

مروری

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

صابر پهلوان^۱ | دکتر علی اکبر نقابی*^۲ |

چکیده:

الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به عنوان یکی از روش های نو ظهور بهینه سازی، طی سال های اخیر توجه گسترده ای در حوزه سیستم های توزیع شده به خود جلب کرده است. این الگوریتم با الهام از رفتار شکار عقاب ماهیگیر، توانایی چشمگیری در ایجاد توازن میان جستجوی سراسری و محلی دارد و در نتیجه می تواند مسائل پیچیده و چندمعیاره را به طور مؤثر حل کند. در دهه اخیر، سیستم های توزیع شده به ستون فقرات بسیاری از فناوری های نوین تبدیل شده اند. این سیستم ها با فراهم کردن بستری برای همکاری اجزای پراکنده در جغرافیاهای متفاوت، امکان پردازش و مدیریت داده ها را در مقیاس جهانی فراهم می کنند. این مقاله مروری نظام مند از پژوهش های انجام شده در حوزه کاربرد الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در سیستم های توزیع شده انجام شده است. ۱۹ مقاله منتخب در حوزه هایی مانند 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. یافته ها نشان می دهد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر قادر است مصرف انرژی را کاهش دهد، تخصیص منابع را بهبود بخشد، امنیت داده ها را ارتقا دهد و کارایی و پایداری سیستم های توزیع شده را افزایش دهد. در عین حال، چالش هایی نظیر پیچیدگی محاسباتی، وابستگی به پارامترهای اولیه و کمبود آزمون های میدانی در محیط های واقعی همچنان باقی است. نتایج این مرور، چشم اندازهایی برای توسعه نسخه های بهبود یافته الگوریتم و کاربرد آن در محیط های عملیاتی آینده پیشنهاد می کند.

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

Pahlavan.ir2006@gmail.com

^۲ گروه 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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۶

<https://doi.org/...>

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

۱- مقدمه

الگوریتم های فراابتکاری^۱ مجموعه ای از روش های پیشرفته بهینه سازی هستند که برای حل مسائل پیچیده، غیرخطی و با ابعاد بالا طراحی شده اند [۱]. این الگوریتم ها با الهام از پدیده های طبیعی، فرآیندهای زیستی یا رفتارهای اجتماعی، به جستجوی راه حل های بهینه در فضاهای جستجوی وسیع می پردازند. ویژگی شاخص این الگوریتم ها، توانایی مقابله با مسائل بزرگ و پیچیده ای است که روش های کلاسیک یا دقیق در حل آن ها ناکارآمد هستند. کاربرد این الگوریتم ها طیف گسترده ای را شامل می شود؛ از مسائل مهندسی مانند بهینه سازی طراحی سازه ها، زمان بندی تولید و مسیریابی شبکه های حمل و نقل [۲] تا حوزه های علوم داده شامل خوشه بندی، انتخاب ویژگی و یادگیری ماشین [۳] [۴] و همچنین کاربردهای زیست محیطی 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 [6]. این الگوریتم از رفتار شکار این پرند الهام گرفته شده است. استراتژی های شکار عقاب ماهیگیر شامل پرواز بر فراز آب، شناسایی موقعیت طعمه، تمرکز بر هدف و شیرجه سریع به صورت مدل سازی شده در این الگوریتم پیاده سازی شده اند. این روش با ترکیب متوازن دو مکانیزم کلیدی اکتشاف^۳ (جستجوی گسترده برای کشف نواحی جدید) و بهره برداری^۴ (جستجوی محلی دقیق در نواحی امیدبخش)، قادر به حل مسائل پیچیده در فضاهای جستجوی گسترده است. سادگی ساختار، انعطاف پذیری و قدرت جستجوی بالا، این الگوریتم را به یکی از روش های نوآورانه و کارآمد در حوزه بهینه سازی تبدیل کرده است.

در دهه اخیر، سیستم های توزیع شده^۵ به ستون فقرات بسیاری از فناوری های نوین تبدیل شده اند [۴]. این سیستم ها با فراهم کردن بستری برای همکاری اجزای پراکنده در جغرافیاهای متفاوت، امکان پردازش و مدیریت داده ها را در مقیاس جهانی فراهم می کنند. آنچه اهمیت این سیستم ها را دوچندان کرده، تغییرات بنیادینی است که در نیازهای جوامع و صنایع رخ داده است که از آن جمله می توان به افزایش وابستگی به سرویس های آنلاین، رشد تصاعدی داده ها، ضرورت واکنش بلادرنگ به رویدادها و تقاضا برای زیرساخت های پایدار و قابل اطمینان اشاره کرد [۷]. نقش سیستم های توزیع شده محدود به مراکز داده یا شبکه های ارتباطی نیست؛ آن ها امروزه در سامانه های حمل و نقل هوشمند [۸]، مدیریت انرژی شهری [۹]، پایش محیط زیست [۵]، هماهنگی عملیات های امدادی [۸] و بسیاری از موارد دیگر نیز به کار گرفته می شوند.

گسترده گی حوزه های کاربرد سیستم های توزیع شده، باعث شده است تا مسائل بهینه سازی در آن ها شکل و ابعاد جدیدی پیدا کنند. برای مثال، در یک شبکه حمل و نقل شهری، تصمیم گیری 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 هم زمان مصرف، تولید تجدیدپذیر و شرایط اضطراری را لحاظ کند [۷]. از سوی دیگر، تحولات فناورانه آینده مانند گسترش محاسبات لبه ای و پردازش مه [۴]، ورود ارتباطات ۶G، و استفاده گسترده از هوش مصنوعی در سیستم های کنترل [۸]، مرزهای توانمندی سیستم های توزیع شده را جابه جا خواهند کرد. این پیشرفت ها فرصتهایی تازه اما در عین حال پیچیدگی های مدیریتی جدیدی به همراه می آورند. عواملی مانند تغییرات سریع در بار کاری [۳]، تهدیدات امنیت سایبری پیچیده تر، و نیاز به هماهنگی بین المللی، مدیریت این سیستم ها را به یک مسئله بهینه سازی پویا و چندمعیاره تبدیل می کند. این شرایط، استفاده از الگوریتم های فراابتکاری قدرتمند را اجتناب ناپذیر می سازد.

الگوریتم عقاب ماهیگیر، با قابلیت ایجاد تعادل بین جستجوی سراسری و جستجوی محلی، یکی از گزینه های ایده آل برای مواجهه با مسائل بهینه سازی پیچیده در سیستم های توزیع شده محسوب می شود و این مسئله اهمیت بررسی تحقیقات انجام گرفته در حوزه کاربرد الگوریتم عقاب ماهیگیر در حل چالش های سیستم های توزیع شده را نشان می دهد. هدف این پژوهش، بررسی کاربرد الگوریتم عقاب ماهیگیر و نسخه های ترکیبی آن در حل چالش های کلیدی سیستم های توزیع شده 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 می‌باشد، 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 عبارتند از:

- ۱- لایه سخت افزار: 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 ذخیره سازی 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 نرم افزار یا میانی^۵: این لایه به عنوان واسطه‌ای بین سخت افزار و نرم افزارهای 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، مقیاس پذیری 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 سیستم های توزیع شده دسترسی جغرافیایی به منابع مشترک می باشد 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 آنجمله 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 سیستم های توزیع شده توضیح داده می شود.

