مجله علمسنجی کاسپین
Caspian Journal of Scientometrics
p-ISSN: 2423-4710 e-ISSN: 2383-157X

The Evolution of Swarm Robotics in the Context of Nature-Inspired Computing: A Scientometric Study

Amin Mohammadi Kouhbanani (PhD student)[1]*, Mohammad Ahmadinia (PhD)[1]

1. Department of Computer Engineering, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran.

Article Type:
Research Paper

Received:
21 May 2026
Revised:
25 July 2026
Accepted:
5 Aug. 2026
Pub. Online:
18 Aug. 2026

ABSTRACT

Background and aim: Swarm robotics and nature-inspired computing, as interdisciplinary fields, have grown considerably in recent years by integrating artificial intelligence, computational biology, optimization algorithms, and autonomous robotic systems. Despite the rapid increase in scientific publications, a comprehensive picture of the intellectual evolution, knowledge structure, and emerging trends in this field has not yet been presented. Therefore, the present study was conducted with the aim of performing a scientometric analysis to identify research trends, knowledge structures, influential scientific networks, and emerging research gaps in swarm robotics and nature-inspired computing.

Materials and methods: This research is of an applied type with a descriptive-analytical approach and is based on the scientometric method. The research population included all documents indexed in Scopus in the field of swarm robotics and nature-inspired computing during the years 2000 to 2025. Bibliographic data were extracted and analyzed using VOSviewer software. In order to map the scientific structure of this field, keyword co-occurrence, co-authorship, co-citation, and bibliographic coupling networks were examined. Furthermore, in addition to scientific performance analysis, citation impact indicators, including the average number of citations per article, were analyzed to evaluate the trend of research quality evolution over time.

Findings: The quantitative findings of the study revealed that scientific publications in this field followed an upward trend from 2000 to 2025, accelerating significantly after 2020. Pearson correlation analysis confirmed a positive, strong, and statistically significant relationship between the annual number of publications and both the average citations per paper and the annual h-index, indicating a simultaneous growth in the quantity and quality of research output. Among the scientific journals, Swarm Intelligence secured the highest level of scholarly authority, receiving 2,983 citations from 55 publications. Geographically, China achieved the highest quantitative share with 225 publications, while Belgium recorded the highest academic impact with 4,164 citations. Iran ranked among the top 20 leading nations, accumulating 540 citations from 17 publications. Furthermore, co-occurrence analysis identified the term “swarm intelligence” as the core concept of the network, with 716 occurrences and a total link strength of 4,176. It also revealed a research paradigm shift since 2022, moving away from traditional simulation models toward “reinforcement learning” and “autonomous agents.”

Conclusion: The scientific growth of swarm robotics has been accelerated, and its effectiveness (citation rate) has a direct correlation with international collaborations and the interdisciplinary nature. However, the lack of a significant correlation between the development of theoretical algorithms and practical implementations was identified as the main structural gap in this field. Accordingly, the future direction of research should be oriented from abstract single-agent models toward the integration of embodied artificial intelligence and reinforcement learning in real robots to enable the transition from theory to practice.

Keywords: Artificial intelligence, Robotics, Algorithms, Computational biology, Scientometrics

Cite this article: Mohammadi Kouhbanani A, Ahmadinia M. The Evolution of Swarm Robotics in the Context of Nature-Inspired Computing: A Scientometric Study. *Caspian Journal of Scientometrics*. 2026; 13(1): 94-108.

© The Author(s).
Publisher: Babol University of Medical Sciences

*Corresponding Author: Amin Mohammadi Kouhbanani
Address: Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.
E-mail: aminmohamadi.info@gmail.com

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

مجله علم‌سنجی کاسپین
Caspian Journal of Scientometrics
p-ISSN: 2423-4710 e-ISSN: 2383-157X
دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بابل

سیر تحول رباتیک جمعی در پرتو محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت: یک مطالعه علم‌سنجی

امین محمدی کوهبنانی (PhD student)[1*]، محمد احمدی‌نیا (PhD)[1]

۱. گروه کامپیوتر، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه و هدف: رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت به‌عنوان حوزه‌هایی میان‌رشته‌ای، با تلفیق هوش مصنوعی، زیست‌شناسی محاسباتی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سامانه‌های رباتیک خودمختار، در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته‌اند. با وجود افزایش سریع تولیدات علمی، تاکنون تصویری جامع از سیر تکامل فکری، ساختار دانشی و روندهای نوظهور این حوزه ارائه نشده است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف انجام یک تحلیل علم‌سنجی به‌منظور شناسایی روندهای پژوهشی، ساختار دانش، شبکه‌های علمی اثرگذار و شکاف‌های پژوهشی نوظهور در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش از نوع کاربردی با رویکرد توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر روش علم‌سنجی است. جامعه پژوهش شامل تمامی مدارک نمایه‌شده در Scopus در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ بود. داده‌های کتاب‌شناختی استخراج و با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer تحلیل شدند. به‌منظور ترسیم ساختار علمی این حوزه، شبکه‌های هم‌رخدادی واژگان کلیدی، هم‌تألیفی، هم‌استنادی و هم‌پیوندی کتاب‌شناختی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، علاوه بر تحلیل عملکرد علمی، شاخص‌های تأثیر استنادی از جمله میانگین تعداد استناد به ازای هر مقاله برای ارزیابی روند تحول کیفیت پژوهش‌ها در طول زمان تحلیل شدند.

یافته‌ها: تولیدات علمی این حوزه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ روندی صعودی داشته و از سال ۲۰۲۰ به بعد شتاب بیشتری گرفته است. نتایج آزمون همبستگی پیرسون تأیید کرد که بین تعداد مقالات منتشرشده با میانگین استناد به ازای هر مقاله و همچنین شاخص اچ‌ایندکس سالانه رابطه مثبت، قوی و از نظر آماری معناداری برقرار است که نشان‌دهنده ارتقای هم‌زمان کمّیت و کیفیت تولیدات است. از میان مجلات علمی، نشریه «Swarm Intelligence» با ۲۹۸۳ استناد از ۵۵ مدرک در صدر مرجعیت علمی قرار دارد. در سطح جغرافیایی، چین با ۲۲۵ مدرک بالاترین سهم کمّی و بلژیک با ۴۱۶۴ استناد بالاترین میزان نفوذ علمی را به ثبت رساندند؛ در حالی که ایران با ۵۴۰ استناد از ۱۷ مدرک در میان ۲۰ کشور پیشرو جهان قرار گرفت. همچنین، تحلیل هم‌رخدادی نشان داد واژه «هوش جمعی» با ۷۱۶ تکرار و قدرت پیوند کل ۴۱۷۶ محوری‌ترین مفهوم شبکه است و از سال ۲۰۲۲، گرایش پژوهش‌ها از مدل‌های شبیه‌سازی سنتی به سمت «یادگیری تقویتی» و «عوامل خودمختار» چرخش داشته است.

نتیجه‌گیری: رشد علمی رباتیک جمعی شتابان بوده و اثربخشی آن (میزان استناد) همبستگی مستقیمی با همکاری‌های بین‌المللی و ماهیت بین‌رشته‌ای دارد. با این حال، نبود همبستگی معنادار میان توسعه الگوریتم‌های نظری و پیاده‌سازی‌های عملی، به عنوان شکاف ساختاری اصلی این حوزه شناسایی شد. بر این اساس، جهت‌گیری آینده پژوهش‌ها باید از مدل‌های انتزاعی تک‌عاملی به سمت ادغام هوش مصنوعی تجسم‌یافته و یادگیری تقویتی در ربات‌های واقعی معطوف شود تا امکان گذار از نظریه به عمل فراهم آید.

دریافت: ۱۴۰۵/۲/۳۱
ویرایش: ۱۴۰۵/۵/۳
پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۴
انتشار: ۱۴۰۵/۵/۲۷

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی، رباتیک، الگوریتم‌ها، زیست‌شناسی محاسباتی، علم‌سنجی

استناد: امین محمدی کوهبنانی، محمد احمدی‌نیا. سیر تحول رباتیک جمعی در پرتو محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت: یک مطالعه علم‌سنجی. مجله علم‌سنجی کاسپین. ۱۴۰۵؛ ۱۳(۱): ۱۰۸-۹۴.

© The Author(s)
Publisher: Babol University of Medical Sciences

* **مسئول مقاله:** امین محمدی کوهبنانی
آدرس: کرمان، بلوار ولیعصر، بلوار گلستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان.
رایانامه: aminmohamadi.info@gmail.com

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

مقدمه

رباتیک جمعی یکی از حوزه‌های نوظهور و میان‌رشته‌ای در مرز رباتیک، هوش مصنوعی و سامانه‌های چندعاملی است که با الهام از رفتارهای جمعی موجودات زنده، مانند مورچگان، زنبورها، پرندگان و ماهیان، به طراحی مجموعه‌ای از ربات‌های نسبتاً ساده می‌پردازد که از طریق تعاملات محلی و تصمیم‌گیری غیرمتمرکز قادر به انجام وظایف پیچیده هستند (۲، ۷–۵). برخلاف سامانه‌های رباتیکی متعارف که بر کنترل متمرکز متکی هستند، رباتیک جمعی بر اصول خودسازمان‌دهی، همکاری توزیع‌شده، مقیاس‌پذیری، تحمل خطا و سازگاری با محیط‌های پویا استوار است؛ ویژگی‌هایی که موجب شده این رویکرد به یکی از پارادایم‌های اصلی توسعه سامانه‌های هوشمند خودمختار تبدیل شود (۷–۵).

