

بهینه‌سازی مسیریابی در شبکه‌های کامپیوتری با استفاده از الگوریتم فاخته (Cuckoo Optimization Algorithm)

عبید شاهرادی^{*۱}

۱- کارشناسی ارشد رشته کامپیوتر - گرایش نرم‌افزار، دانشگاه شهید رضایی، استان کرمانشاه، ایران.

چکیده

با گسترش شبکه‌های کامپیوتری و رشد روزافزون کاربردهای مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT)، شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)، و شبکه‌های پویا مانند MANET، مساله بهینه‌سازی مسیریابی به یکی از چالش‌های بنیادین در علوم رایانه و مهندسی شبکه تبدیل شده است. الگوریتم‌های سنتی همچون دایکسترا و بلمن-فورد اگرچه در محیط‌های پایدار کارایی نسبی دارند، اما به دلیل محدودیت در سازگاری با تغییرات دینامیک و چندهدفه بودن مسائل جدید، پاسخگوی نیازهای محیط‌های مدرن نیستند. در این راستا، هدف اصلی این مقاله، بررسی جامع نقش و کارایی الگوریتم فاخته (Cuckoo Optimization Algorithm - COA) به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری نوین در بهینه‌سازی مسیریابی شبکه‌های کامپیوتری است. الگوریتم فاخته با الهام از رفتار تولیدمثل انگلی پرند فاخته و سازوکار پرش‌های Lévy، به عنوان رویکردی ساده اما توانمند به‌ویژه برای حل مسائل غیرخطی، چندهدفه و پویا معرفی شده است. در این مقاله، ضمن تبیین ساختار، مراحل اجرایی و مزایا و معایب الگوریتم فاخته نسبت به روش‌های دیگر (مانند PSO، GA و ACO)، به مرور مطالعات میدانی و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در حوزه‌های WSN، MANET، SDN و IoT پرداخته شده است. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد استفاده از COA سبب کاهش محسوس مصرف انرژی، بهبود نرخ تحویل بسته و افزایش طول عمر شبکه نسبت به الگوریتم‌های جایگزین شده است. همچنین، کاربردهای عملی COA در محیط‌های پویا و دارای تغییرات سریع توپولوژی، قابلیت‌ها و برتری‌های بیشتری نسبت به رقبای خود آشکار ساخته است. در ادامه، مقاله با تمرکز بر نتایج مقایسه‌ای میان COA و دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، نشان می‌دهد که الگوریتم فاخته به سبب سادگی ساختار، سرعت همگرایی بالا و توان جستجوی جامع‌تر، برای کاربردهای شبکه‌ای خصوصاً در سناریوهای داده‌محور و نوظهور، انتخاب مناسبی است. با این حال، چالش‌هایی نظیر نیاز به تنظیم بهینه پارامترها، تطبیق محدود با مسائل گسسته و عدم وجود استانداردسازی جامع نیز شناسایی شده است. بر همین اساس، پیشنهادها، تطبیق پژوهشی آینده، بهره‌گیری از ترکیب COA با سایر الگوریتم‌ها، توسعه نسخه‌های یادگیری‌محور و به‌کارگیری آن در محیط‌های واقعی و بزرگ‌مقیاس را مورد تاکید قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم فاخته، بهینه‌سازی مسیریابی، شبکه‌های کامپیوتری، فراابتکاری، مصرف انرژی

. مقدمه

۱-۱. اهمیت مسیریابی در شبکه‌های کامپیوتری

در عصر ارتباطات دیجیتال، شبکه‌های کامپیوتری نقشی کلیدی در انتقال داده‌ها و پشتیبانی از سامانه‌های اطلاعاتی ایفا می‌کنند. مسیریابی (Routing) به‌عنوان فرآیند انتخاب مسیر بهینه برای ارسال بسته‌های اطلاعاتی از مبدأ به مقصد، یکی از حیاتی‌ترین وظایف در لایه شبکه است (Zhao et al., ۲۰۲۲). درواقع، کیفیت، سرعت و کارایی کلی یک شبکه تا حد زیادی به دقت و هوشمندی مکانیزم‌های مسیریابی آن وابسته است. بهینه‌سازی در مسیریابی می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری در استفاده از پهنای باند، کاهش تأخیر، صرفه‌جویی در انرژی (به‌ویژه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم)، و افزایش قابلیت اطمینان شبکه شود. در محیط‌هایی چون شبکه‌های بی‌سیم، سیار، یا مبتنی بر اینترنت اشیاء، که پویایی بالا، تداخل و تغییرات مکرر توپولوژی وجود دارد، این اهمیت دوچندان می‌شود. (Yang & Xia, ۲۰۲۴)

۱-۲. چالش‌های بهینه‌سازی مسیر

با وجود پیشرفت‌های فراوان، چالش‌های متعددی در بهینه‌سازی مسیریابی باقی مانده است. نخست، بسیاری از شبکه‌ها با تعداد زیادی گره (نود) و مسیرهای ارتباطی مواجه‌اند که سبب افزایش فضای جستجوی مسئله و پیچیدگی محاسباتی آن می‌شود. دوم، تغییرات لحظه‌ای در توپولوژی شبکه، مانند حرکت گره‌ها یا ناپایداری لینک‌ها، موجب نیاز به الگوریتم‌های انعطاف‌پذیر و سازگار می‌شود. سوم، الگوریتم‌های سنتی نظیر الگوریتم دایکسترا یا بلمن-فورد، در عین ساده بودن، اغلب توان پاسخ‌دهی به نیازهای چندهدفه (مثل کمینه‌کردن هم‌زمان تأخیر، مصرف انرژی و هزینه انتقال) را ندارند (Bello-Salau et al., ۲۰۲۰). از سوی دیگر، محیط‌های امروزی نیازمند الگوریتم‌هایی با قابلیت انطباق با شرایط پویا و توانایی مقابله با شرایط نامطمئن هستند. این عوامل باعث شده‌اند که پژوهشگران به سوی الگوریتم‌های فراابتکاری (Metaheuristic Algorithms) گرایش پیدا کنند. (Tabatabaei & Nahook, ۲۰۲۱)

