**بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ: یک الگوریتم متاهیوریستیک جدید الهام‌گرفته از طبیعت**

**چکیده:** اخیراً، الگوریتم‌های متاهوریستیک به دلیل توانایی آنها در حل مسائل پیچیده و متنوع به یک حوزه تحقیقاتی بسیار جالب تبدیل شده‌اند. این مقاله یک روش متاهوریستیک جدید به نام بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ [[1]](#footnote-1)را معرفی می‌کند که از رفتارهای نهنگ‌های تک‌شاخ الهام گرفته است. الگوریتم NO مکانیزم شکار نهنگ‌های تک‌شاخ را شبیه‌سازی می‌کند. نهنگ‌های تک‌شاخ پستانداران دریایی هستند که به خاطر ارتباط پیچیده خود بر اساس صداهای کلیک برای پیدا کردن طعمه‌هایشان شناخته می‌شوند. این الگوریتم بر اساس سه مرحله اصلی استوار است: انتشار سیگنال، انتقال سیگنال، و به‌روزرسانی موقعیت نهنگ‌ها. فرآیند شکار که بر اساس انتشار و انتقال سیگنال است، به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی، فرموله شده است. استراتژی‌های مشاهده شده در گروه‌های نهنگ تک‌شاخ برای بهبود اکتشاف و بهره‌برداری در فضای جستجو تقلید می‌شوند. الگوریتم NO بر روی 13 تابع معروف شامل توابع یکنواخت، چندقله‌ای و چندقله‌ای با ابعاد ثابت آزمایش شده است. نتایج تجربی نشان داد که NO راه‌حل‌های رضایت‌بخش و معقولی از نظر جلوگیری از ورود به مینیمم‌های محلی و دستیابی به بهینگی جهانی ارائه می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ، متاهوریستیک، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت، هوش جمعی.

1. **مقدمه**

بهینه‌سازی می‌تواند به‌عنوان فرایند انتخاب مجموعه‌ای از متغیرها، که به‌عنوان متغیرهای تصمیم شناخته می‌شوند، تعریف شود که بهترین ترکیب ممکن برای حل یک مسئله خاص بهینه‌سازی را نمایان می‌سازد. هدف نهایی رسیدن به حداکثر یا حداقل یک تابع هدف یا تابع چندهدفه است. فرایند یافتن یک راه‌حل برای یک مسئله بهینه‌سازی در هر حوزه علمی یا مهندسی بسیار حیاتی است. به همین دلیل، تقاضا برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی قوی و کارآمد در حال افزایش است [1].

در دهه گذشته، بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متاهیوریستیک توسعه یافته‌اند. رایج‌ترین آنها شامل الگوریتم ژنتیک (GA) [4]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [15] و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO) [5] است. متاهیوریستیک‌ها مزایای زیادی دارند. اولین مزیت این است که همه این روش‌ها بسیار ساده هستند و مفهوم آنها از پدیده‌های فیزیکی، مفاهیم تکاملی یا رفتارهای حیوانات الهام گرفته شده است. مزیت دوم انعطاف‌پذیری آنهاست. متاهیوریستیک‌ها می‌توانند در بسیاری از کاربردهای دنیای واقعی به‌کار روند [6، 7، 12].

الگوریتم‌های متاهیوریستیک را می‌توان بر اساس نوع رویکرد آنها که می‌تواند الهام‌گرفته از طبیعت یا غیرالهام‌گرفته از طبیعت باشد، دسته‌بندی کرد. همچنین می‌توان آنها را بر اساس نوع تابع هدف، مانند تابع تک‌هدفه، چندهدفه، هدف دینامیک، چند هدفه، هدف دینامیک یا هدف ایستا [9، 24] دسته‌بندی کرد. به‌طور کلی، الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت به چهار دسته تقسیم می‌شوند: الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی: این الگوریتم‌ها از رفتار جمعی ارگانیسم‌های اجتماعی در طبیعت الهام گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، گروهی از عوامل با یکدیگر و محیط‌هایشان تعامل دارند تا به یک هدف برسند. می‌توان به PSO [15]، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO) [5]، الگوریتم‌های زنبور (BA)، و بهینه‌ساز والروس [3] اشاره کرد.

