تخمین پارامترهای سیستم فوق آشوب لورنز با استفاده از الگوریتم نهنگ بهبودیافته با الگوریتم جستجوی ممنوعه

مهسا اسماعیل‌نیا[۱]، مصطفی سعادتی‌فر[۲] و مهدی یعقوبی[۳*]

چکیده

سیستمهای آشوب، سیستم های دینامیکی بسیار پیچیده ای هستند با ویژگی های خاص مانند حساسیت زیاد به شرایط اولیه وعدم پیش بینی آماری ؛ اما با وجود رفتار به ظاهر اتفاقی، نتایج کاملاً قطعی هستند. تخمین پارامترهای اسیلاتورهای فوق آشوبناک، به عنوان یکی از مهم ترین مسائل در زمینه آشوب می باشد. تخمین پارامترهای سیستم های فوق آشوبناک را می توان به عنوان یک مسئله بهینه سازی چند متغیره در نظر گرفت. این مقاله قصد دارد تا روش نوینی برای تخمین پارامترهای سیستم فوق آشوب لورنز مبتنی بر بهبود الگوریتم نهنگ با الگوریتم جست و جوی ممنوعه ارائه دهد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که الگوریتم نهنگ توان رقابتی بالایی در مقایسه با الگوریتم های فراابتکاری مشابه را دارد. در این مطالعه از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای یافتن جواب های بهینه محلی استفاده شده تا از خطر افتادن در جوابهای بهینه محلی نیز پیشگیری شده باشد. نتایج حاصل از روش پیشنهادی در حل مسئله تخمین پارامتر سیستم فوق آشوب نشان داد که کمترین مقدار تابع هزینه توسط الگوریتم پیشنهادی با مقدار 1.2917e-21 به دست آمده است ، بنابراین می توان گفت که روش پیشنهادی دقت تخمین پارامتر را بهبود داده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم های فراابتکاری، تخمین پارامتر، سیستم های فوق آشوب، الگوریتم نهنگ، جستجوی ممنوعه

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

۱-مقدمه

سیستمهای آشوبناک رفتارهای دینامیکی دارند که دارای برخی از ویژگیهای خاص میباشند که از جمله آنها حساسیت بیش از حد سیستمهای آشوبناک به شرایط اولیه میباشد که موقعیت جدید به رفتارهای پیشین وابسته است و تغییری اندکی در شرایط اولیه ، باعث تغییرات بسیار قابل توجه در شرایط نهایی میشود.

آشوب پدیده‌ای است که در سیستم‌های غیرخطی و پویا رخ می‌دهد.این سیستم‌ها به شرایط اولیه بسیار حساس هستندوتغییر اندکی در شرایط اولیه موجب تفاوت های گسترده ای در رفتارآنها خواهد شد[۱]. همچنین سیستم های آشوبناک رفتار شبه تصادفی از خود نشان می‌دهند. یک سیستم آشوبگون سیستمی است که در نگاه اول به نظر می‌رسد رفتاری تصادفی داشته باشد، اما در حقیقت همین سیستم تحت حاکمیت قوانینی قرار دارد. شناسایی سیستم آشوبی در مخابرات ایمن،رباتهای موبایلی، رمزنگاری و...کاربرد دارد[۲]. از زمانی که نظریه آشویی و سیستم های آشوبی قدم به عرصه های علمی نهادند،تلاش های زیادی به منظور پیش بینی و کنترل رفتار این دسته از سیستم های غییرخطی انجام شده است با این حال،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: yaghoobi@mshdiau.ac.ir

۳. دانشیارگروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران

۱. دانشجوی رشته هوش مصنوعی و رباتیکز، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران

۲. دانشجوی رشته هوش مصنوعی و رباتیکز، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران

بسیاری از این روش ها نامعتبر هستند، زیرا پارامترهای سیستم آشوب شناخته شده نیستند.در دنیای واقعی با توجه به پیچیدگی های سیستم آشوب تعیین پارامترهای سیستم مشکل خواهد بود .بهمین دلیل مدلسازی یک رفتار آشوبناک با توجه به ویژگیهاوکاربردهای آن، اهمیت مضاعف پیدامیکند و نیاز است که دقت مدل افزایش یابد. هدف از شناسایی سیستم بدست آوردن پارامترهای مجهول سیستم فرعی بوده به طوریکه با دقت مناسبی به مقادیر اصلی همگرا شوند. شناسایی پارامترهای اسیلاتورهای آشوبناک، به عنوان یکی از مهم ترین مسائل در زمینه آشوب میباشد. در این تحقیق مسئله تخمین پارامتر سیستم، در قالب یک مسئله بهینه سازی بیان می شود. این مساله به کمک الگوریتم های بهینه سازی حل می شود.

الگوریتمهای تکاملی، روشهای جستجوی تصادفی هستند که تکامل طبیعی زیستی و یا رفتار اجتماعی موجودات که از طریق یادگیری، سازش و تکامل، هدایت میگردند، را تقلید مینمایند. این الگوریتمها با پیروی از قوانین احتمالی به جای قوانین قطعی و عدم نیاز به مشتق‌گیری و یا هر گونه اطلاعات کمکی و تنها با تابع هدف وشیوه تعیین ارزیابی از اطلاعات خام، جهت جستجو را مشخص مینمایند. با بکارگیری این روشها در زمان محاسباتی معقول ،راه حلهای سریع و نزدیک جواب بهینه سراسری برای مسائل بهینه سازی پیچیده فراهم میآید، لیکن هیچ کدام از این روشها تضمینی برای یافتن جواب بهینه سراسری به دست نمیدهد.

الگوریتم های فرااکتشافی بسیاری با توجه به ماهیت و مدل مسائل مورد نیاز تا کنون ارائه شده اند. میتوان از الگوریتم های ژنتیک ،بهینه سازی تراکم ذرات به عنوان شناخته شده ترین الگوریتم های فرااکتشافی نام برد. مانند بسیاری از الگوریتم های متاهیوریستیک، الگوریتم نهنگ مزایایی چون سادگی و انعطاف پذیری دارد. الگوریتم نهنگ به سادگی پیاده سازی می شود و مانند یک الگوریتم ساده می تواند برای حل طیف گسترده ای از مسائل، انعطاف پذیر باشد.

الگوریتم نهنگ که از استراتژی شکار شبکه حبابی نهنگ های کوهان دار الهام گرفته شده است[۳] که دارای ویژگی های متعددی چون سادگی، انعطاف پذیری، همگرایی سریع در فاز یادگیری و همچنین بهره گیری از جستجوگرهای محلی در ساختار الگوریتم می باشد.

الگوریتم نهنگ در مقایسه با سایر الگوریتم های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، PSOو ... دارای دقت و کارایی بالاتری می باشد[۴].

برآورد پارامترهای سیستم های آشوب یک مسئله مهم در زمینه ریاضیات محاسباتی و علوم غیر خطی است که تحقیقات و برنامه های کاربردی آن را افزایش داده است. در دنیای واقعی تعیین پارامترهای سیستم اشوب با توجه به پیچیدگی سیستم بسیار مشکل است، بنابراین، تخمین پارامتر برای سیستم اشوب به یک موضوع بسیار مهم تبدیل شده است. این امر باعث شده تحقیقات زیادی در زمینه تخمین پارامتر برای سیستم اشوب ارائه شود.

موسوی و همکارش در تحقیقی، مسئله برآورد پارامترهای سیستم های آشوب با استفاده از الگوریتم شبیه سازی (FA) مورد بررسی قرار دادند. سهم اصلی کار حاضر این است که یک نسخه اصلاح شده FA را با استفاده از محاسبات کسری در طی فرآیند جستجو معرفی می کند [۵]. پنگ[1] نشان داد که ،برآورد پارامتر یک سیستم آشوب موضوع مهمی در علم غیرخطی است و در سال های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. با این حال، روش های برآورد موجود باید بر اساس مقادیر اولیه شناخته شده در سیستم اصلی باشد. با این وجود مقادیر اولیه در بسیاری از موارد به

[1] Peng

دست نمی آید، که به بازسازی و کنترل سیستم های آشوب منجر نمی شود[۶]. زو[1] و همکارانش(۲۰۱۸) نشان داد که برآورد پارامتر یک مسئله تحقیق اساسی است که نگرانی های زیادی را در کنترل و هماهنگ سازی سیستم های آشوب به ارمغان آورده است. این مشکل می تواند به صورت ریاضی به عنوان یک مسئله بهینه سازی مستمر چند بعدی از طریق ساخت یک تابع آمادگی مناسب و سپس توسط الگوریتم های فراشناختی حل شود. الگوریتم گرده افشانی گل[2] های ترکیبی در این مقاله برای حل این مشکل به صورت موثرتر پیشنهاد شد[۷]. لازووس [3]و همکاران الگوریتم هوش هیجانی جدیدرا برای ارزیابی پارامترهای سیستم آشوب به وجود دارد. برای این منظور برآورد پارامترهای سیستم های لورنز[4]به عنوان یک مسئله چند بعدی صورت گرفته است و برای حل این مشکل یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر بهینه سازی ذرات با بهینه سازی کلون های مورچه[5] (PSO-ACO) به کار گرفته شده است. اولا، عملکرد الگوریتم PSO-ACO پیشنهاد شده بر روی یک مجموعه ای از سه عملگر معیار ارزیابی شده و تأثیر تنظیمات پارامتر بر کارایی PSO-ACO مورد بررسی قرار گرفت[۸].

