

Research Article

Applications of the Osprey Optimization Algorithm in Distributed Systems: A Systematic Review

Saber Pahlavan¹  | Ali Akbar Neghabi^{2*} 

¹Department of Computer Engineering and Information Technology, Islamic Azad University, Sabzevar Branch, Sabzevar, Iran, Pahlavan.ir2006@gmail.com

²Department of Computer Engineering and Information Technology, Islamic Azad University, Sabzevar Branch, Sabzevar, Iran, Aa_neghabi@iau.ac.ir

Correspondence

*Ali Akbar Neghabi, Assistant Professor, Department of Computer Engineering and Information Technology, Islamic Azad University, Sabzevar Branch, Sabzevar, Iran, Aa_neghabi@iau.ac.ir

Main Subjects: Optimization Algorithms

Received: 2 August 2025

Revised: 4 September 2025

Accepted: 7 September 2025

Abstract

The Osprey Optimization Algorithm (OOA), as a novel metaheuristic approach, has recently gained considerable attention in distributed systems due to its strong ability to balance global exploration and local exploitation. Inspired by the hunting behavior of ospreys, OOA demonstrates significant potential in solving complex and multi-objective optimization problems with high efficiency. Distributed systems, as the backbone of modern technologies, provide a platform for cooperation among geographically dispersed components, enabling large-scale data processing and resource management. This study presents a systematic review of research on the applications of OOA in distributed systems. Nineteen selected articles have been analyzed across different domains, including the Internet of Things (IoT), cloud and fog computing, smart grids, microgrids, wireless sensor networks, and smart healthcare systems. The findings reveal that OOA can effectively reduce energy consumption, improve resource allocation, enhance data security, and increase the reliability and efficiency of

distributed environments. Nevertheless, several challenges remain, such as computational complexity, dependency on initial parameters, and limited real-world validation. The outcomes of this review highlight the strong potential of OOA for developing improved variants and for future deployment in practical large-scale distributed scenarios.

Keywords: Osprey Optimization Algorithm (OOA), Internet of Things (IoT), Meta-Heuristic Algorithms, Distributed Systems, Optimization.

<https://doi.org/10.82195/NTDS.2025.1213842>

پژوهشی

مروری نظام مند بر کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در سیستم های توزیع شده

صابر پهلوان^۱ | علی اکبر نقابی^۲*

چکیده:

الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به عنوان یکی از روش های نوین بهینه سازی، در سال های اخیر توجه زیادی در حوزه سیستم های توزیع شده به خود جلب کرده است. این الگوریتم با الهام از رفتار شکار عقاب ماهیگیر، توانایی ایجاد توازن میان جستجوی سراسری و محلی را دارد و می تواند مسائل پیچیده و چندمعیاره را با دقت و کارایی بالایی حل کند. سیستم های توزیع شده در دهه اخیر به ستون فقرات بسیاری از فناوری های نوین تبدیل شده اند و بستری برای همکاری میان اجزای پراکنده فراهم کرده اند. این مقاله مرور نظام مندی از پژوهش های انجام شده در زمینه کاربرد الگوریتم عقاب ماهیگیر در سیستم های توزیع شده ارائه می دهد. در این راستا، ۱۹ مقاله منتخب در حوزه های مختلف شامل اینترنت اشیا، رایانش ابری و مه، شبکه های برق هوشمند، ریزشبکه ها، شبکه های حسگر بی سیم و سامانه های سلامت هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد این الگوریتم قادر است مصرف انرژی را کاهش دهد، تخصیص منابع را بهبود بخشد، امنیت داده ها را افزایش دهد و در مجموع موجب بهبود پایداری و بهره وری سیستم های توزیع شده شود. باین حال، چالش هایی مانند پیچیدگی محاسباتی، وابستگی به پارامترهای اولیه و کمبود آزمون های میدانی همچنان مطرح است. یافته های این پژوهش بیانگر ظرفیت بالای الگوریتم عقاب ماهیگیر برای توسعه نسخه های پیشرفته تر و کاربرد در محیط های عملیاتی آینده است.

^۱گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران،

Pahlavan.ir2006@gmail.com

^۲گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران،

Aa_neghabi@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

*علی اکبر نقابی، استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، سبزوار، ایران،

Aa_neghabi@iau.ac.ir

عنوان اصلی: الگوریتم های فراابتکاری

تاریخ دریافت: ۱۱ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۳ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۶ شهریور ۱۴۰۴

<https://doi.org/10.82195/NTDS.2025.1213842>

کلیدواژه ها: الگوریتم عقاب ماهیگیر، اینترنت اشیا، الگوریتم های فراابتکاری، سیستم های توزیع شده، بهینه سازی

۱- مقدمه

الگوریتم‌های فراابتکاری^۱ مجموعه‌ای از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی هستند که برای حل مسائل پیچیده، غیرخطی و با ابعاد بالا طراحی شده‌اند [۱]. این الگوریتم‌ها با الهام از پدیده‌های طبیعی، فرآیندهای زیستی یا رفتارهای اجتماعی، به جستجوی راه‌حل‌های بهینه در فضاهای جستجوی وسیع می‌پردازند. ویژگی شاخص این الگوریتم‌ها، توانایی مقابله با مسائل بزرگ و پیچیده‌ای است که روش‌های کلاسیک یا دقیق در حل آن‌ها ناکارآمد هستند. کاربرد این الگوریتم‌ها طیف گسترده‌ای را شامل می‌شود؛ از مسائل مهندسی مانند بهینه‌سازی طراحی سازه‌ها، زمان‌بندی تولید و مسیریابی شبکه‌های حمل‌ونقل [۲] تا حوزه‌های علوم داده شامل خوشه‌بندی، انتخاب ویژگی و یادگیری ماشین [۳، ۴] و همچنین کاربردهای زیست‌محیطی برای مدیریت منابع و کاهش مصرف انرژی [۵].

الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر^۲ برای اولین بار در سال ۲۰۲۳ توسط محمد دهقانی و پاول تروجوسکی معرفی شد [۶]. این الگوریتم از رفتار شکار این پرند الهام گرفته شده است. استراتژی‌های شکار عقاب ماهیگیر شامل پرواز بر فراز آب، شناسایی موقعیت طعمه، تمرکز بر هدف و شیرجه سریع به صورت مدل‌سازی شده در این الگوریتم پیاده‌سازی شده‌اند. این روش با ترکیب متوازن دو مکانیزم کلیدی اکتشاف^۳ (جستجوی گسترده برای کشف نواحی جدید) و بهره‌برداری^۴ (جستجوی محلی دقیق در نواحی امیدبخش)، قادر به حل مسائل پیچیده در فضاهای جستجوی گسترده است. سادگی ساختار، انعطاف‌پذیری و قدرت جستجوی بالا، این الگوریتم را به یکی از روش‌های نوآورانه و کارآمد در حوزه بهینه‌سازی تبدیل کرده است.

در دهه اخیر، سیستم‌های توزیع‌شده^۵ به ستون فقرات بسیاری از فناوری‌های نوین تبدیل شده‌اند [۴]. این سیستم‌ها با فراهم کردن بستری برای همکاری اجزای پراکنده در جغرافیاهای متفاوت، امکان پردازش و مدیریت داده‌ها را در مقیاس جهانی فراهم می‌کنند. آنچه اهمیت این سیستم‌ها را دوچندان کرده، تغییرات بنیادینی است که در نیازهای جوامع و صنایع رخ داده است که از آنجمله می‌توان به افزایش وابستگی به سرویس‌های آنلاین، رشد تصاعدی داده‌ها، ضرورت واکنش بلادرنگ به رویدادها و تقاضا برای زیرساخت‌های پایدار و قابل اطمینان اشاره کرد [۷]. نقش سیستم‌های توزیع‌شده محدود به مراکز داده یا شبکه‌های ارتباطی نیست؛ آن‌ها امروزه در سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند [۸]، مدیریت انرژی شهری [۹]، پایش محیط زیست [۵]، هماهنگی عملیات‌های امدادی [۸] و بسیاری از موارد دیگر نیز به کار گرفته می‌شوند.

گسترده‌ی حوزه‌های کاربرد سیستم‌های توزیع شده، باعث شده است تا مسائل بهینه‌سازی در آن‌ها شکل و ابعاد جدیدی پیدا کنند. برای مثال، در یک شبکه حمل‌ونقل شهری، تصمیم‌گیری در مورد مسیرهای بهینه باید با در نظر گرفتن هزاران عامل متغیر از وضعیت ترافیک گرفته تا شرایط جوی و آن هم در کسری از ثانیه انجام شود. یا در یک شبکه برق هوشمند، تخصیص منابع باید هم‌زمان مصرف، تولید تجدیدپذیر و شرایط اضطراری را لحاظ کند [۷]. از سوی دیگر، تحولات فناورانه آینده مانند گسترش محاسبات لبه‌ای و پردازش مه [۴]، ورود ارتباطات ۶G، و استفاده گسترده از هوش مصنوعی در سیستم‌های کنترل [۸]، مرزهای توانمندی سیستم‌های توزیع‌شده را جابه‌جا خواهند کرد. این پیشرفت‌ها فرصت‌هایی تازه اما در عین حال پیچیدگی‌های مدیریتی جدیدی به همراه می‌آورند. عواملی مانند تغییرات سریع در بار کاری [۳]، تهدیدات امنیت سایبری پیچیده‌تر، و نیاز به هماهنگی بین‌المللی، مدیریت این سیستم‌ها را به یک مسئله بهینه‌سازی پویا و چندمعیاره تبدیل می‌کند. این شرایط، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری قدرتمند را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

الگوریتم عقاب ماهیگیر، با قابلیت ایجاد تعادل بین جستجوی سراسری و جستجوی محلی، یکی از گزینه‌ای ایده‌آل برای مواجهه با مسائل بهینه‌سازی پیچیده در سیستم‌های توزیع شده محسوب می‌شود و این مسئله اهمیت بررسی تحقیقات انجام‌گرفته در حوزه کاربرد الگوریتم عقاب ماهیگیر در حل چالش‌های سیستم‌های توزیع شده را نشان می‌دهد. هدف این پژوهش، بررسی کاربرد الگوریتم عقاب ماهیگیر و نسخه‌های ترکیبی آن در حل چالش‌های کلیدی سیستم‌های توزیع‌شده است. تمرکز بر

¹ Meta-heuristic algorithms

² Osprey optimization algorithm

³ Exploration

⁴ Exploitation

⁵ Distributed system

حوزه‌هایی نظیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱، رایانش ابری^۲، رایانش مه^۳، شبکه‌های برق هوشمند^۴ و سایر زیرساخت‌های مرتبط است، تا راهکارهایی عملی برای بهبود کارایی، کاهش مصرف انرژی و افزایش سطح امنیت ارائه شود.

۲- ادبیات پژوهش

۲-۱- سیستم‌های توزیع شده

سیستم‌های توزیع شده به مجموعه‌ای از کامپیوترها یا گره‌های مستقل اطلاق می‌شود که در مکان‌های جغرافیایی مختلف پراکنده و از طریق شبکه‌های ارتباطی با یکدیگر مرتبط شده‌اند. این سامانه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که وظایف مشترکی را به صورت هماهنگ انجام دهند، در حالی که هر گره به صورت مستقل عمل می‌کند. برخلاف سیستم‌های متمرکز که همه پردازش‌ها در یک نقطه مرکزی انجام می‌شود، سیستم‌های توزیع شده با توزیع بار کاری و داده‌ها در نقاط مختلف، مزایایی همچون افزایش قابلیت اطمینان، مقیاس پذیری و بهبود عملکرد را فراهم می‌کنند.

ساختار معماری این سیستم‌ها معمولاً شامل سه لایه اصلی است که عبارت‌اند از:

- ۱- لایه سخت‌افزار: گره‌های محاسباتی را شامل می‌شود؛ این گره‌ها می‌توانند انواع مختلفی از دستگاه‌ها مانند سرورها، کامپیوترهای شخصی یا دستگاه‌های اینترنت اشیا باشند. هر گره توانایی انجام پردازش و ذخیره‌سازی داده را داراست.
- ۲- لایه شبکه: این لایه مسئول ارتباط بین گره‌ها بوده و وظیفه انتقال پیام‌ها و داده‌ها را به صورت قابل اعتماد و در زمان مناسب بر عهده دارد. استفاده از پروتکل‌های متنوعی نظیر TCP/IP برای تضمین ارتباط پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است.

- ۳- لایه نرم‌افزار یا میانی^۵: این لایه به عنوان واسطه‌ای بین سخت‌افزار و نرم‌افزارهای کاربردی عمل می‌کند و وظایفی مانند هماهنگی، مدیریت منابع، کشف سرویس‌ها، امنیت، تضمین سازگاری داده‌ها و همگامی را انجام می‌دهد.

یکی از ویژگی‌های بارز سیستم‌های توزیع شده، افزایش تاب‌آوری و تحمل خطا است؛ بدین معنی که در صورت بروز مشکل در یکی از گره‌ها یا قطعی بخشی از شبکه، سیستم به صورت کلی از کار نمی‌افتد و سایر گره‌ها به فعالیت خود ادامه می‌دهند. این قابلیت برای سامانه‌های حیاتی و حساس به قطعی، نظیر بانک‌ها، مراکز داده و خدمات پزشکی، اهمیت بسیار زیادی دارد. با توجه به رشد فزاینده کاربران و داده‌ها، مقیاس‌پذیری این سیستم‌ها به گونه‌ای است که می‌تواند تعداد گره‌ها افزایش داده شود بدون اینکه عملکرد سیستم به طور قابل توجهی کاهش یابد. از دیگر مزایای سیستم‌های توزیع شده دسترسی جغرافیایی به منابع مشترک است که به کاربران و دستگاه‌ها اجازه می‌دهد بدون توجه به موقعیت فیزیکی خود، به منابع و خدمات دسترسی داشته باشند. این ویژگی به ویژه در عصر اینترنت و خدمات ابری اهمیت فراوانی یافته است. افزون بر این، با توزیع بار کاری، این سیستم‌ها امکان بهینه‌سازی منابع سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را فراهم می‌آورند که به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری منجر می‌شود.

با وجود مزایا و گستردگی کاربرد سیستم‌های توزیع شده، این سیستم‌ها با چالش‌های متعددی روبرو هستند که از آن جمله می‌توان به تضمین همگامی و سازگاری داده‌ها میان گره‌ها، چالش‌های امنیتی و مخاطرات مربوط به نفوذ و حملات سایبری به دلیل افزایش تعداد نقاط دسترسی، پیچیدگی‌های مدیریت ارتباطات و هماهنگی بین گره‌ها اشاره نمود. در ادامه تعدادی از سیستم‌های توزیع شده توضیح داده می‌شود.

¹ Wireless sensor network

² Cloud computing

³ Fog computing

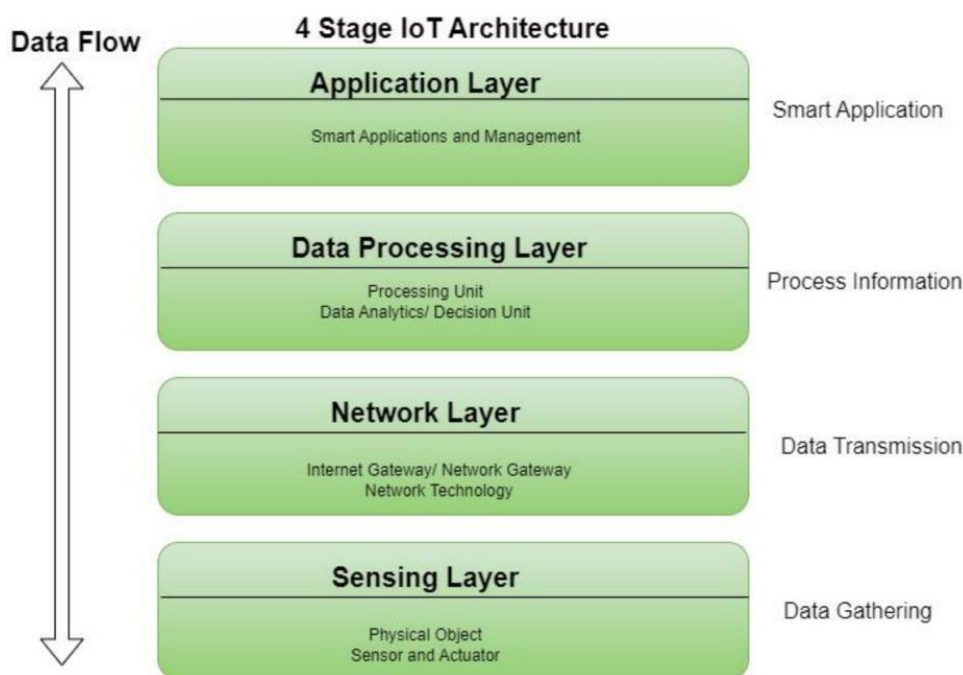
⁴ Smart grid

⁵ Middleware

۱-۲-۱ اینترنت اشیا^۱:

اینترنت اشیا به مجموعه‌ای از اشیا فیزیکی اطلاق می‌شود که از طریق اینترنت به یکدیگر متصل بوده و امکان جمع‌آوری، ارسال و تبادل داده‌ها را فراهم می‌کنند. این فناوری در حوزه‌های متنوعی همچون خانه‌های هوشمند، سلامت الکترونیک، حمل‌ونقل هوشمند و صنایع مختلف کاربرد دارد [۱۰].

