10.30497/SMT.2024.245192.3510

Quarterly Scientific Journal of Strategic Management Thought (Management Thought), Research Article, Vol. 18, No. 1 (Serial 39) Spring 2024

Presenting a Proposal for the Quantum Technology Roadmap of the Islamic Republic of Iran

Seyed Nasibollah Doustimotlagh *
Siamak Tahmasebi **
Seyed Ali Fatemi Khorasghani ***

Received: 08/10/2023
Accepted: 29/10/2024

Abstract

The main purpose of this article is to propose a quantum technology roadmap for the Islamic Republic of Iran in a 25-year time horizon. In order to reach the main goal, some sub-goals should also be investigated, which include: identifying the tree of quantum field technologies, prioritizing different fields of quantum technology using the importance and performance matrix. This research is of applied type and its methodology is "mixed"; i.e. several different methods were used to achieve the goal, including: "documentary studies", " surveying experts" and "Delphi or expert panel". The main finding is presented in the form of a quantum technology roadmap. In this map, which was developed for a 25-year time horizon, the necessary actions and related timing are discussed separately in 5 areas of quantum computing, quantum simulation, quantum measurement, quantum communication and fundamental areas. The secondary findings include: identifying and introducing the quantum technology tree and providing prioritization among the different branches of quantum technology. The results of the research also show that among the four fields of quantum technology, "quantum communication" is more important and next is "quantum measurement", which can provide the basis for fundamental developments.

Keywords

Quantum; Technology Management; Technology Roadmap; Islamic Republic of Iran.

* Assistant Professor, Department of Science and Technology, National Defense University, Tehran, Iran. doustimotlagh@iran.ir 0000-0003-4907-2382

** Assistant Professor, Department of Science and Technology, National Defense University, Tehran, Iran. (Corresponding Author). tahmasebysiamak@gmail.com 0000-0001-5864-5678

*** PhD in Technology Management, National Defense University, Tehran, Iran. alifatemi6@gmail.com 0009-0003-3826-0692

فصلنامه علمی اندیشه مدیریت راهبردی (اندیشه مدیریت)، مقاله علمی پژوهشی
سال هجدهم، شماره اول (پیاپی ۳۹)، بهار ۱۴۰۳، صص. ۶۳-۱۰۲

ترسیم درخت فناوری و ارائه پیشنهادی برای نقشه راه فناوری کوانتوم جمهوری اسلامی ایران

سیدنصیب‌الله‌دوستی‌مطلق *
سیامک‌طهماسبی **
سیدعلی‌فاطمی‌خوارسگانی ***

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸
مقاله برای اصلاح به مدت ۳۵ روز نزد نویسنده(گان) بوده است.
10.30497/SMT.2024.245192.3510

چکیده

هدف اصلی این مقاله پیشنهاد نقشه راه فناوری کوانتوم برای جمهوری اسلامی ایران در افق ۲۵ ساله است. برای رسیدن به هدف اصلی، برخی اهداف فرعی نیز باید بررسی می‌شدند که این موارد عبارتند از: شناسایی درخت فناوری‌های حوزه کوانتوم، اولویت‌بندی حوزه‌های مختلف فناوری کوانتوم با استفاده از ماتریس اهمیت و عملکرد. این تحقیق براساس هدف از نوع کاربردی بوده و روش‌شناسی آن از نوع «آمیخته» می‌باشد؛ یعنی برای رسیدن به هدف از چند روش مختلف استفاده شده که عبارتند از: «مطالعات اسنادی»، «پیمایش و نظرسنجی از خبرگان» و «دلفی یا پنل خبرگانی». یافته اصلی مقاله در قالب نقشه راه فناوری کوانتوم ارائه شده است. در این نقشه که برای افق زمانی ۲۵ ساله تدوین شده، به تفکیک در ۵ حوزه محاسبات کوانتومی، شبیه‌سازی کوانتومی، حسگری (سنجش) کوانتومی، ارتباطات کوانتومی، حوزه‌های بنیادی به بیان اقدامات مورد نیاز و زمانبندی مرتبط با آن پرداخته می‌شود. همچنین، در کنار یافته اصلی، یافته‌های جانبی عبارتند از: شناسایی و معرفی درخت فناوری کوانتوم و ارائه اولویت‌بندی در بین شاخه‌های مختلف فناوری کوانتوم. همچنین خروجی‌های پژوهش نشانگر آن است که از بین چهار حوزه فناوری کوانتوم، «ارتباطات کوانتومی» اهمیت بیشتری داشته و در مرتبه بعدی «حسگری یا سنجش کوانتومی» قرار دارد که می‌تواند زمینه تحولات اساسی را فراهم کند.

واژگان کلیدی

کوانتوم؛ مدیریت فناوری؛ نقشه راه فناوری؛ ایران.

* استادیار گروه علم و فناوری، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران.
doustimotlagh@iran.ir 0000-0003-4907-2382
** استادیار گروه علم و فناوری، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران.(نویسنده مسئول).
tahmasebysiamak@gmail.com 0000-0001-5864-5678
*** استادیار، دبیرخانه شورای عالی انقلاب فرهنگی، تهران، ایران.
alifatemi6@gmail.com 0009-0003-3826-0692

مقدمه

در اوایل قرن بیستم میلادی آزمایش‌هایی انجام شدند که فیزیک کلاسیک و نظریه‌های موجود از توصیف دقیق آن‌ها ناتوان بود. از جمله مهم‌ترینِ این آزمایش‌ها می‌توان به آزمایش دو شکافِ یانگ، اثر فوتوالکتریک، تابشِ جسم سیاه و اثر کامپتون اشاره کرد. در ابتدا فیزیک‌دانان سعی داشتند با اضافه کردن مفاهیمی جدید به فیزیک کلاسیک، به توصیف این آزمایش‌ها بپردازند. اما در ادامه متوجه شدند برای توصیف دقیق‌تر این آزمایش‌ها به نظریه‌ای بنیادی‌تر نیاز است؛ نظریه‌ای که فهم ما را نسبت به ساختار اتمی مواد دگرگون ساخت. با توجه به اینکه یکی از نتایج این نظریه، گسسته و تکه‌تکه (کوانتیده) بودن ترازهای انرژی اتم‌ها است، این نظریه را مکانیک کوانتومی می‌نامند (Krane, 2012, p. 50).

این دگرگونی‌ها در فهم ما از ساختارهای اتمی سبب پیشرفت‌های شگرف در عرصه‌ی فناوری شد. در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی این ایده مطرح گردید که با توجه به پیچیدگی محاسبات اتمی، از ماشین محاسباتی استفاده شود که خود براساس ویژگی‌های مکانیک کوانتومی کار می‌کند (Feynman, 1982, p. 472)، در نتیجه ساخت کامپیوترهای کوانتومی (ماشین‌های محاسبه‌ای که به نحو درستی از امکانات مکانیک کوانتومی استفاده می‌کنند) مورد توجه قرار گرفت. این موضوع سبب پیشرفت‌های شگرفی هم در زمینه‌ی نظری و هم در زمینه‌های تجربی شد. به نحوی که در سال ۲۰۱۲ میلادی جایزه‌ی نوبل فیزیک به صاحبان ایده دست‌کاری تک اتم‌ها تعلق گرفت.

این تلاش‌ها که تا امروز ادامه دارد نه‌تنها سبب فهم عمیق‌تر ما از مکانیک کوانتومی شده است بلکه زمینه‌ساز توسعه‌ی فناوری‌های کوانتومی در سال‌های اخیر نیز شده است (Nielsen & Chuang, 2000, p. 62)، (Nakahara & Ohmi, 2008, p. 73)، (LaPierre, 2021, p. 103) و (Hayashi, 2006, p. 47). در سال‌های نخست شاید برای کسی قابل تصور نبود که آن‌چه به صورت نظری در مکانیک کوانتومی طرح می‌شود، در آزمایشگاه هم قابل پیاده‌سازی باشد. موفقیت‌های چشمگیر در شاخه‌ی اپتیک کوانتومی و توانایی پژوهشگران برای کار کردن با تک فوتون‌ها و اتم‌های منفرد سبب رشد سریع این

فناوری‌ها شده و کشورها و قدرت‌های بزرگ اقتصادی دنیا راهبردهای کلانی را برای سرمایه‌گذاری در شاخه‌ی فناوری‌های کوانتومی در نظر گرفتند.

