)،(۱۴) و (۱۵)، بردارهای $\vec{A}_1$،$\vec{A}_2$ و $\vec{A}_3$ از طریق رابطه (۸) برای هر کدام از گرگهای رهبر به صورت مستقل محاسبه می شوند. در نهایت موقعیت گرگ جدید از طریق رابطه (۱۶) بدست خواهد امد.

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \tag{۱۶}$$

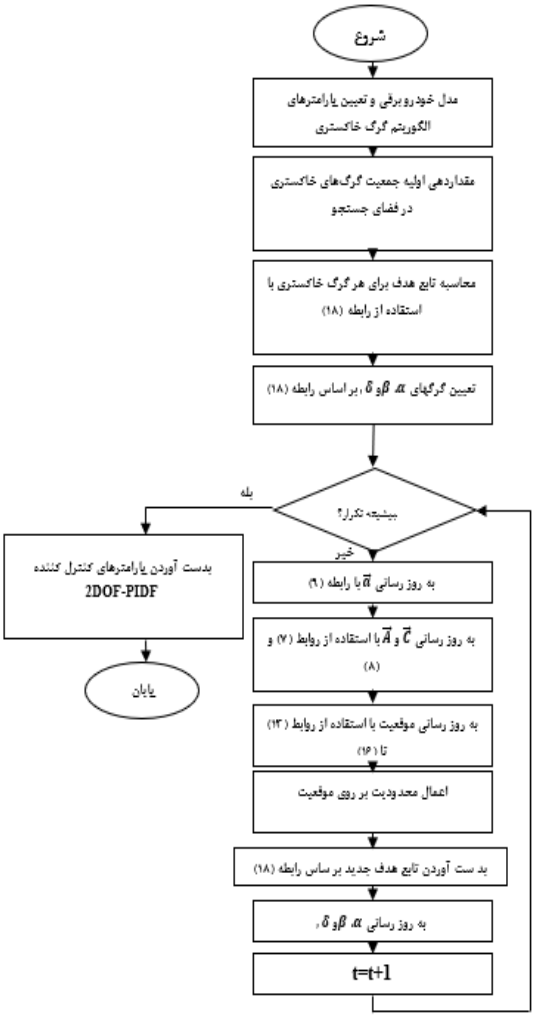
در واقع به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده 2DOF-PIDF در کنترل سرعت در خودرو برقی از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است. در این مقاله، تابع هدف در بهینه سازی ضرایب کنترل کننده 2DOF-PIDF در کنترل سرعت خودرو برقی به صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته شده است. در این تابع، هدف کمینه سازی مجموع خطای وزنی ITAE[1] (خطای مطلق انتگرال زمانی) و مربع سیگنال کنترلی است.

$$\min J = \int_0^{t_{\sim}} \left(r_1 \times t \times |e(t)| + r_2 \times u^2(t)\right) dt \tag{۱۷}$$

در رابطه (۱۷)، r_1=0.95: ضریب وزنی مربوط به ITAE و $e(t)$: خطای ردیابی سرعت، r_2=0.05: ضریب وزنی مربوط به مربع سیگنال کنترلی و $u^2(t)$ مربع سیگنال کنترلی می‌باشد. قیود مربوط به بهینه سازی در رابطه (۱۸) نشان داده است که مطابق آن محدوده مجاز برای پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF نشان داده شده است.

[1] Integral Time Absolute Error

$$
\begin{aligned}
&0.01 \le K_p \le 10 \\
&0.01 \le T_i \le 10 \\
&0.01 \le T_d \le 5 \\
&0 \le \beta \le 5 \\
&0 \le \gamma \le 5 \\
&0 < N < 20
\end{aligned}
\qquad (۱۸)
$$



شکل (۴): فلوچارت تنظیم پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF به کار برده شده در کنترل سرعت خودرو برقی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری

