Journal of
Study and Innovation in Education and Development Volume 5, Issue 2 (2025): 1-33

# Identifying Knowledge Fronts Using International Reports and Documents

**Mahdi Pakzad[1]*, Ehsan Ehteshamnejad[2]**

1. Assistant Professor, Department of Policy Evaluation and Monitoring of Science, Technology, and Innovation, National Research Institute for Science Policy, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Science, Technology, and Innovation Financing and Economics, National Research Institute for Science Policy, Tehran, Iran

**Received:** 02 Jan 2025
**Accepted:** 02 Mar 2025
**Available Online:** 15 Aug 2025

## ABSTRACT

This study aimed to identify emerging knowledge frontiers through the analysis of international strategic reports in science, technology, and innovation. This is a narrative review article using a descriptive analytical approach. It examines the content of key reports published by global institutions including Clarivate, McKinsey, WHO, WEF, and NATO. The data were extracted from five leading international sources and analyzed through qualitative comparative analysis and thematic classification. A synthesis-based framework was applied to identify and group overlapping knowledge clusters across domains. The review revealed substantial convergence among the reports despite institutional and strategic differences. Areas such as artificial intelligence, digital health, sustainable energy, smart agriculture, and big data emerged as common knowledge frontiers. A range of methodologies including co-citation analysis, scientometric indices, expert consultation, and policy analysis were used to identify these domains. Conceptual distinctions between "research front," "technology trend," and "strategic priority" were also observed. The study's results offer a foundation for developing a localized framework to monitor and classify knowledge frontiers at the national level. It is recommended that a hybrid system integrating quantitative data and qualitative policy analysis be designed to guide science and technology strategies aligned with both global developments and local needs.

**Keywords**

Knowledge frontiers, emerging technologies, science and technology trends, international reports, comparative analysis, research priorities

**How to cite:**
Pakzad, M., & Ehteshamnejad, E. (2025). Identifying Knowledge Fronts Using International Reports and Documents. *Study and Innovation in Education and Development, 5*(2), 1-33.

*** Corresponding Author:**
Dr. Mahdi Pakzad
E-mail: Pakzad@nrisp.ac.ir

© 2025 the authors. Published by Institute for Knowledge, Development, and Research.
This is an open access article under the terms of the CC BY-NC 4.0 License.

# EXTENDED ABSTRACT

## INTRODUCTION

The rapid acceleration of scientific and technological transformations has fundamentally reshaped the priorities and frameworks of national and international research ecosystems. In an era characterized by geopolitical instability, climate crises, public health emergencies, and digital disruptions, there is an urgent need to identify, categorize, and respond to emerging knowledge frontiers across multiple sectors. Global institutions, policy-makers, and academic stakeholders are increasingly reliant on horizon-scanning tools and foresight-based methodologies to detect critical shifts in knowledge production and innovation. These efforts are vital to ensuring national competitiveness, sustainable development, and equitable access to cutting-edge technologies (4).

The identification of "knowledge frontiers"—defined as emergent domains of high-impact research, rapidly growing scientific clusters, and transformative technological pathways—has become a cornerstone of science and innovation policy. Institutions such as Clarivate Analytics have operationalized metrics like the Co-Citation Probability Threshold (CPT) and publication intensity (P) to identify hot and emerging research fronts based on bibliometric trends and citation behavior (2). Other organizations, such as McKinsey Digital, deploy large-scale trend-mapping tools that integrate patent data, investment patterns, and talent demand projections to classify emerging technology clusters with disruptive potential (6). The World Economic Forum, through expert panels and multidisciplinary assessments, curates an annual list of the "Top 10 Emerging Technologies" with an emphasis on environmental, societal, and industrial impact (7).

Meanwhile, the World Health Organization (WHO) has incorporated digital health priorities within its Global Strategy on Digital Health, responding to disparities in infrastructure and access across different nations and regions (8). NATO, in its long-term Science & Technology Trends report, has integrated a defense-oriented approach by tracking emerging disruptive technologies (EDTs) such as quantum computing, AI, and autonomous systems in the context of strategic security (1). These reports not only reflect the epistemic diversity of institutional perspectives but also provide an empirical basis for comparative analysis and conceptual alignment of knowledge frontier identification practices. In doing so, they enable scholars and policy-makers alike to derive integrated models of research priority setting, cross-sectoral innovation, and technology foresight (12, 13).

Given the fragmented and multi-perspective nature of the international science and technology landscape, there is a pressing need for analytical studies that synthesize the methodological, conceptual, and strategic patterns across leading foresight reports. This article responds to that need by conducting a narrative review and comparative analysis of five key international documents: Clarivate's Research Fronts 2023, McKinsey's Technology Trends Outlook 2023, WHO's Global Digital Health Strategy, WEF's Top 10 Emerging Technologies 2023, and NATO's Science and Technology Trends 2023–2043. The study aims to identify common knowledge clusters, classify technological trajectories, and evaluate the conceptual coherence of terms such as "research front," "emerging trend," and "strategic priority." Such an exercise has direct implications for national science and innovation strategies, especially in middle-income and transitioning countries that seek to align local capacity building with global scientific shifts (3, 14).

## METHODS AND MATERIALS

The present study employed a narrative review methodology with a descriptive-analytical approach. Five international foresight and technology reports published between 2021 and 2024 were selected based on three criteria: institutional credibility, methodological transparency, and thematic relevance to science and technology policy. The content of each report was subjected to qualitative thematic coding. Coded data were then compared using cross-case synthesis to identify overlaps, divergences, and conceptual frameworks. Analytical dimensions included the methodology used for knowledge frontier identification, domains of scientific and technological focus, key indicators and metrics applied, and types of outputs and recommendations.

## FINDINGS

Clarivate's Research Fronts 2023 identified over 100 research fronts through co-citation analysis and citation velocity metrics. These fronts were classified into emerging and hot fronts based on the CPT and publication growth rate. The majority of these were concentrated in life sciences, materials science, and information technology. The model emphasized bibliometric rigor and scientific impact over broader socio-economic relevance.

McKinsey Digital's 2023 report clustered 15 technological trends into five overarching domains: computing and AI, connectivity, human-machine interaction, clean energy and sustainability, and future of mobility. The report triangulated patent filings, VC investments, and skill shortages to highlight trends such as generative AI, industrializing machine learning, and quantum technology as critical transformation vectors. Additionally,

the report detailed workforce skill requirements for each domain, noting gaps in STEM and cross-disciplinary talent.

WHO's Global Digital Health Strategy (2021–2025) adopted a needs-driven approach, identifying four strategic goals: enhancing governance, strengthening digital health infrastructure, promoting interoperability, and building workforce capacity. The strategy identified digital epidemiology, health data integration, and telemedicine platforms as high-priority research areas, particularly in low-resource contexts. Acknowledging disparities, the strategy stressed equity, ethical governance, and stakeholder coordination.

The WEF's Top 10 Emerging Technologies 2023 emphasized societal and ecological impact in its selection process. Technologies such as flexible batteries, sustainable aviation fuel, and spatial omics were evaluated through multidisciplinary lenses. The assessment process prioritized technologies with high transformative potential, cross-sector scalability, and alignment with UN Sustainable Development Goals.

NATO's Science and Technology Trends 2023–2043 focused on emerging disruptive technologies (EDTs) with implications for defense and national security. Eleven key EDTs were identified, including AI, quantum sensors, advanced materials, and space systems. The report employed scenario planning and military foresight to evaluate both capability gaps and threat potential. It also explored dual-use technologies and their potential integration into civilian domains.

Cross-report analysis revealed significant convergence around specific knowledge frontiers such as artificial intelligence, digital health, clean energy, and data-intensive research. Differences emerged in the metrics and conceptual frameworks used: whereas Clarivate emphasized bibliometric indicators, McKinsey prioritized innovation outputs, and WHO emphasized health equity and policy readiness. The WEF adopted an integrative lens based on social utility, while NATO's lens was focused on strategic resilience and threat mitigation.

## DISCUSSION AND CONCLUSION

The comparative analysis demonstrates that international institutions employ diverse yet complementary methodologies for identifying knowledge frontiers. Despite differing institutional mandates, five major knowledge clusters consistently appear: artificial intelligence, digital health, sustainable energy technologies, precision agriculture, and big

data analytics. These recurrent domains signify a collective global prioritization of technologically mediated solutions to complex socio-technical problems.

This synthesis also illuminates conceptual ambiguities between related terms. A “research front” often refers to rapidly growing scientific clusters identified through citation analytics. In contrast, a “technology trend” reflects broader innovation dynamics, including economic deployment and industrial uptake. A “strategic priority,” meanwhile, is usually framed through policy goals and long-term societal needs. Clarifying these terminological distinctions is essential for coherent communication across science, industry, and policy-making communities.

Furthermore, the study identifies a critical need for hybrid foresight frameworks that blend quantitative metrics (e.g., patent counts, citation velocity, funding levels) with qualitative assessments (e.g., ethical concerns, equity, and geopolitical relevance). Such frameworks enable more nuanced and actionable interpretations of global scientific and technological evolution.

Another key implication is the role of foresight in shaping inclusive and anticipatory national innovation systems. For countries with limited R&D capacity, relying solely on global frontier identification can lead to misaligned policies. Instead, adapting international insights to local contexts—by embedding indigenous knowledge systems, local needs, and regional strengths—ensures relevance and sustainability. This calls for developing national observatories that integrate international foresight outputs with bottom-up intelligence gathering.

The study also underscores the importance of capacity building in science policy interfaces. Training a new generation of analysts who can navigate the complexities of data-driven foresight, ethical evaluation, and policy translation is vital. Institutions must invest in infrastructure, talent, and cross-sector collaboration to internalize global knowledge dynamics and translate them into actionable strategies.

In conclusion, by integrating insights from leading global reports, this study offers a comparative blueprint for understanding how emerging knowledge frontiers are defined, assessed, and applied in different institutional settings. The results advocate for the creation of a hybridized and adaptive foresight model that can inform national science and technology strategies while remaining responsive to global shifts. This model would support the design of policy tools that are both scientifically grounded and socially responsive, ultimately enabling more resilient and forward-looking innovation ecosystems.

# شناسایی جبهه‌های دانش با بهره‌گیری از اسناد و گزارش‌های بین‌المللی

مهدی پاکزاد*[۱]، احسان احتشام نژاد [۲]

۱. استادیار گروه ارزیابی سیاست‌ها و پایش علم، فناوری و نوآوری، مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور، تهران، ایران
۲. استادیار گروه تامین مالی و اقتصاد علم، فناوری و نوآوری، مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور، تهران، ایران

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۱۲/۱۲
**تاریخ چاپ:** ۱۴۰۴/۰۵/۲۴

## چکیده

هدف پژوهش حاضر شناسایی جبهه‌های دانش نوظهور از طریق تحلیل اسناد و گزارش‌های راهبردی بین‌المللی در حوزه علم، فناوری و نوآوری بود. این مقاله یک مطالعه مروری روایی با رویکرد تحلیل توصیفی است که به بررسی محتوای گزارش‌های منتشرشده توسط نهادهای بین‌المللی از جمله Clarivate، McKinsey، WHO، WEF و NATO می‌پردازد. داده‌ها از ۵ منبع بین‌المللی معتبر استخراج شده‌اند و با استفاده از روش تحلیل تطبیقی کیفی و طبقه‌بندی موضوعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای ساختاردهی یافته‌ها از رویکرد تلفیقی بهره گرفته شد که عناصر هم‌پوشان در جبهه‌های دانش را در حوزه‌های مختلف شناسایی و دسته‌بندی می‌کند. بررسی گزارش‌ها نشان داد که علی‌رغم تفاوت‌های نهادی و هدف‌گذاری، هم‌گرایی قابل‌توجهی در شناسایی خوشه‌های دانشی وجود دارد. حوزه‌هایی همچون هوش مصنوعی، سلامت دیجیتال، انرژی پایدار، کشاورزی هوشمند و کلان‌داده‌ها به‌عنوان جبهه‌های دانشی مشترک در اغلب اسناد مطرح شده‌اند. همچنین رویکردهای مختلفی از تحلیل هم‌استنادی و شاخص‌های علم‌سنجی گرفته تا نظرسنجی نخبگان و تحلیل سیاستی برای شناسایی این جبهه‌ها به‌کار رفته است. تفاوت‌هایی در تمرکز مفهومی بین «جبهه پژوهشی»، «روند فناوری» و «اولویت راهبردی» نیز مشخص شد. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای طراحی یک چارچوب بومی جهت رصد و طبقه‌بندی جبهه‌های دانش در سطح ملی باشد. پیشنهاد شده است که یک سامانه ترکیبی شامل داده‌های کمی و تحلیل‌های کیفی برای هدایت سیاست‌های علم و فناوری توسعه یابد تا همسو با تحولات جهانی، اولویت‌های داخلی نیز پوشش داده شوند.

## واژگان کلیدی

جبهه‌های دانش، فناوری نوظهور، روندهای علم و فناوری، اسناد بین‌المللی، تحلیل تطبیقی، اولویت‌های پژوهشی

**شیوه ارجاع‌دهی:**

پاکزاد، مهدی.، و احتشام نژاد، احسان. (۱۴۰۴). شناسایی جبهه‌های دانش با بهره‌گیری از اسناد و گزارش‌های بین‌المللی. *پژوهش و نوآوری در تربیت و توسعه*، ۵(۲)، ۳۳-۱.

**نویسنده مسئول:**
دکتر مهدی پاکزاد
پست الکترونیکی: Pakzad@nrisp.ac.ir

© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است.
انتشار این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی CC BY-NC 4.0 صورت گرفته است.

# مقدمه

امروزه، شناسایی دقیق جبهه‌های دانش به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای نظام‌های علمی، اقتصادی و حکمرانی بدل شده است. جبهه‌های دانش به مثابه نقاط اوج تحولات دانشی و فناوری شناخته می‌شوند که نشان‌دهنده روندهای نوظهور، اولویت‌های پژوهشی، و شکاف‌های راهبردی در تولید علم هستند. این جبهه‌ها نه‌تنها بازتابی از نوآوری‌های فناورانه‌اند بلکه نشان‌دهنده جهت‌گیری آینده پژوهش‌ها و تمرکز منابع علمی در سطح جهانی هستند. با توجه به گسترش دامنه علوم بین‌رشته‌ای، نفوذ فناوری‌های همگرا همچون هوش مصنوعی، کوانتوم، داده‌های بزرگ و بیوتکنولوژی، شناسایی این جبهه‌ها به تصمیم‌گیری در حوزه تخصیص منابع، سیاست‌گذاری پژوهشی، و توسعه ظرفیت‌های بومی کمک شایانی می‌کند.

از منظر تحلیلی، روندهای علمی به شدت تحت تأثیر چرخه‌های کوتاه نوآوری و رقابت فناورانه میان کشورها و شرکت‌ها قرار گرفته‌اند. در چنین فضایی، عدم آگاهی از جبهه‌های نوظهور می‌تواند به کاهش مزیت رقابتی و عقب‌ماندگی علمی منجر شود. به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، فقدان سازوکارهای مؤثر برای رصد علمی و اولویت‌بندی پژوهش‌ها، به اتلاف منابع و موازی‌کاری‌های پژوهشی انجامیده است. از این‌رو، بهره‌گیری از ابزارهای نوین همچون تحلیل هم‌استنادی، شاخص‌های تأثیر استنادی و روش‌های داده‌کاوی برای استخراج جبهه‌های دانش از پایگاه‌های بین‌المللی به یکی از اولویت‌های بنیادین در حوزه سیاست‌گذاری علم و فناوری تبدیل شده است. بر اساس گزارش سازمان توسعه علم و فناوری ناتو، روندهای نوظهور علمی در دو دهه آینده می‌توانند ساختارهای امنیتی، اقتصادی و اجتماعی کشورها را به‌کلی متحول سازند و توسعه جبهه‌های دانش به عنوان عامل قدرت نرم علمی عمل خواهد کرد (1).