می‌توان گفت که فناوری کوانتوم و صنایع مرتبط با آن از فناوری‌ها و صنایع راهبردی محسوب می‌شود (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۰، صص. ۷۰-۹۰) و توجه جهانی به فناوری‌های کوانتومی زنگ هشداری برای کشور ایران است. طبیعی است که کشور ما نیز به‌عنوان یک کشور در حال توسعه باید به حوزه‌ی فناوری‌های کوانتومی ورود کند و ضمن بهره‌برداری از مزیت‌های این حوزه در عرصه‌های مختلف، در برابر اقدامات و پیشرفت‌های سایر کشورها نیز غافل‌گیر نشود.

بر همین اساس نیز در چند سال اخیر مجموعه‌های مختلف مبتنی بر نیازهای عرصه و بخش خود، اقدامات اولیه‌ای را در زمینه تحقیقات علمی و توسعه فناوری در حوزه کوانتوم آغاز کرده‌اند. نتیجه اقدامات انجام شده در سال‌های اخیر، در قالب آغاز سیر صعودی چاپ مقاله، ثبت اختراع و مشارکت در پروژه‌های تحقیقاتی بین‌المللی توسط محققان و پژوهشگران ایرانی، نمایان شده است. همچنین در عرصه توسعه فناوری نیز دستاوردهای اولیه‌ای مانند تولید فوتون‌های درهم‌تنیده، رمزنگاری کوانتومی آزمایشی در فضای آزاد و فواصل کوتاه، اکتساب دانش‌های پایه حوزه حسگری کوانتومی، طراحی اولیه تجهیزات ناوبری کوانتومی و ... در کشور حاصل شده‌است (دوستی‌مطلق، جادریان و دیوبند، ۱۴۰۱، ص. ۵۳).

با این حال، اصلی‌ترین درس‌آموخته کشور از این فعالیت‌های پراکنده و بخشی در سال‌های اخیر، این بود که ورود موفق و اثربخش به حوزه علوم و فناوری‌های کوانتومی نیازمند برخورداری از برنامه‌ای جامع و بلندمدت و هم‌افزایی منابع و توانمندی‌ها حول آن برنامه است. با توجه به ویژگی‌های کلیدی علوم و فناوری‌های کوانتومی مانند:

- دامنه اثر گسترده علوم و فناوری‌های کوانتومی در عرصه‌های مختلف و متنوع؛
- ماهیت بلندمدت توسعه علوم و فناوری در این حوزه و همچنین زمان انتظار نسبتاً زیاد تا دستیابی به محصول با قابلیت کاربرد عملیاتی؛

- لزوم انجام سرمایه‌گذاری قابل‌توجه در این حوزه علی‌الخصوص در زمینه توسعه زیرساخت‌های آزمایشگاهی و عملیاتی؛
- و ماهیت فرابخشی و بین‌رشته‌ای بسیاری از مسائل و کاربردهای علوم و فناوری‌های کوانتومی؛

می‌توان گفت ضروری است کشور با نگاه به عرصه‌های مختلف از دریچه علوم و فناوری‌های کوانتومی، برنامه‌ریزی بلندمدت را در دستور کار خود قرار دهد و ظرفیت‌ها و منابع مختلف خود را به‌منظور تحقق اهداف مشترک تعیین‌شده، تجهیز و تخصیص نماید.

در این راستا معاونت علمی ریاست جمهوری نیز از سال ۱۴۰۰ توجه به موضوع کوانتوم را افزایش داده و مباحث علمی آن را ذیل ستادی با عنوان «ستاد توسعه فناوری‌های اپتیک و کوانتوم» پیگیری می‌نماید[1].

یکی از مهم‌ترین ارکان و ابزارهای شروع فرآیندهای هدفمند و برنامه‌مند فناورانه، تهیه‌ی نقشه راه است (Vinayavekhin et al, 2021, p. 10). ابتدا باید نقشه‌ی راه با در نظر گرفتن همه‌ی جوانب تهیه شود و پس از آن براساس این نقشه، اقدامات تعریف شود. به همین منظور، در تحقیق حاضر بر مبنای درخت فناوری تدوین شده برای حوزه کوانتومی، تلاش شده است نقشه راهی به‌منظور تعیین هدف‌گذاری‌های کلان و بلندمدت کشور در حوزه فناوری‌های کوانتومی تدوین شود.

۱. ادبیات تحقیق و پیشینهٔ پژوهش

۱-۱. مروری بر حوزه علوم و فناوری‌های کوانتوم

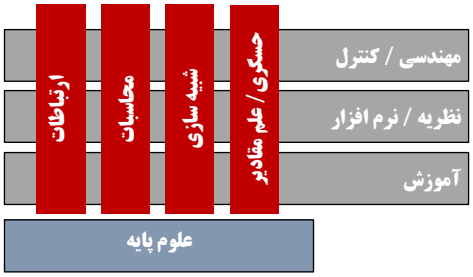
واژه کوانتوم به معنی «بسته» یا «دانه» اولین بار در مکانیک کوانتومی که در بعضی از کمیت‌های فیزیکی، مانند انرژی اتم مقادیر گسسته مشاهده شد، مطرح گردید. تعریف اولیه و ساده از کوانتوم عبارت است از: «کوچک‌ترین ذره ممکن از هر چیزی». برای مثال، کوچک‌ترین ذره نور قابل‌مشاهده، «فوتون» یا «کوانتوم نوری» نام دارد. یک کوانتوم کوچک‌ترین واحد از هر چیزی که کشف شده است (معادی‌رودسری و پوراسماعیل ۱۴۰۱، ص. ۵). پایه‌های مکانیک کوانتومی در نیمه اول قرن بیستم توسط دانشمندان

بزرگ رشته‌فیزیک بنا نهاده شد (John P. Holdren, Afua Bruce at all, 2018, p. 6). اگرچه دانش کوانتوم در ابتدا برای توصیف دنیای اتمی ابداع شد، اما تأثیر آن در زندگی امروزی بسیار گسترده شده است. نظریه علوم و فناوری‌های مبتنی بر کوانتوم اولین بار در سال ۱۹۹۷ مطرح شد (دوستی‌مطلق، جادریان و دیوبند، ۱۴۰۱، ص. ۶۰). فیزیک کوانتوم نیز علم بررسی ذراتی مانند فوتون یا الکترون است. این مواد عملکرد و رفتاری متفاوت با اشیا عادی دارند که با مشاهده این تفاوت عملکرد و رفتار اشیا و ذرات بسیار ریز با اشیا عادی فیزیک کوانتوم آغاز شد. این به تحول در منطق، ریاضیات، ارتباطات، محاسبات و درک بشر از محیط پیرامونش منجر شد. فناوری کوانتوم، فناوری کاربردی سازی خواص متفاوت ذرات بسیار ریز در ابعاد اتم و کوچکتر از اتم است (معادی-رودسری و پوراسماعیل، ۱۴۰۱، ص. ۵).

محققان حوزه کوانتوم دو انقلاب اساسی برای این فناوری قائل شده‌اند که انقلاب اول در واقع استفاده از خاصیت دوگانگی موج-ذره در ایجاد پیشرفت‌های عظیمی مانند چیپ‌های رایانه‌ای، لیزرها، تصویربرداری رزونانسی مغناطیسی و فناوری‌های ارتباطی مدرن است (John P. Holdren, Afua Bruce at all, 2018, p. 7). انقلاب دوم کوانتومی و ماهیت درهم تنیدگی که حدود ۸۵ سال پیش شناسایی و طی ۴۰ سال اخیر تنها به‌طور آزمایشگاهی بررسی شده است، مبنای جدید ارتباطات، حسگری و محاسبات کوانتومی به‌حساب می‌آید (دوستی‌مطلق، جادریان و دیوبند، ۱۴۰۱، ص. ۸۱).