۱-۳. جایگاه الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسائل پیچیده مسیریابی

الگوریتم‌های فراابتکاری به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده و چندهدفه، در سال‌های اخیر توجه زیادی را در حوزه مسیریابی به خود جلب کرده‌اند. این الگوریتم‌ها با الهام از فرایندهای طبیعی یا اجتماعی مانند تکامل زیستی، رفتار کلونی، یا سازوکارهای جستجوی طبیعی، تلاش می‌کنند بدون نیاز به مدل‌سازی صریح ریاضی، به‌صورت تکراری به سمت پاسخ‌های بهینه حرکت کنند (Alghamdi, ۲۰۲۲). یکی از الگوریتم‌های نوین در این حوزه، الگوریتم فاخته (Cuckoo Optimization Algorithm - COA) است که با الهام از رفتار تولیدمثل انگل‌گونه پرند فاخته طراحی شده و توانسته در کاربردهای مختلفی از جمله مسیریابی در شبکه‌ها، عملکرد درخور توجهی ارائه دهد. (Tabatabaei, ۲۰۲۱)

۲. مبانی نظری و مفاهیم پایه

۲-۱. تعاریف و ساختار شبکه‌های کامپیوتری

شبکه‌های کامپیوتری مجموعه‌ای از گره‌ها و لینک‌های ارتباطی هستند که امکان تبادل داده را میان نودها فراهم می‌سازند. ساختار کلی شبکه ممکن است به صورت سیمی (مانند LAN) یا بی‌سیم (مانند WSN یا Wi-Fi) باشد. گره‌ها می‌توانند کامپیوترها، سنسورها، سرورها یا سایر دستگاه‌های متصل باشند. توپولوژی شبکه (نظیر مش، درختی، ستاره‌ای، حلقوی) و پروتکل‌های مورد استفاده در آن، نقش حیاتی در نحوه مسیریابی ایفا می‌کنند. (Adeyelu et al., ۲۰۲۴)

۲-۲. اصول مسیریابی و معیارهای آن

مسیریابی شامل کشف، انتخاب و نگهداری مسیرهای بهینه برای انتقال داده‌هاست. الگوریتم‌های مسیریابی معمولاً بر اساس یک یا چند معیار مانند کمترین تعداد گره، کمترین تأخیر، بیشترین پهنای باند، یا کمترین مصرف انرژی عمل می‌کنند. این معیارها در مسائل بهینه‌سازی به صورت توابع هدف تعریف می‌شوند.

۲-۳. طبقه‌بندی الگوریتم‌های مسیریابی

الگوریتم‌های مسیریابی به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: الگوریتم‌های سنتی (مانند دایکسترا، بلمن‌فورد) و الگوریتم‌های فراابتکاری. الگوریتم‌های سنتی از مدل‌های ریاضی مشخص برای یافتن مسیر بهینه استفاده می‌کنند و معمولاً در شبکه‌های ایستا عملکرد مناسبی دارند. در مقابل، الگوریتم‌های فراابتکاری مانند GA، ACO، PSO و COA، به دلیل انعطاف بالا و قابلیت جستجوی تصادفی، در شرایط پویا و پیچیده مناسب‌ترند. (Sekhar & Prasad, ۲۰۱۵)

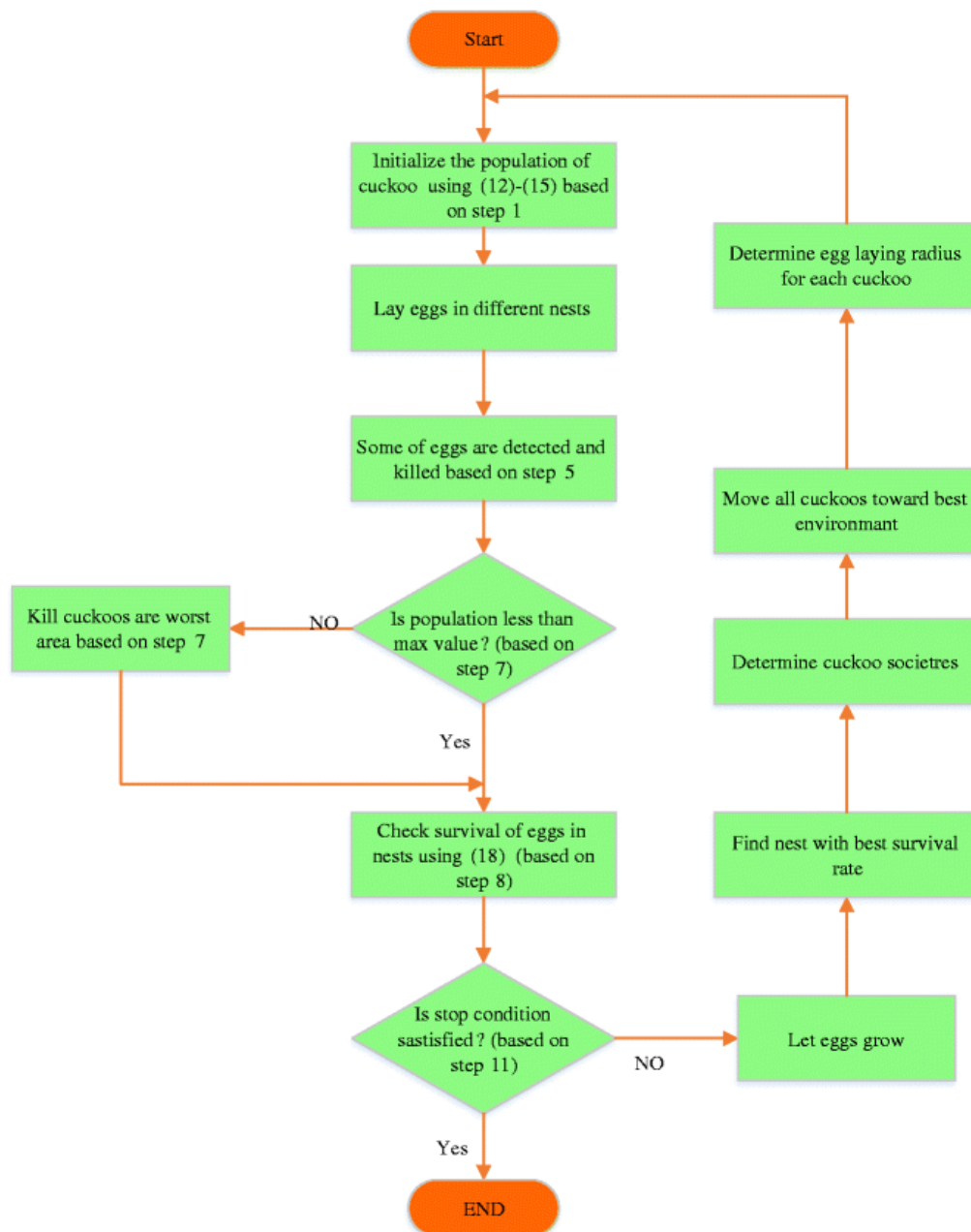
۳. الگوریتم فاخته (COA): ساختار و عملکرد