الگوریتم‌های مبتنی بر تکامل: این نوع الگوریتم‌ها بر اساس اصول تکامل طبیعی هستند. آنها از فرآیند انتخاب طبیعی، تولید مثل و تنوع ژنتیکی الهام می‌گیرند. نمونه‌ای از الگوریتم‌های مبتنی بر تکامل، GA [4] و تکامل تفاضلی (DE) [8] هستند.

الگوریتم‌های مبتنی بر رفتار انسانی: این نوع الگوریتم‌ها بر اساس رفتار انسانی هستند و به‌طور خاص بر هوش، شهود و تصمیم‌گیری انسانی تمرکز دارند. الگوریتم‌های ژنتیک تعاملی و جمع‌سپاری برای بهینه‌سازی، رایج‌ترین الگوریتم‌ها هستند.

الگوریتم‌های مبتنی بر فیزیک: این نوع الگوریتم‌ها کلاس‌هایی از روش‌های بهینه‌سازی هستند که از اصول و پدیده‌های فیزیکی الهام گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها معمولاً فرآیندها یا مفاهیم فیزیکی را برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی مدل‌سازی می‌کنند. به‌عنوان مثال می‌توان به شبیه‌سازی آنیلینگ (SA) [10]، الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) [23] و جستجوی هارمونی (HS) [13] اشاره کرد.

بهینه‌سازی در بسیاری از زمینه‌ها مانند بینایی کامپیوتری، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی و غیره استفاده می‌شود [2، 17].

در این مقاله، یک الگوریتم متاهیوریستیک جدید به نام بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ (NO) پیشنهاد می‌شود. این الگوریتم بر اساس رفتار نهنگ‌های تک‌شاخ در طبیعت هنگام شکار است. نهنگ‌های تک‌شاخ از سیگنال‌ها برای شناسایی طعمه‌های خود استفاده می‌کنند که به‌صورت صداهای کلیک است. این صدا به عنوان اکو مکان‌یابی شناخته می‌شود. انتشار سیگنال و انتقال سیگنال به‌صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شوند. پس از این دو فرآیند، موقعیت نهنگ‌ها در طول تکرارها به‌روزرسانی می‌شود تا زمانی که به طعمه که همان راه‌حل بهینه است، برسند.

باقی‌مانده مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: بخش 2 مدل بهینه‌ساز NO را ارائه می‌دهد. بخش 3 نتایج تجربی به‌دست‌آمده توسط NO را که با استفاده از 13 تابع مرجع ارزیابی شده‌اند، ارائه می‌دهد. بخش 4 نتیجه‌گیری را ترسیم می‌کند.

1. **بهینه سازی نهنگ تک‌شاخ (NO)**

این بخش به توصیف بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ (NO)، الهام‌گیری آن و مدل ریاضی آن می‌پردازد.

* 1. اصول بیولوژیکی

نهنگ تک‌شاخ یک پستاندار دریایی جذاب است و نوعی نهنگ دندان‌دار متوسط اندازه محسوب می‌شود که به خاطر شاخ بلند و مارپیچ خود شناخته می‌شود. نهنگ‌های تک‌شاخ نسبت به سایر نهنگ‌ها اندازه متوسطی دارند (حدود ۴ تا ۶ متر به‌جز شاخ‌هایشان). آن‌ها با پوستی خاکستری لکه‌دار یا قهوه‌ای مشخص می‌شوند که به آن‌ها کمک می‌کند تا با یخ‌های قطبی ترکیب شوند، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. این نهنگ‌ها تمام طول سال در آب‌های قطب شمال اطراف گرینلند، کانادا، نروژ و روسیه زندگی می‌کنند. آن‌ها توانایی محدودی در ناوبری از طریق یخ‌های دریایی دارند.