از سوی دیگر، جهانی شدن علم و گسترش اشتراک‌گذاری داده‌های علمی، فرصت‌هایی بی‌نظیر برای تحلیل جبهه‌های دانش فراهم کرده است. وجود پایگاه‌های جامع علم‌سنجی و گسترش گزارش‌های استراتژیک از سوی نهادهایی مانند Clarivate، OECD و WHO امکان درک دقیق‌تری از روندهای جهانی را ایجاد نموده‌اند. در همین راستا، یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیلی، روش تحلیل هم‌استنادی و خوشه‌بندی مفهومی است که با تحلیل نحوه ارجاع مقالات به یکدیگر، امکان شناسایی خوشه‌های دانشی پرشتاب را فراهم می‌کند. به عنوان نمونه، در گزارش فناوری‌های نوظهور کلاریویت، از شاخص CPT برای سنجش تأثیر و تازگی جبهه‌های دانش استفاده شده که ترکیبی از تعداد استنادات، سن مقالات استنادکننده و حجم مقالات اصلی است (2).

در یک نمای کلان، جبهه‌های دانش به عنوان «راهبردهای خاموش» در سیاست‌گذاری علم عمل می‌کنند. آن‌ها معیاری هستند برای ارزیابی اینکه کدام حوزه‌ها در حال تسریع، تحول یا فرسایش هستند. اگرچه شناسایی آن‌ها فرآیندی فناورانه و داده‌محور است، اما تحلیل ابعاد اقتصادی، اخلاقی و اجتماعی آن‌ها نیز به شدت حیاتی است. این اهمیت زمانی بیشتر می‌شود که در نظر بگیریم بسیاری از فناوری‌های نوظهور از جمله هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، محاسبات کوانتومی، و بلاک‌چین نه‌تنها در بعد علمی بلکه در

سطح زیربناهای حکمرانی، اقتصاد و زیست اجتماعی اثرگذار هستند (3). در این چارچوب، شناسایی جبهه‌های دانش نه صرفاً یک اقدام فنی، بلکه یک ضرورت راهبردی برای هدایت توسعه پایدار و رقابت‌پذیر محسوب می‌شود.

درک عمیق از جبهه‌های دانش جهانی مستلزم بهره‌گیری از منابعی است که دیدی کلان، مقایسه‌ای و میان‌رشته‌ای از تحولات علمی ارائه دهند. اسناد بین‌المللی مانند گزارش‌های سالانه نهادهایی نظیر OECD، McKinsey، WEF، Gartner و WHO، از جمله مهم‌ترین ابزارها در رصد روندهای علمی، فناوری و نوآوری محسوب می‌شوند. این اسناد با تکیه بر داده‌های جهانی، تحلیل‌های همگرای تخصصی، و اعتبارسنجی از طریق شبکه‌های بین‌المللی پژوهشگران، توانسته‌اند به نقشه‌راهی برای تصمیم‌سازان حوزه علم و فناوری در سطح ملی و بین‌المللی تبدیل شوند (4).

نقش این اسناد فراتر از صرفاً گزارش‌دهی روندهاست؛ آن‌ها به‌منزله بستری برای همسوسازی سیاست‌های تحقیقاتی، هماهنگی بین‌المللی در سرمایه‌گذاری‌های کلان علمی، و توسعه چارچوب‌های اخلاقی و زیربنایی در استفاده از فناوری‌ها عمل می‌کنند. به عنوان نمونه، گزارش فناوری‌های استراتژیک گارتنر در سال ۲۰۲۴ با تمرکز بر فناوری‌هایی چون هوش مصنوعی مولد، مهندسی اعتماد دیجیتال و سیستم‌های انطباق‌پذیر، توانست دیدی عملیاتی برای شرکت‌ها و دولت‌ها در اتخاذ فناوری‌های نوین فراهم آورد (5). همچنین، تحلیل‌های ارائه‌شده در گزارش مک‌کینزی نشان می‌دهد که بسیاری از روندهای فناورانه مانند یادگیری ماشین، سیستم‌های ابری و واقعیت افزوده، در کنار پتانسیل اقتصادی بالا، نیازمند سیاست‌های دقیق برای توسعه مهارت‌های نیروی انسانی و جذب سرمایه هستند (6).

این اسناد نه‌تنها روندهای حال حاضر را بررسی می‌کنند، بلکه با تکیه بر داده‌های آینده‌پژوهانه، مسیرهای احتمالی توسعه علمی را نیز شناسایی می‌نمایند. برای مثال، گزارش کلیدی منتشرشده توسط World Economic Forum در سال ۲۰۲۳، ده فناوری نوظهور با بیشترین پتانسیل اثرگذاری اجتماعی در پنج سال آینده را معرفی کرد، که از جمله آن‌ها می‌توان به هوش مصنوعی مولد، باتری‌های انعطاف‌پذیر و فناوری امیکس فضایی اشاره کرد (7). این‌گونه اسناد از طریق ارائه شواهد و تحلیل‌های سیستماتیک، به کشورها و مؤسسات پژوهشی کمک می‌کنند تا از اقدامات واکنشی فاصله گرفته و به رویکردهای پیش‌نگرانه و آینده‌محور در سیاست‌گذاری برسند.

از منظر روشی نیز این گزارش‌ها به الگویی برای طراحی ابزارهای بومی رصد دانش بدل شده‌اند. به عنوان مثال، روش‌شناسی‌های گزارش‌های ناتو و کلاریویت شامل استفاده از تحلیل شبکه‌های استنادی، سنجش تأثیر زمانی استنادات، شاخص‌های نوآوری و ارزیابی قابلیت جذب فناوری‌ها در سیستم‌های ملی است (1, 2). از این طریق، تحلیل‌گران می‌توانند ساختار و پویایی نظام علم را در سطح ملی با ساختار جهانی مقایسه کرده و شکاف‌های استراتژیک را شناسایی کنند. چنین اطلاعاتی نقش کلیدی در تدوین برنامه‌های تحقیقاتی بلندمدت، اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌های پژوهشی، و تدوین سیاست‌های حمایت از فناوری‌های همگرا دارند.

همچنین، اسناد جهانی دارای ابعاد هنجاری و اخلاقی مهمی نیز هستند. به عنوان نمونه، استراتژی جهانی سلامت دیجیتال سازمان جهانی بهداشت نه‌تنها به اولویت‌های فناورانه در حوزه سلامت دیجیتال اشاره کرده، بلکه بر اصولی چون برابری، امنیت داده‌ها، قابلیت همکاری و مسئولیت‌پذیری اخلاقی در استفاده از فناوری تأکید دارد (8). این‌گونه چارچوب‌ها در کشورهای کمترتوسعه‌یافته می‌توانند راهبردهای بومی‌سازی فناوری‌های حساس و ارتقای سلامت عمومی را هدایت کنند. در مجموع، اسناد بین‌المللی نقشی دوگانه ایفا می‌کنند: هم مرجع اطلاعاتی برای رصد جبهه‌های دانش هستند و هم ابزارهایی برای تنظیم چارچوب‌های سیاست‌گذاری، اخلاقی، و سرمایه‌گذاری در حوزه علم و فناوری.

این مقاله با هدف تحلیل ساختاری و محتوایی جبهه‌های دانش جهانی، بر پایه بررسی نظام‌مند اسناد و گزارش‌های بین‌المللی برجسته تهیه شده است. هدف اصلی، شناسایی الگوهای برتر در طراحی روندهای پژوهشی و فناوری‌های نوظهور در سطح جهانی است تا از طریق آن بتوان چارچوبی تحلیلی برای سیاست‌گذاری پژوهشی در سطوح ملی و منطقه‌ای فراهم آورد. در این راستا، مقاله تلاش می‌کند تا با بهره‌گیری از رویکرد تحلیل توصیفی و اسنادی، محتوای گزارش‌های علمی و راهبردی منتشرشده از سوی نهادهایی مانند Clarivate، OECD، WHO، McKinsey، Gartner، WEF و NATO را استخراج و مقایسه کند. تمرکز ویژه بر روش‌شناسی‌های استخراج روندها، معیارهای اولویت‌بندی، حوزه‌های دانشی مورد توجه، و شاخص‌های کمی همچون CPT، TRL و حجم استنادات است تا بتوان جبهه‌های دانش با بالاترین اهمیت و پتانسیل اثرگذاری را به‌صورت خوشه‌ای شناسایی نمود.

محدوده مقاله، هم حوزه‌های علمی بنیادین مانند ریاضیات، فیزیک و علوم زیستی را دربرمی‌گیرد و هم فناوری‌های تحول‌آفرین همچون هوش مصنوعی، امنیت داده، سلامت دیجیتال، کشاورزی هوشمند، انرژی‌های نو، و محاسبات کوانتومی را شامل می‌شود. این رویکرد چندرشته‌ای به مقاله اجازه می‌دهد تا ضمن بررسی افقی روندهای فناورانه، نگاهی عمقی نیز به زمینه‌های دانشی شکل‌دهنده این فناوری‌ها داشته باشد. همچنین با تحلیل مقایسه‌ای اسناد، امکان استخراج شکاف‌ها و اشتراکات رویکردهای شناسایی جبهه‌های دانش فراهم می‌شود، که می‌تواند مبنای طراحی نظام‌های رصد بومی و اولویت‌گذاری پژوهشی در کشور قرار گیرد. در نهایت، هدف مقاله آن است که از طریق یک تحلیل میان‌رشته‌ای و بین‌المللی، به ترسیم یک نقشه دانشی پویا برای تصمیم‌سازی در عرصه علم و فناوری کمک کند و به گفتمان توسعه مبتنی بر دانش در سطح ملی یاری رساند.

## روش‌شناسی

روش پژوهش مبتنی بر رویکرد تحلیل توصیفی و اسنادی است. در این مقاله، روش‌شناسی نه‌تنها به‌عنوان ابزار بررسی محتوا، بلکه به‌عنوان چارچوبی برای استخراج منظم، مقایسه‌پذیر و معنادار داده‌ها از منابع بین‌المللی عمل می‌کند. تمرکز اصلی در این بخش، تبیین روند انتخاب اسناد مرجع، شیوه تحلیل محتوا، و رویکرد ترکیبی در طبقه‌بندی و استخراج جبهه‌های دانش است که از طریق آن‌ها مقاله تلاش دارد تصویری جامع و چندبعدی از تحولات دانشی بین‌المللی ارائه دهد.

در گام نخست، انتخاب منابع و اسناد برای تحلیل، از طریق معیارهای شفاف و قابل دفاع صورت پذیرفت. معیار اول، جامعیت و اعتبار نهادی بود؛ به‌طوری‌که تنها گزارش‌هایی از سازمان‌ها و نهادهای معتبر بین‌المللی مانند Clarivate، WHO، NATO، McKinsey، WEF، و KEYSIGHT وارد دامنه تحلیل شدند که از روش‌شناسی‌های مشخص و داده‌محور استفاده کرده‌اند و از منظر علمی، راهبردی یا اقتصادی مورد استناد گسترده قرار گرفته‌اند. معیار دوم، تازگی و به‌روز بودن اطلاعات بود؛ لذا فقط گزارش‌های منتشر شده از سال ۲۰۲۰ به بعد مورد بررسی قرار گرفتند تا اولویت‌های فناورانه و دانشی مطابق با تحولات چهارمین و پنجمین انقلاب صنعتی منعکس شوند. معیار سوم، صراحت روش‌شناسی در خود اسناد بود؛ به این معنا که تنها گزارش‌هایی وارد تحلیل شدند که در آن‌ها چارچوب شناسایی فناوری‌ها و روندها به صورت مرحله‌مند، داده‌محور و با پشتوانه تخصصی ارائه شده باشد.

پس از انتخاب اسناد، روش تحلیل کیفی توصیفی برای استخراج اطلاعات به کار گرفته شد. در این مرحله، ابتدا هر گزارش به صورت کامل مطالعه و سپس کدگذاری اولیه محتوای آن انجام شد. در فرایند کدگذاری، اجزایی همچون هدف گزارش، روش‌شناسی مورد استفاده، معیارهای انتخاب روندها یا جبهه‌ها، شاخص‌های ارزیابی (مانند CPT، نوآوری، سرمایه‌گذاری، TRL و...)، حوزه‌های علمی و فناورانه مورد اشاره، و خروجی‌های کلیدی (اولویت‌ها، طبقه‌بندی‌ها و توصیه‌ها) به عنوان محورهای استخراج اطلاعات تعیین شدند. این عناصر به شکل منسجم در جدولی تحلیلی طبقه‌بندی و با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه، با استفاده از روش مقایسه تطبیقی (comparative thematic analysis)، اشتراکات و افتراقات رویکردهای پنج‌گانه مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان خوشه‌های دانشی، روش‌شناسی‌های برتر، و مفاهیم نوظهور در اسناد بین‌المللی را آشکار ساخت.

عنصر مهم دیگر در روش‌شناسی این مقاله، بهره‌گیری از تلفیق بین تحلیل محتوای اسنادی و مدل‌سازی مفهومی است. به این معنا که علاوه بر تحلیل توصیفی اجزای گزارش‌ها، یک مدل مفهومی از روند شناسایی جبهه‌های دانش ارائه شده در سطح بین‌المللی ترسیم شد که در آن مراحل کلیدی شناسایی، رتبه‌بندی، تأثیرگذاری، و طبقه‌بندی نهایی روندهای علمی و فناورانه در قالب یک فرآیند سیستماتیک مدل‌سازی شده است. این مدل نه‌تنها برای فهم بهتر روش‌های موجود در تحلیل اسناد سودمند است، بلکه زمینه‌ساز استخراج الگوی بومی قابل اقتباس برای سیاست‌گذاران ملی نیز به‌شمار می‌رود. مدل مذکور درواقع ترکیب خلاقانه‌ای از شاخص‌های کمی مانند CPT، P و TRL با تحلیل‌های کیفی متخصصان و ارزیابی‌های استراتژیک است که ساختار گزارش‌های تحلیل‌شده را شفاف و قابل مقایسه می‌سازد.

## چارچوب نظری و مفهومی

در بررسی جبهه‌های دانش و تحولات فناورانه نوظهور، تبیین مفاهیم بنیادین و چارچوب‌های مفهومی که به تحلیل روندهای علمی و سیاست‌گذاری تحقیقاتی کمک می‌کنند، از اهمیتی اساسی برخوردار است. نخستین مفهوم کلیدی، «جبهه دانش» است که به طور معمول به خوشه‌هایی از پژوهش‌ها، مقالات یا فناوری‌ها اطلاق می‌شود که در یک بازه زمانی مشخص بیشترین تمرکز، نوآوری،

و استناد را به خود اختصاص داده‌اند. جبهه‌های دانش به نوعی معرف مرزهای فعال دانش در هر حوزه تخصصی هستند و نشان‌دهنده جهت‌گیری آینده تحقیقات می‌باشند. این مفهوم برخاسته از روش‌های تحلیل علم‌سنجی و شاخص‌های استنادی است و در گزارش‌هایی چون «Science & Technology Trends 2023–2043» ناتو و «Top 10 Emerging Technologies» مجمع جهانی اقتصاد، از آن برای طبقه‌بندی و اولویت‌بندی حوزه‌های دانشی استفاده شده است (1, 7).