¹ Wireless sensor network

² Cloud computing

³ Fog computing

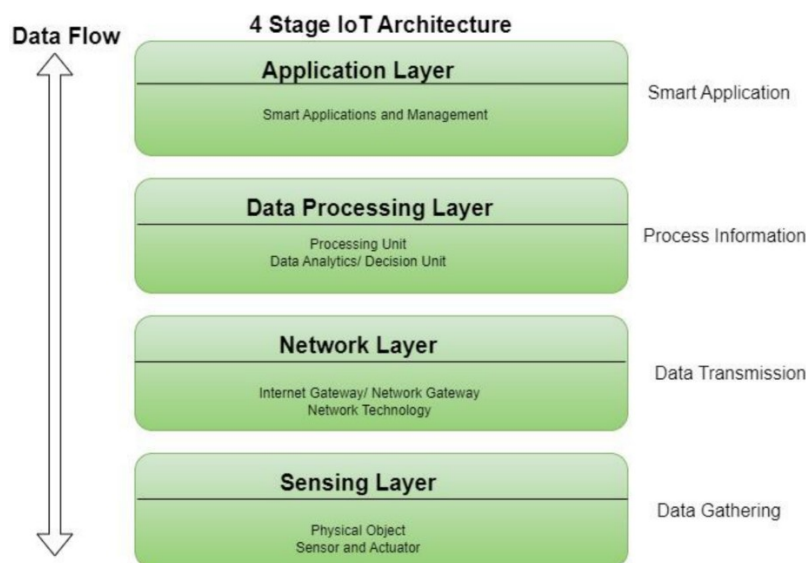
⁴ Smart grid

⁵ Middleware

۱-۱-۲ 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، حمل و نقل 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 [۵،۳]:



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 جمع‌آوری شده 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 و 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 می باشد. 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 و Virtual Machines می باشد [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

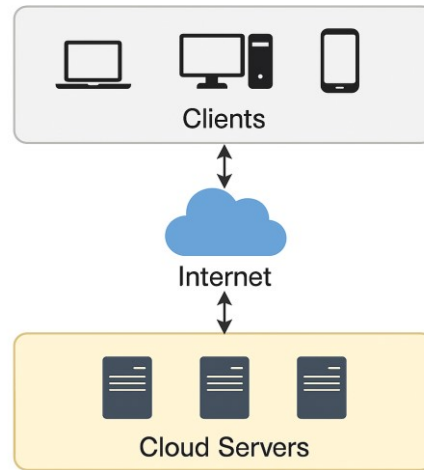
² Application layer

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 به‌صورت 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 به‌عنوان 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 دستگاه‌های انتهایی، لایه مه، و لایه ابر. این لایه‌ها در کنار هم امکان پردازش داده در نزدیکی منبع تولید، و در عین حال بهره‌مندی از قدرت محاسباتی ابر را فراهم می‌کنند [۱۰]. در اینجا به توضیح این لایه‌ها خواهیم پرداخت:

¹ End Users

² Cloud servers

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 لبه 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 با هدف 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].

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:

¹ Fog layer

² Cloud layer

³ Vehicular Ad hoc NETWORK (VANET)

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 [12]. 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 [13]. 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 [12]. 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 [14]. 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 [13]. 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 مورد نظر 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 [13].

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 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 [14].

¹ Roadside Units (RSUs)

² Base stations

³ Local processing layer

۳. لایه شبکه ارتباطی^۱: این لایه مسئول انتقال داده‌ها از حسگرها و گره‌های پردازشی به ایستگاه پایه است. انتقال داده‌ها در WSN معمولاً از طریق شبکه‌ای از گره‌ها و به صورت چندمرحله‌ای انجام می‌شود، به طوری که داده‌ها از یک حسگر به حسگر دیگر و در نهایت به ایستگاه پایه منتقل می‌شوند. استفاده از روش‌های مسیریابی چندمرحله‌ای و سلسله‌مراتبی باعث می‌شود 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 داده‌ها را پایدار نگه دارد.

۴. ایستگاه پایه: ایستگاه پایه نقطه مرکزی شبکه است که داده‌های ارسال شده از سراسر شبکه را دریافت می‌کند. این مرکز معمولاً دارای توان پردازشی بالا، حافظه گسترده و قابلیت اتصال به شبکه‌های گسترده‌تر مانند اینترنت است. در این بخش داده‌ها ذخیره، تحلیل و پردازش‌های پیچیده‌تر انجام می‌شود. همچنین، ایستگاه پایه می‌تواند فرمان‌ها و تنظیمات کنترلی را به گره‌های حسگر ارسال کند تا شبکه به صورت هوشمند و بهینه کار کند.

با پیشرفت فناوری و توسعه الگوریتم‌های نوین، انتظار می‌رود شبکه‌های حسگر بی‌سیم نقش کلیدی در سامانه‌های هوشمند و اینترنت اشیا ایفا کرده و محدودیت‌های فعلی به مرور کاهش یابد [12].

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

سیستم موقعیت‌یابی داخلی مبتنی بر نور مرئی یکی از فناوری‌های نوظهور در حوزه مکان‌یابی در محیط‌های بسته است که از چراغ‌های LED^۳ به‌عنوان منبع ارسال سیگنال استفاده می‌کند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های نوری منحصربه‌فرد چراغ‌های LED، امکان تخمین دقیق موقعیت کاربران یا اشیاء را فراهم می‌آورند. سیگنال‌های نوری از طریق فرستنده‌ها منتشر شده و توسط گیرنده‌هایی مانند دیودهای نوری گیرنده^۴ یا دوربین‌های نوری دریافت می‌شوند [19]. سپس این داده‌ها توسط الگوریتم‌های پردازشی تحلیل و موقعیت دقیق تعیین می‌شود معماری IVLP معمولاً شامل سه لایه اصلی است: لایه فرستنده، لایه گیرنده، و لایه پردازش [۲۰]:

✓ لایه فرستنده: این لایه شامل چراغ‌های LED است که به‌عنوان منابع نور و ارسال‌کننده سیگنال عمل می‌کنند. چراغ‌های LED علاوه بر تامین روشنایی محیط، سیگنال‌های نوری مدوله‌شده را منتشر می‌کنند که این سیگنال‌ها حاوی اطلاعات موقعیت یا شناسه خاصی هستند. مدولاسیون سیگنال نوری معمولاً به گونه‌ای انجام می‌شود که برای چشم انسان قابل تشخیص نباشد ولی توسط گیرنده‌های نوری قابل دریافت و تحلیل باشد. در این لایه، فناوری‌هایی 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 می‌توانند دیودهای نوری گیرنده، دوربین‌های یا سایر سنسورهای حساس به نور باشند. وظیفه اصلی این لایه، دریافت سیگنال‌های نوری ارسالی از چراغ‌های LED و اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر شدت نور، فرکانس مدولاسیون و تغییرات زمانی سیگنال است. داده‌های جمع‌آوری شده در این مرحله، به صورت خام یا پردازش‌شده به لایه بعدی منتقل می‌شوند. کیفیت و نوع حسگرها تاثیر مستقیمی بر دقت و کارایی کل سیستم دارد.

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)

✓ 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. با این 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 می باشد. در مجموع، سیستم موقعیت یابی داخلی مبتنی بر نور مرئی با توجه به دقت بالا و سازگاری با محیط های حساس، یکی از گزینه های موثر و بهینه برای مکان یابی در فضای بسته به شمار می آید [22].

۲-۱-۷ 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 [11]. ریزشبکه ها با استفاده از سامانه های کنترلی هوشمند، امکان مدیریت همزمان 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 غیرتجدیدپذیر محلی (شامل ژنراتورهای دیزلی یا گازی که به عنوان پشتیبان برای مواقع کمبود انرژی تجدیدپذیر به کار می روند) و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت^۷ (شامل سیستم هایی که راندمان کلی را از طریق استفاده همزمان از انرژی حرارتی و الکتریکی افزایش می دهند) [11].

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

¹ Time of flight

² Received signal strength

³ Trilateration

⁴ Multilateration

⁵ Microgrid

⁶ Distributed generation

⁷ Combined Heat and Power (CHP)

الکتروشیمیایی (باتری های لیتیوم-یون، باتری های سرب-اسید پیشرفته و باتری های جریان) و ذخیره سازهای مکانیکی (چرخ های طیار^۱ که انرژی را به صورت جنبشی ذخیره می کنند) می باشند [11].

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 می باشد 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 براساس 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 برعهده دارد [11].

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 شبکه های مقاوم در برابر تأخیر بر پایه مفهوم ذخیره، حمل و ارسال^۱ طراحی شده است و هدف آن فراهم سازی ارتباط پایدار در محیط هایی با اتصالات ناپایدار، تأخیر بالا یا قطع و وصل های مکرر است. اجزای اصلی این معماری شامل موارد زیر است:

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

۲. پروتکل لایه باندل^۳: یک لایه میانی بین لایه های سنتی شبکه مثل TCP/IP و برنامه های کاربردی که داده ها را به شکل بسته های بزرگ تر موسوم به باندل مدیریت می کند. این لایه مسئول ذخیره سازی، صف بندی و زمان بندی ارسال داده ها است.

۳. مکانیزم های ذخیره سازی و صف بندی: هر گره مجهز به فضای ذخیره سازی پایدار (مانند حافظه فلش یا دیسک) است تا داده ها را تا زمان در دسترس بودن مسیر مناسب نگه دارد.

۴. مکانیزم کشف و برقراری ارتباط: شامل پروتکل ها و الگوریتم هایی برای کشف گره های مجاور و ایجاد لینک ارتباطی به محض در دسترس بودن آن ها می باشد.