پیشرفت رباتیک جمعی ارتباط تنگاتنگی با توسعه محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت دارد. این حوزه مجموعه‌ای از الگوریتم‌های محاسباتی برگرفته از فرایندهای زیستی و طبیعی، از جمله بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم‌های تکاملی و سایر روش‌های هوشمند را در بر می‌گیرد که برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی، تصمیم‌گیری و کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳، ۹، ۱۰ و ۱۳). این الگوریتم‌ها علاوه بر افزایش کارایی در هماهنگی ربات‌های چندعاملی، امکان توسعه سامانه‌هایی را فراهم کرده‌اند که بدون نیاز به کنترل مرکزی، قادر به سازگاری با شرایط متغیر و انجام وظایف جمعی هستند (۱۰، ۱۳ و ۱۴). مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد که رفتارهای جمعی حیوانات همچنان یکی از مهم‌ترین منابع الهام برای طراحی معماری‌های همکاری، ناوبری و تصمیم‌گیری در سامانه‌های رباتیک جمعی محسوب می‌شوند (۱۲، ۱۴ و ۱۵).

در سال‌های اخیر، هم‌زمان با پیشرفت هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، سامانه‌های سایبر–فیزیکی و فناوری‌های خودمختار، دامنه کاربردهای رباتیک جمعی به‌طور قابل‌توجهی گسترش یافته است. این سامانه‌ها در پایش محیط‌زیست، عملیات جست‌وجو و نجات، کشاورزی هوشمند، بازرسی زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل، اکتشافات فضایی، معدن‌کاری و صنایع هوشمند به‌کار گرفته شده‌اند (۱، ۲، ۶ و ۲۰). همچنین پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ترکیب الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت با سامانه‌های رباتیک چندعاملی می‌تواند موجب افزایش انعطاف‌پذیری، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود تاب‌آوری در محیط‌های پیچیده و غیرقطعی شود (۱، ۱۷ و ۱۸). در نتیجه، رباتیک جمعی از یک حوزه عمدتاً نظری به بستری کاربردی برای توسعه سامانه‌های هوشمند توزیع‌شده تبدیل شده است.

هم‌زمان با رشد سریع این حوزه، حجم تولیدات علمی نیز به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. پژوهش‌های منتشرشده طی سال‌های اخیر طیف گسترده‌ای از موضوعات، از توسعه الگوریتم‌های طبیعت‌الهام و روش‌های کنترل توزیع‌شده گرفته تا طراحی سخت‌افزار، همکاری چندرباته و کاربردهای صنعتی را در بر می‌گیرند (۲، ۵، ۱۲ و ۱۳). این گسترش سریع موجب شکل‌گیری شبکه‌ای پیچیده از مفاهیم، فناوری‌ها، نویسندگان، مؤسسات و مجلات علمی شده است که شناخت ساختار آن تنها با مرورهای روایی امکان‌پذیر نیست. در چنین شرایطی، تحلیل‌های کمّی و ساختاری می‌توانند تصویری دقیق‌تر از مسیر تحول این حوزه ارائه دهند.

اگرچه مطالعات مروری متعددی درباره الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت، هوش جمعی و کاربردهای رباتیک جمعی منتشر شده است (۲، ۱۴–۱۲)، اغلب این پژوهش‌ها بر مرور مفهومی، طبقه‌بندی الگوریتم‌ها یا بررسی کاربردهای خاص تمرکز داشته‌اند و کمتر به تحلیل ساختار دانشی، شبکه‌های همکاری علمی، الگوهای استنادی و روند تکامل موضوعات پژوهشی پرداخته‌اند. به بیان دیگر، هنوز تصویری جامع از نحوه تحول علمی این حوزه، خوشه‌های دانشی غالب، بازیگران اثرگذار، مجلات پیشرو و روندهای نوظهور در بازه زمانی اخیر وجود ندارد. این خلأ به‌ویژه با توجه به رشد شتابان تولیدات علمی پس از سال ۲۰۲۰ اهمیت بیشتری یافته است و می‌تواند شناسایی مسیرهای آینده پژوهش را با چالش مواجه سازد.

در چنین شرایطی، علم‌سنجی به‌عنوان رویکردی کمّی برای تحلیل ساختار و پویایی ادبیات علمی، ابزاری مناسب برای شناسایی روندهای پژوهشی، شبکه‌های همکاری، الگوهای استناد و تحول مفاهیم علمی محسوب می‌شود. تحلیل هم‌رخدادی واژگان، هم‌استنادی منابع، شبکه همکاری کشورها و روندهای زمانی، امکان آشکارسازی ساختار دانشی یک حوزه و شناسایی موضوعات نوظهور را فراهم می‌کند و می‌تواند مسیرهای آینده تحقیقات را با اتکا بر شواهد کمّی ترسیم نماید. این رویکرد در حوزه‌های نوظهور که با رشد سریع و پراکندگی موضوعی مواجه هستند، نسبت به مرورهای سنتی از قدرت تبیین بیشتری برخوردار است (۲۱).

بنابراین پژوهش حاضر با هدف تحلیل علم‌سنجی تحول رباتیک جمعی در پرتو محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت انجام شده است. این مطالعه با تحلیل مدارک نمایه‌شده در پایگاه Scopus طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، ساختار دانشی، روندهای زمانی، شبکه‌های همکاری علمی، منابع اثرگذار، خوشه‌های موضوعی و جهت‌گیری‌های نوظهور این حوزه را بررسی می‌کند. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش، ضمن ارائه تصویری جامع از تکامل علمی رباتیک جمعی، شکاف‌های دانشی موجود را آشکار ساخته و مبنایی برای هدایت پژوهش‌های آینده، توسعه فناوری‌های هوشمند و تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران علم و فناوری فراهم آورد. این مطالعه، با تمرکز بر تحلیل ساختاری و کمّی ادبیات، خلأ موجود میان مرورهای روایی و نیاز به ارزیابی جامع روندهای تحول این حوزه را پوشش می‌دهد.

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

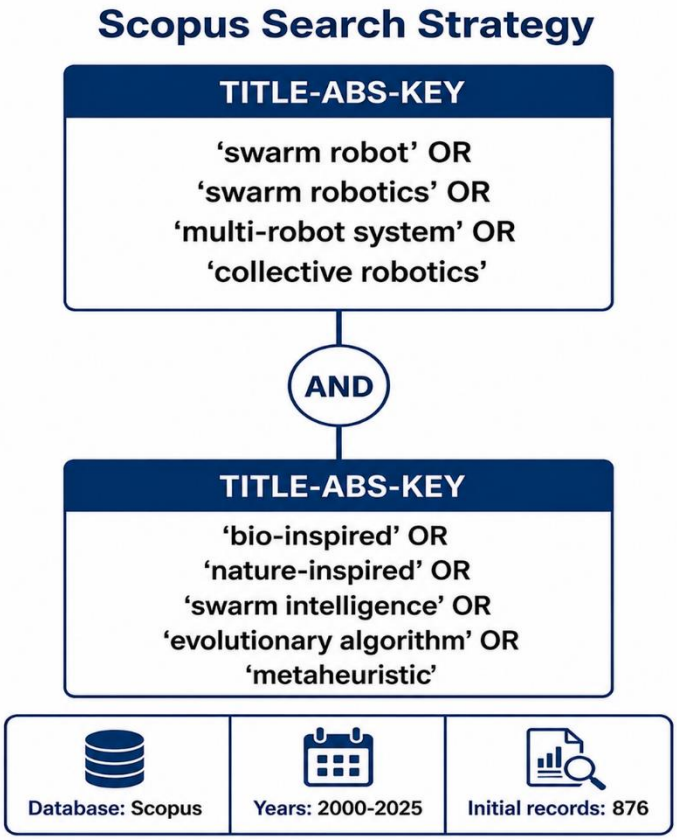
[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف تحلیل علم‌سنجی سیر تحول رباتیک جمعی در پرتو محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت انجام شد. این مطالعه از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش اجرا، توصیفی–تحلیلی است. جامعه آماری پژوهش شامل مقالات علمی مرتبط با رباتیک جمعی، سامانه‌های چندرباتی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت است که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ در پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس نمایه شده‌اند. انتخاب این بازه زمانی با هدف بررسی روند تاریخی و تحولات علمی این حوزه از آغاز گسترش مطالعات رباتیک جمعی تا جدیدترین پژوهش‌های نمایه‌شده انجام گرفت. برای گردآوری داده‌ها، از یک راهبرد جستجوی نظام‌مند و هدفمند در پایگاه اسکوپوس استفاده شد.

راهبرد جستجوی این پژوهش با هدف بازیابی جامع تولیدات علمی در حوزه «رباتیک جمعی» و «محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت»، در پایگاه استنادی اسکوپوس (Scopus) طراحی و اجرا گردید. جستجو با تمرکز بر فیلد ترکیبی «عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها» (TITLE-ABS-KEY) و از طریق ترکیب منطقی دو دسته از واژگان کلیدی صورت پذیرفت.