از مزایای به‌کارگیری اینترنت اشیا می‌توان به افزایش سطح اتوماسیون، بهبود کیفیت خدمات و فراهم‌سازی داده‌های دقیق و لحظه‌ای اشاره کرد. در مقابل، برخی از چالش‌ها و محدودیت‌های این فناوری شامل نگرانی‌های امنیتی و حفظ حریم خصوصی، نیاز به پهنای باند و منابع سخت‌افزاری بالا و همچنین پیچیدگی در مدیریت شبکه‌های گسترده است [۱۱]. معماری آن چند لایه بوده و معمولاً از لایه حسگرها، لایه شبکه، لایه پردازش داده و لایه کاربرد تشکیل شده است. در شکل (۱) معماری اینترنت اشیا نشان داده شده است، این معماری شامل چهار لایه اصلی است که عبارتند از [۳،۵]:



شکل ۱: معماری اینترنت اشیا [12].

Figure 1. Internet of thing architecture. [12]

۱- لایه حسگر^۲: این لایه پایین‌ترین لایه در معماری چهار مرحله‌ای اینترنت اشیا است و به جمع‌آوری داده‌ها از محیط اطراف می‌پردازد. در این لایه از اشیا فیزیکی، حسگرها، و عملگرها استفاده می‌شود. حسگرها اطلاعاتی مانند دما، فشار، رطوبت، نور و حرکت را جمع‌آوری می‌کنند و عملگرها برای اعمال تغییرات در محیط استفاده می‌شوند. این داده‌ها به عنوان ورودی برای لایه‌های بالاتر عمل می‌کنند و نقشی اساسی در ارتباط دستگاه‌ها با محیط واقعی دارند [۱۲].

۲- لایه شبکه^۳: این لایه وظیفه انتقال داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط حسگرها به لایه‌های بالاتر را بر عهده دارد. لایه شبکه شامل فناوری‌هایی مانند دروازه‌های اینترنتی و پروتکل‌های شبکه است که امکان انتقال امن و سریع اطلاعات را فراهم می‌کنند. این لایه از طریق ارتباطات بی‌سیم مانند Wi-Fi، ZigBee، LoRa یا سیمی مانند Ethernet، داده‌ها را انتقال داده و پایه اصلی ارتباط در سیستم اینترنت اشیا محسوب می‌شود [۱۳].

¹ Internet of Things (IoT)

² Sensing layer

³ Network layer

۳- لایه پردازش داده^۱: در این لایه داده های جمع آوری شده پردازش و تحلیل می شوند. این مرحله شامل واحدهای پردازشی، تحلیل داده ها، و سیستم های تصمیم گیری است. لایه پردازش داده از الگوریتم های پیشرفته ای مانند یادگیری ماشین و تحلیل داده های بزرگ، برای استخراج الگوها و تولید اطلاعات ارزشمند استفاده می کند. همچنین این لایه تصمیمات لازم را بر اساس تحلیل داده ها اتخاذ کرده و نتایج را برای اجرای اقدامات به لایه های دیگر ارسال می کند [۱۴].

۴- لایه کاربرد^۲: این لایه بالاترین سطح در معماری اینترنت اشیا است و وظیفه مدیریت و نمایش اطلاعات پردازش شده را به کاربران نهایی برعهده دارد. در این لایه، اپلیکیشن های هوشمند برای نظارت، کنترل و مدیریت سیستم های اینترنت اشیا توسعه داده می شوند. لایه کاربرد داده های پردازش شده را در قالب رابط های کاربری، داشبوردها، و برنامه های کاربردی به کاربران ارائه می دهد و امکان تعامل مستقیم کاربران با سیستم را فراهم می کند [۱۲].

۲-۱-۲ رایانش ابری:

رایانش ابری به فناوری ارائه خدمات رایانشی از طریق اینترنت اشاره دارد که امکان دسترسی به منابعی مانند سرورها، فضای ذخیره سازی، پایگاه داده ها، شبکه ها و نرم افزارها را بدون نیاز به مدیریت مستقیم زیرساخت های فیزیکی فراهم می کند. این فناوری به کاربران و سازمان ها اجازه می دهد تا از خدمات اشتراکی و مقیاس پذیر بهره مند شوند و هزینه های سرمایه گذاری در تجهیزات و نگهداری آنها را کاهش دهند [۱۵، ۱۶]. در رایانش ابری، سه مدل اصلی خدمات وجود دارد که هر یک با سطح متفاوتی از کنترل، انعطاف پذیری و مسئولیت میان ارائه دهنده و کاربر تعریف می شوند که عبارتند از:

۱- زیرساخت به عنوان خدمت^۳: در این مدل، ارائه دهنده خدمات ابری منابع سخت افزاری پایه شامل سرورها، فضای ذخیره سازی، تجهیزات شبکه و ماشین های مجازی را به صورت مجازی در اختیار کاربران قرار می دهد. این منابع به صورت پویا قابل افزایش یا کاهش هستند و کاربران بدون نیاز به سرمایه گذاری در تجهیزات فیزیکی می توانند از آنها استفاده کنند. کنترل سیستم عامل، نرم افزارها و پیکربندی ها در اختیار کاربر است و ارائه دهنده صرفاً مسئول تأمین و نگهداری زیرساخت فیزیکی است. این مدل برای سازمان هایی که به انعطاف پذیری بالا و کنترل کامل بر محیط محاسباتی نیاز دارند مناسب است. نمونه هایی از این خدمات شامل Amazon EC2 و Microsoft Azure Virtual Machines است [۱۵].

۲- پلتفرم به عنوان خدمت^۴: در این مدل یک بستر کامل توسعه و اجرای نرم افزار شامل سیستم عامل، پایگاه داده، ابزارهای برنامه نویسی و چارچوب های نرم افزاری در اختیار توسعه دهندگان قرار می گیرد. هدف این مدل کاهش پیچیدگی های مربوط به مدیریت زیرساخت و فراهم کردن محیطی آماده برای توسعه، تست و استقرار نرم افزار است. توسعه دهندگان می توانند بر روی منطق برنامه نویسی و طراحی محصول تمرکز کنند و تمام مسائل مربوط به پیکربندی سرورها، به روزرسانی سیستم عامل و امنیت زیرساخت توسط ارائه دهنده مدیریت می شود. نمونه هایی از این خدمات عبارتند از Google App Engine و Heroku [۱۶].

۳- نرم افزار به عنوان خدمت^۵: در این مدل، نرم افزارهای کاربردی به طور کامل بر روی سرورهای ارائه دهنده اجرا می شوند و کاربران از طریق اینترنت و معمولاً با استفاده از مرورگر وب یا اپلیکیشن های اختصاصی به آنها دسترسی پیدا می کنند. کاربران نیازی به نصب، به روزرسانی یا نگهداری نرم افزار ندارند و تمامی این موارد توسط ارائه دهنده انجام

¹ Data processing layer

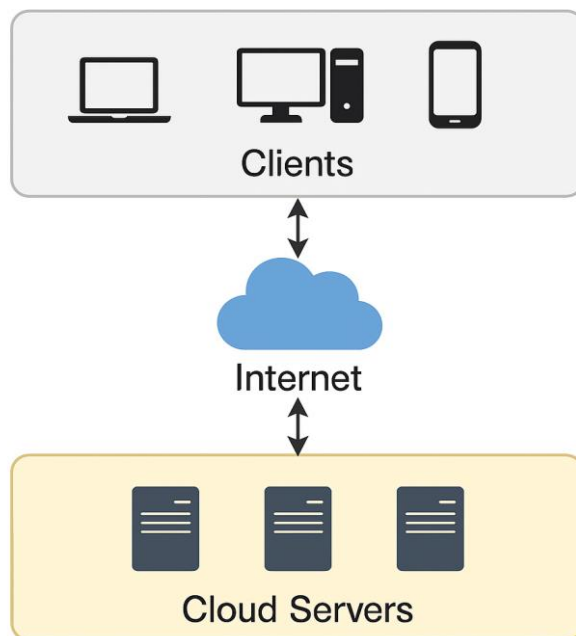
² Application layer

³ Infrastructure as a Service (IaaS)

⁴ Platform as a Service (PaaS)

⁵ Software as a Service (SaaS)

می‌شود. این مدل امکان دسترسی سریع، مقیاس‌پذیری بالا و به‌روزرسانی خودکار را فراهم می‌سازد و برای کاربران نهایی و سازمان‌ها که به دنبال کاهش هزینه‌های پشتیبانی و افزایش بهره‌وری هستند بسیار مناسب است. از نمونه‌های مشهور این مدل می‌توان به Google Workspace (شامل Gmail و Google Docs) و Microsoft 365 اشاره کرد [۱۶].



شکل ۲: معماری رایانش ابری [۱۲].
Figure 2: Cloud computing architecture [12].

در شکل ۲ معماری رایانش ابری نشان داده شده است که شامل سه لایه اصلی شامل کاربران نهایی^۱، مراکز داده یا سرویس‌دهنده‌های ابری^۲ که خدمات را ارائه می‌دهند، و شبکه اینترنت که ارتباط بین این دو را برقرار می‌کند. معماری ابری می‌تواند به صورت عمومی، خصوصی یا ترکیبی پیاده‌سازی شود که هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. این ساختار توزیع‌شده امکان بهینه‌سازی منابع و افزایش قابلیت اطمینان خدمات را فراهم می‌کند. رایانش ابری به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در حوزه محاسبات توزیع‌شده، مزایای متعددی از جمله مقیاس‌پذیری بالا، کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی، امکان دسترسی به منابع از هر نقطه با استفاده از اتصال به اینترنت و افزایش سرعت توسعه و استقرار خدمات نرم‌افزاری را در اختیار قرار می‌دهد. با این حال، چالش‌هایی همچون مسائل امنیتی و دغدغه‌های مربوط به حفظ حریم خصوصی داده‌ها، وابستگی بالا به زیرساخت اینترنت پایدار، احتمال عدم انطباق با قوانین و مقررات مرتبط با حفاظت داده‌ها و ریسک بروز اختلال یا خرابی سرویس‌دهنده‌های ابری می‌تواند کارایی و قابلیت اطمینان این فناوری را تحت تأثیر قرار دهد [۱۶].

۲-۱-۳ رایانش مه:

رایانش مه یک الگوی محاسباتی توزیع‌شده است که به منظور کاهش فاصله بین دستگاه‌های کاربر و مراکز داده ابری ایجاد شده است. در این معماری به جای آنکه همه پردازش‌ها صرفاً در ابر انجام گیرد بخشی از پردازش، ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها به لبه شبکه و نزدیک به منابع داده منتقل می‌شود. این رویکرد موجب کاهش تأخیر شبکه، بهینه‌سازی پهنای باند و بهبود پاسخ‌گویی سیستم‌ها می‌شود [۱۵]. از نظر ساختاری، رایانش مه معمولاً شامل سه لایه اصلی است که عبارتند از: لایه کاربر یا

¹ End Users

² Cloud servers

دستگاه های انتهایی، لایه مه، و لایه ابر. این لایه ها در کنار هم امکان پردازش داده در نزدیکی منبع تولید، و در عین حال بهره مندی از قدرت محاسباتی ابر را فراهم می کنند [۱۰]. در اینجا به توضیح این لایه ها خواهیم پرداخت:

۱- **لایه کاربر یا دستگاه های انتهایی:** این لایه شامل انواع حسگرها، دوربین ها، دستگاه های اینترنت اشیا و سایر دستگاه های هوشمند است که داده ها را تولید و جمع آوری می کنند. این دستگاه ها معمولاً محدودیت هایی از نظر پردازش و ذخیره سازی داشته و برای تحلیل های پیچیده تر نیاز به لایه های بالاتر دارند [۱۱].

۲- **لایه مه^۱:** لایه مه شامل گره های پردازشی است که در نزدیکی دستگاه های انتهایی و لایه شبکه قرار دارند، مانند روترها، سوئیچ ها، سرورهای کوچک یا مینی سرورها. این لایه وظیفه پردازش اولیه، فیلتر کردن، تحلیل های ساده و مدیریت داده ها را بر عهده دارد. به این ترتیب، حجم داده های ارسال شده به ابر کاهش یافته و زمان پاسخ دهی بهبود می یابد [۱۵].

۳- **لایه ابر^۲:** این لایه شامل مراکز داده ی بزرگ و قدرتمند است که قابلیت پردازش های سنگین، ذخیره سازی بلندمدت و تحلیل های پیشرفته داده را فراهم می کند. داده های پردازش شده در لایه مه در صورت نیاز برای تحلیل های جامع تر به این لایه ارسال می شوند.

از مزایای استفاده از رایانش مه می توان به کاهش زمان پاسخ گویی در برنامه های حساس به تأخیر مانند خودروهای خودران، سیستم های پایش پزشکی و صنایع هوشمند اشاره کرد. همچنین، پردازش محلی در مه باعث می شود حجم کمتری از داده خام به ابر ارسال شود که این امر علاوه بر کاهش مصرف پهنای باند، امنیت و حریم خصوصی کاربران را نیز افزایش می دهد. رایانش مه به عنوان پلی میان رایانش ابری و دستگاه های لبه، نقش مهمی در بهبود عملکرد، امنیت و کارایی سیستم های هوشمند ایفا می کند و انتظار می رود با گسترش اینترنت اشیا و نیاز روزافزون به پردازش سریع و محلی، جایگاه آن در معماری های آینده فناوری اطلاعات بیش از پیش تقویت شود.

۲-۱-۴ شبکه های خودرویی ادهاک^۳:

این شبکه ها نوعی شبکه بی سیم توزیع شده هستند که ارتباطات میان خودروها و زیرساخت های جاده ای را برقرار می کنند. شبکه های خودرویی ادهاک باهدف ایجاد ارتباطات سریع، پویا و ایمن میان وسایل نقلیه و ایستگاه های جاده ای طراحی شده اند تا به بهبود ایمنی رانندگی، مدیریت ترافیک و ارائه خدمات هوشمند در حوزه حمل و نقل کمک کنند. در این شبکه ها، خودروها به عنوان گره های متحرک عمل می کنند و ایستگاه های جاده ای نیز به عنوان گره های ثابت، وظیفه جمع آوری، پردازش و انتقال داده ها را بر عهده دارند. از جمله مزایای مهم شبکه های خودرویی می توان به ارتباط مستقیم بین خودروها بدون نیاز به زیرساخت ثابت اشاره کرد که باعث می شود سیستم به راحتی در مناطق مختلف قابل استفاده باشد. همچنین این شبکه ها توانایی پشتیبانی از تعداد زیادی خودرو که با سرعت های بالا در حال حرکت هستند را دارد که این ویژگی برای محیط های شهری و بزرگراه ها بسیار حیاتی است. علاوه بر این، این نوع شبکه می تواند به کاهش تصادفات و افزایش ایمنی جاده ها کمک کند چرا که اطلاعات مرتبط با وضعیت ترافیک و خطرات احتمالی به سرعت بین خودروها رد و بدل می شود. با این تغییر مکرر توپولوژی شبکه که حفظ ارتباط پایدار را دشوار می سازد، نیاز به پروتکل های خاص برای مدیریت دسترسی، امنیت و اطمینان از حریم خصوصی در این شبکه ها از جمله چالش هایی آن است. محدودیت های پهنای باند و احتمال تأخیر در انتقال داده ها از دیگر مشکلات بالقوه در این شبکه ها به شمار می روند [۱۳].