شکل 1 نهنگ های تک شاخ در اقیانوس

* + 1. ساختار اجتماعی

نهنگ‌های تک‌شاخ از گروه‌هایی به نام «پاد» تشکیل شده‌اند. اندازه این پادها می‌تواند از دوازده نفر تا صد نفر متغیر باشد. گروه‌ها می‌توانند «پرورشگاه‌ها» باشند که تنها شامل ماده‌ها و جوانان هستند یا می‌توانند شامل جوانان و نرها باشند. همچنین، یک گروه مختلط که شامل نر، ماده و جوان است، می‌تواند در هر زمان از سال رخ دهد.

* + 1. مهاجرت

در فصل تابستان، نهنگ‌های تک‌شاخ گروه‌هایی به نام «پاد» با تعداد ۱۰ تا ۱۰۰ فرد تشکیل می‌دهند و نزدیک‌تر به سواحل حرکت می‌کنند. در فصل زمستان، آن‌ها به آب‌های عمیق‌تر زیر یخ‌های ضخیم حرکت می‌کنند.

* + 1. رژیم غذایی

نهنگ‌های تک‌شاخ از شاخ‌های بلند خود برای بی‌حس کردن ماهی‌ها قبل از شکار و خوردن آن‌ها استفاده می‌کنند. طعمه آن‌ها شامل ماهی قطب شمال ، هالیبوت گرینلند و سایر ماهی‌های قطبی است.

* + 1. ارتباط و هماهنگی

نهنگ‌های تک‌شاخ از صدا برای شکار غذا و ناوبری استفاده می‌کنند. آواز آن‌ها شامل کلیک‌ها، ضربه‌ها و سوت‌ها است که روش مهمی برای ارتباط درون پاد محسوب می‌شود. کلیک‌ها برای شناسایی طعمه و یافتن موانع در فواصل کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ارتباط با هر نهنگ نقش بسیار مهمی در هماهنگی فعالیت‌های گروهی که شامل شکار طعمه می‌شود، دارد. نهنگ‌های تک‌شاخ از انواع مختلفی از آوازها مانند کلیک‌ها و سوت‌ها استفاده می‌کنند که برای اکو‌مکان‌یابی جهت ناوبری و یافتن طعمه به‌کار می‌روند. همچنین، کلیک‌ها که پالس‌های کوتاه صدا هستند، برای شناسایی اشیاء در آب از جمله طعمه‌ها استفاده می‌شوند.

نهنگ‌ها در پادها سفر و شکار می‌کنند و با استفاده از ارتباط، می‌توانند اطلاعاتی درباره موقعیت طعمه یا جزئیات مرتبط دیگر را به اشتراک بگذارند. این آوازها به نهنگ‌ها کمک می‌کند تا حرکات خود را هماهنگ کرده و موقعیت خود را به‌روزرسانی کنند تا اطمینان حاصل شود که در حین جستجو و شکار طعمه به‌عنوان یک گروه باقی می‌مانند. زمانی که نهنگ‌ها طعمه را شناسایی می‌کنند، ارتباط درون پاد ممکن است تشدید شود. آوازها می‌توانند برای علامت‌گذاری وجود طعمه، هماهنگی حمله یا به اشتراک‌گذاری اطلاعات درباره موقعیت تهدیدات بالقوه استفاده شوند.

با الهام از رفتارهای نهنگ‌های تک‌شاخ در ارتباط و شکار طعمه، ما یک الگوریتم متاهیوریستیک جدید به نام NO را پیشنهاد می‌کنیم.