۳-۳-مراحل طراحی کنترل کننده پیشنهادی برای کنترل سرعت خودرو برقی

فلوچارت تنظیم پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF به کار برده شده در کنترل سرعت خودرو برقی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری در شکل (۴) نمایش داده شده است. پارامترهای مربوط به الگوریتم گرگ خاکستری در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای مربوط به الگوریتم گرگ خاکستری

پارامتر	مقدار
تعدادگرگ ها(N)	۵۰
تعداد تکرارها(T_{max})	۱۰۰
a	۲→۰
$\vec{r}_1, \vec{r}_2$	[۰،۱]
$\vec{C}$	[۰،۲]

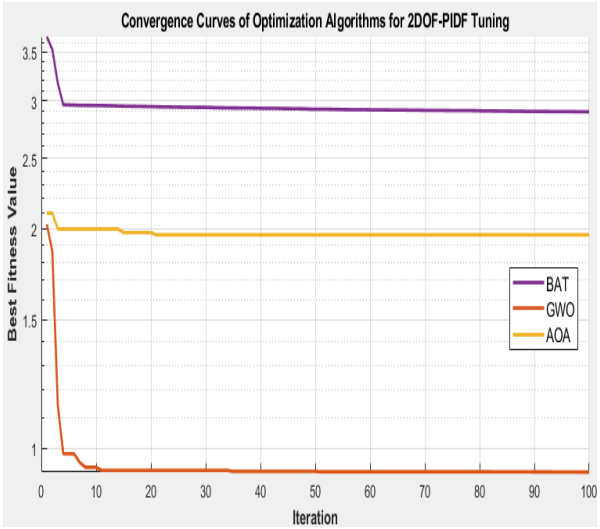
۴-شبیه سازی:

سناریو ۱: سرعت مرجع خودرو برقی در لحظه t=0 به میزان ۱ m/sec تغییر می‌کند. ابتدا از الگوریتم‌های مختلف مانند الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)، الگوریتم خفاش(BAT) و الگوریتم عقاب (AOA) برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF به کار برده شده در کنترل سرعت خودرو برقی استفاده شده است. نحوه همگرایی الگوریتمهای مختلف در بهینه سازی پارامترهای 2DOF-PIDF در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق شکل (۵)، الگوریتم پیشنهادی (GWO) در سریعتر همگرا شده است (تکرار ۱۱). الگوریتم خفاش(BAT) در تکرار ۵۰ همگرا شده است و الگوریتم عقاب (AOA) در تکرار ۲۲ همگرا شده است. همچنین الگوریتم پیشنهادی (GWO) در کمینه سازی تابع هدف عملکرد بهتری داشته است و مقدار تابع هدف با ۰.۹۲۶۶ است. مقدار تابع هدف با استفاده از الگوریتمهای خفاش(BAT) و عقاب (AOA) به ترتیب ۲.۸۹۷۵ و ۱.۹۶۲۷ است. مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل (۶) ، سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کنندهای (2DOF-PIDF-GWO)، Arc tan PID، PID و NL-PID نشان داده شده است. در شکل (۷)، نمایش دهنده سیگنال کنترلی

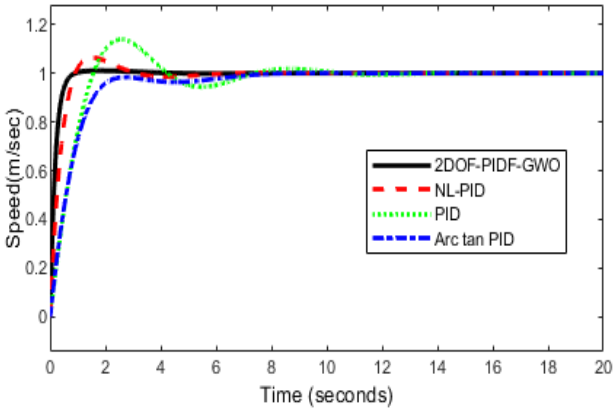
اعمالی بر اساس کنترل کنندهای (2DOF-PIDF-GWO)، Arc tan PID، PID و NL-PID به خودرو برقی می‌باشد. مطابق شکل (۶)، کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) دارای کمترین بیشینه فراجهش (۰) می‌باشد. همچنین دارای کمترین زمان نشست (۰.۹۲ ثانیه) می‌باشد. بر اساس شکل (۷)، کنترل کننده پیشنهادی دارای کمترین بیشینه دامنه سیگنال کنترلی به میزان۳.۷۵ است. نتایج کامل سناریو (۱) بر اساس کنترل کننده های مختلف در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۲): مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده 2DOF-PIDF با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)