مطابق با شکل ۱، دسته نخست واژگان شامل اصطلاحات مرتبط با رباتیک جمعی نظیر "swarm robot، swarm robotics، multi-robot system و collective robotics" بود که با عملگر OR با یکدیگر ترکیب شدند. دسته دوم نیز شامل مفاهیم محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت و الگوریتم‌های فراابتکاری همچون "bio-inspired، nature-inspired، swarm intelligence، evolutionary algorithm و metaheuristic" بود. الحاق این دو دسته با استفاده از عملگر منطقی AND انجام گرفت تا مقالات تخصصی که در فصل مشترک این دو حوزه قرار دارند، بازیابی شوند. محدوده زمانی این مطالعه از آغاز سال ۲۰۰۰ تا پایان سال ۲۰۲۵ تعیین گردید که در مرحله جستجوی اولیه، منجر به شناسایی و استخراج ۸۷۶ مدرک علمی شد.



شکل ۱. راهبرد جستجوی نظام‌مند مقالات مرتبط با رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در پایگاه اسکوپوس

در جستجوی اولیه تعداد ۸۷۶ مدرک علمی بازیابی شد. سپس داده‌ها بر اساس معیارهای ورود و خروج پالایش شدند. معیارهای ورود شامل مدارک انگلیسی‌زبان مرتبط با رباتیک جمعی، سامانه‌های چندرباتی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت بود.

با وجود اهمیت مقالات کنفرانسی در حوزه رباتیک و هوش مصنوعی و نقش کنفرانس‌های معتبری مانند ICRA، IROS، RSS و CASE در انتشار دستاوردهای اولیه، در پژوهش حاضر صرفاً مقالات پژوهشی منتشرشده در مجلات علمی (Article) مورد تحلیل قرار گرفتند. دلیل این تصمیم، ایجاد یک مجموعه داده همگن، برخوردار از فرآیند داوری کامل، کاهش ناهمگنی ناشی از تفاوت معیارهای داوری کنفرانس‌ها و افزایش قابلیت مقایسه

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

شاخص‌های استنادی در تحلیل‌های علم‌سنجی بود. ازاین‌رو، مقالات کنفرانسی، مقالات همایشی، فصل کتاب، کتاب، یادداشت‌ها، نامه‌ها به سردبیر، ویرایش‌ها و سایر انواع مدارک از تحلیل نهایی کنار گذاشته شدند. این محدودیت به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش در بخش بحث و نتیجه‌گیری نیز مورد اشاره قرار گرفته است.

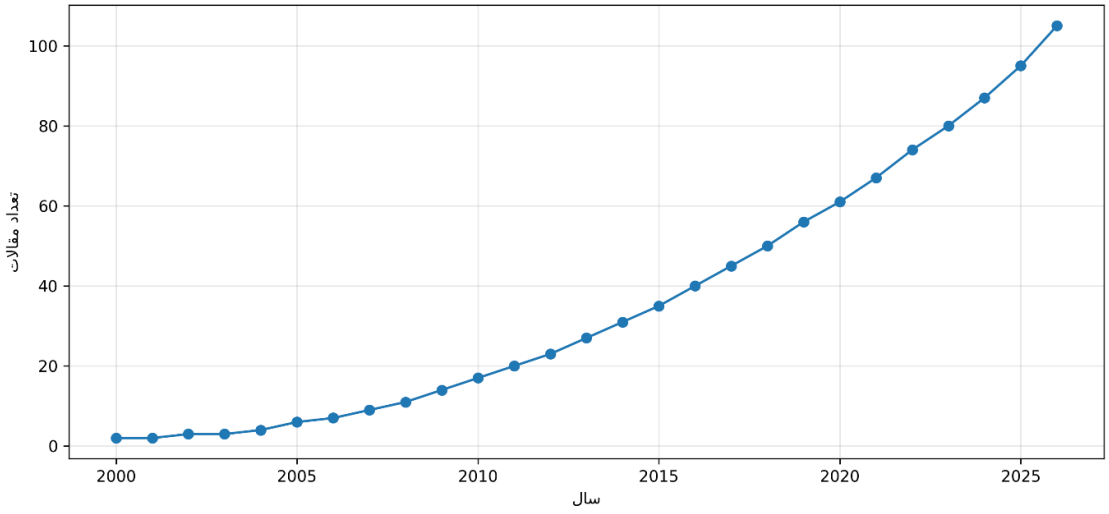
پس از اعمال معیارهای انتخاب، اطلاعات کتاب‌شناختی شامل عنوان مقاله، نویسندگان، سال انتشار، نام مجله، وابستگی سازمانی، کشور، کلیدواژه‌ها، چکیده و تعداد استنادات استخراج شد. سپس داده‌ها پیش از ورود به مرحله تحلیل پاک‌سازی شدند. این فرآیند شامل حذف رکوردهای تکراری، یکسان‌سازی نام نویسندگان (برای مثال ادغام نگارش‌های متفاوت یک نویسنده)، استانداردسازی نام کشورها و مؤسسات، و ادغام کلیدواژه‌های مترادف (Synonyms) و اشکال مختلف نگارشی مانند swarm robotics، swarm robotic systems و robot swarms در قالب یک اصطلاح استاندارد بود. همچنین اشکال مفرد و جمع واژگان و تفاوت‌های املایی انگلیسی آمریکایی و بریتانیایی نیز یکسان‌سازی شدند تا از ایجاد خوشه‌های مصنوعی جلوگیری شود.

تحلیل شبکه‌های علم‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer نسخه ۱٫۶٫۲۰ انجام شد. این نرم‌افزار برای تحلیل هم‌رخدادی واژگان، هم‌نویسندگی، هم‌استنادی، هم‌رخدادی کشورها و ترسیم نقشه‌های شبکه‌ای و زمانی به‌کار گرفته شد. تشکیل خوشه‌ها بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی پیش‌فرض VOSviewer و با استفاده از روش Association Strength انجام شد.

برای ارزیابی روند رشد علمی، تعداد مقالات منتشرشده، تعداد استنادات، میانگین استناد به ازای هر مقاله و شاخص h-index سالانه محاسبه شد تا علاوه بر رشد کمّی، کیفیت و اثرگذاری علمی حوزه نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به‌منظور بررسی رابطه میان حجم تولیدات علمی و اثرگذاری استنادی، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics نسخه ۲۹ انجام شدند.

یافته‌ها

تحلیل شکل ۲ نشان‌دهنده روند سالانه انتشار مقالات در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ است. نتایج این نمودار بیانگر رشد تدریجی و سپس شتاب‌گرفته تولیدات علمی در این حوزه طی دو دهه اخیر است. در سال‌های ابتدایی دوره مورد بررسی (اوایل دهه ۲۰۰۰)، تعداد مقالات منتشرشده بسیار محدود بوده و این امر نشان‌دهنده نوظهور بودن این حوزه پژوهشی و قرار داشتن آن در مراحل اولیه توسعه علمی است. در این دوره، تحقیقات بیشتر بر مبانی نظری رباتیک جمعی، الگوریتم‌های ابتدایی هوش ازدحامی و شبیه‌سازی‌های اولیه متمرکز بوده است. با گذر زمان و به‌ویژه از حدود سال‌های ۲۰۱۰ به بعد، روند انتشار مقالات به‌تدریج افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان به پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه‌های مرتبط مانند هوش مصنوعی، الگوریتم‌های تکاملی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم‌های کلونی مورچگان نسبت داد. همچنین توسعه توان محاسباتی، دسترسی گسترده‌تر به پلتفرم‌های شبیه‌سازی و افزایش علاقه جامعه علمی به سیستم‌های چندعامله و سامانه‌های خودسازمان‌ده از دیگر عوامل مؤثر در رشد تحقیقات در این حوزه محسوب می‌شوند. در سال‌های اخیر، به‌ویژه از حدود سال ۲۰۱۸ به بعد، نمودار روندی صعودی و چشمگیر را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش قابل توجه توجه پژوهشگران به رباتیک جمعی است. این رشد را می‌توان ناشی از کاربردهای گسترده این فناوری در حوزه‌هایی مانند عملیات جستجو و نجات، پایش محیط‌زیست، کشاورزی هوشمند، اکتشافات فضایی، لجستیک و سامانه‌های خودمختار دانست. علاوه بر این، همگرایی فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا، یادگیری ماشین و سیستم‌های سایبر–فیزیکی نیز نقش مهمی در گسترش مطالعات در این حوزه ایفا کرده است.



شکل ۲. روند سالانه انتشار مقالات در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

در طول دو دهه گذشته (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵)، حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت دستخوش تحولات شگرفی شده است که ریشه در همگرایی علوم رایانه، مهندسی رباتیک و زیست‌شناسی رفتاری دارد. تحلیل کتاب‌سنجی منابع استخراج‌شده نشان می‌دهد که ساختار تولید دانش در این حوزه حول محور چندین ژورنال تخصصی شکل گرفته است که نه تنها نقش مخزن دانش، بلکه نقش هدایت‌گر جریان‌های اصلی تحقیقاتی را بر عهده دارند (جدول ۱). در رأس این سلسله‌مراتب علمی، مجلاتی همچون Swarm Intelligence و Robotics and Autonomous Systems قرار دارند که با جذب بالاترین میزان استنادات، مرجعیت علمی این رشته را تثبیت کرده‌اند. نرخ بالای استناد در این ژورنال‌ها در مقایسه با تعداد مدارک منتشرشده، گویای آن است که پژوهش‌های «پایه و بنیادین» در این حوزه همچنان از وزن و تأثیرگذاری بسیار بالایی در جامعه علمی برخوردارند.