پناهی وجعفری(۲۰۱۶) ، یک تابع هزینه جدید برای ارزیابی پارامتر در یک مدار آشفته با جاذب پنهان ایجاد کردند: یک مدار با یک سطح متعادل. برای به حداقل رساندن تابع هزینه پیشنهادی و به دست آوردن پارامترهای صحیح، از روش جدید و کارای بهینه سازی الگوریتم کریل[6] استفاده کردند [۹]. گائو[7]و همکاران(۲۰۱۵) درتحقیق خود، یک الگوریتم هماهنگ سازی تطبیقی – تسخیری ارائه دادند. در این الگوریتم برآورد پارامترهای سیستم آشوب تنها با استفاده از سیگنال های درایو انجام می شود. در طرح ارائه شده هر دو کنترل کننده هماهنگی مکانیکی و پارامترهای سازگاری ،فقط با استفاده از خروجی متداول سیستم های آشوب مدل سازی می شوند. این در برنامه های کاربردی معنی دار است، زمانی که سیگنال های مداوم قابل دستیابی نیستند. علاوه بر این، طرح های بتن برای شبکه عصبی سلولی کوانتومی (کوانتوم CNN) و سیستم چاوز شناخته شده چن طراحی شدند[۱۰]. لی[8] و همکارانش الگوریتم ترکیبی، با ترکیب تداخل دیفرانسیل با کلونی مصنوعی زنبور عسل برای حل معیار پارامتر برای سیستم های آشوب اجرا نمودند. الگوریتم آزمایشات بر روی سیستم لورنز و سیستم چن انجام شده است. نتایج و مقایسه های شبیه سازی نشان می دهد که الگوریتم تحقیق شده نتایج بهتر یا حداقل قابل مقایسه با تکامل دیفرانسیل، کلونی مصنوعی زنبور عسل، بهینه سازی ذرات زنبور عسل و الگوریتم ژنتیک ارائه داده است[۱۱]. احمدی و مجللی در تحقیقی، یک الگوریتم بهینه سازی ترکیبی جدید را با بهره گیری از ویژگی های تصادفی جستجو های آشوب و روش بهینه سازی علف های هرز[9] (IWO) معرفی نمودند. به منظور مقابله با نقاط ضعف مرتبط با روش معمول، ارائه الگوریتم بهینه سازی علف های هرز مهاجم پیشنهاد شده (CIWO) ارائه شد که توانایی های روش های جستجوی آشوب را شامل می شود. عملکرد الگوریتم بهینه سازی ارائه شده از طریق چندین توابع چند بعدی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، یک روش شناسایی برای سیستم های آشوب مبتنی بر الگوریتم CIWO با چندین مثال مشخص و مورد تایید قرار گرفت.[۱۲].

وانگ[10] و همکارانشدرتحقیق خود ، از یک الگوریتم بهینه سازی موثر جدید بر اساس نظریه زیست شناسی توزیع جغرافیایی موجودات زنده، بهینه سازی بر اساس زیست

[1] Xu
[2] Flower pollination algorithm
[3] Lazzús
[4] Lorenz sytem
[5] Ant-colony optimization
[6] Krill Herd
[7] Gao
[8] Li
[9] Invasive Weed Optimization
[10] Wang

شناسی (BBO)ارائه دادند [۱۳]. هی[1] برای برآورد پارامترهای سیستم لورنز یک رویکرد PSO استفاده نمودند[۱۴]. موسوی و همکاران از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ (EWOA) برای مقابله با مشکل شناسایی پارامتر یک سیستم WDPS استفاده کردند[۱۵]. یک الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ با کمک جانشین بهبودیافته، که به عنوان ISAWOA برای شناسایی پارامترهای سیستم‌های آشفته نشان داده می‌شود، توسط Shuhui Wang و همکاران در سال ۲۰۲۲ پیشنهاد شد[۱۶].

مدلسازی رفتار آشوبناک سیستم های دینامیکی با توجه به کاربرد های عدیده در جهان واقعی مانند مدار، ریاضیات،رمز نگاری، ماهواره، اینورترها، سیستم های قدرت، پزشکی، زیست شناسی، الکترو شیمیایی و غیره، مسئله ای مهم و تأمل برانگیز است . از طرفی مدل سازی یک رفتار آشوبناک با توجه به ویژگیهای آن :۱-غیر خطی شدید؛ ۲-پیچیده بودن؛ ۳-حساسیت به شرایط اولیه؛ ۴-ارگودیسیته؛ در مقام یک موضوع چالشی اهمیت مضاعف پیدا میکند و نیاز است که دقت مدل افزایش یابد. با توجه به دقت و کارایی بالایی که الگوریتم نهنگ نسبت به سایر الگوریتم ها دارا می باشد، تخمین بهینه پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم جدیدنهنگ بهینه شده باجستجوی ممنوعه هدف این مقاله میباشد. در این مقاله برای اولین بار الگوریتم بهینه سازی نهنگ ترکیب شده باجستجوی ممنوعه ،برای تخمین پارامتر سیستم آشوبی لورنز استفاده گردیده است تا کیفیت و کارآیی این روش در مقایسه با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات ونهنگ استاندارد سنجیده و اثبات گردد.

سازمان دهی این مقاله به این صورت است. در بخش دوم به تعاریف الگوریتم نهنگ، جزئیات پیاده سازی و نیز کاربردهای آن می پردازیم و مختصری درباره الگوریتم جستجوی ممنوعه بحث خواهیم کرد. سپس در مورد دربارهٔ تخمین پارامترهای سیستم بحث خواهیم کرد. در فصل سوم روش پیشنهادی برای حل مساله تخمین پارامتر را مطرح می کنیم و در بخش چهارم نیز به بررسی نتایج شبیه سازی، خواهیم پرداخت. نتیجه گیری کلی و پیشنهادات در بخش پنجم آورده شده است.

۲- روش

در این بخش روش های به کار برده شده در این مقاله بیان می شود. مفاهیم الگوریتم نهنگ و الگوریتم جستجوی ممنوعه بیان شده و سپس روش پیشنهادی ترکیب نهنگ با جستجوی ممنوعه بیان می شود.

۲-۱-الگوریتم نهنگ

الگوریتم های متاهیوریستیک که شامل رفتار های تکاملی و هوش تجمعی هستند امروزه در بسیاری از مسایل مورد استفاده قرار می گیرند. نحوه پردازش این روش ها از رفتار موجودات در طبیعت الهام گرفته شده است. الگوریتم نهنگ، بر استراتژی شکار گونه خاصی از نهنگ ها به نام نهنگ گوژ پشت استوار است. اجازه دهید تا در این بخش مختصری در مورد استراتژی شکار نهنگ گوژ پشت صحبت کنیم.

