



## کنترل آشوب در سیستم‌های چرخ دنده‌ی صنعتی به کمک کنترل کننده فازی بهینه شده

### با الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته

زینب معصومی<sup>(۱)</sup> مهدی یعقوبی\*<sup>(۲)</sup> حمید رضا کبروی<sup>(۳)</sup>

(۱) گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(۲) گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران\*

(۳) گروه مهندسی پزشکی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

#### چکیده

آشوب پدیده‌ای است که در سامانه‌های دینامیکی غیرخطی مورد توجه قرار می‌گیرد. یکی از سامانه‌ها با دینامیک غیر خطی سیستم چرخ دنده است که در برخی از مواقع از خود رفتار آشوبی نشان می‌دهد. در تحقیقات گذشته برای کنترل رفتار آشوبی این سیستم از کنترل کننده مد لغزشی و کنترل کننده پیش‌بین برای این سیستم استفاده شده است که مشکل آن پیچیدگی محاسباتی و عدم وجود یک کنترل کننده هوشمند است. با توجه به تحقیقات گذشته، کنترل کننده فازی ترکیب شده با الگوریتم فرا ابتکاری که بتواند در زمان سریع و با خطای کم رفتار آشوبی سیستم چرخ دنده را کنترل نماید، ارائه نشده است. در این مقاله کنترل رفتار آشوبی این سیستم به کمک یک روش جدید مورد بررسی قرار گرفته است. برای کنترل آشوبی این سیستم، یک کنترل کننده فازی تنظیم شده با الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته پیشنهاد شده است. مزیت این کنترل کننده ویژگی هوشمند بودن آن است که بر خلاف روش‌های مد لغزشی و کنترل پیش‌بین می‌تواند با استفاده از منطق فازی رفتار آشوبی این سیستم را به طور هوشمند کنترل کند. الگوریتم گرگ خاکستری توانایی جستجوی محلی و سراسری ضعیفی دارد. بنابراین در این مقاله به منظور بهبود توانایی جستجوی محلی و سراسری الگوریتم گرگ خاکستری، از الگوریتم جستجوی خزنده استفاده می‌شود. سپس از این الگوریتم در تنظیم پارامترهای توابع عضویت کنترل کننده فازی اعمال شده به سیستم چرخ دنده استفاده شده است. از نظر معیارهای انتگرال قدر مطلق خطا و انتگرال قدر مربعات خطا به ترتیب روش پیشنهادی برابر با ۰/۲۴۳۱ و ۰/۴۲۵، روش کنترل مد لغزشی ترمینال سریع تطبیقی برابر با ۰/۳۱۴۹، ۰/۱۳۶۳، کنترل کننده مد لغزشی معمولی ۰/۵۶۲۳ و ۰/۱۹۴۶ شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب به خوبی نشان می‌دهد که استراتژی کنترلی ترکیبی و بهینه‌ی طراحی شده توانسته است که ضمن مقابله با آشوب، متغیرهای حالت سامانه‌ی چرخ دنده را در زمان مناسبی پس از اعمال ورودی، با وجود اغتشاش خارجی و نویز در سیستم، به وضعیت و مکان مشخص برساند.

کلمات کلیدی: سیستم چرخ دنده، کنترل آشوب، کنترل کننده فازی، الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته

\*عهدده دار مکاتبات:

مهدی یعقوبی

نشانی: گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

پست الکترونیکی: [yaghoobi@mshdiau.ac.ir](mailto:yaghoobi@mshdiau.ac.ir)

سیستم‌های آشوبی، سیستم‌هایی هستند که به شرایط اولیه خیلی حساس می‌باشند. این ویژگی منجر می‌شود که پیش‌بینی رفتار آن‌ها مشکل باشد. در سال‌های اخیر، کنترل سامانه‌های مکانیکی که رفتار آشوبناک در آن‌ها وجود دارد، در بسیاری از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. از جمله‌ی این سامانه‌ها، ربات دو درجه آزادی، ماشین دورانی، سامانه‌ی سروونوماتیک، سامانه‌ی تعلیق خودرو، سامانه‌ی تعلیق میدان مغناطیسی و سامانه‌های خودگردان می‌باشند [۱]. اخیراً برای حذف آشوب در برخی از سامانه‌های مکانیکی، روش‌های کنترلی متنوعی طراحی شده است. یکی از این سامانه‌ها، سامانه‌ی انتقال چرخ دنده می‌باشد. سیستم‌های چرخ دنده در صنایع مختلف ماشینی و سیستم‌های انتقال توان کاربرد دارند [۲]. تحقیقات زیادی برای تحلیل دینامیک‌های چرخ دنده انجام شده است. در این تحقیقات نشان داده شده است که رفتارهای آشوبی در سیستم‌های چرخ دنده وجود دارند [۲].

ارتعاشات موجود در سامانه‌های چرخ دنده به طور مستقیم بر عملکرد سامانه تأثیرگذار هستند. درباره‌ی این حوزه‌ی پژوهشی کارهای زیادی صورت گرفته است [۳]. نتایج به دست آمده بیان‌گر رفتار آشوبناک در بازه‌های خاصی از ارتعاش می‌باشد. این نوع از ارتعاشات، شدید بوده و باعث صدمه و نیز ایجاد صدای مزاحم در چرخ دنده می‌گردد. از این‌رو، بررسی و تحلیل ارتعاشات سامانه‌های چرخ دنده‌ای و تأثیر عوامل مختلف بر آن، کمک زیادی در یافتن راه‌هایی برای کاهش یا از بین بردن صداهای مزاحم ناشی از آن و در نتیجه بالا بردن کیفیت چرخ دنده‌ها خواهد کرد.

سامانه‌ی چرخ دنده تحت تأثیر عواملی غیرخطی و متغیر با زمان، لقی، خطاهای انتقال چرخ دنده، اصطکاک بین سطوح دندانه‌ها و بسیاری از عوامل دیگر، یک سامانه‌ی ارتعاشی غیرخطی است که می‌تواند بسیاری از پدیده‌های غیرخطی را به نمایش بگذارد. با پیشرفت دینامیک غیرخطی، مشخصه‌های غیرخطی سامانه از قبیل پاسخ‌های غیرپریودیک، دو شاخگی و آشوب مورد توجه بیشتری قرار گرفت [۴]. در پژوهش انجام گرفته توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، دو شاخگی و آشوب و بزرگترین نمایی لیاپانوف سامانه‌ی چرخ دنده با اصطکاک لغزشی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و پارامترهای بحرانی آن‌ها شناسایی شد [۵]. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که اصطکاک نقش بسزایی در رفتار دینامیکی سامانه‌ی چرخ دنده دارد. آقایان فرشیدیان‌فر و سقفی در سال ۲۰۱۴ توانستند مدل دینامیکی غیرخطی متغیر با زمان سامانه‌ی چرخ دنده را به دست آورند [۶]. وان<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک تحلیل سامانه‌ای برای رفتار دینامیکی سامانه‌ی چرخ دنده با یک درجه‌ی آزادی با تعلیق غیرخطی و بدون تعلیق غیرخطی ارائه داده‌اند [۷]. همچنین، شیهوآ<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ توانستند یک مدل هشت درجه آزادی برای سامانه‌ی غیرخطی چرخ دنده که شامل لقی، خطای انتقال، جاذبه و گشتاور ورودی/خروجی است، ارائه دهند [۲۸]. چن و همکاران در ۲۰۱۹ برای یک سیستم چرخ دنده مشخصه‌های دینامیک غیر خطی را تحت اثرات دمایی بر روی آن مطالعه نموده و رفتار آشوبی آن را کنترل نمودند [۹]. شنگ و همکاران در ۲۰۱۸ برای یک سیستم چرخ دنده، دینامیک غیر خطی نیمه مستقیم با چند درجه آزادی در برش زغال سنگ تحلیل نموده و رفتار آشوبی را در آن کنترل نمودند [۱۰]. زیا و همکاران در

<sup>۱</sup> Wan

<sup>۲</sup> Shihua

۲۰۱۸ رفتار آشوبی و دوشاخگی را برای یک سیستم جفت چرخ دنده با اصطکاک را مطالعه نمودند [۱۱]. زیا و همکاران در ۲۰۱۸ بررسی کنترل دوشاخگی و آشوبی را برای یک سیستم دنده جفت چرخ دنده با و بدون تعلیق غیرخطی مطالعه نمودند [۱۲]. آن‌ها یک مدل دینامیکی غیرخطی از یک سیستم چرخ دنده جفت چرخ دنده پیشنهاد نمودند که واکنش برگشتی دنده، خطای انتقال استاتیک، سختی مش بندی و غیره را در نظر گرفته است. آراین و تقوی در ۲۰۲۱ تجزیه و تحلیل دینامیک آشوب و یک کنترل کننده آشوب برای سیستم‌های انتقال چرخ دنده با هرزگرد انجام دادند [۱۳]. خانیکی و همکاران در ۲۰۲۲ در [۱۴] همزمانسازی و کنترل آشوب را در سیستم چرخ دنده به کمک کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع غیر تکین تطبیقی مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل دوشاخگی و آشوبی یک سیستم جفت چرخ دنده با واکنش برگشتی چرخ دنده فرکتال بوسیله هوانگ و همکاران در ۲۰۲۰ مطالعه شد [۱۵]. در این مرجع بر مدل‌سازی برگشت دنده تاکید شد. در همین حال، نیروی اصطکاک لغزشی گرفته شد. کنترل آشوب در سیستم انتقال دنده با استفاده از کنترلرهای پیش بین تعمیم یافته ( $GPC^3$ ) و مد لغزشی ( $SMC^4$ ) بوسیله قراقوزلو و شاه منصوریان در ۲۰۲۲ مطالعه شد [۱۶]. ولدییگی و ابطحی در ۲۰۲۲ تحلیل و کنترل در سیستم چرخ دنده غیرخطی را با استفاده از کنترل مد لغزشی پیش بین مورد مطالعه قرار دادند [۱۷]. در مورد استفاده از کنترل کننده فازی برای کنترل سیستم چرخ دنده توجه کمی شده است که می‌توان به تحقیق انجام شده توسط لیو و همکاران در ۲۰۱۸ اشاره نمود [۳۸].

ثقفی و همکاران در ۲۰۱۷ ارتعاشات در سیستم دینامیکی چرخ‌دنده - یاتاقان را به کمک کنترل  $H_\infty$  کنترل نمودند [۱۹]. ثقفی و فرشیدیان فر در ۱۳۹۳ دوشاخه شدگی و آشوب در سیستم انتقال چرخ دنده را مطالعه نمودند [۲۰]. آراین و همکاران در ۲۰۲۱ از کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل رفتار آشوبی و ارتعاشات در سیستم انتقال قدرت چرخ‌دنده استفاده نمودند [۲۱]. دلاوری و محدث زاده در ۲۰۱۷ از کنترل مود لغزشی ترمینال تطبیقی با عامل غیر خطی در ورودی کنترلی برای کنترل آشوب در سیستم چرخ دنده استفاده نمودند [۲۲].