در سوی دیگر این طیف، با ورود به حوزه‌های مهندسی‌محور، شاهد ظهور پررنگ انتشاراتی نظیر IEEE Robotics and Automation Letters و IEEE Access هستیم. حجم بالای مدارک در این مجلات نشان‌دهنده یک تغییر پارادایم از تئوری‌های انتزاعی به سمت کاربردی‌سازی سیستم‌های خودمختار و توسعه زیرساخت‌های سخت‌افزاری است. این گذار نشان می‌دهد که جامعه رباتیک از فاز مدل‌سازی‌های اولیه عبور کرده و به دنبال چالش‌های واقعی در محیط‌های پیچیده و کنترل شبکه‌های رباتیکی است. همزمان، حضور مجلات تخصصی مانند Artificial Life and Robotics و Autonomous Agents and Multi-Agent Systems تأکید می‌کند که شبیه‌سازی سیستم‌های زیستی و رفتارهای جمعی همچنان به عنوان موتور محرک برای حل مسائل پیچیده در هوش مصنوعی مدرن عمل می‌کند.

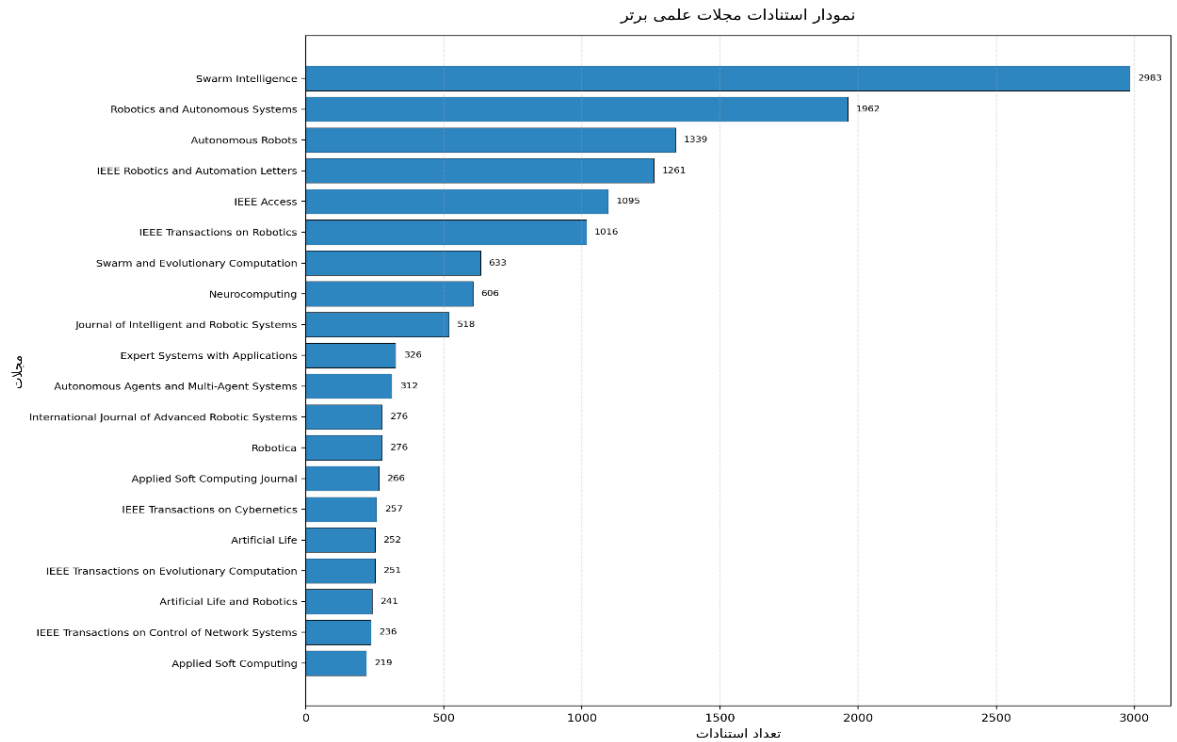
علاوه بر این، تحلیل داده‌ها نشان‌دهنده یک چرخش راهبردی به سمت «محاسبات نرم» است. مجلاتی مانند Neurocomputing و Applied Soft Computing در میان ۲۰ منبع برتر جایگاه ویژه‌ای دارند که نشان‌دهنده پیوند عمیق میان الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت (مانند بهینه‌سازی ازدحامی یا تکاملی) و یادگیری ماشین است. این همگرایی بین‌رشته‌ای، نویدبخش ظهور نسل جدیدی از ربات‌های خودسازمان‌ده است که نه تنها در تصمیم‌گیری‌های انفرادی، بلکه در عملکردهای گروهی و هوشمندانه، انعطاف‌پذیری بالایی از خود نشان می‌دهند (شکل ۳).

جدول ۱. مراجع علمی استخراج‌شده در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵

نام منبع (ژورنال)	تعداد مدارک	تعداد استنادات
Swarm Intelligence	۵۵	۲۹۸۳
Robotics and Autonomous Systems	۵۱	۱۹۶۲
Autonomous Robots	۲۸	۱۳۳۹
IEEE Robotics and Automation Letters	۶۸	۱۲۶۱
IEEE Access	۶۰	۱۰۹۵
IEEE Transactions on Robotics	۱۵	۱۰۱۶
Swarm and Evolutionary Computation	۲۱	۶۳۳
Neurocomputing	۱۱	۶۰۶
Journal of Intelligent and Robotic Systems	۱۹	۵۱۸
Expert Systems with Applications	۱۲	۳۲۶
Autonomous Agents and Multi-Agent Systems	۶	۳۱۲
International Journal of Advanced Robotic Systems	۱۷	۲۷۶
Robotica	۱۳	۲۷۶
Applied Soft Computing Journal	۸	۲۶۶
IEEE Transactions on Cybernetics	۸	۲۵۷
Artificial Life	۱۰	۲۵۲
IEEE Transactions on Evolutionary Computation	۸	۲۵۱
Artificial Life and Robotics	۴۸	۲۴۱
IEEE Transactions on Control of Network Systems	۵	۲۳۶
Applied Soft Computing	۱۱	۲۱۹

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]



شکل ۳. مراجع علمی استخراج شده در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ بر اساس تعداد استنادات

تحلیل توزیع جهانی برون‌دادهای علمی در بازه زمانی مورد مطالعه (جدول ۲)، از یک گذار ساختاری در جغرافیای دانش حکایت دارد؛ جایی که موازنه میان «حجم تولیدات» و «نفوذ علمی» به شکلی پویا در حال تغییر است. یافته‌های حاصل از نگاشت فعالیت‌های پژوهشی نشان می‌دهد که کشورهای پیشرو را می‌توان در سه بلوک راهبردی دسته‌بندی کرد. در بلوک نخست، کشورهایی نظیر چین و ژاپن با اتخاذ رویکرد توسعه حداکثری، سهم عمده‌ای از ترافیک مدارک علمی را به خود اختصاص داده‌اند. چین با تولید ۲۲۵ مدرک، به عنوان موتور محرکِ کمی در این حوزه شناخته می‌شود، اما تحلیل نرخ استنادات نشان می‌دهد که این حجم بالای تولید، لزوماً به معنای تسلط بر مرزهای کیفی دانش نیست؛ چرا که در شاخص نفوذ، کشورهایی با حجم تولید کمتر، کارایی بالاتری از خود نشان داده‌اند.

در بلوک دوم، کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی قرار دارند که الگوی «بهره‌وری کیفی» را دنبال می‌کنند. صدرنشینی بلژیک در شاخص استنادات (۴۱۶۴ ارجاع) با وجود تعداد مدارک محدود، پدیده‌ای تامل‌برانگیز است که نشان از تمرکز مراکز تحقیقاتی این کشور بر حوزه‌های بنیادین و جریان‌ساز دارد. به‌طور مشابه، ثبات علمی بریتانیا و ایالات متحده در کسب استنادات بالا (بالای ۴۰۰۰ ارجاع)، بیانگر ریشه‌دار بودن زیرساخت‌های پژوهشی و مرجعیت علمی این دو کشور در هدایت پارادایم‌های تحقیقاتی است. در این میان، کشور سوئیس با کسب بیش از ۱۸۰۰ استناد تنها از ۲۸ مدرک، نمادی از تخصص‌گرایی محض و تولید دانش در لبه‌های تکنولوژی محسوب می‌شود که بالاترین نسبت استناد به مدرک را در میان رقبا به ثبت رسانده است.

بلوک سوم، شامل قدرت‌های نوظهور علمی از جمله ایران، هند، ترکیه و برزیل است که توانسته‌اند با عبور از سد کشورهای سنتی صاحب‌نام همچون فرانسه، جایگاه خود را در میان ۲۰ قطب برتر جهان تثبیت کنند. حضور ایران در این فهرست با ثبت ۵۴۰ استناد، نشان‌دهنده همسویی پژوهشگران داخلی با روندهای جهانی و کیفیت رقابت‌پذیر مقالات ایرانی در تراز بین‌المللی است. در نهایت، این آرایش جغرافیایی پیامی روشن برای سیاست‌گذاران علمی به همراه دارد؛ این‌که در عصر کنونی، «مرجعیت علمی» بیش از آنکه حاصل کثرتِ مدارک باشد، نتیجه‌ی تمرکز بر کیفیت، نوآوری و انتشار در گلوگاه‌های استراتژیک دانش است. آینده این حوزه در گروِ تعامل سازنده میان قطب‌های تولید انبوه در شرق و کانون‌های مرجعیت علمی در غرب خواهد بود.

