



The Role of Technology Foresight in Prioritizing Science and Technology Policies in Iran: Evidence from an Expert-Based Assessment of Transformative Technologies

1. Reza Hafezi 
2. Abolfazl Zinati
3. Amirhadi Azizi

Article Type: Research Paper

Vol. 35 | No. 2 | Serial 98 | Jun. 2025

Received: 2025.12.26

Revised: 2026.03.10

Accepted: 2026.04.09

Published Online: 2026.08.12

Pages: 27-44

P-ISSN: 1027-2690

E-ISSN: 2783-4514

Abstract

Science and technology policymaking is increasingly shaped by uncertainty, technological convergence, and the accelerating pace of innovation. Under these conditions, conventional approaches to technology prioritization, especially those based on retrospective indicators such as publications, patents, or existing levels of technological maturity, are no longer sufficient. These indicators may describe current scientific or technological activity, but they often fail to capture future strategic relevance, institutional feasibility, and the conditions required for national technological development. This problem is particularly important for countries such as Iran, where limited financial and human resources, fragmented policy instruments, and unstable institutional conditions make technology prioritization both necessary and difficult.

This article examines the role of technology foresight in improving the prioritization of science and technology policies in Iran. It argues that the main challenge is not simply the selection of promising technologies, but the design of a decision-making logic that can translate expert knowledge into policy-relevant priorities under uncertainty. From this perspective, technology foresight is not treated as a descriptive or symbolic exercise. Rather,

Keywords

Technology Foresight, Science and Technology Policy, Expert-based Assessment, Technology Prioritization, Institutional Uncertainty.

1.  Assistant Professor of Futures Studies, National Research Institute for Science Policy (NRISP), Tehran, Iran (Corresponding Author)
hafezi@nrisp.ac.ir
ORCID: 0000-0003-0070-3737
2. PhD Candidate Energy, Sharif University of Technology, Tehran, Iran,
zinati_abolfazl@yahoo.com
Scopus ID: 60638561300
3. STI Policy Researcher, Institute for Science and Technology Studies, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran,
amirhadiAzizi1373@yahoo.com
ORCID: 0009-0009-1213-7067

Cite This Paper: Hafezi, R., Zinati, A., Azizi, A. (2025). The Role of Technology Foresight in Prioritizing Science and Technology Policies in Iran: Evidence from an Expert-Based Assessment of Transformative Technologies. *Rahyaft*, 35 (2), 27-44. (Persian).

DOI: 10.22034/RAHYAFT.2026.12185.1631



© The Author(s)

Publisher: National Research Institute for Science Policy (N.R.I.S.P)

it is positioned as a structured decision-support mechanism that can help policymakers distinguish between short-term needs, long-term strategic opportunities, and technologies that require monitoring before large-scale intervention.

The study is based on an expert-oriented foresight framework and uses a structured Delphi process to assess transformative technologies across five technological domains: nano and micro technologies, advanced materials and manufacturing, biotechnology and precision medicine, quantum technologies, and optics. The research process combines a desk-based review, expert validation of the initial list of technologies, multi-stage expert assessment, and the construction of composite indicators for prioritization. The assessment criteria include present impact, expected future impact, global technological maturity, national technological maturity, the importance of hardware infrastructure, the importance of human capital, and the strategic attractiveness of each technology for the country. This multi-criteria framework enables the analysis to move beyond static ranking and evaluate technologies in relation to both future relevance and national feasibility.

A total of 156 instances of expert participation were recorded in the Delphi process. Since some experts participated in more than one technological domain, this number reflects the volume of expert participation rather than the number of unique individuals. The expert group was mainly composed of highly qualified participants, with more than 70 percent holding doctoral degrees. Approximately 50 participants were university faculty members, while others came from industrial, governmental, and private-sector backgrounds. Most participants had between 10 and 20 years of professional experience. This composition reflects the knowledge-intensive and emerging nature of the technologies under study. At the same time, the article emphasizes that expert participation itself should be interpreted as an institutional signal. Limited or uneven participation in some domains is not only a methodological issue but may also reflect broader uncertainty, weak policy incentives, and the fragile connection between expert assessment and actual decision-making processes.

The findings reveal three major cross-domain

patterns. First, there is limited overlap between technologies that are important in the present and those that are expected to become strategically important in the future. Some technologies with strong current impact may lose relative strategic weight over time, while others with limited present impact may become highly significant by 2035. This temporal asymmetry challenges uniform support policies and shows that policymakers need to distinguish between immediate support, gradual capacity building, and active monitoring.

Second, the study identifies a significant gap between global and national levels of technological maturity in many assessed technologies. This gap suggests that the main challenge is not only technical or scientific. It is also institutional, infrastructural, and human-capital related. Direct financial support, without attention to laboratories, standards, industrial linkages, regulation, and skilled personnel, is unlikely to produce effective technological development. This finding is especially relevant for advanced materials and manufacturing, biotechnology and precision medicine, and quantum technologies, where national capability depends on long-term accumulation of technical, organizational, and regulatory capacities.

Third, the results show that transformative technologies require different policy pathways. Some technologies are close to application and need industrial scaling, market formation, and value-chain integration. Others require long-term investment in knowledge accumulation, infrastructure, and human capital. A further group remains highly uncertain and should be addressed through monitoring, experimentation, and adaptive regulation rather than immediate large-scale intervention. This differentiation is one of the article's main contributions because it shifts attention from producing a fixed list of priority technologies to designing a more flexible policy logic for matching technologies with suitable policy instruments.

The domain-level findings reinforce this argument. In advanced materials and manufacturing, future priorities are linked to scalability, process control, value-chain restructuring, and semi-industrial infrastructure. In biotechnology and precision medicine, strategic potential is high, but progress depends heavily on regulatory

clarity, data governance, ethical frameworks, and coordination across health, research, and innovation systems. In optics, the results indicate strong scientific and enabling potential, but also a dispersed policy orientation that requires clearer national missions and stronger alignment with priority areas such as energy, health, and advanced technologies. In quantum technologies, the findings point to a long-term strategic field where short-term returns are limited and where gradual learning, human capital development, and continuous monitoring of global trajectories are more appropriate than rapid project-based intervention. In nano and micro technologies, the results show internal heterogeneity: some technologies are close to commercialization, while others require institutional maturation, regulatory support, or longer-term observation. The policy implications are clear. Iran's science and technology policy system does not suffer only from a shortage of technological lists or technical information. Its deeper problem is the absence of an institutionalized foresight-based framework for translating technological assessment into differentiated policy decisions.

The article therefore recommends integrating technology foresight into formal processes of priority setting, budgeting, strategic planning, and national policy formulation. It also recommends separating short-, medium-, and long-term policy horizons, moving from simple financial support to policy mixes, and using structured expert assessment as a recurring mechanism for reducing policy errors.

Overall, the article contributes to science and technology policy by demonstrating how structured expert judgment can support technology prioritization under uncertainty. Its main contribution is not the ranking of specific technologies, but the development of a policy-oriented foresight logic that connects technological assessment, temporal differentiation, institutional capacity, and strategic decision-making. The study concludes that technology foresight, when genuinely embedded in governance processes, can reduce policy errors, improve coherence among policy instruments, and guide national resources toward technologies whose future significance, feasibility, and institutional requirements are more carefully understood.



نقش آینده‌نگاری فناوری در اولویت‌گذاری سیاست‌های علم و فناوری ایران: شواهدی از ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز

۱. رضا حافظی

۲. ابولفضل زینتی

۳. امیرهادی عزیزی

• نوع مقاله: پژوهشی

• دوره ۳۵ | شماره ۲ | پیاپی ۹۸ | تیر ۱۴۰۴

• تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

• تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۹

• تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰

• تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱

• صفحات: ۲۷-۴۴

• شاپای چاپی: ۲۶۹۰-۱۰۲۷

• شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۴-۲۷۸۳

چکیده

شتاب تحولات علم و فناوری، همگرایی میان‌رشته‌ای و افزایش عدم قطعیت درباره مسیرهای آینده، سیاست‌گذاری علم و فناوری را با چالش‌های بنیادینی مواجه ساخته است. در چنین شرایطی، اتکای صرف به رویکردهای گذشته‌نگر و سیاست‌های حمایتی یکنواخت نه تنها ناکارآمد است، بلکه می‌تواند به پراکندگی منابع و افزایش خطای تصمیم‌سازی منجر شود. این مقاله با تمرکز بر آینده‌نگاری فناوری، نقش آن را در بهبود اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری ایران بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که ارزیابی خبرگانی ساختارمند چگونه می‌تواند همچون ابزاری مؤثر برای تصمیم‌سازی در شرایط عدم قطعیت به کار گرفته شود. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از یک چارچوب آینده‌نگر مبتنی بر ارزیابی خبرگانی، فناوری‌های جریان‌ساز را در چند حوزه اصلی فناوریانه تحلیل کرده است. به‌منظور افزایش پایداری تحلیلی، نتایج ابتدا به‌صورت تجمعی و میان‌حوزه‌ای بررسی و سپس به‌طور خلاصه در سطح حوزه‌های فناوریانه تبیین شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که هم‌پوشانی محدودی میان اولویت‌های کوتاه‌مدت و اولویت‌های افق آینده وجود دارد و شکاف میان بلوغ جهانی و ملی فناوری‌ها، توجه هم‌زمان به ابعاد نهادی، زیرساختی و سرمایه انسانی را ضروری می‌سازد. این مطالعه همچنین الگوی مشارکت خبرگان را به‌منزله سیگنال نهادی معناداری شناسایی

کلیدواژه‌ها

آینده‌نگاری فناوری، سیاست‌گذاری علم و فناوری، ارزیابی خبرگانی، اولویت‌بندی فناوری، عدم قطعیت نهادی.

۱. استادیار آینده‌پژوهی، مؤسسه تحقیقات سیاست علمی کشور، تهران، ایران (پدیدآور رابط)

hafezi@nrisp.ac.ir

ORCID: 0000-0003-0070-3737

۲. دانشجوی دکتری انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
zinati_abolfazl@yahoo.com

Scopus ID: 60638561300

۳. پژوهشگر سیاست‌گذاری علم، فناوری و نوآوری، پژوهشکده مطالعات بنیادین علم و فناوری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

amirhadiiazizi1373@yahoo.com

ORCID: 0009-0009-1213-7067

استناد به این مقاله: حافظی، ر.، زینتی، ا.، و عزیزی، ا. (۱۴۰۴). نقش آینده‌نگاری فناوری در اولویت‌گذاری سیاست‌های علم و فناوری ایران: شواهدی از ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز. *رهیافت*، ۳۵ (۲)، صص. ۲۷-۴۴.

DOI: 10.22034/RAHYAFT.2026.12185.1631

ناشر: مؤسسه تحقیقات سیاست علمی کشور
نویسندگان: © حق مؤلف



ندارند. در چنین شرایطی، نادیده گرفتن قضاوت‌های تخصصی، دانش ضمنی و درک آینده‌نگر خبرگان می‌تواند به تصمیم‌هایی منجر شود که از نظر فنی قابل دفاع‌اند، اما از منظر راهبردی ناکارآمد یا پرریسک هستند (Nonaka, 2009; Polanyi, 2009).

ایران نیز از این قاعده مستثنا نیست. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در تولید علم و توسعه برخی حوزه‌های فناوریانه، همچنان چالش‌هایی همچون پراکندگی سیاست‌ها، ضعف هم‌راستایی میان برنامه‌های حمایتی و اولویت‌های بلندمدت، و فاصله میان دانش تخصصی و فرایند رسمی تصمیم‌سازی در حوزه علم و فناوری مشاهده می‌شود. در بسیاری از موارد، حمایت از فناوری‌ها بدون تفکیک روشن میان اولویت‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت صورت می‌گیرد یا بر مبنای ملاحظات نهادی و بخشی انجام می‌شود، نه بر اساس تحلیل نظام‌مند از آینده و ظرفیت‌های ملی (Flanagan, Uyarra, & Laranja, 2011). این وضعیت ضرورت بازاندیشی در ابزارها و رویکردهای سیاست‌گذاری فناوریانه را برجسته می‌سازد.