۲-۱-۱- استراتژی شکار نهنگ گوژپشت

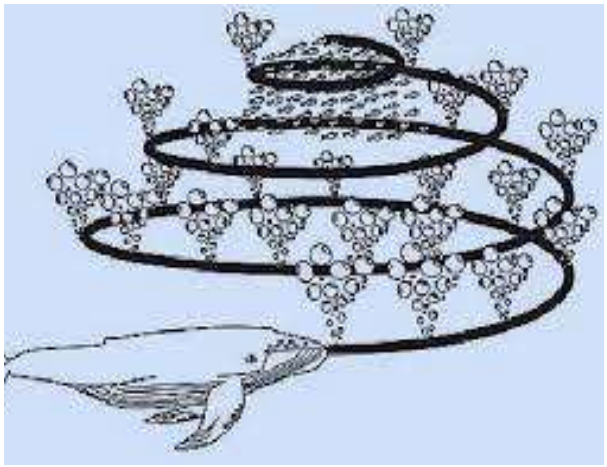
نهنگ ها به عنوان بزرگترین پستانداران جهان مورد توجه قرار دارند. آنها بیشتر به خاطر شکار خود معروف شده اند. آنها هرگز نمی توانند بخوابند، زیرا باید در سطح اقیانوس ها تنفس کنند. در حقیقت فقط نیمی از مغز آنها می خوابد. نهنگ ها حیواناتی بسیار باهوش و احساساتی هستند. نهنگ ها در ناحیه مرکزی مغز سلول هایی دارند که بسیار شبیه به سلول های بنیادی مغز انسان است. این سلول ها کارهایی از قبیل داوری، رفتارهای احساسی و رفتارهای اجتماعی انسان را انجام می دهند.

به عبارت دیگر سلول های بنیادی ما را از دیگری موجودات متفاوت می کند. نهنگ ها نسبت به انسان دو برابر سلول بنیادی دارند. همین مسئله باعث شده آنها حیواناتی بسیار هوشمند باشند. دانشمندان ثابت کرده اند که نهنگ های

[1] He

می توانند فکر کنند، یاد بگیرند، داوری کنند، با دیگران ارتباط برقرار کنند و حتی بسیار احساساتی باشند.

نهنگ های موجوداتی اجتماعی هستند. آنها بیشتر به صورت گروهی زندگی می کنند. نهنگ از یک روش تغذیه خاص به نام روش تغذیه حباب خالص[1] استفاده می کنند. نهنگ های ترجیح می دهند همیشه مجموعه ای از حشرات یا ماهی های کوچک سطح آب را شکار کنند. همانطور که در شکل یک نشان داده شده است، آنها هنگام شکار یک مجموعه ای از حباب های مجزا در یک مسیر دایره ای اطراف خود ایجاد می کنند. نهنگ ها هنگام شکار ، ابتدا به ۱۲ متر زیر سطح آب شیرجه می زند و سپس در یک مسیر حلزونی اطراف شکار حباب های مجزا ایجاد می کند.



شکل ۱ استراتژی شکار نهنگ گوژپشت

۲-۱-۲- مدل سازی ریاضی الگوریتم نهنگ

مدل سازی ریاضی این الگوریتم به سه بخش تقسیم می شود: محاصره شکار، حمله حباب-خالص (فاز بهره برداری[2] واستخراج الگوریتم بهینه سازی) و جستجوی شکار(فاز اکتشاف[3] الگوریتم بهینه سازی).

۲-۱-۳ محاصره شکار

نهنگ های می توانند شکار را تشخیص داده و دور آن حلقه بزنند، ولی موقعیت مکانی دقیق آنها را در ابتدا نمی دانند. بنابر در ابتدا یک تعداد موقعیت مکانی به صورت تقریبی ایجاد می شود. سپس بهترین موقعیت مکانی شناسایی شده و موقعیت های مکانی دیگر خود را با توجه به بهترین موقعیت مکانی بروز رسانی می کنند. این رفتار با استفاده از روابط ۱ و ۲ مدل سازی ریاضی می شود [۴]:

$$D=\left|\vec{C}.\vec{X}^{*}(t)-\vec{X}(t)\right| \quad (۱)$$

$$\vec{X}(t+1)=\vec{X}^{*}(t)-\vec{A}.\vec{D} \quad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲) ، t شماره مرحله اخیر، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردارهای ضرایب، $\vec{X}^{*}(t)$ بردار بهترین موقعیت مکانی در مرحله t و $\vec{X}(t)$ بردار موقعیت مکانی در مرحله t را نشان می دهد. بردارهای ضرایب $\vec{A}$ و $\vec{C}$ با استفاده از روابط (۳) و (۴) بدست می آید.

$$\vec{A}=2\vec{a}.\vec{r}-\vec{a} \quad (۳)$$

$$\vec{C}=2.\vec{r} \quad (۴)$$

$\vec{a}$ یک بردار است که عناصر آن با افزایش تعداد مراحل اجرا به طور خطی از ۲ به صفر کاهش می یابد. $\vec{r}$ بردار اعداد تصادفی در بازه [0,1] است.

دو روش برای مدل سازی ریاضی رفتار ایجاد حباب-خالص نهنگ ها طراحی شده است که به شرح ذیل است:

- **مکانیزم کاهش محدوده محاصره**

این مکانیزم با کاهش خطی ارزش عناصر بردار $\vec{a}$ از ۲ به صفر حاصل می شود. ارزش عناصر بردار $\vec{A}$ نیز با کاهش

[1] Bubble net
[2] Exploitation
[3] Exploration

خطی بردار $\vec{a}$ به صورت خطی کاهش می یابد. محدوده عناصر بردار $\vec{A}$ بازه بسته$[-\vec{a}, \vec{a}]$ می باشد.

- **بروز رسانی حلزونی موقعیت مکانی**

در این مرحله موقعیت های مکانی کاندید با استفاده از بهترین موقعیت مکانی کاندید بروز رسانی می شود. رابطه (۵) موقعیت مکانی کاندید را بروز رسانی می کند.

(۵)

$$\vec{X}(t+1)=\begin{cases}\vec{X}^{*}(t)-\vec{A}.\vec{D} & \text{if } p<0.5\\ \vec{D}'.e^{bl}.\cos(2\pi l)+\vec{X}^{*}(t) & \text{if } p\geq 0.5\end{cases}$$

در رابطه (۵) ، $\vec{D}'=\left|\vec{X}^{*}(t)-\vec{X}(t)\right|$ فاصله میان موقعیت مکانی کاندید و بهترین موقعیت مکانی کاندید را نشان می دهد. bیک عدد ثابت برای تعریف شکل مارپیچی لگاریتمی می باشد. L یک عدد تصادفی در بازه بسته $[0,1]$ است. p یک عدد تصادفی در بازه بسته $[0,1]$ می باشد.

۲-۱-٤ جستجوی شکار(فاز اکتشاف الگوریتم بهینه سازی)

در این مرحله هر موقعیت مکانی کاندید یک موقعیت مکانی کاندید دیگر از مجموعه موقعیت های مکانی به طور تصادفی انتخاب می کند. سپس موقعیت مکانی خود را با توجه به موقعیت مکانی تصادفی بروز رسانی می کند. روابط (۶) و (۷)مدل سازی ریاضی این رفتار را نشان می دهد.[۴].

$$D=\left|\vec{C}.\vec{X}_{rand}(t)-\vec{X}(t)\right| \qquad (۶)$$

$$\vec{X}(t+1)=\vec{X}_{rand}(t)-\vec{A}.\vec{D} \qquad (۷)$$

۲-۲- الگوریتم جستجوی ممنوعه

جستجوی ممنوعه(TS) یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط گلوور Glover معرفی شد. در سال ۱۹۹۷، اولین کتابی که کاملاً به جستجوی ممنوعه اختصاص داشت توسط گلوور و لاگونا منتشر شد . واژه تابو از تُنگان زبان مردم جزایر پلینزی در اقیانوس آرام گرفته شده‌است. این واژه به معنای شیء مقدسی است که به دلیل قداست نباید آن را لمس کرد. بر اساس واژه‌نامه‌ی وِبستر، امروزه این واژه در معنای «ممنوعیت ایجاد شده به دلیل فرهنگ اجتماعی برای ایجاد اقدام حفاظتی» یا «ممنوعیت چیزی که دارای ریسک است»، به کار می‌رود . معنای اخیر واژه تابو، با تکنیک جستجوی ممنوعه کاملاً سازگار است. ریسکی که در الگوریتم جستجوی ممنوعه از آن اجتناب می‌شود، خطر مسیرهای نامناسب است.