طبق یکی از رویکردهای نسبتاً مهم، چهار حوزه اصلی زیر برای علوم و فناوری‌های کوانتومی در نظر گرفته شده است که عبارتند از: محاسبات کوانتومی، شبیه‌سازی کوانتومی، حسگری کوانتومی، و ارتباطات کوانتومی (Acín et al. 2018, p. 3).

شکل (۱): ساختار حوزه‌های پژوهشی فناوری کوانتوم



(Acín et al. 2018, p. 3)

در ادامه به صورت خلاصه به توصیف هر یک از این حوزه‌های اصلی می‌پردازیم:

- **محاسبات کوانتومی یا رایانش کوانتومی**[۲]: محاسبات کوانتومی یک الگوی نوظهور با پتانسیل ارائه مزیت محاسباتی قابل توجهی نسبت به محاسبات کلاسیک معمولی با بهره‌برداری از اصول مکانیکی کوانتومی مانند برهم نهی[۳] و درهم تنیدگی[۴] است. پیش‌بینی می‌شود که محاسبات کوانتومی به حل بسیاری از مسائل پیچیده و محاسباتی حل نشدنی در چندین حوزه کاربردی مانند طراحی دارو، علم داده، انرژی پاک، مالی، توسعه شیمیایی صنعتی، ارتباطات ایمن و شیمی کوانتومی کمک کند (Gill et al, 2022, p. 82). (معادی‌رودسری و پوراسماعیل، ۱۴۰۱، ص. ۶). این فناوری مبنای ساخت رایانه کوانتومی است که از پدیده‌ها و قوانین مکانیک کوانتوم برای انجام محاسبات استفاده می‌کند. رایانه‌های کوانتومی با رایانه‌های فعلی که مبتنی بر ترانزیستورها کار می‌کنند، تفاوت اساسی دارند. ایده اصلی که در پس رایانه‌های کوانتومی نهفته است این است که می‌توان از خواص و قوانین فیزیک کوانتوم برای ذخیره‌سازی و انجام عملیات روی داده‌ها استفاده کرد. یک مدل تئوریک و انتزاعی از این ماشین‌ها، ماشین تورینگ کوانتومی[۵] است که کامپیوتر کوانتومی جهانی[۶] نیز نامیده می‌شود (دوستی‌مطلق، جادریان و دیوبند، ۱۴۰۱، ص. ۱۲۷).
- **شبیه‌سازی کوانتومی**: ایده اصلی محاسبات کوانتومی از شبیه‌سازی کوانتومی سرچشمه گرفت. شبیه‌سازی کوانتومی[۷] به منزله مدل‌سازی خواص کوانتومی ذرات میکروسکوپی است که مستقیماً با علم مواد مدرن، فیزیک انرژی بالا و شیمی کوانتومی مرتبط هستند (Daley et al, 2022, p. 672). ریچارد فاینمن[۸] فیزیک‌دان آمریکایی بر

این باور بود که حل مسائل اتمی و برهم‌کنش‌های بین آن‌ها براساس مکانیک کوانتومی با رایانه‌های کلاسیک موجود امکان‌پذیر نیست. با یک محاسبه‌ی ساده می‌توان نشان داد اگر یک سیستم فیزیکی متشکل از ۸۰ ذره با اسپین ۲/۱ باشد، حافظه‌ی مورد نیاز برای ذخیره‌سازی اطلاعات آن بر روی یک رایانه کلاسیک $\mathbf{5 * 10^{12}}$ ترابایت است. طبیعتاً چنین حافظه‌ای در دسترس نیست. افزون‌براین می‌دانیم که در یک سیستم واقعی تعداد ذرات از مرتبه‌ی عدد آووگادرو ($\mathbf{10^{23}}$) ذره است و نه ۸۰ ذره. در نتیجه باید به سراغ رایانه (ماشین محاسبه‌ای) برویم که خود بر مبنای مکانیک کوانتومی کار می‌کند. این موضوع ایده‌ی اصلی شبیه‌سازی کوانتومی است؛ منظور بهره‌گیری از امکانات مکانیک کوانتومی برای شبیه‌سازی و انجام محاسباتی است که با رایانه‌های کلاسیک امکان‌پذیر نیستند (IQCI, 2020).

- **حسگری یا سنجش کوانتومی:** بالا بردن دقت در اندازه‌گیری هم از جهت علمی و هم از جهت فناوری و مهندسی همیشه دارای اهمیت بوده است. بسیاری از پیشرفت‌هایی که امروزه در حوزه‌های مختلف علوم رخ می‌دهد، به کمک ابزارهای دقیق است. ساخت ابزارهای دقیق توانایی پژوهشگران را تا حد دست‌کاری اتم‌ها بالا برده و آن‌ها را قادر ساخته که با تک اتم‌ها کار کنند. استفاده‌ی مناسب از ظرفیت مکانیک کوانتومی سبب بهبود دقت اندازه‌گیری می‌شود. وقتی از اندازه‌گیری و ابزار دقیق صحبت می‌کنیم باید یکاهای دقیقی نیز تعریف نماییم. ضرورت این موضوع تا حدی است که در ۱۶ نوامبر ۲۰۱۸ نمایندگان شصت کشور دنیا در ورسای[۹] فرانسه جمع شدند و تصمیم گرفتند که یکاهای اصلی را بر حسب ثابت‌های فیزیکی که در تمام زمین یکسان هستند، تعریف کنند (Gambetta, IBM's roadmap for scaling quantum technology, 2020).

- **ارتباطات کوانتومی:** ارتباطات دیجیتال برای شبکه‌های آینده با چالش‌های مختلفی از جمله ترافیک داده، تأخیر کم، استقرار پهنای باند بالا، امنیت و حریم خصوصی مواجه است. ارتباطات کوانتومی[۱۰]، حسگرهای کوانتومی، محاسبات کوانتومی راه‌حل‌هایی برای رفع این مشکلات هستند (Singh et al, 2020, p. 1470).

در ارتباطات کلاسیک، اگر فردی بخواهد پیامی را به فرد دیگر بفرستد، این پیام کمابیش در یک خط مستقیم منتقل می‌شود. در مسیر انتقال، سیگنال‌ها از تکرارکننده‌ها یا بازپخش‌کننده‌های مطمئن عبور می‌کنند و پس از تقویت و اصلاح خطاهای موجود به مسیر خود ادامه می‌دهند. اگرچه ارتباطات کلاسیک به نسبت ارزان و مستقل از فاصله‌ی فیزیکی فرستنده و گیرنده است، اما نقطه‌به‌نقطه‌ی مسیر و تمام فرایند انتقال در برابر شنود به شدت آسیب‌پذیر است. در سوی دیگر و در شکل کوانتومی ارتباطات، فرایند ارسال به‌گونه‌ای کاملاً متفاوت است. در حقیقت، اگر فرستنده بخواهد اطلاعات کوانتومی را به گیرنده بفرستد، باید از حالت‌های کوانتومی استفاده کند که از طریق کانال‌های کوانتومی منتقل می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، اطلاعات کوانتومی با تولید و ارسال حالت‌های کوانتومی از فرستده به گیرنده منتقل می‌شوند. حالت‌های کوانتومی نیز برای ارسال از ذرات تشکیل دهنده‌ی نور موسوم به فوتون بهره می‌گیرند و از طریق کانال‌های کوانتومی منتقل می‌شوند. آنچه امنیت (نامشروط) اطلاعات کوانتومی را در این فرایند تضمین می‌کند، اصول و پدیده‌های مکانیک کوانتومی هستند (دوستی‌مطلق، جادریان و دیوبند، ۱۴۰۱، ص. ۶۸). از مهم‌ترین ویژگی‌های ارتباطات کوانتومی سرعت بسیار بالا و غیرقابل شنود بودن و تقریباً غیرقابل تخریب بودن ارتباطات کوانتومی است (معادی‌رودسری و پوراسماعیل، ۱۴۰۱، ص. ۱۲).