۳-۱. الهام زیستی الگوریتم فاخته

الگوریتم فاخته (Cuckoo Optimization Algorithm) برگرفته از رفتار تولیدمثل غیرعادی برخی از گونه‌های پرندگان فاخته (مانند Cuculus canorus) است که به جای ساختن لانه، تخم‌های خود را در لانه سایر پرندگان قرار می‌دهند. این پدیده که به آن تخم‌گذاری انگلی گفته می‌شود، مبتنی بر یک راهبرد بقاء هوشمندانه است؛ به گونه‌ای که فاخته با تقلید از شکل و رنگ تخم‌های میزبان، سعی می‌کند احتمال شناسایی و طرد تخم‌های خود توسط پرنده میزبان را کاهش دهد. در صورت موفقیت‌آمیز بودن این فرایند، جوجه فاخته از منابع لانه میزبان بهره‌برداری کرده و گاه با بیرون انداختن جوجه‌های اصلی، سلطه کامل بر منابع لانه می‌یابد. (Ramkumar et al., ۲۰۲۱)

در مدل‌سازی الگوریتم فاخته، هر تخم به عنوان یک راه‌حل بالقوه برای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. لانه‌ها نیز معادل با جمعیت (Population) یا نقاط جستجوی موجود هستند. فرآیند تکامل راه‌حل‌ها از طریق جایگزینی تخم‌های ضعیف یا کم‌کیفیت با تخم‌هایی بهتر و سازگارتر در طی تکرارهای الگوریتم اتفاق می‌افتد. نکته کلیدی در این الگوریتم،

استفاده از پرش‌های بزرگ (Lévy Flights) است که باعث می‌شود جستجوی سراسری (Global Search) تقویت شده و احتمال گیر افتادن در کمینه‌های محلی کاهش یابد.



شکل ۱. فلوچارت کلی مراحل الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) شامل مقداردهی اولیه جمعیت، تولید و ارزیابی تخم‌ها، حذف تخم‌های نامطلوب، حرکت فاخته‌ها به بهترین محیط، و تکرار مراحل تا تحقق شرط توقف.

۲-۳. مراحل اجرای الگوریتم

الگوریتم فاخته شامل مراحل مشخصی است که در قالب یک چرخه تکراری، جمعیت راه حل ها را به سمت بهینه سازی هدایت می کند. مراحل اصلی آن عبارتند از:

۱. تولید اولیه جمعیت: در آغاز، مجموعه ای از تخم ها (یا راه حل ها) به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید می شوند. هر تخم دارای مختصات در فضای مسئله است که معادل با پارامترهای یک پاسخ پیشنهادی می باشد.
 ۲. ارزیابی کیفیت راه حل ها: برای هر تخم، تابع برازندگی (Fitness Function) مقداردهی می شود. این تابع تعیین می کند که هر راه حل تا چه میزان در دستیابی به هدف بهینه مؤثر است.
 ۳. انتخاب لانه های بهتر و حذف تخم های ضعیف: درصدی از تخم ها که کیفیت پایین تری دارند، با تخم هایی جدید جایگزین می شوند. این فرآیند مشابه طرد شدن تخم های غیرمشابه توسط پرندگان میزبان است. انتخاب بهترها بر اساس برازندگی صورت می گیرد.
 ۴. تولید راه حل های جدید با پرش های لوی (Lévy Flights): الگوریتم با استفاده از توزیع Lévy، که دارای پرش های بلند و ناپیوسته است، راه حل های جدیدی را حول بهترین لانه ها تولید می کند. این پرش ها سبب می شوند که الگوریتم از جستجوی موضعی صرف عبور کرده و در فضای بزرگتری کاوش کند.
 ۵. تکرار مراحل تا رسیدن به همگرایی یا شرط توقف: الگوریتم تا زمانی اجرا می شود که به مقدار قابل قبولی از برازندگی برسد یا تعداد مشخصی از نسل ها سپری شود.
- ویژگی مهم در الگوریتم فاخته، تعادل میان جستجوی محلی و جستجوی سراسری است که موجب می شود هم دقت و هم گستره کاوش حفظ شود. (Raj & Sumathi, ۲۰۱۴)