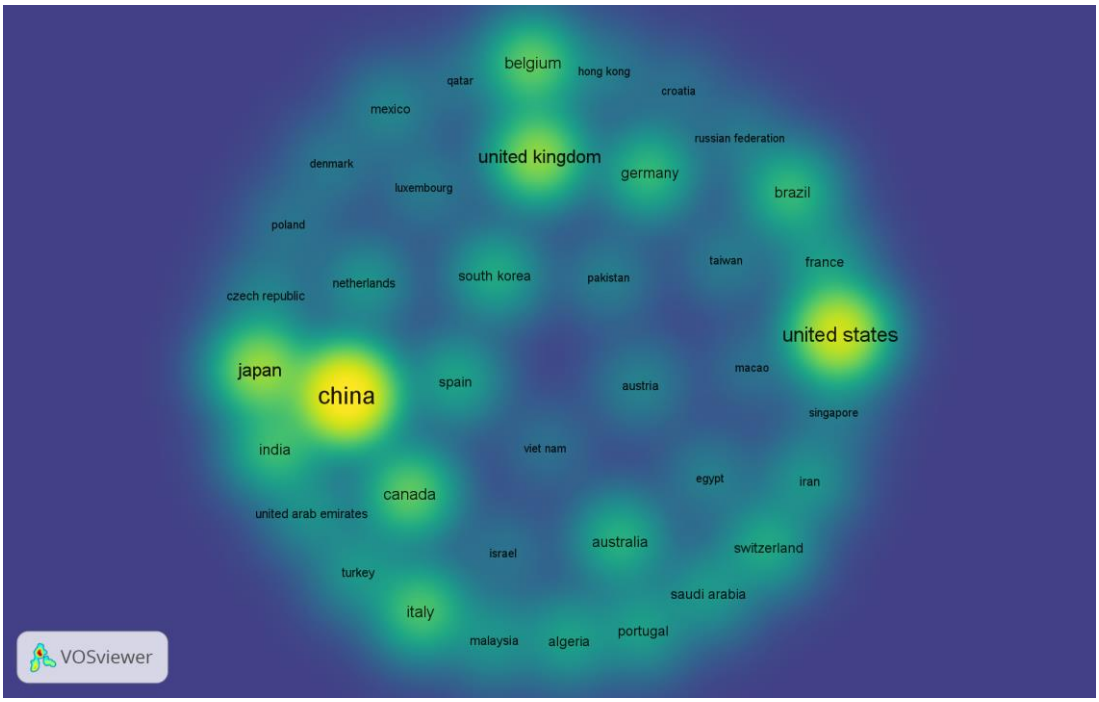
[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

جدول ۲. کشورهای پیشرو بر اساس تعداد تولیدات علمی و استنادات

ردیف	نام کشور	تعداد مدارک	تعداد استنادات	ردیف	نام کشور	تعداد مدارک	تعداد استنادات
۱	بلژیک (Belgium)	۶۰	۴۱۶۴	۱۱	استرالیا (Australia)	۳۴	۷۷۶
۲	بریتانیا (United Kingdom)	۸۴	۴۰۳۴	۱۲	آلمان (Germany)	۴۰	۷۲۵
۳	ایالات متحده (United States)	۱۳۴	۴۰۰۴	۱۳	هند (India)	۴۳	۷۲۴
۴	چین (China)	۲۲۵	۳۹۶۸	۱۴	برزیل (Brazil)	۴۰	۶۷۵
۵	سوئیس (Switzerland)	۲۸	۱۸۵۱	۱۵	کره جنوبی (South Korea)	۲۹	۶۶۴
۶	ایتالیا (Italy)	۵۰	۱۴۰۸	۱۶	اسپانیا (Spain)	۲۵	۶۳۳
۷	ترکیه (Turkey)	۱۸	۱۰۵۶	۱۷	ژاپن (Japan)	۸۸	۵۸۸
۸	کانادا (Canada)	۵۹	۱۰۳۳	۱۸	اتریش (Austria)	۱۰	۵۵۸
۹	پرتغال (Portugal)	۲۲	۸۴۹	۱۹	ایران (Iran)	۱۷	۵۴۰
۱۰	هنگ کنگ (Hong Kong)	۸	۷۹۱	۲۰	فرانسه (France)	۱۹	۵۳۹

شکل (۴) ، تمرکز جغرافیایی فعالیت‌های علمی را در سطح جهان نشان می‌دهد. در ادامه، تحلیل پاراگرافی این شکل ارائه شده است. این نقشه حرارتی به وضوح نشان‌دهنده تمرکز نامتوازن اما پویای دانش در سطح بین‌المللی است. در این نمودار، نقاط روشن‌تر و متمایل به رنگ زرد (مانند چین، ایالات متحده، بریتانیا و بلژیک)، کانون‌های اصلی و داغ پژوهشی را نمایش می‌دهند که دارای بیشترین وزن از نظر تعداد مدارک یا میزان استنادات هستند. در شرق نقشه، قطب قدرتمند چین به همراه ژاپن و هند یک بلوک منسجم آسیایی را تشکیل داده‌اند که نشان‌دهنده حجم بالای تولیدات علمی در این منطقه است. در مقابل، در غرب و مرکز نقشه، ایالات متحده و کشورهای اروپایی نظیر بریتانیا، آلمان و بلژیک به‌عنوان قطب‌های سنتی و کیفی دانش خودنمایی می‌کنند. پراکندگی سایر کشورها در حاشیه این نقاط روشن، از جمله حضور ایران، ترکیه و برزیل، گویای آن است که اگرچه این کشورها هنوز به هسته مرکزی قدرت علمی نپیوسته‌اند، اما در حال تثبیت جایگاه خود در شبکه جهانی این تخصص هستند. نزدیکی گره‌ها به یکدیگر در این نقشه، فراتر از موقعیت جغرافیایی، نشان‌دهنده میزان همکاری‌های علمی و اشتراک موضوعی میان این کشورهاست که یک اکوسیستم جهانیِ متصل را برای تبادل دانش فراهم آورده است.



شکل ٤. نقشه تراکم توزیع جغرافیایی و کانون‌های تمرکز پژوهش در سطح بین‌المللی

تحلیل هم‌رخدادی واژگان کلیدی و بررسی شاخص‌های کمّی مستخرج از نرم‌افزار VOSviewer، ترسیم‌کننده نقشه مفهومی و مرزهای دانش در حوزه رباتیک جمعی است. بر اساس یافته‌های حاصل از جدول ۳، واژه کلیدی «هوش جمعی» (Swarm Intelligence) با ۷۱۶ تکرار و قدرت پیوند کل ۴۱۷۶، به‌عنوان محوری‌ترین و تاثیرگذارترین مفهوم در این شبکه شناسایی شده است. پس از آن، «رباتیک جمعی» (Swarm Robotics) با ۵۰۸

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

مورد تکرار، هسته سخت پژوهش‌ها را تشکیل می‌دهد. بالا بودن چشمگیر شاخص «قدرت پیوند کل» (Total Link Strength) در این دو واژه، نشان‌دهنده نقش پیونددهنده آن‌ها میان حوزه‌های مختلف هوش مصنوعی و علوم مهندسی است؛ به‌طوری که اکثر مفاهیم دیگر در این شبکه به نحوی با این دو قطب در ارتباط هستند.

در لایه دوم تحلیل، حضور پررنگ الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت همچون «بهینه‌سازی ازدحام ذرات» (PSO) و «الگوریتم‌های ژنتیک»، حاکی از تکیه بنیادین این حوزه بر محاسبات تکاملی برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی است. همچنین، بررسی روندها نشان می‌دهد که مفاهیم عملیاتی نظیر «برنامه‌ریزی حرکت»، «تخصیص وظایف» و «اجتناب از برخورد» دارای وزن ارتباطی بالایی هستند که این امر بیانگر تمرکز ویژه محققان بر چالش‌های کنترل و ناوبری در محیط‌های پویا و ناشناخته است.

علاوه بر این، ظهور واژگانی با قدرت پیوند بالا نظیر «یادگیری ربات» و «یادگیری تقویت‌شده» (Reinforcement Learning) در کنار مفاهیم سنتی‌تری مانند «سیستم‌های چندرباتی»، گویای یک گذار پارادایمیک از برنامه‌نویسی قطعی (Deterministic) به سمت رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین و خودگردانی (Autonomy) در سیستم‌های توزیع‌شده است. در مجموع، تراکم واژگانی در حوزه‌هایی چون طراحی ماشین، کینماتیک و سیستم‌های چندعاملی، ماهیت بین‌رشته‌ای این قلمرو علمی را تایید کرده و نشان می‌دهد که پژوهش‌های فعلی نه تنها بر جنبه‌های تئوریک هوش جمعی، بلکه بر کاربردی‌سازی این سیستم‌ها در قالب ربات‌های صنعتی و متحرک متمرکز شده‌اند.