۲-۲-۱- ساختار کلی جستجوی ممنوعه

برای رسیدن به جواب بهینه در یک مسئله بهینه‌سازی، الگوریتم جستجوی ممنوعه ابتدا از یک جواب اولیه شروع به حرکت می‌کند. سپس الگوریتم بهترین جواب همسایه را از میان همسایه‌های جواب فعلی انتخاب می‌کند. در صورتی که این جواب در فهرست ممنوعه قرار نداشته باشد، الگوریتم به جواب همسایه حرکت می‌کند؛ در غیراین‌صورت الگوریتم معیاری به نام معیار تنفس را چک خواهد کرد. بر اساس معیار تنفس اگر جواب همسایه از بهترین جواب یافت شده تا کنون بهتر باشد، الگوریتم به آن حرکت خواهد کرد، حتی اگر آن جواب در فهرست ممنوعه باشد. پس از حرکت الگوریتم به جواب همسایه، فهرست ممنوعه بروزرسانی می‌شود؛ به این معنا که حرکت قبل که بوسیله‌ی آن به جواب همسایه حرکت کردیم در فهرست ممنوعه قرار داده می‌شود تا از بازگشت مجدد الگوریتم به آن جواب و ایجاد سیکل جلوگیری شود. در واقع فهرست ممنوعه ابزاری در الگوریتم جستجوی ممنوعه است که توسط آن از قرار گرفتن الگوریتم در بهینه‌ی محلی جلوگیری می‌شود. پس از قرار دادن حرکت قبلی در فهرست ممنوعه، تعدادی از حرکت‌هایی که قبلاً در فهرست ممنوعه قرار گرفته بودند از فهرست خارج می‌شوند.

مدت زمانی که حرکت‌ها در فهرست ممنوعه قرار می‌گیرند توسط یک پارامتر که زمان ممنوعه نام دارد تعیین می‌شود. حرکت از جواب فعلی به جواب همسایه تا جایی ادامه می‌یابد که شرط خاتمه دیده شود. شرط‌های خاتمه متفاوتی می‌توان برای الگوریتم در نظر گرفت. به طور مثال محدودیت تعداد حرکت به جواب همسایه می‌تواند یک شرط خاتمه باشد.

حافظه الگوریتم می تواند از دو نوع recency و یا frequency باشد.

حافظه recency : حافظه کوتاه مدت در روش جستجوی ممنوع نوعی از جستجوی فعال را جهت یافتن بهترین جواب ها(جواب‌هایی با بیشترین مطلوبیت) تشکیل می دهد و می‌توان اینگونه بیان نمود که هسته اصلی جستجوی ممنوع، در فرایند کوتاه مدت مجسم می شود. این حافظه لیستی با ابعاد N رکورد می‌باشدکه N تا از آخرین حرکاتی را که الگوریتم با آن مواجه بوده است را به عنوان tabu نگهداری می‌کند.

حافظه frequency : این حافظه که به عنوان حافظه بلندمدت شناخته می‌شود با اضافه نمودن اطلاعات تکمیلی دیگری از قبیل اینکه چند بار یک حرکت و یا جواب ممنوع جستجو شده است، مکمل حافظه recency می‌باشد. در حالت کلی جستجوی ممنوع با در نظر گرفتن حافظه بلند مدت و استراتژی‌های مرتبط با آن قوی‌تر می‌شود.

۲-۲-۲- استراتژی‌های پیشرفته جستجوی ممنوعه

ساختار کلی جستجوی ممنوعه اغلب جوابگوی مسائل بزرگ نیست. بنابراین به منظور افزایش قدرت الگوریتم از استراتژی‌های زیر که معروف به استراتژی‌های پیشرفته جستجوی ممنوعه هستند استفاده می‌شود :

• استراتژی فهرست کاندید : در یک TS عادی، برای حرکت از یک جواب فعلی به یک جواب همسایه، باید مقدار تابع هدف برای هر عنصر از همسایه‌ها ارزیابی شود. این کار می‌تواند از لحاظ محاسباتی بسیار هزینه بر باشد. روشی دیگر، این است که به جای آن که تمامی همسایه‌ها بررسی شود، تنها یک زیرمجموعه‌ی تصادفی از همسایه‌ها در نظر گرفته شود، که در نتیجه هزینه‌ی محاسباتی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. انتخاب زیرمجموعه‌ای از جوابهای همسایه به صورت تصادفی، می‌تواند به عنوان یک مکانیزم ضد چرخه عمل کند؛ این کار اجازه می‌دهد که از فهرست ممنوعه‌ی کوچکتری نسبت به کل همسایگی، استفاده شود. البته باید در نظر داشت که این کار یک عیب مهم دارد و آن احتمال از دست دادن جوابهای خوب است، بنابراین احتمال‌هایی را نیز می‌توان به کار برد تا معیارهای ممنوعه فعال شود.

• استراتژی تقویت : استراتژی تقویت به معنای یافتن حرکت‌های خوب و افزایش انجام آن حرکت‌ها در الگوریتم است. تقویت، در بسیاری از پیاده‌سازی‌های TS استفاده می‌شود، اما همیشه ضروری نیست، زیرا حالت‌های بسیاری وجود دارد که در آنها جستجوی معمولی کفایت می‌کند.

• استراتژی تنوع بخشی : روش‌های مبتنی بر جستجوی محلی، آن‌قدر محلی هستند که زمان زیادی و یا تمامی زمان خود را در بخش محدودی از فضای جستجو صرف می‌کنند. نتیجه‌ای که از این واقعیت می‌توان گرفت، این است که هر چند جواب‌های خوبی به وسیله‌ی این روشها به دست می‌آید، اما ممکن است جستجو از اکتشاف مناطق بهتر باز بماند و بنابراین به جواب‌هایی برسد که از جواب بهینه، بسیار دور هستند. تنوع‌بخشی، یک مکانیزم الگوریتمیک است که برای حل این مشکل تلاش می‌کند. برای انجام این کار، تنوع‌بخشی،

جستجو را مجبور می‌کند به سوی مناطقی که تا کنون کشف نشده، حرکت کند.

• مجوز دادن به جوابهای نشدنی: در حالت‌هایی که شرایط مسئله بسیار محدود کننده و انحصاری باشند و از جستجوی موثر فضای جواب جلوگیری کنند از این استراتژی استفاده می‌شود. طی این استراتژی محدودیت‌های مسئله آزاد شده و بجای آنها یک مقدار جریمه به تابع هدف اضافه می‌شود.

۲-۳- تخمین پارامترسیستم های آشوبناک

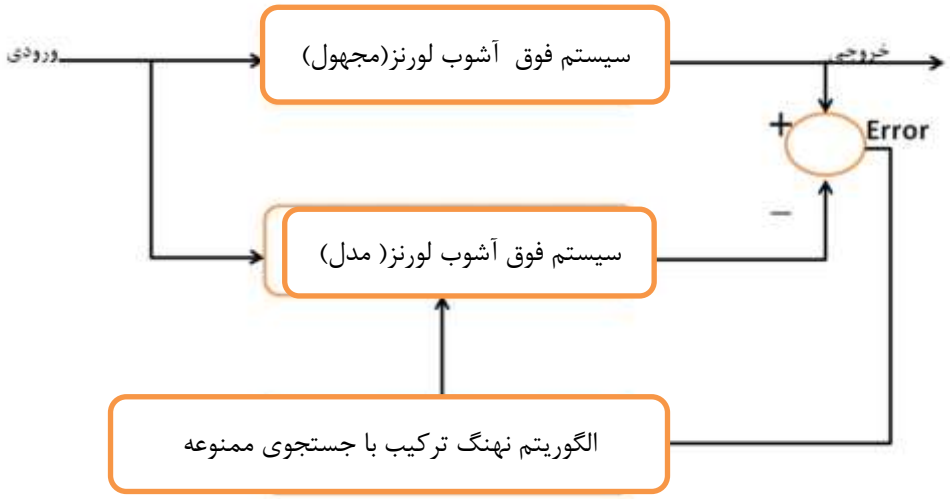
شناسایی سیستم علاوه بر اینکه در بحث ایجاد مدل برای طراحی کنترل کننده کاربرد دارد کاربردی مهم و چه بسا اصلی تر آن در ایجاد فهم بهتر از سیستم و شبیه سازی حالتهای مختلفی میباشد که ممکن است در عمل پیاده سازی آنها غیر ممکن و یا هزینه بر باشد . در مدلسازی سیستم یا یک پدیده ،به صورت ریاضی توصیف میشود. این پدیده میتواند هر سیستم فیزیکی مانند مدار الکتریکی و بدن انسان باشد. در این سیستم ورودی و خروجی وجود دارد . برای توصیف این سیستم باید مدلی را در نظر گرفته شود که اگر همان ورودیها به آن اعمال شود اختلاف خروجی مدل با سیستم اصلی صفر شود . تخمین مدل دقیق امکان پذیر نیست،بنابراین سعی می شود این اختلاف کمینه گردد. هر چه این اختلاف کمتر شود مدل دقیق تر خواهد بود. این خطا را میتوان به صورت میانگین مربعات آن نوشت و به صورت تابع هزینه درآورد و سپس به کمک روشهای مناسب آن را کمینه نمود . اگر چه تحلیل سیستم واقعی یا پدیده امکان پذیر نیست و درک روشنی از پدیده در اختیار نمیباشد، اما ارائه یک مدل مناسب برای پدیده و تحلیل مدل امکان پذیر است. به عمل بدست آوردن این مدل شناسایی سیستم گفته می شود می توان یک سیستم را به صورت معادلات دیفرانسیلی توصیف نمود. در این معادلات دیفرانسیل ضرایبی از بردارهای حالت وجود دارند که به آن ضرایب پارامترهای سیستم گفته میشود. فرض میشود که سیستمی با ضرایب معلوم و سیستمی با ضرایب مجهول وجود دارد به این دو سیستم به ترتیب سیستم پایه وپیرو گفته میشود. اگر ورودی یکسان به دو سیستم اعمال شود تابع هزینه به صورت اختلاف خروجی گرفته شده از دو سیستم بوسیله میانگین مربعات خطا بین دو خروجی نوشته میشود. بنابراین میتوان با روش های بهینه سازی این تابع هزینه را کمینه نمود. هر چقدر مقدار تابع هزینه حداقل گردد پارامتر تخمین زده شده سیستم مجهول به سیستم اصلی نزدیکتر خواهد بود. به این عمل یعنی بدست آوردن پارامتر مجهول، تخمین پارامتر یا شناسایی سیستم گفته میشود . طبق نکات گفته شده در بالا شناسایی سیستم شامل دو بخش یعنی ۱-بدست آوردن مدل مناسب و۲- تخمین زدن پارامترهای مدل میباشد. خوشبختانه اطلاعات کافی در مورد ساختار بسیاری از سیستم های مهندسی و فرآیندهای صنعتی در دسترس میباشد. بنابراین مسئله شناسایی سیستم معمولا به یک مسئله تخمین پارامتر کاهش یافته است.