۵. زیرساخت مدیریت و مسیریابی: از الگوریتم های خاص مسیریابی مانند Epidemic Routing یا Prophet برای یافتن مسیرهای احتمالی بین گره ها در شرایطی که مسیر کامل از مبدا تا مقصد در یک لحظه وجود ندارد، استفاده می شود [۲۶].

۲-۱-۹ سیستم های تولید برق^۴:

این سامانه ها مجموعه ای از تجهیزات است که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند تا برق تولید شود. این سیستم ها انرژی را از منابع مختلف مانند سوخت های هسته ای، تجدیدپذیر، پتانسیل گرانشی یا فسیلی دریافت کرده و با استفاده از یک ژنراتور، آن را به برق تبدیل می کنند. اجزای اصلی یک سیستم تولید برق شامل منبع انرژی (توربین یا موتور)، ژنراتور (مولد برق)، سیستم خنک کاری، سیستم سوخت رسانی و سیستم کنترل و روغن کاری است. در اینجا به شرح این اجزا خواهیم پرداخت:

✓ منبع انرژی (موتور یا توربین): این بخش انرژی را از منابع اولیه فراهم می کند؛ مثلاً توربین گاز، توربین بخار، توربین آبی یا موتور درون سوز، انرژی مکانیکی لازم را تولید می کنند.

✓ ژنراتور: وظیفه اصلی آن تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی از طریق القای الکترومغناطیسی است.

✓ سیستم سوخت رسانی: سوخت را از مخزن جمع آوری کرده، فیلتر می کند و به موتور تزریق می نماید 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 کوچکتر 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 گیر افتادن در بهینه های محلی را دارند. رفتار این الگوریتم ها تصادفی است و فرآیند بهینه سازی را با تولید راه حل های تصادفی آغاز می کنند. برخلاف روش های مبتنی بر جستجوی گرادیان، 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 [12].

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 فرآیند 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)

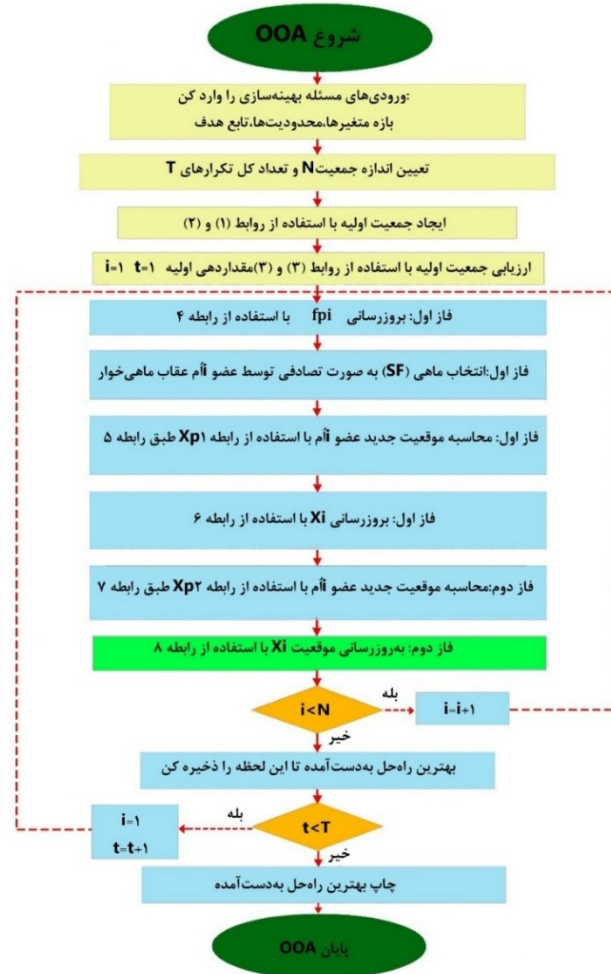
جدول ۱: چند نمونه از انواع الگوریتم های فراابتکاری

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 شبیه 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	شبیه 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 گیر افتادن 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) دیاگرام الگوریتم عقاب ماهیگیر نشان داده شده است. در ادامه به بررسی بخش های مختلف این الگوریتم می پردازیم [6].



شکل ۲: دیاگرام الگوریتم بهینه‌سازی 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 (عقاب‌ها) موقعیت‌های بهتری پیدا کنند و با استفاده از اطلاعات موجود، موقعیت خود را بهینه کنند. مراحل این بخش به ترتیب زیر است:

✓ تعیین موقعیت‌های ماهی‌های شکار شده توسط عقاب: عقاب i -ام یکی از موقعیت‌های ماهی را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند. از رابطه زیر برای به‌روزرسانی مجموعه موقعیت‌ها استفاده می‌شود:

(۱)

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

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 می‌شود:

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

$S_{f_{ij}}$ و L_{ij} پارامترهایی هستند که مربوط به شناسایی و بهره‌برداری اند R_{ij} نیز یک عدد تصادفی است.

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

(۳)

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

L_{bj} و U_{bj} به ترتیب حد پایین و بالای متغیر j -ام هستند.

✓ 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 R_{ij} یک عدد تصادفی است L_{bj} و U_{bj} حد پایین و بالای متغیر j -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:

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

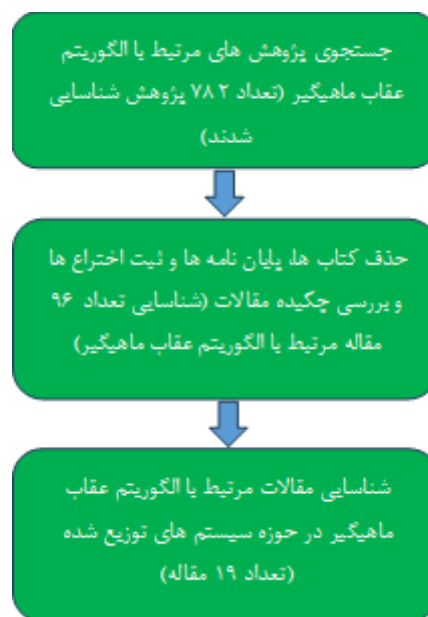
• بخش سوم: پایان الگوریتم:

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 پایگاه داده های اصلی دانشگاهی از جمله Wiley, IEEE Xplore, Elsevier و نیز جستجوگر Google scholar انجام شد. استراتژی جستجو شامل استفاده از کلمات کلیدی خاص مانند " Osprey optimization algorithm" و " Osprey algorithm" بود. در ابتدا، بیش از ۷۸۲ منبع از جمله مقالات، کتاب ها، پایان نامه ها و ثبت اختراع که از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ منتشر شده بودند، بازیابی شدند. در مرحله بعد ابتدا کتاب ها، پایان نامه ها و ثبت اختراع ها 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 فرآیند اجرا شده برای انتخاب مقالات در این مطالعه است. براساس 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، ریزشبکه، 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 براساس سال انتشار و انتشارات آنها به ترتیب در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است. شکل (۴) نشان می دهند 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 می باشد. شکل (۵) نشان می دهد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر بیشترین توجه را در انتشارات IEEE به خود اختصاص داده است و انتشارات SAGE و Elsevier در رتبه های بعدی قرار دارند.