با توجه به تحقیقات گذشته، کنترل کننده فازی ترکیب شده با الگوریتم فرا ابتکاری که بتواند در زمان سریع و با خطای کم رفتار آشوبی سیستم چرخ دنده را کنترل نماید، ارائه نشده است. بنابراین در این مقاله، یک کنترل کننده فازی PID بهینه برای مقابله با رفتار آشوبی سیستم پیشنهاد می‌شود. این کنترل کننده مزایای هوشمند بودن فازی و ساده بودن ساختار PID را با هم در اختیار دارد. در کنترل کننده پیشنهادی، از الگوریتم گرگ خاکستری ترکیب شده با جستجوی خزنده به منظور بهینه سازی توابع عضویت فازی و پارامترهای کنترل کننده استفاده می‌شود. انتظار می‌رود که روش پیشنهادی بتواند در مقایسه با روش‌های مشابه خود عملکرد بهتری از نظر خطای تعقیب داشته باشد.

<sup>۳</sup> Generalized predictive control

<sup>۴</sup> Sliding mode control

سازمان دهی این مقاله به این صورت است. در بخش دوم سیستم چرخ دنده معرفی می‌شود. در بخش سوم الگوریتم گرگ خاکستری و نوع توسعه یافته آن بیان می‌شود. در بخش چهارم نحوه طراحی کنترل کننده توضیح داده می‌شود. در بخش پنجم شبیه سازی‌ها و نتایج ارائه می‌شود. در بخش ششم نتیجه گیری آورده می‌شود.

## ۲- سیستم چرخ دنده

چرخ دنده وسیله‌ای است برای انتقال توان دورانی از یک محور به محور دیگر که طی آن مقدار گشتاور و یا سرعت دورانی و یا جهت چرخش و یا راستای محوری می‌تواند تغییر کند. چرخ دنده‌ها در وسایل مختلف مکانیکی استفاده می‌شوند. این قطعات کوچک و بزرگ در دستگاه‌ها و ماشین‌ها کارهای متفاوتی انجام می‌دهند که مهم‌ترین آن کاهش دنده در تجهیزات موتوری می‌باشد. نقش چرخ دنده‌ها در صنعت کلیدی است، زیرا در بیشتر موارد یک موتور کوچک دوار با سرعت زیاد توانایی تأمین توان کافی برای وسیله را دارد اما قادر به تولید گشتاور کافی نیست. کاربرد دیگر چرخ دنده‌ها، تنظیم جهت چرخش است [۲۳].

یک سامانه‌ی چرخ دنده‌ای عموماً توسط دو دیسک که بیانگر اینرسی دو چرخ دنده می‌باشند، مدل می‌شود. یک سامانه‌ی میراکنده و فنر نیز درگیری دو چرخ دنده را توصیف می‌نماید.

در این مدل، چرخ دنده‌های  $a$  و  $b$  با شعاع‌های  $r_a$  و  $r_b$  نشان داده می‌شوند.  $I_a$  و  $I_b$  بیانگر ممان اینرسی دو چرخ دنده،  $k_m$  و  $c_m$  نیز سختی درگیری و ضریب میرایی معادل جفت چرخ دنده‌ی درگیر هستند. گشتاورهای احتمالی بر چرخ دنده‌ها،  $T_a$  و  $T_b$  می‌باشند. تابع پس‌زنی  $f_h$  نیز برای بیان لقی و همچنین جابه‌جایی  $e(t)$  به منظور ارائه‌ی خطای انتقال استاتیکی سامانه، تعریف می‌شوند. در [۲۴] معادلات چرخ دنده در فرم فضای حالت داده شده است.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\varepsilon\mu x_2 + (0.1667x_1 - 0.1667x_1^3) \\ + \varepsilon(f_m + f_e \Omega_e^2 \cos(\Omega_e \tau + \phi_e)) \end{cases} \quad (1)$$

مدل فضای حالت **Error! Reference source not found.** معادله‌ی آشوبناک سیستم چرخ دنده‌ی مورد تحقیق در این پژوهش است. در [۲۴] نشان داده شده است در صورتیکه پارامترهای زیر انتخاب شوند، سیستم از خود رفتاری آشوبی نشان می‌دهد.

$$\varepsilon = 0.01, f_m = 1, \mu = 9, \Omega_e = 0.5, f_e = 30 \quad (2)$$

## ۳- روش پیشنهادی

در این بخش ابتدا الگوریتم گرگ خاکستری پایه معرفی شده و سپس الگوریتم جستجوی خزنده بیان می‌شود. در نهایت ترکیب این دو الگوریتم پیشنهاد می‌شود.

### ۳-۱- الگوریتم گرگ خاکستری

گرگ‌های خاکستری در راس زنجیره غذایی هستند و زندگی اجتماعی دارند. در هر گله ۴ رتبه اصلی به نام‌های گرگ‌های آلفا، بتا، دلتا و امگا وجود دارد [۲۵]:

فرایند شکار گرگ‌های خاکستری شامل ۳ فاز اصلی است:

۱- مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن

۲- نزدیک شدن، احاطه کردن (حلقه زدن) به دور شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند

۳- حمله به شکار

مراحل حل یک مساله با این روش طی مراحل زیر صورت می‌گیرد.

الف- مدل سازی ساختار سلسله مراتبی (هرم قدرت)

بهینه سازی با استفاده از گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا انجام می‌شود. یک گرگ به عنوان آلفا هدایت کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شود و یک گرگ بتا و دلتا نیز مشارکت دارند و بقیه گرگ‌ها به عنوان دنبال کننده آن‌ها محسوب می‌شوند.

ب- مدل سازی فرایند احاطه کردن شکار

دو رابطه مدل کننده برای احاطه شکار در این الگوریتم وجود دارد:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad \vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (3)$$

که در آن  $\vec{C}$  ,  $\vec{A}$  بردارهای ضرایب که ابعاد آن‌ها به اندازه تعداد تکرار است،  $\vec{X}_p$  بردار موقعیت مکانی شکار و  $\vec{X}$  بردار موقعیت مکانی هر یک از گرگ‌ها است و  $t$  شماره تکرار است.

دو بردار  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}, \vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (4)$$

که در آن مولفه‌های  $\vec{a}$  به صورت خطی و در طی تکرارهای متوالی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابند و  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  بردارهای تصادفی در بازه  $[0,1]$  هستند.

ج- مدل سازی فرایند hunting

گرگ‌های خاکستری توانایی تخمین موقعیت شکار را دارند. برای مدل سازی ریاضی این فرایند به ترتیب زیر عمل می‌شود:

در جستجوی اولیه هیچ ایده ای در مورد موقعیت شکار نداریم. فرض می شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا دانش اول بهتری در خصوص موقعیت شکار (نقطه بهینه جواب) دارند. موقعیت این سه کاندیدای جواب به صورت زیر تعیین می شود:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (5)$$

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

در معادله (5)، گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا بر اساس بهترین مقدار تابع هزینه که از آن‌ها بدست آمده است، به روزرسانی می شوند. گرگی بهترین تابع هزینه را بدست آورده، به عنوان گرگ آلفا انتخاب می شود. سپس مقایسه‌ای میان بقیه گرگ‌ها انجام می شود و گرگ بعدی که بهترین تابع هزینه را میان مابقی گرگ‌ها بدست آورده باشد، به عنوان گرگ بتا انتخاب می شود. برای گرگ بتا نیز به طور مشابه مقایسه میان مابقی گرگ‌ها انجام شده و گرگی که تابع هزینه بهتری بدست آورده باشد، به عنوان گرگ دلتا انتخاب می شود. مابقی گرگ‌ها به عنوان گرگ‌های امگا در نظر گرفته می شوند.

به طور خلاصه می توان الگوریتم را به ترتیب زیر جمع بندی نمود:

- ۱- برازندگی کلیه جواب‌ها محاسبه شده و سه جواب برتر به عنوان آلفا، بتا و دلتا تا پایان الگوریتم انتخاب می شوند.
- ۲- در هر تکرار سه جواب برتر (گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا) قابلیت تخمین موقعیت شکار را داشته و این کار را در هر تکرار با استفاده از رابطه (5) انجام می دهند.
- ۳- در هر تکرار بعد از تعیین موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا، آپدیت موقعیت بقیه جواب‌ها با تبعیت از آن‌ها انجام می شود.
- ۴- در هر تکرار بردار  $a$  (و به تبع آن  $A$ ) و  $C$  آپدیت می شوند.
- ۵- در پایان تکرارها موقعیت گرگ آلفا به عنوان نقطه بهینه معرفی می شود [۲۵].

مشکل اصلی الگوریتم گرگ خاکستری، توانایی جستجوی محلی و سراسری آن است که در برخی از مواقع، در بهینه‌های محلی به دام می افتد. در برخی از موارد هم به خوبی به بهینه‌ی سراسری همگرا نمی شود. برای حل این مشکل، از الگوریتم جستجوی خزنده برای بهبود فازهای استخراج و اکشتاف الگوریتم پایه استفاده می کنیم.

### ۳-۲- الگوریتم جستجوی خزنده

الگوریتم جستجوی خزنده ( $RSA^5$ ) توسط رفتارهای محاصره و شکار کروکودیل‌ها در زندگی واقعی تحریک می‌شود. تفاوت اصلی بین  $RSA$  و سایرین این است که  $RSA$  دارای یک روش منحصر به فرد است که برای به روز رسانی موقعیت راه حل‌ها با استفاده از چهار مکانیسم جدید مدل شده است. به عنوان مثال، احاطه کردن با پیاده روی بلند یا پیاده روی شکمی انجام می‌شود و شکار با هماهنگی شکار یا همکاری شکار انجام می‌شود [۲۶].

۳-۲-۱- فاز مقداردهی اولیه

در  $RSA$ ، فرایند بهینه سازی با یک مجموعه نامزد ( $X$ ) شروع می‌شود که به صورت تصادفی تولید می‌شود و بهترین راه حل بدست آمده به عنوان نزدیکترین جواب بهینه در هر تکرار در نظر گرفته می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,j} & x_{1,n-1} & x_{1,n} \\ x_{2,1} & \dots & x_{2,j} & \dots & x_{2,n} \\ \dots & \dots & x_{i,j} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-1,1} & \dots & x_{N-1,j} & \dots & x_{N-1,n} \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,j} & x_{N,n-1} & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که  $X$  یک مجموعه از راه حل‌های نامزد است که به صورت تصادفی به کمک رابطه (۷) تولید می‌شود. عبارت  $x_{i,j}$  نشان دهنده‌ی موقعیت  $j$ ام راه حل  $i$ ام است  $N$  تعداد راه حل نامزد و  $n$  نشان دهنده‌ی اندازه ابعاد مسئله داده شده است [۲۶].

$$X_{i,j} = rand \times (UB_j - LB_j) + LB_j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

که  $rand$  یک مقدار تصادفی است.  $UB$  و  $LB$  نشان دهنده‌ی محدوده‌ی بالا و پایین مسئله‌ی داده شده است.