۲-۴- معرفی معادلات دینامیکی سیستم فوق آشوب لورنز

معادلات دینامیکی سیستم آشوب بصورت زیر می باشد:

$$\dot{X} = \sigma_1 (y - x)$$

$$\dot{Y} = \sigma_2 x - xz - y$$



شکل ۲ فلوچارت تخمین پارامتر سیستم فوق آشوب با روش پیشنهادی

$$\dot{Z}^{*} = xy - \sigma_3 z$$

که در آن $\sigma_1 = 10, \sigma_2 = 28, \sigma 3 = 8/3$ می‌باشد.

۲-۵- تخمین پارامتر سیستم مجهول با روش پیشنهادی

به در این تحقیق ما مدل فوق آشوبی که پارامترهای آن نامعین است را با الگوریتم نهنگ ترکیبی باجستجوی ممنوعه که ویژگیهای بیان شده درزیر را دارا می باشد تخمین میزنیم و انتظار داریم با توجه به توانمندی های این روش به دقت و سرعت بالاتری دست یابیم.دلایل بسیاری برای موفقیت الگوریتم نهنگ وجود دارد:

• باتوجه به تئوری No Free- Lunch ،هیچ الگوریتم بهینه سازی برای حل تمام مسائل بهینه سازی وجودندارد.بااستفاده از آزمونهای مختلف،ثابت می شودکه WOAبهتر از بسیاری از الگوریتم هاست وجایگزین مناسبی برای حل مسائل بهینه سازی در میان الگوریتمهای مشهور است [۴].

• قدرت اکتشاف واستخراج بالا ذاتی این الگوریتم که از اعمال روی Test-Functionها قابل اثبات است.

• قدرت در حل مسائل واقعی بافضای چندبعدی ویامحدود وحل مسائل پیوسته وگسسته.

• توازن مناسب این الگوریتم بین اکتشاف واستخراج.

به منظور بهبود عملکرد، در بخش جستجوی محلی از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده شده است.شمای کلی فرایند پیشنهادی به شکل ۲ می باشد.

۳- الگوریتم نهنگ ترکیب شده با جست و جوی ممنوعه

به منظور بهبود الگوریتم نهنگ، از الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده می‌کنیم. بدین صورت که در هر تکرار از الگوریتم بدلیل رعایت توازن بین سرعت و دقت ، فقط روی ۱۰ درصد از جمعیت جواب‌ها که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، الگوریتم جستجوی ممنوع را اعمال می کنیم. لازم به ذکر است که این کمیت با توجه به نتایج سعی و خطا در پیاده سازی بدست آمده است .

سپس موقعیت این اعضای جدید ، ارزیابی شده و اگر بهتر از موقعیت قبلی خود باشند، جایگزین می‌شوند. در غیر این صورت تغییری اتفاق نمی‌افتد ودر نتیجه بهترین موقعیت قبلی تغییری نمیکند. در هر تکرار یکی از توابع یا اکشن های مربوط به جست و جوی محلی انجام می شود سپس بلافاصله آن تابع یا اکشن به فهرست ممنوع وارد شده تا در تکرار بعد مورد استفاده قرارنگیرد و یکی دیگر از توابع اجرا شود. با این تکنیک ذاتی جست و جوی ممنوعه ازخطر افتادن در دام بهینه محلی و حرکت به سمت مسیر

نادرست جلوگیری می‌شود. با توجه به مطالب فوق شبیه سازی‌ها به منظور شناسایی سیستم آشوبی لورنز انجام می-دهیم.

مراحل الگوریتم پیشنهادی که حاصل ترکیب الگوریتم نهنگ و جست و جوی ممنوعه میباشد را می توان به صورت زیر لیست کرد:

۱. ایجاد جمعیت اولیه تصادفی

۲. فرا خوانی پارامترهای مجهول مدل از الگوریتم نهنگ

۳. بهینه سازی جوابها باالگوریتم جستجوی ممنوعه

۴. اجرای سیستم شبیه سازی شده و محاسبه تابع هزینه

۵. به روز رسانی موقعیت شکار با استفاده از تابع هزینه به دست آمده

۶. پایان الگوریتم اگر به معیار موردنظر (دقت موردنظر)رسیده باشد،درغیراینصورت بازگشت به مرحله ۲

٤- شبیه سازی و نتایج

در این بخش به ارائه و بررسی نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی بااستفاده ازنرم افزار MATLAB پرداخته می-شود. ابتدا نتایج شبیه سازی توابع محک از CEC2014 بررسی می شود [۱۷]. سپس نتایج شبیه سازی حاصل از بکارگیری الگوریتم پیشنهادی جهت تخمین بهینه پارامترهای سیستم فوق آشوب لورنز ارائه میشود. علاوه بر این جهت ارزیابی عملکرد بهتر و دقت بالاتر الگوریتم نهنگ نسبت به الگوریتم pso ، پارامترهای سیستم آشوبی لورنز با الگوریتم PSO نیز تخمین زده میشود و مقادیر مربعات خطای حاصل از تخمین پارامترها توسط سه الگوریتم نهنگ استاندارد و PSO نهنگ ترکیب شده با جستجوی ممنوعه با یکدیگر مقایسه می گردد.

٤-١ نتایج شبیه سازی توابع محک

توابع محک انتخابی شامل توابع محک Ackley, Rosenbrock, Griewank, BentCigar, Discus, Elliptic هستند.