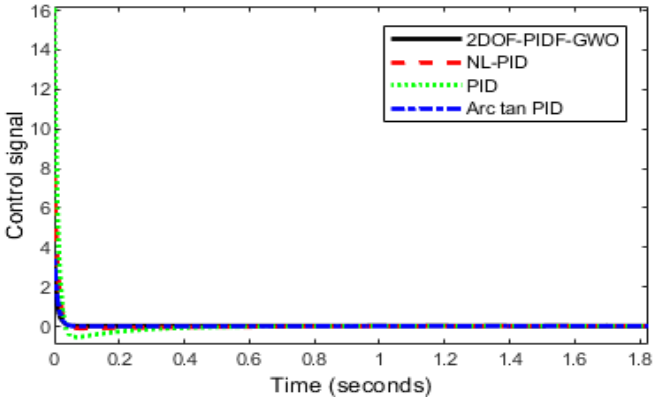
پارامتر	مقدار
K_p	۶
T_i	۱.۶۶۶۶
T_d	۲.۴۷۰۸
β	۰.۳۷۱۳
γ	۲
N	۱۵



شکل (۵): نحوه همگرایی الگوریتمهای مختلف در بهینه سازی پارامترهای 2DOF-PIDF



شکل (۶): سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کنندهای مختلف، سناریو ۱



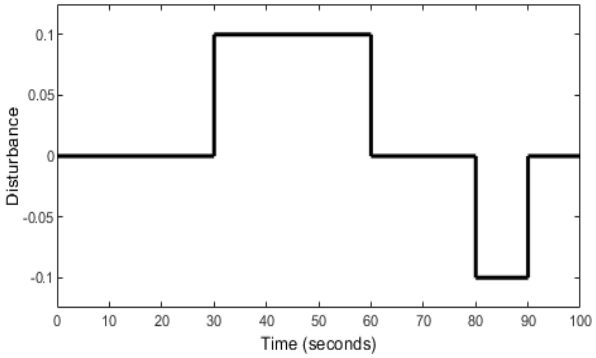
شکل (۷): سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای مختلف به خودرو برقی، سناریو ۱

جدول (۳):نتایج کامل سناریو (۱) بر اساس کنترل کننده های مختلف

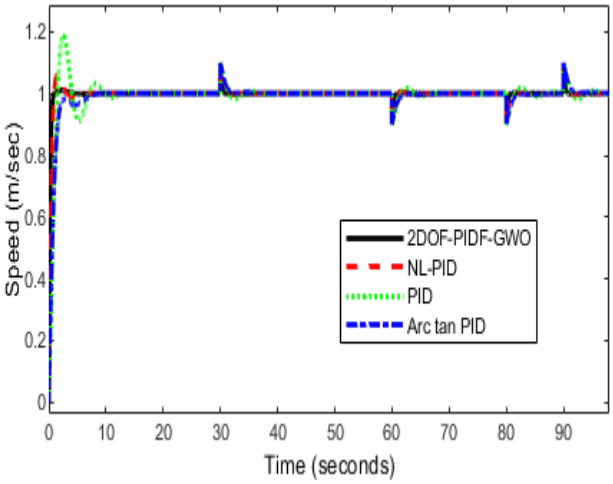
کنترل کننده ها	بیشینه فراجهش (m/sec)	زمان نشست (ثانیه)	حداکثر دامنه تلاش کنترلی
2DOF-PIDF-GWO	۰	۰.۹۲	۳.۷۵
NL-PID	۰.۰۴	۲.۳۶۲	۸.۲۳
PID	۰.۱۵	۱۳.۲۱	۱۶
Arc tan PID	۰	۹.۵۶	۴.۵۸