مفهوم «فناوری نوظهور» نیز یکی از کلیدی‌ترین اصطلاحاتی است که در ادبیات سیاست‌گذاری علم و نوآوری به کار می‌رود. فناوری‌های نوظهور به آن دسته از فناوری‌هایی اطلاق می‌شود که در مراحل اولیه رشد و توسعه قرار دارند، اما پتانسیل ایجاد تحول اساسی در ساختارهای علمی، اقتصادی، یا اجتماعی را دارند. این فناوری‌ها غالباً در ادبیات سیاست‌گذاری به‌عنوان حوزه‌های کلیدی برای سرمایه‌گذاری، تنظیم مقررات و توسعه زیرساخت‌های حمایتی شناخته می‌شوند. گزارش کلاریویت از فناوری‌های نوظهور همچون ترانسکریپتومیکس فضایی، مهندسی کاپروپتوز، و سیستم‌های نورومورفیک نام برده است که در لبه دانشی جهان حرکت می‌کنند (2). از دیدگاه نظری، نوظهور بودن یک فناوری بر مبنای سه شاخص تعریف می‌شود: تازگی مفهومی، شدت نوآوری، و تأثیر بالقوه بر جامعه. این تعریف در گزارش OECD نیز به شکل روش‌مند مورد استفاده قرار گرفته است که در آن از فناوری‌های نوظهور به‌عنوان پیشران‌های گذارهای بزرگ در حوزه‌های زیست‌محیطی، دیجیتال و سلامت یاد شده است (4).

مفهوم «روندهای علمی» نیز ارتباط نزدیکی با تحلیل جبهه‌های دانش دارد. روندهای علمی به الگوهای تکرارشونده یا فزاینده‌ای اطلاق می‌شوند که در تولید، انتشار، یا استناد به دانش علمی مشاهده می‌گردند. این روندها می‌توانند در حوزه‌های میان‌رشته‌ای بروز کنند یا از طریق همگرایی علوم گوناگون مانند زیست‌شناسی، فیزیک و علوم کامپیوتر به وجود آیند. در این زمینه، گزارش مک‌کینزی با استفاده از داده‌های پیمایش، ثبت اختراع، انتشارات علمی و سرمایه‌گذاری‌های مخاطره‌آمیز، روندهای علمی را به‌صورت کمی شناسایی و تحلیل کرده است (6). این روندها عموماً بر اساس شاخص‌هایی چون رشد نمایی مقالات علمی، گسترش بین‌رشته‌ای بودن مطالعات، و حجم داده‌های تولیدشده در حوزه‌های خاص قابل شناسایی هستند. در واقع، هر جا که ما شاهد هم‌افزایی مفاهیم و فناوری‌ها و یا گسترش سریع پژوهش‌های تجربی باشیم، می‌توان از شکل‌گیری یک روند علمی جدید سخن گفت.

آخرین مفهوم اساسی در این چارچوب، «اولویت‌های راهبردی پژوهش» است. این مفهوم به حوزه‌هایی اشاره دارد که در سیاست‌های علم، فناوری و نوآوری به عنوان اولویت سرمایه‌گذاری، هدایت پژوهش‌ها و تمرکز نهادی شناخته می‌شوند. اولویت‌های راهبردی معمولاً بر اساس نیازهای اجتماعی، ظرفیت‌های ملی، روندهای جهانی، و تحلیل‌های آینده‌پژوهانه تعیین می‌شوند. برای مثال، سازمان جهانی بهداشت در گزارش راهبردی خود بر سلامت دیجیتال، مراقبت‌های بهداشتی فراگیر، و امنیت داده‌های سلامت به عنوان اولویت‌های جهانی تأکید کرده است (8). به‌علاوه، گزارش «Sensitive Technology Research Areas» دولت کانادا نیز حوزه‌هایی همچون فناوری‌های کوانتومی، سیستم‌های خودمختار و بیوتکنولوژی را به‌عنوان فناوری‌های حساس و راهبردی که باید تحت حمایت و کنترل ویژه باشند، معرفی می‌کند (2).

برای تحلیل دقیق‌تر اولویت‌های راهبردی پژوهش، مرور مدل‌های مفهومی و دیدگاه‌های مطرح در شناسایی و طبقه‌بندی روندهای علمی در سطح بین‌المللی ضروری است. یکی از مدل‌های رایج، مدل چرخه عمر فناوری است که شامل مراحل ظهور، رشد، بلوغ و افول است و در تحلیل‌های استراتژیک برای تعیین زمان مناسب سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین به کار می‌رود. بر اساس این مدل، فناوری‌هایی که در مرحله ظهور هستند ولی رشد استنادی بالایی دارند، اولویت سرمایه‌گذاری محسوب می‌شوند. در گزارش گارتنر نیز از مدل «چرخه تبلیغات فناوری» (Hype Cycle) برای تحلیل پیش‌بینی‌پذیری و میزان پذیرش فناوری‌ها استفاده شده است که نقاط اوج و افول انتظارات از هر فناوری را نشان می‌دهد (5).

از دیدگاهی دیگر، مدل‌های تحلیل شبکه‌ای مبتنی بر علم‌سنجی، نقش مهمی در شناسایی جبهه‌های دانش ایفا کرده‌اند. در این چارچوب، از روش‌هایی مانند تحلیل هم‌استنادی برای کشف خوشه‌های دانشی و رابطه بین حوزه‌های مختلف علمی استفاده می‌شود. تحلیل هم‌استنادی به بررسی الگوهای استناد مشترک میان مقالات می‌پردازد و بر اساس آن، ساختار دانش در یک حوزه قابل ترسیم می‌شود. این روش در گزارش کلاریویت به‌کار رفته است و با استفاده از آن، جبهه‌هایی که مقالاتشان بیشترین میزان استناد متقابل دارند، به‌عنوان جبهه‌های پژوهشی شناسایی شده‌اند (2). این روش امکان می‌دهد تا بدون نیاز به پیش‌فرض‌های موضوعی، جبهه‌های فعال دانش به‌صورت داده‌محور استخراج شوند و پویایی آن‌ها در زمان نیز مورد تحلیل قرار گیرد.

در تکمیل تحلیل‌های هم‌استنادی، شاخص CPT نیز به‌عنوان یک ابزار کلیدی در سنجش داغی یا نوظهور بودن جبهه‌های دانش معرفی شده است. CPT که مخفف Citation Potential over Time است، نسبت میانگین تأثیر استنادی جبهه پژوهشی به سن مقالات استنادکننده آن را اندازه‌گیری می‌کند. عدد بالای CPT نشان‌دهنده اهمیت، جوانی و داغ بودن یک جبهه پژوهشی است. این شاخص در گزارش Clarivate برای شناسایی جبهه‌های نوظهور در علوم زیستی، پزشکی، فیزیک و علوم اطلاعاتی مورد استفاده قرار گرفته است (2). با ترکیب این شاخص با داده‌های کمی مانند تعداد مقالات اصلی (P) و تغییرات سالانه در میزان استناد، می‌توان به مدلی چندبعدی از شناسایی و رصد جبهه‌های دانشی رسید که هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی غنای تحلیلی دارد.

علاوه بر تحلیل‌های استنادی و شاخص‌های کمی، نقشه‌های تحول نیز به‌عنوان ابزارهای نوین برای فهم مسیرهای توسعه فناوری‌ها و روندهای علمی شناخته می‌شوند. این نقشه‌ها با ترکیب داده‌های علم‌سنجی، منابع ثبت اختراع، گزارش‌های رسانه‌ای و تحولات بازار، تصویری جامع از جریان دانش و کاربرد آن ارائه می‌دهند. به‌طور مثال، در گزارش Frontiers که توسط مجمع جهانی اقتصاد منتشر شده، برای هر یک از ده فناوری برتر، نقشه تحول اختصاصی طراحی شده است که روابط آن فناوری با حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی و نیز با سایر فناوری‌های مکمل یا رقیب را به‌نمایش می‌گذارد (7). این نقشه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل‌های زمینه‌ای طراحی می‌شوند و به‌ویژه در سیاست‌گذاری آینده‌نگر کاربرد فراوان دارند.

در نهایت، شاخص نوآوری نیز از جمله شاخص‌های بنیادین در سنجش پویایی و ارزش فناوری‌ها به شمار می‌رود. این شاخص، ترکیبی از میزان سرمایه‌گذاری، تعداد اختراعات ثبت‌شده، نرخ تولید انتشارات علمی و میزان تأثیر اجتماعی و اقتصادی یک فناوری را شامل می‌شود. برای مثال، در گزارش مک‌کینزی، برای هر فناوری، امتیاز نوآوری بر اساس داده‌های ثبت اختراع و مقالات پژوهشی به دست آمده و امتیاز علاقه عمومی نیز با استفاده از تحلیل کلیدواژه‌های جستجوی اینترنتی، اخبار و استخدام شغلی محاسبه شده است (6). چنین شاخص‌هایی کمک می‌کنند تا به‌جای اتکا به شهود یا گرایش‌های لحظه‌ای، بر مبنای داده‌های تجربی و ساختاری، مسیر سرمایه‌گذاری و توسعه فناوری‌ها ترسیم شود.

## Clarivate – جبهه‌های پژوهشی ۲۰۲۳

در گزارش «جبهه‌های پژوهشی ۲۰۲۳» که توسط شرکت Clarivate Analytics با همکاری آکادمی علوم چین منتشر شده است، یکی از پیشرفته‌ترین و داده‌محورترین رویکردها برای شناسایی روندهای علمی و فناوری‌های نوظهور ارائه شده است. این گزارش با هدف شناسایی خوشه‌های دانشی با بالاترین میزان فعالیت علمی و بیشترین نرخ رشد استنادات، از مدل تحلیلی ترکیبی شامل تحلیل هم‌استنادی، شاخص‌های کمی و ارزیابی‌های متخصصان استفاده کرده است. مهم‌ترین ویژگی این گزارش آن است که به‌جای اتکا به تحلیل کیفی، از داده‌های واقعی موجود در پایگاه داده ESI (Essential Science Indicators) بهره می‌گیرد تا جبهه‌های فعال علمی را از طریق داده‌های استناد واقعی شناسایی کند (2). در مرحله نخست، بیش از ۱۲ هزار جبهه علمی اولیه از پایگاه داده استخراج شدند. این جبهه‌ها خوشه‌هایی از مقالات بودند که به‌طور منظم و مکرر با یکدیگر مورد استناد قرار گرفته‌اند. سپس، با استفاده از دو روش مجزا اما مکمل، جبهه‌های داغ از بین این مجموعه اولیه گزینش شدند: روش اول بر اساس مجموع استنادات کل و میانگین سال انتشار مقالات پایه، و روش دوم بر اساس میانگین استناد به ازای هر مقاله اصلی در هر حوزه علمی بود. در نهایت، با تلفیق این دو روش و نظر متخصصان، ۱۱۰ جبهه داغ و ۱۸ جبهه نوظهور در یازده حوزه گسترده علوم طبیعی و اجتماعی انتخاب شدند. آنچه این رویکرد را منحصربه‌فرد می‌سازد، استفاده از شاخص‌های کمّی برای تقاطع میان شدت علمی و تازگی زمانی است که به‌خوبی در شاخص CPT نمود یافته است (1).

یکی از ارکان کلیدی در تحلیل گزارش کلاریویت، بررسی حوزه‌هایی است که بیشترین تعداد جبهه‌های داغ و نوظهور در آن‌ها مشاهده شده است. حوزه‌هایی مانند علوم زیستی، پزشکی بالینی، شیمی و علوم مواد، فیزیک، و اطلاعات و محاسبات از جمله عرصه‌هایی هستند که تمرکز علمی در آن‌ها با رشد چشمگیر همراه بوده است. به‌طور خاص، علوم زیستی با جبهه‌هایی مانند ترانسکریپتومیکس فضایی، کاپروپتوز، و تحلیل ساختار ژنوم انسان، به عنوان یکی از پرشتاب‌ترین حوزه‌ها مطرح شده است. در حوزه پزشکی بالینی نیز تمرکز ویژه‌ای بر روی درمان‌های نوین مانند ژن‌درمانی کم‌خونی سلول داسی‌شکل و مهارکننده‌های KRAS صورت گرفته است (7). در حوزه علوم زیست‌محیطی، جبهه‌هایی همچون بررسی میکروپلاستیک‌ها در خاک و بافت انسان و استفاده

از راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی در صدر اولویت‌ها قرار دارند. در حوزه اطلاعات و محاسبات نیز، فناوری‌هایی مانند شبکه‌های عصبی اسپایکی و تراشه‌های نورومورفیک، نشان‌دهنده مرزهای نوظهور میان علوم اعصاب و فناوری دیجیتال هستند (9). این تنوع حوزه‌ای نشان می‌دهد که توسعه علم، یک پدیده میان‌رشته‌ای و هم‌زمان در چندین جبهه است که نیازمند هماهنگی گسترده بین نهادهای پژوهشی و سیاست‌گذاران ملی است.

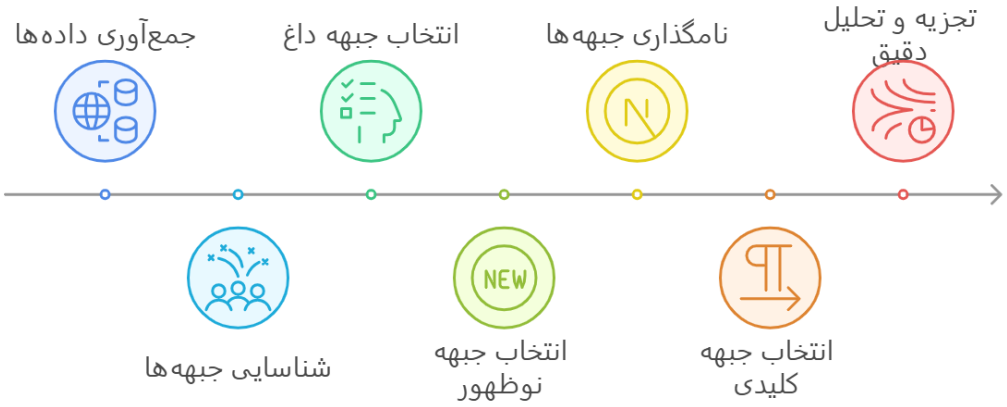
**شکل ۱. گزارش «جبهه‌های پژوهشی ۲۰۲۳» در یک نگاه**

در میان ابزارهای تحلیلی استفاده‌شده در این گزارش، دو شاخص اصلی «تعداد مقالات اصلی» (P) و «شاخص CPT» نقش محوری دارند. شاخص P نشان‌دهنده حجم و گستره دانشی یک جبهه علمی است. این شاخص از طریق شمارش تعداد مقالاتی که در زمره ۱٪ پرارجاع‌ترین مقالات حوزه خود قرار دارند محاسبه می‌شود و حجم واقعی تولید دانش در هر خوشه علمی را بازتاب می‌دهد. از سوی دیگر، شاخص CPT (Citation Potential over Time) نسبت میانگین تأثیر استنادی به سن مقالات استنادکننده را محاسبه می‌کند. این شاخص نه‌تنها تازگی جبهه پژوهشی را نشان می‌دهد، بلکه میزان تحرک علمی در آن را نیز به‌صورت دینامیک منعکس می‌سازد. در واقع، مقدار بالای CPT به معنای داغ بودن و اهمیت لحظه‌ای آن جبهه است که در سیاست‌گذاری پژوهشی، اولویت بالاتری می‌یابد (6). ترکیب این دو شاخص با تحلیل‌های کیفی متخصصان، ساختاری سه‌لایه برای اولویت‌بندی علمی فراهم کرده که در آن معیار حجم، تأثیر و جوانی یک حوزه با یکدیگر تلفیق شده‌اند.