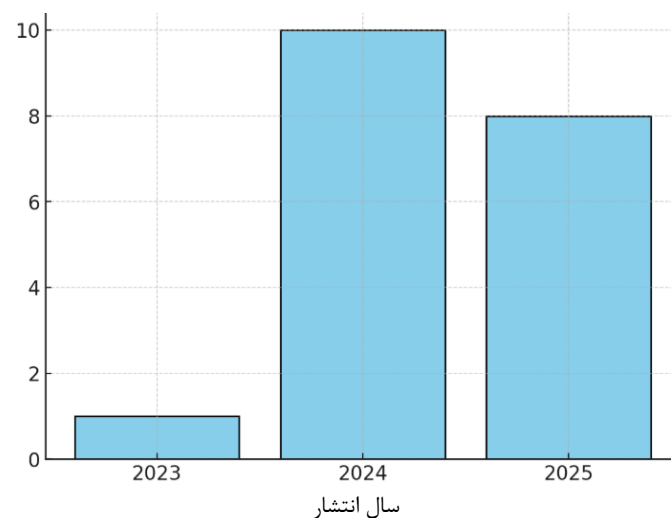


شکل ۳: روش انتخاب مقالات
Figure 3. Selection paper method

Table 2: Categorization of lected papers

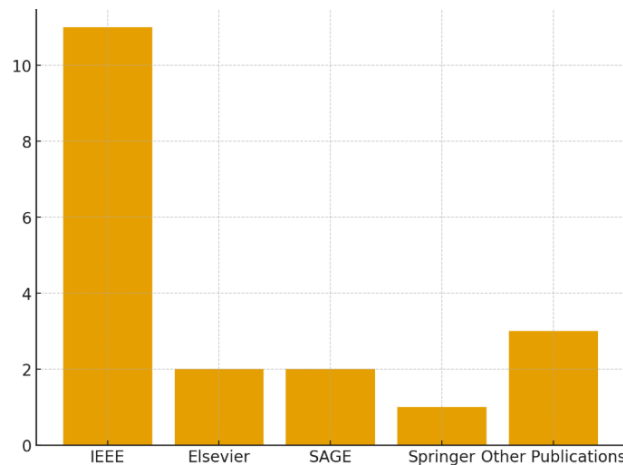
انتشارات	حوزه کاربرد	سال انتشار	عنوان مقاله	مرجع	دسته
Elsevier	امنیت دستگاه های ، یادگیری فدرال IoT	2024	Privacy-Aware Federated Learning Framework for Securing IoT Devices Using Chameleon Swarm Algorithm with Self Attentive Variational Autoencoder Model	[11]	اینترنت اشیا
Elsevier	IoT تشخیص نفوذ در	2024	OOA-modified Bi-LSTM network: An effective intrusion detection framework for IoT systems	[10]	
MDPI	انتخاب سرخوشه WSN بهینه در	2024	SWARAM: osprey optimization algorithm-based energy-efficient cluster head selection for wireless sensor network-based internet of things	[12]	
SAGE	خوشه بندی بهینه WSN	2025	CM-OOA: An energy-efficient clustering algorithm for wireless sensor networks using chaotic mapping and Osprey Optimization	[14]	
Science and Information Organization	تخصیص منابع در Fog-IoT	2025	Multi-Objective Osprey Optimization Algorithm-Based Resource Allocation in Fog-IoT	[31]	
Springer	تشخیص آریتمی IoT قلبی، سلامت	2024	An IoT enabled healthcare framework for arrhythmia detection based on QoS aware trust aided osprey routing protocol and ensemble learning	[34]	
IEEE	مدیریت مصرف انرژی در شبکه برق خانگی	2023	Demand side management in residential smart grid using Osprey Optimization Algorithm	[2]	شبکه ی برق هوشمند
IEEE	تعیین اندازه بهینه میکروگرید	2023	Optimal sizing of autonomous microgrid using Osprey Optimization Algorithm	[3]	
IEEE	مدیریت تقاضای انرژی در شبکه خورشیدی	2024	A resilient Mod Osprey optimization algorithm (MOOA) based effective demand side management for solar PV tied smart grid networks	[5]	
IEEE	مدیریت انرژی شبکه ی هوشمند	2025	A novel approach to smart grid energy management using the Osprey Optimization Algorithm	[9]	
IOP Publishing	کنترل فرکانس میکروگرید هیبریدی	2025	Enhanced frequency control of a hybrid microgrid integrated with EV aggregator using [FOI-(PDN+1)] controller optimized by osprey optimization algorithm	[24]	سیستم های تولید برق
IEEE	زمان بندی تولید کوتاه مدت هیدروترمال	2023	An intelligent approach for the short-term generation scheduling of a hydrothermal power system employing the osprey optimization algorithm	[26]	
IEEE	کنترل فرکانس بار در سیستم های ترکیبی	2025	Osprey optimization algorithm for load frequency control in renewable and non-renewable energy based three-area power generating system	[7]	

سایر سیستم های توزیع شده	[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 ربات های 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:

Kotkar 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 جمعیت 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 [11].

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

نسخه‌های ساده‌تر الگوریتم برای محیط‌های محدود منابع استفاده شود و روش‌های ترکیبی با یادگیری انتقالی جهت بهبود عملکرد در شرایط داده‌های نامتوازن به کار گرفته شوند [10].

مصرف بالای انرژی گره‌ها و کاهش طول عمر شبکه یکی از مشکلات اساسی در اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. این چالش زمانی جدی‌تر می‌شود که تعداد حسگرها زیاد باشد و ارتباط میان آن‌ها منجر به تخلیه سریع باتری شود. به‌منظور رفع این مسئله، Deshpande و همکاران (۲۰۲۴) رویکردی به نام SWARM را معرفی کرده‌اند که بر پایه الگوریتم عقاب ماهیگیر طراحی شده است. در این رویکرد، وظیفه انتخاب سرخوشه‌ها به کمک OOA انجام می‌شود تا تعادل بار میان گره‌ها حفظ گردد. این کار نه تنها مصرف انرژی را بهینه می‌کند، بلکه پایداری ارتباطات و پوشش شبکه را نیز بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های سنتی توانسته است طول عمر شبکه را به شکل قابل توجهی افزایش دهد. SWARM توانایی بالایی در کاهش مصرف انرژی و توزیع بار شبکه دارد، اما نقطه ضعف آن نیاز به پردازش محاسباتی بیشتر و حساسیت نسبت به شبکه‌های مقیاس بزرگ است. نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند در آینده این الگوریتم با روش‌های پیش‌بینی بار و انرژی ترکیب شود و همچنین در شبکه‌های ناهمگن و محیط‌های متحرک مورد آزمایش قرار گیرد [12].

Patel و همکاران (۲۰۲۵) مسئله خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به عنوان یک چالش کلیدی در افزایش طول عمر شبکه و کاهش مصرف انرژی بررسی کرده‌اند. در این نوع شبکه‌ها، انتخاب بهینه سرخوشه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا نقش اساسی در مدیریت انرژی، کاهش تأخیر و بهبود بهره‌وری کل سیستم ایفا می‌کند. برای حل این مسئله، در این پژوهش الگوریتم CM-OOA معرفی شده است که در واقع از نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ای از الگوریتم عقاب ماهیگیر که از نگاشت آشوبی^۱ جهت بهبود فرایند جستجو و توزیع یکنواخت‌تر سرخوشه‌ها بهره می‌برد، استفاده شده است. استفاده از این ترکیب موجب شده است که الگوریتم از همگرایی زود هنگام اجتناب کرده و بتواند نتایج پایدارتری در انتخاب سرخوشه‌ها ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با الگوریتم‌های سنتی WSN، هم در کاهش مصرف انرژی و هم در افزایش طول عمر شبکه تأثیر داشته و همچنین نرخ از دست رفتن بسته‌ها به شکل محسوسی کاهش یافته است. با این حال، محدودیت اصلی این رویکرد آن است که در شبکه‌هایی با مقیاس بسیار بزرگ یا دارای پویایی بالا، ممکن است زمان همگرایی افزایش یابد. نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در آینده، استفاده از نسخه‌های سبک‌تر الگوریتم و آزمون در محیط‌های واقعی WSN می‌تواند راهی برای افزایش کارایی و کاربردی‌پذیری عملی آن باشد [14].

یکی از چالش‌های مهم در معماری Fog-IoT مدیریت منابع میان لایه مه و دستگاه‌های انتهایی است؛ زیرا تقاضای هم‌زمان برای پردازش داده‌ها، ذخیره‌سازی و ارتباطات، موجب فشار مضاعف بر زیرساخت‌ها می‌شود. این مشکل در شرایطی که تعداد زیادی از دستگاه‌ها به‌طور هم‌زمان داده تولید می‌کنند، به شکل پررنگ‌تری دیده می‌شود و منجر به افزایش تأخیر و کاهش بهره‌وری کل سیستم می‌گردد. 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، صرفه‌جویی در انرژی و بهبود بهره‌وری تخصیص منابع به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌شوند. استفاده از این نسخه چندهدفه، امکان برقراری توازن میان معیارهای متضاد را فراهم کرده و نسبت به رویکردهای تک‌هدفه عملکرد جامع‌تری داشته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته است نسبت به سایر روش‌ها، هم در کاهش زمان پاسخگویی و هم در کاهش بار روی سرورهای مه بهبود چشمگیری ایجاد کند. همچنین، توانسته نیازهای چندمعیاره محیط‌های Fog-IoT را برآورده سازد و انعطاف‌پذیری بالایی در شرایط متغیر شبکه داشته باشد. باین‌حال، از محدودیت‌های گزارش‌شده می‌توان به پیچیدگی محاسباتی و نیاز به تنظیم دقیق پارامترها اشاره کرد. نویسندگان در ادامه پیشنهاد کرده‌اند که برای آینده، می‌توان نسخه‌های سبک‌تر و سازگار با منابع محدود IoT را توسعه داد و همچنین آزمایش‌های میدانی در محیط‌های واقعی را انجام داد تا کارایی عملی این رویکرد بیش‌تر سنجیده شود [31].