* 1. مدل ریاضی

در الگوریتم NO، یک راه‌حل، مکان یک نهنگ تک‌شاخ در فضای جستجوی طعمه است که می‌تواند یک راه‌حل بالقوه برای مسئله بهینه‌سازی باشد. زمانی که نهنگ‌های تک‌شاخ طعمه بالقوه‌ای را شناسایی می‌کنند، از طریق ارسال سیگنال با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و ارتباط درون پاد ممکن است تشدید شود. آوازها برای علامت‌گذاری وجود طعمه استفاده می‌شوند و آن‌ها اطلاعاتی درباره مکان طعمه را به اشتراک می‌گذارند. همچنین، آن‌ها برای آماده‌سازی حمله با هم هماهنگی می‌کنند.

فرآیند شناسایی طعمه آن‌ها بر اساس اکو-مکان‌یابی است. اکو-مکان‌یابی تکنیکی است که در آن نهنگ‌های تک‌شاخ کلیک‌هایی را در آب منتشر می‌کنند و به آن‌ها گوش می‌دهند تا موقعیت طعمه را تعیین کنند.

* + 1. راه‌اندازی

در ابتدا، الگوریتم بهینه‌سازی با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی که نمایانگر مکان‌های نهنگ‌ها (X) است، شروع می‌شود. در هر تکرار الگوریتم، این مکان‌ها به‌طور مداوم به‌روزرسانی می‌شوند و توسط ماتریس زیر تعریف می‌شوند:



که در آن n نشان‌دهنده اندازه جمعیت نهنگ‌ها و d بعد متغیرهای تصمیم است.

* + 1. انتشار سیگنال

هنگامی که نهنگ‌های تک‌شاخ ناوبری می‌کنند، موقعیت‌های خود را به اشتراک می‌گذارند و تلاش می‌کنند طعمه را با ارسال سیگنال پیدا کنند. ابتدا فرض می‌کنیم که شدت سیگنال بسیار کم است که نمایانگر مرحله اکتشافی نهنگ‌ها در فضای جستجو است. سیگنال منتشر شده توسط نهنگ تک‌شاخ i به موقعیت خودش و درک آن از محیط بستگی دارد. تابع انتشار به شرح زیر توصیف می‌شود:



که در آن Xiموقعیت نهنگ تک‌شاخ شماره‌ی ith و Xprey موقعیت طعمه است که می‌تواند سیگنال را تشخیص دهد و ممکن است موقعیت آن را تغییر دهد (طعمه نهنگ تک‌شاخ، مانند ماهی‌ها، می‌توانند صداهای نهنگ‌ها را تشخیص دهند).

 فاصله اقلیدسی بین موقعیت نهنگ تک‌شاخ شماره ith و طعمه احتمالی است.

α یک عامل کنترلی است که شدت سیگنال را تنظیم می‌کند.

تابع SE(Xi) نمایانگر انتشار سیگنال در یک مکان خاص Xi است. Xi نمایانگر مکان‌ها در آب یا روی سطح است که سیگنال در آنها اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این، Xprey مکان طعمه‌ی احتمالی است که نهنگ تک‌شاخ هدف قرار داده است. α می‌تواند نحوه تغییر شدت انتشار با فاصله از طعمه را تنظیم کند، که ممکن است عوامل مانند رفتار آوازخوانی نهنگ تک‌شاخ یا ویژگی‌های انتقال صدا در آب را نشان دهد. ثابت 0.1 یک عامل مقیاس‌بندی است که نرخ انتشار پایه را تعیین می‌کند که می‌تواند مقدار مشخصه‌ای برای آوازخوانی نهنگ‌های تک‌شاخ باشد. مقدار 0.1 برای نرمال‌سازی تابع انتشار به دامنه یا بزرگی مشخصی که برای مدل مناسب است، انتخاب شده است. این اطمینان حاصل می‌کند که مقادیر انتشار نه خیلی بزرگ و نه خیلی کوچک هستند، و تفسیر یا کار با آنها آسان‌تر می‌شود. این تابع سیگنال قوی‌تری تولید می‌کند وقتی نهنگ تک‌شاخ به طعمه نزدیک‌تر است و سیگنال با افزایش فاصله کاهش می‌یابد.