حوزه‌های بنیادی مرتبط با مفاهیم کوانتومی: در بحث علوم و فناوری‌های کوانتومی تقسیم‌بندی‌های گوناگون در کشورهای مختلف جهان و توسط گروه‌های علمی مختلف صورت گرفته است و هر یک از تقسیم‌بندی‌ها براساس رویکردهای مختلف نسبت به نقش علوم و فناوری‌های کوانتومی در پیشرفت آن کشور، انجام شده است. در این میان پژوهشگران کشورمان تقسیم‌بندی جدیدی را براساس اسناد و مستندات مستدل انجام داده‌اند و بر این اساس، علوم و فناوری‌های کوانتومی در چهار زیر شاخه اصلی تقسیم‌بندی شده است. برخی از علوم و فناوری‌های کوانتومی با توجه به آنکه موضوعیت آن‌ها در تقسیم‌بندی‌های ما قبل جایی نداشت در تقسیم‌بندی جدیدی با نام حوزه‌های بنیادی مرتبط با مفاهیم کوانتومی قرار گرفتند تا رویکردهای جدیدی را معرفی نمایند.

علوم و فناوری‌های کوانتومی در چهار شاخه اصلی با عناوین شاخه شبیه‌سازی کوانتومی، شاخه ارتباطات کوانتومی، شاخه محاسبات کوانتومی و شاخه حسگری کوانتومی جای گرفته‌اند. در این مقاله شاخه جدیدی به‌عنوان «حوزه‌های بنیادی مرتبط با مفاهیم کوانتومی» تعریف شده است که در آن مواردی چون زیرشاخه‌های تأیید کوانتومی[۱۱]، برتری کوانتومی[۱۲]، زیست‌شناسی کوانتومی، علوم شناختی کوانتومی، نظریه بازی کوانتومی و همچنین گراف‌های کوانتومی را می‌توان جای داد. لازم به ذکر است که به دلیل موضوعیت متفاوت این موارد، این زیر شاخه‌ها را نمی‌توان در هیچ یک از شاخه‌های اصلی مربوط به فناوری های کوانتومی که از قبل تقسیم بندی شدند، جای داد (دوستی- مطلق، جادریان و دیوبند، ۱۴۰۱، ص. ۷۶).

۱-۲. معرفی برخی از پیشرفت‌های حوزه کوانتوم (قابلیت‌ها و کاربردها)

شناخت و تحلیل اقدامات و فعالیت‌های کشورهای پیشرو، می‌تواند الگوی مناسبی برای دیگر کشورها باشد. با تحلیل این اقدامات می‌توان مسیر رسیدن به شکوفایی را آسوده‌تر طی کرد. کشورهایی مانند آمریکا، بریتانیا، کانادا و کشورهای عضو اتحادیه اروپا، از جمله کشورهایی هستند که در حوزه فناوری‌های کوانتومی پیش‌قدم بودند و سرمایه‌گذاری‌های چشم‌گیری نیز داشته‌اند. به همین منظور، در این قسمت اختصاراً مواردی از پیشرفت‌های محقق شده یا مورد انتظار این کشورها در قابلیت‌ها و کاربردهای حوزه کوانتوم برشمرده شده‌اند (IQST, 2019, p. 12)، (QIC, 2018, p. 5)، (IQCI, 2020)، (SBQMI, 2020, p. 18)، (Bjergstrom et al., 2016, p. 17) و (Pritchard & Till, 2016, p. 6):

- تصویربرداری پیشرفته کوانتومی به‌منظور مشاهده اجسام در فضای تار با وضوح بالا
- توسعه حسگرهای جاذبه به‌منظور تشخیص مکان شبکه آب و برق زیرزمینی بدون حفاری
- علوم رایانه کوانتومی با هدف ابداع اولین زبان برنامه‌نویسی و مفسر کوانتومی (کامپایلر)
- توسعه ریزپردازنده‌های کوانتومی با کاربردهای محاسباتی محدود

- ساخت حسگرهای زیست‌فناوری و دفاعی جدید
- ساخت نسل‌های جدید سیستم موقعیت‌یاب و سیستم ناوبری کوانتومی
- تولید ساعت کوانتومی به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری زمان
- ارائه رویکردهای جدید برای درک بهتر علم مواد، شیمی و حتی گرانش از طریق نظریه اطلاعات کوانتومی
- ارائه الگوریتم‌های جدید برای یادگیری ماشین و بهینه‌سازی‌ها
- بهبود سیستم امنیت سایبری با استفاده از رمزنگاری‌های کوانتومی
- شبیه‌سازی مولکولی مایعات و محلول‌ها، مرزها و کریستالیزاسیون[13]
- فناوری اطلاعات کوانتومی با نور و اپتیک کوانتومی تجربی
- طیف‌سنجی هیدروکربن‌ها
- مدل‌سازی واکنش‌های بیوشیمیایی در محیط‌های پیچیده
- شیمی لایه نشانی بخار شیمیایی
- تشدید مغناطیسی هسته‌ای / پردازش اطلاعات کوانتومی بر پایه اسپین
- پردازش اطلاعات بر پایه نانوالکترونیک
- مواد فوتونیکی و نانو ساختاری و ساختارهای ناهمگون
- ابررسانایی غیرمعمول
- پراش پرتوایکس رزونانس الاستیک و غیر الاستیک
- طیف‌سنجی
- فیزیک مواد محاسباتی و تئوری ماده چگال
- برقراری ارتباط کاملاً امن از طریق رمزنگاری کوانتومی
- تولید اعداد تصادفی کوانتومی
- ارتباطات کوانتومی در بستر شبکه و فضای آزاد

۱-۳. نقشه راه فناوری

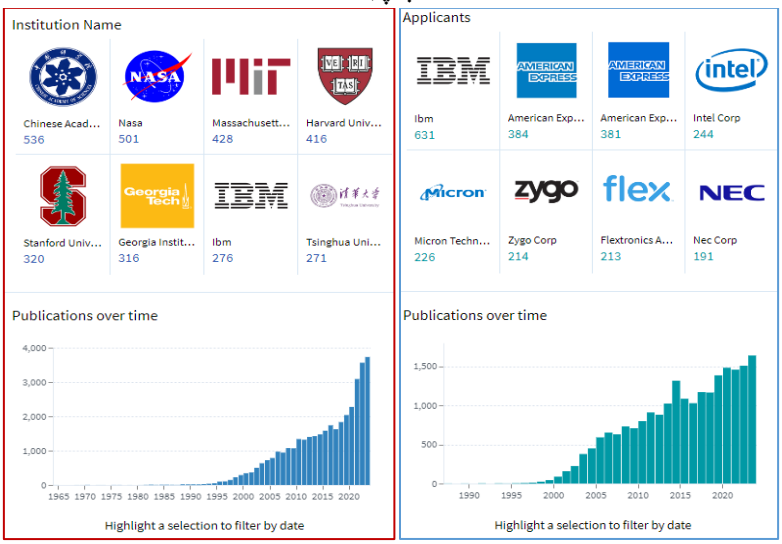
«نقشه راه فناوری» بیش از پنج دهه پیش از حوزه مدیریت صنعتی مطرح شد، در ابتدا برای حمایت از راهبرد و برنامه‌ریزی یکپارچه فناوری محصول، و توسط شرکت‌هایی

مانند موتورولا و فیلیپس حمایت شد. اولین کاربرد این روش در سطح «بخشی»[۱۴] در سال ۱۹۹۱ توسط کمیته مشاوره ملی ایالات متحده در مورد نیمه‌هادی‌ها انجام شد. علاقه آکادمیک به این روش، از اواخر دهه ۱۹۹۰ با گروه‌های تحقیقاتی که سطوح بالایی از مشارکت صنعتی داشتند شروع شد (Phaal & Kerr, 2021, pp. 3-5). در ادامه، با رویکردی که در طیف وسیعی از بخش‌ها اتخاذ شده و برای رسیدگی به بسیاری از اهداف راهبردی و زمینه‌های سازمانی مختلف سازگار شده است، هم در عمل و هم در تحقیق رشد داشته است.