کاربردهای یافته‌های گزارش کلاریویت به‌صورت گسترده در سیاست‌گذاری علم، تخصیص منابع پژوهشی، طراحی برنامه‌های تحقیقاتی، و جهت‌دهی به همکاری‌های علمی بین‌المللی قابل پیاده‌سازی است. کشورها و مؤسسات علمی می‌توانند با استفاده از این داده‌ها، حوزه‌هایی را که در آنها ظرفیت بالقوه برای تبدیل‌شدن به قطب علمی وجود دارد، شناسایی و برای توسعه آن‌ها برنامه‌ریزی کنند. همچنین، این جبهه‌ها به شرکت‌های فناوری کمک می‌کنند تا چشم‌انداز تحقیق و توسعه خود را همسو با مرزهای جهانی علم

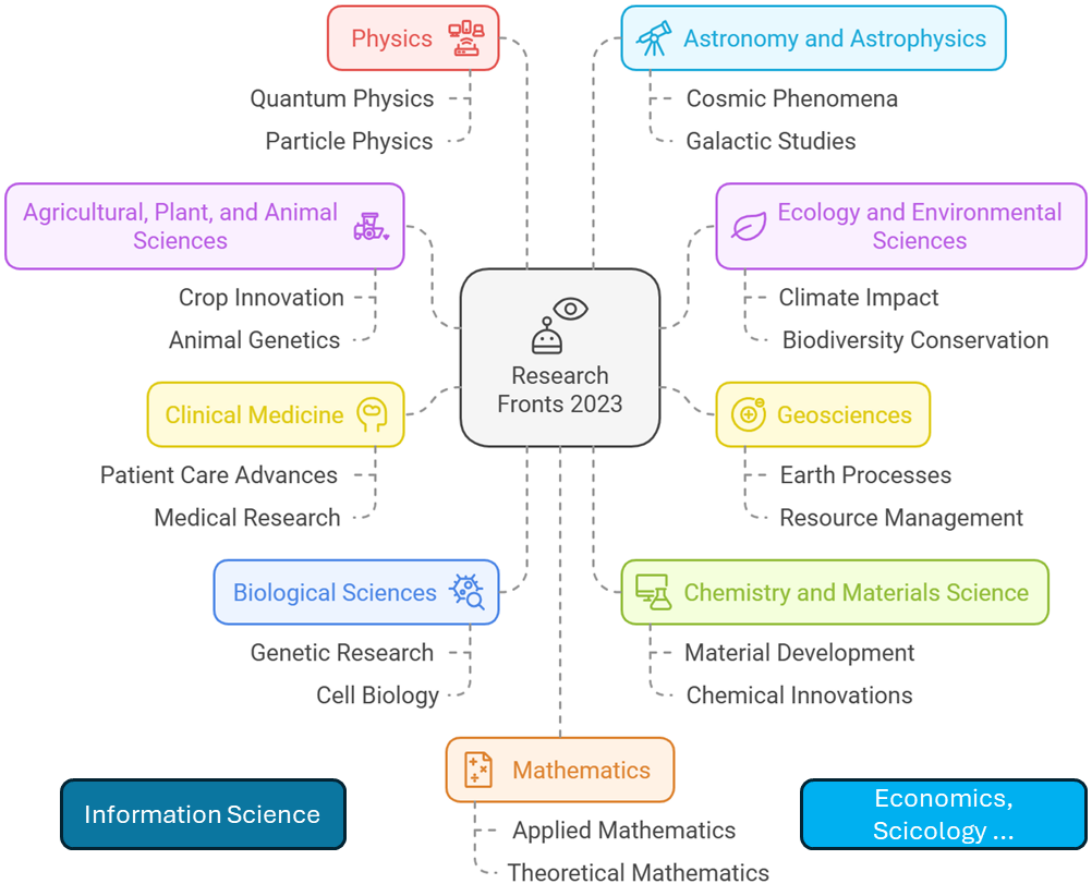
طراحی کنند. برای مثال، در حوزه انرژی، شرکت‌های فعال در زمینه تولید هیدروژن می‌توانند با تمرکز بر جبهه‌هایی همچون فوتوکاتالیزورها برای سوخت خورشیدی یا الکتروکاتالیز الکترولیز آب دریا، مزیت رقابتی خود را توسعه دهند (5). افزون بر این، شناخت جبهه‌های علمی، به سازمان‌های تأمین مالی مانند صندوق‌های نوآوری و شرکت‌های سرمایه‌گذاری خطرپذیر نیز در جهت‌دهی به سرمایه‌گذاری در حوزه‌های پرشتاب کمک می‌کند. داده‌های گزارش کلاریویت همچنین در طراحی نقشه جامع علم و فناوری کشورها، تدوین اولویت‌های ملی پژوهش، و راه‌اندازی پایگاه‌های رصد علم‌سنجی قابل استفاده هستند (4).

در زمینه بازیگران اصلی، گزارش Clarivate نمایی دقیق از کشورها، مؤسسات و پژوهشگرانی که در خط مقدم هر جبهه قرار دارند، ارائه می‌دهد. ایالات متحده، چین، آلمان، بریتانیا و کره جنوبی از جمله کشورهایی هستند که به‌طور منظم در صدر جبهه‌های داغ قرار گرفته‌اند. این کشورها نه‌تنها در تولید مقالات اصلی بلکه در مقالات استنادکننده که بیانگر تلاش‌های علمی پیشرو در تکامل یک جبهه هستند، حضوری پررنگ دارند. در سطح مؤسسات، مراکزی مانند MIT، Tsinghua، Stanford و آکادمی علوم چین به‌عنوان نهادهای کلیدی در پیشبرد دانش در جبهه‌های مختلف معرفی شده‌اند (10). در واقع، این گزارش با ترکیب داده‌های کمی و تحلیل‌های ساختاری، به بازیگران ملی و بین‌المللی کمک می‌کند تا جایگاه خود را در فضای جهانی علم درک کرده و برای ارتقاء آن برنامه‌ریزی کنند.




**شکل ۲. فرایند تعیین اولویت‌های پژوهش و فناوری در گزارش «جبهه‌های پژوهشی»**

در مجموع، رویکرد Clarivate با بهره‌گیری از روش تحلیل هم‌استنادی، شاخص CPT، و بررسی مقالات اصلی و استنادکننده، توانسته است مدلی ساخت‌یافته برای رصد جبهه‌های دانش جهانی ارائه دهد. این مدل نه‌تنها در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی پژوهشی قابل استفاده است بلکه برای شرکت‌های فناور، سرمایه‌گذاران، و نهادهای تصمیم‌ساز نیز یک ابزار راهبردی به شمار می‌آید.




**شکل ۳. اولویت‌های پژوهش و فناوری شناسایی شده در گزارش «جبهه های پژوهشی ۲۰۲۳»**

## McKinsey – روندهای فناوری ۲۰۲۳

گزارش «چشم‌انداز روندهای فناوری ۲۰۲۳» که توسط شرکت مشاوره جهانی مک‌کینزی منتشر شده، یکی از دقیق‌ترین و چندلایه‌ترین تحلیل‌ها از روندهای فناورانه نوظهور در سال‌های اخیر را ارائه می‌دهد. این گزارش با تمرکز بر ۱۵ روند کلیدی فناوری، آن‌ها را در قالب پنج خوشه اصلی طبقه‌بندی کرده و برای هر یک از این خوشه‌ها از معیارهای کمّی مانند ثبت اختراع، پژوهش‌های علمی، حجم سرمایه‌گذاری، شاخص علاقه عمومی و نیازمندی‌های شغلی استفاده کرده است تا تصویری دقیق، قابل مقایسه و کاربردی برای مدیران، سیاست‌گذاران و پژوهشگران ترسیم نماید (6). دسته‌بندی این روندها در پنج خوشه «انقلاب هوش مصنوعی»، «ساخت آینده دیجیتال»، «مرزهای محاسبات و اتصال»، «مهندسی پیشرفته» و «دنیای پایدار» انجام شده و این تقسیم‌بندی امکان بررسی هم‌زمان روندهای میان‌رشته‌ای و کاربردی در صنایع مختلف را فراهم می‌کند.

در خوشه «انقلاب هوش مصنوعی»، روندهایی مانند «هوش مصنوعی مولد»، «هوش مصنوعی کاربردی» و «صنعتی‌سازی یادگیری ماشین» تحلیل شده‌اند. این حوزه با توجه به رشد نمایی مدل‌های زبانی بزرگ، تولید محتوای خودکار و به‌کارگیری گسترده

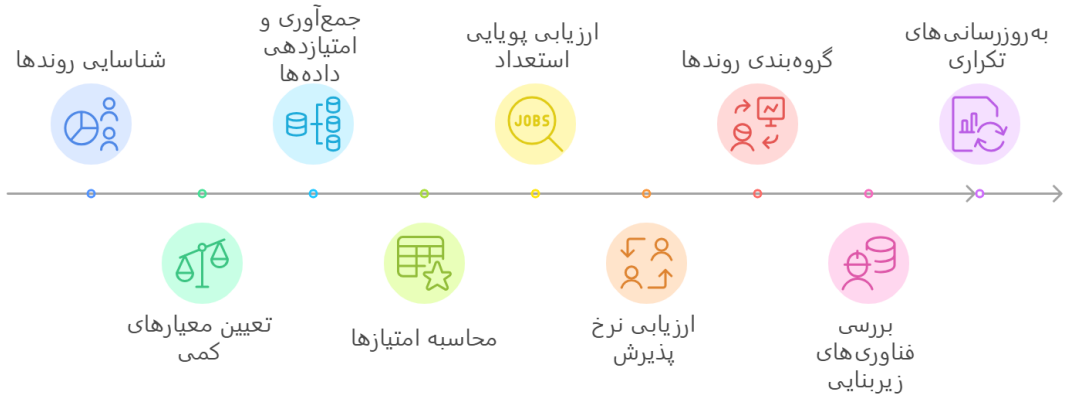
در حوزه‌هایی چون سلامت، خدمات مالی، آموزش و بازاریابی، جایگاه محوری در ساختار تحول دیجیتال به خود اختصاص داده است. به‌ویژه هوش مصنوعی مولد که از سال ۲۰۲۲ با ظهور ابزارهایی مانند ChatGPT، Midjourney و Copilot به اوج توجه رسید، از دید مک‌کینزی قابلیت خلق ارزش اقتصادی تا سقف ۴.۴ تریلیون دلار را داراست و به‌سرعت در حال تعمیق نفوذ در صنایع مختلف است (11).

در دومین خوشه با عنوان «ساخت آینده دیجیتال»، روندهایی همچون «توسعه نرم‌افزار نسل بعدی»، «وب ۳» و «معماری‌های اعتماد دیجیتال» مطرح شده‌اند. این روندها با هدف ایجاد زیرساخت‌هایی برای محیط‌های دیجیتال امن، مقیاس‌پذیر و قابل اعتماد توسعه یافته‌اند و نقشی حیاتی در تحول معماری سازمان‌ها ایفا می‌کنند. از جمله، معماری‌های مبتنی بر اعتماد صفر و سیستم‌های هویت غیرمتمرکز در حال جایگزینی مدل‌های امنیتی قدیمی هستند و بستری برای پردازش داده‌های حساس در محیط‌های توزیع‌شده فراهم می‌آورند (5).

در خوشه «مرزهای محاسبات و اتصال»، روندهایی مانند «محاسبات کوانتومی»، «واقعیت فراگیر»، «اتصال پیشرفته» و «محاسبات ابری و لبه» معرفی شده‌اند. این فناوری‌ها ضمن افزایش قدرت پردازش، امکان تبادل داده‌ها را در مقیاس بزرگ، با تأخیر کم و امنیت بالا فراهم می‌سازند. به‌ویژه اتصال LEO (مدار پایین زمین) و شبکه‌های G۵ خصوصی در صنایع لجستیک، سلامت، و انرژی در حال افزایش هستند. همچنین، واقعیت‌های ترکیبی مانند AR/VR/MR به‌عنوان لایه‌هایی از محاسبات فضایی به‌سرعت در حال نفوذ به حوزه‌های آموزشی و صنعتی هستند (12).

در خوشه «مهندسی پیشرفته»، روندهایی همچون «آینده تحرک»، «فناوری‌های فضایی» و «مهندسی زیستی» قرار دارند که به‌طور خاص در امتداد تحولات مواد، مکانیک و زیست‌فناوری قرار می‌گیرند. مهندسی زیستی، با ترکیب زیست‌شناسی مصنوعی و داده‌های مولکولی، به خلق محصولات دارویی و غذایی نوین منجر شده است. همچنین، تحرک هوشمند در قالب خودروهای خودران، ناوگان هوایی شهری و لجستیک روباتیک به یکی از جبهه‌های فعال سرمایه‌گذاری شرکت‌ها بدل شده است (3).

پنجمین خوشه با عنوان «دنیای پایدار»، بر فناوری‌هایی تمرکز دارد که به دستیابی به آینده‌ای با آلودگی کمتر، مصرف انرژی بهینه‌تر و سازگاری با چالش‌های زیست‌محیطی کمک می‌کنند. روندهایی مانند «الکترونیک پایدار»، «برقی‌سازی»، «فناوری‌های جذب و حذف کربن» و «محاسبات سبز» از جمله اولویت‌های مطرح‌شده هستند. این روندها با توجه به اهداف توافق‌نامه‌های جهانی در مورد تغییرات اقلیمی، به‌ویژه اهداف خالص صفر (Net Zero) طراحی شده‌اند و در بسیاری از صنایع از جمله انرژی، حمل‌ونقل، ساختمان‌سازی و تولید، قابل پیاده‌سازی هستند (4).