در این میان، آینده‌نگاری فناوری به‌عنوان رویکردی ساختارمند برای مواجهه با عدم قطعیت، می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت تصمیم‌گیری ایفا کند (Hafezi, 2021; Kousari & Rahmati, 2019). آینده‌نگاری، برخلاف پیش‌بینی خطی، نه در پی ارائه تصویری قطعی از آینده، بلکه در پی گشودن دامنه‌ای از آینده‌های محتمل، شناسایی عدم قطعیت‌های کلیدی و کمک به تصمیم‌گیران برای انتخاب آگاهانه‌تر در زمان حال است (Hafezi, Malekifar, & Akhavan, 2018; Hafezi, Wood, Alipour, & Taghikhah, 2023). هنگامی که آینده‌نگاری به‌درستی در فرایند سیاست‌گذاری ادغام شود، می‌تواند به کاهش سوگیری‌های کوتاه‌مدت، افزایش انسجام سیاستی و هدایت هدفمند منابع عمومی منجر شود (Cuhls, 2010; Miles, 2003).

یکی از مؤلفه‌های اساسی آینده‌نگاری فناوری، بهره‌گیری نظام‌مند از دانش و قضاوت خبرگان است (Cuhls, 2003; Nonaka, 2009; Polanyi, 2009). در شرایطی که داده‌های تاریخی برای فناوری‌های نوظهور ناکافی یا گمراه‌کننده‌اند، ارزیابی خبرگانی می‌تواند شکاف دانشی موجود را تا حدی پر کند و تصویری واقع‌بینانه‌تر از مسیرهای محتمل آینده ارائه دهد. خبرگان، به‌واسطه تجربه علمی، صنعتی و سیاستی خود قادرند ابعاد پنهان فناوری‌ها، موانع نهادی، نیازهای زیرساختی و پیامدهای راهبردی آنها را بهتر از شاخص‌های کمی صرف درک کنند. از این‌رو، ارزیابی خبرگانی می‌تواند همچون مکملی ضروری برای ابزارهای متعارف تحلیل سیاستی عمل کند. با این حال، استفاده از نظر خبرگان بدون چارچوب روشمند

می‌کند و استدلال می‌کند که نهادینه‌سازی آینده‌نگاری فناوری، مستلزم اتصال واقعی ابزارهای تحلیلی به فرایندهای حکمرانی علم و فناوری است. نتایج مقاله نشان می‌دهد که آینده‌نگاری، در صورت ادغام مؤثر در تصمیم‌سازی سیاستی، می‌تواند به کاهش خطای سیاستی، افزایش انسجام تصمیم‌ها و هدایت هدفمند منابع در نظام علم و فناوری کشور کمک کند.

مقدمه

تحولات شتابان علم و فناوری در دهه‌های اخیر، منطق سنتی تصمیم‌گیری در حوزه سیاست‌گذاری علم، فناوری و نوآوری را با چالش‌های بنیادین مواجه ساخته است. ظهور پی‌درپی فناوری‌های نوظهور، همگرایی میان‌رشته‌ای، کوتاه شدن چرخه عمر نوآوری‌ها و افزایش عدم قطعیت درباره مسیرهای آینده، موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر روندهای گذشته یا شاخص‌های ایستا، پاسخگوی نیازهای راهبردی کشورها نباشد (Dosi & Nelson, 2010; Manyika et al., 2013; Roco & Bainbridge, 2002). در چنین شرایطی، سیاست‌گذاری فناوریانه بیش از آنکه به مسئله «انتخاب یک فناوری خاص» محدود باشد، به مسئله‌ای کلان‌تر یعنی «چگونگی اولویت‌بندی عقلانی در شرایط عدم قطعیت» تبدیل شده است (Stirling, 2008).

در سطح ملی، سیاست‌گذاران علم و فناوری با مجموعه‌ای از محدودیت‌ها و فشارهای هم‌زمان مواجه‌اند: منابع مالی و انسانی محدود، انتظارات فزاینده اجتماعی و اقتصادی، رقابت شدید فناوریانه در سطح جهانی و ضرورت پاسخ‌گویی به مسائل پیچیده‌ای چون سلامت، انرژی، محیط‌زیست و امنیت. در چنین فضایی، اتخاذ تصمیم‌های شتاب‌زده، واکنشی یا مبتنی بر ترجیحات بخشی می‌تواند به پراکندگی منابع، تضعیف انسجام سیاستی و از دست رفتن فرصت‌های راهبردی منجر شود (Braun, 1998; Mazzucato, 2018). از این منظر، اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری نه انتخابی مدیریتی، بلکه ضرورتی راهبردی برای حکمرانی مؤثر در عصر عدم قطعیت محسوب می‌شود.

با وجود این ضرورت، تجربه بسیاری از کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، نشان می‌دهد که فرایندهای اولویت‌بندی فناوریانه غالباً یا به‌صورت ضمنی و غیرشفاف انجام می‌شوند یا بیش از حد به شاخص‌های کمی و گذشته‌نگر اتکا دارند (Miles, 2010; Saltelli et al., 2020; Stirling, 2003). این رویکردها، هرچند در ظاهر عینی و قابل سنجش‌اند، اما در مواجهه با فناوری‌های نوظهور، که داده‌های تجربی محدود و مسیرهای تکامل آنها نامطمئن است، کارایی لازم را

نه خطی‌اند، نه قابل پیش‌بینی با اتکا بر روندهای گذشته. همگرایی فناوری‌ها، شتاب نوآوری و تغییرات ناگهانی در محیط‌های اقتصادی، سیاسی و ژئوپلیتیکی موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شاخص‌های ایستا، اسناد بالادستی کلی یا تقلید از تجربه دیگر کشورها، کارایی خود را به‌تدریج از دست بدهند (Van Asselt & Rotmans, 2002; Walker, Lempert, & Kwakkel, 2013). در چنین شرایطی، سیاست‌گذاری بدون نگاه آینده‌نگر، عملاً به مدیریت گذشته تبدیل می‌شود.

با این حال، در عمل مشاهده می‌شود که آینده‌نگاری فناوری در بسیاری از نظام‌های سیاست‌گذاری، از جمله در ایران، هنوز به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌سازی نهادینه نشده است. آینده‌پژوهی اغلب یا در قالب مطالعات پراکنده و پروژه‌های باقی می‌ماند، یا به تولید اسناد کلی و غیرالزام‌آور محدود می‌شود که پیوند روشنی با فرایند تخصیص منابع، طراحی مشوق‌ها و تنظیم‌گری فناوریانه ندارند. نتیجه چنین وضعیتی آن است که تصمیم‌های کلیدی درباره حمایت یا عدم حمایت از فناوری‌ها، عملاً خارج از چارچوب آینده‌نگر و مبتنی بر شواهد اتخاذ می‌شوند.

یکی از کاستی‌های اساسی در این زمینه، غلبه رویکردهای گذشته‌نگر در اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری است (Lundvall, 1992; Soete & Freeman, 2012). شاخص‌هایی چون تعداد مقالات، ثبت اختراع یا سطح بلوغ فعلی فناوری، هرچند اطلاعات مفیدی ارائه می‌دهند، اما به‌تنهایی قادر نیستند مسیرهای آینده و ظرفیت‌های تحول‌آفرین فناوری‌ها را آشکار سازند. اتکای بیش از حد به این شاخص‌ها، سیاست‌گذار را به‌سمت حمایت از فناوری‌هایی سوق می‌دهد که نه‌تنها در حال حاضر فعال‌تر یا پرنسب‌ترند، بلکه در برخی موارد بیشتر در کانون توجه و قضاوت خبرگان قرار دارند، که این می‌تواند ناشی از سوگیری‌های ادراکی و تمرکز شناختی در ارزیابی‌های خبرگانی باشد. به‌علاوه، در مورد فناوری‌های نوظهور، که هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارند، به تصمیم‌گیری‌های محافظه‌کارانه و بعضاً فرصت‌سوز منجر می‌شود. البته باید توجه داشت که در مورد فناوری‌های واقعاً نوظهور، عدم قطعیت و حتی پراکندگی در قضاوت خبرگان، نه یک ضعف روش‌شناختی، بلکه بازتابی از ماهیت این فناوری‌هاست. در چنین مواردی، نبود اجماع می‌تواند نشان‌دهنده قرار داشتن فناوری در مرزهای دانش و شکل‌گیری مسیرهای متنوع توسعه باشد و نیازمند قوه تشخیص و تحلیل عمیق‌تری از سوی سیاست‌گذاران است. در این شرایط، هدف تحلیل نه حذف عدم قطعیت، بلکه

و شفاف، خود می‌تواند منبع سوگیری و ابهام باشد (Cooke, Slovic, 1982). بنابراین، چالش اصلی نه صرفاً «مشارکت خبرگان»، بلکه «چگونگی ساختاردهی و تجمیع قضاوت‌های آنان» است. در این زمینه، روش‌های نظام‌مند ارزیابی خبرگانی، به‌ویژه روش دلفی (Linstone & Turoff, 1975)، امکان می‌دهند که دیدگاه‌های متنوع در فرایندی تکرارشونده، ناشناس و مبتنی بر بازخورد جمعی پالایش و به اجماعی آگاهانه نزدیک شوند. چنین فرایندی می‌تواند مبنایی قابل اتکا برای اولویت‌بندی سیاست‌های فناوریانه فراهم آورد.

این مقاله با تکیه بر همین منطق، به بررسی نقش آینده‌نگاری فناوری در اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری ایران می‌پردازد و از ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز به‌عنوان شواهد تجربی استفاده می‌کند. هدف اصلی مقاله آن است که نشان دهد چگونه می‌توان از طریق چارچوب آینده‌نگاری و مبتنی بر نظر خبرگان، فرایند تصمیم‌سازی در حوزه علم و فناوری را از وضعیت واکنشی و پراکنده، به‌سمت رویکردی نظام‌مند، شفاف و راهبردی سوق داد. پرسش محوری مقاله این است که چگونه می‌توان قضاوت‌های خبرگان را در قالب چارچوبی ساختاریافته، به‌گونه‌ای در فرایند رفت‌وبرگشتی میان آینده‌نگاری فناوریانه و سیاست‌گذاری علم و فناوری ادغام کرد که به اولویت‌بندی قابل اتکا و تصمیم‌پذیر منجر شود؟ به زبان دیگر، مسئله اصلی نه صرف تولید دانش آینده‌نگر، بلکه «ترجمه این دانش به منطق تصمیم‌گیری سیاستی» است؛ فرایندی که در آن قضاوت‌های خبرگان نقش محوری دارند اما غالباً به‌صورت نظام‌مند به سیاست‌گذاری متصل نمی‌شوند.

در ادامه، مقاله ابتدا جایگاه نظری آینده‌نگاری فناوری در سیاست‌گذاری علم و فناوری را تبیین می‌کند، سپس چارچوب تحلیلی و منطق استفاده از ارزیابی خبرگانی را توضیح می‌دهد. در گام بعد، یافته‌های اصلی حاصل از ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز تحلیل و الگوهای سیاستی استخراج می‌شود. در نهایت، مقاله با بحث درباره دلالت‌های سیاستی این رویکرد و ارائه توصیه‌هایی برای بهبود فرایند تصمیم‌گیری در نظام سیاست‌گذاری علم و فناوری ایران به پایان می‌رسد.

آینده‌نگاری فناوری به‌مثابه ابزار سیاست‌گذاری علم و فناوری

سیاست‌گذاری علم و فناوری در دنیای امروز، بیش از هر زمان دیگری با مسئله عدم قطعیت ساختاری مواجه است. مسیرهای تحول فناوری

تفسیر و مدیریت آن در فرایند سیاست‌گذاری است. در این پژوهش، تفسیر نتایج دلفی با توجه به سطح بلوغ فناوری انجام شده است؛ به گونه‌ای که در فناوری‌های بالغ، اجماع خبرگان به عنوان نشانه‌ای از تثبیت مسیر توسعه تلقی شده، در حالی که در فناوری‌های نوظهور، پراکندگی نظرات به مثابه شاخصی از عدم قطعیت ساختاری در نظر گرفته شده است.

صورت‌بندی پرسش‌های این پژوهش صرفاً بر مبنای ملاحظات اجرایی یا تجربی انجام نشده، بلکه ریشه در یک مسئله نظری در ادبیات آینده‌نگاری فناوریانه دارد: «چگونگی تبدیل دانش آینده‌نگر به منطق تصمیم‌گیری سیاستی در شرایط عدم قطعیت». در ادبیات سیاست‌گذاری علم و فناوری، این مسئله به عنوان یکی از چالش‌های اصلی مطرح است، زیرا نتایج آینده‌نگاری غالباً به صورت توصیفی باقی می‌ماند و به صورت نظام‌مند وارد فرایند تخصیص منابع و اولویت‌گذاری نمی‌شود. از این منظر، پرسش‌های پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف و با تمرکز بر سازوکارهای تبدیل قضاوت خبرگان به خروجی‌های تصمیم‌پذیر طراحی شده‌اند. این صورت‌بندی با الهام از چارچوب‌های مطرح در ادبیات امثال پاپر (Popper, 2008a) و کولز (Cuhls, 2001)، و جورجیو و کینان (Georghiou, 2008b)، و کینان (Keenan, 2006, 2008) طرح شده است.