۳-۲-۲- فاز احاطه طعمه (اکتشاف)

در این بخش، رفتار اکتشاف احاطه  $RSA$  معرفی شده است بر طبق رفتار اکتشاف، با توجه به رفتار دور زدن، کروکودیل‌ها در حین دور زدن دو حرکت دارند: راه رفتن بالا و راه رفتن شکمی. حرکات تمساح (بالا و شکم راه رفتن) نمی‌تواند به آن‌ها اجازه دهد که به راحتی به طعمه هدف نزدیک شوند، از این رو، جستجوی اکتشافی فضای جستجوی وسیعی را کشف می‌کند. علاوه بر این، مکانیسم‌های اکتشافی (راه رفتن در ارتفاع و شکم) در این مرحله از بهینه‌سازی، برای پشتیبانی از مرحله دیگر (شکار/اکتشاف) در فرآیند جستجو از طریق تحقیقات گسترده و گسترده استفاده می‌شوند.

الگوریتم  $RSA$  می‌تواند بین مراحل جستجوی محاصره (اکتشاف) و شکار (بهره برداری) انتقال یابد، این تغییر بین رفتارهای مختلف بر اساس چهار شرط انجام می‌شود. مکانیسم‌های اکتشافی  $RSA$  مناطق جستجو و رویکرد را برای یافتن راه حل بهتر بر اساس دو استراتژی جستجوی اصلی (استراتژی راه رفتن بالا و استراتژی راه رفتن شکمی) بررسی می‌کنند [۲۶]. این فاز

<sup>5</sup> Reptile search algorithm

جستجو دارای دو قید شرطی است استراتژی راه رفتن بالا به صورت قید  $t \leq \frac{T}{4}$  و استراتژی حرکت پیاده روی به صورت قید  $t \leq 2\frac{T}{4}$  و  $t > \frac{T}{4}$ . این به معنای آن است که این شرط برای اغلب تعداد تکرارهای جستجو (پیاده روی بالا) و نیمه دیگر برای پیاده روی شکمی استفاده می‌شود. این دو روش جستجوی اکتشافی است. توجه شود که یک ضریب مقیاس گذاری تصادفی برای هر المان به منظور تولید راه حل‌های پراکنده و جستجوی نواحی گسترده بررسی می‌شود. در اینجا، معادلات به روز رسانی موقعیت برای مرحله اکتشاف مانند معادله (۴۸) پیشنهاد شده است.

$$x_{(i,j)}(t+1) = \begin{cases} Best_j - \eta_{(i,j)}(t) \times R_{(i,j)}(t) \times rand & t \leq \frac{T}{4} \\ Best_j(t) \times x_{(i,j)}(t) \times ES(t) \times rand & t \leq 2\frac{T}{4} \text{ and } t > \frac{T}{4} \end{cases} \quad (8)$$

که  $Best_j(t)$  و  $J_{th}$  در بهترین راه حل یافته شده تاکنون است. عبارت  $rand$  نشان دهنده‌ی یک عدد تصادفی بین صفر و ۱ است. عبارت  $t$  تعداد تکرار فعلی است و  $T$  تعداد تکرار بیشینه است. عبارت  $\eta_{(i,j)}$  نشان دهنده‌ی عملگر شکار برای موقعیت  $j$ ام در راه حل  $i$ ام است که با استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌شود.  $\beta$  یک پارامتر حساس است که دقت اکتشاف را کنترل می‌کند. (یعنی راه رفتن زیاد) برای فاز احاطه کردن در طول دوره تکرار، که برابر با ۰,۱ ثابت است. تابع کاهش ( $R_{i,j}$ ) یک مقدار است که برای کاهش ناحیه‌ی جستجو استفاده می‌شود که با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.  $r1$  یک عدد تصادفی بین  $[1 N]$  است و  $x_{(i,j)}$  نشان دهنده‌ی یک موقعیت تصادفی از راه حل  $i$ ام است.  $N$  تعداد راه حل‌های نامزد است. حس تکاملی ( $ES(t)$ ) یک نرخ احتمالی است که به طور تصادفی از مقدار ۲ الی ۰,۲ به کمک تعداد تکرار کاهش می‌یابد که به صورت معادله (۱۱) نشان داده شده است.

$$\eta_{(i,j)} = Best_j(t) \times P_{(i,j)} \quad (9)$$

$$R_{(i,j)} = \frac{Best_j(t) - x_{(i,j)}}{Best_j(t) + \varepsilon} \quad (10)$$

$$ES(t) = 2 \times r_3 \times \left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (11)$$

که  $\varepsilon$  یک مقدار کوچک و  $r2$  یک عدد تصادفی بین  $[1 N]$  است،  $r3$  یک عدد تصادفی در محدوده ۰-۱ الی ۱ است. عبارت  $P_{(i,j)}$  درصد اختلاف بین موقعیت  $j$ ام بهترین راه حل بدست آمده و موقعیت  $j$ ام بهترین راه حل فعلی است که به کمک معادله (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$P_{(i,j)} = \alpha + \frac{x_{(i,j)} - M(x_i)}{Best_j(t) \times (UB_{(j)} - LB_{(j)}) + \varepsilon} \quad (12)$$



که  $M(x_1)$  در معادله (۱۲)، موقعیت‌های میانگین راه حل  $i$ ام است که با استفاده از معادله (۴-۱۰) محاسبه می‌شود. عبارات  $UB_{(j)}$  و  $LB_{(j)}$  محدوده‌های بالا و پایین موقعیت  $j$ ام به ترتیب هستند. عبارت  $\alpha$  یک پارامتر حساس است که همچنین دقت اکتشاف را برای مشارکت شکار در طول دوره‌ی تکرارها کنترل می‌کند که معادل با ۰,۱ در نظر گرفته شده است.

$$M(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{(i,j)}, \quad (13)$$

۳-۲-۳- فاز شکار (استخراج)

مکانیسم‌های بهره‌برداری RSA از فضای جستجو و رویکرد برای یافتن راه‌حل بهینه بر اساس استفاده از دو استراتژی جستجوی اصلی (یعنی (۱) هماهنگی شکار و (۲) همکاری شکار استفاده می‌کنند که در معادله (۱۴) مدل‌سازی شده است. جستجو در این فاز به عنوان استراتژی هماهنگی بوسیله‌ی شرایط  $t \leq 3\frac{T}{4}$  و  $t > 2\frac{T}{4}$  مقید می‌شود. در غیر اینصورت در هنگامیکه  $t \leq T$  و  $t > \frac{3T}{4}$  استراتژی مشارکت شکار انجام می‌شود. توجه شود که ضرایب تصادفی برای ایجاد راه‌حل‌های عمیقتر در نظر گرفته شده و نواحی قابل اطمینان را استخراج می‌کنند. در این روش از ساده‌ترین قانون استفاده شده است که می‌تواند رفتار شکار کروکودیل‌ها را تقلید کند [۲۶].

$$x_{(i,j)}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times P_{(i,j)}(t) \times rand & t \leq 3\frac{T}{4} \text{ and } t > 2\frac{T}{4} \\ Best_j(t) - \eta_{(i,j)} \times \varepsilon - R_{(i,j)} \times rand & t \leq T \text{ and } t > 3\frac{T}{4} \end{cases} \quad (14)$$

که  $Best_j(t)$  موقعیت  $j$ ام در بهترین راه‌حل یافته شده تاکنون است. عبارت  $\eta_{(i,j)}$  نشان دهنده‌ی عملگر شکار برای موقعیت  $j$ ام در  $i$ امین راه‌حل است. پارامتر  $\varepsilon$  یک مقدار کوچک است. عبارت  $R_{(i,j)}$  یک مقدار استفاده شده برای کاهش ناحیه‌ی جستجو است [۲۶].

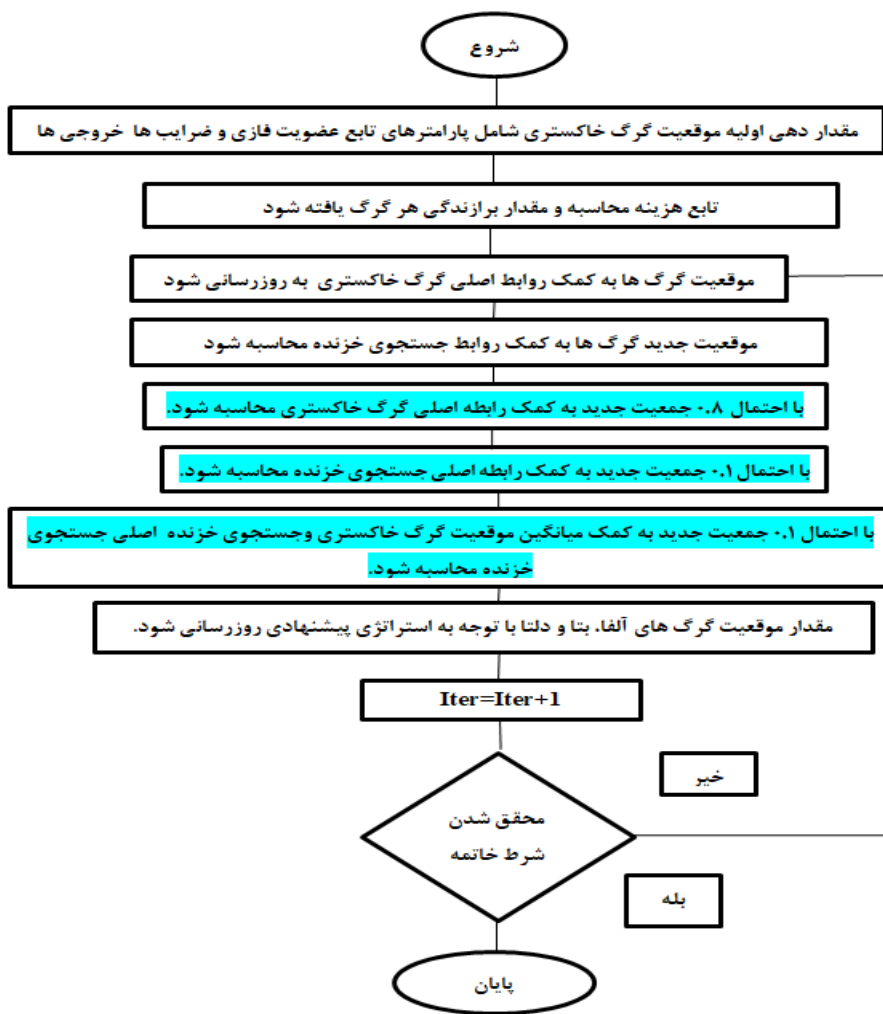
هنگامیکه  $t \leq 2\frac{T}{4}$  باشد، فاز احاطه طعمه اتفاق می‌افتد در غیر اینصورت هنگامیکه  $t > \frac{T}{2}$  باشد، فاز شکار (استخراج) اتفاق می‌افتد که وقتی حمله می‌شود، برای شکار به اندازه کافی نزدیک است. مکانیسم‌های جستجوی بهره‌برداری (هماهنگی شکار و همکاری) در تلاش هستند تا از گیر افتادن در بهینه محلی اجتناب کنند. این رویه‌ها به جستجوی اکتشافی در تعیین راه‌حل بهینه و حفظ تنوع در راه‌حل‌های کاندید کمک می‌کنند.