در حوزه سلامت هوشمند، یکی از چالش‌های مهم، تشخیص دقیق و بلادرنگ آریتمی‌های قلبی در بستر اینترنت اشیا است. مشکل اصلی در این سناریو، محدودیت منابع دستگاه‌های پوشیدنی و حسگرها، کیفیت پایین برخی کانال‌های ارتباطی و

¹ Chaotic mapping

همچنین نیاز به حفظ اعتماد و امنیت داده‌های پزشکی است. بسیاری از چارچوب‌های موجود، یا تمرکز خود را تنها بر روی دقت تشخیص قرار داده‌اند و یا نتوانسته‌اند پایداری شبکه و اعتماد میان گره‌ها را تضمین کنند. برای رفع این چالش، نویسندگان یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر اینترنت اشیا پیشنهاد داده‌اند که از پروتکل مسیریابی مبتنی بر عقاب ماهیگیر به همراه مکانیزم اعتماد و کیفیت سرویس استفاده می‌کند. در کنار آن، روش یادگیری ترکیبی برای تحلیل داده‌های 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 زودهنگام بیماری‌های قلبی نیز عملکرد قابل توجهی داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این چارچوب نسبت به روش‌های متداول، توانسته است در معیارهایی همچون دقت تشخیص، کاهش تأخیر شبکه و افزایش اعتماد میان گره‌ها عملکرد بهتری ارائه دهد. با این حال، نویسندگان اشاره کرده‌اند که پیچیدگی محاسباتی بخش یادگیری ترکیبی و وابستگی شدید به کیفیت داده‌ها می‌تواند محدودیت‌هایی ایجاد کند. پیشنهاد شده است که در تحقیقات آینده از نسخه‌های سبک‌تر الگوریتم OOA و مدل‌های یادگیری کم‌هزینه‌تر برای استفاده در دستگاه‌های پوشیدنی با منابع محدود بهره گرفته شود و همچنین چارچوب روی شبکه‌های پزشکی در مقیاس بزرگ‌تر و شرایط واقعی بیمارستانی مورد ارزیابی قرار گیرد [۳۴].

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

یکی از مسائل کلیدی در شبکه‌های 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 هزینه‌های انرژی را کاهش دهد. عدم تعادل بین تولید و مصرف و نبود سازوکارهای کنترل هوشمند از مشکلات مهم در این شبکه‌ها هستند. مدیریت سمت تقاضا (DSM) یکی از مهمترین وظایف در یک شبکه هوشمند است که باعث می‌شود تا مشتریان آگاهانه در مورد مصرف انرژی خود تصمیم‌گیری کنند و به ارائه دهندگان انرژی کمک می‌کند 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 بهینه‌سازی پیشنهاد کرده‌اند. این الگوریتم در فرآیند DSM به گونه‌ای به کار گرفته شده است که برنامه‌ریزی بار خانگی را بهینه کرده و تعادل مناسبی میان هزینه، راحتی کاربران و کارایی شبکه ایجاد کند. نتایج شبیه‌سازی 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 می‌شود. در مقابل، یکی از محدودیت‌ها، نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای الگوریتم و زمان محاسباتی نسبتاً بالا در سناریوهای بزرگ‌تر است. نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در آینده، از ترکیب الگوریتم عقاب ماهیگیر با روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی برای بهبود سرعت و دقت تصمیم‌گیری استفاده گردد [۲].

در حوزه طراحی و بهره‌برداری میکروگریدهای مستقل، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها تعیین اندازه ی بهینه اجزای تولید و ذخیره‌سازی انرژی است. اگر این فرآیند به درستی انجام نشود، می‌تواند منجر به افزایش هزینه سرمایه‌گذاری، کاهش قابلیت اطمینان یا هدررفت انرژی تولیدی شود. مسئله اصلی در این پژوهش Sagor و همکاران، دستیابی به مدلی بود که بتواند به صورت هم‌زمان هزینه‌ها را کاهش داده و پایداری عملکرد میکروگرید را تضمین کند. برای پاسخ به این نیاز، از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل توانایی بالای آن در اکتشاف فضای جستجو و جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی، برای مسأله تعیین اندازه اجزای میکروگرید به کار گرفته شده است. مدل پیشنهادی شامل منابع تجدیدپذیر مانند پنل خورشیدی، توربین بادی و همچنین سیستم‌های ذخیره‌سازی است که با کمک OOA اندازه بهینه هر یک تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که این رویکرد در مقایسه با روش‌های مرسوم، هزینه کلی سیستم را کاهش داده و سطح پایداری و قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد. همچنین، موجب بهبود توازن میان هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی شده و توانسته است عملکرد پایدار میکروگرید را در شرایط مختلف بار تضمین کند. با این حال، وابستگی شدید به کیفیت داده‌های ورودی و افزایش بار محاسباتی در شبکه‌های بزرگ از محدودیت‌های این روش است.

¹ Demand Side Management (DSM)

نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که در مطالعات آینده، ترکیب الگوریتم با مدل‌های پیش‌بینی بار و تولید انرژی تجدیدپذیر و همچنین استفاده از نسخه‌های موازی‌سازی شده OOA می‌تواند باعث ارتقاء سرعت و دقت فرآیند بهینه‌سازی شود [۳]. یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های برق هوشمند متصل به انرژی خورشیدی، مدیریت تقاضای بار است. نوسان ذاتی تولید انرژی خورشیدی و تغییرات پیش‌بینی‌ناپذیر مصرف، سبب بروز مشکلاتی در تعادل عرضه و تقاضا می‌شود که در صورت عدم کنترل، می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها و کاهش پایداری شبکه گردد. به گفته‌ی Sumee Jasmine و Krishnaparamathma، این چالش زمانی پیچیده‌تر می‌شود که شبکه ترکیبی از منابع پراکنده و مصرف‌کنندگان متنوع باشد. برای رفع این مشکل، این محققان نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم عقاب ماهیگیر، موسوم به MOOA^۱ را پیشنهاد کرده‌اند. این نسخه با اصلاحات در مکانیسم جستجو و بهره‌برداری، توانسته است فرآیند مدیریت سمت تقاضا (DSM) را در یک شبکه PV-Grid بهینه‌سازی کند. به بیان نویسندگان، استفاده از MOOA باعث شده است بارهای الکتریکی به‌صورت هوشمند زمان‌بندی شوند، به گونه‌ای که همزمانی بارهای پیک کاهش یافته و بهره‌برداری از انرژی خورشیدی به حداکثر برسد. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های 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 محدودیت‌هایی همچون نیاز به داده‌های دقیق مصرف لحظه‌ای و پیچیدگی محاسباتی اشاره کرده‌اند که می‌تواند مانع استفاده گسترده آن در مقیاس‌های بزرگ شود. نویسندگان این تحقیق، پیشنهاد داده‌اند که از تلفیق MOOA با روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بار و تولید استفاده شود، و همچنین آزمون عملی آن در شبکه‌های واقعی انجام گردد [۵].

یکی از مسائل اساسی در مدیریت انرژی شبکه‌های برق هوشمند، پیچیدگی ناشی از تنوع منابع انرژی و تغییرات مداوم در الگوهای مصرف است. این موضوع باعث می‌شود که هم توازن بار و تولید و هم کاهش تلفات انرژی با چالش‌های قابل توجهی مواجه شوند. به گفته‌ی محققان، عدم وجود الگوریتم‌های کارآمد برای برنامه‌ریزی بهینه انرژی در محیط‌های پویا و نامطمئن، یکی از مشکلات اصلی شبکه‌های هوشمند به شمار می‌رود. برای مقابله با این چالش، Rudrapogu و همکاران استفاده از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر را به عنوان رویکردی نوین پیشنهاد داده‌اند. این الگوریتم با ویژگی‌های اکتشاف گسترده و بهره‌برداری هدفمند، توانسته است راه‌حل مناسبی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع و مدیریت بار ارائه کند. بر اساس شبیه‌سازی‌ها، استفاده از الگوریتم عقاب ماهیگیر توانسته است در مقایسه با روش‌های مرسوم، کاهش چشمگیری در تلفات انرژی، افزایش راندمان سیستم، بهبود پایداری شبکه و کاهش هزینه‌های عملیاتی را محقق سازد. با این حال، وابستگی این الگوریتم به پارامترهای اولیه و همچنین پیچیدگی محاسباتی در مقیاس‌های بزرگ، می‌تواند به عنوان محدودیت روش پیشنهادی مطرح شود. آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند که در تحقیقات آتی، توسعه نسخه‌های سبک‌تر و ترکیب OOA با یادگیری ماشین و الگوریتم‌های پیش‌بینی بار، می‌تواند کارایی این روش را بیش از پیش افزایش دهد [۹].