سناریو ۲: سرعت مرجع خودرو برقی در لحظه t=0 به میزان ۱ m/sec تغییر می کند. شکل (۸) نشان دهنده اغتشاش وارد بر خودرو برقی می باشد. در شکل (۹) ، سرعت خودرو برقی بر اساس

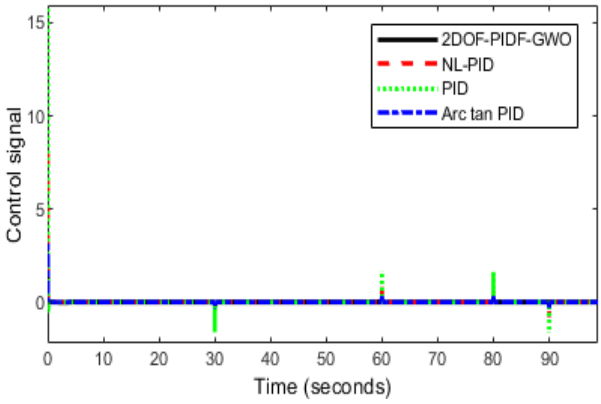
کنترل کنندهای (2DOF-PIDF-GWO)، Arc tan PID، PID و NL-PID نشان داده شده است. شکل های (۱۰) و (۱۱)، نمایش دهنده سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای (2DOF-PIDF-GWO)، Arc tan PID، PID و NL-PID به خودرو برقی می باشد. مطابق شکل (۹)، کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) دارای کمترین بیشینه فراجهش (۰) می باشد. همچنین دارای کمترین زمان نشست (۰.۹۲ ثانیه) می باشد. و توانسته عملکرد مناسبی در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم داشته باشد. بر اساس شکل (۱۱)، کنترل کننده پیشنهادی دارای کمترین بیشینه دامنه سیگنال کنترلی به میزان ۳.۷۵ است. نتایج کامل سناریو (۲) بر اساس کنترل کننده های مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است.



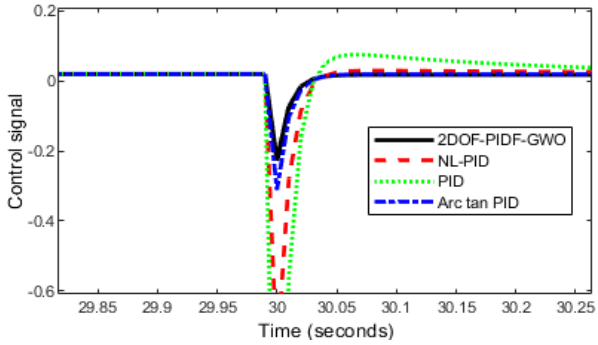
شکل (۸): اغتشاش وارد بر خودرو برقی، سناریو (۲)



شکل (۹): سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کنندهای مختلف، سناریو ۲



شکل (۱۰): سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای مختلف به خودرو برقی، سناریو ۲



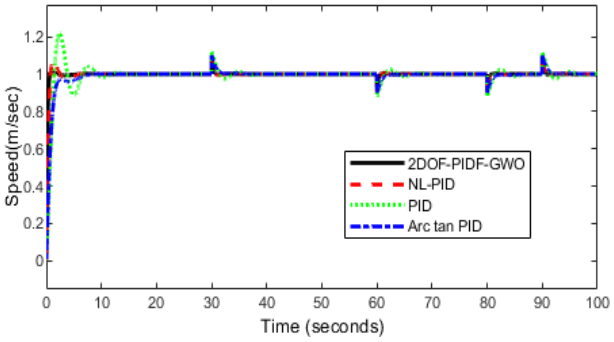
شکل (۱۱): سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای مختلف به خودرو برقی، سناریو ۲