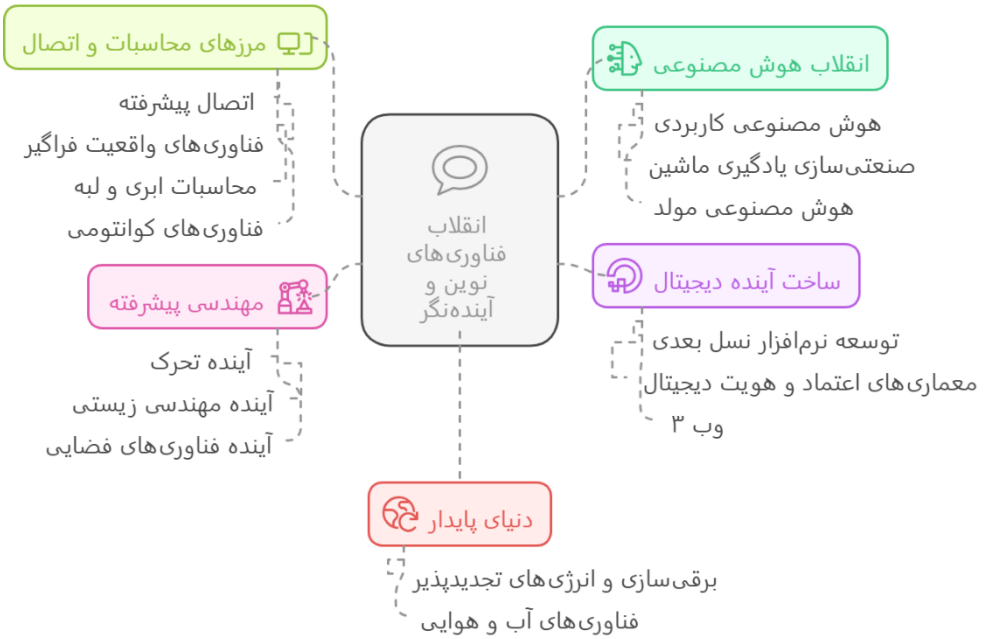

**شکل ۴. مراحل شناسایی فناوری‌های برتر در گزارش «چشم‌انداز روندهای فناوری»**

گزارش مک‌کینزی به‌طور خاص از داده‌های کمّی برای ارزیابی و رتبه‌بندی روندها استفاده کرده است. برای هر روند، پنج شاخص کلیدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند: تعداد جستارهای اینترنتی، تعداد پوشش‌های خبری، ثبت اختراع، انتشارات علمی و میزان سرمایه‌گذاری مالی. این داده‌ها با استفاده از منابعی مانند Google Trends، پایگاه‌های ثبت اختراع، بانک‌های مقالات علمی و پایگاه PitchBook گردآوری شده‌اند و هر یک از این معیارها به صورت امتیازدهی ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شده‌اند. سپس، با میانگین‌گیری از شاخص‌های «اختراعات» و «انتشارات علمی»، امتیاز نوآوری محاسبه شده است و با ترکیب «اخبار» و «جست‌وجو»، امتیاز علاقه عمومی شکل گرفته است (9). این رویکرد باعث شده تا روندهایی که شاید هنوز در مراحل اولیه توسعه هستند اما توجه رسانه‌ای یا علمی بالایی دارند، از روندهایی که اشباع یا بالغ محسوب می‌شوند، تمایز یابند.

از دیگر ابعاد منحصربه‌فرد گزارش مک‌کینزی، تحلیل بحران مهارتی و نیازمندی‌های منابع انسانی در مواجهه با روندهای فناورانه است. برای هر روند، داده‌هایی درباره تعداد آگهی‌های شغلی، توزیع مهارت‌های فنی، و نسبت دسترسی به استعدادهای دارای آن مهارت‌ها تحلیل شده است. به‌عنوان مثال، برای روندهایی مانند یادگیری ماشین یا محاسبات ابری، اختلاف میان تقاضای بازار و تعداد متخصصان موجود به‌شدت بالاست. گزارش با ارائه نسبت‌های مقایسه‌ای، نشان داده است که در بسیاری از این حوزه‌ها، کمتر از ۰.۵ متخصص برای هر موقعیت شغلی وجود دارد، در حالی‌که در حوزه‌های بالغ‌تر مانند توسعه نرم‌افزار سنتی این نسبت به بالای ۲ می‌رسد (13). این یافته به‌وضوح بحران جهانی استعداد در فناوری‌های پیشرفته را نشان می‌دهد، بحرانی که در صورت عدم برنامه‌ریزی، می‌تواند مانعی جدی در مسیر رشد و بومی‌سازی نوآوری‌های فناورانه ایجاد کند.

از منظر راهبردی، داده‌های حاصل از این ارزیابی به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا از یک‌سو بر مهارت‌آموزی و بازآموزی نیروی کار تأکید کنند و از سوی دیگر، برنامه‌های مهاجرت مهارت‌محور و همکاری‌های بین‌المللی در حوزه آموزش تخصصی را گسترش دهند. همچنین این گزارش به کسب‌وکارها توصیه می‌کند تا رویکردهای چابک‌تری برای توسعه نیروی انسانی در پیش گیرند و از ابزارهایی مانند سیستم‌های هوشمند تطبیق مهارت و پلتفرم‌های یادگیری شخصی‌سازی‌شده بهره گیرند (14). این موضوع در هم‌افزایی

با شاخص‌های نوآوری، به دولت‌ها و شرکت‌ها امکان می‌دهد تا نقشه راه سرمایه‌گذاری فناورانه را بر اساس واقعیات بازار کار و قابلیت اجرایی طراحی کنند.



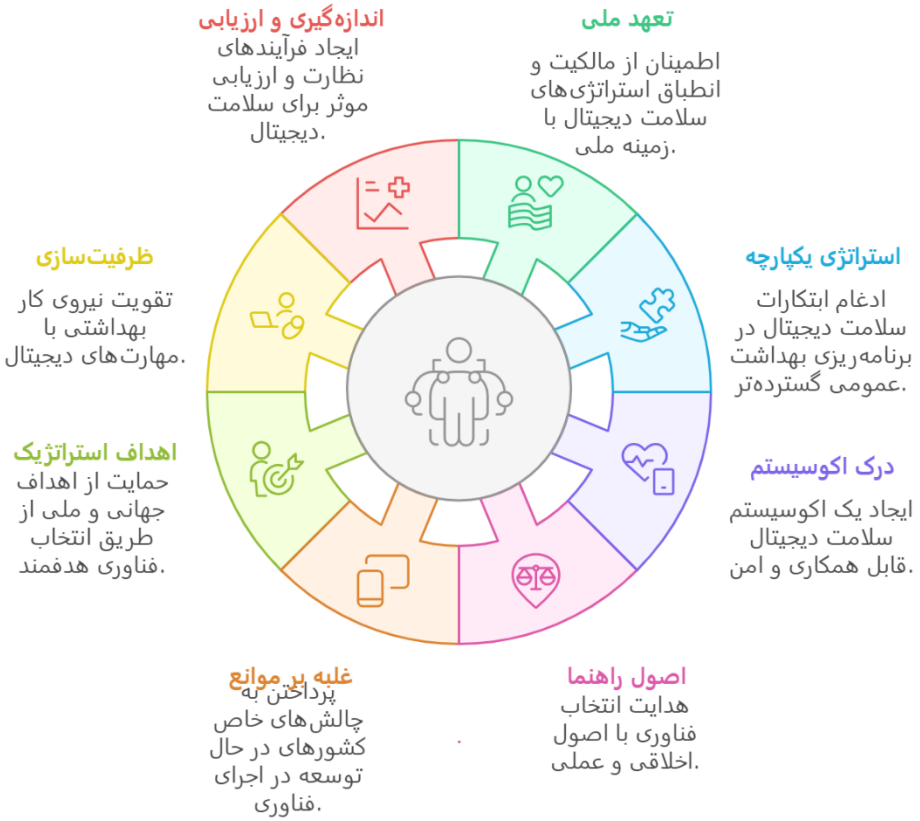

**شکل ۵. روندهای برتر فناوری شناسایی شده در گزارش «چشم‌انداز روندهای فناوری ۲۰۲۳»**

به‌طور کلی، رویکرد مک‌کینزی ترکیبی از تحلیل داده‌محور، ارزیابی متخصص‌محور و دسته‌بندی ساختاریافته است که از آن می‌توان به‌عنوان الگویی برای توسعه پلتفرم‌های رصد ملی و سیاست‌گذاری فناورانه در کشورهای مختلف استفاده کرد. این گزارش علاوه بر شناسایی روندهای فناورانه نوظهور، با تحلیل هم‌زمان شاخص‌های بازار، منابع انسانی و میزان بلوغ فناوری، بستری برای طراحی تصمیم‌های راهبردی در سطوح کلان و سازمانی فراهم می‌آورد.

## WHO – استراتژی جهانی سلامت دیجیتال ۲۰۲۰–۲۰۲۵

سند «استراتژی جهانی سلامت دیجیتال ۲۰۲۰–۲۰۲۵» منتشرشده توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) یکی از جامع‌ترین و هدفمندترین چارچوب‌های سیاستی برای هدایت تحولات فناورانه در نظام‌های سلامت جهان محسوب می‌شود. این سند با رویکردی کل‌نگر، نه‌تنها به معرفی فناوری‌های نوظهور در حوزه سلامت می‌پردازد، بلکه به تبیین اصول اخلاقی، راهبردی، حقوقی و زیرساختی برای تحقق عدالت سلامت از طریق ابزارهای دیجیتال نیز توجه دارد. رویکرد WHO در این سند بر محور توانمندسازی نظام‌های سلامت از طریق فناوری‌های دیجیتال استوار است، به‌گونه‌ای که نه‌تنها اثربخشی و کارایی خدمات سلامت افزایش یابد، بلکه شکاف‌های دسترسی در میان کشورهای مختلف نیز کاهش یابد (8).

چهار اصل کلیدی در این استراتژی جهانی مورد تأکید قرار گرفته است: نخست، تقویت و هم‌راستایی راهبردهای ملی سلامت دیجیتال با اهداف توسعه پایدار؛ دوم، توسعه زیرساخت‌های فناورانه با تأکید بر پلتفرم‌های منبع‌باز و استاندارد؛ سوم، حمایت از نوآوری‌های فناورانه متناسب با نیازهای بومی؛ و چهارم، تضمین حاکمیت داده‌ها و رعایت اصول اخلاقی در بهره‌برداری از داده‌های سلامت. این اصول بر این باور استوارند که سلامت دیجیتال صرفاً ابزار فناورانه نیست، بلکه بستری است برای بازطراحی نظام سلامت به‌نفع کارایی، شفافیت، و دسترسی عادلانه‌تر. بنابراین، تأکید بر طراحی راه‌حل‌های فناورانه قابل تطبیق با نظام‌های سلامت کشورها، خصوصاً کشورهای کم‌برخوردار، یکی از محورهای برجسته این سند به شمار می‌رود (4).




**شکل ۶. اصول کلیدی راهبرد جهانی سلامت دیجیتال WHO ۲۰۲۰–۲۰۲۵**

در راستای تحقق این اصول، سازمان جهانی بهداشت مجموعه‌ای از اهداف راهبردی را تدوین کرده است که مهم‌ترین آن‌ها شامل توسعه ظرفیت سیاست‌گذاری دیجیتال، آموزش مهارت‌های سلامت دیجیتال، گسترش زیرساخت‌های ارتباطی در مناطق دوردست، و ترویج همکاری‌های بین‌المللی در تولید داده و دانش است. این اهداف نه‌تنها ابعاد فناورانه بلکه اجتماعی، حقوقی و فرهنگی سلامت دیجیتال را نیز دربر می‌گیرد. به‌عنوان نمونه، برنامه‌هایی برای ایجاد چارچوب‌های قانونی در زمینه حریم خصوصی داده‌ها و امنیت سایبری پیش‌بینی شده است که از سوابق موفق کشورهای پیشرو مانند استونی و فنلاند الهام گرفته‌اند (10). از منظر فنی نیز

توسعه استانداردهای جهانی برای تبادل اطلاعات سلامت، مانند FHIR، از جمله اقداماتی است که این استراتژی برای تحقق آن برنامه‌ریزی کرده است.

در بعد پژوهش و توسعه، سند WHO اولویت‌هایی برای تحقیقات کاربردی در حوزه سلامت دیجیتال ترسیم کرده است. این اولویت‌ها شامل توسعه الگوریتم‌های تشخیص بیماری‌های غیرواگیر بر پایه داده‌های بالینی، بررسی پیامدهای سلامت روان ناشی از استفاده مفرط از ابزارهای دیجیتال، طراحی مدل‌های هزینه–اثربخشی برای سلامت از راه دور، و بررسی قابلیت مقیاس‌پذیری راهکارهای هوش مصنوعی در سیستم‌های سلامت است (12). در این راستا، یکی از مهم‌ترین پروژه‌های پژوهشی مورد حمایت WHO توسعه سیستم‌های هشدار سریع برای اپیدمی‌ها با تکیه بر تحلیل بلادرنگ داده‌های محیطی و بالینی بوده است که در برخی کشورهای آفریقایی نیز به‌طور آزمایشی اجرا شده است.

نکته مهم دیگر در این سند، تمرکز ویژه بر کشورهای کم‌برخوردار و درحال‌توسعه است. درحالی‌که فناوری‌های سلامت دیجیتال در کشورهای پیشرفته با سرعتی چشمگیر توسعه یافته‌اند، بسیاری از کشورهای فقیر هنوز به زیرساخت‌های ارتباطی، تجهیزات پزشکی دیجیتال و نیروی انسانی آموزش‌دیده دسترسی کافی ندارند. سند WHO ضمن اذعان به این شکاف دیجیتال، راهکارهایی برای کاهش آن پیشنهاد کرده است. از جمله این راهکارها می‌توان به تقویت همکاری‌های فنی منطقه‌ای، انتقال فناوری به کشورهای هدف، و طراحی مدل‌های تأمین مالی پایدار برای اجرای برنامه‌های سلامت دیجیتال اشاره کرد (15). همچنین، توسعه زبان‌های محلی برای رابط‌های کاربری سیستم‌های دیجیتال سلامت و استفاده از فناوری‌های کم‌هزینه مانند تلفن‌های همراه ساده، به‌عنوان ابزارهای جایگزین در مناطق محروم مطرح شده‌اند.

از دیگر چالش‌های مطرح‌شده در این سند، موضوع اعتماد عمومی به فناوری‌های دیجیتال در حوزه سلامت است. فقدان شفافیت در نحوه استفاده از داده‌ها، نگرانی‌های مربوط به سوءاستفاده تجاری از اطلاعات بیماران، و تهدیدات امنیت سایبری از جمله عواملی هستند که می‌توانند مانع از پذیرش عمومی سیستم‌های دیجیتال شوند. برای مقابله با این چالش‌ها، WHO بر تدوین سیاست‌های حاکمیت داده، ارائه آموزش‌های عمومی در زمینه سواد سلامت دیجیتال، و طراحی سازوکارهای شفاف برای کنترل کاربران تأکید کرده است (1).