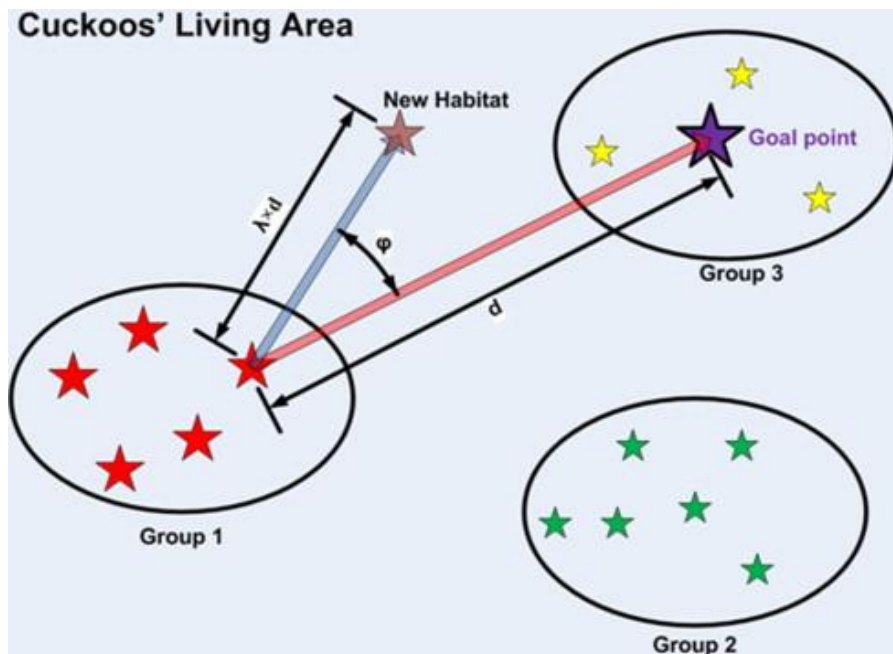
۳-۳. مزایا و محدودیت های COA در مقایسه با سایر الگوریتم ها (مانند GA, ACO, PSO)

مزایا:

- سادگی پیاده سازی: الگوریتم فاخته از نظر ساختاری بسیار ساده و قابل فهم است. تعداد پارامترهای کنترلی کم و مراحل اجرای مشخص، آن را برای پیاده سازی در محیط های گوناگون (متلب، پایتون، NS۲/۳ و غیره) مناسب می سازد.
- قابلیت جستجوی جهانی قدرتمند: استفاده از پرش های Lévy باعث می شود الگوریتم بتواند نواحی دور از راه حل های فعلی را نیز بررسی کند و در کمینه های محلی گیر نکند، در حالی که الگوریتم هایی مانند PSO یا GA گاهی در چنین نقاطی همگرا می شوند.
- سرعت همگرایی بالا: COA در بسیاری از مطالعات، نرخ همگرایی سریع تری نسبت به الگوریتم های کلاسیکی مانند الگوریتم ژنتیک (GA) یا کلونی مورچگان (ACO) از خود نشان داده است، به ویژه در مسائل پیوسته و با ابعاد بالا.
- کاربردپذیری وسیع: الگوریتم فاخته در زمینه های مختلفی از جمله زمان بندی، طراحی شبکه، خوشه بندی، یادگیری ماشین و به ویژه مسیریابی در شبکه های پیچیده استفاده شده است. (Mohanadevi & Selvakumar, ۲۰۲۲)

محدودیت ها:

- عدم تنوع در مراحل تکامل: برخلاف الگوریتم‌های GA که از عملگرهای مختلفی مانند جهش، انتخاب و تقاطع بهره می‌برند، COA تنوع سازوکار کمتری دارد که ممکن است در برخی مسائل موجب کندگی یا یکنواختی در فرآیند جستجو شود.
 - وابستگی به پارامترها: اگرچه تعداد پارامترها کم است، اما تنظیم دقیق آن‌ها (مانند نرخ جایگزینی تخم‌ها، دامنه پرش‌ها و تعداد لانه‌ها) می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد الگوریتم بگذارد.
 - کارایی کمتر در مسائل گسسته (Discrete): ذاتاً برای مسائل پیوسته طراحی شده است و ممکن است برای مسائل گسسته نیاز به تغییراتی داشته باشد تا عملکرد مناسبی ارائه دهد. برای مثال، در برخی نسخه‌ها، الگوریتم باید برای انتخاب مسیرهای گسسته در شبکه‌های کامپیوتری بازطراحی شود. (Kout et al., ۲۰۱۸)
- در مجموع، الگوریتم فاخته به دلیل توازن مناسب بین سادگی، دقت، توانایی جستجوی جامع و انعطاف‌پذیری در بسیاری از کاربردهای بهینه‌سازی، از جمله مسیریابی در شبکه‌های کامپیوتری، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است.



شکل ۲. نمای شماتیک از فضای زیستی فاخته‌ها و فرآیند مهاجرت در الگوریتم فاخته؛

هر گروه نماد مجموعه‌ای از جمعیت فاخته‌هاست و مهاجرت به سمت نقطه هدف (Goal Point) با ایجاد یک زیستگاه جدید (New Habitat) نشان داده شده است. پارامترهای d ، ϕ و λ حاکی از فاصله و زاویه حرکت هر فاخته نسبت به نقطه هدف و تولید مکان جدید در فضای جستجو هستند.