جدول ۳. تحلیل واژگان کلیدی پرتکرار و قدرت پیوند آن‌ها

واژگان کلیدی (فارسی)	واژگان کلیدی (انگلیسی)	تعداد تکرار	قدرت پیوند کل
هوش جمعی	Swarm Intelligence	۷۱۶	۴۱۷۶
رباتیک جمعی	Swarm Robotics	۵۰۸	۲۸۸۵
رباتیک	Robotics	۳۴۳	۲۰۴۳
ربات‌های چندمنظوره	Multipurpose Robots	۲۳۷	۱۹۳۱
ربات‌ها	Robots	۳۲۰	۱۸۵۷
سیستم‌های چندرباتی	Multi-robot Systems	۲۱۷	۱۷۱۶
ربات‌های صنعتی	Industrial Robots	۱۹۳	۱۶۴۱
برنامه‌نویسی ربات	Robot Programming	۱۳۱	۱۱۰۹
ربات‌های هوشمند	Intelligent Robots	۱۳۲	۱۰۰۵
یادگیری ربات	Robot Learning	۱۰۰	۹۰۹
برنامه‌ریزی حرکت	Motion Planning	۹۸	۸۶۵
سیستم‌های چندعاملی	Multi Agent Systems	۹۵	۷۷۴
بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)	Particle Swarm Optimization	۸۹	۶۷۰
الگوریتم‌های ژنتیک	Genetic Algorithms	۸۸	۶۶۶
طراحی ماشین	Machine Design	۸۸	۶۰۵
تصمیم‌گیری	Decision Making	۷۲	۵۱۵
هوش مصنوعی	Artificial Intelligence	۶۳	۴۷۱
ربات‌های متحرک	Mobile Robots	۶۳	۴۶۹
تخصیص وظایف	Task Allocation	۵۴	۴۳۳
اجتناب از برخورد	Collision Avoidance	۴۳	۳۸۹

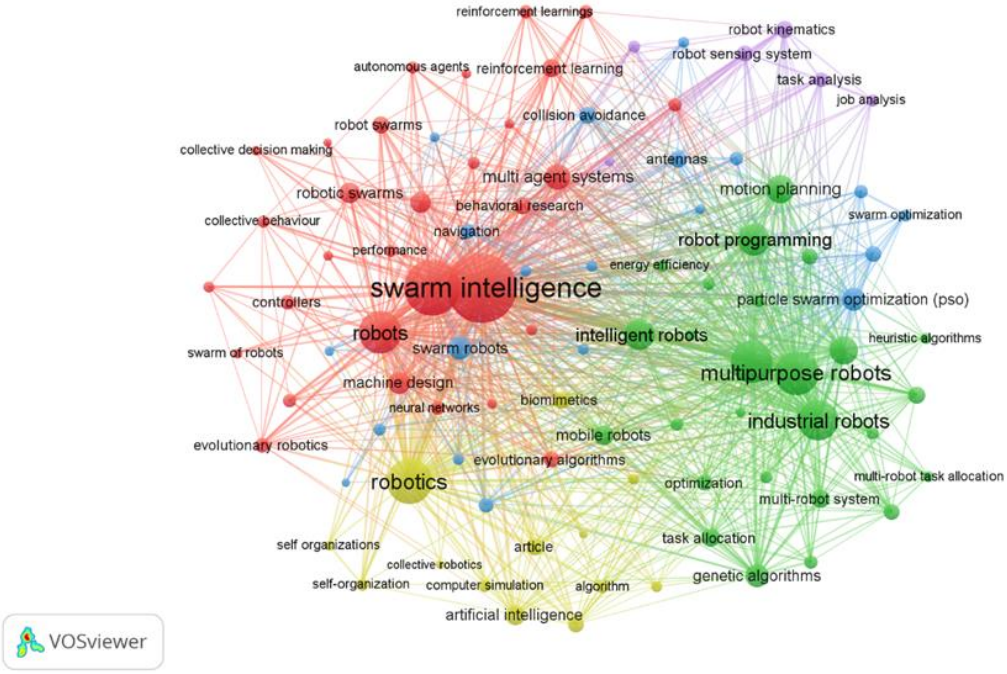
ترسیم نقشه بصری‌سازی شبکه هم‌رخدادی واژگان کلیدی در نرم‌افزار VOSviewer (شکل ۵)، منجر به شناسایی چهار خوشه موضوعی متمایز شد که بازتاب‌دهنده ساختار فکری و مرزهای دانش در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت است. در مرکزیت این شبکه، خوشه قرمز به‌عنوان هسته تئوریک پژوهش‌ها خودنمایی می‌کند. این خوشه که حول محور واژه کلیدی «هوش جمعی» (Swarm Intelligence) شکل گرفته است، بر مفاهیم زیربنایی نظیر رفتارهای جمعی، تصمیم‌گیری‌های گروهی و مدل‌سازی عوامل خودمختار تمرکز دارد. پیوند نزدیک این خوشه با حوزه‌های نوظهوری همچون یادگیری تقویت‌شده (Reinforcement Learning)، نشان‌دهنده گرایش تحقیقات نوین به سمت تلفیق الگوهای زیستی با رویکردهای یادگیری هوشمند برای ارتقای سطح تصمیم‌گیری در سیستم‌های توزیع‌شده است.

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

در مجاورت این قطب تئوریک، خوشه سبز نمایانگر گذار از مفاهیم انتزاعی به سمت کاربردهای مهندسی و صنعتی است. این بخش از شبکه که واژگانی نظیر ربات‌های چندمنظوره، ربات‌های صنعتی و سیستم‌های چندرباتی را در بر می‌گیرد، بر جنبه‌های عملیاتی همچون تخصیص وظایف و برنامه‌نویسی رباتیک متمرکز است. حضور محوری الگوریتم‌های ژنتیک در این خوشه، حاکی از آن است که محققان از راهبردهای تکاملی به‌عنوان ابزار اصلی برای بهینه‌سازی عملکرد و طراحی سیستم‌های رباتیک در محیط‌های واقعی استفاده می‌کنند.

تکمیل‌کننده این ساختار، خوشه آبی و زرد هستند که به ترتیب بر چالش‌های فنی ناوبری و زیرساخت‌های هوش مصنوعی تمرکز دارند. خوشه آبی با محوریت بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، عمدتاً مسائل مربوط به اجتناب از برخورد و کنترل حرکت هماهنگ را پوشش می‌دهد، در حالی که خوشه زرد بر مفاهیم ساختاری نظیر خودسازماندهی (Self-organization) و شبکه‌های عصبی تأکید می‌ورزد. در مجموع، هم‌پوشانی و تراکم بالای خطوط ارتباطی میان این چهار خوشه نشان‌دهنده یکپارچگی عمیق میان تئوری‌های زیستی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سخت‌افزارهای رباتیک است؛ به گونه‌ای که می‌توان گفت پارادایم کنونی پژوهش در این حوزه، از شبیه‌سازی‌های ساده به سمت سیستم‌های هوشمند، خودسازمان‌ده و کاربردمحور با قابلیت یادگیری محیطی حرکت کرده است.



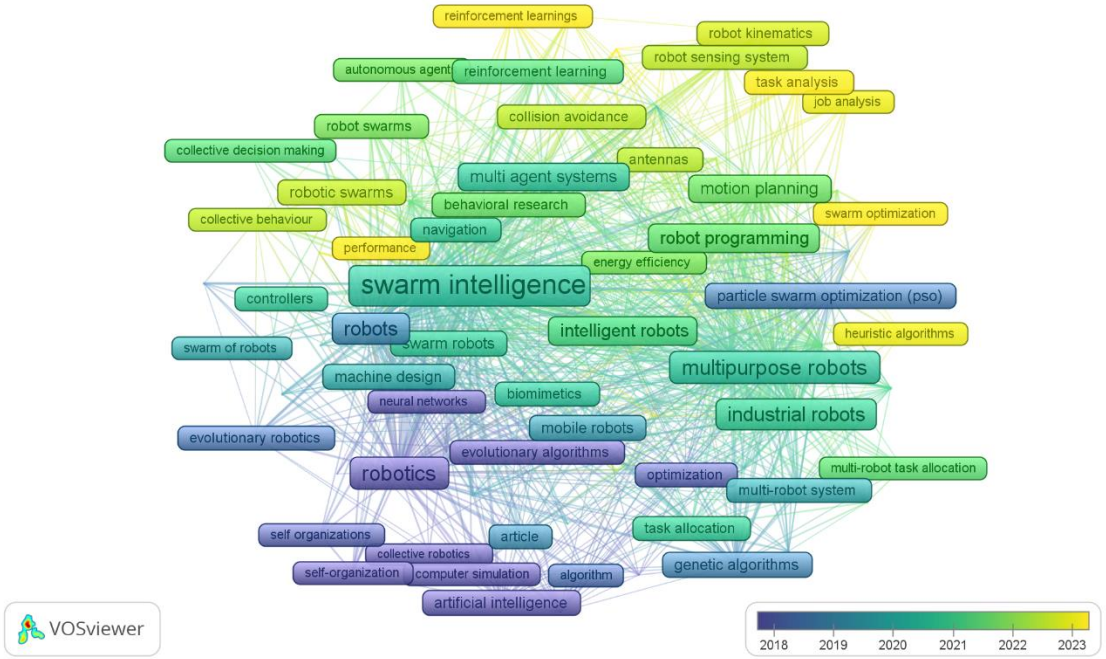
شکل ۵. شبکه هم‌رخدادی واژگان حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵

تحلیل شبکه هم‌رخدادی واژگان در قالب نقشهٔ زمان‌محور (Overlay Visualization)، امکان درک سیر تطور مفاهیم و شناسایی حوزه‌های نوظهور را فراهم می‌آورد. با استناد به طیف رنگی مستخرج از نرم‌افزار VOSviewer (شکل ۵)، پژوهش‌های این حوزه در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ از یک ساختار سنتی مبتنی بر شبیه‌سازی به سمت سیستم‌های هوشمند با خودمختاری بالا حرکت کرده‌اند. واژگانی که با طیف رنگی تیره (سورمه‌ای و بنفش) متمایز شده‌اند، عمدتاً بر مفاهیم کلاسیک نظیر شبکه‌های عصبی (Neural Networks)، کینماتیک ربات و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری تمرکز دارند که نشان‌دهنده اولویت‌های پژوهشی در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است. در این دوره، تمرکز اصلی جامعه علمی بر ایجاد زیرساخت‌های ریاضی و مدل‌سازی‌های اولیه برای درک تعاملات رباتیک بوده است.