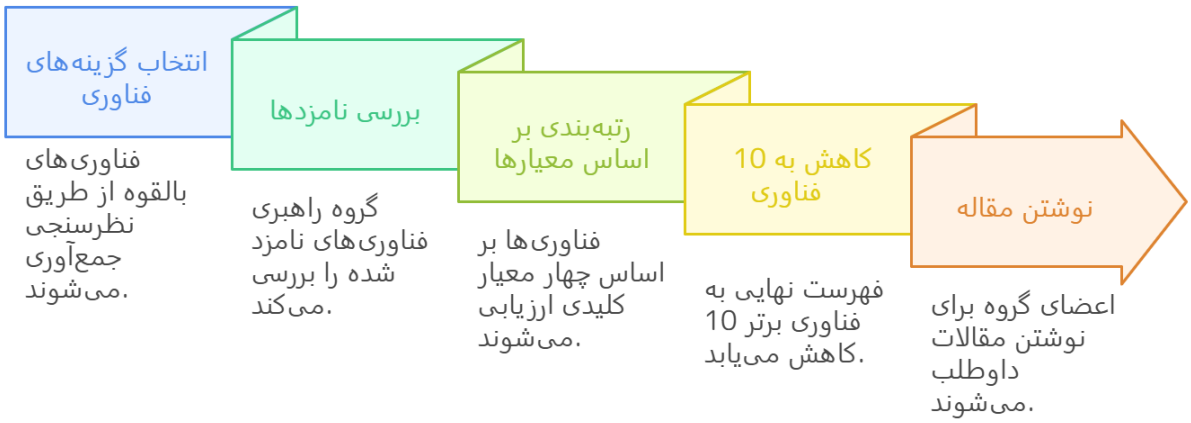
در کنار این چالش‌ها، فرصت‌های گسترده‌ای نیز در افق سلامت دیجیتال پیش‌بینی شده است. به‌ویژه در دوران پساکرونا، پذیرش عمومی نسبت به راهکارهایی مانند مشاوره از راه دور، نسخه‌نویسی الکترونیکی، و سیستم‌های نظارت بر علائم حیاتی از راه دور افزایش یافته است. این تحول فرهنگی می‌تواند زمینه‌ساز ورود سریع‌تر فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی در تشخیص، بلاکچین در امنیت داده، و واقعیت افزوده در آموزش پزشکی گردد (14). در همین راستا، WHO بر لزوم همگرایی میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های فناور، نهادهای بهداشتی و جامعه مدنی برای طراحی راهکارهای نوآورانه تأکید دارد، به‌گونه‌ای که فناوری نه‌تنها کارایی خدمات سلامت را ارتقا دهد بلکه دسترسی برابر برای همه گروه‌ها را تضمین کند.

در مجموع، سند استراتژی جهانی سلامت دیجیتال ۲۰۲۵–۲۰۲۰ یک مدل سیاست‌گذاری یکپارچه، چندبخشی و داده‌محور برای توسعه پایدار سلامت دیجیتال ارائه می‌دهد. این سند با شناسایی هم‌زمان فرصت‌ها و چالش‌ها، کشورها را در مسیر طراحی نظام سلامت هوشمند و مردم‌محور هدایت می‌کند.

## WEF – ۱۰ فناوری نوظهور برتر ۲۰۲۳

گزارش «۱۰ فناوری نوظهور برتر سال ۲۰۲۳» که توسط مجمع جهانی اقتصاد (World Economic Forum) منتشر شده است، به‌عنوان یکی از منابع معتبر جهانی در زمینه شناسایی فناوری‌های آینده‌ساز شناخته می‌شود. این گزارش، هر ساله با همکاری نهادهای علمی، پژوهشی و صنعتی و تحت نظارت هیئت مشاوران علمی WEF تهیه می‌شود و تمرکز اصلی آن بر فناوری‌هایی است که توانایی ایجاد تحولات بنیادین در ابعاد اجتماعی، زیست‌محیطی، و صنعتی در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه دارند. برخلاف گزارش‌هایی مانند مک‌کینزی که عمدتاً مبتنی بر شاخص‌های بازار، ثبت اختراع یا حجم سرمایه‌گذاری هستند، رویکرد WEF در انتخاب فناوری‌ها تلفیقی از تحلیل کارشناسی و ارزیابی چندبُعدی بر اساس اثرات فراگیر اجتماعی، اخلاقی و اکولوژیک است (7).

در فرایند انتخاب این ۱۰ فناوری نوظهور، ابتدا فهرستی گسترده از فناوری‌های پیشنهادی توسط مراکز تحقیقاتی، دانشگاه‌ها و شرکت‌های فناور در سراسر جهان گردآوری می‌شود. سپس این فناوری‌ها در یک فرآیند ارزیابی سه‌مرحله‌ای شامل بررسی ادبیات علمی، تحلیل سیاست‌گذاری، و ارزیابی توسط گروهی از متخصصان منتخب فیلتر می‌شوند. در نهایت، فناوری‌هایی انتخاب می‌شوند که در سه حوزه اصلی—تأثیر اجتماعی، مزیت زیست‌محیطی و تحول صنعتی—بالاترین نمره را کسب کرده باشند (9). این فرایند نه‌تنها با هدف شناسایی فناوری‌های «نوآورانه» بلکه با تمرکز بر فناوری‌هایی انجام می‌شود که قابلیت مقیاس‌پذیری، پاسخ به چالش‌های جهانی و افزایش برابری دسترسی را داشته باشند.




**شکل ۷. فرایند شناسایی اولویت های فناوری در گزارش "۱۰ فناوری نوظهور برتر سال ۲۰۲۳"**

یکی از شاخص‌ترین فناوری‌های انتخاب‌شده در این گزارش، «محاسبات مولکولی» است که به‌عنوان نسل جدیدی از پردازش اطلاعات شناخته می‌شود. در این فناوری، برخلاف ساختار دودویی سنتی در رایانه‌ها، از ساختارهای شیمیایی و پیوندهای مولکولی برای ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات استفاده می‌شود. این فناوری که قابلیت فشرده‌سازی داده‌ها در ابعاد نانومتری و مصرف انرژی فوق‌العاده پایین دارد، برای کاربردهایی مانند مدل‌سازی زیستی، کشف دارو، و رمزنگاری کوانتومی اهمیت ویژه‌ای دارد (6).

فناوری دوم که توجه زیادی را به خود جلب کرده، «پیش‌بینی همه‌گیری‌ها با هوش مصنوعی» است. این فناوری از ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های محیطی، بهداشتی و رفتاری بهره می‌گیرد تا احتمال بروز بیماری‌های واگیردار در مقیاس منطقه‌ای یا جهانی را پیش‌بینی کند. مدل‌های توسعه‌یافته در این حوزه با استفاده از داده‌های جمعیتی، تغییرات اقلیمی، جابجایی انسانی و شاخص‌های زیست‌محیطی می‌توانند مناطق پرخطر را شناسایی کرده و هشدارهای زودهنگام ارائه دهند (11). از جمله نمونه‌های عملی این فناوری می‌توان به پروژه BlueDot اشاره کرد که قبل از شیوع کووید-۱۹ توانسته بود نشانه‌های اولیه ویروس را از چین شناسایی کند.

در حوزه کشاورزی، فناوری «فتوسنتز مصنوعی» به‌عنوان راهکاری برای افزایش بهره‌وری گیاهان بدون افزایش مصرف منابع طبیعی معرفی شده است. این فناوری با الگوبرداری از فرآیندهای زیستی گیاهان، از ساختارهای فوتوکاتالیستی برای تبدیل نور خورشید به انرژی قابل استفاده در سنتز مولکول‌های آلی بهره می‌گیرد. نتایج اولیه نشان داده‌اند که در برخی موارد این روش می‌تواند بازدهی فتوسنتزی را تا سه برابر افزایش دهد. این فناوری می‌تواند انقلابی در حوزه امنیت غذایی، کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، و پایداری منابع خاک و آب ایجاد کند (2).

**شکل ۸. فناوری‌های نوظهور WEF در چهار حوزه کلیدی: سلامت، کشاورزی، محاسبات و انرژی**

در حوزه سلامت، فناوری «واکسن‌های mRNA نسل دوم» جایگاه مهمی دارد. برخلاف واکسن‌های اولیه که تمرکز اصلی آن‌ها بر کووید-۱۹ بود، نسل جدید mRNA قابلیت هدف‌گیری دقیق‌تر، پایداری دمایی بیشتر و زمان توسعه کوتاه‌تری دارد. این فناوری نه‌تنها در واکنش به پاندمی‌های آینده، بلکه در درمان بیماری‌هایی مانند سرطان، مالاریا و بیماری‌های خودایمنی نیز کاربرد دارد. توسعه پلتفرم‌های سفارشی‌سازی‌شده و چاپ زیستی برای تولید واکسن‌های mRNA با زمان پاسخ کمتر از سه ماه، افق جدیدی برای پزشکی فردمحور ایجاد کرده است (14).

در حوزه انرژی، فناوری «جاذب‌های گرافنی برای تصفیه آب و تولید انرژی همزمان» به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین فناوری‌ها مطرح شده است. این فناوری با استفاده از ساختارهای نانومتخلخل گرافن قادر است هم‌زمان فرآیند تصفیه آب از آلاینده‌ها و نمک‌زدایی را با تولید برق از طریق اختلاف گرمایی و الکترولیتی ترکیب کند. این قابلیت، به‌ویژه برای مناطق کم‌برخوردار و فاقد زیرساخت‌های انرژی و آب پاک، یک مزیت دوگانه فراهم می‌سازد (1). همچنین از منظر پایداری زیست‌محیطی، استفاده از گرافن باعث کاهش نیاز به مواد شیمیایی در فرآیند تصفیه شده و ردپای کربنی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

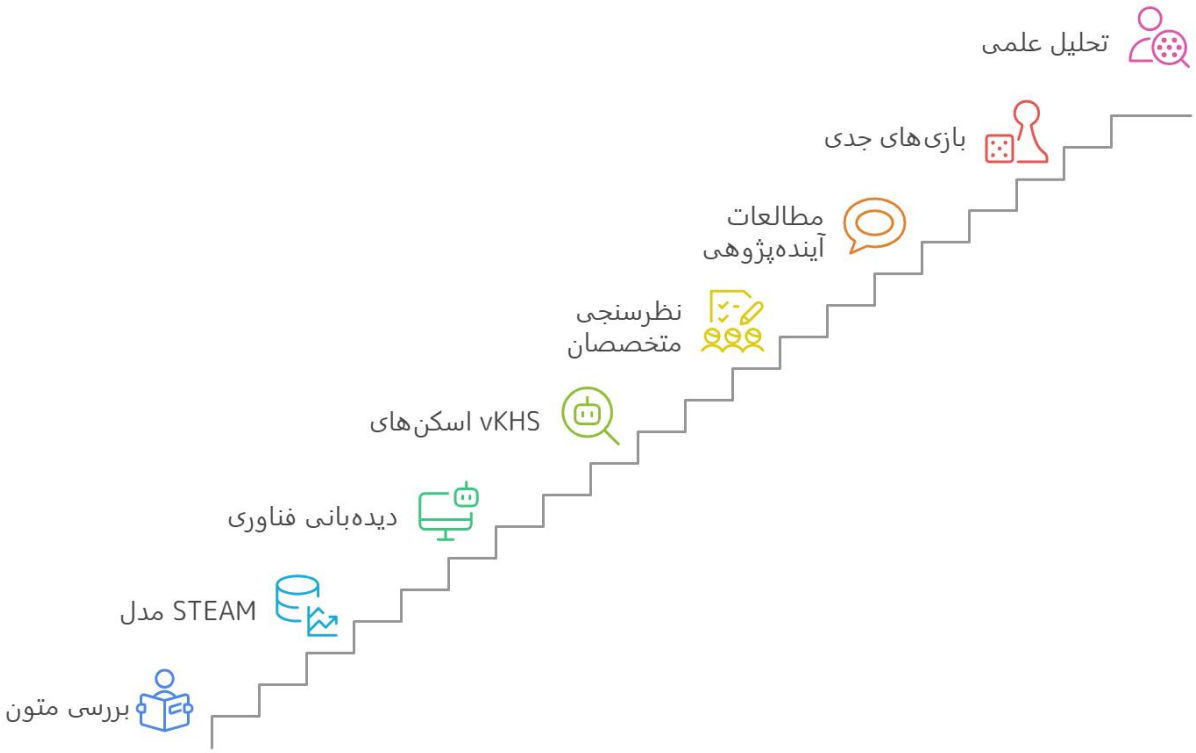
وجه تمایز مهم رویکرد WEF در این است که فناوری‌ها صرفاً بر اساس نو بودن یا جذابیت فناورانه انتخاب نمی‌شوند، بلکه اثرات آن‌ها بر زندگی مردم، پایداری محیطزیست، و تحول در سازوکارهای اقتصادی نیز مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به همین دلیل، فناوری‌هایی نظیر «شبیه‌سازی عصبی زیستی»، «حسگرهای زیستی پوشیدنی نسل جدید»، و «کربن‌زدایی از زنجیره‌های تأمین صنعتی» نیز در این فهرست قرار گرفته‌اند، زیرا در کنار قابلیت‌های فناورانه، به نیازهای واقعی و روزمره جوامع پاسخ می‌دهند (12).

در نهایت، گزارش WEF از فناوری به‌عنوان ابزار تغییر تمدنی یاد می‌کند. این گزارش با ارائه چارچوبی مبتنی بر پیامدهای اخلاقی و اجتماعی فناوری، مسیر مشخصی برای هدایت سرمایه‌گذاری‌ها، طراحی سیاست‌های عمومی و توسعه همکاری‌های فراملی پیشنهاد می‌دهد. همچنین به‌صورت ضمنی نشان می‌دهد که نوآوری باید در خدمت بهبود کیفیت زندگی، افزایش تاب‌آوری زیستی و اجتماعی، و بازآفرینی عدالت در استفاده از منابع باشد. رویکردی که بیش از صرفاً نگاه فنی، از یک دیدگاه انسانی و آینده‌نگرانه به فناوری می‌نگرد (3).

## NATO – روندهای علم و فناوری ۲۰۴۳–۲۰۲۳

گزارش «روندهای علم و فناوری ۲۰۴۳–۲۰۲۳» منتشرشده از سوی سازمان پیمان آتلانتیک شمالی (NATO) یکی از جامع‌ترین تحلیل‌های آینده‌نگر در حوزه علم، فناوری و امنیت است که تمرکز ویژه‌ای بر فناوری‌های تحول‌آفرین یا مخرب (Emerging Disruptive Technologies – EDTs) دارد. این فناوری‌ها از دید ناتو آن دسته از نوآوری‌هایی هستند که در افق زمانی دو دهه آینده می‌توانند توازن قدرت، ساختارهای دفاعی، و شیوه‌های نبرد را به‌صورت بنیادی تغییر دهند. ویژگی مشترک تمام این فناوری‌ها، سرعت بالای پیشرفت، قابلیت کاربرد دوگانه (نظامی و غیرنظامی)، و امکان اثرگذاری ژئوپلیتیکی آن‌هاست. این گزارش با بهره‌گیری از داده‌های کمی، بررسی اسناد راهبردی، و تحلیل دیدگاه‌های متخصصان نظامی و فناورانه تدوین شده است (1).

در صدر فناوری‌های مخرب، «هوش مصنوعی و یادگیری ماشین» قرار دارند. از منظر ناتو، هوش مصنوعی نه‌تنها در زمینه تحلیل داده‌های نظامی، شبیه‌سازی میدان‌های جنگ و تصمیم‌سازی فرماندهی اهمیت دارد، بلکه در کاربردهایی همچون پهپادهای خودمختار، سامانه‌های پدافندی، و ربات‌های جست‌وجو و نجات نیز نقشی حیاتی ایفا می‌کند. ویژگی‌هایی مانند سرعت پردازش تصمیم، سازگاری با شرایط متغیر، و کاهش وابستگی به نیروی انسانی، موجب شده‌اند تا AI به‌عنوان ستون فقرات فناوری‌های دفاعی آینده تلقی شود (14). همچنین، قابلیت تشخیص الگوها از داده‌های پراکنده، پشتیبانی از عملیات اطلاعاتی و تحلیل تهدیدات سایبری از دیگر کاربردهای کلیدی هوش مصنوعی در چشم‌انداز ناتو است.