در این میان، آینده‌نگاری فناوری می‌تواند این خلأ را پر کند، مشروط بر آنکه از سطح تحلیل‌های توصیفی فراتر رود و مستقیماً به فرایند سیاست‌گذاری متصل شود. آینده‌نگاری زمانی برای سیاست‌گذار معنا پیدا می‌کند که بتواند به پرسش‌های مشخص پاسخ دهد: کدام فناوری‌ها در افق پیش رو بیشترین اثر راهبردی را دارند؟ کدام حوزه‌ها به سرمایه‌گذاری فوری نیاز دارند و کدام یک باید در سبد رصد و انتظار قرار گیرند؟ کجا سیاست حمایتی لازم است و کجا تنظیم‌گری یا حتی عدم مداخله؟ بدون پاسخ به این پرسش‌ها، آینده‌نگاری صرفاً به تمرینی تحلیلی تبدیل می‌شود که تأثیر ملموسی بر تصمیم‌های واقعی ندارد.

یکی از عناصر مغفول‌مانده در سیاست‌گذاری فناوریانه، استفاده نظام‌مند از قضاوت‌های تخصصی خبرگان است. در شرایط عدم قطعیت بالا، داده‌های کمی گذشته‌نگر نه تنها ناکافی‌اند، بلکه گاه گمراه‌کننده نیز هستند. در مقابل، خبرگان با درک عمیق از روندهای علمی، محدودیت‌های فناوریانه، ظرفیت‌های نهادی و موانع اجرایی، قادرند تصویری واقع‌بینانه‌تر از آینده‌های محتمل ارائه دهند. نادیده گرفتن این دانش ضمنی، سیاست‌گذاری را به فرایندی مکانیکی و کم‌انعطاف تبدیل می‌کند که توان تطبیق با تحولات سریع را ندارد. با وجود این، اتکا به نظر خبرگان بدون چارچوب مشخص، خود

می‌تواند به بازتولید سوگیری‌های فردی، نهادی یا بخشی منجر شود (Rowe & Wright, 1999; Stirling, 2008; Tversky & Kahneman, 1974). از این رو، مسئله اصلی نه صرفاً «نظر خبره»، بلکه «چگونگی استخراج، پالایش و تجمیع این نظرات» است. آینده‌نگاری فناوری زمانی می‌تواند به ابزار سیاست‌گذاری تبدیل شود که قضاوت‌های تخصصی در قالب فرایندی شفاف، تکرار شونده و قابل ارزیابی سامان یابند. در غیر این صورت، تصمیم‌گیری‌ها همچنان متکی بر برداشت‌های غیررسمی و غیرقابل دفاع باقی خواهند ماند. در این چارچوب، ارزیابی خبرگانی ساختارمند، به‌ویژه با استفاده از روش‌هایی مانند دلفی، امکان عبور از این بن‌بست را فراهم می‌کند. این رویکرد امکان می‌دهد که تنوع دیدگاه‌ها حفظ شود، اما در عین حال، از طریق بازخورد جمعی و تکرار ارزیابی، به نوعی همگرایی تحلیلی دست یابد. چنین فرایندی، برخلاف تصمیم‌گیری‌های فردمحور یا بخشی، می‌تواند مبنایی قابل اتکا برای اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری ایجاد کند؛ مبنایی که هم به آینده حساس است و هم به واقعیت‌های نهادی کشور.

در این مطالعه، روش دلفی نه به عنوان ابزاری صرف برای دستیابی به اجماع خبرگان، بلکه به عنوان هسته چارچوبی تحلیلی برای تصمیم‌سازی سیاستی استفاده شده است. برخلاف کاربردهای متعارف دلفی که عمدتاً به شناسایی یا رتبه‌بندی ساده موضوعات محدود می‌شوند، در این مطالعه تلاش شده است قضاوت‌های خبرگان در قالب مجموعه‌ای از شاخص‌های چندبعدی کمی‌سازی شود و به یک سیستم اولویت‌بندی قابل استفاده برای سیاست‌گذاری تبدیل گردد. از این منظر، دلفی در این پژوهش بخشی از معماری تصمیم‌سازی گسترده‌تری است که اعتبارسنجی اولیه فناوری‌ها، ارزیابی چندمعیاره و استخراج شاخص‌های ترکیبی را دربرمی‌گیرد. در حالی که بسیاری از مطالعات دلفی بر دستیابی به اجماع تمرکز دارند، در این پژوهش هدف اصلی تبدیل پراکندگی نظرات خبرگان به ساختار تصمیم‌پذیر برای سیاست‌گذاری بوده است، حتی در مواردی که اجماع کامل وجود ندارد.

بر این اساس، مقاله حاضر آینده‌نگاری فناوری را نه به عنوان یک فعالیت جانبی یا تزئینی، بلکه به عنوان یکی از ابزارهای اصلی سیاست‌گذاری علم و فناوری صورت‌بندی می‌کند. تمرکز مقاله بر این است که نشان دهد چگونه ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز می‌تواند به اصلاح منطق اولویت‌بندی، کاهش خطای سیاستی و افزایش انسجام تصمیم‌ها در نظام سیاست‌گذاری علم و فناوری ایران کمک کند. در بخش‌های بعدی، این منطق در قالب یک مطالعه تجربی و با تمرکز بر فناوری‌های پیش‌ران بررسی و تحلیل می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع مطالعات کاربردی در حوزه آینده‌نگاری فناوریانه بوده و با رویکرد خبرگانی طراحی شده است. در این چارچوب، از روش دلفی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های استخراج و تجمیع قضاوت‌های تخصصی در شرایط عدم قطعیت استفاده شده است. هدف اصلی پژوهش، شناسایی، اعتبارسنجی و اولویت‌بندی فناوری‌های جریان‌ساز در افق ده‌ساله کشور بوده که این امر از طریق ترکیب تحلیل‌های کتابخانه‌ای و مشارکت ساخت‌یافته خبرگان در قالب فرایند دلفی چندمرحله‌ای انجام شده است. از این منظر، پژوهش حاضر را می‌توان در زمره مطالعات آینده‌نگاری مبتنی بر اجماع خبرگان با هدف پشتیبانی از سیاست‌گذاری علم و فناوری طبقه‌بندی کرد.

مسئله اصلی این مقاله، انتخاب روش تحقیق صرف نیست، بلکه طراحی چارچوب تحلیلی قابل اتکا برای اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری در شرایط عدم قطعیت است. در چنین شرایطی، پرسش اصلی آن نیست که کدام روش از نظر آماری دقیق‌تر است، بلکه این است که کدام رویکرد می‌تواند تصمیم‌گیر را در مواجهه با آینده‌های نامطمئن، پیچیده و چندبعدی یاری دهد. از این منظر، چارچوب تحلیلی این پژوهش بر سه پیش‌فرض اساسی استوار است.

نخست آنکه، اولویت‌بندی فناوریانه مسئله‌ای صرفاً فنی یا علمی نیست، بلکه ذاتاً مسئله‌ای سیاستی و نهادی است (Edquist, 2010; Lundvall, 1992). فناوری‌ها نه در خلأ، بلکه در بستر ساختارهای نهادی، ظرفیت‌های زیرساختی، منابع انسانی، محدودیت‌های اقتصادی و ترجیحات سیاستی توسعه می‌یابند (Edquist, 2010). بنابراین، ارزیابی فناوری‌ها بدون توجه به این ابعاد، به تصمیم‌هایی منجر می‌شود که ممکن است از نظر علمی جذاب، اما از نظر اجرایی یا راهبردی غیرواقع‌بینانه باشند. چارچوب این پژوهش آگاهانه تلاش می‌کند این فاصله میان «امکان علمی» و «امکان سیاستی» را در فرایند ارزیابی کاهش دهد.

دوم آنکه، در حوزه فناوری‌های نوظهور و جریان‌ساز، داده‌های کمی گذشته‌نگر به‌تنهایی مبنای مناسبی برای تصمیم‌گیری نیستند (Geels, 2004; Stirling, 2003). شاخص‌هایی چون تولید مقاله، ثبت اختراع یا حتی سطح بلوغ فناوری، تصویر ناقصی از مسیرهای آینده ارائه می‌دهند و معمولاً به تغییرات ناگهانی، همگرایی فناوری‌ها و تحولات نهادی حساس نیستند. در چنین وضعیتی، اتکای صرف به این شاخص‌ها، سیاست‌گذار را به‌سمت تصمیم‌های محافظه‌کارانه یا تقلیدی سوق می‌دهد. چارچوب تحلیلی این پژوهش با پذیرش این محدودیت، بر نقش قضاوت‌های تخصصی و آینده‌نگر خبرگان به‌عنوان منبعی مکمل و ضروری تأکید می‌کند.

سوم آنکه، استفاده از نظر خبرگان تنها زمانی برای سیاست‌گذاری مفید است که به‌صورت ساختارمند، شفاف و قابل دفاع انجام شود. نظرات پراکنده یا غیررسمی، هرچند ارزشمند، نمی‌توانند مبنای تصمیم‌های کلان قرار گیرند. از این رو، این پژوهش از ارزیابی خبرگانی در قالب یک فرایند نظام‌مند بهره می‌گیرد تا قضاوت‌های فردی در یک چارچوب جمعی پالایش شوند و به نوعی همگرایی تحلیلی برسند. این منطق، مبنای انتخاب روش دلفی در این مطالعه بوده است.

منطق استفاده از ارزیابی خبرگانی ساختارمند

روش دلفی در این پژوهش نه به‌عنوان ابزاری صرفاً دانشگاهی، بلکه به‌عنوان مکانیسمی برای کاهش خطای سیاستی به کار گرفته شده است. دلفی امکان می‌دهد که دیدگاه‌های متنوع خبرگان، بدون غلبه سلسله‌مراتب نهادی یا فشارهای اجتماعی، گردآوری و در چند مرحله بازنگری شوند. این ویژگی، به‌ویژه در نظام‌های سیاست‌گذاری که با تنوع بازیگران و منافع بخشی مواجه‌اند، اهمیتی دوچندان دارد.

در چارچوب این پژوهش، دلفی به سیاست‌گذار کمک می‌کند تا به‌جای اتکا به صداها یا بلندتر یا بازیگران قدرتمندتر، به تصویری متوازن‌تر از ارزیابی‌های تخصصی دست یابد. تکرار ارزیابی‌ها و ارائه بازخورد کنترل‌شده به شرکت‌کنندگان، امکان اصلاح قضاوت‌های اولیه و نزدیک شدن به اجماعی آگاهانه را فراهم می‌سازد. این فرایند، نه به‌معنای حذف اختلاف نظر، بلکه به‌معنای شفاف‌سازی آن و جلوگیری از تصمیم‌گیری‌های شتاب‌زده است.

طراحی چارچوب ارزیابی فناوری‌های جریان‌ساز

چارچوب ارزیابی این پژوهش بر مبنای ترکیب چند معیار اصلی طراحی شده است که مستقیماً با نیازهای سیاست‌گذاری علم و فناوری ارتباط دارند. انتخاب این معیارها تصادفی یا صرفاً برگرفته از ادبیات نظری نبوده، بلکه با هدف پوشش ابعاد اصلی تصمیم‌سازی انجام شده است. این معیارها شامل (۱) اندازه اثر فناوری در زمان حال و (۲) در افق آینده، (۳) میزان بلوغ فناوری در سطح جهانی و (۴) ملی، (۵) اهمیت دسترسی به زیرساخت‌های سخت‌افزاری و (۶) منابع انسانی، و (۷) جذابیت راهبردی فناوری برای کشور است.

ترکیب این معیارها امکان می‌دهد که فناوری‌ها نه‌فقط بر اساس وضعیت فعلی، بلکه بر اساس مسیرهای آینده و قابلیت تحقق آنها در بستر ملی ارزیابی شوند. به‌ویژه تمایز میان اثرگذاری کوتاه‌مدت و اثرگذاری در افق آینده، یکی از نقاط قوت این چارچوب محسوب می‌شود، زیرا سیاست‌گذار را از یکسان‌سازی حمایت‌ها و نگاه تک‌بعدی به فناوری‌ها باز می‌دارد. این تمایز، مبنایی برای تفکیک (الف)

سیاست‌های فوری، (ب) سیاست‌های تدریجی و (ج) سیاست‌های رصدی فراهم می‌آورد.