کاربرد اصلی «نقشه راه» برای حوزه فناوری است، هرچند کاربرد آن منحصر به حوزه فناوری نمی‌شود. نقشه راه فناوری در واقع یک ابزار برنامه‌ریزی است که نقش کلیدی در تصمیم‌گیری‌های فناوری، نوآوری و تحقیق و توسعه در گستره کسب و کار، صنعت و سطوح ملی ایفا می‌کند و مسیر توسعه مهارت‌های مورد نیاز را نشان می‌دهد (Ghazinoory et al, 2017, p. 235). علاوه بر جنبه علمی «نقشه راه» باتوجه به میزان کاربردی بودن آن، استفاده از آن در دو دهه اخیر رو به افزایش است. ونیاواخین و فال و هماکارانشان (Vinayavekhin et al, 2021, p. 8) در یک پژوهش گسترده به بررسی ادبیات نقشه راه پرداختند که نتایج آن نشان می‌دهد که حداقل ده دسته جریان تحقیقاتی مختلف در حوزه نقشه راه وجود دارد که هرکدام با اهداف خاص خود به این موضوع پرداخته‌اند، برخی از مهم‌ترین آنها عبارت است از: نقشه راه به مثابه ابزار مدیریت فناوری، نقشه راه به مثابه آینده‌نگاری راهبردی، نقشه راه به مثابه برنامه‌ریزی نوآوری، نقشه راه به مثابه همگام‌سازی برنامه‌ریزی راهبردی[۱۵]، نقشه راه به مثابه ابزار طراحی و تصویرسازی، نقشه راه به مثابه ابزار اجرایی‌سازی در سطوم ملی و صنعتی، و ... (Vinayavekhin et al, 2021, p. 10).

از سال ۲۰۰۰ میزان توجه شرکت‌ها و پژوهشگران به موضوع «نقشه راه فناوری» افزایش یافته است. در نمودار زیر مقالات علمی منتشر شده بین‌المللی در حوزه «نقشه راه فناوری» و تعداد پتنت‌های حاوی کلید واژه «نقشه راه فناوری» براساس اطلاعات مندرج در سایت https://www.lens.org (در تاریخ آذر ۱۴۰۲) مشاهده می‌شود:

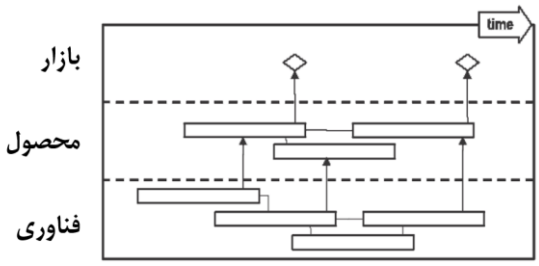
شکل (۲): تعداد مقالات علمی منتشر شده بین‌المللی در حوزه «نقشه راه فناوری technology roadmap» (سمت راست) و تعداد پتنت‌های حاوی کلید واژه «نقشه راه فناوری» (سمت چپ)



منبع: https://www.lens.org (در تاریخ آذر ۱۴۰۲)

یکی از تأثیرگذارترین افراد در ترویج مفهوم «نقشه راه فناوری» روبرت فال[۱۶] است که با همکاری برخی از اندیشمندان مختلف این مفهوم را توسعه داده است (Phaal, Farrukh & Probert, 2001, p. 10) و (Phaal & Muller, 2009, p. 42). نقشه راه فناوری با استفاده از یک نمای تصویری ساده، کمک می‌کند تا ضمن تبیین نیازهای اصلی و کلیدی، اهداف عملی و گام‌های اجرایی مسیر آتی در یک چارچوب زمانی مشخص تعیین شود تا سازمان برای مسیر آتی خود برنامه روشن و مناسبی داشته باشد. فال و همکارانش شکل عمومی ذیل را برای نقشه راه پیشنهاد داده‌اند (Phaal, Farrukh & Probert, 2004, p. 10):

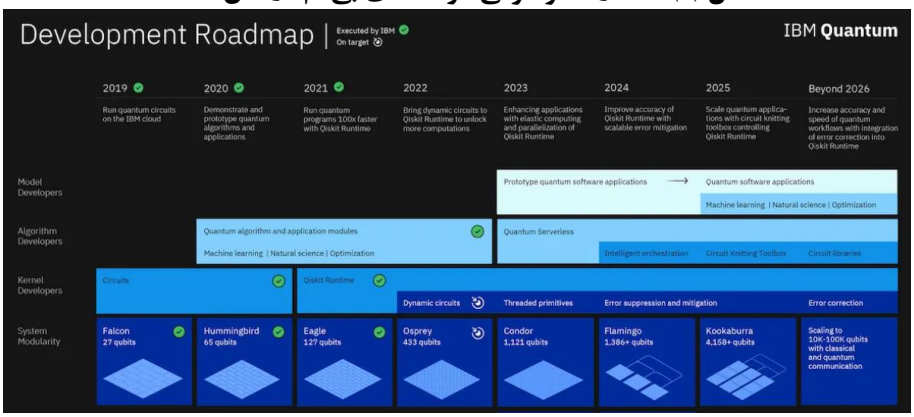
شکل (۳): نمای عمومی و کلاسیک نقشه راه فناوری



منبع: (Phaal, Farrukh & Probert, 2004, p. 10)

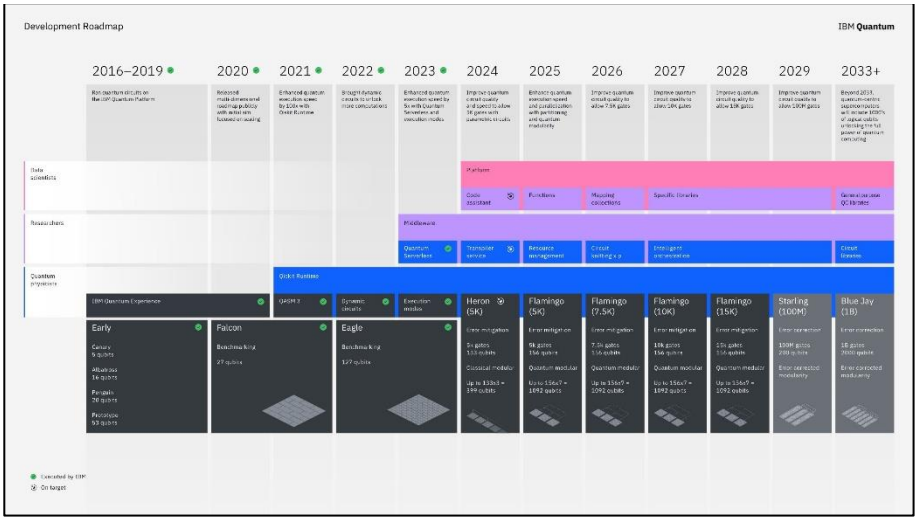
نقشه راه فناوری اغلب از سه لایه اصلی تشکیل شده است. لایه بالایی شامل عوامل محرک مربوط به روندها، اهداف کلی و تقاضای بازار است. لایه میانی شامل عوامل محرک مطابق با روندهای توصیف شده در لایه بالایی است، مانند محصولات و خدماتی که باید توسعه داده شوند. لایه زیرین از منابع و فناوری‌های داخلی و خارجی تشکیل شده است (Lu & Weng, 2018, pp. 58-90). البته به فراخور اقتضائات مورد مطالعه، این امکان وجود دارد که لایه‌های نقشه راه غنی‌تر شود همانگونه که در تحقیقات مختلف اخیر شاهد ارائه نقشه‌های راه مختلف در چندین لایه هستیم (Lu & Weng, 2018, p. 90). امروزه مشخص شده که مکاتب و الگوهای مختلفی برای تدوین نقشه راه وجود دارد که البته باهم تعارض نداشته و مکمل یکدیگرند و هر کشور یا شرکتی می‌تواند براساس اقتضائات خود، مدلی را انتخاب کند (Park, et al, 2020, p. 30). به‌عنوان مثال نقشه راه کوانتومی شرکت آی.بی.ام. که در سال ۲۰۲۰ برای افق زمانی سه ساله جهت دستیابی به یک تراشه ۱۰۰۰ کیوبیتی طراحی شده بود (Gambetta, 2020) و نسخه به‌روز شده آن در سال ۲۰۲۰، ۲۰۲۲ و ۲۰۲٤ تحت عنوان «گسترش نقشه راه کوانتومی آی.بی.ام. برای پیش‌بینی آینده ابر محاسبات کوانتوم محور»[۱۷] در چهار سطح طراحی شده است. در نسخه ۲۰۲۰ آن چهار لایه مذکور عبارت است از: توسعه‌دهندگان مدل، توسعه‌دهندگان الگوریتم، توسعه‌دهندگان هسته و توسعه‌دهندگان سیستم (Gambetta, 2022) البته در ویرایش ۲۰۲٤ در سه لایه با عنوان داده‌های علمی، پژوهشگران، فیزیک کوانتومی دسته بندی شده است (Gambetta, 2024).