شکل ۳- فلوچارت الگوریتم ترکیبی نهنگ و جست و جوی ممنوعه

جدول ۱- نتایج بدست آمده مربوط به کمینه سازی توابع محک با استفاده از الگوریتم‌های WOATS,WOA,PSO

WOATS			WOA			PSO			توابع محک
MIN	MEAN	STD	MIN	MEAN	STD	MIN	MEAN	STD	معیار ارزیابی
8.881e-16	3.7e-13	0.5326	0.005445	4.3145	8.3143	3.065	3.8300	0.4219	**Ackley**
1.110e-15	0.13820	0.151	0.01724	0.1393	0.0907	0.030	0.07623	0.03128	**Griewank**
1.767e-16	0.08985	0.085	6.79e-09	1801.08	5624.9362	3.2497	3.2497	7.283	**Rosenbrock**
5.273 e-08	5.175e-05	9.93 e-05	167.53	5154.029	8590.36	209.76	639.30	356.906	**Elliptic**
1.174e-13	1.164e-08	2.81e-05	1.86e-06	1.23e-05	8.30e-06	47847.9	88276.015	41811.944	**BentCigar**
6.143e-08	0.00194	0.001932	173.23	173.232	124.64	0.3491	0.9524	0.4127	**Discus**

الگوریتم نهنگ ترکیب شده با جستجوی ممنوع با الگوریتم¬های نهنگ و بهینه سازی توده ذرات مقایسه شده است.تعداد بیشینه تکرار برابر با ۲۰۰ و اندازه جمعیت کل برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. هر الگوریتم ۳۰ بار اجرا شده است. نتایج مربوط به کمترین، میانگین و انحراف معیار مربوط به این اجراها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. از جدول ۱ مشاهده می‌شود که در تمام توابع محک مقدار کمترین تابع هزینه بدست آمده از الگوریتم WOATS در مقایسه با الگوریتم‌های WOA و PSO کمتر است. از نظر مقدار میانگین اجراها الگوریتم پیشنهادی نیز بهتر از دو الگوریتم دیگر است. از نظر مقدار انحراف معیار نیز الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با دو الگوریتم دیگر در مجموع مقادیر کمتری بدست آورده است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی در کمینه سازی توابع محک در مقایسه با WOA,PSO کارایی و عملکرد بهتری داشته است.

٤-۲- شبیه سازی ونتایج تخمین پارامتر

سیستم لورنز

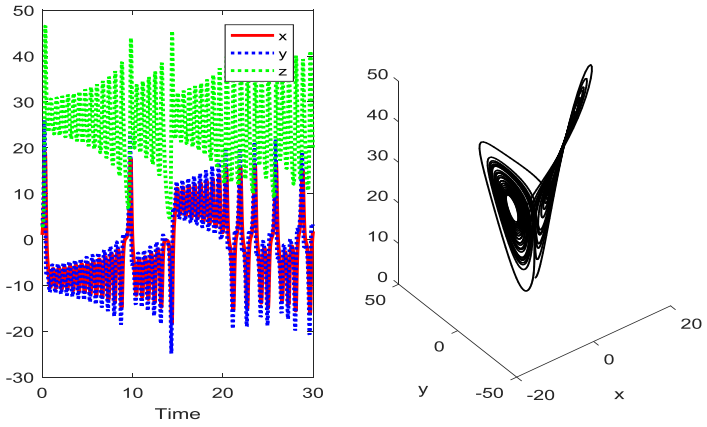
سیستم لورنز را در نظر می گیریم و منحنی های مربوط به آن را رسم می کنیم.

$$\dot{X} = \sigma_1 (y - x)$$

$$\dot{Y} = \sigma_2 x - xz - y$$

$$\dot{Z} = xy - \sigma_3 z$$

که در آن $\sigma_1 = 10, \sigma_2 = 28, \sigma 3 = 8/3$ می باشد. شکل ۴ منحنی فاز سه بعدی و متغیرهای حالت سیستم لورنز را نشان داده است.



شکل ٤- منحنی سیگنالهای x,y,z بر حسب زمان و منحنی فاز سیستم لورنز

جدول ۲- مقایسه نتایج بهترین تخمین پارامتر سیستم لورنزتوسط الگوریتم های PSO,WOA,WOATS

الگوریتم	a	B	c
PSO	9.999972425650068	28.000017924808944	2.666663764856644
WOA	9.999999449354078	28.000000175987260	2.666666628581268
WOATS	9.999999999979776	28.000000000021959	2.666666666664342

جدول ۳- مقایسه نتایج بهترین ، میانگین و بدترین مقدار تابع هزینه مربوط به تخمین پارامتر سیستم لورنز

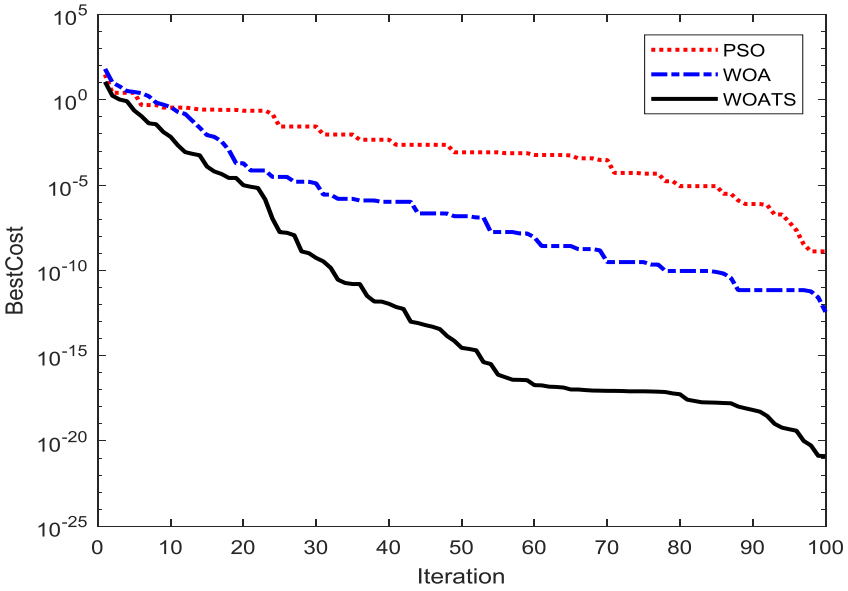
الگوریتم	بهترین	بدترین	میانگین
PSO	1.3056e-09	6.911e-07	3.174207e-07
WOA	3.695e-13	2.9831e-07	2.9886655509e-08
WOATS	1.2917e-21	2.6607e-19	1.1463975e-19

در شبیه سازی ها تعداد تکرار بیشینه برابر با ۱۰۰ و اندازه جمعیت برابر با ۵۰ در نظر گرفته شده است. محدوده متغیرها به این صورت در نظر گرفته شده است:

$$0 \le a \le 40, 0 \le b \le 50, 0 \le c \le 5$$

اندازه گام زمانی برابر با ۰,۰۱ و تعداد نمونه ها برابر با ۲۰۰ انتخاب شده است. شبیه سازی ۱۵ بار اجرا شده است. نتایج مقایسه ای تخمین پارامترها در جدول ۲ نشان داده است و میانگین ، بدترین و بهترین جواب در جدول ۲ آورده شده است.

از جدول ۳ مشاهده می شود که الگوریتم نهنگ از نقطه نظر بهترین، بدترین ومیانگین مقدار تابع هزینه بدست آمده، نتیجه با دقت بالاتری در مقایسه با PSO بدست آورده است.



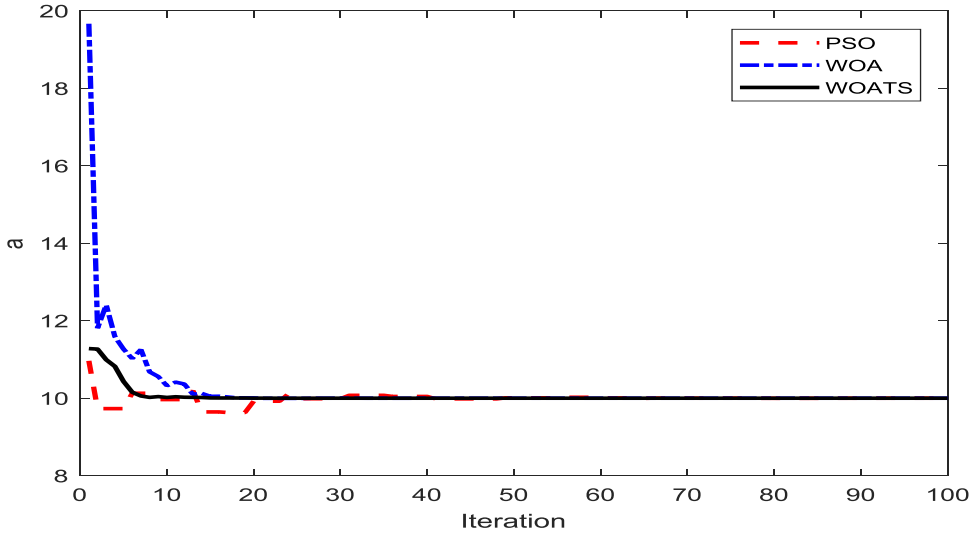
شکل ۵- منحنی بهترین هزینه بر حسب تعداد به کمک الگوریتم های PSO,WOA,WOATS

از طرفی الگوریتم پیشنهادی WOATS از نقطه نظر بهترین ، بدترین و میانگین جواب ها، توانسته است که نتیجه با دقت بالاتری در مقایسه با الگوریتم های PSO و WOA بدست آورد.