فرایند/اجرایی چارچوب

فرایند اجرایی پژوهش در چند گام اصلی طراحی شده است. ابتدا، بر اساس مطالعه پیشینه و گزارش‌های آینده‌نگر، فهرست اولیه‌ای از فناوری‌های مرتبط با حوزه‌های منتخب استخراج شد. در گام بعد، خبرگان از طریق گروه کانونی، این فهرست را اعتبارسنجی کردند تا فناوری‌های غیرمرتبط یا کم‌اهمیت حذف و تمرکز بر فناوری‌های واقعاً جریان‌ساز حفظ شود. سپس ارزیابی خبرگانی در قالب فرایند دلفی انجام شد و فناوری‌ها بر اساس معیارهای تعریف‌شده سنجش شد. در نهایت، با استفاده از شاخص‌های ترکیبی، اولویت فناوری‌ها در دو افق زمانی حال و آینده استخراج شد.

نکته حائز اهمیت آن است که این فرایند به‌گونه‌ای طراحی شده که قابلیت تکرار، به‌روزرسانی و تعمیم به دیگر حوزه‌های فناوری را داشته باشد. از این‌رو، چارچوب ارائه‌شده صرفاً به نتایج موردی این مطالعه محدود نمی‌شود، بلکه می‌توان همچون الگویی برای طراحی فرایندهای آینده‌نگر در سیاست‌گذاری علم و فناوری از آن استفاده کرد.

با این حال، باید تأکید کرد که هدف این پژوهش صرفاً ارائه فهرستی از اولویت‌های فناوری‌ها یا رتبه‌بندی فناوری‌ها نیست. مسئله اصلی، به چالش کشیدن خود فرایند اولویت‌گذاری، مفروضات ضمنی حاکم بر آن و سوگیری‌های ساختاری است که غالباً به‌صورت نادیده، تصمیم‌های سیاستی را شکل می‌دهند. این مطالعه می‌کوشد نشان دهد که «چگونه» اولویت‌ها تعیین می‌شوند، به همان اندازه و چه‌بسا بیش از «اینکه چه چیزی» در اولویت قرار می‌گیرد، اهمیت دارد و بدون بازاندیشی انتقادی در سازوکارهای تصمیم‌سازی، حتی دقیق‌ترین فهرست‌های اولویت نیز ممکن است به بازتولید ناکارآمدی‌های سیاستی منجر شوند. در مجموع، چارچوب تحلیلی و روش‌شناختی این پژوهش تلاش می‌کند فاصله میان تحلیل آینده و تصمیم‌گیری را کاهش دهد. تمرکز اصلی آن نه بر پیش‌بینی دقیق آینده، بلکه بر بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در زمان حال است. در بخش بعدی، یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این چارچوب ارائه و نشان داده می‌شود که این رویکرد چگونه به استخراج الگوهای معنادار برای سیاست‌گذاری علم و فناوری ایران منجر شده است.

جزئیات/اجرایی روش دلفی و گردآوری داده‌ها

در اجرای فرایند دلفی، خبرگان از میان متخصصان دانشگاهی، پژوهشگران و صاحب‌نظران حوزه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند.

معیار انتخاب خبرگان شامل تجربه تخصصی، سابقه پژوهشی یا اجرایی مرتبط و آشنایی با روندهای فناوری‌ها هر حوزه بوده است. فرایند دلفی در چند مرحله متوالی انجام شد. در مرحله نخست، خبرگان به ارزیابی اولیه فناوری‌ها بر اساس معیارهای تعریف‌شده پرداختند. در مراحل بعدی، نتایج تجمیع‌شده به‌صورت بازخورد کنترل‌شده در اختیار خبرگان قرار گرفت تا امکان بازنگری در قضاوت‌ها و کاهش پراکندگی نظرات فراهم شود.

برای تحلیل داده‌ها، از شاخص‌های آماری توصیفی و شاخص‌های ترکیبی استفاده شد و اولویت فناوری‌ها در دو افق زمانی حال و آینده استخراج گردید. میزان همگرایی نظرات خبرگان نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های اعتبار نتایج مورد توجه قرار گرفت.

یافته‌های اصلی و الگوهای سیاستی استخراج‌شده از ارزیابی خبرگانی

در این پژوهش، فرایند دلفی با مشارکت خبرگان از پنج حوزه اولویت‌دار فناوری شامل نانو و میکرو، مواد و ساخت پیشرفته، زیست‌فناوری و پزشکی دقیق، کوانتوم و ایتیک انجام شد. در مجموع، ۱۵۶ مورد مشارکت خبرگانی در این فرایند ثبت گردید. شایان ذکر است که به‌دلیل ماهیت بین‌رشته‌ای برخی فناوری‌ها، تعدادی از خبرگان در بیش از یک حوزه موضوعی مشارکت داشته‌اند، از این‌رو، این عدد بیانگر حجم مشارکت باست، نه لزوماً تعداد افراد منحصربه‌فرد.

از نظر سطح تحصیلات، ترکیب خبرگان عمدتاً در سطح تحصیلات تکمیلی بوده و بیش از ۷۰ درصد آنان دارای مدرک دکتری تخصصی هستند. از نظر وابستگی سازمانی، حدود ۵۰ نفر از مشارکت‌کنندگان را اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها تشکیل می‌دهد و سایر خبرگان نیز از میان متخصصان فعال در بخش‌های صنعتی، دولتی و خصوصی انتخاب شده‌اند که نشان‌دهنده تنوع نهادی مناسب در ترکیب نمونه است.

همچنین، توزیع سابقه کاری خبرگان نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مشارکت‌کنندگان دارای ۱۰ تا ۲۰ سال تجربه حرفه‌ای‌اند و در کنار آن، حضور افراد با سابقه بالاتر نیز موجب تقویت عمق تخصصی ارزیابی‌ها شده است. این ترکیب متنوع از نظر تخصص، تجربه و موقعیت نهادی، به افزایش اعتبار و جامعیت نتایج حاصل از فرایند دلفی کمک کرده است.

از آنجاکه بخش درخور توجهی از فناوری‌های شناسایی‌شده در زمره فناوری‌های نوظهور و لبه دانش قرار دارند، ترکیب جامعه خبرگانی به‌طور طبیعی به‌سمت اعضای هیئت علمی، پژوهشگران دانشگاهی و متخصصان فعال در آزمایشگاه‌های صنعتی پیشرو

مداخلات اجرایی کافی نیستند. فناوری‌ها از نظر سطح بلوغ، الزامات نهادی و نوع حمایت مورد نیاز یکسان نیستند. در نتیجه، تفسیر سیاستی این الگوها مستلزم بررسی آنها در سطح فناوری‌های مشخص است. بر همین اساس، در گام بعدی، تحلیل از سطح تجمعی به تحلیل تفکیکی فناوری‌ها منتقل می‌شود تا پیامدهای سیاستی هر فناوری به‌صورت دقیق‌تر روشن شود.

جمع‌بندی یافته‌های حوزه مواد و ساخت پیشرفته

بر اساس نتایج ارزیابی خبرگانی، حوزه مواد و ساخت پیشرفته از بالاترین ظرفیت اثرگذاری فناوریانه در افق آینده برخوردار است، اما این ظرفیت به‌صورت یکنواخت در تمامی فناوری‌ها توزیع نشده و به‌شدت وابسته به شرایط نهادی و صنعتی کشور است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، توزیع اولویت فناوری‌ها در «زمان حال (۲۰۲۵)» و «افق آینده (۲۰۳۵)» تفاوت شایان توجهی نشان می‌دهد. در وضعیت فعلی، بخش قابل توجهی از فناوری‌ها در حوزه‌هایی متمرکز شده‌اند که ماهیتاً پژوهش‌محورند و به توسعه دانش فنی و ظرفیت‌های آزمایشگاهی وابسته‌اند. در مقابل، در افق آینده، جابه‌جایی نسبی این توزیع به‌سمت فناوری‌هایی قابل مشاهده است که با مقیاس‌پذیری، کاربرد صنعتی و اتصال به زنجیره ارزش تولید شناخته می‌شوند.

این تغییر در الگوی توزیع اولویت‌ها نشان می‌دهد که وزن نسبی توجه از تولید دانش به‌سمت بهره‌برداری، یکپارچه‌سازی و استقرار در مقیاس صنعتی حرکت می‌کند. باین‌حال، این جابه‌جایی لزوماً به‌معنای هم‌راستایی کامل مسیر تحول فناوری در ایران با روندهای جهانی نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش میان بلوغ جهانی فناوری‌ها و ظرفیت‌ها و محدودیت‌های بومی کشور است. در برخی موارد، این تفاوت می‌تواند به شکل شکاف زمانی یا حتی واگرایی در مسیرهای توسعه میان ایران و جهان ظاهر شود.

در وضعیت فعلی، تمرکز بر فناوری‌هایی چون تولید و توسعه کاتالیست‌ها، پوشش‌های ضد میکروبی، مواد زیستی نوین، ساخت افزایشی و باتری‌ها، بازتاب‌دهنده وجود ظرفیت‌های اولیه تحقیقاتی و سطحی از بلوغ دانش فنی در کشور است. در مقابل، فناوری‌هایی که در افق آینده در اولویت قرار گرفته‌اند، عمدتاً مستلزم هزمنه‌های سه مؤلفه «طراحی مهندسی پیشرفته»، «کنترل دقیق فرایند و خواص مواد» و «اتصال مؤثر به صنعت» هستند؛ از جمله مواد پایدار و ایمن زیستی، کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر، مواد پیشرفته ذخیره انرژی، مواد سطحی با کارکردهای زیستی-درمانی و مواد هوشمند برای کاهش آلودگی و افزایش بهره‌وری.

بررسی الگوی کلی جابه‌جایی اولویت‌ها در شکل ۱ نشان می‌دهد

متماثل شده است. در مقابل، سهم خبرگان با تجربه گسترده اجرایی یا بازارمحور در برخی حوزه‌ها محدودتر بوده که این امر با سطح بلوغ پایین‌تر، عدم تثبیت مسیرهای فناوریانه و فاصله این فناوری‌ها از مرحله تجاری‌سازی هم‌خوانی دارد. به همین دلیل، تحلیل تفکیکی و حوزه‌به‌حوزه می‌توانست به بیش‌تفسیری نتایج ناپایدار منجر شود؛ از این‌رو، یافته‌ها در گام نخست به‌صورت تجمعی و میان‌حوزه‌ای تحلیل شده‌اند تا الگوهای مقاوم‌تر و معنادارتری برای سیاست‌گذاری کلان استخراج شود.

در گام دوم، نتایج هر حوزه فناوریانه به‌صورت خلاصه و تبیینی ارائه شده است تا ضمن حفظ دقت تحلیلی، از تبدیل مقاله به گزارش تفصیلی جلوگیری شود. این رویکرد، تمرکز مقاله را از «فهرست فناوری‌ها» به «منطق تصمیم‌سازی» منتقل می‌کند؛ منطقی که برای سیاست‌گذار اهمیت محوری دارد.

الگوهای کلان حاصل از تحلیل تجمعی خبرگان

نخستین الگوی برجسته در تحلیل تجمعی، عدم انطباق میان اولویت‌های کوتاه‌مدت و اولویت‌های افق آینده است. نتایج نشان می‌دهد فناوری‌هایی که از منظر اثرگذاری در زمان حال امتیاز بالایی دارند، لزوماً در افق آینده جایگاه راهبردی مشابهی نخواهند داشت و بالعکس. این عدم تقارن زمانی، پیام سیاستی روشنی دارد: سیاست‌های حمایتی یکنواخت و بدون تفکیک افق زمانی، مستعد خطای تخصیص منابع هستند.

الگوی دوم، شکاف معنادار میان بلوغ جهانی و بلوغ ملی فناوری‌هاست. در بخش قابل توجهی از فناوری‌های ارزیابی‌شده، سطح بلوغ جهانی به‌مراتب بالاتر از سطح بلوغ ملی برآورد شده است. این شکاف بیانگر آن است که چالش اصلی صرفاً فناوریانه نیست، بلکه نهادی و زیرساختی است. در چنین شرایطی، حمایت مالی مستقیم بدون توجه به ظرفیت‌های نهادی، منابع انسانی و زیرساخت‌های صنعتی، احتمال موفقیت سیاست‌ها را کاهش می‌دهد.