شکل (۳): نقشه راه کوانتومی شرکت آی بی ام در سال ۲۰۲۲



منبع: (Gambetta, 2022)

شکل (٤): نقشه راه کوانتومی شرکت آی بی ام در سال ۲۰۲٤



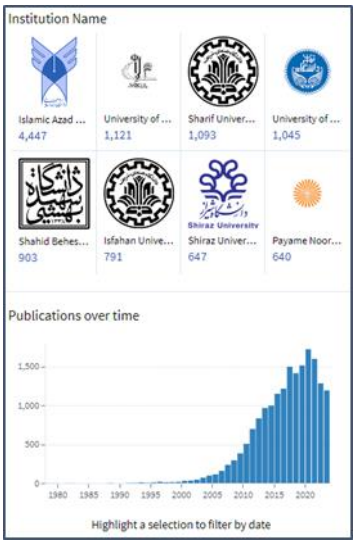
منبع: (Gambetta, 2022)

۱-٤. مروری نسبت به برخی از تحقیقات گذشته

قبل از پرداختن به محتوای تحقیقات گذشته، نیم نگاهی به میزان مشارکت پژوهشگران و مؤسسات ایرانی در تدوین و اسناد علمی و پژوهشی بین‌المللی در حوزه کوانتوم می‌اندازیم. به این منظور از اطلاعات و تحلیل‌های سامانه لنز (Lens.org, 2023) که اطلاعات مربوط به کلیه انتشارات علمی بین‌المللی تجمیع و نمایه شده، استفاده گردیده

است. براساس اطلاعات این سامانه، فعالیت پژوهشگران و مؤسسات ایرانی در چاپ مقالات علمی بین‌المللی، از سال ۱۹۹۱ آغاز شده و پس از طی یک دوره ده ساله نسبتاً ثابت، از سال ۲۰۰۰ شروع به اوج‌گیری نموده است. فراوانی مقالات علمی منتشر شده با مشارکت پژوهشگران و مؤسسات ایرانی مجموعاً بیش از ۱۳.۰۰۰ مقاله علمی است که توزیع آن در شکل ذیل به نمایش درآمده است:

شکل (٦): تعداد مقالات علمی منتشرشده بین‌المللی در حوزه کوانتوم با مشارکت پژوهشگران و مؤسسات ایرانی

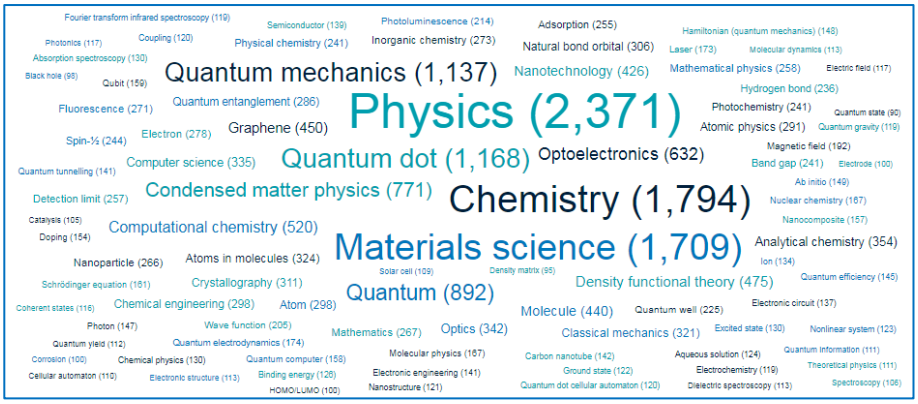


منبع: (Lens.org, 2023)

کلمات کلیدی پرتکرار در مقالات علمی فوق، در

شکل به نمایش درآمده‌اند.

شکل (۷): کلمات کلیدی پرتکرار در مقالات علمی منتشرشده با مشارکت پژوهشگران و مؤسسات ایرانی



منبع: (Lens.org, 2023)

برای رعایت اختصار، نتایج مربوط به مطالعات گذشته جهانی در حوزه کوانتوم را در جدول ذیل نمایش می‌دهیم. در این جدول به معرفی مهم‌ترین پژوهش‌هایی که به لحاظ موضوعی با تحقیق حاضر ارتباط دارد پرداخته می‌شود.

جدول (۱): پیشینه نظری در خصوص کوانتوم

نویسنده	سال	عنوان پژوهش	یافته‌های کلیدی	منبع
کاسیو، روشنی، مصلح	۲۰۲۲	Evolution of Quantum Computing: Theoretical and Innovation Management Implications for Emerging Quantum Industry	این مطالعه با استفاده از روش‌های علم‌سنجی برای تجزیه‌وتحلیل مقالات منتشر شده در ۳۰ سال اخیر در حوزه محاسبات کوانتومی نگارش شده است. برخی از مهم‌ترین یافته‌های مقاله بدین شرح است: • تکامل محاسبات کوانتومی در سی سال اخیر دارای افزایش قابل‌توجهی در اتصال شبکه بوده است (رشد مقیاس مرکزیت درجه). البته دسترسی هر گره به تمام گره‌های دیگر (معیار مرکزیت نزدیکی) تاحدی تسهیل شده است.	(Coccia, Roshani & Mosleh, 2022)

نویسنده	سال	عنوان پژوهش	یافته‌های کلیدی	منبع
			• شبکه محاسبات کوانتومی از تحقیقات سخت‌افزاری به نرم‌افزار انتقال یافته است • مفاهیم نظری این مطالعه، تکامل مورفولوژیکی شبکه را در محاسبات کوانتومی از یک شکل متقارن به شکل نامتقارن نشان می‌دهد که توسط زمینه‌های تحقیقاتی جدید مرتبط و مسیرهای فن‌آوری در حال ظهور هدایت می‌شود.	
گامبتا	۲۰۲۰	IBM's roadmap for scaling quantum technology	ایجاد قدرت محاسباتی بیشتر توسط رایانه‌های کوانتومی در حوزه های مختلف اهمیت فراوانی دارد. تلاش‌های شرکت آی بی ام برای محاسبات کوانتومی در قالب سیستم‌های کوانتومی آی بی ام، افزایش تدریجی کیوبیت‌های مورد استفاده در محاسبات و در نتیجه افزایش قدرت رایانه‌های کوانتومی را هدف گذاری کرده است. این فرآیند تدریجی در ابتدا در قالب سیستم ۲۷ کیوبیتی فالکون ظهور پیدا کرده است. هدف‌گذاری آی بی ام دستیابی به سیستم ۱۱۲۱ کیوبیتی در افق ۵ ساله و سیستم مبتنی بر بیش از یک میلیون کیوبیت در افق بلندمدت است.	(Gambetta, IBM's roadmap for scaling quantum technology, 2020)
آسین و همکاران	۲۰۱۸	The quantum technologies roadmap: a European community view	این نقشه راه برای اتحادیه اروپا طراحی شده و در آن سند حوزه علوم و فناوری‌های کوانتومی از چهار حوزه کلی زیر تشکیل شده است: مخابرات کوانتومی، شبیه‌سازی کوانتومی، محاسبات کوانتومی و حسگری و حسگری کوانتومی. ذیل این چهار حوزه، فناوری‌هایی که احتمال شکوفایی آنها در افق	(Acín, et al,. 2018)