برای تاکید بر اکتشاف و استخراج، فرایند جستجو به دو روش اصلی (اکتشاف و استخراج) با چهار استراتژی تقسیم می‌شود. اکتشاف: همکاری شکار و مشارکت. راه‌حل‌های نامزد ناحیه‌ی جستجو را در هنگامیکه  $t \leq \frac{T}{2}$  باشد تلاش می‌کنند که جستجو

کنند و تلاش می‌کنند که در هنگامیکه  $t > \frac{T}{2}$  باشد، به سمت راه حل بهینه‌ی نزدیکتر حرکت کنند. در فاز اکتشاف، استراتژی حرکتی بالا در هنگامیکه  $t \leq \frac{T}{2}$  و  $t > \frac{T}{4}$  باشد اعمال می‌شوند. در فاز استخراج، استراتژی همکاری شکار در هنگامیکه  $t \leq 3\frac{T}{4}$  و  $t > 2\frac{T}{4}$  باشد اجرا می‌شوند، در غیر اینصورت استراتژی همکاری شکار در هنگامیکه  $t \leq T$  و  $t > 3\frac{T}{4}$  باشد اعمال می‌شود.

### (a) ۳-۳- الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته

در الگوریتم پیشنهادی به دلیل توانایی ضعیف جستجوی محلی الگوریتم گرگ خاکستری از روابط الگوریتم جستجوی خزنده برای بهبود الگوریتم پایه استفاده می‌کنیم. ابتدا روابط گرگ خاکستری اجرا می‌شود. این روابط تا ابتدای فرمول به روز رسانی موقعیت اعضای جمعیت (۵) اجرا می‌شود. پس از به روز رسانی گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا الگوریتم RSA اجرا می‌شود. یک جمعیت جدید به کمک روابط به روز رسانی الگوریتم جستجوی خزنده ایجاد می‌شود. پس از محاسبه جمعیت جدید به کمک روابط مربوط به الگوریتم جستجوی خزنده، در مرحله‌ی بعدی جمعیت الگوریتم پایه را با توجه به احتمالات به روز رسانی می‌کنیم. به این صورت که با احتمال  $0/8$  رابطه گرگ خاکستری اجرا می‌شود با احتمال  $0/1$  جمعیت الگوریتم پیشنهادی فقط مربوط به RSA در نظر گرفته می‌شود. با احتمال  $0/1$  دیگر ترکیب موقعیت‌های ایجاد شده توسط RSA و الگوریتم گرگ خاکستری محاسبه شده و جمعیت جدید به کمک این ترکیب محاسبه می‌شود. برای ارزیابی این الگوریتم نتایج بر روی ۵ تابع محک بررسی می‌شود. در شکل ۱ فلوجارت روش پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۱- فلورچارت کلی روش پیشنهادی ترکیبی گرگ خاکستری با جستجوی خزنده

**(b) ۴- طراحی کنترل کننده‌ی هوشمند فازی و تحلیل پایداری آن به منظور حذف آشوب از سیستم چرخ دنده**

طبق مطالعات قبلی، حذف یا متوقف نمودن آشوب برای یک سیستم چرخ دنده مهم است. این مقاله بر حذف رفتار آشوبی از طریق طراحی مناسب پارامترهای سیستم متمرکز است. بدیهی است که با تنظیم پارامترها در حین طراحی می‌توان آشوب را از سیستم حذف کرد. در چنین شرایطی، یک روش کنترل مناسب برای از بین بردن یا سرکوب آشوب مورد نیاز است. هدف اصلی این تحقیق حذف رفتار آشفته سیستم دنده با دستیابی به کنترل کننده هوشمند و PID فازی بهینه شده همراه با الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته است که دارای ویژگی‌های هوشمند و بهینه است. به منظور طراحی کنترل کننده جهت پایداری دینامیک غیرخطی چرخ دنده، لازم است که متغیرهای حالت و ورودی‌های سیستم به طور دقیق مشخص شوند. لذا معادلات حالت دینامیک سیستم انتقال چرخ دنده با جزئیات بیشتر در ادامه آمده است:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\epsilon\mu x_2 + (0.1667x_1 - 0.1667x_1^3) \\ + \epsilon(f_m + f_e \Omega_e^2 \cos(\Omega_e \tau + \phi_e)) + \Delta f(x(t)) + d(t) + u(t) \end{cases} \quad (15)$$

در رابطه‌ی  $\Delta f(x, t)$  نامعینی **Error! Reference source not found.** بردار حالت سیستم،  $x = [x_1 \cdot x_2]^T$  مدل،  $d(t)$  اغتشاش خارجی و  $u(t)$  ورودی کنترلی است که در گام اول، قانون کنترل هوشمند فازی به آن اعمال می‌شود.

در معادله (۱۵) ورودی کنترلی است که به کمک کنترل کننده فازی PID بدست می‌آید. پیش از اثبات پایداری، ضریب  $\epsilon$  عددی کوچک است که منجر می‌شود عبارات شامل این ضریب تأثیری قابل توجه بر روی دینامیک نداشته باشند. بنابراین فرض می‌شود که عبارت  $\epsilon(f_m + f_e \Omega_e^2 \cos(\Omega_e \tau + \phi_e))$  تأثیر زیادی بر روی عملکرد دینامیکی سیستم ندارد. همچنین فرض می‌شود که عبارت  $\Delta f(x, t) + d(t)$  محدود بوده و مقداری کوچک از نظر دامنه دارد. برای اثبات پایداری به کمک نظریه پایداری لیاپانوف، یک تابع لیاپانوف به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$V = x_1^2 + x_2^2 \quad (16)$$

مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر می‌شود:

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 = x_1 x_2 + x_2 (-2\epsilon\mu x_2 + 0.1667x_1 - 0.1667x_1^3 + G + \Delta f + d + u) \quad (17)$$

تلاش کنترلی  $u$  به صورت (۱۷-۴) تعریف می‌کنیم:

$$u = 0.1667x_1^3 - k_p x_2 - k_i \left( \int x_2 dt \right) - k_d \dot{x}_2 - k_1 x_1 \quad (18)$$

عبارت  $0.1667x_1^3$  برای حذف عبارت غیر خطی در (۱۸) قرار داده شده است. پارامترهای  $k_p$ ،  $k_i$  و  $k_d$  به ترتیب ضرایب تناسبی، انتگرالگیر و مشتقگیر هستند. پارامتر  $k_1 = 1.1667$  انتخاب می‌شود. زیرا بتوان عبارت اول و سوم در (۱۷) را با آن حذف نمود. با اعمال  $u$  در (۱۸) خواهیم داشت:

$$\dot{V} = -2\epsilon\mu x_2^2 - k_p x_2^2 - k_i \left( \int x_2 dt \right) x_2 - k_d (\dot{x}_2) x_2 \quad (19)$$

اندازه ضرایب  $kp, ki, kd$  در دست طراح است. برای آنکه مشتق لیاپانوف کوچکتر یا مساوی صفر شود، ضریب  $kp$  را بیست برابر ضرایب  $ki, kd$  در شبیه سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود. این منجر می‌شود که اثر دو جمله آخر در (۱۹) خیلی کم شده و در نهایت مشتق تابع لیاپانوف کوچکتر یا مساوی صفر شود. این مشتق در نهایت صفر خواهد شد زیرا تمام عبارات  $x_1, x_2$  به سمت صفر می‌روند. بنابراین ضرایب کنترل کننده PID که از خروجی‌های فازی بدست آمده‌اند به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

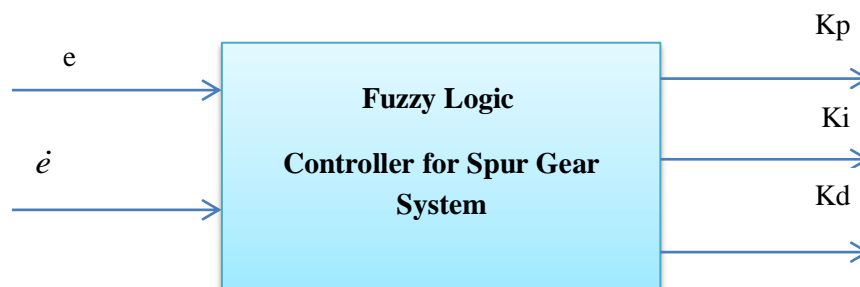
$$Kp = 2 * out(1); Ki = 0.2 * out(2); Kd = 0.2 * out(3) \quad (20)$$

که در آن **out** نشان دهنده خروجی فازی است. در نتیجه مشتق تابع لیاپانوف کوچکتر یا مساوی صفر خواهد شد. بنابراین پایداری سیستم با کنترل کننده (۱۸) تضمین می‌شود. علت استفاده از فازی PID به جای فازی به تنهایی این است که عبارات مشتقگیر و انتگرالگیر برای حذف رفتار آشوبی و برقراری پایداری لازم هستند.

در ادامه به طراحی کنترل کننده فازی پرداخته می‌شود. در بخش بعد توابع عضویت فازی به کمک الگوریتم گرگ خاکستری تنظیم می‌شود به طوریکه اهداف کنترلی حذف آشوب برقرار شود.