جدول (۴):نتایج کامل سناریو (۲) بر اساس کنترل کننده های مختلف

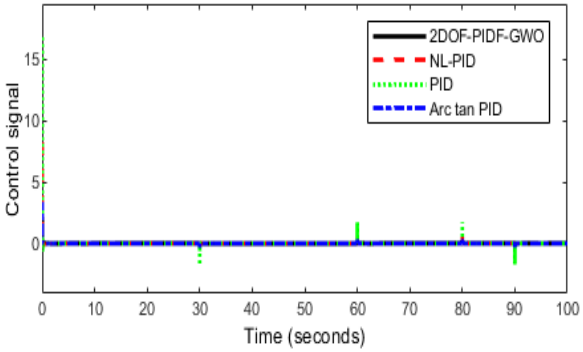
کنترل کنند ها	بیشینه فراجهش (m/sec)	زمان نشست (ثانیه)	حداکثر دامنه تلاش کنترلی
2DOF-PIDF-GWO	۰	۰.۹۲	۳.۷۵
NL-PID	۰.۰۴	۲.۳۶۲	۸.۲۳
PID	۰.۱۵	۱۳.۲۱	۱۶
Arc tan PID	۰	۹.۵۶	۴.۵۸

سناریو ۳: در این سناریو، عدم قطعیت در همه‌ی پارامترهای مربوط به خودرو برقی به میزان ۳۰٪+ در نظر گرفته شده است.سرعت مرجع خودرو برقی در لحظه t=0 به میزان ۱ m/sec تغییر می کند. شکل (۸) نشان دهنده اغتشاش وارد بر خودرو برقی

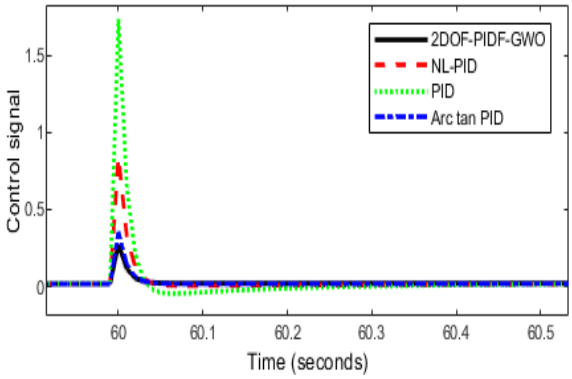
می باشد. در شکل (۱۲) ، سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کنندهای (2DOF-PIDF-GWO)، Arc tan PID، PID و NL-PID نشان داده شده است. شکل های (۱۳) و (۱۴)، نمایش دهنده سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای (2DOF-PIDF-GWO)، Arc tan PID، PID و NL-PID به خودرو برقی می باشد. مطابق شکل (۱۲)، کنترل کننده پیشنهادی (2DOF-PIDF-GWO) دارای کمترین دامنه بیشینه فراجهش (۰) می‌باشد. همچنین دارای کمترین زمان نشست (۰.۹۸ ثانیه) می‌باشد. و توانسته عملکرد مناسبی در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم وارد بر سیستم داشته باشد. بر اساس شکل (۱۳)، کنترل کننده پیشنهادی دارای کمترین بیشینه دامنه سیگنال کنترلی به میزان ۳.۸۲ است. نتایج کامل سناریو (۳) بر اساس کنترل کننده های مختلف در جدول (۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): سرعت خودرو برقی بر اساس کنترل کنندهای مختلف، سناریو ۳



شکل (۱۳): سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای مختلف به خودرو برقی، سناریو ۳



شکل (۱۴): سیگنال کنترلی اعمالی بر اساس کنترل کنندهای مختلف به خودرو برقی، سناریو ۳