با ورود به بازه زمانی میان‌مدت (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱) که در نقشه با طیف رنگی سبز مشخص شده است، پارادایم پژوهشی به سمت بهینه‌سازی و کاربردی‌سازی الگوریتم‌های هوش جمعی (Swarm Intelligence) در محیط‌های صنعتی و چندمنظوره تغییر جهت داده است. در این مرحله، موضوعاتی نظیر برنامه‌ریزی حرکت و تخصیص وظایف به بلوغ رسیده‌اند. با این حال، تحلیل دقیق لبه‌های بیرونی شبکه که با رنگ زرد درخشان مشخص شده‌اند، نشان‌دهنده ظهور جبهه‌های جدید دانش در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ است. مفاهیم کلیدی نظیر یادگیری تقویت‌شده (Reinforcement Learning)، عوامل خودمختار (Autonomous Agents) و اجتناب از برخورد (Collision Avoidance)، به‌عنوان داغ‌ترین موضوعات پژوهشی فعلی شناسایی می‌شوند. این روند نشان‌دهنده آن است که تحقیقات معاصر از الگوریتم‌های ثابت و واکنشی فاصله گرفته و به سمت رویکردهای یادگیری‌محور و

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

تصمیم‌گیری‌های پیچیده جمعی در محیط‌های پویا سوق یافته‌اند. به بیانی دیگر، آینده این حوزه در گرو تلفیق هوش جمعی با تکنیک‌های یادگیری عمیق برای دستیابی به سطوح بالاتری از هوشمندی و خودسازمان‌دهی در سیستم‌های رباتیک است.



شکل ٦. تحلیل زمانی و شناسایی روندهای نوظهور در حوزه پژوهش

نتایج آزمون همبستگی پیرسون (جدول ۴) نشان داد که بین تعداد مقالات منتشرشده و میانگین استناد به ازای هر مقاله، رابطه‌ای مثبت و معنادار وجود دارد. بر اساس طبقه‌بندی شدت همبستگی، مقدار ضریب ۰/۶۷۳ بیانگر همبستگی نسبتاً قوی بین دو متغیر است. این یافته نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مقالات منتشرشده در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت، میانگین استناد دریافتی هر مقاله نیز افزایش یافته است. به بیان دیگر، رشد تولیدات علمی این حوزه صرفاً به افزایش کمّی انتشارات محدود نبوده، بلکه با ارتقای کیفیت و میزان اثرگذاری علمی مقالات نیز همراه بوده است. بنابراین، توسعه این حوزه پژوهشی در بازه زمانی مورد بررسی، هم از نظر حجم تولیدات و هم از نظر تأثیر علمی روندی صعودی و معنادار داشته است.

جدول ٤. همبستگی بین تعداد مقالات منتشرشده و تعداد استنادات

متغیر	جنس	متغیر	جنس	نوع ضریب و آزمون	ضریب	سطح معنی‌داری
تعداد مقالات منتشرشده	فاصله‌ای	تعداد استناد	فاصله‌ای	پیرسون	۰/۶۷۳	<۰/۰۰۱

نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که بین تعداد مقالات منتشرشده و شاخص h-index سالانه رابطه‌ای مثبت، قوی و از نظر آماری معنادار وجود دارد (جدول ۵). مقدار ضریب همبستگی بیانگر آن است که با افزایش تعداد مقالات منتشرشده، شاخص h-index سالانه نیز به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. از آنجا که شاخص h-index علاوه بر تعداد انتشارات، میزان استنادهای دریافتی را نیز در ارزیابی عملکرد علمی لحاظ می‌کند، این نتیجه نشان می‌دهد که رشد این حوزه صرفاً ناشی از افزایش تعداد مقالات نبوده، بلکه کیفیت و نفوذ علمی پژوهش‌های منتشرشده نیز هم‌زمان ارتقا یافته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ علاوه بر گسترش کمّی، از نظر اثرگذاری علمی نیز روندی رو به رشد و پایدار را تجربه کرده است.

جدول ۵. همبستگی بین تعداد مقالات منتشر شده و h-index سالانه

متغیر	جنس	متغیر	جنس	نوع ضریب و آزمون	ضریب	سطح معنی‌داری
تعداد مقالات منتشرشده	فاصله‌ای	h-index سالانه	فاصله‌ای	پیرسون	۰/۷۸۱	<۰/۰۰۱

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تولیدات علمی در حوزه رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ روندی صعودی داشته و این رشد از سال ۲۰۲۰ به بعد شتاب بیشتری گرفته است. همچنین، رابطه مثبت و معنادار میان تعداد مقالات، میانگین استناد و شاخص h-index بیانگر آن است که توسعه این حوزه تنها به افزایش کمّی تولیدات محدود نبوده، بلکه کیفیت و اثرگذاری پژوهش‌ها نیز به‌طور هم‌زمان ارتقا یافته است. این یافته با نتایج Liang و Cheng (۲۱) همسو است؛ آنان در مطالعه علم‌سنجی خود نشان دادند که گسترش همکاری‌های بین‌المللی و افزایش مطالعات میان‌رشته‌ای موجب رشد استنادها و ارتقای جایگاه علمی پژوهش‌ها شده است. همچنین Jiao و همکاران (۱۱) بیان کردند که ادغام هوش مصنوعی، محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت و علوم مهندسی، زمینه‌ساز رشد سریع این حوزه و افزایش نفوذ علمی آن بوده است. در مقابل، برخی پژوهش‌های اولیه مانند مطالعه Sharma و همکاران (۷) بیشتر بر توسعه الگوریتم‌های خاص برای حل مسائل اکتشاف و مسیریابی تمرکز داشتند و هنوز نشانه‌ای از رشد گسترده و میان‌رشته‌ای این حوزه گزارش نکرده بودند. این تفاوت را می‌توان ناشی از مرحله بلوغ حوزه دانست؛ زیرا در سال‌های اخیر با ورود فناوری‌هایی مانند یادگیری ماشین، اینترنت اشیا و سامانه‌های خودمختار، دامنه کاربردهای رباتیک جمعی به‌طور قابل‌توجهی گسترش یافته است.

یافته دیگر پژوهش حاضر نشان داد که «هوش جمعی» همچنان هسته اصلی شبکه دانشی این حوزه است، اما روندهای نوظهور به سمت یادگیری تقویتی، عوامل خودمختار و ربات‌های هوشمند حرکت کرده‌اند. این نتیجه با یافته‌های Schranz و همکاران (۴ و ۵) همسو است که رباتیک جمعی را در حال گذار از مدل‌های مبتنی بر قوانین ثابت به سامانه‌های هوشمند و سازگار با محیط معرفی کرده‌اند. همچنین Dorigo و همکاران (۶) تأکید کردند که آینده رباتیک جمعی در تلفیق یادگیری ماشین، هوش جمعی و ربات‌های واقعی نهفته است. از سوی دیگر، Dorigo و همکاران (۱۲) نیز نشان دادند که رفتارهای جمعی موجودات زنده همچنان مبنای اصلی توسعه همکاری میان ربات‌ها است، اما الگوریتم‌های جدید به سمت افزایش استقلال تصمیم‌گیری و یادگیری محیطی حرکت کرده‌اند. با این حال، برخی مطالعات مانند Pandey و Jha (۳) همچنان تمرکز خود را بر مقایسه و بهبود الگوریتم‌های کلاسیک الهام‌گرفته از طبیعت مانند PSO و الگوریتم ژنتیک قرار داده‌اند و کمتر به کاربرد فناوری‌های نوین یادگیری تقویتی پرداخته‌اند. این تفاوت نشان می‌دهد که اگرچه الگوریتم‌های کلاسیک هنوز جایگاه مهمی دارند، اما جهت‌گیری پژوهش‌های جدید به سمت توسعه سامانه‌های یادگیرنده و خودمختار تغییر یافته است.

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که با وجود رشد سریع مطالعات، هنوز فاصله محسوسی میان توسعه الگوریتم‌های نظری و پیاده‌سازی عملی آن‌ها وجود دارد. این یافته با نتایج Kumar و همکاران (۸) همسو است. آنان در بررسی الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت نشان دادند که بخش عمده پژوهش‌ها بر بهبود تعادل میان اکتشاف و بهره‌برداری در الگوریتم‌های بهینه‌سازی متمرکز بوده و ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها در سامانه‌های رباتیکی واقعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع بیانگر آن است که توسعه روش‌های نظری هنوز با نیازهای کاربردی فاصله دارد.

همچنین، یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج Das و همکاران (۹) نیز همخوانی دارد. آنان در پژوهش خود با ارائه یک الگوریتم ترکیبی برای برنامه‌ریزی مسیر ربات‌های چندگانه، بهبود عملکرد الگوریتم را در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده گزارش کردند، اما در عین حال اشاره نمودند که انتقال این الگوریتم‌ها به محیط‌های واقعی به دلیل پیچیدگی شرایط عملیاتی، همچنان با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. این نتیجه با یافته پژوهش حاضر مبنی بر وجود فاصله میان توسعه الگوریتم‌ها و کاربرد عملی آن‌ها همسو است.