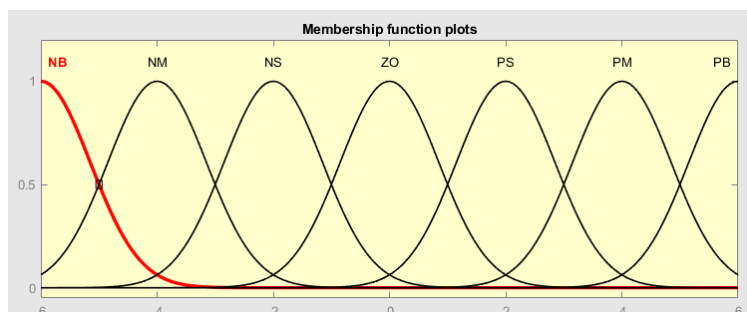
#### ۴-۱- طراحی کنترل کننده‌ی هوشمند فازی به منظور حذف آشوب از سیستم چرخ دنده

در این بخش هدف طراحی و پیاده سازی یک کنترل کننده‌ی هوشمند فازی بر روی این سیستم چرخ دنده است. هدف از این طراحی، حذف آشوب و بهبود پایداری در وضعیت متغیرهای حالت دوگانه‌ی سیستم است. نمای کلی کنترل کننده‌ی فازی پیاده شده در این مقاله به منظور پایداری سازی سیستم آشوبناک چرخ دنده در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختار کلی کنترل کننده‌ی فازی طراحی شده

همانگونه از شکل ۲ دیده می‌شود، کنترل کننده‌ی فازی طراحی شده دارای دو ورودی (سیگنال خطا و مشتق آن) و سه خروجی (بهره‌های کنترل کننده PID) می‌باشد. این بهره‌ها شامل  $K_p, K_i, K_d$  هستند که متناسب با هر کدام از این پنج پارامتر (دو ورودی و سه خروجی) باید توابع عضویت تعریف شود. این توابع از نوع گوسی بوده که به صورت شکل ۳ نشان داده می‌شوند.



شکل ۳- تابع عضویت مربوط به ورودی‌های خطا و مشتق آن و خروجی‌ها شامل بهره‌های  $K_p, K_i, K_d$  در ساختار کنترل فازی طراحی شده قوانین مربوط به کنترل کننده فازی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پایگاه قواعد مربوط به کنترل کننده فازی PID با خروجی‌های  $K_p, K_i, K_d$

1. If (error is NB) and (derror is NB) then (KP is PB)(KI is NB)(KD is PS)

2. If (error is NB) and (derror is NM) then (KP is PB)(KI is NB)(KD is NS)
3. If (error is NB) and (derror is NS) then (KP is PM)(KI is NM)(KD is NB)
4. If (error is NB) and (derror is Z) then (KP is PM)(KI is NM)(KD is NB)
5. If (error is NB) and (derror is PS) then (KP is PS)(KI is NS)(KD is NB)
6. If (error is NB) and (derror is PM) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is NM)
7. If (error is NB) and (derror is PB) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is PS)
8. If (error is NM) and (derror is NB) then (KP is PB)(KI is NB)(KD is PS)
9. If (error is NM) and (derror is NM) then (KP is PB)(KI is PB)(KD is NS)
10. If (error is NM) and (derror is NS) then (KP is PM)(KI is NM)(KD is NB)
11. If (error is NM) and (derror is Z) then (KP is PS)(KI is NS)(KD is NM)
12. If (error is NM) and (derror is PS) then (KP is PS)(KI is NS)(KD is NM)
13. If (error is NM) and (derror is PM) then (KP is ZO)(KI is ZO)(KD is NS)
14. If (error is NM) and (derror is PB) then (KP is NS)(KI is Z)(KD is Z)
15. If (error is NS) and (derror is NB) then (KP is PM)(KI is NB)(KD is Z)
16. If (error is NS) and (derror is NM) then (KP is PM)(KI is NM)(KD is NS)
17. If (error is NS) and (derror is NS) then (KP is PM)(KI is NS)(KD is NM)
18. If (error is NS) and (derror is Z) then (KP is PS)(KI is NS)(KD is NM)
19. If (error is NS) and (derror is PS) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is NS)
20. If (error is NS) and (derror is PM) then (KP is NS)(KI is Z)(KD is NS)
21. If (error is NS) and (derror is PB) then (KP is NS)(KI is PS)(KD is Z)
22. If (error is Z) and (derror is NB) then (KP is PM)(KI is NM)(KD is Z)
23. If (error is Z) and (derror is NM) then (KP is PM)(KI is NM)(KD is Z)
24. If (error is Z) and (derror is NS) then (KP is PS)(KI is NS)(KD is NS)
25. If (error is Z) and (derror is Z) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is NS)
26. If (error is Z) and (derror is PS) then (KP is NS)(KI is PS)(KD is NS)
27. If (error is Z) and (derror is PM) then (KP is NM)(KI is PM)(KD is NS)
28. If (error is Z) and (derror is PB) then (KP is NM)(KI is PM)(KD is Z)
29. If (error is PS) and (derror is NB) then (KP is PS)(KI is NM)(KD is Z)
30. If (error is PS) and (derror is NM) then (KP is PS)(KI is NS)(KD is Z)
31. If (error is PS) and (derror is NS) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is Z)
32. If (error is PS) and (derror is Z) then (KP is NS)(KI is PS)(KD is Z)
33. If (error is PS) and (derror is PS) then (KP is NS)(KI is PS)(KD is Z)
34. If (error is PS) and (derror is PM) then (KP is NM)(KI is PM)(KD is Z)
35. If (error is PS) and (derror is PB) then (KP is NM)(KI is PB)(KD is Z)
36. If (error is PM) and (derror is NB) then (KP is PS)(KI is Z)(KD is PB)
37. If (error is PM) and (derror is NM) then (KP is ZO)(KI is ZO)(KD is NS)
38. If (error is PM) and (derror is NS) then (KP is NS)(KI is PS)(KD is PS)
39. If (error is PM) and (derror is Z) then (KP is NM)(KI is PS)(KD is PS)
40. If (error is PM) and (derror is PS) then (KP is NM)(KI is PM)(KD is PS)
41. If (error is PM) and (derror is PM) then (KP is NM)(KI is PB)(KD is PS)
42. If (error is PM) and (derror is PB) then (KP is NB)(KI is PB)(KD is PB)
43. If (error is PB) and (derror is NB) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is PB)
44. If (error is PB) and (derror is NM) then (KP is Z)(KI is Z)(KD is PM)
45. If (error is PB) and (derror is NS) then (KP is NM)(KI is NS)(KD is PM)
46. If (error is PB) and (derror is Z) then (KP is NM)(KI is PM)(KD is PM)
47. If (error is PB) and (derror is PS) then (KP is NM)(KI is PM)(KD is PS)
48. If (error is PB) and (derror is PM) then (KP is NB)(KI is PB)(KD is PS)
49. If (error is PB) and (derror is PB) then (KP is NB)(KI is PB)(KD is PB)

با توجه به جدول ۱، تعداد ۴۹ قانون جهت طراحی کنترل کننده‌ی فازی تعریف شده است. همچنین در این مقاله از موتور استنتاج حاصل ضرب یعنی استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با ترکیب اجتماع و استلزام حاصل ضرب ممدانی استفاده شده است. در این مقاله توابع عضویت فازی مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های فازی و بهره‌های خروجی فازی که شامل خطا و مشتق خطا می‌باشند بوسیله‌ی الگوریتم گرگ خاکستری تنظیم می‌شوند به طوری که تابع هزینه مساله کمینه شود. در هر مساله‌ی بهینه سازی، هدف پیدا کردن مقادیر بهینه‌ی مناسب برای متغیرهای مساله بوده به طوری که با برقراری قیود موجود، تابع هدف مساله کمینه یا بیشینه شود. برای انجام عمل بهینه سازی، تابع هدف به صورت کمینه سازی مربعات خطای مربوط به سیگنال‌های  $e1, e2$  است.

$$\text{Optimize } J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_1^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_2^2 \quad (21)$$

همان گونه که از ساختار تابع هزینه پیداست، این تابع از مجموع میانگین مربعات خطاهای مربوط به سیستم چرخ دنده تشکیل شده است. هدف این است که این خطاها به سمت صفر برسد.

نحوه‌ی عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته در شبیه سازی به این صورت است که پس از به دست آوردن نتایج در هر مرحله، بهترین آن‌ها که سریع ترین پاسخ است، به عنوان نخبه به نسل بعد منتقل شده و بقیه نسل بعد را به وجود می‌آورند.

با توجه به مطالب گفته شده، هدف از این مقاله تنظیم کنترل کننده‌ی فازی به کمک الگوریتم گرگ خاکستری است، به طوریکه تابع هزینه (۲۰) کمینه گردد. از آنجایی که ورودی اول شامل ۷ تابع عضویت و ورودی دوم شامل ۷ تابع عضویت گوسی، سه خروجی فازی نیز هر کدام دارای ۷ تابع عضویت گوسی هستند، در مجموع ۳۵ تابع عضویت داریم. از آنجایی که هر تابع عضویت دارای دو پارامتر مجهول است در مجموع ۷۰ پارامتر مجهول داریم. دو بهره هم برای خروجی اول و خروجی دوم فازی به همراه یک بهره فیدبک از خطا برای سیگنال اول (e1) داریم. بنابراین تعداد کل پارامترهای مجهول برابر با ۷۳ پارامتر خواهند شد. این پارامترها به کمک الگوریتم گرگ خاکستری طوری تنظیم می‌شوند که تابع هزینه (۲۱) کمینه گردد. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی نتایج آن با کنترل کننده فازی غیر بهینه مقایسه می‌شود.

## ۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش ابتدا نتایج شبیه سازی مربوط به پنج تابع محک و سپس نتایج شبیه سازی مربوط به طراحی کنترل کننده فازی بهینه برای سیستم چرخ دنده نشان داده شده است.

در این بخش توابع محک معروف *Zhakharov* و *Griewank*، *Rastrigin*، *Sphere*، *Rosenbrock* در نظر گرفته شده اند. برای ارزیابی الگوریتم گرگ خاکستری ترکیب شده با جستجوی خزنده، در مقایسه با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات *PSO* و *GWO*، تمام الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن شرایط مشابه اجرا شده اند. اندازه جمعیت برابر با ۵۰ و تعداد تکرار بیشینه برابر با ۶۰ در نظر گرفته شده است. تمام الگوریتم‌ها ۲۰ بار اجرا شده و میانگین، کمترین و بیشترین مقدار بدست آمده مربوط به این ۲۰ بار اجرا در جدول ۱ آورده شده اند. جدول ۲ این مقایسه را میان سه الگوریتم نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده مربوط به توابع محک توسط الگوریتم‌های *Sphere*، *Rosenbrock*، *Rastrigin*، *Griewank*،

Zakharov

نام الگوریتم بهینه سازی	معیار ارزیابی	Sphere	Rosenbrock	Rastrigin	Griewank	Zakharov
GWO	Mean	1.9655e-04	0.0371	0.3106	0.0342	1.9424e-15

3.0592e-18	1.4411e-07	1.9895e-13	0.0031128	2.7239e-05	Min	
1.0475e-14	0.14827	2.1725	0.0997	0.00028077	Max	
6.6104e-04	0.0193	1.6868	0.1498	6.8412e-05	Mean	
8.6161e-05	0.010382	0.52489	0.014166	4.5218e-05	Min	PSO
0.00028218	0.036965	3.1013	0.92346	0.00011438	Max	
0	0	0	5.6165e-05	7.6677e-07	Mean	GWO RSA
0	0	0	1.518e-05	1.42e-07	Min	
0	0	0	0.00012477	8.5436e-07	Max	