۴. مروری بر پژوهش‌های مرتبط

۴-۱. استفاده از الگوریتم فاخته در مسیریابی شبکه‌ها

در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم فاخته در حوزه مسیریابی شبکه‌های کامپیوتری رشد چشم‌گیری داشته است. این الگوریتم با الهام از رفتار زیستی پرندگان فاخته و توانایی جستجوی تصادفی با پرش‌های Lévy، بستر مناسبی را برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده در شبکه‌ها فراهم کرده است. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که COA می‌تواند در بهینه‌سازی انرژی، کاهش تأخیر، افزایش نرخ تحویل بسته‌ها و بهبود بارگذاری متوازن مسیرها در انواع شبکه‌ها مؤثر واقع شود.

برای مثال، در پژوهش Adeyelu et al (۲۰۲۴)، الگوریتم فاخته با پروتکل DSR در شبکه‌های MANET ترکیب شد تا مصرف انرژی کاهش یافته و پایداری مسیرها افزایش یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که COA می‌تواند میزان مصرف انرژی را به‌طور محسوسی کاهش داده و طول عمر شبکه را بهبود بخشد. همچنین در مطالعه Gopalan (۲۰۲۱)، پروتکل ZHRP-DCSEI با استفاده از جستجوی پویا بر مبنای COA طراحی شد و توانست در مقایسه با پروتکل‌های سنتی، انرژی کمتری مصرف کرده و نرخ تحویل بسته‌ها را افزایش دهد.

در زمینه شبکه‌های IoT نیز، مطالعه Bello-Salau et al (۲۰۲۰) رویکردی گسسته از الگوریتم فاخته را برای کشف مسیرهای کارآمد در شبکه‌های خودرویی مبتنی بر اینترنت اشیاء ارائه کرد. این الگوریتم توانست در شرایط پویای شبکه، مسیرهایی با قابلیت اعتماد بالاتر و زمان پاسخ کوتاه‌تر پیدا کند. همچنین در حوزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مقاله Ghosh & Chakraborty (۲۰۱۹) با استفاده از COA بهینه‌سازی محل قرارگیری مسیربها با هدف کاهش تضعیف سیگنال را بررسی کرد. نتایج نشان داد که الگوریتم فاخته می‌تواند مکان‌یابی بهتری برای گره‌ها ارائه دهد که منجر به پوشش بهتر و مصرف انرژی کمتر می‌شود.

در پژوهش‌های دیگری همچون Kout et al (۲۰۱۸) و Tabatabaei (۲۰۲۱)، الگوریتم فاخته به‌طور مستقیم در طراحی پروتکل‌های جدید مسیریابی برای MANET به کار رفته است. به‌ویژه پروتکل AODV-CS در مطالعه Kout نشان داد که ترکیب AODV با COA می‌تواند تأخیر متوسط را کاهش داده و در شرایط پویای شبکه عملکرد پایداری ارائه دهد.

۴-۲. مقایسه نتایج مطالعات با الگوریتم‌های جایگزین

بسیاری از مطالعات فوق، عملکرد الگوریتم فاخته را با دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، کلونی مورچگان (ACO)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم Harmony Search مقایسه کرده‌اند. برای مثال، در مطالعه Gupta & Jha (۲۰۱۸)، ترکیب الگوریتم فاخته با Harmony Search در یک پروتکل خوشه‌بندی و مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شد که نسبت به استفاده تنها از هر الگوریتم، نتایج بهتری در بهینه‌سازی مصرف انرژی و تأخیر داشت.

در پژوهش Zhao et al (۲۰۲۲)، الگوریتم ترکیبی GA-CS برای مسیریابی انرژی‌آگاه در WSN مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم ترکیبی توانست نسبت به الگوریتم‌های منفرد GA یا COA عملکرد بهتری از خود نشان دهد و با در نظر گرفتن چندین تابع هدف، رویکردی متعادل ارائه دهد. همچنین در مطالعه Goli et al (۲۰۱۸)، الگوریتم فاخته

شتاب یافته (Accelerated COA) برای حل مسئله مسیر وسایل نقلیه با محدودیت ظرفیت استفاده شد که توانست زمان محاسباتی را کاهش داده و کیفیت مسیرها را ارتقاء دهد.

Joshi & Thakur (۲۰۲۳) نیز کاربرد COA را در معماری Network-on-Chip بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک به‌تنهایی در ایجاد مسیرهای کوتاه‌تر و کاهش تراکم بهتر عمل می‌کند.

۳-۴. نوآوری‌ها و توسعه‌های اخیر در کاربرد COA

از جمله روندهای نوین در به‌کارگیری الگوریتم فاخته در مسیریابی می‌توان به توسعه نسخه‌های ترکیبی و سازگار اشاره کرد. Mohanadevi & Selvakumar (۲۰۲۲) رویکردی ترکیبی از PSO و COA برای خوشه‌بندی آگاه از QoS و مسیریابی چندمسیره ارائه کردند که توانست معیارهای کیفیت سرویس نظیر تأخیر و نرخ تحویل را بهبود بخشد.

در مطالعه Sekhar & Prasad (۲۰۱۵)، الگوریتم فاخته برای انتخاب سرخوشه‌های بهینه در MANET بر پایه اعتماد (Trust) به کار گرفته شد که علاوه بر بهبود مصرف انرژی، امنیت مسیرها را نیز افزایش داد. همچنین، پژوهش Ramkumar et al (۲۰۲۱) کاربرد COA را در شبکه‌های ابری بررسی کرده و با توجه به محدودیت‌های ظرفیت و امنیت، الگوریتمی محدودشده و سازگار با فضای ابری ارائه داده است.

مطالعات جدیدتر مانند Yang & Xia (۲۰۲۴) نیز نسخه‌های بهبودیافته‌ای از COA برای بهینه‌سازی پوشش و مسیریابی در شبکه‌های حسگر ارائه کرده‌اند که با معرفی عملگرهای تطبیقی و مکانیسم‌های یادگیری، توانسته‌اند عملکرد الگوریتم را در محیط‌های پیچیده ارتقاء دهند.