در مقابل، Jiang و همکاران (۱۰) با مرور روند تکامل رباتیک جمعی نشان دادند که تحقیقات جدید از توسعه صرف الگوریتم‌های نظری فراتر رفته و بر ادغام رفتارهای جمعی، یادگیری ماشین و ربات‌های واقعی تمرکز یافته‌اند. به اعتقاد آنان، آینده این حوزه در طراحی سامانه‌هایی است که بتوانند در محیط‌های واقعی، پویا و غیرقابل پیش‌بینی تصمیم‌گیری و همکاری مؤثر داشته باشند. این دیدگاه یافته‌های پژوهش حاضر را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که حرکت به سمت کاربردهای عملی به یکی از اولویت‌های اصلی این حوزه تبدیل شده است.

Hao و همکاران (۱۹) نیز در مرور پژوهش‌های مربوط به همکاری ربات‌های زمینی و هوایی نشان دادند که استفاده از یادگیری تقویتی، هوش جمعی و همکاری چندعاملی می‌تواند کارایی سامانه‌های رباتیکی را در محیط‌های واقعی بهبود بخشد. با این حال، آنان تأکید کردند که محدودیت‌های سخت‌افزاری، هزینه‌های اجرایی و پیچیدگی تعامل با محیط واقعی همچنان از مهم‌ترین موانع توسعه این فناوری محسوب می‌شود. این نتیجه نیز با یافته پژوهش حاضر همخوانی دارد و نشان می‌دهد که مهم‌ترین چالش پیش روی این حوزه، کاهش فاصله میان دستاوردهای نظری و کاربردهای عملی است.

از منظر جغرافیای علم نیز یافته‌ها نشان داد که چین از نظر تعداد تولیدات علمی در جایگاه نخست قرار دارد، اما کشورهایی مانند بلژیک و بریتانیا از نظر میزان استناد و نفوذ علمی، عملکرد بهتری داشته‌اند. این یافته با نتایج Liang و Cheng (۲۱) همخوانی دارد که بیان کردند کیفیت پژوهش، همکاری‌های بین‌المللی و انتشار در مجلات معتبر، نقش مهم‌تری از صرف افزایش تعداد مقالات در کسب مرجعیت علمی ایفا می‌کند. در مقابل، برخی مطالعات مروری مانند Jiao و همکاران (۱۱) بیشتر بر توسعه فناوری و الگوریتم‌ها تمرکز داشته و تفاوت میان عملکرد کمی و کیفی کشورها را بررسی نکرده‌اند. بنابراین، نتایج پژوهش حاضر از این نظر، تصویری جامع‌تر از ساختار جغرافیایی تولید علم ارائه می‌دهد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رباتیک جمعی و محاسبات الهام‌گرفته از طبیعت در دو دهه اخیر از یک حوزه مبتنی بر الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت به حوزه‌ای میان‌رشته‌ای، کاربردمحور و متکی بر هوش مصنوعی پیشرفته تبدیل شده‌اند. اگرچه اغلب مطالعات پیشین این روند را

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

تأیید می‌کنند، اما تفاوت در رویکرد آن‌ها نشان می‌دهد که پژوهش‌های اولیه بیشتر بر توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی متمرکز بوده‌اند، در حالی که پژوهش‌های جدید بر کاربردهای عملی، یادگیری تقویتی، همکاری چندرباته و سامانه‌های خودمختار تأکید دارند. این تحول بیانگر بلوغ تدریجی این حوزه است و نشان می‌دهد که مسیر آینده پژوهش‌ها باید بر کاهش فاصله میان توسعه الگوریتم‌های نظری و استقرار آن‌ها در محیط‌های واقعی، افزایش همکاری‌های بین‌رشته‌ای و طراحی سامانه‌های هوشمند سازگار با شرایط عملیاتی متمرکز باشد. با این حال، نتایج این پژوهش باید با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌ها تفسیر شود؛ از جمله استفاده از داده‌های نمایه‌شده تنها در پایگاه Scopus، محدود شدن تحلیل به مقالات پژوهشی و حذف سایر انواع مدارک علمی که ممکن است بر جامعیت نتایج اثرگذار باشد. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با استفاده از چندین پایگاه استنادی نظیر Web of Science و Dimensions، و نیز با تلفیق تحلیل‌های علم‌سنجی و مرورهای نظام‌مند یا فراتحلیل، تصویری جامع‌تر از روند تحول این حوزه ارائه دهند. همچنین، تمرکز بر ارزیابی الگوریتم‌های نوین در محیط‌های عملیاتی واقعی و توسعه همکاری‌های بین‌المللی و میان‌رشته‌ای می‌تواند به کاهش فاصله میان پژوهش‌های نظری و کاربردهای عملی و تسریع توسعه سامانه‌های رباتیک جمعی هوشمند کمک کند.

ملاحظات اخلاقی: در این پژوهش، مسائل اخلاقی به‌طور کامل رعایت شده است.

تضاد منافع: نویسندگان تصریح می‌نمایند هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص پژوهش حاضر وجود ندارد.

تقدیر و تشکر

از تمامی نویسندگان و پژوهشگران که پیش از این در این حوزه فعالیت کرده‌اند، قدردانی می‌کنیم. دستاوردهای علمی و یافته‌های آنان، مبنای خوبی برای تحقیقات ما بوده و الهام‌بخش برای ادامه روند پژوهش در این زمینه هستند.

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

References

1. Tan J, Melkoumian N, Harvey D, Akmeliawati R. Nature-inspired solutions for sustainable mining: applications of NIAs, swarm robotics, and other biomimicry-based technologies. Biomimetics. 2025; 10(3): 181.
2. Nguyen LV. Swarm intelligence-based multi-robotics: A comprehensive review. AppliedMath. 2024; 4(4): 1192–1210.
3. Pandey K, Jha CK. Comparison of different swarm based nature inspired algorithm for solution of optimization problem. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence: Advances and Applications (ICAIAA 2022). Singapore: Springer Nature; 2023. p. 79-90.
4. Schranz M, Di Caro GA, Schmickl T, Elmenreich W, Arvin F, Şekercioğlu A, et al. Swarm intelligence and cyber-physical systems: concepts, challenges and future trends. Swarm Evol Comput. 2021; 60: 100762.
5. Schranz M, Umlauft M, Sende M, Elmenreich W. Swarm robotic behaviors and current applications. Front Robot AI. 2020; 7: 36.
6. Dorigo M, Theraulaz G, Trianni V. Reflections on the future of swarm robotics. Sci Robot. 2020; 5(49): eabe4385.
7. Sharma S, Shukla A, Tiwari R. Multi robot area exploration using nature inspired algorithm. Biol Inspired Cogn Archit. 2016; 18: 80-94.
8. Kumar KP, Singarapu S, Singarapu M, Karra SR. Balancing exploration and exploitation in nature inspired computing algorithm. In: International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things. Cham: Springer; 2022. p.163-72.
9. Das PK, Behera HS, Panigrahi BK. A hybridization of an improved particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-robot path planning. Swarm Evol Comput. 2016; 28: 14-28.
10. Jiang A, Xu Y, Zhang H, Liu X, Wen S, Sun Y, et al. From nature to robotics: insights of animals collective behaviors on the development of swarm intelligence and multi-robot systems. Bioinspir Biomim. 2026; 21(3): 031001.
11. Jiao L, Zhao J, Wang C, Liu X, Liu F, Li L, et al. Nature-inspired intelligent computing: A comprehensive survey. Research. 2024; 7: 0442.
12. Duan H, Huo M, Fan Y. From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation. Natl Sci Rev. 2023; 10(5): nwad040.
13. Werfel J. Fluid thinking about collective intelligence. Nat Mach Intell. 2026; 8(4): 506-16.
14. Zhao D, Luo H, Tu Y, Meng C, Lam TL. Snail-inspired robotic swarms: a hybrid connector drives collective adaptation in unstructured outdoor environments. Nat Commun. 2024; 15: 3647.
15. Sheng Y, Nie W, Liu Z, Zhang H, Zhou H, Liu Z, et al. Biomimetic robotics and intelligence: A survey. SmartBot. 2025; 1(2): e12010.
16. Basha DS, Kumar ND. Effectiveness of bio inspired robotics in studying biological systems and looking for the mechanisms that may solve a problem in the engineering field. Technoarete Trans Ind Robot Autom Syst. 2022; 2(3): 1-8.
17. Budiarto BW, Syahputra M, Nurpriyanto BS, Dwiyanto D, Oktiawati UY. Design and analysis of bio-inspired robotic systems for search and rescue operations. J Acad Sci. 2024; 1(4): 408-16.
18. Kolapo P, Ogunsola NO, Komolafe K, Omole DD. Envisioning human–machine relationship towards mining of the future: An overview. *Mining*. 2025; 5(1): 5.

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]

19. Hao ZT, Guo B, Zhao KX, Wu L, Ding YS, Li ZT, et al. From rule-driven to collective intelligence emergence: A review of research on multi-robot air-ground collaboration. Acta Autom Sin. 2024; 50(10): 1877-905.
20. Palmieri N, De Rango F, Yang XS, Marano S. Multi-robot cooperative tasks using combined nature-inspired techniques. In: 2015 7th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI). IEEE; 2015. p.74-82.
21. Liang CJ, Cheng MH. Trends in robotics research in occupational safety and health: A scientometric analysis and review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023; 20(10): 5904.

[Downloaded from cjs.mubabol.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.22088/cjs.13.1.94]