نویسنده	سال	عنوان پژوهش	یافته‌های کلیدی	منبع
			ده ساله محتمل‌تر است عبارت‌اند از: توزیع کلید کوانتومی، الگوریتم‌های کوانتومی، شبیه‌سازهای کوانتومی آنالوگ، طیف حسگرهای کوانتومی، نسل اول پردازشگرهای کوانتومی کوچک.	
مودی و همکاران	۲۰۲۲	Roadmap on integrated quantum photonics	در مسیر حرکت از نمونه‌های اولیه سیستم‌های کوانتومی چندکیوبیتی به سمت سیستم های کوانتومی مشتمل بر ده‌ها هزار کیوبیت، فوتونیک یکپارچه اهمیت فراوانی دارد. پیشرفتهای چند دهه اخیر در فوتونیک کوانتومی امکان تولید نمونه‌هایی ازتراشه‌ها و بررسی کارایی و عملکرد آنها را فراهم ساخته است. در این تراشه‌ها نزدیک به ٦٥٠ جزء در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا عملکرد مورد انتظار را محقق کنند. با توجه به پیشرفتهای احتمالی در حوزه‌های مواد پیشرفته، طراحی معماری فوتونیک، فرآیندهای ساخت و تجمیع و فرآیندهای آزمایش، می‌توان انتظار داشت در دهه پیش‌رو امکان ساخت سیستم‌هایی با قابلیت انجام همزمان چند کارکرد فراهم شود.	(Moody, et al, 2022)

منبع: نویسندگان

علاوه بر مطالعات انجام شده در حوزه کوانتوم که در جدول فوق اشاره شد، مطالعات مختلفی هم در حوزه نقشه راه انجام شده که مهم‌ترین آنها در جدول زیر معرفی می‌شود.

جدول (۲): نگاهی گذرا به پیشینه تجربی استفاده از «نقشه راه» در ایران

نویسنده	عنوان پژوهش	یافته‌های کلیدی	منبع
فارسی، منطقی، فارسیجانی و والمحمدی	ترسیم ره نگاشتی برای تسهیل و تسریع وقوع همپایی فناورانه در صنعت پتروشیمی ایران	در این تحقیق پس از تحلیل قابلیت‌های فناورانه صنعت پتروشیمی، نقشه راه کاهش شکاف فناورانه برای وقوع همپایی فناورانه در صنعت پتروشیمی ایران ارائه شده است.	(فارسی و غیره، ۱۴۰۱)
کریمی، آذر، محبان و قاسمی	تدوین نقشه راه فناوری حمل‌ونقل هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا در صنایع غذایی دارای زنجیره تأمین سرد (فصلنامه مدیریت صنعتی)	در این تحقیق، بر اساس روش عدم قطعیت بحرانی (GBN)، سناریوهای مختلف پیشروی صنعت شناسایی شده و در نهایت دو سناریویی که مطلوبیت بالاتری داشت، انتخاب و برای هر یک، نقشه راه فناوری در سه لایه و در افق زمانی ۱۰ و ۱۵ ساله تدوین گردیده است.	(کریمی و غیره، ۱۴۰۱)
اکبری، سوهانکار و حیدری	نقشه راه تاسیس وزارت انرژی در ایران	روش تحقیق این پژوهش براساس «پنل خبرگان» بوده که در نهایت نقشه راه مرتبط تهیه شده که کلیات آن بدین شرح است: انتصاب معاون انرژی ریاست جمهوری، تأسیس سازمان راهبردی انرژی کشور، اصلاح قانون شورای عالی انرژی و وظایف اعضای آن، تدوین قانون جامع انرژی، تأسیس وزارت انرژی.	(اکبری، سوهانکار و حیدری، ۱۴۰۰)
اخروی و شکیبامنش	ارائه مدل تدوین نقشه راه فناوری‌های یک سامانه پیشرفته	در این تحقیق با استفاده از ماتریس «جذابیت - توانمندی» یکی از سامانه‌های پیشرفته (که عنوان آن ذکر نشده) مطالعه و براساس مقایسه نتایج با شرایط وضع موجود به اولویت‌بندی فناوری‌ها پرداخته شده است. خروجی	(اخروی و شکیبامنش، ۱۳۹۸)

نویسنده	عنوان پژوهش	یافته‌های کلیدی	منبع
		به‌دست‌آمده با خروجی متداول پژوهش‌های این حوزه متفاوت است!	
دهقان، آذر و جاوید	ترسیم نقشه راه فناوری با بهره‌گیری از رویکرد توسعه و تحلیل گزینه‌های راهبردی: شرکت مزارع نوین ایرانیان	در این مقاله نویسندگان از رویکرد توسعه و تحلیل گزینه‌های راهبردی (SODA) (که از رویکردهای ساخت‌دهی است) استفاده کرده‌اند. خروجی این تحقیق مربوط به افق زمانی ۱٤۰٤ است که در نقشه دارای لایه‌های ذیل است: ۱. تعیین اهداف و برنامه‌ریزی، ۲. پشتیبانی از تحقیق و توسعه، ۳. ایجاد دفتر مطالعات فناوری‌های نوین، ٤. تأمین منابع انسانی، ۵. تأمین مالی	(دهقان نیری، آذر و جاوید میلانی، ۱۳۹۸)
حسینی، جوادی و ارباب شیرانی	مرور و مقایسه برخی‌کاربردهای نقشه راه فناوری	پژوهشگران در این تحقیق با بررسی هفت نقشه راه (دو مورد داخلی و ۵ مورد خارجی) به تحلیل انواع نقشه‌های راه پرداخته و در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که تنوعی از رویکردها برای تهیه نقشه راه فناوری وجود دارد که نحوه تهیه آن وابستگی زیادی به اهداف و وضعیت مورد نظر دارد.	(حسینی-نسب، جوادی و ارباب شیرانی، ۱۳۸۹)

منبع: نویسندگان

۲. روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق براساس هدف از نوع کاربردی بوده و در صدد تهیه نقشه راه برای فناوری کوانتوم می‌باشد. از آنجایی که همه اولویت‌ها و نیازها در یک سطح قرار ندارند لذا هدف‌گذاری‌ها در سه سطح کوتاه‌مدت (۰ تا ۵ سال)، میان‌مدت (۵ تا ۱۵ سال) و

بلندمدت (بیشتر از ۱۵ سال) برای توسعه علوم و فناوری‌های کوانتومی در نظر قرار گرفته شده است.

پژوهشگران مختلف برای تدوین نقشه راه، با عنایت به اقتضائات و ویژگی‌های تحقیق، مراحل اجرایی متفاوتی را در نظر می‌گیرند. مثلاً لو و ونگ (Lu & Weng, 2018, pp. 85-92). که در سال ۲۰۱۸ نقشه راه «صنعت تولید محصولات الکترونیکی و رایانه‌ای» را تنظیم و مقاله خود را در نشریه معتبر Technological Forecasting & Social Change به چاپ رسانده‌اند، روش کار خود را به شرح ذیل بیان کرده‌اند (Lu & Weng, 2018, pp. 85-92):

- گام ۱: (جمع‌آوری داده‌های ثانویه): شناسایی فناوری‌های عمومی از بررسی تجارب تولید هوشمند؛
- گام ۲: (طبقه‌بندی فناوری‌ها): طبقه‌بندی فناوری‌های شناسایی شده در چهار طبقه برمبنای ادبیات تحقیق؛
- گام ۳: (اجرای دور اول نظرسنجی از خبرگان): تکمیل پرسشنامه مربوط به میزان بلوغ بازار و فناوری و پرسشنامه همبستگی آن با توسعه فناوری؛
- گام ٤: (همبستگی فناوری و تحلیل بلوغ): تحلیل زمان بلوغ بازار و بلوغ فناوری و تهیه ماتریس همبستگی فناوری؛
- گام ۵: (جزئیات نقشه راه): انتخاب یکی از فناوری‌ها به‌عنوان نقطه شروع و سپس انتخاب مواردی که بیشترین ارتباط و همبستگی را با فناوری ابتدایی دارد؛
- گام ٦: (دور دوم نظرسنجی از خبرگان): تشکیل جلسه و بحث و گفتگو در خصوص نقشه راه و یافته‌های مرتبط؛
- گام ۷: (مشارکت در اجرایی‌سازی): ارائه دلالت‌هایی برای تدوین سیاست‌های دولتی و پشتیبانی از توسعه صنعت (Lu & Weng, 2018, pp. 85-92).