¹ Fog layer

² Cloud layer

³ Vehicular Ad hoc Network (VANET)

معماری VANET به طور کلی از دو بخش اصلی تشکیل شده است که هر کدام نقش خاص و مهمی در عملکرد شبکه دارند و عبارتند از:

۱. گره های متحرک (خودروها): هر خودرو در شبکه به عنوان یک گره متحرک عمل می کند که قادر است داده ها را تولید، دریافت و ارسال کند. این گره ها به دلیل حرکت مداوم و تغییر موقعیت، توپولوژی شبکه را به طور مداوم تغییر می دهند و ارتباطات بین خودروها باید با این تغییرات سریع سازگار شود. خودروها با استفاده از تجهیزات مخابراتی بی سیم مانند Wi-Fi به یکدیگر متصل می شوند و می توانند اطلاعاتی مانند سرعت، موقعیت، وضعیت جاده و هشدارهای ایمنی را به اشتراک بگذارند. این ارتباط مستقیم بین خودروها، تحت عنوان ارتباط خودرو به خودرو شناخته می شود [۱۱].

۲. ایستگاه های جاده ای ثابت^۱: علاوه بر خودروها، در طول جاده ها و خیابان ها ایستگاه های جاده ای ثابتی تعبیه می شود که نقش رابط و نقطه دسترسی به زیرساخت شبکه را دارند. این ایستگاه ها؛ داده های جمع آوری شده از خودروها را پردازش، ذخیره و در صورت نیاز به مراکز داده یا شبکه های ابری ارسال می کنند. همچنین ایستگاه ها می توانند اطلاعات مهمی مانند هشدارهای ترافیکی، وضعیت جاده، تغییرات جوی و قوانین رانندگی را به خودروها منتقل کنند. این نوع ارتباط به نام ارتباط خودرو به زیرساخت معروف است [۱۳].

۲-۱-۵ شبکه های حسگر بی سیم:

شبکه های حسگر بی سیم مجموعه ای از حسگرهای کوچک و خودمختار هستند که به صورت توزیع شده در محیط های مختلف مستقر می شوند و داده های محیطی مانند دما، رطوبت، حرکت و سایر پارامترهای فیزیکی را جمع آوری می کنند. این داده ها به صورت بی سیم به ایستگاه های پایه^۲ یا مراکز کنترل ارسال می شوند تا پردازش و تحلیل شود [۱۲]. به دلیل قابلیت نصب آسان و انعطاف پذیری بالا، این شبکه ها در محیط های سخت و دورافتاده کاربرد فراوانی دارند. از جمله نقاط قوت WSN می توان به توانایی پوشش گسترده محیط های نامناسب برای دسترسی مستقیم اشاره کرد. همچنین مصرف انرژی پایین حسگرها، که به کمک الگوریتم های بهینه سازی مدیریت می شود، موجب افزایش طول عمر شبکه می گردد. قابلیت نصب آسان و انعطاف پذیری در طراحی شبکه نیز امکان پیاده سازی در کاربردهای مختلف را فراهم می آورد. با این حال، محدودیت منابع سخت افزاری مانند ظرفیت باتری و توان پردازشی محدود، چالشی جدی در این شبکه ها به شمار می آیند [۱۲]. از سوی دیگر، مسائل امنیتی نظیر آسیب پذیری در برابر حملات سایبری و خطرات دسترسی غیرمجاز به داده ها از مشکلات مهم این حوزه است [۱۲]. علاوه بر این، نویز و تداخل سیگنال در محیط های مختلف می تواند کیفیت انتقال داده ها را کاهش داده و موجب تأخیر یا از دست رفتن اطلاعات شود [۱۴]. کاربردهای شبکه های حسگر بی سیم گسترده است که از میان آن ها می توان به مانیتورینگ محیطی و کشاورزی هوشمند، مراقبت های پزشکی از راه دور، نظارت بر زیرساخت های حیاتی و صنایع است [۱۳]. معماری شبکه های حسگر بی سیم معمولاً از لایه های زیر تشکیل می شود:

۱. لایه حسگر: این لایه شامل گره های حسگر کوچک و خودمختاری است که به صورت پراکنده در محیط موردنظر مستقر می شوند. هر حسگر وظیفه جمع آوری داده های محیطی مانند دما، رطوبت، نور، فشار و حرکت را دارد. این داده ها معمولاً به صورت خام و با حجم کم هستند که نیاز به پردازش و پالایش دارند. حسگرها به دلیل محدودیت های سخت افزاری مانند ظرفیت باتری و توان پردازشی، باید مصرف انرژی خود را بهینه کنند [۱۳].

۲. لایه پردازش محلی^۳: داده های جمع آوری شده در این لایه ابتدا پردازش اولیه می شوند. این پردازش می تواند شامل فشرده سازی داده، حذف نویز، ادغام داده های مشابه و تحلیل های اولیه باشد. هدف این لایه کاهش حجم داده هایی

¹ Roadside Units (RSUs)

² Base stations

³ Local processing layer

است که باید به مراحل بعدی ارسال شود تا مصرف انرژی و پهنای باند کاهش یابد. گره های پردازشی می توانند شامل حسگرهای پیشرفته تر یا گره های میانی با توان پردازشی بیشتر باشند [۱۴].

۳. لایه شبکه ارتباطی^۱: این لایه مسئول انتقال داده ها از حسگرها و گره های پردازشی به ایستگاه پایه است. انتقال داده ها در WSN معمولاً از طریق شبکه ای از گره ها و به صورت چندمرحله ای انجام می شود، به طوری که داده ها از یک حسگر به حسگر دیگر و در نهایت به ایستگاه پایه منتقل می شوند. استفاده از روش های مسیریابی چندمرحله ای و سلسله مراتبی باعث می شود انرژی مصرفی در هر گره کاهش یافته و طول عمر کلی شبکه افزایش یابد. این لایه باید بتواند با شرایط متغیر محیطی، نویز و تداخل مقابله کند و انتقال داده ها را پایدار نگه دارد.

۴. ایستگاه پایه: ایستگاه پایه نقطه مرکزی شبکه است که داده های ارسال شده از سراسر شبکه را دریافت می کند. این مرکز معمولاً دارای توان پردازشی بالا، حافظه گسترده و قابلیت اتصال به شبکه های گسترده تر مانند اینترنت است. در این بخش داده ها ذخیره، تحلیل و پردازش های پیچیده تر انجام می شود. همچنین، ایستگاه پایه می تواند فرمان ها و تنظیمات کنترلی را به گره های حسگر ارسال کند تا شبکه به صورت هوشمند و بهینه کار کند.

با پیشرفت فناوری و توسعه الگوریتم های نوین، انتظار می رود شبکه های حسگر بی سیم نقش کلیدی در سامانه های هوشمند و اینترنت اشیا ایفا کرده و محدودیت های فعلی به مرور کاهش یابد [۱۲].

۲-۱-۶ سیستم موقعیت یابی داخلی مبتنی بر نور مرئی^۲:

سیستم موقعیت یابی داخلی مبتنی بر نور مرئی یکی از فناوری های نوظهور در حوزه مکان یابی در محیط های بسته است که از چراغ های LED^۳ به عنوان منبع ارسال سیگنال استفاده می کند. این سیستم ها با بهره گیری از ویژگی های نوری منحصر به فرد چراغ های LED، امکان تخمین دقیق موقعیت کاربران یا اشیا را فراهم می آورند. سیگنال های نوری از طریق فرستنده ها منتشر شده و توسط گیرنده هایی مانند دیوده های نوری گیرنده^۴ یا دوربین های نوری دریافت می شوند [۱۹]. سپس این داده ها توسط الگوریتم های پردازشی تحلیل و موقعیت دقیق تعیین می شود معماری IVLP معمولاً شامل سه لایه اصلی است: لایه فرستنده، لایه گیرنده، و لایه پردازش [۲۰]:

✓ لایه فرستنده: این لایه شامل چراغ های LED است که به عنوان منابع نور و ارسال کننده سیگنال عمل می کنند. چراغ های LED علاوه بر تأمین روشنایی محیط، سیگنال های نوری مدوله شده را منتشر می کنند که این سیگنال ها حاوی اطلاعات موقعیت یا شناسه خاصی هستند. مدولاسیون سیگنال نوری معمولاً به گونه ای انجام می شود که برای چشم انسان قابل تشخیص نباشد؛ ولی توسط گیرنده های نوری قابل دریافت و تحلیل باشد. در این لایه، فناوری هایی مانند مدولاسیون پهنای پالس^۵ یا مدولاسیون تقسیم فرکانس^۶ ممکن است به کار روند تا اطلاعات به شکل امن و دقیق منتقل شوند.

✓ لایه گیرنده: این لایه شامل حسگرهای نوری است که می توانند دیوده های نوری گیرنده، دوربین های یا سایر سنسورهای حساس به نور باشند. وظیفه اصلی این لایه، دریافت سیگنال های نوری ارسالی از چراغ های LED و اندازه گیری پارامترهایی نظیر شدت نور، فرکانس مدولاسیون و تغییرات زمانی سیگنال است. داده های جمع آوری شده در این

¹ Communication layer

² Indoor Visible Light Positioning (IVLP)

³ Light Emitting Diode (LED)

⁴ Photodiodes

⁵ Pulse Width Modulation (PWM)

⁶ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

مرحله، به صورت خام یا پردازش شده به لایه بعدی منتقل می شوند. کیفیت و نوع حسگرها تأثیر مستقیمی بر دقت و کارایی کل سیستم دارد.

✓ لایه پردازش: در این لایه، داده های دریافتی از گیرنده های نوری توسط الگوریتم های پیشرفته پردازش می شوند. این الگوریتم ها شامل روش های مختلفی مانند تعیین زمان پرواز نور^۱، اندازه گیری شدت سیگنال دریافتی^۲، یا روش های چندگانه مثل سه گانه سازی^۳ و چندضلعی سازی^۴ هستند. هدف اصلی این لایه، تحلیل داده ها به منظور استخراج مختصات دقیق موقعیت کاربر یا شیء است. علاوه بر این، در این لایه ممکن است الگوریتم های تصحیح خطا، فیلترهای کاهنده نویز و روش های بهینه سازی نیز به کار گرفته شوند تا دقت و پایداری سیستم افزایش یابد.

از مزایای این فناوری می توان به دقت بالا (معمولاً در حد چند سانتی متر)، عدم ایجاد تداخل با امواج رادیویی که آن را برای محیط های حساس به سیگنال فرکانس رادیویی مناسب می سازد و بهره گیری از زیرساخت روشنایی موجود اشاره کرد که هزینه های نصب و راه اندازی را کاهش می دهد. باین حال، IVLP با محدودیت هایی نیز همراه است، از جمله نیاز به وجود خط دید مستقیم بین منبع نور و گیرنده، عملکرد ضعیف در شرایط نور محیطی شدید یا وجود موانع فیزیکی و نیاز به هماهنگی دقیق سخت افزار و نرم افزار برای حفظ کیفیت عملکرد می توان اشاره کرد. کاربردهای اصلی این سیستم شامل راهنمایی و ناوبری در فضاهای داخلی مانند مراکز خرید، موزه ها و بیمارستان ها، ردیابی دارایی ها و تجهیزات در محیط های صنعتی و انبارها، و پشتیبانی از سیستم های واقعیت افزوده در محیط های بسته است. در مجموع، سیستم موقعیت یابی داخلی مبتنی بر نور مرئی باتوجه به دقت بالا و سازگاری با محیط های حساس، یکی از گزینه های مؤثر و بهینه برای مکان یابی در فضای بسته به شمار می آید [۲۲].

۷-۱-۲ ریزشبکه^۵:

ریزشبکه یک سامانه انرژی کوچک، محلی و خودکفا است که می تواند به صورت متصل به شبکه اصلی برق یا به شکل کاملاً مستقل (حالت جزیره ای) عمل کند. این شبکه ها متشکل از منابع تولید انرژی مانند پنل های خورشیدی، توربین های بادی و ژنراتورهای دیزلی یا گازی، سامانه های ذخیره سازی انرژی، و مجموعه ای از مصرف کنندگان محلی هستند [۱۱]. ریزشبکه ها با استفاده از سامانه های کنترلی هوشمند، امکان مدیریت هم زمان تولید و مصرف را فراهم کرده و به افزایش پایداری، قابلیت اطمینان و بهره وری سیستم انرژی کمک می کنند. معماری یک ریزشبکه معمولاً شامل سه بخش اصلی زیر است:

۱- منابع تولید پراکنده^۶: این بخش شامل تمام واحدهای تولید توان است که در مقیاس کوچک و در نزدیکی مصرف کنندگان قرار گرفته اند. مهم ترین نمونه های آن عبارتند از: منابع انرژی تجدیدپذیر (شامل پنل های خورشیدی که انرژی خورشید را به برق تبدیل می کنند و توربین های بادی که انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی بدل می سازند)، منابع غیر تجدیدپذیر محلی (شامل ژنراتورهای دیزلی یا گازی که به عنوان پشتیبان برای مواقع کمبود انرژی تجدیدپذیر به کار می روند) و واحدهای تولید هم زمان برق و حرارت^۷ (شامل سیستم هایی که راندمان کلی را از طریق استفاده هم زمان از انرژی حرارتی و الکتریکی افزایش می دهند) [۱۱].

¹ Time of flight

² Received signal strength

³ Trilateration

⁴ Multilateration

⁵ Microgrid

⁶ Distributed generation

⁷ Combined Heat and Power (CHP)

۲- سیستم های ذخیره سازی انرژی: نقش اصلی این بخش، ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا، و تضمین پایداری سیستم در شرایط نوسان بار یا تغییرات ناگهانی تولید است. مهم ترین فناوری های ذخیره سازی شامل ذخیره سازی الکتروشیمیایی (باتری های لیتیوم - یون، باتری های سرب - اسید پیشرفته و باتری های جریان) و ذخیره سازی مکانیکی (چرخ های طیار^۱ که انرژی را به صورت جنبشی ذخیره می کنند) هستند [۱۱].

۳- زیرساخت کنترلی و مدیریتی: این بخش ستون فقرات عملکرد بهینه ریزشبکه است و شامل لایه های سخت افزاری و نرم افزاری برای نظارت، کنترل و بهینه سازی است که عبارتند از:

✓ سیستم کنترل محلی: وظیفه کنترل آنی منابع و بارهای متصل به هر واحد تولید یا ذخیره را بر عهده دارد.

✓ سیستم مدیریت انرژی^۲: الگوریتم های بهینه سازی تولید، ذخیره سازی و مصرف را بر اساس پیش بینی بار و شرایط شبکه اجرا می کند.

✓ سیستم حفاظت^۳: برای شناسایی و رفع خطاها، جداسازی بخش های آسیب دیده و حفظ پایداری کل شبکه طراحی شده است.

✓ ارتباطات و اینترنت اشیا^۴: تبادل داده بین اجزای ریزشبکه و شبکه اصلی یا اپراتورهای محلی از طریق پروتکل های ارتباطی امن و پایدار را بر عهده دارد [۱۱].

این سه بخش به صورت هماهنگ و یکپارچه عمل کرده و با استفاده از فناوری های نوین، امکان بهره برداری بهینه، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش اثرات زیست محیطی را فراهم می کنند.

۲-۱-۸ شبکه های مقاوم در برابر تأخیر^۵:

شبکه های مقاوم در برابر تأخیر نوعی معماری ارتباطی هستند که برای انتقال داده در محیط هایی با تأخیر زیاد، قطعی های مکرر یا دسترسی متناوب به شبکه طراحی شده اند. این معماری با بهره گیری از رویکرد ذخیره و ارسال^۶، بسته های داده را در حافظه گره های واسط ذخیره کرده و تنها در زمان ایجاد مسیر ارتباطی پایدار، اقدام به ارسال آن ها به مقصد بعدی می کند. این ویژگی موجب می شود که این نوع شبکه ها در سناریوهایی که ارتباط پیوسته ممکن نیست، عملکرد قابل اعتمادی را ارائه دهد [۲۳، ۲۴]. از مزایای استفاده از DTN می توان به پایداری بالا در شرایط ارتباطی دشوار، انعطاف پذیری در محیط های گوناگون نظیر فضا، اعماق دریا یا مناطق دورافتاده، عدم نیاز به اتصال دائمی بین مبدا و مقصد و همچنین قابلیت استفاده از گره های متحرک مانند ماهواره ها یا پهپادها برای حمل داده اشاره کرد. در مقابل، برخی معایب استفاده از DTN عبارتند از پیچیدگی مدیریت حافظه برای نگهداری موقت داده ها، زمان بالای تحویل پیام در برخی سناریوها، مصرف انرژی بیشتر در صورت نیاز به روشن ماندن طولانی مدت گره ها و دشواری در پیاده سازی و نگهداری به دلیل نیاز به پروتکل ها و نرم افزارهای اختصاصی. از طرف دیگر نیاز به ظرفیت ذخیره سازی بالا در گره ها، پیچیدگی در مدیریت صف ها و زمان بندی ارسال و افزایش ریسک های امنیتی به دلیل ذخیره موقت داده ها، از جمله محدودیت های اصلی آن به شمار می آید [۲۵].