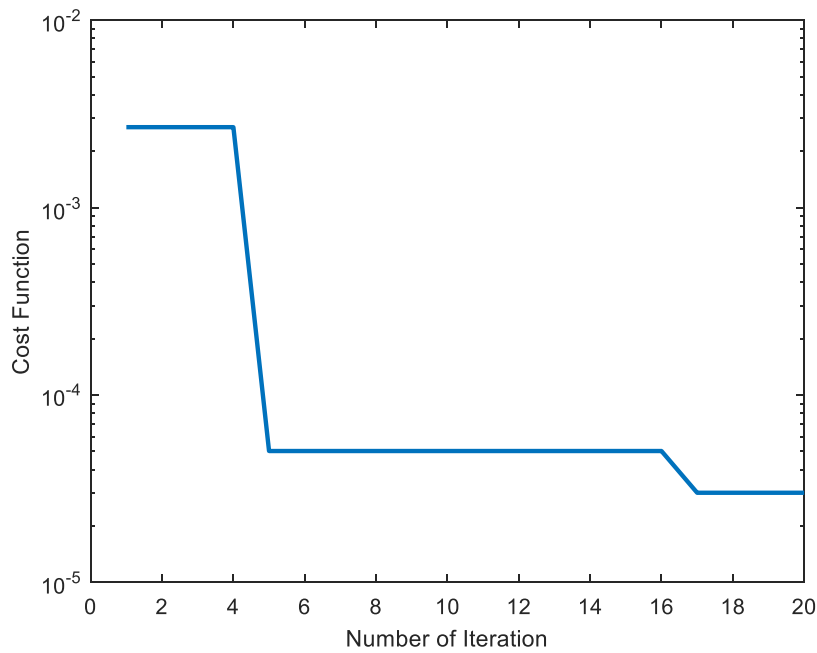
از جدول ۲ مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی GWORSA مقادیر میانگین، کمترین و بیشترین آن در مقایسه با دو روش دیگر کمتر است. به خصوص برای توابع محک **Zhakhrov** و **Rastrigin, Griewank** که مقدار صفر برای معیارهای میانگین، کمترین و بیشترین بدست آمده است. بنابراین روش پیشنهادی کارایی بهتری در مقایسه با PSO و GWO دارد. انتظار می‌رود که در کاربردهای دیگر نیز موفقتر از دو الگوریتم مذکور باشد.

با توجه به موارد فوق، ما از کنترل کننده PID فازی الگوریتم گرگ خاکستری و نوع توسعه یافته آن برای کنترل سیستم آشوب چرخ دنده استفاده می‌کنیم. شبیه سازی‌ها با زمان ۲۰ ثانیه با اندازه گام ۰,۰۲ ثانیه اجرا می‌شوند. اندازه جمعیت الگوریتم گرگ خاکستری ۳۰ و تعداد تکرارها ۲۰ در نظر گرفته شده است. در حالت اول فرض می‌شود که اغتشاش یا نویز وجود ندارد. سپس در حالت دوم، اغتشاش و نویز فرض می‌شود. ما در هر دو حالت شبیه سازی را اجرا می‌کنیم. در نهایت، در مورد دوم، نتایج را با نتایج کنترل کننده فازی PID غیربهبینه مقایسه می‌کنیم.

#### الف- شبیه سازی در صورت عدم وجود نویز و اغتشاش

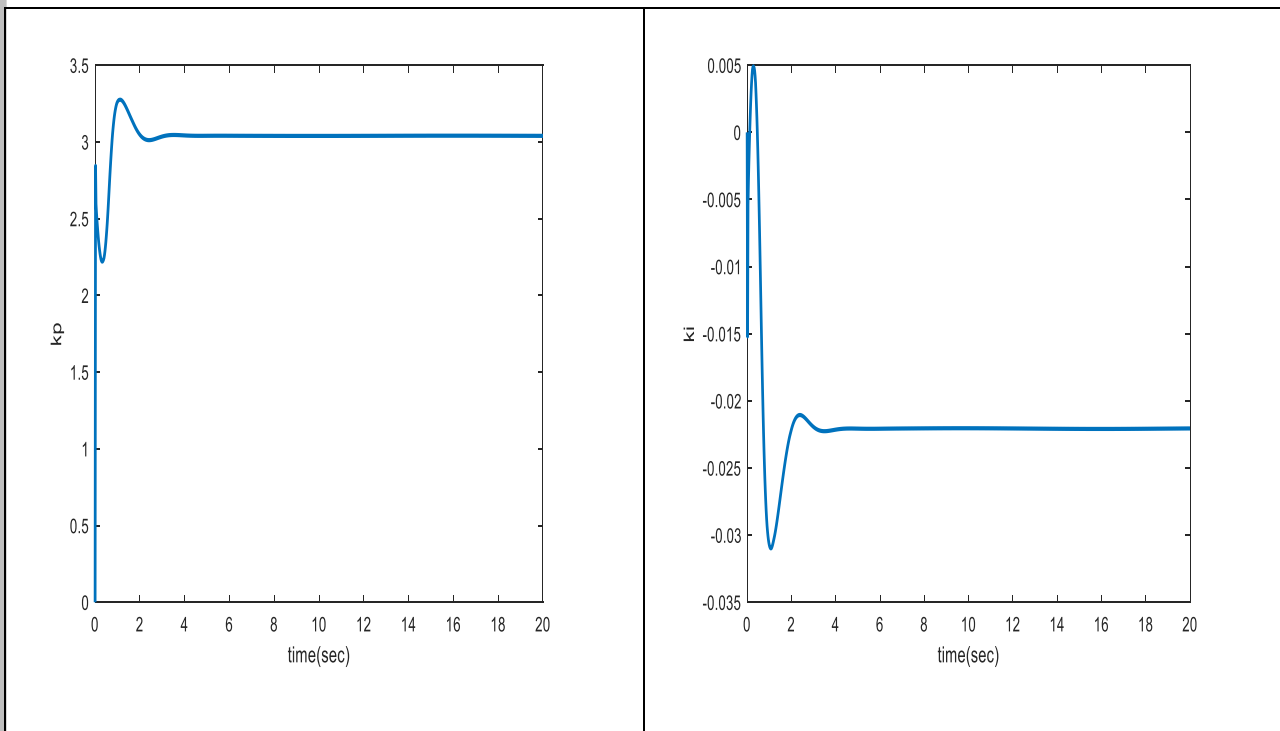
در این حالت، الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته را اجرا می‌کنیم. سپس کنترل کننده فازی PID بهبود یافته را به دست می‌آوریم و آن را برای کنترل رفتار آشوب در سیستم چرخ دنده اعمال می‌کنیم. شکل ۴ بهترین منحنی هزینه را از نظر تعداد تکرار نشان می‌دهد.

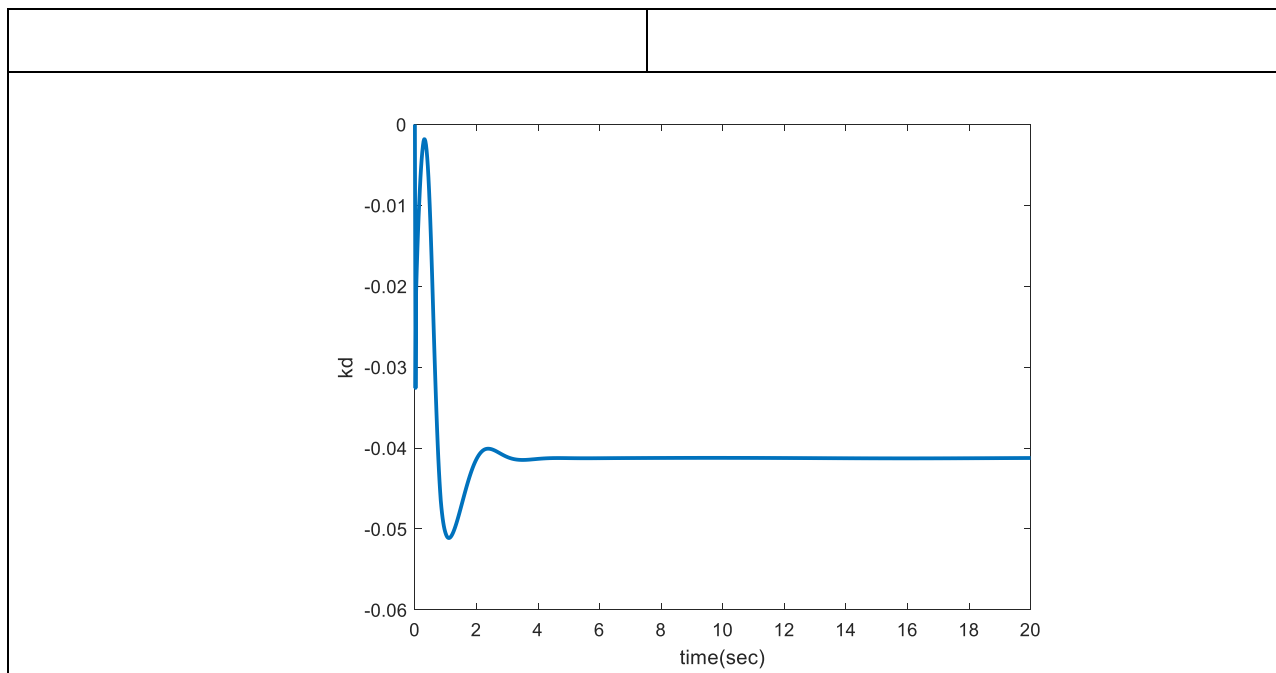




شکل ۴- منحنی بهترین تابع هزینه بر حسب تعداد تکرار با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری

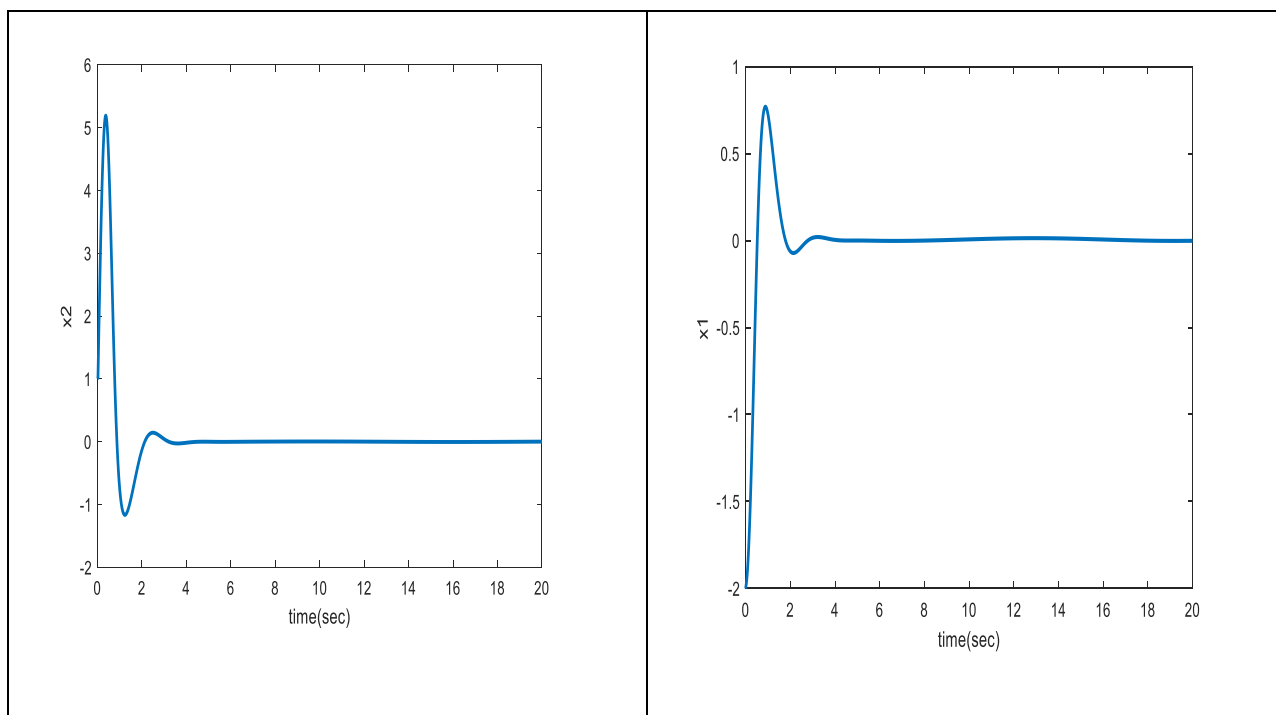
از شکل ۴ می‌توان دریافت که بهترین تابع هزینه از نظر تعداد تکرار ابتدا در محدوده  $1e-02$  قرار دارد و سپس در تکرارهای نهایی به محدوده ده تا توان منفی پنج می‌رسد. از نتیجه به دست آمده مربوط به شکل ۴ می‌توان دریافت که تابع هزینه به دست آمده با الگوریتم گرگ خاکستری به سرعت و به خوبی به حداقل می‌رسد. در شکل ۵ منحنی‌های مربوط به ضرایب  $kp, ki, kd$  بدست آمده از کنترل کننده فازی پیشنهادی نشان داده شده است.





شکل ۵- منحنی ضرایب  $kp, ki, kd$  بدست آمده از کنترل کننده فازی پیشنهادی

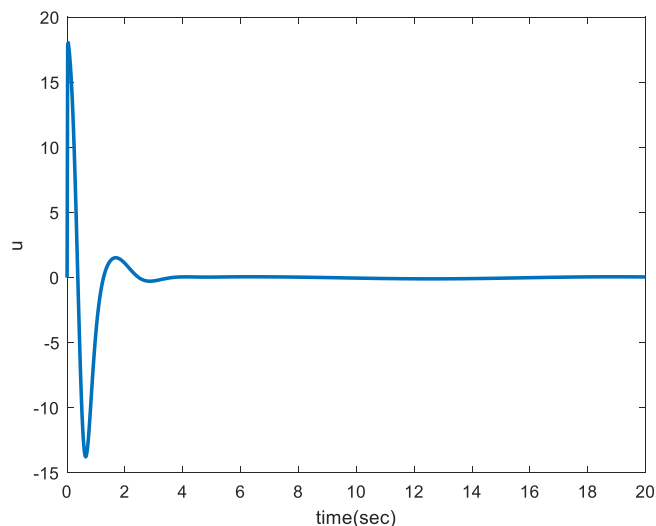
شکل ۶ منحنی‌های سیگنال  $x_1$  و  $x_2$  را بر حسب زمان نشان می‌دهد. شکل ۷ منحنی تلاش کنترلی  $u$  را نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی  $x_1$  در زمان با کمک کنترل کننده فازی PID تنظیم شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته

از شکل ۶ می‌توان دریافت که در ابتدا منحنی  $x_1$  از مقدار اولیه صفر تا مقادیر زیاد شروع شده و دارای نوسانات کمی بوده است. سپس در عرض حدود ۵ ثانیه نوسانات به پایان رسیده و این منحنی به صفر رسیده است. مشاهده می‌شود که منحنی  $x_2$

از مقدار اولیه خود شروع شده و افزایش یافته و سپس با نوسانات کاهش یافته و در نهایت پس از ۵ ثانیه بدون نوسان به صفر رسیده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که در ابتدا نمودارهای  $X_1$  و  $X_2$  دارای نوسان هستند اما پس از ۵ ثانیه به صفر می‌رسند.



شکل ۷- منحنی کنترل به دست آمده از کنترل کننده فازی PID توسط الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته

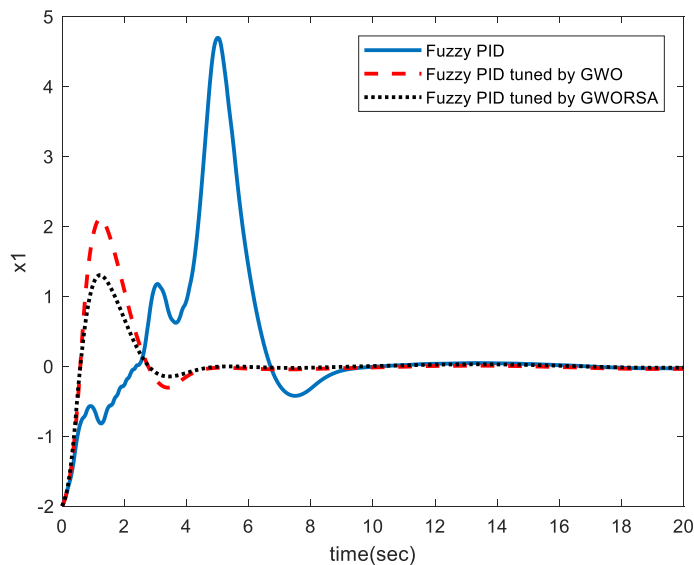
از شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود که تلاش کنترلی  $u$  قبل از ۵ ثانیه کم و سپس زیاد شده است، اما پس از گذشت ۵ ثانیه به صفر می‌رسد. از نتایج بدست آمده مربوط به میانگین مربعات خطا برای  $X_1$  برابر با  $0/0602$  و برای  $X_2$  برابر با  $0/5871$  شده است. در حالیکه این مقدار توسط الگوریتم گرگ خاکستری برای  $X_1$  برابر با  $0/0512$  و  $2/6401$  شده است. از آنجایی که کنترل  $X_2$  هدف مهمتری است. نتیجه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موفقتر عمل نموده است.

#### ب- نتایج شبیه سازی‌ها در حضور نویز و اغتشاش

در این حالت، سیگنال‌های نویز و اختلال در معادله دیفرانسیل  $X_2$  اعمال می‌شود. نویز با استفاده از دستور `unifrnd` در محدوده  $[-0.05, 0.05]$  تولید می‌شود. اختلال نیز به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

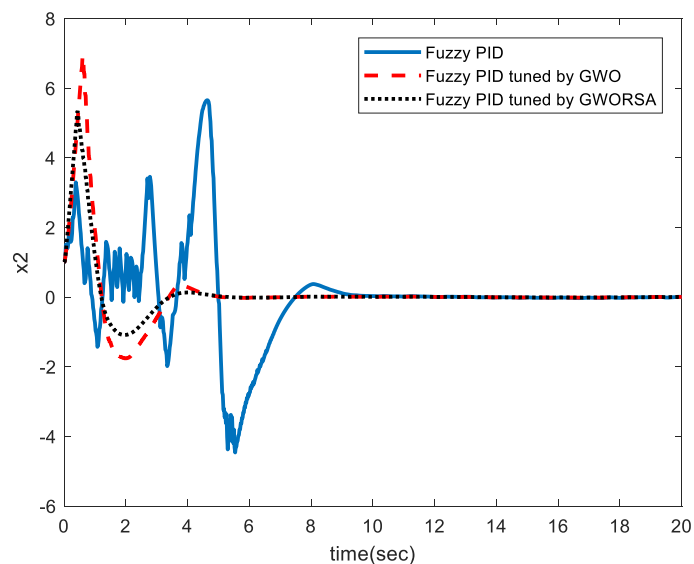
$$D = 0.01 \sin(x_1) \sin(x_2) \quad (22)$$

با توجه به این سیگنال‌ها، شبیه سازی را با یک مجموعه کنترل کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری و نوع توسعه یافته آن انجام می‌دهیم و نتایج را به دست می‌آوریم. شکل‌های ۸ تا ۱۰ منحنی‌های  $X_1$ ،  $X_2$  و  $u$  را نشان می‌دهند.



شکل ۸- منحنی  $x_1$  بر حسب زمان در حضور نویز و اغتشاش

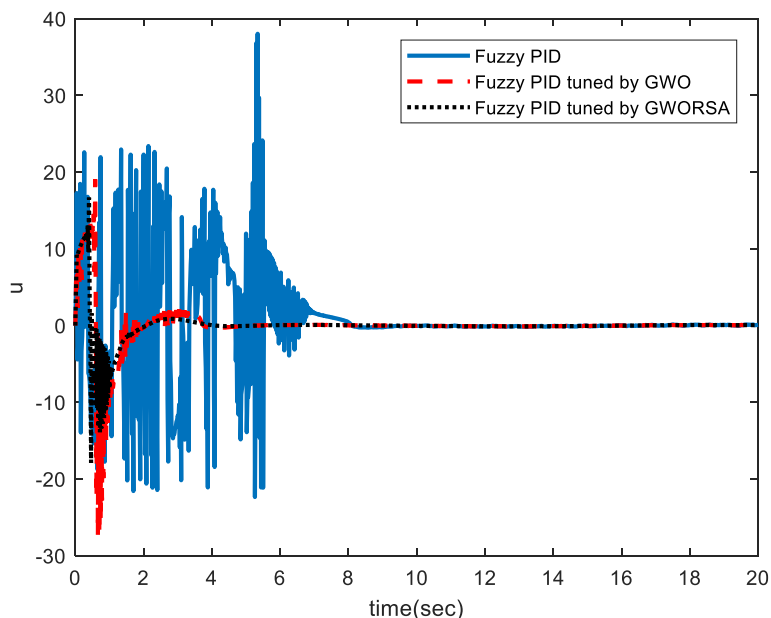
شکل ۸ نشان می‌دهد که  $x_1$  بدست آمده از روش گرگ خاکستری و گرگ خاکستری توسعه یافته با جستجوی خزنده بعد از ۵ ثانیه به صفر رسیده است. اما روش پیشنهادی دارای دامنه کمتری در مقایسه با گرگ خاکستری بوده و کمی زودتر به هدف رسیده است. به دلیل نویز و اغتشاش در زمان‌های پایانی یک خطای جزئی وجود دارد.