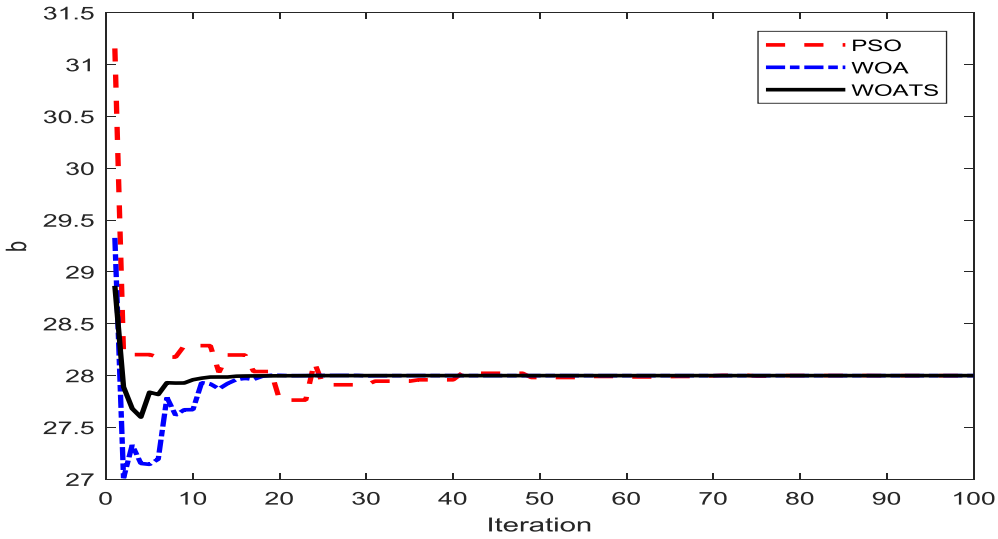
در شکل ۵ منحنی بهترین هزینه بدست آمده از سه الگوریتم مقایسه شده است. در شکل های ۳ الی ۵ نتایج مربوط به تخمین پارامترهای a,b,c نشان داده شده است.

از شکل ۵ آشکار است که روش پیشنهادی WOATS در تعداد تکرار کمتری به جواب با هزینه پایینتر رسیده است.در نتیجه در تعداد تکرار کمتری نسبت به PSO و WOA به نتیجه رسیده است.

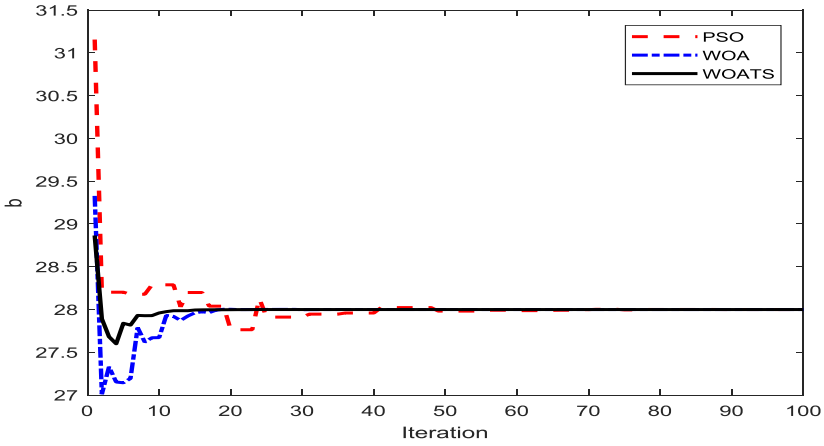
از شکل ۶ مشاهده می شود که روش پیشنهادی در تعداد تکرار کمتری از الگوریتم نسبت به دو روش PSO و WOA پارامتر a را تخمین زده است.



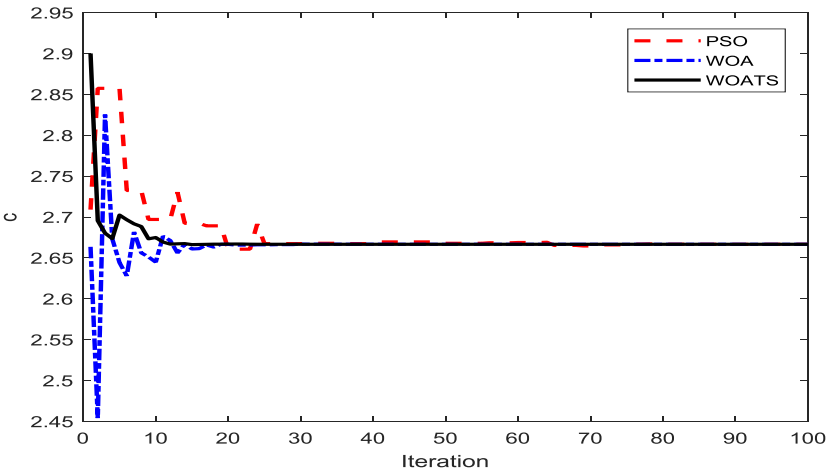
شکل ٦- منحنی تخمین پارامتر a بر حسب تعداد به کمک الگوریتم های PSO,WOA,WOATS



شکل ۷- منحنی تخمین پارامتر b بر حسب تعداد به کمک الگوریتم های PSO,WOA,WOATS



شکل ۷– منحنی تخمین پارامتر b بر حسب تعداد به کمک الگوریتم های PSO,WOA,WOATS



شکل ۸–منحنی تخمین پارامتر c بر حسب تعداد به کمک الگوریتم های PSO,WOA,WOATS

ا ز شکل ۷ مشاهده می شود که پس از ۱۲ تکرار روش پیشنهادی توانسته است که پارامتر b را تخمین بزند . اما دو روش دیگر در تعداد تکرار بالاتری به نتیجه مطلوب رسیده اند. از شکل ۸ مشاهده می شود که سرعت همگرایی الگوریتم WOATS در تخمین پارامتر C بیش از دو روش دیگر PSO و WOA است. همچنین دو روش دیگر نوسان و تغییرات زیادی در تخمین این پارامتر داشته-اند. با توجه به نتایج، در مجموع دقت و همگرایی به نتیجه مطلوب در تعداد تکرار کمتر، روش پیشنهادی الگوریتم نهنگ ترکیب شده با الگوریتم جستجوی ممنوع بهتر از PSO و WOA عمل نموده است.

۵– نتیجه گیری

در این مقاله، یک رویکرد ترکیبی جهت تخمین پارامترهای سیستم فوق آشوب لورنز پیشنهاد گردید که هدف آن بالابردن دقت در تخمین پارامترها و در عین حال افزایش سرعت همگرایی الگوریتم است.در این روش مسئله تخمین پارامتر های سیستم فوق آشوب مورد مطالعه (سیستم فوق آشوب لورنز) همانند یک مسئله بهینه سازی چندبعدی مطرح شد و در جهت حل آن از روشی ابتکاری حاصل ترکیب الگوریتم فرااکتشافی قدرتمند و جدید نهنگ با الگوریتم جست و جوی ممنوعه با عنوان WOATS استفاده گردید.

دلیل انتخاب الگوریتم نهنگ قدرتمند بودن ذاتی این الگوریتم از جهت توازن بین فرایندهای اکتشاف و استخراج است که دو جزء جدانشدنی تمام الگوریتم های فرااکتشافی می باشند و پرواضح است که میزان توازن بین این دو، قدرت هر الگوریتم را مشخص می نماید. اما از آنجا که در تمام مسائل بهینه سازی همواره خطر افتادن در بهینه محلی وجود دارد که موجب کاهش سرعت همگرایی و یا کاهش دقت جواب های بدست آمده از آنها می گردد ، در این کار پژوهشی ،الگوریتم نهنگ با هدف جلوگیری از

مخاطرات مربوط به بهینه های محلی با جست وجوی ممنوعه ترکیب شد .