¹ Flywheels

² Energy Management System (EMS)

³ Protection system

⁴ IoT integration

⁵ Delay Tolerant Networks (DTN)

⁶ Store and forward

معماری کلی شبکه‌های مقاوم در برابر تأخیر بر پایه مفهوم ذخیره، حمل و ارسال^۱ طراحی شده است و هدف آن فراهم‌سازی ارتباط پایدار در محیط‌هایی با اتصالات ناپایدار، تأخیر بالا یا قطع و وصل‌های مکرر است. اجزای اصلی این معماری شامل موارد زیر است:

۱. گره‌ها^۲: شامل انواع مختلفی از گره‌ها است که می‌توانند ثابت یا متحرک باشند و قابلیت ذخیره داده برای مدت طولانی را دارند. این گره‌ها می‌توانند داده‌ها را دریافت، نگهداری و در صورت برقراری مسیر مناسب آن‌ها را به مقصد یا گره بعدی ارسال کنند.

۲. پروتکل لایه باندل^۳: یک لایه میانی بین لایه‌های سنتی شبکه مثل TCP/IP و برنامه‌های کاربردی که داده‌ها را به شکل بسته‌های بزرگ‌تر موسوم به باندل مدیریت می‌کند. این لایه مسئول ذخیره‌سازی، صف‌بندی و زمان‌بندی ارسال داده‌ها است.

۳. مکانیزم‌های ذخیره‌سازی و صف‌بندی: هر گره مجهز به فضای ذخیره‌سازی پایدار (مانند حافظه فلش یا دیسک) است تا داده‌ها را تا زمان در دسترس بودن مسیر مناسب نگه دارد.

۴. مکانیزم کشف و برقراری ارتباط: شامل پروتکل‌ها و الگوریتم‌هایی برای کشف گره‌های مجاور و ایجاد لینک ارتباطی به محض در دسترس بودن آن‌ها است.

۵. زیرساخت مدیریت و مسیریابی: از الگوریتم‌های خاص مسیریابی مانند Epidemic Routing یا Prophet برای یافتن مسیرهای احتمالی بین گره‌ها در شرایطی که مسیر کامل از مبدأ تا مقصد در یک لحظه وجود ندارد، استفاده می‌شود [۲۶].

۹-۱-۲ سیستم های تولید برق^۴:

این سامانه‌ها مجموعه‌ای از تجهیزات است که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند تا برق تولید شود. این سیستم‌ها انرژی را از منابع مختلف مانند سوخت‌های هسته‌ای، تجدیدپذیر، پتانسیل گرانشی یا فسیلی دریافت کرده و با استفاده از یک ژنراتور، آن را به برق تبدیل می‌کنند. اجزای اصلی یک سیستم تولید برق شامل منبع انرژی (توربین یا موتور)، ژنراتور (مولد برق)، سیستم خنک‌کاری، سیستم سوخت‌رسانی و سیستم کنترل و روغن‌کاری است. در اینجا به شرح این اجزا خواهیم پرداخت:

- ✓ منبع انرژی (موتور یا توربین): این بخش انرژی را از منابع اولیه فراهم می‌کند؛ مثلاً توربین گاز، توربین بخار، توربین آبی یا موتور درون‌سوز، انرژی مکانیکی لازم را تولید می‌کنند.
- ✓ ژنراتور: وظیفه اصلی آن تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی از طریق القای الکترومغناطیسی است.
- ✓ سیستم سوخت‌رسانی: سوخت را از مخزن جمع‌آوری کرده، فیلتر می‌کند و به موتور تزریق می‌نماید تا فرایند تولید انرژی مکانیکی آغاز شود.

¹ Store-Carry-Forward

² Nodes

³ Bundle Protocol

⁴ Power generating system

✓ سیستم خنک کاری: گرمای تولید شده توسط ژنراتور را دفع کرده و از آسیب دیدن قطعات جلوگیری می کند.

✓ سیستم روان کاری: قطعات متحرک ژنراتور را روغن کاری می کند تا اصطکاک کاهش یابد و عمر دستگاه افزایش پیدا کند.

سیستم کنترل: پارامترهایی مانند ولتاژ، فرکانس و سایر عملکردهای سیستم را تنظیم و کنترل می کند.

سیستم های تولید برق در نیروگاه های بزرگ، مراکز صنعتی، ساختمان های پرمصرف و حتی در مقیاس کوچک تر به صورت ژنراتورهای قابل حمل مورد استفاده قرار می گیرند. این سیستم ها زیرساخت های اساسی برای رشد صنعتی، اقتصادی و اجتماعی جوامع محسوب می شوند.

۲-۲- الگوریتم های فراابتکاری

الگوریتم های فراابتکاری روش هایی برای بهینه سازی هستند که راه حل های بهینه (یا تقریباً بهینه) مسائل بهینه سازی را پیدا می کنند. این الگوریتم ها فاقد وابستگی به مشتق هستند و ویژگی هایی مانند سادگی، انعطاف پذیری و توانایی جلوگیری از گیرافتادن در بهینه های محلی را دارند. رفتار این الگوریتم ها تصادفی است و فرایند بهینه سازی را با تولید راه حل های تصادفی آغاز می کنند. برخلاف روش های مبتنی بر جستجوی گرادین، نیازی به محاسبه مشتق فضای جستجو ندارند [10]. این الگوریتم ها می توانند به سادگی برای حل مسائل خاص تغییر داده شوند. یکی از مهم ترین خاصیت آن ها توانایی جلوگیری از همگرایی زود هنگام است. به دلیل رفتار تصادفی، این الگوریتم ها به صورت جعبه سیاه عمل کرده و از گیر افتادن در بهینه های محلی اجتناب می کنند و فضای جستجو را به طور کارآمد و مؤثری بررسی می نمایند. الگوریتم های فراابتکاری برای حل مسائل بهینه سازی با تمرکز بر دو جنبه اصلی طراحی می شوند: اکتشاف و بهره برداری. اکتشاف به معنای جستجوی گسترده در فضای جستجو برای شناسایی نواحی امیدوارکننده و اجتناب از گرفتار شدن در بهینه های محلی است. در مقابل، بهره برداری به معنای جستجوی دقیق تر در نواحی شناسایی شده برای یافتن بهترین پاسخ ممکن است. تعادل بین این دو جنبه، عامل اصلی موفقیت الگوریتم های فراابتکاری است. الگوریتم هایی مانند الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی ازدحام ذرات، بهینه سازی کلونی مورچگان و الگوریتم عقاب ماهیگیر از جمله الگوریتم های فراابتکاری هستند که با استفاده از این دو جنبه توانسته اند در حل مسائل پیچیده و چندبعدی عملکرد مؤثری داشته باشند. این الگوریتم ها در زمینه های مهندسی و علوم مختلف مانند مهندسی برق (بهینه سازی تولید توان)، مهندسی عمران (طراحی پل ها و ساختمان ها)، داده کاوی (طبقه بندی، پیش بینی و خوشه بندی) و بسیاری از زمینه های دیگر به کار گرفته شده اند [۱۲].

الگوریتم های فراابتکاری معمولاً به چهار دسته اصلی تقسیم می شوند که عبارتند از: الگوریتم های مبتنی بر تکامل که الهام گرفته از تکامل طبیعی هستند و فرایند را با جمعیتی تصادفی آغاز می کنند. الگوریتم ژنتیک نمونه ای شناخته شده در این دسته است. الگوریتم های مبتنی بر هوش ازدحامی که از رفتار اجتماعی حشرات، حیوانات یا پرندگان الهام گرفته اند. مانند بهینه سازی ازدحام ذرات و بهینه سازی کلونی مورچه ها. الگوریتم های مبتنی بر قوانین فیزیکی که از قوانین فیزیکی الهام گرفته شده اند. مانند الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده^۱ و جستجوی هارمونی. الگوریتم های مبتنی بر رفتار انسانی که از رفتار انسانی الهام گرفته اند. مانند الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر یادگیری آموزش و الگوریتم قهرمانی [۲۶]. برای درک بهتر موضوع چند نمونه از انواع الگوریتم های فراابتکاری را با توجه به الهام گرفته شدن آنها از عناصر طبیعی، سال انتشار و نام نویسنده آن در جدول ۱ مشاهده می شود.

¹ Simulated Annealing (SA)

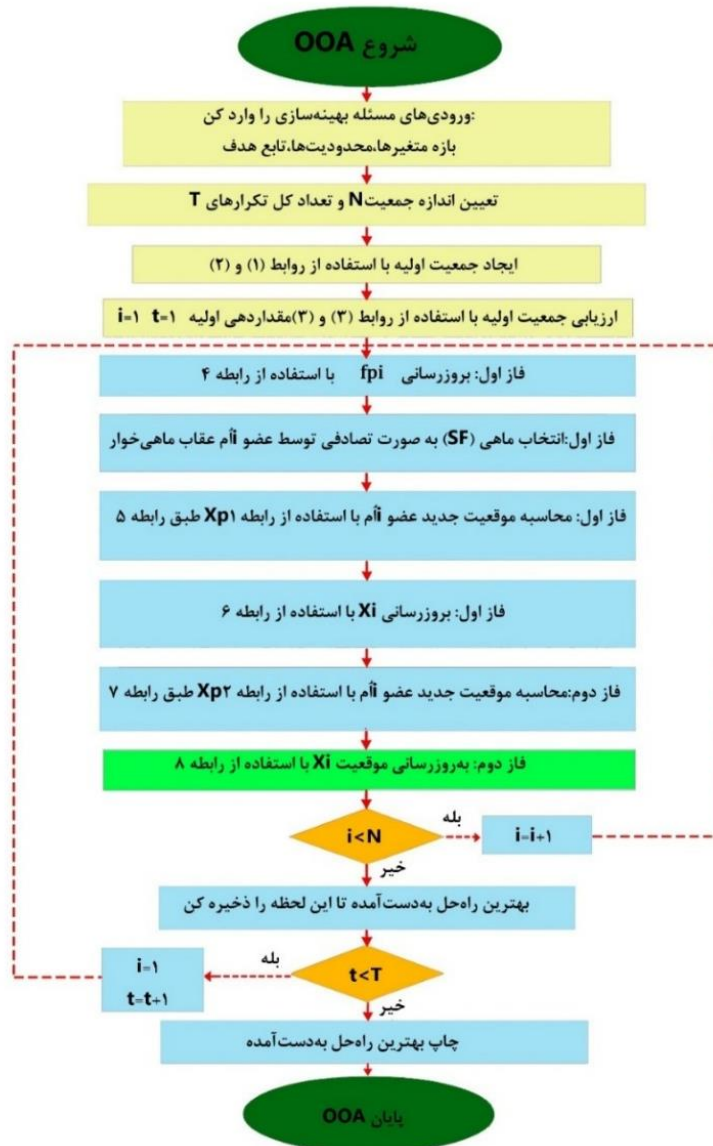
جدول ۱: چند نمونه از انواع الگوریتم های فراابتکاری

Table 1. Examples of meta-heuristic algorithms

نام نویسنده و مرجع	سال ارایه	الهام از	نام الگوریتم
(Kirkpatrick et al.) [23]	1983	سرد شدن فلزات	الگوریتم تبرید شیبیه سازی شده
(Fred Glover) [21]	1950	جستجوی محلی برای بهبود راه حل	جستجوی محلی
(Fred Glover) [21]	1986	حافظه کوتاه مدت و بلندمدت برای اجتناب از تکرار	الگوریتم جستجوی ممنوعه
(John Holland) [27]	1975	تکامل زیستی	الگوریتم ژنتیک
(Kennedy & Eberhart) [28]	1995	حرکت گروهی پرندگان و ماهی ها	الگوریتم ازدحام ذرات
(Marco Dorigo) [27]	1992	رفتار مورچه ها در یافتن مسیر	الگوریتم کلونی مورچه ها
(Karaboga & Basturk) [22]	2005	رفتار زنبورهای عسل در جستجوی غذا	الگوریتم زنبور عسل
(Mirjalili et al.) [29]	2014	رفتار شکار و همکاری گرگ ها	الگوریتم گرگ خاکستری
(Mohammad Dehghani and Pavel Trojovský) [6]	2021	شکار عقاب های ماهیگیر	الگوریتم عقاب ماهیگیر
(Xin-She Yang) [30]	2010	شیبیه سازی رفتار خفاش ها در جهت یابی با امواج	الگوریتم خفاش

۲-۳ الگوریتم عقاب ماهیگیر

عقاب ماهیگیر یک پرنده شکارچی جهانی است که بیشتر رژیم غذایی آن را ماهی تشکیل می دهد و با ویژگی های ظاهری خاص و دید بسیار قوی قادر به شناسایی و شکار طعمه از ارتفاع بالاست. رفتارهای شکار این پرنده، شامل شناسایی مناطق مناسب، پرواز در ارتفاع برای یافتن طعمه و حمله سریع و دقیق به شکار، الهام بخش طراحی الگوریتم بهینه سازی عقاب ماهیگیر شده است. الگوریتم عقاب ماهیگیر یک الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته از رفتار شکار عقاب ماهیگیر است که با تمرکز بر تعادل میان اکتشاف و بهره برداری طراحی شده است. این الگوریتم در فاز اول (شناسایی شکار) به بررسی گسترده فضای جستجو می پردازد تا از گیرافتادن در بهینه های محلی جلوگیری کند، و در فاز دوم (حمل شکار به موقعیت مناسب)، به جستجوی دقیق در بهترین مناطق شناسایی شده برای یافتن پاسخ بهینه می پردازد. از ویژگی های بارز این الگوریتم می توان به سادگی در پیاده سازی، انعطاف پذیری در حل مسائل مختلف، و توانایی اجتناب از بهینه های محلی اشاره کرد. این الگوریتم به دلیل ساختار کارآمد خود، در حل مسائل پیچیده مانند بهینه سازی شبکه های اینترنت اشیا، انتخاب ویژگی در یادگیری ماشین، و بهینه سازی مسیر بسیار مؤثر بوده است. از کاربردهای مهم الگوریتم عقاب ماهیگیر می توان به موارد زیر اشاره کرد: مهندسی و طراحی: برای بهینه سازی طراحی سازه ها، سیستم های انرژی و مدیریت منابع. لوم داده و هوش مصنوعی: در خوشه بندی داده ها، انتخاب ویژگی، و آموزش مدل های یادگیری ماشین. مسائل صنعتی: مانند زمان بندی تولید، بهینه سازی زنجیره تأمین و مسیریابی. سیستم های انرژی: برای بهینه سازی شبکه های برق هوشمند و کاهش مصرف انرژی. مسائل زیست محیطی: مانند مدیریت منابع آب و بهینه سازی استفاده از منابع طبیعی. این الگوریتم به دلیل سادگی، انعطاف پذیری و کارایی بالا در حل مسائل غیرخطی و پیچیده، به ویژه در مسائلی که فضای جستجو بزرگ و پرچالش است، مورد توجه قرار گرفته است. در شکل ۲ دیگرام الگوریتم عقاب ماهیگیر نشان داده شده است. در ادامه به بررسی بخش های مختلف این الگوریتم می پردازیم [۶].



شکل ۲: دیاگرام الگوریتم بهینه سازی عقاب ماهیگیر [۶]

Figure 2. Flowchart of the osprey optimization algorithm [6]

• بخش اول: شناسایی موقعیت و شکار ماهی

در این بخش، هدف الگوریتم این است که اعضای جمعیت (عقاب ها) موقعیت های بهتری پیدا کنند و با استفاده از اطلاعات موجود، موقعیت خود را بهینه کنند. مراحل این بخش به ترتیب زیر است:

✓ تعیین موقعیت های ماهی های شکار شده توسط عقاب: عقاب i -ام یکی از موقعیت های ماهی را به صورت تصادفی انتخاب می کند. از رابطه زیر برای بروزرسانی مجموعه موقعیت ها استفاده می شود:

$$F_{p_i} = X_k | k \in \{1, 2, \dots, N\}, F_k < F_i\} \cup X_{best}\} \quad (1)$$

F_k مقدار تابع هدف در موقعیت X_k است و X_{best} بهترین موقعیت موجود تا این لحظه است.