الگوی سوم، تنوع مسیرهای سیاستی مورد نیاز برای فناوری‌های جریان‌ساز است. یافته‌ها نشان می‌دهد که فناوری‌ها از نظر نوع مداخله سیاستی مورد نیاز، همگن نیستند. برخی فناوری‌ها مستعد سیاست‌های حمایتی فعال هستند، برخی دیگر بیش از هر چیز به تنظیم‌گری، ایجاد بسترهای آزمایشی یا سیاست‌های رصد فعال نیاز دارند. این تمایز، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای رویکرد آینده‌نگرانه این پژوهش به‌شمار می‌رود.

الگوهای کلان به‌دست‌آمده از تحلیل تجمعی، تصویری کلی از منطق حاکم بر اولویت‌گذاری فناوریانه ارائه می‌دهند، اما برای طراحی

اولویت‌هاست، نه صرفاً تغییر جایگاه یک یا چند فناوری خاص. از این منظر، نتایج نشان می‌دهد که تداوم تمرکز سیاستی صرف بر پژوهش‌های آزمایشگاهی منفصل از تولید، می‌تواند به تعمیق شکاف میان تولید دانش و بهره‌برداری صنعتی منجر شود.

که بسیاری از فناوری‌های آینده، امتداد خطی فناوری‌های فعلی نیستند، بلکه مستلزم بازآرایی زنجیره‌های ارزش، توسعه استانداردهای صنعتی، و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های آزمایشگاهی نیمه‌صنعتی و صنعتی هستند. این تفسیر مبتنی بر تحلیل الگوی کلی توزیع



شکل ۱. اولویت‌بندی فناوری‌های جریان‌ساز حوزه مواد و ساخت پیشرفته در کشور در زمان حال و آینده

است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، توزیع اولویت فناوری‌ها در «زمان حال» و «افق آینده» الگوی یکنواخت و خطی ندارد، بلکه تغییرات آن در چند سطح و با جابجایی‌های غیرهمگن میان دسته‌های مختلف فناوری قابل مشاهده است. در وضعیت فعلی، تمرکز فناوری‌ها عمدتاً بر حوزه‌هایی چون روش‌های تشخیص مولکولی بیماری‌ها، تولید کودهای زیستی، کشت بافت گیاهی، تولید انرژی زیستی از پسماندهای آلی و برخی کاربردهای مهندسی زیستی قرار دارد. این تمرکز بازتاب‌دهنده وجود سطحی از بلوغ فنی، تجربه اجرایی و امکان‌پذیری نسبی در چارچوب‌های نهادی موجود است.

بر این اساس، پیام سیاستی این حوزه آن است که موفقیت فناوری‌های مواد و ساخت پیشرفته در افق آینده، نه صرفاً به پیشرفت علمی، بلکه به هم‌راستاسازی سیاست‌های پژوهشی، صنعتی و نوآوری وابسته است. به بیان دیگر، گذار از «دانش‌محوری منفرد» به «سیستم نوآوری یکپارچه» شرط لازم برای بالفعل‌سازی ظرفیت‌های این حوزه در اقتصاد و صنعت کشور است.

جمع‌بندی یافته‌های حوزه زیست‌فناوری و پزشکی دقیق یافته‌های ارزیابی خبرگانی در حوزه زیست‌فناوری و پزشکی دقیق نشان می‌دهد که این حوزه از جذابیت راهبردی بالایی در افق آینده برخوردار است، اما هم‌زمان با سطحی از پیچیدگی نهادی مواجه

دارای اولویت در افق آینده، در مقایسه با فناوری‌های فعلی، وابستگی بیشتری به موضوعاتی مانند داده‌های حساس سلامت، ملاحظات اخلاقی، و هماهنگی میان بازیگران متعدد در نظام سلامت و پژوهش دارند. این تفسیر مبتنی بر تحلیل الگوی کلی توزیع اولویت‌هاست، نه صرفاً تغییر جایگاه یک یا چند فناوری خاص.

بر این اساس، می‌توان استدلال کرد که مسیر توسعه این حوزه، علاوه بر پیشرفت‌های فناورانه، به میزان قابل توجهی به نحوه شکل‌گیری و کارآمدی چارچوب‌های حقوقی، اخلاقی و نهادی وابسته است. در چنین شرایطی، محدودیت‌های مقرراتی، نبود شفافیت در قواعد، و ناهماهنگی نهادی می‌تواند مانند عامل کندکننده یا حتی بازدارنده در مسیر توسعه فناوری عمل کند.

در مقابل، در افق آینده، جابه‌جایی در توزیع اولویت‌ها به سمت فناوری‌هایی مشاهده می‌شود که علاوه بر پیچیدگی فنی، وابستگی بیشتری به داده، زیرساخت‌های دیجیتال و چارچوب‌های تنظیم‌گرانه دارند؛ از جمله پزشکی دقیق، پایش سلامت دیجیتال، تحلیل داده‌های زیستی برای پیش‌بینی عوارض دارویی، اصلاحات ژنتیکی هدفمند، پروتئین‌های نو ترکیب پیشرفته و کاربردهای هوش مصنوعی در زیست‌پزشکی.

بررسی الگوی جابه‌جایی اولویت‌ها در شکل ۲ نشان می‌دهد که بسیاری از فناوری‌های آینده در این حوزه، صرفاً امتداد فنی فناوری‌های موجود نیستند، بلکه مستلزم تغییر در الزامات نهادی و تنظیم‌گرانه هستند. این برداشت از آنجا ناشی می‌شود که فناوری‌های



شکل ۲. اولویت‌بندی فناوری‌های جریان‌ساز حوزه زیست‌فناوری و پزشکی دقیق در کشور در زمان حال و آینده

مدیریت ریسک‌های نهادی است.

جمع‌بندی یافته‌های حوزه اپتیک

یافته‌های ارزیابی خبرگانی در حوزه اپتیک نشان می‌دهد که این

در جمع‌بندی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که زیست‌فناوری و پزشکی دقیق، حوزه‌ای با پتانسیل بالا اما حساسیت نهادی قابل توجه است. از این رو، موفقیت در این حوزه مستلزم گذار از سیاست‌گذاری صرفاً فناورانه به سیاست‌گذاری تنظیم‌گرانه، بین‌بخشی و مبتنی بر

محدود از اولویتهای غالب رخ می‌دهد. این الگو می‌تواند نشانه‌ای از توزیع پراکنده توجه و منابع در این حوزه باشد.

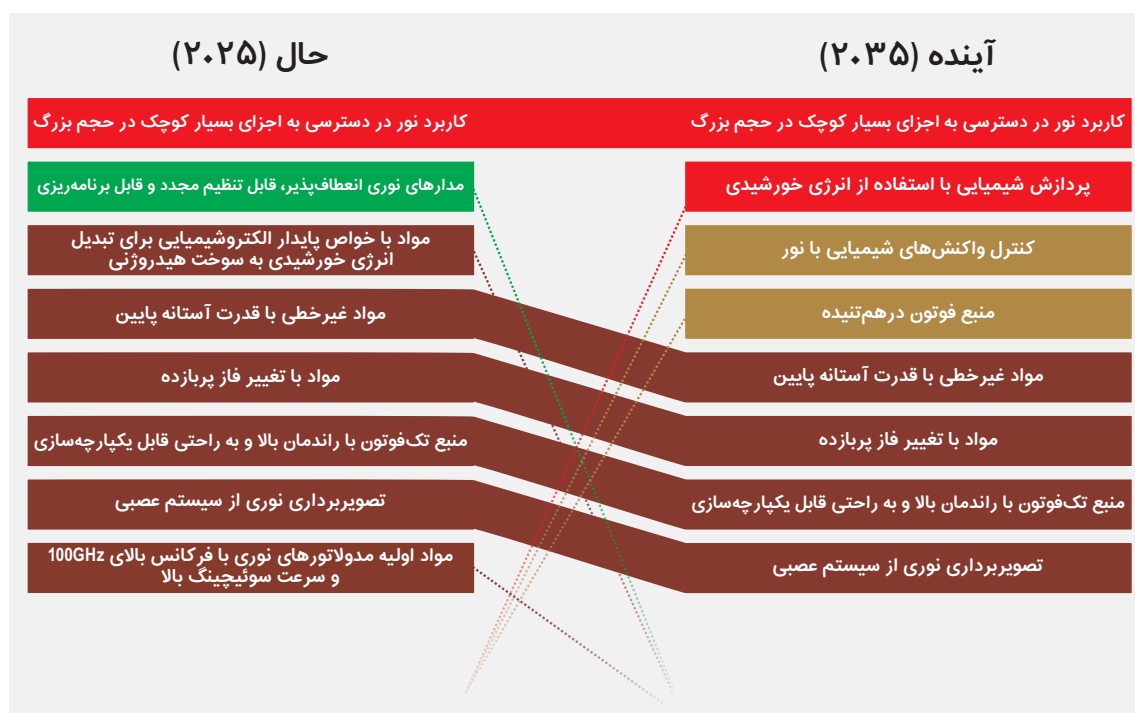
در افق آینده، اگرچه برخی فناوری‌ها مانند پردازش شیمیایی با استفاده از انرژی خورشیدی، کنترل واکنش‌های شیمیایی با نور، و منابع فوتونی پیشرفته اهمیت بیشتری می‌یابند، اما بررسی جابجایی اولویت‌ها نشان می‌دهد که این تغییرات الزاماً حول یک مسیر سیاستی مشخص یا مأموریت‌محور شکل نگرفته‌اند.

از این منظر، می‌توان استدلال کرد که بخشی از فناوری‌های اپتیک، به‌رغم بلوغ علمی قابل قبول، فاقد تمرکز سیاستی مشخص هستند؛ به این معنا که اولویت‌ها در این حوزه به‌جای هم‌افزایی و تجمع در مسیرهای محدود و هدفمند، در حوزه‌های متنوعی پراکنده شده‌اند. این تفسیر مبتنی بر تحلیل الگوی کلی توزیع و امتداد مسیرها در شکل است، نه صرفاً موقعیت یک یا چند فناوری خاص. این وضعیت می‌تواند به پخش‌شدگی منابع، پروژه‌ها و حمایت‌ها منجر شود و احتمال شکل‌گیری مزیت فناورانه متمرکز را کاهش دهد.

حوزه از نظر پیوندهای میان‌رشته‌ای و ظرفیت اثرگذاری میان‌مدت، جایگاهی راهبردی اما نسبتاً پراکنده در نظام نوآوری کشور دارد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فناوری‌های اپتیک در هر دو افق «حال (۲۰۲۵)» و «آینده (۲۰۳۵)» حضور دارند، اما الگوی جابجایی آنها بیشتر به‌صورت امتدادهای موازی و بدون تمرکز در یک یا چند مسیر غالب قابل مشاهده است.

در وضعیت فعلی، اولویت‌ها عمدتاً بر فناوری‌هایی متمرکز است که یا کاربردهای عمومی و گسترده دارند، مانند تصویربرداری نوری در سیستم‌های عصبی، منابع نور با توان و پایداری بالا، و مواد با خواص غیرخطی، یا به‌عنوان فناوری‌های پشتیبان در سایر حوزه‌های ایفای نقش می‌کنند. این ترکیب نشان‌دهنده آن است که اپتیک در حال حاضر بیشتر به‌عنوان یک «فناوری توانمندساز» عمل می‌کند تا یک حوزه مأموریت‌محور مستقل.

بررسی الگوی مسیرها در شکل ۳ نشان می‌دهد که این فناوری‌ها از وضعیت فعلی به افق آینده امتداد می‌یابند، اما این امتدادها عمدتاً بدون همگرایی در یک جهت مشخص یا تمرکز بر مجموعه‌ای



شکل ۳. اولویت‌بندی فناوری‌های جریان‌ساز حوزه اپتیک در کشور در زمان حال و آینده

مستلزم تمرکز سیاستی بیشتر، تعریف مأموریت‌های مشخص و هم‌راستاسازی این حوزه با نیازهای اولویت‌دار کشور در حوزه‌هایی مانند انرژی، سلامت و فناوری‌های پیشرفته است.