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

افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های تولید برق، به‌ویژه در ریزشبکه‌های هیبریدی، چالش‌های جدی در زمینه پایداری و کنترل فرکانس ایجاد کرده است. وجود منابعی همچون انرژی خورشیدی و بادی با ماهیت متغیر و غیرقابل پیش‌بینی، سبب بروز نوسانات فرکانسی و تهدید قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. علاوه بر این، ادغام واحدهای ذخیره‌سازی انرژی و ناوگان خودروهای برقی، نیازمند الگوریتم‌های کنترلی دقیق و انعطاف‌پذیر است تا بتوانند به تعادل بار و تولید کمک کنند. این شرایط پیچیده ضرورت توسعه ی راهکارهای بهینه‌سازی نوین را آشکار می‌سازد. برای پاسخ به این نیاز، Santra و همکاران (۲۰۲۵) از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی (FOI-(PDN+1) استفاده کرده‌اند. ایده اصلی 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 نه تنها پایداری دینامیکی سیستم را بهبود داده، بلکه زمان بازیابی فرکانس پس از اغتشاش را نیز کاهش یافته است. مزیت اصلی این کار، دقت بالای الگوریتم در یافتن مقادیر بهینه و

¹ Mod Osprey Optimization Algorithm (MOOA)

توانایی آن در جلوگیری از گیر افتادن در بهینه های داده است. با این حال، پیچیدگی محاسباتی و نیاز به توان پردازشی بیشتر از محدودیت های روش است. به عنوان پیشنهاد آتی، گسترش الگوریتم برای استفاده در ریزشبکه های بزرگ تر، آزمون در محیط های واقعی و همچنین ترکیب با تکنیک های یادگیری ماشین می تواند مسیرهای تحقیقاتی ارزشمندی باشد [24].

نیروگاه های زمین گرمایی با استفاده از منابع تولید هیدروحرارتی مانند آب و بخار کار می کنند. برای دسترسی به این منابع، نیروگاه های زمین گرمایی مخازن زمین گرمایی زیرزمینی را حفاری می کنند. منابع هیدروترمال به سطح زمین لوله کشی می شوند، جایی که از آنها برای چرخاندن توربینی که به یک ژنراتور متصل است استفاده می شود. یکی از مسائل بنیادین در این نیروگاه ها، زمان بندی کوتاه مدت تولید در آنها می باشد. این فرآیند به دلیل وجود محدودیت های عملیاتی، تغییرات غیرقابل پیش بینی در تقاضای بار، و وابستگی به منابع متنوع انرژی، به طور ذاتی پیچیده محسوب می شود. روش های کلاسیک بهینه سازی، در مواجهه با چنین پیچیدگی هایی معمولاً دچار همگرایی کند و گیر افتادن در بهینه محلی می شوند. برای غلبه بر این مشکلات، Pasupulati و دیگر همکاران، بهره گیری از الگوریتم عقاب ماهیگیر به عنوان یک روش فراابتکاری هوشمند را برای بهینه سازی در این نیروگاه ها پیشنهاد کرده اند. این الگوریتم با تکیه بر ویژگی های اکتشافی قوی و جستجوی متوازن، موفق شده است زمان بندی تولید نیروگاه های آبی و حرارتی را بهینه کند. نتایج آزمایش ها حاکی از آن است که استفاده از OOA نه تنها باعث کاهش هزینه سوخت و بهبود تخصیص توان تولیدی شده، بلکه در مقایسه با الگوریتم های متداول، توانسته به پایداری بالاتر و نرخ همگرایی سریع تر 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 الگوریتم های پیش بینی بار مبتنی بر یادگیری عمیق یا توسعه نسخه های چندهدفه آن، می تواند به بهبود چشمگیر کیفیت زمان بندی و کاهش ریسک های عملیاتی کمک کند [۲۶].

یکی از مسائل کلیدی در سیستم های تولید برق، کنترل فرکانس بار است که در حضور منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر با چالش های بیشتری همراه می شود. تغییرات ناگهانی در توان تولیدی ناشی از منابع خورشیدی و بادی و همچنین تغییرات بار مصرفی می تواند منجر به انحرافات فرکانسی و کاهش پایداری شبکه گردد. این مشکل در سیستم های چندناحیه ای به دلیل وابستگی متقابل بین مناطق مختلف پیچیده تر نیز می شود. برای غلبه بر این چالش، Rahman و همکاران (۲۰۲۵) از الگوریتم عقاب ماهیگیر برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده در یک سیستم سه ناحیه ای شامل منابع انرژی تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر استفاده کرده اند. 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 شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم های مرسوم مانند PSO و GA عملکرد سریع تر و دقیق تری در کاهش نوسانات فرکانس ارائه می دهد. از مزایای این رویکرد می توان 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 کرده اند که در تحقیقات آینده، ترکیب الگوریتم عقاب ماهیگیر با کنترل کننده های تطبیقی و یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گیرد تا قابلیت پیاده سازی در شبکه های عملی بیشتر شود [۷].

هدف اصلی مسئله برنامه ریزی کوتاه مدت تولید هیدروحرارتی^۱ (SHGS)، تعیین استراتژی بهینه برای تولید انرژی آبی و حرارتی به منظور کمینه کردن هزینه سوخت نیروگاه های حرارتی، با در نظرگیری محدودیت های مختلف عملیاتی و فیزیکی است. Ponnuru Sudhakiran و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود راه حلی برای زمان بندی کوتاه مدت تولید هیدروحرارتی (SHTS) در حضور منابع بادی پرداختند. یکی از مشکلات اصلی در این حوزه، عدم قطعیت توان بادی است که به طور مستقیم بر هزینه تولید و پایداری سیستم تأثیر می گذارد. ترکیب منابع آبی، حرارتی و بادی در عین حال که موجب کاهش مصرف سوخت های فسیلی می شود، به دلیل نوسانات تولید بادی، برنامه ریزی تولید را به یک مسئله بهینه سازی پیچیده تبدیل می کند. برای مقابله با این چالش، نویسندگان از الگوریتم عقاب ماهیگیر به عنوان روش اصلی بهینه سازی 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 زمان بندی بهینه ارائه دهد. نتایج شبیه سازی روی سیستمی با ۴ واحد آبی، ۸

¹ Short term HydroThermal generation Scheduling (SHTS)

واحد حرارتی و ۲ واحد بادی نشان داده است که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم های 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 انعطاف پذیری شبکه نیز شده است. با این حال، یکی از محدودیت ها پیچیدگی محاسباتی و زمان بالای اجرا در سیستم های مقیاس بزرگ است. نویسندگان پیشنهاد داده اند که در آینده، الگوریتم عقاب ماهیگیر با مدل های پیش بینی دقیق تر توان بادی و همچنین روش های بهینه سازی چندهدفه ترکیب شود تا بتواند نتایج بهتری برای بهره برداری عملی ارائه کند [۸].

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

Li و همکاران (۲۰۲۴) به یکی از چالش های مهم در محیط های ابری توزیع شده یعنی بالانس بار و مدیریت منابع پرداخته اند. در چنین محیط هایی، توزیع غیربهینه بار پردازشی می تواند 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 می کند. هدف از این ترکیب، استفاده هم زمان از قابلیت های اکتشافی قوی KOA و توانایی بهره برداری دقیق OOA است تا فرآیند تخصیص منابع و توزیع بار میان سرورها به شکل کارآمدتری انجام گیرد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی توانسته است زمان اجرای وظایف را کاهش داده و نرخ استفاده از منابع را بهبود بخشد. همچنین، نسبت به روش های غیر ترکیبی مقایسه شده عملکرد پایداری ارائه داده و بین اکتشاف و بهره برداری 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 محدودیت های آن به شمار می آید. نویسندگان پیشنهاد کرده اند که در آینده نسخه های ساده تر و مقیاس پذیرتری از این رویکرد توسعه یافته و همچنین عملکرد آن در شرایط پویا و چندابزار مورد آزمایش قرار گیرد [13].