**شکل ۸. فرایند شناسایی اولویت‌های پژوهش و فناوری در گزارش "روندهای علم و فناوری ۲۰۲۳-۲۰۴۳"**

در کنار هوش مصنوعی، فناوری‌های «خودمختار» و «سامانه‌های بدون سرنشین» از دیگر ستون‌های مهم تحولات فناورانه دفاعی هستند. ناتو تأکید دارد که تحول در این حوزه صرفاً شامل هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها) نیست، بلکه زمینی، دریایی، زیرآبی و فضایی را نیز در بر می‌گیرد. سامانه‌هایی که بتوانند در محیط‌های متخاصم، با حداقل دخالت انسانی، تصمیم‌گیری، پیمایش و اجرای عملیات داشته باشند، قدرت مانور و انعطاف‌پذیری نیروهای نظامی را به‌طرز چشمگیری افزایش می‌دهند. به‌ویژه در محیط‌های پرخطر یا ناشناخته، استفاده از ربات‌های خودمختار می‌تواند تلفات انسانی را کاهش داده و دقت عملیات را افزایش دهد (9).

یکی دیگر از فناوری‌های محوری در چشم‌انداز ناتو، «فضا» است. با تجاری‌سازی فضا و گسترش ماهواره‌های کوچک (CubeSats)، بسترهای جدیدی برای نظارت، ارتباطات و رهگیری تهدیدات به وجود آمده‌اند. ناتو تأکید می‌کند که تسلط بر زیرساخت‌های فضایی—از جمله موقعیت‌یابی جهانی، انتقال داده‌های رمزنگاری‌شده، و پایش آنی میدان نبرد—یکی از عوامل تعیین‌کننده در برتری اطلاعاتی و راهبردی خواهد بود. هم‌زمان با کاهش هزینه پرتاب و توسعه فناوری‌های بازیافت موشکی، رقابت بر سر فضا وارد فاز تازه‌ای شده که امنیت زیرساخت‌های فضایی را نیز به چالش کشیده است (11).

در حوزه «فناوری‌های کوانتومی»، تمرکز ناتو بر سه زمینه اصلی است: محاسبات کوانتومی، حسگرهای کوانتومی، و ارتباطات کوانتومی. از منظر امنیتی، محاسبات کوانتومی می‌توانند در آینده توان رمزگشایی سیستم‌های رمزنگاری‌شده سنتی را داشته باشند، مسئله‌ای که چالش‌های عمیقی برای حاکمیت سایبری به وجود می‌آورد. در عین حال، سامانه‌های رمزنگاری کوانتومی نیز به‌عنوان یک راهکار دفاعی مطرح هستند که از طریق اصول مکانیک کوانتومی، امنیت داده‌ها را تضمین می‌کنند. ناتو تأکید دارد که توسعه

زیرساخت‌های مقاوم در برابر حملات کوانتومی و آموزش نیروهای متخصص در این حوزه، از ضروریات راهبردی دو دهه آینده خواهد بود (3).

در کنار فناوری‌های فوق، ناتو به «فناوری‌های زیستی» و «مدلسازی مغزی» نیز توجه دارد. کاربردهایی مانند بهبود توان فیزیکی و ذهنی نیروهای انسانی، توسعه داروهای شخصی‌سازی‌شده برای مقابله با سلاح‌های زیستی، و استفاده از واسطهای مغز–رایانه برای هدایت سامانه‌ها، نشان‌دهنده جهت‌گیری جدید ناتو به سمت هم‌گرایی علم زیست‌شناسی و فناوری اطلاعات است (13). چنین روندی نه‌تنها مرزهای سنتی میان انسان و ماشین را بازتعریف می‌کند، بلکه سؤال‌های اخلاقی عمیقی درباره نظارت، حاکمیت فردی، و استفاده از فناوری برای کنترل شناخت نیز برمی‌انگیزد.

ویژگی برجسته گزارش ناتو، تحلیل روندهای علمی و فناورانه در بستر امنیتی است. برخلاف اسناد عمومی که بیشتر بر نوآوری‌های بازارمحور یا اجتماعی تمرکز دارند، این گزارش تلاش می‌کند اثرات فناوری را در زمینه‌های عملیاتی، تاکتیکی، و ژئوپلیتیکی ارزیابی کند. در همین راستا، ناتو فناوری‌های مخرب را نه به‌عنوان تهدید ذاتی، بلکه به‌عنوان فرصتی راهبردی برای ارتقای آمادگی و انعطاف‌پذیری نیروها تلقی می‌کند، مشروط بر آنکه توسعه آن‌ها با سازوکارهای کنترلی، اخلاقی و حقوقی همراه باشد (4).

گزارش همچنین هشدار می‌دهد که غفلت از این فناوری‌ها می‌تواند منجر به «شکاف فناورانه» میان کشورهای عضو و غیرعضو شود. به‌ویژه کشورهایی که در توسعه زیرساخت‌های هوش مصنوعی، ارتباطات امن یا فناوری‌های کوانتومی عقب‌تر هستند، ممکن است در دهه‌های آتی با تهدیداتی از سوی بازیگران دولتی و غیردولتی مواجه شوند که از این فناوری‌ها برای جنگ‌های هیبریدی، حملات سایبری، یا عملیات اطلاعاتی استفاده می‌کنند (2).

در نهایت، چشم‌انداز ناتو برای سال ۲۰۴۳، شکلی از قدرت نرم و سخت فناورانه است که در آن علم و امنیت به‌صورت تنگاتنگی به‌هم گره خورده‌اند. از این منظر، نوآوری فناورانه باید با هوشمندی سیاسی، همکاری بین‌المللی، و نهادسازی اخلاقی همراه شود تا ضمن بهره‌برداری از فرصت‌های فناورانه، از وقوع تهدیدات فناورانه نیز پیشگیری گردد. این نگاه تلفیقی، چارچوبی ارزشمند برای سیاست‌گذاران و پژوهشگران در حوزه مطالعات آینده و امنیت بین‌الملل فراهم می‌سازد.

## مقایسه تطبیقی رویکردها

با توجه به تنوع اسناد بین‌المللی بررسی‌شده در این مطالعه، بخش حاضر به مقایسه تطبیقی میان رویکردهای مطرح در شناسایی جبهه‌های دانش، روندهای فناورانه، و اولویت‌های راهبردی پژوهش می‌پردازد. این مقایسه نه‌تنها به شناخت تفاوت‌های مفهومی و تحلیلی میان نهادهای تولیدکننده این اسناد کمک می‌کند، بلکه امکان تبیین جایگاه هر یک در زنجیره سیاست‌گذاری علم و فناوری را نیز فراهم می‌سازد. برای این منظور، چهار شاخص کلیدی شامل ساختار تحلیلی، رویکرد روش‌شناختی، حوزه تمرکز موضوعی، و نوع خروجی مقایسه می‌شوند.

در گام نخست، می‌توان به تفاوت بنیادین در ساختار تحلیلی گزارش‌ها اشاره کرد. به‌عنوان مثال، گزارش Clarivate بر مبنای روش تحلیل هم‌استنادی و شاخص CPT (Citation Per Topic) تمرکز دارد که به‌طور مستقیم از داده‌های علمی استخراج می‌شود و جبهه‌های پژوهشی داغ را بر اساس رشد استنادها و هم‌پوشانی موضوعی شناسایی می‌کند. این نوع تحلیل بیشتر در زمره تحلیل‌های علم‌سنجی قرار می‌گیرد و بنیانی تجربی و آماری دارد (1). در مقابل، گزارش McKinsey از روش‌های اکتشافی بهره می‌گیرد که ترکیبی از داده‌های ثبت اختراع، حجم سرمایه‌گذاری، میزان پژوهش‌های منتشرشده، و روندهای بازار است و تمرکز آن بیشتر بر پیش‌بینی اثرات اقتصادی و صنعتی فناوری‌هاست (6).

از سوی دیگر، گزارش WHO درباره استراتژی جهانی سلامت دیجیتال به‌صورت برنامه‌محور و هدف‌مدار تنظیم شده و بر اساس نیازهای بهداشتی جهانی، اولویت‌های فناوری را در بستر نظام سلامت کشورها تعیین می‌کند. در این گزارش، جنبه‌های اخلاقی، نابرابری در دسترسی، و چالش‌های کشورهای کم‌برخوردار از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (8). به‌علاوه، مجمع جهانی اقتصاد در گزارش فناوری‌های نوظهور خود، از رویکرد چندمعیاره استفاده می‌کند که تلفیقی از داوری کارشناسی، تحلیل پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی، و پتانسیل نوآوری را در بر دارد (7).

شکل ۱۲. مقایسه ساختار مفهومی و روش‌شناسی گزارش‌های بین‌المللی فناوری

در ادامه، تفاوت‌های مفهومی میان اصطلاحات کلیدی همچون "روند فناوری"، "جبهه پژوهشی"، و "اولویت راهبردی" بررسی می‌شود. اصطلاح "روند فناوری" بیشتر از منظر زمان‌محور تعریف می‌شود و به فناوری‌هایی اشاره دارد که در حال گسترش هستند و اثرگذاری آن‌ها در آینده قابل‌انتظار است. این مفهوم در گزارش‌هایی مانند McKinsey و Gartner کاربرد دارد که تمرکز آن‌ها بر فناوری‌های نوظهور و در حال رشد است (5). در مقابل، "جبهه پژوهشی" به حوزه‌هایی اطلاق می‌شود که در حال حاضر دارای بیشترین نرخ رشد علمی و بیشترین میزان فعالیت علمی در میان محققان هستند، که توسط داده‌های علم‌سنجی قابل شناسایی است (13).

در سطحی دیگر، مفهوم "اولویت راهبردی" پژوهش معمولاً در اسناد سیاست‌گذاری به‌کار می‌رود و هدف آن هدایت منابع، بودجه و حمایت‌ها به سمت حوزه‌هایی است که از نظر ملی یا بین‌المللی حیاتی محسوب می‌شوند. این مفهوم در اسنادی مانند OECD و WHO نقش مهمی دارد که در آن‌ها هدف، نه صرفاً شناسایی روندهای علمی بلکه همسوسازی آن‌ها با اهداف توسعه پایدار، عدالت اجتماعی، و مقابله با بحران‌های جهانی است (4).

این تفاوت‌های مفهومی، پیامدهای مهمی در نحوه تدوین سیاست‌های ملی علم، فناوری و نوآوری دارند. کشوری که به‌دنبال ارتقای جایگاه خود در مرزهای دانش است، ممکن است بیشتر به تحلیل جبهه‌های پژوهشی و هم‌استنادی توجه کند، در حالی‌که کشوری که به‌دنبال پاسخ به بحران‌های اجتماعی و زیست‌محیطی است، تمرکز خود را بر اولویت‌های راهبردی و کاربردی قرار می‌دهد (12). از این‌رو، تفکیک مفهومی این واژگان می‌تواند از سردرگمی در طراحی اسناد راهبردی و تخصیص منابع جلوگیری کند.

یکی دیگر از محورهای مهم مقایسه، خروجی‌های نهایی این اسناد است. در گزارش‌هایی مانند Clarivate یا Tech Trends Deloitte، خروجی‌ها به‌صورت فهرستی از جبهه‌ها یا فناوری‌ها با رتبه‌بندی علمی ارائه می‌شوند (11). در مقابل، گزارش‌هایی مانند WHO یا NATO، خروجی‌هایی به شکل دستورالعمل‌های سیاستی، سناریوهای آینده، و تحلیل‌های اثرگذاری ارائه می‌دهند که می‌توانند مستقیماً در فرایندهای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گیرند (3).

همچنین باید به دامنه جغرافیایی و تمرکز محتوایی هر گزارش اشاره کرد. برخی اسناد مانند گزارش OECD یا WHO دارای دامنه جهانی و با رویکرد توسعه‌ای هستند و بیشتر به نیازهای کشورهای کم‌برخوردار و نابرابری‌های فناورانه توجه دارند (10). اما گزارش‌هایی مانند Clarivate، NATO یا WEF عمدتاً از منظر کشورهای صنعتی و پیشرفته تنظیم می‌شوند و تمرکز آن‌ها بر رقابت علمی، مزیت فناورانه، و تسلط بر بازارهای نوظهور است.

در پایان این بخش، جدول زیر مروری تطبیقی از پنج گزارش کلیدی مورد تحلیل را ارائه می‌دهد تا تفاوت‌ها و شباهت‌های آن‌ها در چهار بُعد دامنه، حوزه تمرکز، روش‌شناسی و خروجی نهایی به‌صورت منسجم‌تر نشان داده شود.

**جدول ۱. مقایسه تطبیقی گزارش‌های کلیدی علم و فناوری بین‌المللی بر اساس چهار شاخص کلیدی**

| نهاد منتشرکننده | دامنه پوشش | حوزه تمرکز | روش‌شناسی تحلیل | نوع خروجی‌ها |
|---|---|---|---|---|
| Clarivate (۲۰۲۳) | جهانی | جبهه‌های پژوهشی داغ و نوظهور | تحلیل هم‌استنادی، شاخص CPT ، شاخص P | فهرست جبهه‌ها، داده‌نما، طبقه‌بندی حوزه‌ای |
| McKinsey Digital (۲۰۲۳) | جهانی | روندهای تحول‌آفرین فناوری در صنعت | تحلیل پتنت، سرمایه‌گذاری، مقالات علمی، مهارت‌های بازار | ماتریس روندها، پیش‌بینی اثرات، خوشه‌بندی فناوری |
| WHO (۲۰۲۱) | جهانی با تأکید بر کشورهای کم‌برخوردار | سلامت دیجیتال | تحلیل سیاستی، اجماع متخصصان، مشورت منطقه‌ای | اصول راهبردی، برنامه عمل، توصیه‌های سیاستی |
| World Economic Forum (۲۰۲۳) | جهانی | فناوری‌های نوظهور با اثر اجتماعی–اقتصادی بالا | انتخاب هیئت داوران، ارزیابی چندمعیاره، تحلیل کاربردی | فهرست فناوری‌ها، تحلیل پیامدها، نقشه اثرات |
| NATO (۲۰۲۳) | کشورهای عضو ناتو | فناوری‌های مخرب (EDT) با کاربرد امنیتی | تحلیل سناریو، نظرسنجی نخبگان، بررسی روندهای نظامی | گزارش روند، طبقه‌بندی تهدیدمحور، نقشه زمانی توسعه |

با تحلیل تطبیقی این اسناد، می‌توان نتیجه گرفت که هیچ‌کدام به‌تنهایی برای ترسیم کامل جبهه‌های دانش کافی نیستند. بلکه ترکیب بین‌رویکردی که داده‌های علم‌سنجی، تحلیل‌های اقتصادی، پیامدهای اجتماعی، و سیاست‌های سلامت جهانی را هم‌زمان در نظر گیرد، بهترین چشم‌انداز را برای تدوین سیاست‌های علمی آینده‌نگر ارائه می‌دهد. این رویکرد ترکیبی می‌تواند پایه‌ای برای طراحی سامانه‌های پایش هوشمند علم و فناوری در سطح ملی باشد.