✓ محاسبه موقعیت جدید عقاب در فاز اول: موقعیت جدید برای عضو i -ام الگوریتم از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$X_{p1}(ij) = X_{ij} + R_{ij} * (S_{f_{ij}} - L_{ij} * X_{ij}) \quad (2)$$

✓ بررسی حدود مجاز موقعیت‌ها: اطمینان حاصل می‌شود که موقعیت جدید از مرزهای مسئله تجاوز نکند که از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$X_{ij}^{P1} = \begin{cases} X_{ij}^{P1}, L_{bi} \leq X_{ij}^{P1} \leq U_{bj}; \\ L_{bj}, X_{ij}^{P1} < L_{bj}; \\ U_{bj}, X_{ij}^{P1} > U_{bj}. \end{cases} \quad (3)$$

✓ به‌روزرسانی عضو i -ام بر اساس عملکرد موقعیت جدید: اگر مقدار تابع هدف در موقعیت جدید بهتر باشد، موقعیت با استفاده از رابطه (۴) به‌روزرسانی می‌شود:

$$X_i \leftarrow \begin{cases} X_i^{P1}, F_i^{P1} < F_i; \\ X_i, else. \end{cases} \quad (4)$$

• بخش دوم: حمل ماهی به موقعیت مناسب
این بخش شامل حرکت اعضای جمعیت به موقعیت‌های مناسب‌تر است تا به همگرایی بهینه برسد. مراحل این بخش به شرح زیر است:

✓ محاسبه موقعیت جدید عقاب در بخش دوم: موقعیت جدید عضو i -ام با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$X_{p2ij} \leftarrow X_{ij} + (L_{bj} + R_{ij} * (U_{bj} - L_{bj})) / t \quad (5)$$

در اینجا t شماره تکرار جاری است و ri_j یک عدد تصادفی است lb_j و ub_j حد پایین و بالای متغیر i -ام هستند.
✓ بررسی حدود مجاز موقعیت‌ها: با استفاده از رابطه (۶) اطمینان حاصل می‌شود که موقعیت‌های جدید همچنان در بازه معتبر قرار دارند:

$$X_{ij}^{P2} = \begin{cases} X_{ij}^{P2}, L_{bj} \leq X_{ij}^{P2} \leq U_{bj}; \\ L_{bj}, X_{ij}^{P2} < L_{bj}; \\ U_{bj}, X_{ij}^{P2} > U_{bj}. \end{cases} \quad (6)$$

✓ به‌روزرسانی عضو i -ام بر اساس عملکرد موقعیت جدید: اگر مقدار تابع هدف در موقعیت جدید بهتر باشد، موقعیت با استفاده از رابطه زیر به‌روزرسانی می‌شود:

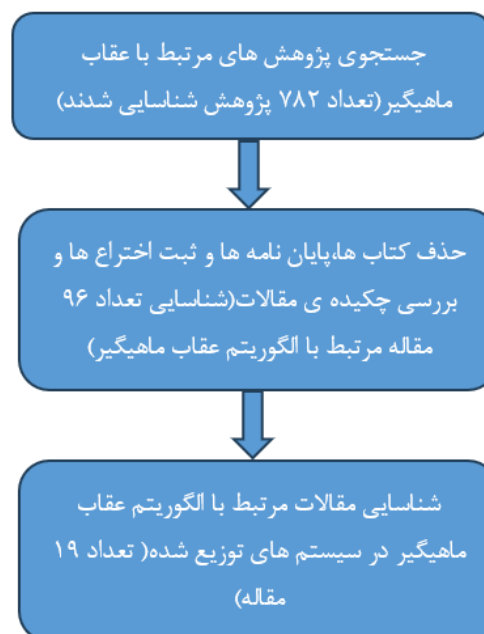
$$X_i \leftarrow \begin{cases} X_i^{P2}, F_i^{P2} < F_i; \\ X_i, else. \end{cases} \quad (7)$$

• بخش سوم: پایان الگوریتم:
در این مرحله بهترین راه‌حل پیدا شده در طول الگوریتم ذخیره می‌شود. این مرحله نشان‌دهنده پایان الگوریتم عقاب ماهیگیر است.

۳- روش انتخاب مقالات

در روند انتخاب مقالات، یک جستجوی جامع در پایگاه‌داده‌های اصلی دانشگاهی از جمله Elsevier، IEEE Xplore، Wiley و نیز جستجوگر Google scholar انجام شد. استراتژی جستجو شامل استفاده از کلمات کلیدی خاص مانند "Osprey algorithm" و "optimization algorithm" بود. در ابتدا، بیش از ۷۸۲ منبع از جمله مقالات، کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها و ثبت اختراع که از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ منتشر شده بودند، بازیابی شدند. در مرحله بعد ابتدا کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها و ثبت اختراع‌ها

حذف شده و سپس با بررسی دقیق تر چکیده ی مقالات، تعداد ۹۶ مقاله مرتبط که به طور مستقیم در روش پیشنهادی آنها از الگوریتم عقاب ماهیگیر استفاده شده بود، شناسایی شدند. در آخرین مرحله و با بررسی دقیق تر، مقالات مرتبط در حوزه سیستم های توزیع شده که در روش پیشنهادی آنها از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر استفاده کرده بودند به تعداد ۱۹ مقاله مورد شناسایی قرار گرفت. شکل ۳ نشان دهنده ی نمای کلی از فرایند اجرا شده برای انتخاب مقالات در این مطالعه است. بر اساس نوع سیستم توزیع شده استفاده شده در مقالات، آنها به چهار دسته مقالات مرتبط با: اینترنت اشیا (شامل: رایانش ابری، رایانش مه، شبکه های خودرویی ادهاک، شبکه های حسگر بی سیم، سیستم موقعیت یابی داخلی مبتنی بر نور مرئی، ریز شبکه، شبکه های مقاوم در برابر تأخیر)، شبکه های برق هوشمند، سیستم های تولید برق و دیگر سیستم های توزیع شده دسته بندی شدند. دسته بندی این مقالات در جدول ۲ مشاهده می شود. توزیع مقالات بر اساس سال انتشار و انتشارات آنها به ترتیب در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می دهد که تعداد مقالات منتشر شده در سال های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ افزایش یافته است که نشان دهنده توجه محققین به کاربرد الگوریتم عقاب ماهیگیر در حوزه های مختلف است. شکل ۵ نشان می دهد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر بیشترین توجه را در انتشارات IEEE به خود اختصاص داده است و انتشارات Elsevier و SAGE در رتبه های بعدی قرار دارند.



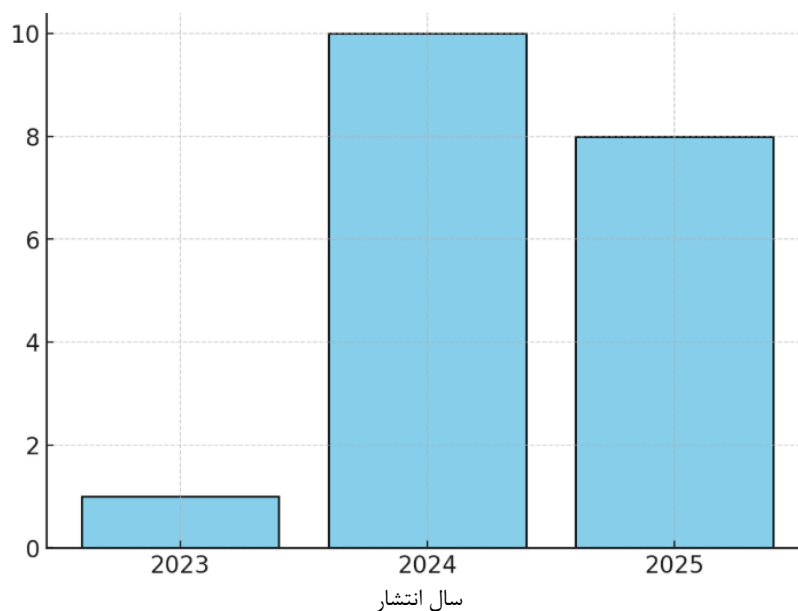
شکل ۳: روش انتخاب مقالات

Figure 3. Selection paper method

جدول ۲: دسته بندی مقالات انتخابی
Table 2: Categorization of selected papers

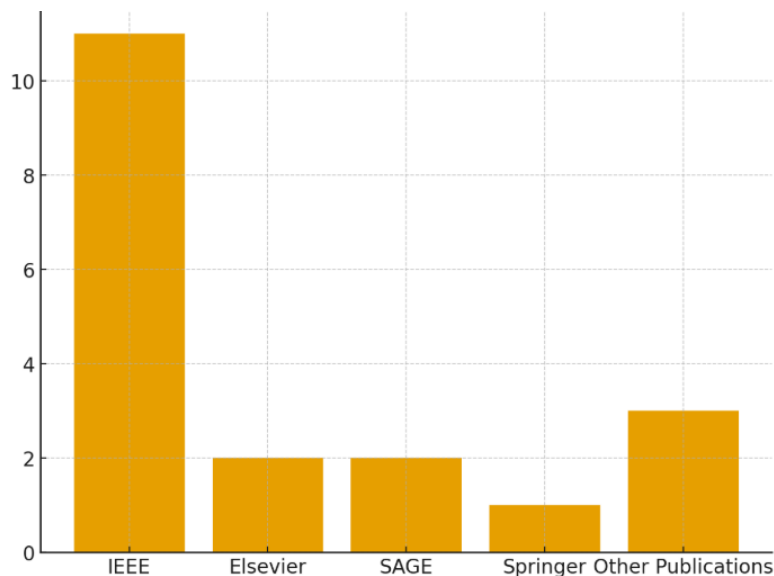
دسته	مرجع	عنوان مقاله	سال انتشار	حوزه کاربرد	انتشارات
اینترنت اشیا	[11]	Privacy-Aware Federated Learning Framework for Securing IoT Devices Using Chameleon Swarm Algorithm with Self Attentive Variational Autoencoder Model	2024	امنیت دستگاه های ، یادگیری IoT فدرال	Elsevier
	[10]	OOA-modified Bi-LSTM network: An effective intrusion detection framework for IoT systems	2024	تشخیص نفوذ در IoT	Elsevier
	[12]	SWARAM: osprey optimization algorithm-based energy-efficient cluster head selection for wireless sensor network-based internet of things	2024	انتخاب سرخوشه WSN بهینه در	MDPI
	[14]	CM-OOA: An energy-efficient clustering algorithm for wireless sensor networks using chaotic mapping and Osprey Optimization	2025	خوشه بندی بهینه WSN	SAGE
	[31]	Multi-Objective Osprey Optimization Algorithm-Based Resource Allocation in Fog-IoT	2025	تخصیص منابع در Fog-IoT	Science and Information Organization
	[34]	An IoT enabled healthcare framework for arrhythmia detection based on QoS aware trust aided osprey routing protocol and ensemble learning	2024	تشخیص آریتمی IoT قلبی، سلامت	Springer
شبکه ی برق هوشمند	[2]	Demand side management in residential smart grid using Osprey Optimization Algorithm	2023	مدیریت مصرف انرژی در شبکه برق خانگی	IEEE
	[3]	Optimal sizing of autonomous microgrid using Osprey Optimization Algorithm	2023	تعیین اندازه بهینه میکروگرید	IEEE
	[5]	A resilient Mod Osprey optimization algorithm (MOOA) based effective demand side management for solar PV tied smart grid networks	2024	مدیریت تقاضای انرژی در شبکه خورشیدی	IEEE
	[9]	A novel approach to smart grid energy management using the Osprey Optimization Algorithm	2025	مدیریت انرژی شبکه ی هوشمند	IEEE
سیستم های تولید برق	[24]	Enhanced frequency control of a hybrid microgrid integrated with EV aggregator using [FOI-(PDN+1)] controller optimized by osprey optimization algorithm	2025	کنترل فرکانس میکروگرید هیبریدی	IOP Publishing
	[26]	An intelligent approach for the short-term generation scheduling of a hydrothermal power system employing the osprey optimization algorithm	2023	زمان بندی تولید کوتاه مدت هیدروترمال	IEEE

سایر سیستم‌های توزیع شده	[7]	Osprey optimization algorithm for load frequency control in renewable and non-renewable energy based three-area power generating system	2025	کنترل فرکانس بار در سیستم‌های ترکیبی	IEEE
	[13]	Adaptive load balancing in distributed cloud environment: Hybrid Kookaburra-Osprey optimization algorithm	2024	بالانس بار در محیط ابری توزیع شده	SAGE
	[32]	Osprey Optimization Algorithm and Position-Aware Graph Neural Network for Enhanced Vehicle-to-Grid Control System	2025	Vehicle-to-Grid کنترل	IEEE
	[25]	Indoor visible light positioning based on backward propagation neural network and improved osprey optimization algorithm	2025	موقعیت یابی داخلی نور مرئی	IEEE
	[33]	A multi-strategy improved Osprey Optimization Algorithm for UAV path planning	2024	مسیریابی پهپاد	IEEE
	[4]	Application of improved Osprey Optimization Algorithm in path planning of planar mobile robots	2025	مسیریابی ربات‌های سطحی	IEEE
	[8]	Wind power uncertainty is taken into consideration while using the Osprey Optimization Algorithm for hydro-thermal-wind complementary scheduling	2024	زمان بندی ترکیبی هیدروترمال-باد	IEEE



شکل ۴: تعداد مقالات انتخابی چاپ شده بر اساس سال انتشار

Figure 4: The number of selected published articles based on the year of publication



شکل ۵: نمودار تعداد مقالات انتخابی بر اساس مجلات چاپ شده

Figure 3. The number of selected articles published in different journals

۴- مروری بر تحقیقات مرتبط با کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در سیستم های توزیع شده:

الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر طی سال های اخیر توجه پژوهشگران را در حوزه های مختلف بهینه سازی جلب کرده است. مطالعات متعددی در زمینه اینترنت اشیا، شبکه ی برق هوشمند، سیستم های تولید برق و سایر سیستم های توزیع شده انجام شده که نشان دهنده توانمندی بالای این الگوریتم در حل مسائل پیچیده و غیرخطی است. در ادامه، پژوهش های انجام شده مرور می شوند.

۴-۱ کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در اینترنت اشیا:

کتکار و همکاران (۲۰۲۴) چالش اصلی امنیت و حریم خصوصی در دستگاه های IoT را بررسی کرده اند. با وجود استفاده از یادگیری فدرال برای جلوگیری از انتقال مستقیم داده ها، همچنان خطر حملات استنتاجی و نفوذ وجود دارد و این موضوع یکی از موانع جدی در پذیرش گسترده IoT محسوب می شود. برای رفع این مشکل، نویسندگان یک چارچوب ترکیبی معرفی کردند که در آن الگوریتم عقاب ماهیگیر برای بهینه سازی فرآیند تجمیع مدل های فدرال به کار گرفته شده است. در کنار آن، الگوریتم Chameleon Swarm قابلیت جستجوی سراسری و مدل Self-Attentive VAE توانایی استخراج ویژگی های دقیق تر را فراهم کرده اند. این ترکیب توانسته است دقت مدل را افزایش داده و نشت اطلاعات را نسبت به روش های رایج کاهش دهد. از مزایای این روش می توان به افزایش دقت و امنیت اشاره کرد، اما پیچیدگی محاسباتی بالای آن محدودیت جدی محسوب می شود و اجرای آن در دستگاه های IoT کوچک دشوار است. نویسندگان برای آینده پیشنهاد داده اند نسخه های سبک وزن OOA توسعه یابد، از روش های رمزنگاری سبک استفاده شود و چارچوب پیشنهادی در شبکه های ناهمگن و در مقیاس وسیع تر آزمایش گردد [۱۱].

Golande و همکاران (۲۰۲۴) به مسئله امنیت در سامانه های اینترنت اشیا پرداخته اند، جایی که حملات نفوذی می تواند عملکرد شبکه را مختل کند و امنیت داده ها را به خطر اندازد. چالش اصلی در این حوزه، طراحی روشی است که هم دقت بالایی در تشخیص نفوذ داشته باشد و هم در برابر حجم بالای داده ها و ترافیک پیچیده، کارایی خود را حفظ کند. برای حل این مشکل، نویسندگان چارچوبی ترکیبی بر پایه الگوریتم عقاب ماهیگیر و شبکه Bi-LSTM ارائه کرده اند. در این ساختار، وظیفه بهینه سازی پارامترهای شبکه را برعهده دارد و Bi-LSTM توانایی مدل سازی وابستگی های زمانی در داده های حملات را فراهم می سازد. نتایج تجربی مقاله نشان داده است که این روش در مقایسه با مدل های سنتی، دقت بیشتری در شناسایی نفوذ و کاهش

نرخ خطا داشته است. مزیت اصلی این روش، افزایش دقت و کاهش هشدارهای کاذب است، اما در مقابل پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده های آموزشی باکیفیت از نقاط ضعف آن به شمار می رود. نویسندگان پیشنهاد کرده اند در پژوهش های آینده، از نسخه های ساده تر الگوریتم برای محیط های محدود منابع استفاده شود و روش های ترکیبی با یادگیری انتقالی جهت بهبود عملکرد در شرایط داده های نامتوازن به کار گرفته شوند [۱۰].