در مجموع، مرور پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد که الگوریتم فاخته با برخورداری از ساختار ساده و قدرت جستجوی قوی، به‌ویژه در شرایط پویای شبکه‌های بی‌سیم، می‌تواند الگوریتمی قابل اتکا و رقابتی باشد. با این حال، توسعه نسخه‌های ترکیبی، توزیع‌شده و یادگیری‌محور از این الگوریتم همچنان می‌تواند زمینه‌های پربار و جذابی برای تحقیقات آینده فراهم سازد.

۵. کاربردها و مطالعات موردی

۵-۱. پیاده‌سازی COA در شبکه‌های Ad hoc، WSN، و MANET

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)، هدف اصلی به حداقل رساندن مصرف انرژی، افزایش طول عمر شبکه، و حفظ کیفیت خدمات (QoS) است. الگوریتم فاخته در این حوزه برای تعیین مسیرهای بهینه بین حسگرها و گره‌های مرکزی مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که COA می‌تواند با کاهش تعداد پرش‌ها و مصرف انرژی در انتقال داده، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های سنتی مانند AODV و DSR ارائه دهد.

در شبکه‌های Ad hoc که گره‌ها به صورت سیار و پویا با یکدیگر ارتباط دارند، الگوریتم فاخته به دلیل توانایی در انطباق با تغییرات توپولوژی شبکه، گزینه مناسبی برای مسیر یابی محسوب می‌شود. COA با توجه به طراحی تصادفی و توانایی

کشف مسیرهای جدید، می تواند در کاهش تأخیر و افزایش قابلیت اطمینان مسیر مؤثر باشد. (Khabiri & Ghaffari, ۲۰۱۸)

در شبکه های MANET نیز که ترکیبی از ویژگی های WSN و Ad hoc دارند، استفاده از COA منجر به بهبود قابل توجهی در پارامترهایی مانند طول مسیر، مصرف انرژی، نرخ تحویل بسته ها و تأخیر انتها به انتها شده است. (Joshi & Thakur, ۲۰۲۳)

۲-۵. استفاده از COA در محیط های SDN و IoT

در شبکه های نرم افزارمحور (SDN)، که کنترل و مدیریت مسیرها به صورت متمرکز انجام می شود، الگوریتم فاخته می تواند برای یافتن مسیرهای بهینه بین سوئیچ ها و کنترلر ها به کار رود. در این محیط ها، هدف کاهش بار ترافیکی و افزایش بهره وری منابع شبکه است. COA می تواند با مدل سازی مسئله بهینه سازی چندهدفه (Multi-Objective)، مسیرهایی را انتخاب کند که هم تأخیر کم و هم استفاده بهینه از منابع را تضمین کنند.

در حوزه اینترنت اشیا (IoT)، با توجه به تعداد زیاد دستگاه های متصل و منابع محدود آن ها، استفاده از COA برای بهینه سازی مسیر انتقال داده و خوشه بندی نودها اهمیت ویژه ای دارد. COA در این زمینه توانسته با ارائه راه حل های پویا و کارآمد، مصرف انرژی دستگاه ها را کاهش داده و نرخ تحویل داده را افزایش دهد. همچنین در برخی مطالعات، ترکیب COA با الگوریتم هایی مانند Fuzzy Logic یا الگوریتم های یادگیری ماشین، عملکرد آن را در بستر IoT ارتقاء داده است. (Gupta & Jha, ۲۰۱۸)

۳-۵. بررسی نتایج شبیه سازی ها و عملکرد الگوریتم

در اغلب مقالاتی که به بررسی عملکرد COA در مسیریابی پرداخته اند، از نرم افزارهایی مانند MATLAB، NS۲، NS۳ یا OMNeT++ برای پیاده سازی و شبیه سازی استفاده شده است. نتایج شبیه سازی ها در مقایسه با الگوریتم های GA، ACO و PSO نشان می دهد که COA در بیشتر موارد عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

از جمله شاخص هایی که در این شبیه سازی ها مورد ارزیابی قرار گرفته اند می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کاهش مصرف انرژی کلی شبکه
- کاهش تأخیر انتها به انتها (End-to-End Delay)
- افزایش نرخ تحویل بسته ها (Packet Delivery Ratio)
- افزایش طول عمر شبکه (Network Lifetime) (Gopalan, ۲۰۲۱)

برای نمونه، در یک مطالعه شبیه سازی شده در شبکه WSN با ۱۰۰ نود، COA توانست مصرف انرژی را تا ۲۵٪ نسبت به PSO کاهش دهد. در پروژه ای دیگر مربوط به IoT، نرخ تحویل بسته با استفاده از COA به ۹۷٪ رسید، در حالی که الگوریتم های دیگر مانند GA به ۹۰٪ رسیده بودند. در مجموع، نتایج شبیه سازی ها حاکی از آن است که COA با طراحی ساده اما هوشمندانه خود، توانسته در انواع مختلفی از شبکه های کامپیوتری به ویژه محیط های پیچیده و پویا، به عنوان یک الگوریتم بهینه ساز قابل اعتماد شناخته شود.