## شناسایی جبهه‌های دانشی مشترک

در این بخش، با هدف ارائه یک چارچوب تلفیقی و مقایسه‌ای، خوشه‌های دانشی تکرارشونده و هم‌راستایی که در اسناد بین‌المللی گوناگون به‌صورت مکرر مطرح شده‌اند، مورد تحلیل قرار می‌گیرند. بررسی اسناد منتشر شده از سوی نهادهایی مانند Clarivate، McKinsey، WHO، WEF و NATO نشان می‌دهد که علیرغم تفاوت در اهداف، روش‌شناسی و حوزه‌های تمرکز، الگوهای مشابهی در اولویت‌بندی جبهه‌های دانش وجود دارد که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان نقاط هم‌گرای بین‌المللی در علم و فناوری یاد کرد. این هم‌پوشانی‌های دانشی به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند هوش مصنوعی، سلامت دیجیتال، کشاورزی هوشمند، انرژی پایدار، و داده‌های بزرگ نمایان است که نشان از شکل‌گیری اجماع جهانی حول اولویت‌های استراتژیک برای دهه پیش‌رو دارد.

در صدر این هم‌پوشانی‌ها، فناوری «هوش مصنوعی» قرار دارد که تقریباً در تمام اسناد مورد بررسی به‌عنوان یک حوزه بنیادین و تحول‌آفرین معرفی شده است. گزارش McKinsey با تحلیل دقیق داده‌های ثبت اختراع، میزان پژوهش‌های تولیدشده و حجم سرمایه‌گذاری انجام‌شده، AI را در مرکز تحول صنعتی آینده قرار داده و آن را موتور محرک سایر فناوری‌ها نظیر رباتیک، اینترنت اشیا و خدمات دیجیتال معرفی می‌کند (6). در همین راستا، گزارش NATO نیز بر قابلیت‌های نظامی و اطلاعاتی هوش مصنوعی تمرکز کرده و آن را عامل کلیدی در برتری راهبردی آینده قلمداد می‌کند (1).

در ادامه، حوزه «سلامت دیجیتال» به‌عنوان یکی دیگر از جبهه‌های دانشی مشترک مطرح می‌شود. استراتژی جهانی WHO در زمینه سلامت دیجیتال بر توسعه زیرساخت‌های دیجیتال سلامت، پرونده الکترونیک، تله‌مدیسین، و پلتفرم‌های هوش مصنوعی در تشخیص و درمان تأکید دارد (8). این جهت‌گیری با یافته‌های Clarivate که رشد فزاینده تحقیقات در پزشکی شخصی‌سازی‌شده، تصویربرداری هوشمند و پایش از راه دور را گزارش می‌دهد، هم‌راستاست (13). همچنین WEF در گزارش خود از ۱۰ فناوری نوظهور، چندین مورد را با کاربرد مستقیم در سلامت معرفی می‌کند، از جمله فناوری‌های زیستی و سیستم‌های زیست‌محور قابل‌برنامه‌ریزی (7).

حوزه «انرژی پایدار» نیز در اغلب گزارش‌ها به‌عنوان یک خوشه دانشی نوظهور با پیامدهای گسترده زیست‌محیطی، صنعتی و ژئوپلیتیکی مورد توجه قرار گرفته است. در گزارش McKinsey، فناوری‌های مرتبط با انرژی خورشیدی، باتری‌های نسل جدید، و زیرساخت‌های هوشمند انرژی در زمره روندهای برتر معرفی شده‌اند که رشد سریع سرمایه‌گذاری‌ها در این زمینه‌ها را تأیید می‌کنند (6). همچنین Clarivate رشد جبهه‌های پژوهشی مرتبط با بهینه‌سازی مصرف انرژی، تبدیل انرژی و مدل‌سازی آب و هوایی را شناسایی کرده است (2). این موارد با رویکرد سازمان‌هایی مانند OECD که بر پیوند میان نوآوری فناورانه و گذار سبز تمرکز دارند، هم‌راستا هستند (4).

از دیگر حوزه‌های مشترک، می‌توان به «کشاورزی هوشمند» اشاره کرد که با ترکیب فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، حسگرهای محیطی، و اینترنت اشیا در جهت ارتقاء بهره‌وری، پایداری و امنیت غذایی به کار گرفته می‌شود. WEF در گزارش ۲۰۲۳ خود فناوری‌هایی نظیر ریزکپسول‌سازی مواد مغذی و حسگرهای پایش خاک را معرفی می‌کند که به‌طور مستقیم در بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی کاربرد دارند (7). این موضوع همچنین در گزارش‌های McKinsey و Clarivate نیز مطرح شده و تأکید شده است که افزایش پیچیدگی سیستم‌های تأمین غذا، نیازمند نوآوری فناورانه است (11).

در کنار این موارد، «کلان‌داده‌ها» یا داده‌های بزرگ یکی دیگر از پیشران‌های دانشی تکرارشونده است که به‌عنوان بستر زیرین تحلیل، تصمیم‌گیری، و نوآوری در همه حوزه‌ها ایفای نقش می‌کند. Clarivate با تحلیل روندهای هم‌استنادی نشان داده که علوم داده و یادگیری ماشین بیشترین هم‌پوشانی را با سایر جبهه‌های دانشی دارند (13). همچنین WEF بر اهمیت سیستم‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده در کشاورزی، انرژی، سلامت و تغییرات اقلیمی تأکید دارد (7).

اما در کنار این هم‌پوشانی‌ها، برخی واگرایی‌های مفهومی و محتوایی نیز در اسناد مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، NATO بیشتر بر فناوری‌هایی تمرکز دارد که پتانسیل ایجاد تغییرات ژئوپلیتیکی یا نظامی دارند مانند فضا، سامانه‌های خودمختار، یا رمزنگاری کوانتومی (1). در حالی‌که WHO و OECD رویکردی اجتماعی و توسعه‌محور دارند و بیشتر به اثرات فناوری‌ها در حوزه‌های برابری سلامت، توسعه انسانی و گذارهای پایدار توجه می‌کنند (4). همچنین، تفاوت در دامنه جغرافیایی داده‌ها باعث شده است که برخی فناوری‌ها مانند بلاک‌چین یا واقعیت افزوده تنها در برخی اسناد پررنگ شوند، نه در همه آن‌ها.

در راستای جمع‌بندی این تحلیل، می‌توان چارچوبی سه‌سطحی برای طبقه‌بندی جبهه‌های دانش در سطح بین‌المللی پیشنهاد داد. در سطح اول، جبهه‌های بنیادین همچون هوش مصنوعی و کلان‌داده قرار دارند که زیرساختی برای توسعه سایر حوزه‌ها ایجاد می‌کنند. در سطح دوم، جبهه‌های بخشی مانند سلامت دیجیتال، کشاورزی هوشمند و انرژی پایدار مطرح می‌شوند که متکی بر فناوری‌های سطح اول بوده و در حوزه‌های کاربردی متمرکزند. در سطح سوم نیز جبهه‌های خاص و تخصصی قرار دارند که مرتبط با اقتضائات جغرافیایی، راهبردی یا موضوعی هر کشور یا نهاد هستند مانند دفاع فضایی، فناوری‌های زیستی یا سامانه‌های رمزنگاری کوانتومی.

این چارچوب سه‌لایه می‌تواند مبنایی برای طراحی نقشه‌های دانشی ملی باشد و در توسعه سامانه‌های پایش هوشمند جبهه‌های علم و فناوری به‌کار رود. بر این اساس، نهادهای سیاست‌گذار باید علاوه‌بر رصد تحولات جهانی، به‌طور هم‌زمان تحلیل‌های داخلی و بومی‌سازی‌شده نیز داشته باشند تا از هم‌راستایی با روندهای بین‌المللی عقب نمانند و هم‌زمان نیازهای خاص خود را نیز پاسخ دهند.

## نتیجه‌گیری

تحولات شتابان علمی و فناورانه در دهه‌های اخیر، ضرورت بازنگری در شیوه‌های شناسایی، تحلیل و بهره‌برداری از جبهه‌های دانش را بیش از پیش آشکار کرده‌اند. ورود فناوری‌های نوظهور، پیچیدگی‌های فزاینده جهانی و چالش‌های چندلایه‌ای همچون بحران‌های زیست‌محیطی، سلامت جهانی، کمبود منابع و امنیت سایبری، سیاست‌گذاران و پژوهشگران را ناگزیر ساخته تا از مدل‌های سنتی تصمیم‌گیری فراتر روند و به‌سوی تحلیل‌های هوشمند و پیش‌نگرانه گام بردارند. در چنین بستری، شناسایی جبهه‌های دانش نه‌تنها یک وظیفه شناختی بلکه ضرورتی راهبردی برای هر نظام علمی و فناورانه به‌شمار می‌رود.

مرور گزارش‌های بین‌المللی معتبر از نهادهایی همچون Clarivate، McKinsey، WHO، WEF و NATO نشان می‌دهد که هم‌گرایی نسبی میان این منابع در تشخیص حوزه‌های کلیدی دانش در حال شکل‌گیری است. علی‌رغم تفاوت در روش‌شناسی، اهداف و دامنه تحلیلی، مجموعه‌ای از خوشه‌های دانشی همچون هوش مصنوعی، سلامت دیجیتال، کشاورزی هوشمند، انرژی پایدار، و داده‌های بزرگ به‌طور مکرر در مرکز توجه قرار گرفته‌اند. این هم‌پوشانی را می‌توان به‌منزله شکل‌گیری اجماع بین‌المللی بر سر اولویت‌های فناورانه و پژوهشی جهان آینده تعبیر کرد؛ اجماعی که می‌تواند نقش رهنمون‌گر برای کشورها در تدوین برنامه‌های ملی علم و فناوری ایفا کند.

یافته‌های این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که واژگان و مفاهیم به‌کاررفته در اسناد بین‌المللی، با وجود نزدیکی، در معنا و کارکرد با یکدیگر متفاوت‌اند. "روند فناوری" بیشتر ناظر به مسیر رشد تدریجی یک فناوری و پیامدهای آن در بازار و صنعت است، حال‌آن‌که "جبهه پژوهشی" اشاره به نقاط تمرکز علمی با رشد سریع دارد، و "اولویت راهبردی" بر تصمیمات کلان و سیاست‌گذاری متمرکز است. این تفکیک مفهومی، ضرورت شفاف‌سازی اصطلاحات و تدوین زبان مشترک میان سطوح مختلف برنامه‌ریزی را برجسته می‌کند.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای تحلیل اسناد بررسی‌شده، ارائه یک چارچوب سه‌سطحی برای طبقه‌بندی جبهه‌های دانش است که می‌تواند در طراحی نظام‌های پایش ملی و بین‌المللی به‌کار رود. در این چارچوب، لایه نخست شامل فناوری‌های بنیادین و زیرساختی مانند هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ است. لایه دوم به فناوری‌های کاربردی در حوزه‌های بخشی مانند سلامت، کشاورزی، انرژی و آموزش اختصاص دارد. لایه سوم نیز شامل فناوری‌های خاص با کارکردهای راهبردی یا جغرافیایی است که اغلب توسط نهادهای خاص مانند نظامی، بهداشتی یا محیط‌زیستی دنبال می‌شود.

پیشنهاد این مقاله آن است که برای رصد اثربخش جبهه‌های دانش و استفاده حداکثری از ظرفیت اسناد بین‌المللی، یک سامانه ترکیبی طراحی شود که هم داده‌های کمی علم‌سنجی و هم تحلیل‌های کیفی سیاستی را دربرگیرد. این سامانه باید بتواند روندهای علمی، ثبت اختراعات، سرمایه‌گذاری‌های فناورانه، و تغییرات زیست‌محیطی و اجتماعی را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کند و از طریق داشبوردهای تعاملی، اطلاعات را به سیاست‌گذاران، محققان و نخبگان علمی منتقل سازد. همچنین این سامانه باید توانایی

تحلیل هم‌پوشانی‌ها و واگرایی‌های فناورانه را در سطح ملی و بین‌المللی داشته باشد تا بتواند نقشه دانشی کشور را با واقعیات جهانی همسو نماید.

با در نظر گرفتن شکاف‌های ساختاری در نظام علم و فناوری بسیاری از کشورها، از جمله فقدان بانک‌های جامع داده، نبود نظام‌های هشدار سریع علمی، یا ضعف در پیوند میان پژوهش و سیاست، این مقاله بر آن است که استفاده هدفمند از اسناد بین‌المللی می‌تواند فرصتی برای جبران این شکاف‌ها و توسعه ظرفیت سیاست‌گذاری آینده‌نگر باشد. با اتکا به تحلیل تطبیقی این اسناد و توسعه روش‌های علم‌سنجی، می‌توان به طراحی نقشه‌های راه مبتنی بر شواهد پرداخت که هم در سطح کلان و هم در سطح برنامه‌های پژوهشی بخشی مؤثر واقع شود.

در نهایت، این مطالعه بر این نکته تأکید دارد که شناسایی جبهه‌های دانش نه صرفاً یک فرایند فنی بلکه فرایندی فرهنگی، نهادی و مشارکتی است. موفقیت در این مسیر، نیازمند تقویت همکاری‌های بین‌المللی، توسعه نهادهای واسط علم و سیاست، و آموزش نسل جدیدی از تحلیل‌گران علم و فناوری است که بتوانند با درک میان‌رشته‌ای، پیچیدگی‌های آینده را مدیریت و هدایت کنند. تنها در چنین بستری است که می‌توان از جبهه‌های دانش به‌عنوان پیشران‌هایی برای توسعه پایدار، امنیت ملی، رفاه اجتماعی و ارتقاء موقعیت بین‌المللی بهره‌برداری کرد.

## تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

## مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

## موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

## حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

## منابع


1. Reding DF, Martín Blanco Á, De Lucia A, Regan LA, Bayliss D. Science & Technology Trends 2023–2043. NATO Science & Technology Organization, 2023.
2. Science I, Economic Development Canada. Sensitive Technology Research Areas. Government of Canada, 2023.
3. Moşteanu N. Fintech Frontiers in Quantum Computing, Fractals, and Blockchain Distributed Ledger: Paradigm Shifts and Open Innovation. Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity. 2021.
4. OECD. OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2023: Enabling Transitions in Times of Disruption. Paris: OECD Publishing; 2023.
5. Gartner. Top Strategic Technology Trends 2024. Gartner, 2023.
6. McKinsey Digital. Technology Trends Outlook 2023. McKinsey & Company, 2023.
7. World Economic Forum. Top 10 Emerging Technologies of 2023. WEF, 2023.
8. World Health Organization. Global Strategy on Digital Health. WHO, 2021.
9. Keysight. Emerging Technologies 2024 Vision Report. Keysight Technologies, 2023.
10. Andrews D. Frontier Firms, Technology Diffusion and Public Policy: Micro Evidence from OECD Countries. 2015.
11. Burns E, Ravinutala A. Tech Trends 2025: Deloitte; 2024.
12. Ameen N. Consumer interaction with cutting-edge technologies: Implications for future research. Computers in Human Behavior. 2021.
13. Callaghan C. Business Research Methodologies and the need for Economies of Scale in the Business Research Process: Harnessing the Innovation Opportunities of Novel Technologies and Technological Change. Electronic Journal of Business Research Methods. 2019.
14. Wang W. Artificial Intelligence, Machine Learning, Automation, Robotics, Future of Work and Future of Humanity: A Review and Research Agenda. Journal of Database Management. 2019.
15. Tromaras A. Future Technologies in the EU Transport Sector and Beyond: An Outlook of 2020–2035. Data Analytics: Paving the Way to Sustainable Urban Mobility2018.