مصرف بالای انرژی گره ها و کاهش طول عمر شبکه یکی از مشکلات اساسی در اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه های حسگر بی سیم است. این چالش زمانی جدی تر می شود که تعداد حسگرها زیاد باشد و ارتباط میان آن ها منجر به تخلیه سریع باتری شود. به منظور رفع این مسئله، Deshpande و همکاران (۲۰۲۴) رویکردی به نام SWARAM را معرفی کرده اند که بر پایه الگوریتم عقاب ماهیگیر طراحی شده است. در این رویکرد، وظیفه انتخاب سرخوشه ها به کمک OOA انجام می شود تا تعادل بار میان گره ها حفظ گردد. این کار نه تنها مصرف انرژی را بهینه می کند، بلکه پایداری ارتباطات و پوشش شبکه را نیز بهبود می بخشد. نتایج آزمایش ها نشان داد که روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم های سنتی توانسته است طول عمر شبکه را به شکل قابل توجهی افزایش دهد. SWARAM توانایی بالایی در کاهش مصرف انرژی و توزیع بار شبکه دارد، اما نقطه ضعف آن نیاز به پردازش محاسباتی بیشتر و حساسیت نسبت به شبکه های مقیاس بزرگ است. نویسندگان پیشنهاد کرده اند در آینده این الگوریتم با روش های پیش بینی بار و انرژی ترکیب شود و همچنین در شبکه های ناهمگن و محیط های متحرک مورد آزمایش قرار گیرد [۱۲].

Patel و همکاران (۲۰۲۵) مسئله خوشه بندی در شبکه های حسگر بی سیم را به عنوان یک چالش کلیدی در افزایش طول عمر شبکه و کاهش مصرف انرژی بررسی کرده اند. در این نوع شبکه ها، انتخاب بهینه سرخوشه ها اهمیت ویژه ای دارد زیرا نقش اساسی در مدیریت انرژی، کاهش تأخیر و بهبود بهره وری کل سیستم ایفا می کند. برای حل این مسئله، در این پژوهش الگوریتم CM-OOA معرفی شده است که در واقع از نسخه ی اصلاح شده ای از الگوریتم عقاب ماهیگیر که از نگاشت آشوبی^۱ جهت بهبود فرایند جستجو و توزیع یکنواخت تر سرخوشه ها بهره می برد، استفاده شده است. استفاده از این ترکیب موجب شده است که الگوریتم از همگرایی زود هنگام اجتناب کرده و بتواند نتایج پایدارتری در انتخاب سرخوشه ها ارائه دهد. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که این روش در مقایسه با الگوریتم های سنتی WSN، هم در کاهش مصرف انرژی و هم در افزایش طول عمر شبکه تأثیر داشته و همچنین نرخ از دست رفتن بسته ها به شکل محسوسی کاهش یافته است. با این حال، محدودیت اصلی این رویکرد آن است که در شبکه هایی با مقیاس بسیار بزرگ یا دارای پویایی بالا، ممکن است زمان همگرایی افزایش یابد. نویسندگان پیشنهاد کرده اند که در آینده، استفاده از نسخه های سبک تر الگوریتم و آزمون در محیط های واقعی WSN می تواند راهی برای افزایش کارایی و کاربردپذیری عملی آن باشد [۱۴].

یکی از چالش های مهم در معماری Fog-IoT مدیریت منابع میان لایه مه و دستگاه های انتهایی است؛ زیرا تقاضای هم زمان برای پردازش داده ها، ذخیره سازی و ارتباطات، موجب فشار مضاعف بر زیرساخت ها می شود. این مشکل در شرایطی که تعداد زیادی از دستگاه ها به طور هم زمان داده تولید می کنند، به شکل پررنگ تر دیده می شود و منجر به افزایش تأخیر و کاهش بهره وری کل سیستم می گردد. برای غلبه بر این چالش، در پژوهشی که توسط Reddy و همکاران (۲۰۲۵) ارائه شده، از نسخه چندهدفه الگوریتم عقاب ماهیگیر بهره گرفته شده است. در این روش، چندین تابع هدف شامل کاهش تأخیر، صرفه جویی در انرژی و بهبود بهره وری تخصیص منابع به طور هم زمان بهینه سازی می شوند. استفاده از این نسخه چندهدفه، امکان برقراری توازن میان معیارهای متضاد را فراهم کرده و نسبت به رویکردهای تک هدفه عملکرد جامع تری داشته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی توانسته است نسبت به سایر روش ها، هم در کاهش زمان پاسخگویی و هم در کاهش بار روی سرورهای مه بهبود چشمگیری ایجاد کند. همچنین، توانسته نیازهای چندمعیاره محیط های Fog-IoT را برآورده سازد و انعطاف پذیری بالایی در شرایط متغیر شبکه داشته باشد. باین حال، از محدودیت های گزارش شده می توان به پیچیدگی محاسباتی و نیاز به تنظیم دقیق پارامترها اشاره کرد. نویسندگان در ادامه پیشنهاد کرده اند که برای آینده، می توان نسخه های سبک تر و سازگار با منابع

¹ Chaotic mapping

محدود IoT را توسعه داد و همچنین آزمایش های میدانی در محیط های واقعی را انجام داد تا کارایی عملی این رویکرد بیش تر سنجیده شود [۳۱].

در حوزه سلامت هوشمند، یکی از چالش های مهم، تشخیص دقیق و بلادرنگ آریتمی های قلبی در بستر اینترنت اشیا است. مشکل اصلی در این سناریو، محدودیت منابع دستگاه های پوشیدنی و حسگرها، کیفیت پایین برخی کانال های ارتباطی و همچنین نیاز به حفظ اعتماد و امنیت داده های پزشکی است. بسیاری از چارچوب های موجود، یا تمرکز خود را تنها بر روی دقت تشخیص قرار داده اند و یا نتوانسته اند پایداری شبکه و اعتماد میان گره ها را تضمین کنند. برای رفع این چالش، نویسندگان یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر اینترنت اشیا پیشنهاد داده اند که از پروتکل مسیریابی مبتنی بر عقاب ماهیگیر به همراه مکانیزم اعتماد و کیفیت سرویس استفاده می کند. در کنار آن، روش یادگیری ترکیبی برای تحلیل داده های قلبی به کار گرفته شده است تا دقت تشخیص آریتمی افزایش یابد. ترکیب این دو بخش باعث شده سیستم علاوه بر انتخاب مسیرهای امن و بهینه در شبکه اینترنت اشیا، از نظر تشخیص زود هنگام بیماری های قلبی نیز عملکرد قابل توجهی داشته باشد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که این چارچوب نسبت به روش های متداول، توانسته است در معیارهایی همچون دقت تشخیص، کاهش تأخیر شبکه و افزایش اعتماد میان گره ها عملکرد بهتری ارائه دهد. با این حال، نویسندگان اشاره کرده اند که پیچیدگی محاسباتی بخش یادگیری ترکیبی و وابستگی شدید به کیفیت داده ها می تواند محدودیت هایی ایجاد کند. پیشنهاد شده است که در تحقیقات آینده از نسخه های سبک تر الگوریتم OOA و مدل های یادگیری کم هزینه تر برای استفاده در دستگاه های پوشیدنی با منابع محدود بهره گرفته شود و همچنین چارچوب روی شبکه های پزشکی در مقیاس بزرگ تر و شرایط واقعی بیمارستانی مورد ارزیابی قرار گیرد [۳۴].

۴-۲ کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در شبکه های برق هوشمند:

یکی از مسائل کلیدی در شبکه های هوشمند خانگی، مدیریت سمت تقاضا^۱ است. افزایش بار خانگی و ورود تجهیزات هوشمند باعث ایجاد نوسانات مصرف و در نتیجه افزایش فشار بر شبکه شده است. چالش اصلی در این حوزه، طراحی رویکردی است که بتواند ضمن پاسخگویی به نیاز کاربران، مصرف را بهینه کرده و هزینه های انرژی را کاهش دهد. عدم تعادل بین تولید و مصرف و نبود سازوکارهای کنترل هوشمند از مشکلات مهم در این شبکه ها هستند. مدیریت سمت تقاضا (DSM) یکی از مهم ترین وظایف در یک شبکه هوشمند است که باعث می شود تا مشتریان آگاهانه در مورد مصرف انرژی خود تصمیم گیری کنند و به ارائه دهندگان انرژی کمک می کند تا تقاضای پیک بار را کاهش و شکل مشخصات بار را تغییر و اصلاح کنند. برای حل این چالش Nanibabu و همکاران (۲۰۲۳) الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر را به عنوان ابزار اصلی بهینه سازی پیشنهاد کرده اند. این الگوریتم در فرایند DSM به گونه ای به کار گرفته شده است که برنامه ریزی بار خانگی را بهینه کرده و تعادل مناسبی میان هزینه، راحتی کاربران و کارایی شبکه ایجاد کند. نتایج شبیه سازی نشان داده است که رویکرد پیشنهادی قادر است هزینه برق مصرفی را به شکل قابل توجهی کاهش داده و بار پیک شبکه را مدیریت نماید. همچنین، باعث بهبود راندمان سیستم و سازگاری با بارهای متنوع خانگی می شود. در مقابل، یکی از محدودیت ها، نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای الگوریتم و زمان محاسباتی نسبتاً بالا در سناریوهای بزرگ تر است. نویسندگان پیشنهاد کرده اند که در آینده، از ترکیب الگوریتم عقاب ماهیگیر با روش های یادگیری ماشین و شبکه های عصبی برای بهبود سرعت و دقت تصمیم گیری استفاده گردد [۲].

در حوزه طراحی و بهره برداری میکروگریدهای مستقل، یکی از مهم ترین چالش ها تعیین اندازه ی بهینه اجزای تولید و ذخیره سازی انرژی است. اگر این فرآیند به درستی انجام نشود، می تواند منجر به افزایش هزینه سرمایه گذاری، کاهش قابلیت اطمینان یا هدررفت انرژی تولیدی شود. مسئله اصلی در این پژوهش Sagor و همکاران، دستیابی به مدلی بود که بتواند به صورت هم زمان هزینه ها را کاهش داده و پایداری عملکرد میکروگرید را تضمین کند. برای پاسخ به این نیاز، از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به عنوان ابزار بهینه سازی استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل توانایی بالای آن در اکتشاف فضای جستجو و جلوگیری از گیر افتادن در بهینه های محلی، برای مسأله تعیین اندازه اجزای میکروگرید به کار گرفته شده است. مدل پیشنهادی شامل منابع تجدیدپذیر مانند پنل خورشیدی، توربین بادی و همچنین سیستم های ذخیره سازی است که با کمک OOA اندازه بهینه هر یک تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که این رویکرد در مقایسه با روش های مرسوم، هزینه کلی

¹ Demand Side Management (DSM)

سیستم را کاهش داده و سطح پایداری و قابلیت اطمینان را افزایش می دهد. همچنین، موجب بهبود توازن میان هزینه سرمایه گذاری و هزینه های عملیاتی شده و توانسته است عملکرد پایدار میکروگرید را در شرایط مختلف بار تضمین کند. با این حال، وابستگی شدید به کیفیت داده های ورودی و افزایش بار محاسباتی در شبکه های بزرگ از محدودیت های این روش است. نویسندگان پیشنهاد کرده اند که در مطالعات آینده، ترکیب الگوریتم با مدل های پیش بینی بار و تولید انرژی تجدیدپذیر و همچنین استفاده از نسخه های موازی سازی شده OOA می تواند باعث ارتقاء سرعت و دقت فرآیند بهینه سازی شود [۳].

یکی از چالش های اصلی در شبکه های برق هوشمند متصل به انرژی خورشیدی، مدیریت تقاضای بار است. نوسان ذاتی تولید انرژی خورشیدی و تغییرات پیش بینی ناپذیر مصرف، سبب بروز مشکلاتی در تعادل عرضه و تقاضا می شود که در صورت عدم کنترل، می تواند منجر به افزایش هزینه ها و کاهش پایداری شبکه گردد. به گفته ی Sumeet Jasmine و Krishnaparamathma، این چالش زمانی پیچیده تر می شود که شبکه ترکیبی از منابع پراکنده و مصرف کنندگان متنوع باشد. برای رفع این مشکل، این محققان نسخه بهبود یافته ای از الگوریتم عقاب ماهیگیر، موسوم به MOOA¹ را پیشنهاد کرده اند. این نسخه با اصلاحات در مکانیسم جستجو و بهره برداری، توانسته است فرایند مدیریت سمت تقاضا (DSM) را در یک شبکه PV-Grid بهینه سازی کند. به بیان نویسندگان، استفاده از MOOA باعث شده است بارهای الکتریکی به صورت هوشمند زمان بندی شوند، به گونه ای که هم زمان بارهای پیک کاهش یافته و بهره برداری از انرژی خورشیدی به حداکثر برسد. نتایج شبیه سازی نشان داده است که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم های مرسوم، کاهش محسوسی در هزینه انرژی و بهبود قابل توجهی در پایداری سیستم ایجاد کرده است. مزایای اصلی این مدل شامل کاهش بار پیک، بهبود بازده انرژی تجدیدپذیر و افزایش قابلیت اعتمادپذیری شبکه است. با این حال، نویسندگان مقاله به محدودیت هایی همچون نیاز به داده های دقیق مصرف لحظه ای و پیچیدگی محاسباتی اشاره کرده اند که می تواند مانع استفاده گسترده آن در مقیاس های بزرگ شود. نویسندگان این تحقیق، پیشنهاد داده اند که از تلفیق MOOA با روش های یادگیری ماشین برای پیش بینی بار و تولید استفاده شود، و همچنین آزمون عملی آن در شبکه های واقعی انجام گردد [۵].

یکی از مسائل اساسی در مدیریت انرژی شبکه های برق هوشمند، پیچیدگی ناشی از تنوع منابع انرژی و تغییرات مداوم در الگوهای مصرف است. این موضوع باعث می شود که هم توازن بار و تولید و هم کاهش تلفات انرژی با چالش های قابل توجهی مواجه شوند. به گفته ی محققان، عدم وجود الگوریتم های کارآمد برای برنامه ریزی بهینه انرژی در محیط های پویا و نامطمئن، یکی از مشکلات اصلی شبکه های هوشمند به شمار می رود. برای مقابله با این چالش، Rudrapogu و همکاران استفاده از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر را به عنوان رویکردی نوین پیشنهاد داده اند. این الگوریتم با ویژگی های اکتشاف گسترده و بهره برداری هدفمند، توانسته است راه حل مناسبی برای بهینه سازی تخصیص منابع و مدیریت بار ارائه کند. بر اساس شبیه سازی ها، استفاده از الگوریتم عقاب ماهیگیر توانسته است در مقایسه با روش های مرسوم، کاهش چشمگیری در تلفات انرژی، افزایش راندمان سیستم، بهبود پایداری شبکه و کاهش هزینه های عملیاتی را محقق سازد. با این حال، وابستگی این الگوریتم به پارامترهای اولیه و همچنین پیچیدگی محاسباتی در مقیاس های بزرگ، می تواند به عنوان محدودیت روش پیشنهادی مطرح شود. آن ها پیشنهاد کرده اند که در تحقیقات آتی، توسعه نسخه های سبک تر و ترکیب OOA با یادگیری ماشین و الگوریتم های پیش بینی بار، می تواند کارایی این روش را بیش از پیش افزایش دهد [۹].