جدول (۵):نتایج کامل سناریو (۳) بر اساس کنترل کننده های مختلف

کنترل کنند ها	بیشینه فراجهش (m/sec)	زمان نشست (ثانیه)	حداکثر دامنه تلاش کنترلی
2DOF-PIDF-GWO	۰	۰.۹۸	۳.۸۲
NL-PID	۰.۰۷	۴.۲۱	۶.۲۳
PID	۰.۱۵	۱۳.۲۱	۱۸.۴۱۶
Arc tan PID	۰	۹.۵۶	۵.۲۱

۵-نتیجه گیری:

با توجه به اهمیت روز افزون خودرو برقی، تحقیق و توسعه در مورد آن اهمیت زیادی دارد. برای کنترل موثر سرعت خودرو برقی، طراحی یک کنترل کننده دقیق و با قابلیت اطمینان بالا لازم است. در این مقاله، کنترل کننده 2DOF-PIDF برای کنترل سرعت خودرو برقی به دلیل عملکرد مناسب در ردیابی سرعت، مقاوم بودن در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم طراحی شد و برای بهبود عملکرد کنترل کننده 2DOF-PIDF در کنترل سرعت خودرو برقی از الگوریتم گرگ خاکستری برای تنظیم پارامترهای آن استفاده شد. الگوریتم پیشنهادی دارای ساختار ساده و سرعت همگرایی بالا می باشد. به منظور بررسی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی در چندین سناریو با کنترل کننده های Arc tan PID، PID و NL-PID مقایسه شده است. مطابق نتایج، کنترل کننده 2DOF-PIDF بهبود یافته نسبت به سایر کنترل

کننده ها، عملکرد مطلوبی دارد و توانسته سرعت خودرو برقی را سریع ردیابی کند، همچنین از لحاظ شاخص هایی مانند بیشینه فراجهش و زمان نشست انحرافات عملکرد بهتری داشته باشد و این دو شاخص را به میزان ۱۰۰٪ و ۴۰٪ درصد به ترتیب بهبود دهد.

مراجع

Abdelwanis, M. I. (2025). Optimizing the performance of six-phase induction motor-powered electric vehicles with fuzzy-PID and DTC. Neural Computing and Applications, 37(16), 9721-9734.

Alnaib, I. I., & Alsammak, A. N. (2025). Optimization of fractional PI controller parameters for enhanced induction motor speed control via indirect field-oriented control. Electrical Engineering & Electromechanics, (1), 3-7.

Amiri, F., Moradi, M. H., & Eskandari, M. (2024). Suppression of low-frequency oscillations in hybrid/multi microgrid systems with an improved model predictive controller. IET Renewable Power Generation, 18(9-10), 1691-1709.

Amiri, F., & Moradi, M. H. (2023). Design of a new control method for dynamic control of the two-area microgrid: F. Amiri and MH Moradi. Soft Computing, 27(10), 6727-6747.

Baidya, D., Dhopte, S., & Bhattacharjee, M. (2023). Sensing system assisted novel PID controller for efficient speed control of DC motors in electric vehicles. IEEE Sensors Letters, 7(1), 1-4.

Chakraborty, S., Bhattacharjee, D., Basu, P., & Dan, P. (2025). A systematic review on speed control modelling for electric vehicle. Journal of Control and Decision, 12(2), 167-194.

Chantoufi, A., Derouich, A., El Ouanjli, N., Mahfoud, S., & El Idrissi, A. (2025). Improved direct torque control of doubly fed induction motor in electric vehicles using fuzzy logic controllers. E-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 11, 100882.

Dantas, A. D. O. D. S., Dantas, A. F. O. D. A., Campos, J. T. L., de Almeida Neto, D. L., & Dórea, C. E. T. (2018). PID control for electric vehicles subject to control and speed signal constraints. Journal of Control Science and Engineering, 2018(1), 6259049.

Daisy, M., Aliabadi, M. H., Javadi, S., & Naimi, H. M. (2023). Double phase fault location in microgrids with the presence of electric vehicles and distributed parameters line model. Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, 12(1), 11-21.