در جمع‌بندی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که حوزه اپتیک در ایران از نظر علمی دارای ظرفیت‌های قابل توجه و پیوندهای بالقوه قوی با دیگر حوزه‌های راهبردی است، اما بالفعل‌سازی این ظرفیت‌ها

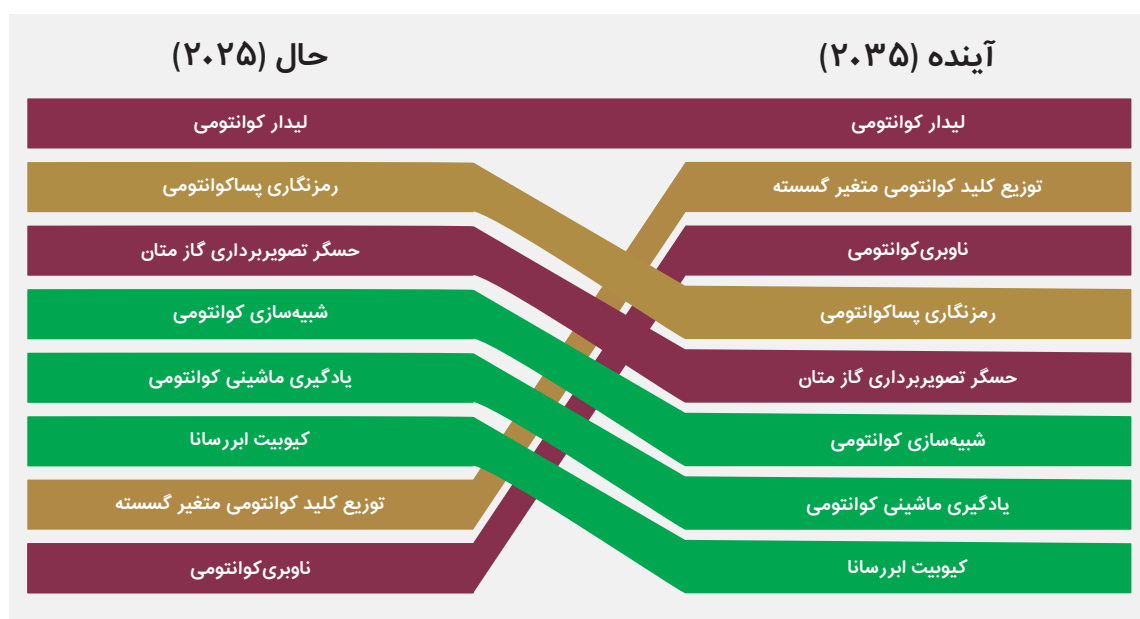
جمع‌بندی یافته‌های حوزه کوانتوم

یافته‌های ارزیابی خبرگانی در حوزه کوانتوم نشان می‌دهد که این حوزه با نوعی عدم تقارن زمانی در الگوی اولویت‌ها مواجه است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بسیاری از فناوری‌های کوانتومی در «زمان حال (۲۰۲۵)» در سطوحی با اثرگذاری محدود و عمدتاً در مراحل مفهومی یا آزمایشگاهی قرار دارند، درحالی‌که در «افق آینده (۲۰۳۵)» همین فناوری‌ها در زمره گزینه‌های با اهمیت راهبردی بالا ارزیابی شده‌اند.

این تفاوت در توزیع اولویت‌ها میان دو افق زمانی نشان می‌دهد که فاصله قابل توجهی میان وضعیت فعلی و نقش مورد انتظار این فناوری‌ها در آینده وجود دارد. در وضعیت فعلی، تمرکز بر حوزه‌هایی چون شبیه‌سازی کوانتومی، یادگیری ماشین کوانتومی، کویت‌های ابررسانا و برخی کاربردهای اولیه در حسگری و تصویربرداری است که بیشتر بازتاب‌دهنده ظرفیت‌های پژوهشی و علمی موجود هستند. در مقابل، در افق آینده، جابه‌جایی اولویت‌ها به سمت فناوری‌هایی همچون توزیع کلید کوانتومی، رمزنگاری پساکوانتومی، ناوبری

کوانتومی و سامانه‌های پیشرفته حسگری مشاهده می‌شود؛ حوزه‌هایی که علاوه بر پیچیدگی فنی، مستلزم زیرساخت‌های پیشرفته، اکوسیستم صنعتی و چارچوب‌های کاربردی گسترده‌تری هستند.

بررسی الگوی جابه‌جایی در شکل ۴ نشان می‌دهد که مسیر ارتباطی میان وضعیت فعلی و آینده، بیشتر از جنس انباشت تدریجی دانش، توسعه سرمایه انسانی و یادگیری فناورانه است تا توسعه خطی کوتاهمدت با بازده سریع. این برداشت از آنجا ناشی می‌شود که فناوری‌های دارای اولویت در افق آینده، در مقایسه با فناوری‌های فعلی، فاصله بیشتری از کاربردهای اقتصادی مستقیم دارند و مستلزم بلوغ زیرساختی و نهادی بلندمدت هستند. این تفسیر مبتنی بر تحلیل الگوی کلی توزیع اولویت‌هاست، نه صرفاً تغییر جایگاه چند فناوری خاص. از این منظر، می‌توان استدلال کرد که سیاست‌گذاری در حوزه کوانتوم با منطق رایج «بازده کوتاهمدت» همخوانی محدودی دارد و مستلزم رویکردی مبتنی بر سرمایه‌گذاری تدریجی، توسعه ظرفیت‌های انسانی و رصد مستمر تحولات جهانی است.



شکل ۴. اولویت‌بندی فناوری‌های جریان‌ساز حوزه کوانتوم در کشور در زمان حال و آینده

جمع‌بندی یافته‌های حوزه نانو و میکرو

یافته‌های ارزیابی خبرگانی در حوزه نانو و میکرو نشان می‌دهد که این حوزه، هم در وضعیت فعلی و هم در افق آینده، از سطح بالایی از اثرگذاری بالقوه برخوردار است. با این حال، همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توزیع و مسیر تحول فناوری‌ها در این حوزه یکنواخت نیست و الگوی گذار آنها از «حال» به «آینده» با ناهمگنی قابل توجهی همراه است.

در جمع‌بندی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که حوزه کوانتوم بیش از آنکه میدان رقابت کوتاهمدت فناورانه باشد، عرصه‌ای برای سرمایه‌گذاری راهبردی بلندمدت است؛ حوزه‌ای که در آن پیشرفت پایدار نه از مسیر شتاب‌زدگی در حمایت‌های پروژه‌محور، بلکه از طریق تداوم سیاست‌های یادگیری‌محور و تمرکز بر توسعه سرمایه انسانی حاصل می‌شود.



شکل ۵. اولویت‌بندی فناوری‌های جریان‌ساز حوزه نانو و میکرو در زمان حال و آینده

محدودیت‌های نهادی، زیرساختی و تنظیم‌گرانه مواجه‌اند که مسیر گذار آنها را پیچیده‌تر می‌سازد. بررسی الگوی مسیرها و جابه‌جایی اولویت‌ها در شکل ۵ نشان می‌دهد که فناوری‌ها در این حوزه رفتار یکسانی ندارند: برخی مسیرها کوتاه‌تر و هم‌راست‌تر و به کاربرد نزدیک‌ترند، درحالی‌که برخی دیگر مسیرهای طولانی‌تر، غیرخطی و وابسته به شرایط نهادی دارند. این تفاوت در الگوی مسیرها، مبنای تفسیر ناهمگنی ساختاری در این حوزه است.

بر اساس این الگو، می‌توان استنباط کرد که بخشی از فناوری‌ها

در وضعیت کنونی، بخشی از فناوری‌های نانو و میکرو همچون رنگ‌های پیشرفته، کاتالیست‌های پیشرفته، حسگرها و سیالات هوشمند به سطحی از بلوغ فنی رسیده‌اند که امکان بهره‌برداری صنعتی یا نیمه‌صنعتی آنها فراهم شده است. این فناوری‌ها دارای مسیرهای نسبتاً کوتاه‌تر و مستقیم‌تر از پژوهش به کاربرد هستند. در مقابل، فناوری‌هایی همچون ویرایش ژن، نانوذرات پیشرفته برای زیست‌پزشکی، سامانه‌های هدفمند دارورسانی و برخی کاربردهای پیشرفته مهندسی بافت، به‌رغم اهمیت علمی و راهبردی، با

در افق آینده دچار «ارتقای نقش» می‌شوند و از فناوری‌های پشتیبان به فناوری‌های جریان‌ساز تبدیل می‌گردند، درحالی‌که برخی دیگر، با وجود حضور در فضای پژوهشی، همچنان نیازمند رصد و بلوغ تدریجی باقی می‌مانند. این تفسیر مبتنی بر تحلیل الگوی کلی مسیرها و توزیع اولویت‌هاست، نه صرفاً تغییر جایگاه چند فناوری خاص.

از این منظر، نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری در این حوزه نمی‌تواند مبتنی بر یک الگوی حمایتی یکنواخت باشد. بلکه می‌توان سه دسته متمایز از فناوری‌ها را در این حوزه تشخیص داد: (۱) فناوری‌های نزدیک به بهره‌برداری که مستلزم تسهیل صنعتی‌سازی و بازارسازی‌اند؛ (۲) فناوری‌های نیازمند تکمیل زنجیره ارزش که به پیوند مؤثر میان پژوهش، صنعت و تنظیم‌گری وابسته‌اند؛ و (۳) فناوری‌هایی که به‌رغم اهمیت علمی، در افق زمانی کوتاه‌مدت به رصد و توسعه تدریجی نیاز دارند.

در جمع‌بندی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که حوزه نانو و میکرو مستلزم سیاست‌گذاری لایه‌بندی‌شده و زمان‌حساس است. به بیان دیگر، موفقیت در این حوزه نه در افزایش هم‌زمان حمایت از همه فناوری‌ها، بلکه در تشخیص جایگاه هر فناوری در چرخه بلوغ، زمان‌بندی مداخله و انتخاب ابزار سیاستی متناسب نهفته است. این رویکرد شرط لازم برای تبدیل ظرفیت علمی این حوزه به مزیت فناورانه پایدار در سطح ملی است.

مرور یافته‌های حوزه‌های مختلف نشان می‌دهد که تفاوت میان فناوری‌ها صرفاً به ویژگی‌های فنی آنها محدود نیست، بلکه زمینه‌های نهادی، سطح عدم قطعیت و ظرفیت کنشگران نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به نتایج سیاستی دارند. به‌ویژه، نحوه و میزان مشارکت خبرگان در فرایند ارزیابی، خود حامل پیام‌هایی فراتر از محتوای فناوری‌هاست. از همین رو، در ادامه، تمرکز از دلالت‌های بخشی فراتر می‌رود و به دلالت نهادی کمتر دیده‌شده پرداخته می‌شود.

دلالت نهادی مغفول: مشارکت خبرگان در بافتار عدم قطعیت

در کنار دلالت‌های سیاستی مطرح‌شده، تجربه اجرای این پژوهش دلالت نهادی مهمی را نیز آشکار می‌سازد که کمتر در مطالعات آینده‌نگاری مورد توجه قرار گرفته است. سطح و الگوی مشارکت خبرگان در فرایندهای ارزیابی آینده‌نگرانه، خود تابعی از بافتار اجتماعی، اقتصادی و سیاسی حاکم بر نظام علم و فناوری است. محدودیت یا عدم مشارکت برخی خبرگان را نمی‌توان صرفاً به ملاحظات فردی یا ضعف طراحی پژوهش نسبت داد، بلکه این پدیده تا حد زیادی بازتابی از شرایط عدم قطعیت، بی‌ثباتی نهادی و ابهام در افق‌های تصمیم‌گیری است که انگیزه کنشگران علمی برای مشارکت

فعال را تضعیف می‌کند. از این منظر، مشارکت خبرگان نه‌فقط یک ورودی روش‌شناختی، بلکه یک شاخص نهادی از کیفیت حکمرانی علم و فناوری محسوب می‌شود. نادیده گرفتن این پیوند، خطر تقلیل آینده‌نگاری به یک تمرین تکنیکی را در پی دارد و می‌تواند اثربخشی آن را در فرایند سیاست‌گذاری به‌طور جدی محدود سازد.

دلالت‌های سیاستی و توصیه‌های اجرایی

یافته‌های این پژوهش فراتر از شناسایی فناوری‌های جریان‌ساز، حامل پیام‌های روشنی برای بازاندیشی در منطق سیاست‌گذاری علم و فناوری در ایران است. مهم‌ترین دلالت سیاستی نتایج آن است که چالش اصلی نظام سیاست‌گذاری، نبود اطلاعات یا کمبود فهرست‌های فناورانه نیست، بلکه نبود چارچوب آینده‌نگاری برای اولویت‌بندی تصمیم‌هاست. در غیاب چنین چارچوبی، حتی دقیق‌ترین تحلیل‌های فناورانه نیز به تصمیم‌های پراکنده، کوتاه‌مدت و بعضاً متناقض منجر می‌شوند.