مدیریت تبادل انرژی میان خودروهای برقی و شبکه انرژی الکتریکی یکی از چالش های کلیدی در سیستم های فناوری شارژ دو طرفه^۲ است. به عبارت دیگر، مشکل اصلی در این حوزه، بهینه سازی جریان توان و پایداری شبکه در شرایطی است که تعداد بالایی خودرو الکتریکی به صورت هم زمان به شبکه متصل می شوند. علاوه بر این، تغییرات تصادفی در الگوهای شارژ و دشارژ خودروها موجب می شود پیش بینی و کنترل بار شبکه پیچیده تر گردد. برای رفع این چالش، Venkatesh و همکاران رویکردی ترکیبی شامل الگوریتم عقاب ماهیگیر و شبکه عصبی گراف آگاه از موقعیت^۳ پیشنهاد کرده اند. در این ساختار، الگوریتم عقاب ماهیگیر مسئول بهینه سازی تخصیص منابع و جریان توان است، در حالی که شبکه عصبی گراف با تحلیل ارتباطات مکانی خودروها و ایستگاه های شارژ، تصمیمات کنترلی هوشمندتری اتخاذ می کند. 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 شبیه سازی ها نشان می دهد که روش ترکیبی توانسته نسبت به الگوریتم های کلاسیک و حتی برخی مدل های هوش مصنوعی مستقل، کارایی بالاتری در کاهش نوسانات و افزایش بهره وری شبکه داشته باشد. با این حال، از معایب آن می توان به پیچیدگی پیاده سازی و نیاز به داده های گسترده برای آموزش شبکه عصبی اشاره کرد. نویسندگان پیشنهاد کرده اند که در آینده، این چارچوب با روش های سبک تر یادگیری ماشین و مدل های پیش بینی بار بلندمدت ترکیب شود تا امکان استفاده در مقیاس بزرگ تر شبکه های V2G فراهم گردد [۳۲].

سامانه مکانیابی مبتنی بر نور مرئی (VLP) به طور گسترده به عنوان یک راه حل امیدبخش برای مکانیابی در محیط های داخلی در جایی که فناوری های مرسوم مانند GPS کارایی ندارند شناخته شده است. به عنوان یکی از دو فناوری متداول VLP، روش های مبتنی بر برد^۴ به دلیل هزینه پایین و پیاده سازی آسان، توجه قابل ملاحظه ای را به خود جلب کرده اند. در اکثر روش های موجود 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 چند مسیره 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

¹ Kookaburra Optimization Algorithm (KOA)

² Vehicle to Grid (V2G)

³ Position aware graph neural network

⁴ Range based VLP

در مراکز خرید، بیمارستان‌ها یا سیستم‌های واقعیت افزوده می‌گردد. راهکاری که Shi و همکاران ارائه کرده‌اند، ترکیب یک شبکه عصبی پس‌انتشار^۱ با نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم عقاب ماهیگیر^۲ است. در این ساختار، الگوریتم فراابتکاری وظیفه تنظیم بهینه پارامترهای شبکه عصبی را بر عهده دارد تا فرآیند یادگیری با سرعت بیشتر و دقت بالاتر انجام شود. این ترکیب موجب شده است که مدل پیشنهادی نسبت به شبکه‌های عصبی متداول، عملکرد بهتری در کاهش خطای مکان‌یابی و مقاومت در برابر تغییرات نوری محیط داشته باشد. از نتایج کلیدی پژوهش می‌توان به بهبود دقت مکان‌یابی تا سطح سانتی‌متری و همچنین پایداری عملکرد در حضور نویز اشاره کرد. با وجود این، مدل پیشنهادی به دلیل پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده‌های آموزشی متنوع در محیط‌های واقعی با محدودیت‌هایی مواجه است. نویسندگان توصیه کرده‌اند که در تحقیقات آینده، نسخه‌های سبک‌تر الگوریتم عقاب ماهیگیر و روش‌های یادگیری تطبیقی مورد استفاده قرار گیرد تا سیستم در مقیاس بزرگ‌تر و در شرایط عملیاتی واقعی نیز قابلیت استقرار داشته باشد [۲۵].

یافتن مسیر بهینه برای پهپادها در محیط‌هایی با موانع پیچیده و شرایط متغیر یک چالش مهم است. مسیریابی پهپاد نه تنها باید کوتاه‌ترین و ایمن‌ترین مسیر را ارائه دهد، بلکه لازم است در شرایطی با محدودیت انرژی و تهدیدهای محیطی نیز کارا باشد. روش‌های متداول بهینه‌سازی اغلب دچار مشکل همگرایی زودرس یا افزایش زمان محاسباتی می‌شوند که مانع استفاده از آن‌ها در کاربردهای بلادرنگ می‌گردد. راهکار پیشنهادی توسط Yang و همکاران استفاده از یک نسخه چنداستراتژی بهبودیافته از الگوریتم عقاب ماهیگیر است. در این رویکرد، ترکیبی از عملگرهای جستجوی محلی، مکانیزم‌های اکتشاف گسترده و تکنیک‌های تنظیم پویا به کار گرفته می‌شوند تا تعادل مناسبی میان اکتشاف و بهره‌برداری برقرار گردد. این تغییرات باعث شده است تا الگوریتم بتواند از گیر افتادن در بهینه‌های محلی اجتناب کرده و به راه‌حل‌های دقیق‌تری در زمان کمتر دست یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که روش ارائه‌شده توانسته است نسبت به الگوریتم‌های پایه و برخی فراابتکاری‌های مرسوم، مسیرهای کوتاه‌تر، مصرف انرژی پایین‌تر و سرعت محاسباتی بالاتر را برای پهپادها فراهم کند. با این حال، نویسندگان اذعان کرده‌اند که عملکرد الگوریتم در محیط‌های بسیار پویای سه‌بعدی یا شرایطی که پهپادها به صورت گروهی عمل می‌کنند هنوز بهینه نیست. به همین دلیل، پیشنهاد شده که در آینده، این الگوریتم با یادگیری تقویتی و مدل‌های پیش‌بینی محیطی ترکیب شود تا قابلیت سازگاری آن در سناریوهای پیچیده و مقیاس بزرگ افزایش یابد [۳۳].

یکی از چالش‌های کلیدی در حوزه رباتیک متحرک، طراحی مسیر بهینه برای حرکت در محیط‌های دوبعدی با موانع متعدد است. روش‌های سنتی در چنین شرایطی معمولاً یا به دلیل پیچیدگی بالای محیط دچار خطا می‌شوند و یا توانایی کافی برای تطبیق با تغییرات سریع محیط را ندارند. علاوه بر این، بسیاری از الگوریتم‌های موجود با مشکل سرعت پایین و همگرایی زود هنگام به بهینه محلی مواجه هستند که موجب کاهش دقت در مسیریابی می‌شود. در روش استفاده شده توسط Liu و همکاران، یک نسخه بهبود یافته از الگوریتم عقاب ماهیگیر برای حل مسئله مسیریابی ربات‌های سطحی ارائه شده است. این نسخه شامل مکانیزم‌های ترکیبی اکتشاف و بهره‌برداری است که با استفاده از استراتژی‌های تطبیقی و تکنیک‌های جستجوی محلی پیشرفته، به الگوریتم اجازه می‌دهد فضای جستجو را به‌طور کارآمدتری پوشش دهد. در نتیجه، ربات قادر به یافتن مسیر کوتاه‌تر، ایمن‌تر و با برخورد کمتر به موانع خواهد بود. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که این روش نسبت به الگوریتم‌های پایه و سایر روش‌های فراابتکاری، از نظر سرعت همگرایی، کاهش طول مسیر و صرفه‌جویی در انرژی مصرفی عملکرد بهتری دارد. با این حال، نویسندگان اشاره کرده‌اند که در محیط‌های دینامیک و چندعاملی که ربات‌ها به صورت گروهی عمل می‌کنند، این الگوریتم هنوز محدودیت‌هایی دارد و پیشنهاد داده‌اند که الگوریتم عقاب ماهیگیر بهبودیافته با سیستم‌های یادگیری ماشینی و شبکه‌های عصبی عمیق ترکیب شود تا بتواند در محیط‌های پویا و در شرایط بلادرنگ نیز کارایی مناسبی ارائه کند [۴].