۳-۴ کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در سیستم های تولید برق:

افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در شبکه های تولید برق، به ویژه در ریزشبکه های هیبریدی، چالش های جدی در زمینه پایداری و کنترل فرکانس ایجاد کرده است. وجود منابعی همچون انرژی خورشیدی و بادی با ماهیت متغیر و غیرقابل پیش بینی، سبب بروز نوسانات فرکانسی و تهدید قابلیت اطمینان شبکه می شود. علاوه بر این، ادغام واحدهای ذخیره سازی انرژی و ناوگان خودروهای برقی، نیازمند الگوریتم های کنترلی دقیق و انعطاف پذیر است تا بتوانند به تعادل بار و تولید کمک کنند. این شرایط پیچیده ضرورت توسعه ی راهکارهای بهینه سازی نوین را آشکار می سازد. برای پاسخ به این نیاز، Santra و همکاران (۲۰۲۵) از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی (FOI-(PDN+1) استفاده کرده اند. ایده اصلی

¹ Mod Osprey Optimization Algorithm (MOOA)

این روش آن است که الگوریتم بتواند ضمن جستجوی کارآمد در فضای وسیع پارامترها، بهترین مقادیر را برای کاهش انحرافات فرکانسی بیابد. شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که استفاده از این ترکیب نه‌تنها پایداری دینامیکی سیستم را بهبود داده، بلکه زمان بازیابی فرکانس پس از اغتشاش را نیز کاهش‌یافته است. مزیت اصلی این کار، دقت بالای الگوریتم در یافتن مقادیر بهینه و توانایی آن در جلوگیری از گرفتار شدن در بهینه‌های داده است. با این حال، پیچیدگی محاسباتی و نیاز به توان پردازشی بیشتر از محدودیت‌های روش است. به عنوان پیشنهادها آتی، گسترش الگوریتم برای استفاده در ریزشبکه‌های بزرگ‌تر، آزمون در محیط‌های واقعی و همچنین ترکیب با تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌تواند مسیرهای تحقیقاتی ارزشمندی باشد [۲۴].

نیروگاه‌های زمین گرمایی با استفاده از منابع تولید هیدرو حرارتی مانند آب و بخار کار می‌کنند. برای دسترسی به این منابع، نیروگاه‌های زمین گرمایی مخازن زمین گرمایی زیرزمینی را حفاری می‌کنند. منابع هیدروترمال به سطح زمین لوله‌کشی می‌شوند، جایی که از آنها برای چرخاندن توربینی که به یک ژنراتور متصل است استفاده می‌شود. یکی از مسائل بنیادین در این نیروگاه‌ها، زمان‌بندی کوتاه‌مدت تولید در آنها می‌باشد. این فرآیند به دلیل وجود محدودیت‌های عملیاتی، تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در تقاضای بار و وابستگی به منابع متنوع انرژی، به طور ذاتی پیچیده محسوب می‌شود. روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، در مواجهه با چنین پیچیدگی‌هایی معمولاً دچار همگرایی کند و گیرافتادن در بهینه محلی می‌شوند. برای غلبه بر این مشکلات، Pasupulati و دیگر همکاران، بهره‌گیری از الگوریتم عقاب ماهیگیر به عنوان یک روش فراابتکاری هوشمند را برای بهینه‌سازی در این نیروگاه‌ها پیشنهاد کرده‌اند. این الگوریتم باتکیه بر ویژگی‌های اکتشافی قوی و جستجوی متوازن، موفق شده است زمان‌بندی تولید نیروگاه‌های آبی و حرارتی را بهینه کند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که استفاده از OOA نه‌تنها باعث کاهش هزینه سوخت و بهبود تخصیص توان تولیدی شده، بلکه در مقایسه با الگوریتم‌های متداول، توانسته به پایداری بالاتر و نرخ همگرایی سریع‌تر دست یابد. با وجود این دستاوردها، عملکرد الگوریتم در شرایط بار بسیار متغیر یا قیود سخت عملیاتی ممکن است کاهش یابد. به همین دلیل، پیشنهاد شده است در آینده، ترکیب OOA با الگوریتم‌های پیش‌بینی بار مبتنی بر یادگیری عمیق یا توسعه نسخه‌های چندهدفه آن، می‌تواند به بهبود چشمگیر کیفیت زمان‌بندی و کاهش ریسک‌های عملیاتی کمک کند [۲۶].

یکی از مسائل کلیدی در سیستم‌های تولید برق، کنترل فرکانس بار است که در حضور منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر با چالش‌های بیشتری همراه می‌شود. تغییرات ناگهانی در توان تولیدی ناشی از منابع خورشیدی و بادی و همچنین تغییرات بار مصرفی می‌تواند منجر به انحرافات فرکانسی و کاهش پایداری شبکه گردد. این مشکل در سیستم‌های چند ناحیه‌ای به دلیل وابستگی متقابل بین مناطق مختلف پیچیده‌تر نیز می‌شود. برای غلبه بر این چالش، Rahman و همکاران (۲۰۲۵) از الگوریتم عقاب ماهیگیر برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده در یک سیستم سه‌ناحیه‌ای شامل منابع انرژی تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر استفاده کرده‌اند. استفاده از الگوریتم عقاب ماهیگیر توانسته است با تنظیم بهینه ضرایب کنترلی، انحرافات فرکانسی را کاهش داده و پاسخ دینامیکی سیستم را بهبود بخشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مرسوم مانند PSO و GA عملکرد سریع‌تر و دقیق‌تری در کاهش نوسانات فرکانس ارائه می‌دهد. از مزایای این رویکرد می‌توان به کاهش خطای پایداری، بهبود زمان نشست، و توانایی سازگاری با تغییرات بار و تولید اشاره کرد. در مقابل، یکی از معایب اصلی آن نیاز به توان پردازشی نسبتاً بالا برای اجرای الگوریتم در زمان واقعی است. نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در تحقیقات آینده، ترکیب الگوریتم عقاب ماهیگیر با کنترل‌کننده‌های تطبیقی و یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گیرد تا قابلیت پیاده‌سازی در شبکه‌های عملی بیشتر شود [۷].

هدف اصلی مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت تولید هیدرو حرارتی^۱ (SHGS)، تعیین استراتژی بهینه برای تولید انرژی آبی و حرارتی به منظور کمینه‌کردن هزینه سوخت نیروگاه‌های حرارتی، با در نظرگیری محدودیت‌های مختلف عملیاتی و فیزیکی است. Ponnuru Sudhakiran و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود راه حلی برای زمان‌بندی کوتاه‌مدت تولید هیدروحرارتی (SHTS) در حضور منابع بادی پرداختند. یکی از مشکلات اصلی در این حوزه، عدم قطعیت توان بادی است که به‌طور مستقیم بر هزینه تولید و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارد. ترکیب منابع آبی، حرارتی و بادی در عین حال که موجب کاهش مصرف سوخت‌های

¹ Short term HydroThermal generation Scheduling (SHTS)

فسیلی می‌شود، به دلیل نوسانات تولید بادی، برنامه‌ریزی تولید را به یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده تبدیل می‌کند. برای مقابله با این چالش، نویسندگان از الگوریتم عقاب ماهیگیر به عنوان روش اصلی بهینه‌سازی استفاده کردند. در این رویکرد، الگوریتم توانسته است با در نظر گرفتن قیود عملیاتی واحدهای آبی و حرارتی (مانند ظرفیت مخازن و بارگذاری شیرهای حرارتی) و همچنین عدم قطعیت تولید بادی، یک برنامه زمان‌بندی بهینه ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی روی سیستمی با ۴ واحد آبی، ۸ واحد حرارتی و ۲ واحد بادی نشان داده است که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مرسوم، هزینه کل سوخت را کاهش داده و پایداری سیستم را افزایش داده است که باعث کاهش هزینه اقتصادی، توانایی مدیریت عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و بهبود انعطاف‌پذیری شبکه نیز شده است. با این حال، یکی از محدودیت‌ها پیچیدگی محاسباتی و زمان بالای اجرا در سیستم‌های مقیاس بزرگ است. نویسندگان پیشنهاد داده‌اند که در آینده، الگوریتم عقاب ماهیگیر با مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر توان بادی و همچنین روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه ترکیب شود تا بتواند نتایج بهتری برای بهره‌برداری عملی ارائه کند [۸].

۴-۴ کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در سایر سیستم‌های توزیع شده:

کی و همکاران (۲۰۲۴) به یکی از چالش‌های مهم در محیط‌های ابری توزیع شده یعنی بالانس بار و مدیریت منابع پرداخته‌اند. در چنین محیط‌هایی، توزیع غیربهینه بار پردازشی می‌تواند منجر به کاهش کارایی، افزایش زمان پاسخ و حتی افت کیفیت خدمات شود. برای غلبه بر این چالش، در این پژوهش یک رویکرد ترکیبی معرفی شده است که الگوریتم عقاب ماهیگیر را با الگوریتم کوکابورا^۱ ادغام می‌کند. هدف از این ترکیب، استفاده هم‌زمان از قابلیت‌های اکتشافی قوی KOA و توانایی بهره‌برداری دقیق OOA است تا فرآیند تخصیص منابع و توزیع بار میان سرورها به شکل کارآمدتری انجام گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته است زمان اجرای وظایف را کاهش داده و نرخ استفاده از منابع را بهبود بخشد. همچنین، نسبت به روش‌های غیر ترکیبی مقایسه شده عملکرد پایدارتری ارائه داده و بین اکتشاف و بهره‌برداری تعادل برقرار کند که باعث شده است کیفیت سرویس ارتقا یابد. با این حال، پیچیدگی محاسباتی بالا و نیاز به تنظیم دقیق پارامترها از جمله محدودیت‌های آن به شمار می‌آید. نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در آینده نسخه‌های ساده‌تر و مقیاس‌پذیرتری از این رویکرد توسعه یافته و همچنین عملکرد آن در شرایط پویا و چندابزار مورد آزمایش قرار گیرد [۱۳].

مدیریت تبادل انرژی میان خودروهای برقی و شبکه انرژی الکتریکی یکی از چالش‌های کلیدی در سیستم‌های فناوری شارژ دوطرفه^۲ است. به عبارت دیگر، مشکل اصلی در این حوزه، بهینه‌سازی جریان توان و پایداری شبکه در شرایطی است که تعداد بالایی خودرو الکتریکی به صورت هم‌زمان به شبکه متصل می‌شوند. علاوه بر این، تغییرات تصادفی در الگوهای شارژ و دشارژ خودروها موجب می‌شود پیش‌بینی و کنترل بار شبکه پیچیده‌تر گردد. برای رفع این چالش، Venkatesh و همکاران رویکردی ترکیبی شامل الگوریتم عقاب ماهیگیر و شبکه عصبی گرافی آگاه از موقعیت^۳ پیشنهاد کرده‌اند. در این ساختار، الگوریتم عقاب ماهیگیر مسئول بهینه‌سازی تخصیص منابع و جریان توان است، درحالی‌که شبکه عصبی گرافی با تحلیل ارتباطات مکانی خودروها و ایستگاه‌های شارژ، تصمیمات کنترلی هوشمندتری اتخاذ می‌کند. این ترکیب موجب شده است که هم پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه بهبود یابد و هم میزان اتلاف انرژی و هزینه عملیاتی کاهش پیدا کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش ترکیبی توانسته نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک و حتی برخی مدل‌های هوش مصنوعی مستقل، کارایی بالاتری در کاهش نوسانات و افزایش بهره‌وری شبکه داشته باشد. با این حال، از معایب آن می‌توان به پیچیدگی پیاده‌سازی و نیاز به داده‌های گسترده برای آموزش شبکه عصبی اشاره کرد. نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در آینده، این چارچوب با روش‌های سبک‌تر یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی بار بلندمدت ترکیب شود تا امکان استفاده در مقیاس بزرگ‌تر شبکه‌های V2G فراهم گردد [۳۲]. سامانه مکان‌یابی مبتنی بر نور مرئی (VLP) به طور گسترده به عنوان یک راه‌حل امیدبخش برای مکان‌یابی در محیط‌های داخلی در جایی که فناوری‌های مرسوم مانند GPS کارایی ندارند شناخته شده است. به عنوان یکی از دو فناوری متداول VLP، روش‌های مبتنی بر برد^۴ به دلیل هزینه پایین و پیاده‌سازی آسان، توجه قابل‌ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در اکثر روش‌های موجود

¹ Kookaburra Optimization Algorithm (KOA)

² Vehicle to Grid (V2G)

³ Position aware graph neural network

⁴ Range based VLP

VLP مبتنی بر برد، لازم است قدرت سیگنال دریافتی از هر چراغ LED به فاصله تبدیل شود تا موقعیت هدف تخمین زده شود. با این حال، به دلیل تأثیر چندمسیره بودن و نویز، خطای تبدیل قدرت سیگنال دریافتی به فاصله قابل اغماض نیست که این امر معمولاً منجر به خطای مکانیابی بزرگی می شود. علاوه بر این، باعث کاهش کیفیت خدمات در کاربردهایی نظیر راهنمایی در مراکز خرید، بیمارستان ها یا سیستم های واقعیت افزوده می گردد. راهکاری که Shi و همکاران ارائه کرده اند، ترکیب یک شبکه عصبی پس انتشار^۱ با نسخه بهبودیافته ای از الگوریتم عقاب ماهیگیر^۲ است. در این ساختار، الگوریتم فراابتکاری وظیفه تنظیم بهینه پارامترهای شبکه عصبی را بر عهده دارد تا فرایند یادگیری با سرعت بیشتر و دقت بالاتر انجام شود. این ترکیب موجب شده است که مدل پیشنهادی نسبت به شبکه های عصبی متداول، عملکرد بهتری در کاهش خطای مکانیابی و مقاومت در برابر تغییرات نوری محیط داشته باشد. از نتایج کلیدی پژوهش می توان به بهبود دقت مکانیابی تا سطح سانتی متری و همچنین پایداری عملکرد در حضور نویز اشاره کرد. با وجود این، مدل پیشنهادی به دلیل پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده های آموزشی متنوع در محیط های واقعی با محدودیت هایی مواجه است. نویسندگان توصیه کرده اند که در تحقیقات آینده، نسخه های سبک تر الگوریتم عقاب ماهیگیر و روش های یادگیری تطبیقی مورد استفاده قرار گیرد تا سیستم در مقیاس بزرگ تر و در شرایط عملیاتی واقعی نیز قابلیت استقرار داشته باشد [۲۵].

یافتن مسیر بهینه برای پهپادها در محیط هایی با موانع پیچیده و شرایط متغیر یک چالش مهم است. مسیریابی پهپاد نه تنها باید کوتاه ترین و ایمن ترین مسیر را ارائه دهد، بلکه لازم است در شرایطی با محدودیت انرژی و تهدیدهای محیطی نیز کارا باشد. روش های متداول بهینه سازی اغلب دچار مشکل همگرایی زودرس یا افزایش زمان محاسباتی می شوند که مانع استفاده از آن ها در کاربردهای بلادرنگ می گردد. راهکار پیشنهادی توسط Yang و همکاران استفاده از یک نسخه چند استراتژی بهبودیافته از الگوریتم عقاب ماهیگیر است. در این رویکرد، ترکیبی از عملگرهای جستجوی محلی، مکانیزم های اکتشاف گسترده و تکنیک های تنظیم پویا به کار گرفته می شوند تا تعادل مناسبی میان اکتشاف و بهره برداری برقرار گردد. این تغییرات باعث شده است تا الگوریتم بتواند از گرفتار شدن در بهینه های محلی اجتناب کرده و به راه حل های دقیق تری در زمان کمتر دست یابد. نتایج آزمایش ها نشان داده است که روش ارائه شده توانسته است نسبت به الگوریتم های پایه و برخی فراابتکاری های مرسوم، مسیرهای کوتاه تر، مصرف انرژی پایین تر و سرعت محاسباتی بالاتر را برای پهپادها فراهم کند. با این حال، نویسندگان اذعان کرده اند که عملکرد الگوریتم در محیط های بسیار پویای سه بعدی یا شرایطی که پهپادها به صورت گروهی عمل می کنند هنوز بهینه نیست. به همین دلیل، پیشنهاد شده که در آینده، این الگوریتم با یادگیری تقویتی و مدل های پیش بینی محیطی ترکیب شود تا قابلیت سازگاری آن در سناریوهای پیچیده و مقیاس بزرگ افزایش یابد [۲۳].