شکل ۹- منحنی  $x_2$  بر حسب زمان در حضور نویز و تلاطم

از شکل ۹ می‌توان دریافت که  $x_2$  بدست آمده از روش‌های گرگ خاکستری و نوع توسعه یافته آن پس از ۵ ثانیه به صفر رسیده است. از این شکل مشاهده می‌شود که روش گرگ خاکستری توسعه یافته کمی زودتر از گرگ خاکستری معمولی به

هدف رسیده است. در این حالت با وجود نویز و تلاطم در زمان های پایانی، خطا بسیار ناچیز است. این نشان می دهد که کنترل کننده پیشنهادی در دفع نویز و اختلال عملکرد خوبی داشته است.



شکل ۱۰- منحنی تلاش کنترلی  $u$  بر حسب زمان

از شکل ۱۰ می توان دریافت که تلاش کنترلی  $u$  بدست آمده از روش های گرگ خاکستری معمولی و نوع توسعه یافته آن در ابتدا نوسان کرده و پس از ۴ ثانیه به صفر می رسد. تلاش کنترلی بدست آمده از گرگ خاکستری توسعه یافته دامنه کمتر داشته و کمی زودتر به صفر رسیده است.

### ج- تحلیل حساسیت

در این حالت تحلیل حساسیت برای روش پیشنهادی گرگ خاکستری توسعه یافته در حضور اغتشاش و عدم حضور اغتشاش بررسی می شود. معیارهای میانگین مربعات خطا و انتگرال مربعات خطا در نظر گرفته شده اند. در جدول ۳ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت با حضور اغتشاش و بدون آن نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج مربوط به تحلیل حساسیت روش پیشنهادی در حضور اغتشاش و بدون اغتشاش

معیار	بدون اغتشاش	با اغتشاش
میانگین مربعات خطای $e1$	1.4274e-04	4.2613e-04
میانگین مربعات خطای $e2$	7.2036e-06	7.4750e-05
انتگرال قدر مطلق خطای $e1$	0.1011	0.1586
انتگرال قدر مطلق خطای $e2$	0.0236	0.0761

از جدول ۳ مشاهده می‌شود که حساسیت در حضور اغتشاش بیشتر است. از نظر میانگین مربعات خطا، حساسیت برای خطای e1 در زیر ده درصد است. اما حساسیت برای خطای e2 بالای ده درصد شده است. در این حالت، اگر اغتشاش بیشتر شود، کنترل کننده قادر به کنترل این سیستم نخواهد بود و رفتار آشوبی کنترل نمی‌شود.

د- مقایسه با مقالات [۱۴] و [۱۶]

در این بخش از نظر معیارهای انتگرال قدر مطلق خطا IAE و انتگرال مربعات خطا ISE نتایج را با کنترل کننده مد لغزشی ترمینال سریع تطبیقی مرجع [۱۴] و کنترل کننده‌های پیش‌بین و مد لغزشی مربوط به مرجع [۱۶] و مقایسه می‌کنیم. در جدول ۴ این مقایسه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۴- مقایسه معیارهای IAE و ISE مربوط به روش پیشنهادی و روش‌های مربوط به مراجع [۱۴] و [۱۶]

معیار	کنترل کننده SMC [۱۶]	کنترل کننده GPC [۱۶]	کنترل کننده مد لغزشی ترمینال سریع تطبیقی [۱۴]	کنترل کننده پیشنهادی
IAE	0.5623	0.5272	0.3149	0.2431
ISE	0.1946	0.1893	0.1363	0.0425

از جدول ۴ مشاهده می‌شود که معیار IAE بدست آمده از روش پیشنهادی ۰/۲۴۳۱ شده است در حالیکه مابقی روش‌ها مقادیر بیشتری بدست آورده‌اند. از نظر معیار ISE نیز مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی مقدار ۰/۰۴۲۵ بدست آورده است، در حالیکه روش‌های دیگر مقادیر بیشتری بدست آورده‌اند.

## ۶- نتیجه گیری

رفتار آشوبی در سیستم‌های دنده می‌تواند تاثیر منفی بر عملکرد آن داشته باشد. در نتیجه کنترل این رفتارها در سیستم‌های چرخ دنده ای ضروری است. به دلیل این مشکل، در این مقاله، یک کنترل کننده فازی PID تنظیم شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری توسعه یافته با جستجوی خزنده برای کنترل رفتار آشوبی سیستم چرخ دنده پیشنهاد شد. برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، نتایج در دو مطالعه موردی بدون نویز و بدون اغتشاش و نویز و اغتشاش مقایسه شد. نتایج نشان داد که کنترل کننده فازی PID که با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری توسعه پیشنهادی تنظیم شده است، نوسانات کمتری نسبت به کنترل کننده فازی PID معمولی ایجاد می‌کند. نتایج در حضور اغتشاش و نویز نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با گرگ خاکستری معمولی زودتر توانسته است که مسیرهای حالت را به هدف برساند. بنابراین عملکرد روش پیشنهادی در کنترل رفتار آشوبی سیستم چرخ دنده به نتیجه رسیده است.

مراجع

- [1] S. Hamel, A. Boukroune, and A. Bouzeriba, "Function vector synchronization based on fuzzy control for uncertain chaotic systems with dead-zone nonlinearities," *Complexity*, vol. 21, no. S1, pp. 234–249, 2016.

- [2] Saghafi, A., & Farshidianfar, A. (2016). An analytical study of controlling chaotic dynamics in a spur gear system. *Mechanism and Machine Theory*, 96, 179-191.
- [3] C. Luo and X. Wang, "Hybrid robust modified function projective lag synchronization in two different dimensional chaotic systems," *Nonlinear Dyn.*, vol. 73, no. 1-2, pp. 245-257, 2013.
- [4] Li, H., Hu, J., Shi, Y., & Liu, S. (2017). Dynamic behavior analysis and time delay feedback control of gear pair system with backlash non-smooth characteristic. *Journal of Vibroengineering*, 19(1), 302-313.
- [5] J. Wang, J. Zheng, and A. Yang, "An analytical study of bifurcation and chaos in a spur gear pair with sliding friction," *Procedia Eng.*, vol. 31, pp. 563-570, 2012.
- [6] A. Farshidianfar and A. Saghafi, "Global bifurcation and chaos analysis in nonlinear vibration of spur gear systems," *Nonlinear Dyn.*, vol. 75, no. 4, pp. 783-806, 2014.
- [7] C.-W. Chang-Jian and S.-M. Chang, "Bifurcation and chaos analysis of spur gear pair with and without nonlinear suspension," *Nonlinear Anal. Real World Appl.*, vol. 12, no. 2, pp. 979-989, 2011.
- [8] S. Zhou, G. Song, Z. Ren, and B. Wen, "Nonlinear dynamic analysis of coupled gear-rotor-bearing system with the effect of internal and external excitations," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 281-292, 2016.
- [9] Chen, J., Li, W., Xin, G., Sheng, L., Jiang, S., & Li, M. (2019). Nonlinear dynamic characteristics analysis and chaos control of a gear transmission system in a shearer under temperature effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(16), 5691-5709.
- [10] Sheng, L., Li, W., Wang, Y., Fan, M., & Yang, X. (2019). Nonlinear dynamic analysis and chaos control of multi-freedom semi-direct gear drive system in coal cutters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 62-77.
- [11] Xia, Y., Wan, Y., & Liu, Z. (2018). Bifurcation and chaos analysis for a spur gear pair system with friction. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(11), 1-19.
- [12] Xia, Y., Wan, Y., & Chen, T. (2018, July). Investigation on bifurcation and chaos control for a spur pair gear system with and without nonlinear suspension. In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 489-494). IEEE.
- [13] Arian, G., & Taghvaei, S. (2021). Dynamic analysis and chaos control of spur gear transmission system with idler. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 87, 104229.
- [14] Labbaf Khaniki, M. A., Salehi Kho, M., & Aliyari Shoorehdeli, M. (2022). Control and synchronization of chaotic spur gear system using adaptive non-singular fast terminal sliding mode controller. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 01423312221087578.
- [15] Huang, K., Cheng, Z., Xiong, Y., Han, G., & Li, L. (2021). Bifurcation and chaos analysis of a spur gear pair system with fractal gear backlash. *Chaos, Solitons & Fractals*, 142, 110387.
- [16] Gharagozloo, M. H., & Shahmansoorian, A. (2022). Chaos Control in Gear Transmission System using GPC and SMC Controllers. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(2), 545-556.

- [17] Valadbeigi, N., & Abtahi, S. M. (2022). Analysis and Control of Chaos in Nonlinear Gear System using Predictive Sliding Mode Control. *ADMT Journal*, 15(2), 97-104.
- [18] Liu, X., Zhao, F., Mei, X., Tao, T., & Shen, J. (2019). High-efficiency gear hobbing technics based on fuzzy adaptive control of spindle torque. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(10), 3331-3345.
- [19] Farshidianfar, A., Saghafi, A., & Akbari, A. A. (2014). Vibration control of gear-bearing dynamic system. *Modares Mechanical Engineering*, 14(6), 135-143.
- [۲۰] فرشیدیان فر، انوشیروان، ثقفی، امین. (۲۰۱۵). کنترل دوشاخه‌شدگی و آشوب در سیستم انتقال چرخ‌دنده. *مهندسی مکانیک مدرس*, ۱۴(۱۴), ۶۱-۶۸.
- [۲۱] آریان، ق.، قاسم، تقوایی، وطن‌خواه، رامین. (۲۰۲۱). کنترل ارتعاشات آشوبناک در سیستم انتقال قدرت چرخ‌دنده ساده به کمک کنترل مد لغزشی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, ۵۱(۱), ۸-۱.
- [۲۲] دلاوری، هادی، محدث‌زاده. (۲۰۱۷). کنترل آشوب در سیستم انتقال چرخ‌دنده با استفاده از روش کنترل مودلغزشی ترمینال تطبیقی جدید با عامل غیرخطی در ورودی کنترلی. *مجله کنترول*, ۱۰(۴), ۴۵-۵۳.
- [23] N. K. Raghuwanshi and A. Parey, "Effect of Back-side Contact on Mesh Stiffness of Spur Gear Pair by Finite Element Method," *Procedia Eng.*, vol. 173, pp. 1538–1543, 2017.
- [24] A. Farshidianfar and A. Saghafi, "Global bifurcation and chaos analysis in nonlinear vibration of spur gear systems," *Nonlinear Dyn.*, vol. 75, no. 4, pp. 783–806, 2014.
- [25] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [26] Abualigah, L., Abd Elaziz, M., Sumari, P., Geem, Z. W., & Gandomi, A. H. (2022). Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer. *Expert Systems with Applications*, 191, 116158.