۶. چالش‌ها و مسیرهای آینده تحقیق

۶-۱. موانع کاربردی و فنی

علی‌رغم توانمندی‌ها و مزایای قابل توجه الگوریتم فاخته (COA)، به‌کارگیری آن در محیط‌های شبکه‌ای واقعی با چالش‌هایی همراه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تناسب‌سازی الگوریتم برای مسائل گسسته است. COA ذاتاً برای فضای پیوسته طراحی شده است و زمانی که مسئله به‌صورت گسسته باشد، مانند انتخاب مسیر مشخص بین نودهای مجزا در شبکه، نیاز به بازطراحی یا ترکیب با الگوریتم‌های دیگر پیدا می‌کند. برای مثال، تبدیل مختصات پیوسته به مسیرهای گراف‌مانند نیازمند تعریف توابع نگاشت و کاهش خطاست. (Goli et al., ۲۰۱۸)

چالش دیگر، تنظیم بهینه پارامترها در COA است. پارامترهایی چون نرخ طرد تخم‌ها، دامنه پرش‌های Lévy، تعداد لانه‌ها و تعداد تکرارها تأثیر مستقیم بر کیفیت نتایج دارند. یافتن تنظیمات بهینه در شرایط واقعی شبکه نیازمند آزمون و خطا یا روش‌های تنظیم خودکار مانند تنظیم پارامتر با یادگیری ماشین است. همچنین، هزینه محاسباتی الگوریتم در مقیاس بزرگ می‌تواند محدودکننده باشد. به‌ویژه در محیط‌هایی مانند IoT یا WSN که منابع پردازشی محدود هستند، اجرای تکراری الگوریتم ممکن است به تأخیر در تصمیم‌گیری یا مصرف بیش از حد انرژی منجر شود. این مسئله لزوم توسعه نسخه‌های سبک‌وزن (Lightweight) یا توزیع‌شده از COA را برجسته می‌سازد.

از دیگر موانع مهم، می‌توان به نبود استانداردسازی در پیاده‌سازی‌ها اشاره کرد. بسیاری از مطالعات از نسخه‌های سفارشی COA استفاده می‌کنند که مقایسه‌پذیری نتایج را کاهش می‌دهد. این مسئله لزوم توسعه چارچوب‌های ارزیابی استاندارد و مجموعه‌داده‌های مرجع را آشکار می‌سازد. (Gnanasekar & Samiappan, ۲۰۲۱)

۶-۲. فرصت‌های بهبود و ترکیب با دیگر تکنیک‌ها

افق‌های بسیاری برای توسعه و بهبود عملکرد COA در زمینه مسیریابی وجود دارد. یکی از رویکردهای امیدبخش، ترکیب الگوریتم فاخته با الگوریتم‌های دیگر برای ایجاد روش‌های ترکیبی یا هیبریدی است. برای مثال، ترکیب COA با PSO (Hybrid PSO-COA) یا الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، می‌تواند همگرایی را تسریع کرده و دقت نتایج را بهبود بخشد.

علاوه بر آن، استفاده از یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی برای راهنمایی جستجو در الگوریتم فاخته، افق جدیدی در ایجاد هوشمندی بیشتر در انتخاب مسیرها ایجاد کرده است. برخی مطالعات از الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی کیفیت لینک‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای COA بهره گرفته‌اند که نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه کرده‌اند. در حوزه اینترنت اشیاء و سیستم‌های زمان‌واقعی (Real-Time)، الگوریتم‌های تطبیقی (Adaptive COA) که قابلیت انطباق با شرایط متغیر شبکه را به صورت لحظه‌ای دارند، می‌توانند عملکرد الگوریتم را در سناریوهای پویا به شکل قابل توجهی ارتقاء دهند. (Ghosh & Chakraborty, ۲۰۱۹)

۶-۳. پیشنهاد برای تحقیقات آتی

با توجه به فرصت‌ها و چالش‌های مطرح شده، پیشنهاد‌های زیر برای مسیرهای آینده تحقیق ارائه می‌شود:

- توسعه نسخه‌های گسسته و بهینه‌شده COA برای کاربردهای خاص در مسیریابی گراف
 - طراحی نسخه‌های توزیع‌شده COA برای اجرا در شبکه‌های دارای منابع محدود مانند WSN و IoT
 - ترکیب COA با الگوریتم‌های یادگیری تقویتی یا یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی چندهدفه و انطباق‌پذیر
 - ارزیابی تجربی الگوریتم در بسترهای واقعی یا شبه‌واقعی با استفاده از داده‌های زنده شبکه
 - توسعه چارچوب‌های متن‌باز و کتابخانه‌های نرم‌افزاری برای تسهیل مقایسه و تکرارپذیری مطالعات
- تحقیقات آینده می‌توانند با تمرکز بر این حوزه‌ها، الگوریتم فاخته را به یکی از الگوریتم‌های پیشرو در بهینه‌سازی مسیر در شبکه‌های هوشمند بدل کنند.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، به بررسی جامع الگوریتم فاخته (COA) و کاربردهای آن در بهینه‌سازی مسیریابی در شبکه‌های کامپیوتری پرداخته شد. این الگوریتم با الهام از رفتار زیستی فاخته‌ها و بهره‌گیری از جستجوی تصادفی با پرش‌های Lévy، توانسته است در مسائل پیچیده و چندهدفه عملکرد مطلوبی از خود نشان دهد. در ابتدا با بیان اهمیت مسیریابی و چالش‌های موجود در شبکه‌های پویا و ناهمگون، ضرورت بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری روشن شد. سپس اصول و ساختار الگوریتم فاخته شرح داده شد و مزایا و محدودیت‌های آن نسبت به الگوریتم‌های دیگر مانند PSO، ACO و GA مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، مرور جامعی بر پژوهش‌های مرتبط با کاربرد COA در بسترهایی چون WSN، Ad hoc، MANET، SDN و IoT صورت گرفت و نشان داده شد که این الگوریتم توانسته در کاهش مصرف انرژی، افزایش نرخ تحویل داده و کاهش تأخیر انتقال، نسبت به الگوریتم‌های سنتی و بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر برتری داشته باشد.