از این منظر، نتایج پژوهش صرفاً به نقد کلی منطق سیاست‌گذاری محدود نمی‌شود، بلکه امکان استخراج دلالت‌های سیاستی مشخص را فراهم می‌کند. الگوهای شناسایی‌شده نشان می‌دهد که ناکارآمدی‌های موجود، ریشه در شیوه تفکیک افق‌های زمانی، نوع مداخلات سیاستی و نقش نهادهای تصمیم‌گیر دارند. بر همین اساس، در ادامه، مهم‌ترین دلالت‌های سیاستی پژوهش به‌صورت منظم و تفکیک‌شده ارائه می‌شود.

ضرورت تفکیک سیاست‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت

نخستین و شاید بنیادی‌ترین دلالت سیاستی این مطالعه، ضرورت تفکیک روشن میان سیاست‌های کوتاه‌مدت و سیاست‌های افق آینده است. تحلیل تجمعی ارزیابی خبرگان نشان داد که هم‌پوشانی محدودی میان فناوری‌هایی با اثرگذاری بالا در زمان حال و فناوری‌های راهبردی در افق آینده وجود دارد. این یافته به‌طور مستقیم سیاست‌های حمایتی یکنواخت را زیر سؤال می‌برد.

در عمل، سیاست‌گذاری علم و فناوری در ایران غالباً با یک منطق واحد برای همه فناوری‌ها انجام می‌شود؛ منطقی که در آن، حمایت مالی، ایجاد برنامه‌های پژوهشی و تخصیص منابع بدون تمایز زمانی صورت می‌گیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که چنین رویکردی نه‌تنها ناکارآمد است، بلکه می‌تواند به عقب ماندن از فناوری‌های آینده‌ساز و اتلاف منابع در فناوری‌های کم‌اثر در افق بلندمدت منجر شود. سیاست‌گذار ناگزیر است میان فناوری‌هایی که به حمایت فوری نیاز دارند، فناوری‌هایی که باید در سید رصد قرار گیرند و فناوری‌هایی که مستلزم سرمایه‌گذاری بلندمدت‌اند، تمایز قائل

شود. این تمایز نه بر اساس یک قضاوت کلی، بلکه بر مبنای تحلیل ترکیبی شاخص‌های ارزیابی خبرگانی در این پژوهش شکل گرفته است؛ به‌گونه‌ای که هم‌زمان اثرگذاری فناوری در زمان حال و آینده، سطح بلوغ ملی و جهانی، و الزامات نهادی آن در نظر گرفته شده است. بر این اساس، فناوری‌هایی با اثرگذاری بالا در زمان حال و بلوغ نسبی، در اولویت مداخلات کوتاه‌مدت قرار می‌گیرند، درحالی‌که فناوری‌های با اهمیت راهبردی در افق آینده اما بلوغ پایین، مستلزم سرمایه‌گذاری بلندمدت‌اند و دسته‌ای دیگر، به‌دلیل عدم قطعیت بالا یا وابستگی نهادی، در سبد رصد و پایش قرار می‌گیرند.

عبور از حمایت مالی به سیاست‌های ترکیبی

دالالت دوم، بازتعریف مفهوم «حمایت» در سیاست‌گذاری فناوریانه است. تحلیل ترکیبی نتایج ارزیابی خبرگانی نشان می‌دهد که در بسیاری از حوزه‌ها، چالش‌های توسعه فناوری صرفاً به کمبود منابع مالی محدود نمی‌شود. به‌ویژه در مواردی که فناوری‌ها در افق آینده از اهمیت بالایی برخوردارند، اما از نظر بلوغ ملی، زیرساخت‌های پشتیبان یا الزامات نهادی در سطح پایین‌تری قرار دارند، محدودیت‌های اصلی بیشتر به ضعف زیرساخت، کمبود سرمایه انسانی تخصصی یا نبود چارچوب‌های تنظیم‌گرانه شفاف بازمی‌گردد. این برداشت بر مبنای هم‌زمانی شکاف میان اهمیت آینده و قابلیت تحقق، در کنار الزامات نهادی فناوری‌ها شکل گرفته است، نه صرفاً مقایسه دو افق زمانی.

بر این اساس، سیاست‌های علم و فناوری باید از تمرکز صرف بر حمایت مالی به سمت سیاست‌های ترکیبی حرکت کنند؛ سیاست‌هایی که هم‌زمان توسعه زیرساخت، تنظیم‌گری هوشمند، تقویت سرمایه انسانی و ایجاد پیوند با صنعت را دربرگیرند. این رویکرد به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند زیست‌فناوری، پزشکی دقیق و مواد ساخت پیشرفته اهمیت دارد، جایی که موانع نهادی می‌توانند اثرگذاری فناوری‌ها را به‌طور جدی محدود کنند.

نقش آینده‌نگاری در کاهش خطای سیاستی

یکی از کارکردهای کمتر مورد توجه آینده‌نگاری فناوری، کاهش خطای سیاستی است. تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، همواره با ریسک همراه است، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده نظام‌مند از ارزیابی خبرگانی می‌تواند این ریسک را مدیریت‌پذیرتر کند. آینده‌نگاری در این چارچوب، نه به معنای پیش‌بینی دقیق آینده، بلکه به معنای شناسایی گزینه‌های پرریسک، فرصت‌های نهفته و مسیرهای محتمل تحول فناوریانه است.

از منظر سیاستی، این امر به معنای آن است که آینده‌نگاری باید بخشی از فرایند رسمی تصمیم‌سازی در نظر گرفته شود، نه فعالیتی

جانبی یا مطالعاتی تزئینی. نهادینه‌سازی ابزارهایی مانند ارزیابی خبرگانی ساختارمند می‌تواند از تصمیم‌های واکنشی و مبتنی بر فشارهای کوتاه‌مدت جلوگیری کند و انسجام سیاستی را افزایش دهد.

بازتعریف نقش نهادهای سیاست‌گذار علم و فناوری

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که نهادهای سیاست‌گذار علم و فناوری، به‌ویژه در سطح ملی، مستلزم بازتعریف نقش خود از «توزیع‌کننده منابع» به «معمار مسیرهای فناوریانه» هستند. این تغییر نقش مستلزم آن است که سیاست‌گذار نه تنها به انتخاب فناوری‌ها، بلکه به طراحی مسیرهای توسعه، زمان‌بندی مداخلات و هماهنگی میان بازیگران توجه کند. بدون استقرار یک سازوکار پایدار آینده‌نگر، سیاست‌گذاری علم و فناوری ناگزیر به تصمیم‌گیری‌های یکنواخت و کوتاه‌مدت میل می‌کند. عدم انطباق میان اولویت‌های زمان حال و افق آینده، در کنار تنوع مسیرهای سیاستی لازم برای فناوری‌های مختلف، بیانگر آن است که تصمیم‌گیری موردی یا پروژه‌محور قادر به پاسخ‌گویی به پیچیدگی‌های موجود نیست. از این رو، نهادینه‌سازی آینده‌نگاری فناوری نه انتخابی هنجاری، بلکه پاسخی مستقیم به الگوهای مشاهده‌شده در یافته‌های این پژوهش است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نبود نهادینه‌سازی آینده‌نگاری، خود یکی از ریشه‌های اصلی ناکارآمدی سیاست‌های فناوریانه در مواجهه با عدم قطعیت است.

در این چارچوب، آینده‌نگاری فناوری می‌تواند به ابزاری برای هم‌راستاسازی سیاست‌ها، کاهش تعارضات نهادی و ایجاد زبان مشترک میان دولت، دانشگاه و صنعت تبدیل شود. بدون چنین ابزاری، سیاست‌گذاری همچنان متکی بر تصمیم‌های مقطعی و بخشی باقی خواهد ماند.

توصیه‌های اجرایی برای سیاست‌گذاری علم و فناوری ایران

تحلیل تجمعی نتایج نشان می‌دهد که ضعف‌های سیاستی مشاهده‌شده نه صرفاً ناشی از انتخاب نادرست فناوری‌ها، بلکه عمدتاً محصول نبود تفکیک زمانی، ناهماهنگی ابزارهای مداخله و گسست میان فرایندهای تحلیلی و تصمیم‌سازی نهادی است. توصیه‌های سیاستی زیر مستقیماً برای پاسخ به این سه ضعف ساختاری ارائه می‌شوند. بر اساس یافته‌های ارائه‌شده، می‌توان مجموعه‌ای از توصیه‌های اجرایی مشخص را برای بهبود سیاست‌گذاری علم و فناوری در ایران مطرح کرد:

◆ نهادینه‌سازی آینده‌نگاری فناوری به عنوان بخشی از فرایند رسمی اولویت‌بندی و تخصیص منابع در حوزه علم و فناوری، به‌گونه‌ای که نتایج ارزیابی‌های آینده‌نگر مستقیماً در

تصمیم‌های بودجه‌ای، برنامه‌ریزی و تدوین اسناد بالادستی استفاده شود؛

♦ تفکیک صریح سیاست‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت در حمایت از فناوری‌ها، بر اساس اثرگذاری و بلوغ آنها، به‌نحوی که از یکسان‌سازی مداخلات برای فناوری‌های ناهمگن جلوگیری شود؛

♦ حرکت به‌سمت سیاست‌های ترکیبی، به این معنا که حمایت از فناوری‌ها صرفاً به تأمین مالی محدود نشود، بلکه هم‌زمان توسعه زیرساخت، چارچوب‌های تنظیم‌گرانه و سرمایه‌انسانی تخصصی را نیز دربرگیرد؛

♦ استفاده نظام‌مند از ارزیابی خبرگانی ساختارمند، به‌منظور افزایش شفافیت در تصمیم‌گیری، کاهش سوگیری‌های فردی و بهبود کیفیت اولویت‌بندی در شرایط عدم قطعیت؛

♦ تمرکز بر الگوهای سیاستی به‌جای فهرست فناوری‌ها در اسناد بالادستی و برنامه‌های ملی، به این معنا که به‌جای تعیین فهرست‌های ثابت، چارچوبی برای دسته‌بندی فناوری‌ها بر اساس ویژگی‌هایی مانند سطح بلوغ، زمان اثرگذاری و الزامات نهادی تعریف شده، برای هر دسته، نوع مداخله سیاستی متناسب طراحی شود.

این توصیه‌ها نه نسخه‌ای کلی، بلکه حاصل تحلیل مشخص از نتایج ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز در ایران هستند و می‌توانند مبنایی عملی برای اصلاح منطق سیاست‌گذاری در این حوزه فراهم آورند.

نتیجه‌گیری

این مقاله باهدف تبیین نقش آینده‌نگاری فناوری در بهبود اولویت‌بندی سیاست‌های علم و فناوری ایران تدوین شد و نشان داد که در شرایط عدم قطعیت فزاینده، تصمیم‌گیری مبتنی بر رویکردهای گذشته‌نگر و یکنواخت، پاسخگوی نیازهای راهبردی کشور نیست. یافته‌های حاصل از ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری مؤثر در این حوزه، مستلزم تفکیک زمانی سیاست‌ها، تنوع ابزارهای مداخله و عبور از منطق حمایت مالی ساده‌انگانه است. آینده‌نگاری فناوری، در صورتی که به‌طور واقعی به فرایند تصمیم‌سازی متصل شود، می‌تواند این گذار را تسهیل کند.

درعین‌حال، یکی از نکات قابل تأمل این مطالعه، محدودیت مشارکت خبرگان در برخی حوزه‌هاست؛ نکته‌ای که صرفاً نباید محدودیت روش‌شناختی تلقی شود. تجربه اجرای این پژوهش نشان می‌دهد که سطح و کیفیت مشارکت خبرگان، خود تابعی از شرایط

کلان‌تری است که فراتر از طراحی تحقیق قرار دارد. بی‌ثباتی‌های اقتصادی، عدم قطعیت‌های سیاسی، فشارهای نهادی و کاهش افق پیش‌بینی‌پذیری در محیط اجتماعی، می‌توانند انگیزه و تمایل کنشگران علمی و فناورانه برای مشارکت فعال در فرایندهای آینده‌نگرانه را تضعیف کنند. در چنین شرایطی، افزایش مشارکت خبرگان صرفاً با بهبود طراحی روش‌شناختی محقق نمی‌شود، بلکه مستلزم مداخلات مکمل در سطح طراحی فرایند و انگیزه‌های مشارکت است. تجربه این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سازوکارهای انعطاف‌پذیر (مانند دلفی بی‌درنگ)، کاهش بار زمانی مشارکت، ارائه بازخورد شفاف به خبرگان درباره اثرگذاری نظرات آنها، و ایجاد مشوق‌های حرفه‌ای می‌تواند تا حدی از افت مشارکت در شرایط بی‌ثبات بکاهد. همچنین، تنوع‌بخشی به ترکیب خبرگان و کاهش وابستگی به شبکه‌های محدود، به افزایش تاب‌آوری فرایندهای آینده‌نگاری کمک می‌کند. در غیر این صورت، خطر آن وجود دارد که فرایندهای آینده‌نگاری به‌تدریج به بازتاب دیدگاه‌های گروه‌های محدود و در دسترس تبدیل شوند و اعتبار آنها کاهش یابد.