George, M. A., Kamat, D. V., & Kurian, C. P. (2021). Electronically tunable ACO based fuzzy FOPID controller for effective speed control of electric vehicle. IEEE Access, 9, 73392-73412.

Gheisarnejad, M., Mirzavand, G., Ardeshiri, R. R., Andresen, B., & Khooban, M. H. (2022). Adaptive speed control of electric vehicles based on multi-agent fuzzy Q-learning. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 7(1), 102-110.

Intidam, A., El Fadil, H., Housny, H., El Idrissi, Z., Lassioui, A., Nady, S., & Jabal Laafou, A. (2023). Development and experimental implementation of optimized PI-ANFIS controller for speed control of a brushless DC motor in fuel cell electric vehicles. Energies, 16(11), 4395.

Jassim, A. A., Karam, E., & Ali, M. E. (2023). Design of optimal PID controller for electric vehicle based on particle swarm and multi-verse optimization algorithms. Engineering and Technology Journal, 41(2), 1-10.

Kesseler, M., & Messner, T. (2026). Disconnect Systems in Battery Electric Vehicles. MTZ worldwide, 87(1), 74-79.

Kosuru, V. S. R., & Kavasseri Venkitaraman, A. (2023). Trends and challenges in electric vehicle motor drivelines-A review. International journal of electrical and computer engineering systems, 14(4), 485-495.

Kumar, V., Rana, K. P. S., & Mishra, P. (2016). Robust speed control of hybrid electric vehicle using fractional order fuzzy PD and PI controllers in cascade control loop. Journal of the Franklin Institute, 353(8), 1713-1741.

Ma, L., Cheng, C., Guo, J., Shi, B., Ding, S., & Mei, K. (2023). Direct yaw-moment control of electric vehicles based on adaptive sliding mode. Math. Biosci. Eng, 20(7), 13334-13355.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. Advances in engineering software, 69, 46-61.

Naqvi, S. S. A., Jamil, H., Iqbal, N., Khan, S., Lee, D. I., Park, Y. C., & Kim, D. H. (2024). Multi-objective optimization of PI controller for BLDC motor speed control and energy saving in Electric Vehicles: A constrained swarm-based approach. Energy Reports, 12, 402-417.

Nivolianti, E., Karnavas, Y. L., Becker, F., Belkhier, Y., & Charpentier, J. F. (2025). Hybrid AC Shipboard Microgrid Time Delayed LFC and AVR Controllers Tuning Through Gazelle Optimization Algorithm and Real-Time HIL Implementation. IEEE Journal of Oceanic Engineering.

Oleiwi, B. K., & Mohamed, M. J. (2024). Optimal design of linear and nonlinear PID controllers for speed control of an electric vehicle. Journal of Intelligent Systems, 33(1), 20240028.

Rind, S. J., Jamil, M., & Amjad, A. (2018, September). Electric motors and speed sensorless control for electric and hybrid electric vehicles: A review. In 2018 53rd

International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (pp. 1-6). IEEE.

Shaik, Z. B., & Peddakrishna, S. (2025). Design and implementation of electric vehicle with autonomous motion and steering control system using single board computer and sensors. Results in Engineering, 25, 103995.

Subbarao, M., Dasari, K., Duvvuri, S. S., Prasad, K. R. K. V., Narendra, B. K., & Krishna, V. M. (2024). Design, control and performance comparison of PI and ANFIS controllers for BLDC motor driven electric vehicles. Measurement: Sensors, 31, 101001.

Turcian, D., & Dolga, V. (2020, December). Intelligent speed control system for electric vehicle. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 997, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.

Veysi, M., Aghaei, J., Shasadeghi, M., Razzaghi, R., Bahrani, B., & Ryan, D. J. (2020). Energy-efficient speed control of electric vehicles: Linear matrix inequality approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(10), 10469-10483.

WU, B., & FU, P. (2022). Rotating Speed Control of Electric Vehicle During Gear Shift Process Based on Fuzzy Fractional PID. Journal of Beijing University of Technology, 48(10), 1069-1077.