* + 1. انتقال سیگنال

سیگنال منتشر شده از طریق آب پراکنده خواهد شد که می‌تواند به عنوان تابعی مبتنی بر فاصله بین نهنگ‌ها مدل‌سازی شود. تابع انتقال به صورت زیر تعریف می‌شود:



که در آن  تابع انتقال است که برای پخش سیگنال استفاده می شود. این تابع به شرح زیر تعریف می‌شود:



که در آن  انحراف معیار گاوسی در تکرار t است که کاهش تاثیر با فاصله را کنترل می کند.

توجه داشته باشید که اگر  مقدار کمی داشته باشد، ارتباط بیشتر محلی خواهد بود، درحالی که مقدار بزرگ  ارتباط بیشتر جهانی و متناسب با فواصل بزرگ می شود.

مقدار  به صورت خطی در طول تکرارها کاهش می یابد. این مقدار با  شروع می شود.



* + 1. به‌روزرسانی موقعیت

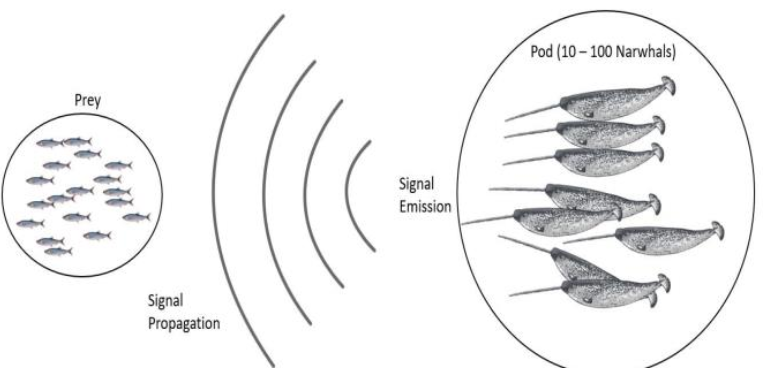
مکان نهنگ‌های تک‌شاخ به‌طور مداوم در هر تکرار به‌روز می‌شود. این به‌روزرسانی بر اساس سیگنال منتشر شده و انتقال آن انجام می‌شود. ما می‌توانیم این فرآیند را به صورت تکراری در طول زمان مدل‌سازی کنیم با به‌روز رسانی موقعیت‌ها در هر گام با استفاده از تابع زیر مدل‌سازی کنیم :



که در آن  گام در تکرار t است و توسط معادله زیر تعیین می شود:



یک پارامتر است که به  مربوط می شود و کنترل کننده کاهش انتقال سیگنال است. همانطور که قبلاً ذکر شد، طعمه می‌تواند سیگنال منتشر شده توسط نهنگ‌های تک‌شاخ را تشخیص دهد. به عبارت دیگر، طعمه می‌تواند تحت تأثیر سیگنال منتشر شده قرار گیرد، به همین دلیل ما  را پیشنهاد کردیم. این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. انتشار سیگنال و پراکندگی آن برای مکان‌یابی طعمه

* 1. الگوریتم بهینه ساز نهنگ های تک‌شاخ

در بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ ، پارامتر  برای تعیین اینکه آیا الگوریتم در مرحله اکتشاف (Exploration) یا مرحله بهره‌برداری (Exploitation) قرار دارد، استفاده می‌شود. در ابتدا، الگوریتم با یک مقدار اولیه از σ آغاز می‌شود که در طول تکرارها کاهش می‌یابد.

پارامتر  در انتشار سیگنال می‌تواند با محدوده تأثیر سیگنال منتشر شده توسط نهنگ‌های تک‌شاخ مرتبط باشد. مقدار بزرگتر  محدوده تأثیر را افزایش می‌دهد، که به احتمال زیاد امکان اکتشاف گسترده‌تری از محیط را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، مقدار کوچکتر  محدوده تأثیر سیگنال را محدود می‌کند و به نفع بهره‌برداری محلی‌تر از اطلاعات است.