موضوع مقایسه روش ابتکاری برای نشان دادن قدرت و کارایی الگوریتم جدید مسئله ای حائظ اهمیت است .لازم به ذکر است دلیل مقایسه WOATS با PSO شباهت ذاتی و ساختاری این دو روش می باشد. اگرچه در بررسی نتایج برخی روش های ترکیبی انتظار مقایسه روش ابتکاری با هر یک الگوریتم های سازنده آن روش وجود دارد اما از آنجا که الگوریتم TS یک الگوریتم جست و جوی محلی است به جای شروع از جمعیتی از جواب ها از یک نمونه آغاز می شود و به عبارت دیگر مبتنی بر جمعیت نیست و ساختار کلی جستجوی ممنوعه اغلب جوابگوی مسائل بزرگ نمی باشد انجام مقایسه WOATS با TS از جنبه آکادمیک حاوی اطلاعات ارزشمند بنطر نمی رسید.

نتایج حاصل از انجام شبیه سازی الگوریتم ها در محیط آزمایشی نرم افزار متلب و ترسیم و بررسی نمودارهای مقایسه ای ، مبین این مطلب است که علاوه برافزایش دقت تخمین پارامتر توسط WOATS نسبت به WOA و PSO،هدف دیگر که رسیدن به پاسخ موردنظر در تعداد تکرار کمتر الگوریتم می باشد یا همان سرعت همگرایی بیشتر نسبت به الگوریتم های مورد مقایسه (WOA و PSO)، نیز بدست آمده است .

پس در یک نتیجه گیری کلی می توان گفت WOATS ، قدرت WOA در جست و جوهای سراسری و حل مسائل پیچیده و بزرگ که ناشی از برقراری توازن قابل قبول در اکتشاف و استخراج می باشد ، را در کنارافزایش سرعت همگرایی منتج از ترکیب با TS به ارث برده است.

الگوریتم پیشنهادی می‌تواند در تخمین دقیق تر پارامترهای سیستم فوق آشوب لورنز و ایجاد یک مدل با کارایی بالاتر بکار رود. همچنین آزمایش الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم های فوق آشوب دیگر با ویژگی‌های متفاوت نسبت به لورنز نیز دید وسیعتری از این روش می‌دهد و برای کاربردی‌تر کردن الگوریتم مؤثر است.

از سویی دیگر مباحث مهمی در الگوریتم نهنگ وجود دارند که نیاز به تحقیق بیشتری است. این مسائل کلیدی عبارتند از: تنظیم پارامتر، کنترل پارامتر و تسریع همگرایی.

در مرحله اول تنظیم پارامتر برای هر الگوریتم متاهیوریستیک اهمیت دارد تا به درستی بکار برود. تقریباً در همه موارد، کارایی یک الگوریتم تا حد زیادی به پارامترهای آن بستگی دارد.

در مرحله دوم در ارتباط با تنظیم پارامتر موضوع مهم دیگری وجود دارد که آن کنترل پارامتر است. در الگوریتم، بسیاری از تنظیمات پارامتر ثابت است و این تنظیمات در طول تکرارها تغییر نمی کند. این می تواند مفید باشد اما گاهی نیاز داریم که مقادیر پارامترهای مربوط به الگوریتم را در طول فرایند جستجوی تکراری تغییر دهیم. اینکه چگونه این پارامترها را تغییر دهیم یا کنترل کنیم در سطحی بالاتر نیاز به مطالعه بیشتری دارد. در الگوریتم نهنگ، استراتژی کنترل پارامتر را مطرح می کنیم که هنوز موضوع مهمی است و جای کار دارد. یک مسأله چالش برانگیز این است که بهترین استراتژی کنترل چیست تا بتوان در زمان درست از مرحله اکتشاف به بهره برداری تغییر وضعیت داد.

در نهایت، حتی اگر الگوریتم نهنگ و سایر الگوریتم ها کارآمد باشند هنوز هم ممکن است بتوان کارایی آنها را بیشتر بهبود و یا افزایش دهیم. با این حال، چگونه سرعت بخشیدن به همگرایی یک الگوریتم هنوز هم یک مسئله چالش برانگیز است. امیدواریم که این پایان نامه بتواند برای تحقیق بیشتر در آینده ای نزدیک الهام بخش باشد.

از مواردی که می توان به عنوان کارهای بعدی و در ادامه این تحقیق انجام داد به شرح زیر بیان می گردد:

- تحقیق روی کاربردهای دیگر الگوریتم WOATS و حل مسائل بهینه سازی دیگر به جز تخمین پارامترهای سیستم های فوق آشوب.
- استفاده از الگوریتم های جست و جوی محلی دیگر و ترکیب با الگوریتم نهنگ جهت بهبود آن را نیز می توان بررسی کرد.
- استفاده از دیگر الگوریتم های فراابتکاری و بهبود آنها در حل مسئله تخمین پارامترهای سیستم های فوق آشوب .
- بررسی قابلیت الگوریتم WOATS در حل مسئله تخمین پارامترهای سیستم های فوق آشوب دیگر از قبیل چن ، راسلر،لو و... .

مراجع

[1]. Jing, Z., Xu, D., Chang, Y., & Chen, L. "Bifurcations, chaos, and system collapse in a three node power system", International journal of electrical power & energy systems, 2003, 25(6), 443-461.

[2]. Alvarez, G., Montoya, F., Romera, M., & Pastor, G. "Breaking parameter modulated chaotic secure communication system", Chaos, Solitons & Fractals, 2004, 21(4), 783-787.

[3]. Ursem, R. K., & Vadstrup P., "Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithms". Applied Soft Computing, 2004, 4(1), 49-64.

[4]. Mirjalili, S., & Lewis, A., "The whale optimization algorithm", Advances in engineering software, 2014, 95, 51-67.

[5]. Mousavi, Y., & Alfi, A. " Fractional calculus-based firefly algorithm applied to parameter estimation of chaotic systems", Chaos, Solitons & Fractals, 2018, 114, 202-215.

[6]. Peng, B., Liu, B., Zhang, F. Y., & Wang, L., " Differential evolution algorithm-based parameter estimation for chaotic systems", Chaos, Solitons & Fractals, 2019, 39(5), 2110-2118.

[7]. Xu, S., Wang, Y., & Liu, X, "Parameter estimation for chaotic systems via a hybrid flower pollination algorithm", Neural Computing and Applications, 2018, 30(8), 2607-2623.

[8]. Lazzús, J. A., Rivera, M., & López-Caraballo, C. H., " Parameter estimation of Lorenz chaotic system using a hybrid swarm intelligence algorithm", Physics Letters A, 2018, 380(11-12), 1164-1171.

[9]. Peng, B., Liu, B., Zhang, F. Y., & Wang, L, "Differential evolution algorithm-based parameter estimation for chaotic systems", Chaos, Solitons & Fractals, 2016, 39(5), 2110-2118.

[10]. Xu, S., Wang, Y., & Liu, X., "Parameter estimation for chaotic systems via a hybrid flower pollination algorithm", Neural Computing and Applications, 2018, 30(8), 2607-2623.

[11]. Lazzús, J. A., Rivera, M., & López-Caraballo, C. H, " Parameter estimation of Lorenz chaotic system using a hybrid swarm intelligence algorithm", Physics Letters A, 2018, 380(11-12), 1164-1171.

[12]. Panahi, S., Jafari, S., Pham, V. T., Kingni, S. T., Zahedi, A., & Sedighy, S. H, "Parameter identification of a chaotic circuit with a hidden attractor using Krill herd optimization", International Journal of Bifurcation and Chaos, 2016, 26(13), 1650221.

[13]. Gao, X., & Hu, H, " Adaptive–impulsive synchronization and parameters estimation of chaotic systems with unknown parameters by using discontinuous drive signals", Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(14), 3980-3989.

[14]. Li, X., & Yin, M. "Parameter estimation for chaotic systems by hybrid differential evolution algorithm and artificial bee colony algorithm", Nonlinear Dynamics, 2005,77(1-2), 61-71.

[15]. Mousavi,Y., Alfi ,A.&Kucucdemiral, I., "Enhanced Fractional Chaotic Whale Optimization Algorithm for Parameter Identification of Isolated Wind-Diesel Power Systems", IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 140862-140875

[16]. Wang, S., Hu, W.,Riego I.,& Yu Y., "Improved surrogate-assisted whale optimization algorithm for fractional chaotic systems ' parameters identification", Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, Vol 110,

[17]. Adhirai, S., Mahapatra, R. P., & Singh, P, "The Whale Optimization Algorithm and Its Implementation in MATLAB",