از این منظر، عدم مشارکت یا مشارکت محدود خبرگان را می‌توان نشانه‌ای از همان عدم قطعیتی دانست که سیاست‌گذاری علم و فناوری نیز با آن مواجه است. در شرایطی که افق‌های توسعه مبهم‌اند و پیوند میان تحلیل‌های تخصصی و تصمیم‌های سیاستی ضعیف است، مشارکت در فرایندهای ارزیابی آینده‌نگرانه ممکن است از سوی برخی خبرگان کم‌اثر یا کم‌فایده تلقی شود. این چرخه معیوب، خود یکی از موانع توسعه پایدار علم و فناوری به شمار می‌رود.

بر همین اساس، یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد که نهادینه‌سازی آینده‌نگاری فناوری صرفاً به طراحی ابزارهای تحلیلی محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم بازسازی اعتماد نهادی، افزایش شفافیت تصمیم‌سازی و ایجاد پیوند معنادار میان مشارکت خبرگان و نتایج سیاستی است. تازمانی که خبرگان اطمینان نیابند که ارزیابی‌ها و قضاوت‌های آنان به‌طور واقعی در فرایند سیاست‌گذاری استفاده می‌شوند، مشارکت گسترده و پایدار در چنین مطالعاتی شکل نخواهد گرفت. ازاین‌رو، افزایش مشارکت پایدار خبرگان مستلزم طراحی سازوکارهای نهادی و اجرایی متناسب است. انتخاب نهاد مجری متناسب با حوزه سیاستی، ترکیب روش‌های مشارکتی (مانند دلفی، کارگاه‌های تخصصی و سناریونویسی)، ایجاد مشوق‌های حرفه‌ای و ارائه بازخورد شفاف درباره نحوه استفاده از نتایج، از جمله عواملی هستند که می‌توانند اعتماد خبرگان را تقویت کنند. همچنین، نحوه انتشار هدفمند نتایج و پیوند آنها با فرایندهای رسمی تصمیم‌سازی، نقش مهمی در تبدیل ارزیابی‌های خبرگانی به دستور کارهای سیاستی

تقدیر و تشکر

ایفامی کند.

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از حمایت‌های «معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست جمهوری» به‌عنوان کارفرمای این پژوهش ابراز می‌دارد که فراهم‌سازی بستر اجرایی این مطالعه را ممکن ساخت. همچنین از تمامی خبرگان محترمی که با صرف زمان و ارائه دیدگاه‌های تخصصی خود در فرایند دلفی مشارکت کردند، صمیمانه تشکر می‌شود. بدون مشارکت دقیق و مسئولانه این خبرگان، انجام این پژوهش و دستیابی به نتایج حاضر امکان‌پذیر نبود.

افشای استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی

در نگارش و ویرایش نهایی این مقاله، از ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی صرفاً در حد ویرایش زبانی و بهبود خوانایی متن استفاده شده است. ابزار استفاده‌شده برای ویرایش متن و بر اساس مستندات مراجعی همچون پایگاه فرهنگستان شعر و ادب پارسی آموزش دیده است. ضمناً این ابزارها در هیچ‌یک از مراحل طراحی پژوهش، گردآوری و تحلیل داده‌ها، یا تفسیر نتایج مداخله‌ای نداشته‌اند و مسئولیت کامل محتوای علمی مقاله بر عهده نویسندگان است.

در این چارچوب، عدم مشارکت کامل خبرگان را می‌توان نه تنها محدودیت، بلکه هشدار سیاستی تلقی کرد. هشدار می‌دهد چالش حکمرانی علم و فناوری در ایران، صرفاً فنی یا روش‌شناختی نیست، بلکه ریشه در بافتار اجتماعی، سیاسی و نهادی دارد که بر رفتار بازیگران علمی و فناورانه اثر می‌گذارد. پرداختن به این بافتار، شرط لازم برای اثربخشی هرگونه رویکرد آینده‌نگرانه است.

در نهایت، این مقاله نشان می‌دهد که آینده‌نگاری فناوری، در صورت اتصال واقعی به فرایند تصمیم‌سازی و توجه به زمینه‌های نهادی و اجتماعی، می‌تواند به ابزاری مؤثر برای کاهش خطای سیاستی، افزایش انسجام تصمیم‌ها و هدایت هدفمند توسعه علم و فناوری تبدیل شود (Hafezi, 2021). ارزیابی خبرگانی فناوری‌های جریان‌ساز، اگرچه به‌تنهایی راحل همه چالش‌ها نیست، اما چارچوبی فراهم می‌کند که سیاست‌گذار را از تصمیم‌های واکنشی و کوتاه‌مدت به انتخاب‌های آگاهانه‌تر و آینده‌محور سوق دهد. تحقق این هدف، مستلزم آن است که آینده‌نگاری نه در حاشیه، بلکه در متن حکمرانی علم و فناوری کشور قرار گیرد.

References

- Braun, D. (1998). The role of funding agencies in the cognitive development of science. *Research Policy*, 27(8), 807-821.
[https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(98\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(98)00092-4)
- Cooke, R. (1991). *Experts in uncertainty: Opinion and subjective probability in science*. Oxford: Oxford university press.
- Cuhls, K. (2001). Foresight with Delphi surveys in Japan. *Technology Analysis & Strategic Management*, 13(4), 555-569. <https://doi.org/10.1080/09537320127287>
- Cuhls, K. (2003). From forecasting to foresight processes - new participative foresight activities in Germany. *Journal of Forecasting*, 22(2-3), 93-111.
<https://doi.org/10.1002/for.848>
- Dosi, G., & Nelson, R. R. (2010). Technical change and industrial dynamics as evolutionary processes. *Handbook of the Economics of Innovation*, 1, 51-127.
[https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)01003-8](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)01003-8)
- Edquist, C. (2010). Systems of innovation perspectives and challenges. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 2(3), 14-45.
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199286805>
- .003.0007
- Flanagan, K., Uyerra, E., & Laranja, M. (2011). Reconceptualising the 'policy mix' for innovation. *Research Policy*, 40(5), 702-713.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.02.005>
- Geels, F. W. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, 33(6-7), 897-920.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>
- Georghiou, L., & Keenan, M. (2006). Evaluation of national foresight activities: Assessing rationale, process and impact. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(7), 761-777.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.08.003>
- Georghiou, L., & Keenan, M. (2008). 16. Evaluation and Impact of Foresight. In L. Georghiou (Ed.), *The Handbook of technology foresight: Concepts and practice*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Hafezi, R. (2021). Foresight, and science, technology and innovation policy. *Rahyaf*, 31(3), 123-128. (Persian)
<https://doi.org/10.22034/rahyaf.2022.13945>
- Hafezi, R., Malekifar, S., & Akhavan, A. (2018). Analyzing

- Iran's science and technology foresight programs: Recommendations for further practices. *foresight*, 20(3), 312-331.
<https://doi.org/10.1108/FS-10-2017-0064>
- Hafezi, R., Wood, D. A., Alipour, M., & Taghikhah, F. R. (2023). Water-power scenarios to 2033: A mixed model. *Environmental Science & Policy*, 148, 103555.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103555>
- Kousari, S., & Sadat Rahmati, F. (2019). Future-Oriented Researches and Its Roles in STI Policy Making. *Journal of Science and Technology Policy*, 12(2), 103-118. (Persian)
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The Delphi method* (Vol. 1975). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Lundvall, B. A. (1992). *National systems of innovation: Towards a theory of innovation and interactive learning*. London: Anthem Press.
- Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., & Marrs, A. (2013). *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy*. San Francisco: McKinsey Global Institute.
- Mazzucato, M. (2018). Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, 27(5), 803-815.
<https://doi.org/10.1093/icc/dty034>
- Miles, I. (2010). The development of technology foresight: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1448-1456.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.07.016>
- Nonaka, I. (2009). The knowledge-creating company. In T. Siesfeld, J. Cefola, D. Neef (Eds.), *The economic impact of knowledge* (pp. 175-187). Abingdon: Routledge.
- Polanyi, M. (2009). The tacit dimension. In L. Prusak (Ed.), *Knowledge in organisations* (pp. 135-146). Abingdon: Routledge.
- Popper, R. (2008a). Foresight methodology. In L. Georgiou, J. C. Harper, M. Keenan, I. Miles, R. Popper (Eds.), *The handbook of technology foresight: Concepts and Practice* (pp. 44-88). Cheltenham: Edward Elgar Publishing
- Popper, R. (2008b). How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62-89.
<https://doi.org/10.1108/14636680810918586>
- Roco, M. C., & Bainbridge, W. S. (2002). Converging technologies for improving human performance: Integrating from the nanoscale. *Journal of Nanoparticle Research*, 4(4), 281-295.
<https://doi.org/10.1023/A:1021152023349>
- Rowe, G., & Wright, G. (1999). The Delphi technique as a forecasting tool: Issues and analysis. *International Journal of Forecasting*, 15(4), 353-375.
[https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(99\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(99)00018-7)
- Saltelli, A., Bammer, G., Bruno, I., Charters, E., Di Fiore, M., Didier, E., ... Mayo, D. (2020). Five ways to ensure that models serve society: A manifesto. *Nature*, 582(7813), 482-484.
<https://doi.org/10.1038/d41586-020-01812-9>
- Soete, L., & Freeman, C. (2012). *The economics of industrial innovation*. Abingdon: Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203357637>
- Stirling, A. (2003). Risk, uncertainty and precaution: Some instrumental implications from the social sciences. In Negotiating environmental change. Edward Elgar Publishing.
<https://doi.org/10.4337/9781843765653.00008>
- Stirling, A. (2008). "Opening up" and "closing down" power, participation, and pluralism in the social appraisal of technology. *Science, Technology, & Human Values*, 33(2), 262-294.
<https://doi.org/10.1177/0162243907311265>
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases: Biases in judgments reveal some heuristics of thinking under uncertainty. *Science*, 185(4157), 1124-1131.
<https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- Tversky, A., Kahneman, D., & Slovic, P. (1982). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124-1131.
- Van Asselt, M. B. A., & Rotmans, J. (2002). Uncertainty in integrated assessment modelling. *Climatic Change*, 54(1), 75-105.
<https://doi.org/10.1023/A:1015783803445>
- Walker, W. E., Lempert, R. J., & Kwakkel, J. H. (2013). Deep uncertainty. In S. I Gass, M. C. Fu (Eds.), *Encyclopedia of operations research and management science* (pp. 395-402). Berlin: Springer.





رضا حافظی

استادیار مؤسسه تحقیقات سیاست علمی کشور است. حوزه پژوهشی او بر سیاست‌گذاری فناوری، روش‌شناسی‌های آینده‌پژوهی و سناریونگاری در شرایط عدم قطعیت عمیق متمرکز است، با تأکید ویژه بر رویکردهای ترکیبی کیفی-کمی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در نظام‌های پیچیده اجتماعی، فنی.



ابوالفضل زینتی

دانشجوی دکتری مهندسی انرژی در دانشگاه صنعتی شریف است. حوزه‌های پژوهشی وی شامل سیاست‌گذاری انرژی و فناوری، امنیت انرژی و آینده‌پژوهی است. او در پروژه‌های پژوهشی مرتبط با سیاست‌گذاری انرژی و آینده‌نگاری فناوری مشارکت داشته است.



امیرهادی عزیزی

فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی ارشد سیاست‌گذاری علم و فناوری از دانشگاه شهید بهشتی است. او هم‌اکنون در پژوهشکده مطالعات بنیادین علم و فناوری دانشگاه شهید بهشتی در حوزه‌هایی چون سیاست فناوری و نوآوری و همچنین آینده‌نگاری فناوریانه به‌عنوان پژوهشگر فعالیت می‌کند.