یک پارامتر بسیار مهم دیگر در الگوریتم، پارامتر β است. مقدار کوچک β منجر به تنظیمات موقعیت آهسته‌تر می‌شود که موجب ارتقاء اکتشاف فضای جستجو می‌گردد. برعکس، مقدار بالای β می‌تواند منجر به تنظیمات موقعیت سریع‌تر و برجسته‌تر در پاسخ به سیگنال دریافتی شود. این می‌تواند به تشویق بیشتر بهره‌برداری از فضای جستجو بیانجامد.

شبه کد الگوریتم NO در الگوریتم (۱) شرح داده شده است.

*الگوریتم ۱: شبه‌کد بهینه‌ساز نهنگ تک‌شاخ*

1. موقعیت نهنگ‌های تک‌شاخ Xi را به صورت تصادفی مقداردهی اولیه کنید.
2. مقدار تابع هدف f(X) را محاسبه کنید.
3. پارامترهای α، β و  را مقداردهی اولیه کنید.
4. تا زمانی که t کمتر از حداکثر تعداد تکرارها باشد، ادامه دهید:
5. مقدار σ را با استفاده از معادله ۵ به‌روزرسانی کنید
6. برای هر جستجوگر نهنگ تک‌شاخ i، انجام دهید:
7. انتشار سیگنال SE(Xi) را با استفاده از معادله ۲ محاسبه کنید
8. پراکندگی سیگنال SP(Xi) را با استفاده از معادله ۳ محاسبه کنید
9. مقدار β را با استفاده از معادله ۸ به‌روزرسانی کنید
10. مقدار Δt را با استفاده از معادله ۷ به‌روزرسانی کنید
11. موقعیت نهنگ تک‌شاخ  را با استفاده از معادله ۶ به‌روزرسانی کنید
12. پایان حلقه برای بروزرسانی مکان نهنگ ها
13. مقدار جدید تابع هدف را محاسبه کنید
14. یکی به تکرار اضافه کن t=t+1
15. پایان حلقه اصلی الگوریتم با رسیدن به شرط توقف

در الگوریتم (۱)، فرآیند شکار طعمه توسط نهنگ‌های تک‌شاخ به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی مدل‌سازی می‌شود. الگوریتم با یک راه‌حل تصادفی اولیه شروع می‌شود. در هر تکرار، انتشار سیگنال و انتقال سیگنال محاسبه می‌شود. مقدار انتقال سیگنال برای محاسبه مقدار گام ∆ استفاده می‌شود. فرض می‌کنیم که طعمه می‌تواند سیگنال را تشخیص داده و سعی می‌کند با تغییر موقعیت خود از آن اجتناب کند. در هر تکرار، الگوریتم موقعیت نهنگ‌های تک‌شاخ را نسبت به موقعیت طعمه به‌روزرسانی می‌کند.

محاسبه تابع هدف به زمینه مسئله‌ای که در حال حل آن هستیم بستگی دارد. این تابع نمایانگر مقداری است که الگوریتم سعی در بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی آن دارد. فرض می‌کنیم که f(X) تابع هدف است و X برداری است که ابعاد آن نشان‌دهنده ابعاد مسئله بهینه‌سازی هستند. توابع هدف استفاده‌شده برای آزمایش الگوریتم NO در جدول ۱ توصیف شده‌اند. پیچیدگی الگوریتم بسیار قدرتمند است تا عملکرد و زمان محاسباتی الگوریتم را ارزیابی کند. تعداد جستجوگران (نهنگ‌های تک‌شاخ) برابر با N و ابعاد مسئله بهینه‌سازی برابر با D است. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی برابر با O(N×D) است.

1. Narwhal Optimizer (NO) [↑](#footnote-ref-1)