یکی از چالش های کلیدی در حوزه رباتیک متحرک، طراحی مسیر بهینه برای حرکت در محیط های دوبعدی با موانع متعدد است. روش های سنتی در چنین شرایطی معمولاً یا به دلیل پیچیدگی بالای محیط دچار خطا می شوند و یا توانایی کافی برای تطبیق با تغییرات سریع محیط را ندارند. علاوه بر این، بسیاری از الگوریتم های موجود با مشکل سرعت پایین و همگرایی زود هنگام به بهینه محلی مواجه هستند که موجب کاهش دقت در مسیریابی می شود. در روش استفاده شده توسط Liu و همکاران، یک نسخه بهبودیافته از الگوریتم عقاب ماهیگیر برای حل مسئله مسیریابی ربات های سطحی ارائه شده است. این نسخه شامل مکانیزم های ترکیبی اکتشاف و بهره برداری است که با استفاده از استراتژی های تطبیقی و تکنیک های جستجوی محلی پیشرفته، به الگوریتم اجازه می دهد فضای جستجو را به طور کارآمدتری پوشش دهد. در نتیجه، ربات قادر به یافتن مسیر کوتاه تر، ایمن تر و با برخورد کمتر به موانع خواهد بود. بررسی های تجربی نشان می دهد که این روش نسبت به الگوریتم های پایه و سایر روش های فراابتکاری، از نظر سرعت همگرایی، کاهش طول مسیر و صرفه جویی در انرژی مصرفی عملکرد بهتری دارد. با این حال، نویسندگان اشاره کرده اند که در محیط های دینامیک و چندعاملی که ربات ها به صورت گروهی عمل می کنند، این الگوریتم هنوز محدودیت هایی دارد و پیشنهاد داده اند که الگوریتم عقاب ماهیگیر بهبودیافته با سیستم های یادگیری ماشینی و شبکه های عصبی عمیق ترکیب شود تا بتواند در محیط های پویا و در شرایط بلادرنگ نیز کارایی مناسبی ارائه کند [۴].

¹ Backward propagation neural network

² Improved OOA (IOOA)

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

مرور گسترده پژوهش‌های انجام‌شده نشان داد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به‌عنوان یکی از روش‌های نوین بهینه‌سازی، جایگاه ویژه‌ای در حل مسائل پیچیده سیستم‌های توزیع‌شده پیدا کرده است. در این مطالعه، ۱۹ مقاله منتخب که به کاربردهای الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در زمینه‌های مختلف از جمله اینترنت اشیا، شبکه‌های برق هوشمند، کنترل فرکانس، مدیریت انرژی، مکان‌یابی و مسیریابی، و کاربردهای سلامت هوشمند پرداخته‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که این الگوریتم به دلیل ساختار ساده، توانایی ایجاد تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری و قابلیت انطباق با شرایط متغیر محیطی، عملکرد مناسبی در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر داشته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به طور خاص در بهینه‌سازی کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت هیبریدی و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر عملکرد قابل توجهی داشته است. مقالات مرور شده بیانگر این موضوع هستند که ترکیب الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر با روش‌های کنترلی پیشرفته و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، توانسته است پایداری سیستم‌های قدرت را افزایش داده و هزینه‌ها را کاهش دهد. از سوی دیگر، در حوزه اینترنت اشیا، کاربرد الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در افزایش امنیت شبکه‌ها، مدیریت انرژی در خانه‌های هوشمند و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه‌های متصل مورد توجه بوده و نتایج مثبتی را نشان داده است. از منظر سیستم‌های ارتباطی و مکان‌یابی، استفاده از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در مسیریابی ربات‌ها، پهپادها و سیستم‌های مبتنی بر نور مرئی به افزایش دقت، کاهش خطا و بهبود کیفیت سرویس کمک کرده است. همچنین، مطالعات نشان دادند که ترکیب این الگوریتم با شبکه‌های عصبی و مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق، می‌تواند کارایی آن را در محیط‌های پیچیده و پویا بیشتر کند. در حوزه سلامت هوشمند نیز استفاده از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی تشخیص، پایش و تخصیص منابع، افق‌های جدیدی را گشوده است.

با این حال، مرور مقالات بیانگر برخی محدودیت‌ها و چالش‌ها نیز بود. در بسیاری از موارد، الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر همچنان با مسائلی نظیر وابستگی به تنظیمات اولیه، افزایش زمان محاسباتی در مقیاس‌های بزرگ و دشواری در سازگاری با داده‌های بلادرنگ مواجه است. علاوه بر این، بسیاری از پژوهش‌ها در سطح شبیه‌سازی و محیط‌های آزمایشگاهی باقی‌مانده‌اند و هنوز شواهد کافی از کاربردهای عملی و صنعتی الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در مقیاس واقعی وجود ندارد. این مسئله نشان می‌دهد که برای توسعه و به‌کارگیری این الگوریتم در صنایع حساس مانند انرژی، حمل‌ونقل و بهداشت، نیازمند تحقیقات عمیق‌تر و آزمون‌های میدانی گسترده هستیم. جدول ۳ مزایا و معایب مقالات بررسی شده را بطور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۳: خلاصه ای از مقالات بررسی شده

Table 3. Summary of selected papers

محدودیت‌ها	مزایا	هدف اصلی	روش استفاده شده	مرجع
پیچیدگی محاسباتی بالا	حفظ حریم خصوصی، کاهش حملات	امنیت دستگاه‌های IoT	یادگیری فدرال + Osprey	[11]
نیاز به دیتاست‌های گسترده‌تر	دقت بالا در تشخیص حملات	تشخیص نفوذ در IoT	OOA + Bi-LSTM	[10]
کاهش کارایی در شبکه‌های متمرکز	مصرف انرژی کمتر، توزیع متوازن بار	افزایش طول عمر شبکه	WSN در انتخاب سرخوشه OOA	[12]
سربار پردازشی بالا	بهبود تخصیص منابع، کاهش زمان پاسخ	بالانس بار در رایانش ابری	OOA + Kookaburra (ترکیبی)	[13]
عدم توجه به امنیت ارتباطات	کاهش مصرف انرژی، پایداری شبکه	خوشه‌بندی WSN	نقشه آشوب + OOA	[14]
آزمایش فقط در شبیه‌سازی	بهینه‌سازی چندمعیاره، کاهش تأخیر	تخصیص منابع در Fog-IoT	چندهدفه OOA	[31]
هزینه محاسباتی بالا	بهبود پایداری دینامیکی سیستم	کنترل فرکانس میکروگرید	FOI-(PDN+1) کنترل‌کننده + OOA	[24]

[2]	عدم ارزیابی میدانی	کاهش پیک بار، بهره‌وری بیشتر	مدیریت مصرف انرژی خانگی	DSM برای OOA
[3]	نادیده گرفتن عدم قطعیت منابع	هزینه کمتر، راندمان بالاتر	اندازه‌گذاری بهینه منابع	برای طراحی میکروگرید OOA
[32]	نیاز به زیرساخت محاسباتی قوی	بهبود کنترل و پایداری شبکه	Vehicle-to-Grid	OOA + GNN
[25]	حساسیت به نور محیطی	دقت بالا، عدم تداخل RF	موقعیت‌یابی داخلی نور مرئی	شبکه عصبی + OOA
[26]	پیچیدگی در مدل‌سازی	کاهش هزینه تولید، بهینه‌سازی منابع	زمان‌بندی کوتاه‌مدت	SHTS برای OOA
[9]	نیاز به داده‌های زمان واقعی	بهبود بهره‌وری انرژی، پایداری بیشتر	هماهنگی منابع در شبکه‌ی هوشمند	برای مدیریت انرژی OOA
[33]	زمان محاسباتی نسبتاً بالا	یافتن مسیر بهینه در موانع پیچیده	مسیریابی پهباد	چند استراتژی OOA
[4]	محدودیت در محیط‌های پویا	دقت بالا در محیط‌های بسته	مسیریابی ربات‌های سطحی	بهبودیافته OOA
[7]	نیاز به تنظیمات پیچیده	پایداری بیشتر سیستم قدرت	کنترل فرکانس بار	سه ناحیه‌ای LFC برای OOA
[5]	تست فقط در محیط شبیه‌سازی	کاهش هزینه و بهبود بهره‌وری	مدیریت تقاضا PV-Smart Grid	MOOA (اصلاح شده OOA)
[8]	افزایش پیچیدگی محاسبات	لحاظ کردن منابع تجدیدپذیر	زمان‌بندی هیدروترمال - باد	با عدم قطعیت باد OOA
[34]	مصرف انرژی زیاد حسگرها	دقت بالا، کاربرد پزشکی	سلامت (IoT تشخیص آریتمی)	ensemble یادگیری + OOA

برای تحقیقات آینده، چند مسیر کلیدی پیشنهاد می‌شود:

- توسعه نسخه‌های سبک‌وزن و سازگار با محیط‌های محدود منابع، به‌ویژه در اینترنت اشیا و دستگاه‌های پوشیدنی.
- ترکیب الگوریتم عقاب ماهیگیر با مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای افزایش دقت و سرعت همگرایی در محیط‌های پویا.
- گسترش آزمون‌های عملی و میدانی در مقیاس صنعتی و شهری به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان الگوریتم در شرایط واقعی.
- طراحی نسخه‌های چندهدفه برای مدیریت هم‌زمان معیارهای متضاد مانند هزینه، انرژی، امنیت و کیفیت خدمات. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم عقاب ماهیگیر نه تنها پتانسیل بالایی برای ارتقای کارایی و تاب‌آوری سیستم‌های توزیع شده دارد، بلکه در صورت رفع محدودیت‌های فعلی، می‌تواند به یکی از ابزارهای اصلی در مدیریت نسل آینده زیرساخت‌های هوشمند تبدیل شود.

۶- مراجع

- [1] D. C. Tansel Dokeroglu, Tayfun Kucukyilmaz, "A survey on pioneering metaheuristic algorithms between 2019 and 2024," *Computers & Industrial Engineering (preprint on arXiv)*, 2024.
- [2] S. Nanibabu, Baskaran, S., & Marimuthu, P., "Demand side management in residential smart grid using Osprey Optimization Algorithm," *2023 IEEE 3rd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, 2023.

- [3] A. R. Sagor, Ahmad, S., Ahmed, A., Hazari, M. R., Jahan, E., Hossain, C. A., Ogliari, E., & Mannan, M. A., "Optimal sizing of autonomous microgrid using Osprey Optimization Algorithm," *2023 IEEE 3rd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, 2023.
- [4] Z. Liu, & Hui, L., "Application of improved Osprey Optimization Algorithm in path planning of planar mobile robots," *Proceedings of the 2025 7th International Conference on Information Science, Electrical and Automation Engineering (ISEAE), IEEE*, 2025, doi: 10.1109/ISEAE64934.2025.11042112.
- [5] A. S. Jasmine, & Krishnaparamathma, M., "A Resilient Mod Osprey Optimization Algorithm (MOOA) Based Effective Demand Side Management for Solar PV tied Smart Grid Networks," *2024 International Conference on Integration of Emerging Technologies for the Digital World (ICIETDW), IEEE*, 2024, doi: 10.1109/ICIETDW61607.2024.10939457.
- [6] M. D. a. P. Trojovský, "Osprey optimization algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems," *IEEE Access*, vol. 9, 2023, doi: 10.3389/fmech.2022.1126450.
- [7] J. N. F. Abidur Rahman Sagor¹, Sazzad Hossain Sahed¹, Shameem Ahmad¹, Md. Rifat Hazari¹, Md. Shahariar Parvez¹, Kazi Firoz Ahmed¹, and Mahamudul Hassan², "Osprey Optimization Algorithm for Load Frequency Control in Renewable and Non-renewable Energy based Three-Area Power Generating System," *Proceedings of the 4th International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, 2025, doi: 10.1109/ICREST63960.2025.10914392.
- [8] J. R. b. Ponnuru Sudhakiran a, M. Dhinakaran c, Baburao Pasupulati "Wind power uncertainty is taken into consideration while using the Osprey Optimization Algorithm for hydro-thermal-wind complementary scheduling," *2024 Third International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), IEEE*, 2024, doi: 10.1109/ICEEICT61591.2024.10718537.
- [9] N. Rudrapogu, Hemalatha, N., Warkad, S. B., Jayanthi, A., Vinoth, K., & Jayaram, B, "A novel approach to smart grid energy management using the Osprey Optimization Algorithm," *Proceedings of the Fourth International Conference on Sentiment Analysis and Deep Learning (ICSADL-2025), IEEE*, 2025.
- [10] S. S. SSN Chintapalli, J Frnda, PB Divakarachari, VL Sarraju, P Falkowski-Gilski, "OOA-modified Bi-LSTM network: An effective intrusion detection framework for IoT systems," *Heliyon*, Research article vol. 10, no. 8, 2024.
- [11] A. Dr. Saad A, "Privacy-Aware Federated Learning Framework for Securing IoT Devices Using Chameleon Swarm Algorithm with Self Attentive Variational Autoencoder Model," (in ENGLISH), *SSRN review* 2020.
- [12] Y. C. Ramasubbareddy Somula 1, * and Bhabendu Kumar Mohanta, "SWARAM: Osprey Optimization Algorithm-Based Energy-Efficient Cluster Head Selection for Wireless Sensor Network-Based Internet of Things," *sensors*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/s24020521>.
- [13] S. W. s. g. c. a. B. M. P. a. a. affiliations, "Adaptive load balancing in distributed cloud environment: Hybrid Kookaburra-Osprey optimization algorithm," *Sage Journals*, Research article vol. 18, no. 3, 2024, doi: <https://doi.org/10.3233/IDT-240672>.
- [14] W. S. Songhao Jia, Cai Yang, Shuya Jia, Yaohui Yuan, Huiyuan Chen, Haiyu Zhang, "CM-OOA : An Energy-Efficient Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks Using Chaotic Mapping and Osprey Optimization," *Informatika*, vol. 49, no. 12, 2025, doi: <https://doi.org/10.31449/inf.v49i12.7840>.
- [15] P. Mell, & Grance, T., "The NIST Definition of Cloud Computing," *NIST Special Publication 800-145*, 2011.
- [16] M. Armbrust, Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R. H., Konwinski, A., ... & Zaharia, M., "A View of Cloud Computing," *Communications of the ACM*, vol. 53, no. 4, 2010.
- [17] T.-H. D. M. Yoo, "TDOA-based indoor positioning using visible light," *Photonics*, vol. 3, no. 4, 2014, doi: <https://doi.org/10.3390/photonics3040085>.

- [18] R. M. Flavio Bonomi, Jiang Zhu, Sateesh Addepalli, "Fog Computing and Its Role in the Internet of Things," *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, 2012.
- [19] Z. Yang, Wu, C., & Liu, Y, *Indoor positioning technologies: Techniques, trends and challenges* (no. 4). 2018.
- [20] X. F. Parth H. Pathak, Pengfei Hu, and Prasant Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2476474>.
- [21] F. Glover, "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence." *Computers & Operations Research* 13, 533-549," *Computers & Operations Research*, vol. 13, no. 5, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1).
- [22] D. K. B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal of Global Optimization*, vol. 39, no. 3, 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>.
- [23] C. D. G. S. Kirkpatrick, Jr., M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, 1983, doi: <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.
- [24] S. Santra, Mondal, S., & De, M., "Enhanced frequency control of a hybrid microgrid integrated with EV aggregator using [FOI-(PDN+1)] controller optimized by osprey optimization algorithm," *Engineering Research Express (IOP Publishing)*, vol. 7, no. 2, 2025.
- [25] T. Shi, Liang, Z., Dong, B., & Zhang, J., "Indoor visible light positioning based on backward propagation neural network and improved osprey optimization algorithm," *Proceedings of the 10th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS 2025)*, IEEE, 2025.
- [26] M. S. Baburao Pasupulati, Amosedinakaran S, R Sreedhar, Sudhakaran P, Vinoth John Prakash S, "An intelligent approach for the short-term generation scheduling of a hydrothermal power system employing the osprey optimization algorithm," *2023 IEEE 3rd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, 2023, doi: DOI: 10.1109/ICCIGST60741.2024.10717630.
- [27] C. R. Reeves, *Genetic Algorithms*. 2010.
- [28] J. K. a. R. Eberhart2, "Particle Swarm Optimization," *IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN 1995)*, 1995, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [29] S. Mirjalili, Mirjalili, Seyed Mohammad, Lewis, Andrew, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- [30] X.-S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm," *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-12538-1_6.
- [31] E. Nagarjun, Chouhan, D., & S. M., D. K, "Multi-Objective Osprey Optimization Algorithm-Based Resource Allocation in Fog-IoT," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 16, no. 2, 2025.
- [32] K. Venkatesh, Dhasmana, G., Deokar, S. U., Thacker, C., Saravanan, K. G., & Padmashini, R. K., "Osprey Optimization Algorithm and Position-Aware Graph Neural Network for Enhanced Vehicle-to-Grid Control System," *IEEE MysuruCon 2023 (Proceedings)*, 2025.
- [33] L. Yang, Wang, W., & Xu, B, "A multi-strategy improved Osprey Optimization Algorithm for UAV path planning," *Proceedings of the 2024 7th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)*, IEEE, 2024, doi: 10.1109/RCAE62637.2024.10834189.
- [34] V. A. K. A. L. G. K. V. D. M. S. V. H. Bhutnal, "An IoT enabled healthcare framework for arrhythmia detection based on Qos aware trust aided osprey routing protocol and ensemble learning," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-17773-w>.