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

مرور گسترده پژوهش‌های انجام‌شده نشان داد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به عنوان 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

¹ Backward propagation neural network

² Improved OOA (IOOA)

الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در زمینه های مختلف از جمله اینترنت اشیا، شبکه های برق هوشمند، کنترل فرکانس، مدیریت انرژی، مکان یابی و مسیریابی، و کاربردهای سلامت هوشمند پرداخته اند، مورد بررسی قرار گرفت. یافته ها نشان می دهد که این الگوریتم به دلیل ساختار ساده، توانایی ایجاد تعادل بین اکتشاف و بهره برداری و قابلیت انطباق با شرایط متغیر محیطی، عملکرد مناسبی در مقایسه با الگوریتم های دیگر داشته است. نتایج تحقیقات نشان می دهد که الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به طور خاص در بهینه سازی کنترل فرکانس در سیستم های 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 روش های کنترلی پیشرفته و الگوریتم های یادگیری ماشین، توانسته است پایداری سیستم های قدرت را افزایش داده و هزینه ها را کاهش دهد. از سوی دیگر، در حوزه اینترنت اشیا، کاربرد الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در افزایش امنیت شبکه ها، مدیریت انرژی در خانه های هوشمند و بهینه سازی عملکرد دستگاه های متصل مورد توجه بوده و نتایج مثبتی را نشان داده است. از منظر سیستم های ارتباطی و مکان یابی، استفاده از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در مسیریابی ربات ها، پهپادها و سیستم های 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 شبکه های عصبی و مدل های مبتنی بر یادگیری عمیق، می تواند کارایی آن را در محیط های پیچیده و پویا بیشتر کند. در حوزه سلامت هوشمند نیز استفاده از الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر به عنوان ابزاری برای بهینه سازی تشخیص، پایش و تخصیص منابع، افق های جدیدی را گشوده است.

با این حال، مرور مقالات بیانگر برخی محدودیت ها و چالش ها نیز بود. در بسیاری از موارد، الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر همچنان با مسائلی نظیر وابستگی به تنظیمات اولیه، افزایش زمان محاسباتی در مقیاس های بزرگ و دشواری در سازگاری با داده های بلادرنگ مواجه است. علاوه بر این، بسیاری از پژوهش ها در سطح شبیه سازی و محیط های آزمایشگاهی باقی مانده اند و هنوز شواهد کافی از کاربردهای عملی و صنعتی الگوریتم فراابتکاری عقاب ماهیگیر در مقیاس واقعی وجود ندارد. این مسئله نشان می دهد که برای توسعه و به کارگیری این الگوریتم در صنایع حساس مانند انرژی، حمل و نقل و بهداشت، نیازمند تحقیقات عمیق تر و آزمون های میدانی گسترده هستیم. جدول (۳) مزایا و معایب مقالات بررسی شده را بطور خلاصه نشان می دهد.

جدول ۳: خلاصه ای از مقالات بررسی شده

Table 3. Summary of selected papers

محدودیت ها	مزایا	هدف اصلی	روش استفاده شده	مرجع
پیچیدگی محاسباتی بالا	حفظ حریم خصوصی، کاهش حملات	امنیت دستگاه های IoT	یادگیری فدرال Osprey +	[11]
نیاز به دیتاست های گسترده تر	دقت بالا در تشخیص حملات	تشخیص نفوذ در IoT	OOA + Bi-LSTM	[10]
کاهش کارایی در شبکه های متراکم	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	خوشه بندی WSN	نقشه آشوب OOA +	[14]
آزمایش فقط در شبیه سازی	بهینه سازی چندمعیاره، کاهش تأخیر	تخصیص منابع در Fog-IoT	چندهدفه OOA	[31]
هزینه محاسباتی بالا	بهبود پایداری دینامیکی سیستم	کنترل فرکانس میکروگرید	FOI-(PDN+1) کنترل کننده + OOA	[24]
عدم ارزیابی میدانی	کاهش پیک بار، بهره وری بیشتر	مدیریت مصرف انرژی خانگی	DSM برای OOA	[2]
نادیده گرفتن عدم قطعیت منابع	هزینه کمتر، راندمان بالاتر	اندازه گذاری بهینه منابع	برای طراحی میکروگرید OOA	[3]

[32]	OOA + GNN	Vehicle-to-Grid	بهبود کنترل و پایداری شبکه	نیاز به زیرساخت محاسباتی قوی
[25]	شبکه عصبی + OOA	موقعیت یابی داخلی نور مرئی	دقت بالا، عدم تداخل RF	حساسیت به نور محیطی
[26]	SHTS برای OOA	زمان بندی کوتاه مدت هیدروترمال	کاهش هزینه تولید، بهینه سازی منابع	پیچیدگی در مدل سازی
[9]	برای مدیریت انرژی OOA	هماهنگی منابع در شبکه ی هوشمند	بهبود بهره وری انرژی، پایداری بیشتر	نیاز به داده های زمان واقعی
[33]	چنداستراتژی OOA	مسیریابی پهباد	یافتن مسیر بهینه در موانع پیچیده	زمان محاسباتی نسبتاً بالا
[4]	بهبود یافته OOA	مسیریابی ربات های سطحی	دقت بالا در محیط های بسته	محدودیت در محیط های پویا
[7]	سه ناحیه ای LFC برای OOA	کنترل فرکانس بار	پایداری بیشتر سیستم قدرت	نیاز به تنظیمات پیچیده
[5]	MOOA (اصلاح شده OOA)	مدیریت تقاضا PV-Smart Grid	کاهش هزینه و بهبود بهره وری	تست فقط در محیط شبیه سازی
[8]	با عدم قطعیت باد OOA	زمان بندی هیدروترمال-باد	لحاظ کردن منابع تجدیدپذیر	افزایش پیچیدگی محاسبات
[34]	ensemble یادگیری + OOA	سلامت (IoT) تشخیص آریتمی)	دقت بالا، کاربرد پزشکی	مصرف انرژی زیاد حسگرها

برای تحقیقات آینده، چند مسیر کلیدی پیشنهاد می شود:

- توسعه نسخه های سبک وزن و سازگار با محیط های محدود منابع، به ویژه در اینترنت اشیا و دستگاه های پوشیدنی.
- ترکیب الگوریتم عقاب ماهیگیر با مدل های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای افزایش دقت و سرعت همگرایی در محیط های پویا.
- گسترش آزمون های عملی و میدانی در مقیاس صنعتی و شهری به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان الگوریتم در شرایط واقعی.
- طراحی نسخه های چندهدفه برای مدیریت همزمان معیارهای متضاد مانند هزینه، انرژی، امنیت و کیفیت خدمات. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که الگوریتم عقاب ماهیگیر نه تنها پتانسیل بالایی برای ارتقای کارایی و تاب آوری سیستم های توزیع شده دارد، بلکه در صورت رفع محدودیت های فعلی، می تواند به یکی از ابزارهای اصلی در مدیریت نسل آینده زیرساخت های هوشمند تبدیل شود.

۶- مراجع

- [1] D. C. Tansel Dokeroğlu, 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. 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, Sudhakiran 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/ICCI GST60741.2024.10717630.
- [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>.

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

Saber Pahlavan^۱  | Ali Akbar Neghabi^{۲*}  |

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

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

Correspondence

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

Abstract

The Osprey Optimization Algorithm (OOA), an emerging metaheuristic method, has recently gained significant attention in the field of distributed systems. Inspired by the predatory behavior of ospreys, the algorithm exhibits a strong capability to balance global exploration with local exploitation, thereby offering effective solutions for complex and multi-objective optimization problems. Over the past decade, distributed systems have become the backbone of modern technologies, enabling seamless cooperation among geographically dispersed components and supporting large-scale data processing and management. This article studies research on OOA applications in distributed systems. Nineteen selected studies were analyzed, covering domains such as the Internet of Things, cloud and fog computing, smart grids, microgrids, wireless sensor networks, and smart healthcare systems. The findings reveal that OOA can significantly reduce energy consumption, improve resource allocation, enhance data security, and increase the efficiency and resilience of distributed systems. Nevertheless, challenges remain, including computational complexity, sensitivity to parameter tuning, and the lack of real-world experimental validations. The results of this review highlight promising avenues for developing enhanced variants of the algorithm and extending its deployment in practical operational environments.

<https://doi.org/...>

Keywords: Osprey Optimization Algorithm (OOA), Internet of Things (IoT), Meta-heuristic algorithms, Distributed systems, Optimization.