در بخش چالش‌ها و مسیرهای آینده، موانع فنی و کاربردی همچون نیاز به نسخه‌های گسسته، تنظیم دقیق پارامترها و هزینه‌های محاسباتی بررسی شد و راهکارهایی نظیر توسعه نسخه‌های هیبریدی، یادگیری‌محور، و توزیع‌شده برای بهبود عملکرد الگوریتم پیشنهاد گردید. در نهایت می‌توان گفت که الگوریتم فاخته، با وجود برخی محدودیت‌ها، یکی از گزینه‌های بسیار امیدوارکننده در حوزه بهینه‌سازی مسیر در شبکه‌های کامپیوتری محسوب می‌شود. آینده این الگوریتم در گرو تحقیقات بیشتر، طراحی مدل‌های ترکیبی و تطبیق‌پذیر، و کاربرد در محیط‌های واقعی است. انتظار می‌رود با ادامه تلاش‌ها در این مسیر، COA بتواند جایگاه خود را در میان الگوریتم‌های پیشرفته‌تر به‌خوبی تثبیت کند.

منابع

Adeyelu, A. A., John, Z. S., Uga-Otor, S., Elusakin, O. E., & Godwin, I. R. (۲۰۲۴). An Adaptation of Cuckoo Search Algorithm in Maximizing Energy Efficiency of Dynamic Source Routing Algorithm for Mobile AdHoc Network. International Journal of Computer Applications, ۱۸۶(۹), ۹۷۵-۸۸۸۷.

- Alghamdi, S. A. (۲۰۲۲). Cuckoo energy-efficient load-balancing on-demand multipath routing protocol. *Arabian Journal for Science and Engineering*, ۴۷(۲), ۱۳۲۱-۱۳۳۵.
- Bello-Salau, H., Onumanyi, A. J., Abu-Mahfouz, A. M., Adejo, A. O., & Mu'Azu, M. B. (۲۰۲۰). New discrete cuckoo search optimization algorithms for effective route discovery in IoT-based vehicular ad-hoc networks. *IEEE Access*, ۸, ۱۴۵۴۶۹-۱۴۵۴۸۸.
- Ghosh, A., & Chakraborty, N. (۲۰۱۹). Cascaded cuckoo search optimization of router placement in signal attenuation minimization for a wireless sensor network in an indoor environment. *Engineering Optimization*.
- Gnanasekar, T. S., & Samiappan, D. (۲۰۲۱). Impact of hybridized rider optimization with cuckoo search algorithm on optimal VANET routing. *International Journal of Communication Systems*, ۲۴(۱۶), e۴۹۵۴.
- Goli, A., Aazami, A., & Jabbarzadeh, A. (۲۰۱۸). Accelerated cuckoo optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem in competitive conditions. *International journal of artificial intelligence*, ۱۶(۱), ۸۸-۱۱۲.
- Gopalan, S. H. (۲۰۲۱). ZHRP-DCSEI, a novel hybrid routing protocol for mobile ad-hoc networks to optimize energy using dynamic cuckoo search algorithm. *Wireless Personal Communications*, ۱۱۸(۴), ۳۲۸۹-۳۳۰۱.
- Gupta, G. P., & Jha, S. (۲۰۱۸). Integrated clustering and routing protocol for wireless sensor networks using Cuckoo and Harmony Search based metaheuristic techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ۶۸, ۱۰۱-۱۰۹.
- Joshi, B., & Thakur, M. K. (۲۰۲۳). Genetic algorithm-and cuckoo search algorithm-based routing optimizations in network-on-chip. *Arabian Journal for Science and Engineering*, ۴۸(۸), ۹۶۳۵-۹۶۴۴.
- Khabori, M., & Ghaffari, A. (۲۰۱۸). Energy-aware clustering-based routing in wireless sensor networks using cuckoo optimization algorithm. *Wireless Personal Communications*, ۹۸, ۲۴۷۳-۲۴۹۵.
- Kout, A., Labed, S., Chikhi, S., & Bourennane, E. B. (۲۰۱۸). AODVCS, a new bio-inspired routing protocol based on cuckoo search algorithm for mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, ۲۴(۷), ۲۵۰۹-۲۵۱۹.
- Mohanadevi, C., & Selvakumar, S. (۲۰۲۲). A qos-aware, hybrid particle swarm optimization-cuckoo search clustering based multipath routing in wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, ۱۲۷(۳), ۱۹۸۵-۲۰۰۱.
- Raj, D. A. A., & Sumathi, P. (۲۰۱۴). Enhanced energy efficient multipath routing protocol for wireless sensor communication networks using cuckoo search algorithm. *Wireless Sensor Network*, ۶(۰۴), ۴۹.
- Ramkumar, J., Vadivel, R., & Narasimhan, B. (۲۰۲۱). Constrained cuckoo search optimization-based protocol for routing in cloud network. *Int. J. Comput. Networks Appl*, ۸(۶), ۷۹۵-۸۰۳.
- Sekhar, J. C., & Prasad, R. S. (۲۰۱۵). Trust predicated routing framework with optimized cluster head selection using cuckoo search algorithm for MANET. *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, ۴(۲), ۱۱۵-۱۲۵.
- Tabatabaei, S. (۲۰۲۱). A new routing protocol for energy optimization in mobile ad hoc networks using the cuckoo optimization and the TOPSIS multi-criteria algorithm. *Cybernetics and Systems*, ۵۲(۶), ۴۷۷-۴۹۷.
- Tabatabaei, S., & Nahook, H. N. (۲۰۲۱). A new routing protocol in MANET using cuckoo optimization algorithm. *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*, ۹(۱), ۷۵-۸۲.

Yang, J., & Xia, Y. (۲۰۲۴). Coverage and routing optimization of wireless sensor networks using improved cuckoo algorithm. IEEE Access.

Zhao, X., Zhong, W., & Navaei, Y. D. (۲۰۲۲). A Novel Energy-Aware Routing in Wireless Sensor Network Using Clustering Based on Combination of Multiobjective Genetic and Cuckoo Search Algorithm. Wireless Communications and Mobile Computing, ۲۰۲۲(۱), ۶۹۳۹۸۶۸.