پژوهش پیش‌رو نیز از گام‌ها و مراحل مختلف تشکیل شده که در این مسیر از روش‌های تحقیق مختلفی بهره گرفته شده‌است. به عبارت دیگر، طبق تقسیم‌بندی ساندرز و همکارانش (Saunders, Lewis & Thornhill, 2019, pp. 121) که تحت عنوان پیاز پژوهش مطرح می‌شود، روش‌شناسی این تحقیق از نوع «آمیخته»[۱۸] بوده و استراتژی‌های

پژوهش استفاده شده در تحقیق عبارتند از: «مطالعات اسنادی»[۱۹] ، «پیمایش و نظرسنجی از خبرگان»[۲۰] و «پنل خبرگانی و دلفی» بهره گرفته شده است. در ادامه برای روشن شدن دقیق‌تر گام‌ها و مراحل انجام تحقیق، مراحل مهم و اصلی آن به شرح ذیل تبیین می‌شود:

۱) در گام نخست، هدف تیم پژوهش شناسایی «فناوری‌های جدید حوزه کوانتوم» بوده که از روش تحقیق «مطالعات اسنادی» (صادقی‌فسایی و عرفان‌منش، ۱۳۹٤، صص. ۸۰-۸۵) و مراجعه به جدیدترین آثار علمی و یافته‌ها روز دنیا انجام شده است.

۲) در مرحله دوم، تیم پژوهش با استفاده از پنل خبرگان[۲۱] اقدام به دسته‌بندی فناوری‌ها در پنج دسته نمود. چارچوب اولیه براساس طبقه‌بندی اتحادیه اروپا (Acín, et al, 2018, p. 15) بوده که یک طبقه به آن اضافه شده است. تعداد خبرگانی که در این مرحله مشارکت داشتند به شرح ذیل است (این خبرگان مربوط به حوزه‌های مختلف علم کوانتوم هستند):

نوع خبره	تعداد
خبرگان دانشگاهی	۱۰
خبرگانی صنعت	٦
سیاستگذاران صنعتی	۳

۳) در مرحله سوم اقدام به «تعیین نیازها و اولویت‌ها» نموده و به این منظور از «ماتریس جذابیت و توانمندی»[۲۲] (Mohammadzadeh, Garoosi & Mokhtarzadeh & Rasaei, 2021, p. 75) استفاده شد. قرارگیری هر یک از فناوری‌ها در ماتریس مذکور براساس پیمایش از خبرگان صورت گرفته است (دور اول نظر سنجی از خبرگان). مشخصات کلی مشارکت کنندگان در این مرحله به شرح ذیل است:

جدول (۳): مشخصات کلی مشارکت کنندگان در مرحله تعیین نیازها و اولویت‌ها

نوع خبره	تعداد کل	تعداد مبتنی بر تخصص				
		عمومی	محاسبات	شبیه‌سازی	ارتباطات	حسگری یا سنجش
خبرگان دانشگاهی	۳٤	۵	۹	۵	۸	۷
خبرگانی صنعت	۱۸	۳	۵	۲	۳	۵
سیاستگذاران صنعتی	۱۲	۱۲	–	–	–	–

٤) در مرحله چهارم، تیم پژوهش نقشه‌های راه متناسب با هر دسته از فناوری‌های چهارگانه را تنظیم نموده،

۵) در مرحله بعدی، با برگزاری ۱۷ دور جلسه غنای یافته‌ها ارتقا یافت. ۱٤ دور از این جلسات در حکم پنل خبرگانی بوده و سه دور نهایی در حکم روش دلفی است که نظرات خبرگان مرتبط أخذ، و نقشه راه پیشنهادی ترسیم شد.

جدول (٤): مشخصات کلی مشارکت کنندگان در مرحله پنل خبرگان

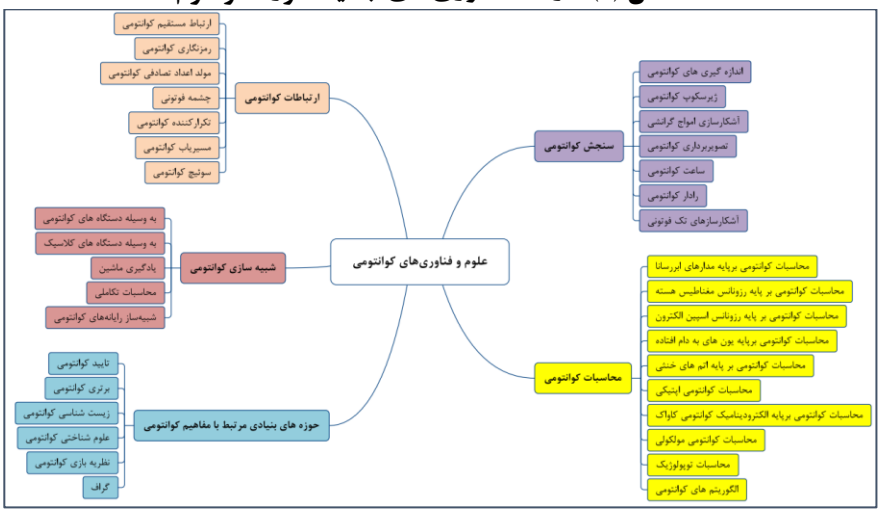
نوع خبره	تعداد کل	تعداد مبتنی بر تخصص				
		عمومی	محاسبات	شبیه‌سازی	ارتباطات	حسگری یا سنجش
خبرگان دانشگاهی	۱۶	۴	۴	۲	۳	۳
خبرگانی صنعت	۹	۳	۲	۱	۱	۲
سیاستگذاران صنعتی	۵	۵	–	–	–	–

۲. یافته‌های پژوهش

به منظور رعایت اختصار، مهم‌ترین یافته‌های هر مرحله از پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

در مرحله اول اقدام به بررسی و شناسایی فناوری‌های جدید حوزه کوانتوم نمودیم و در مرحله دوم فناوری‌های مذکور در پنج گروه دسته‌بندی شدند. شکل ذیل نشانگر این طبقه‌بندی است:

شکل (۸): درخت فناوری‌های جدید حوزه کوانتوم



منبع: یافته های تحقیق

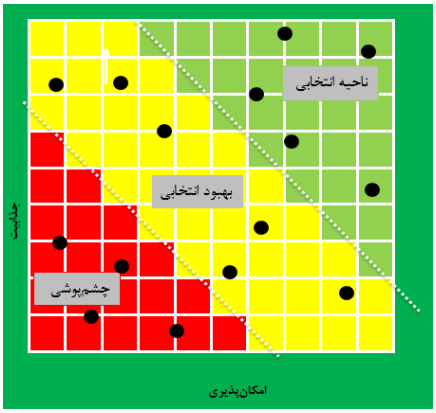
در مرحله سوم باید اولویت‌بندی فناوری‌ها انجام شود. با استفاده از ماتریس جذابیت–توانمندی[۲۳] اقدام به اولویت‌بندی فناوری‌ها نمودیم. از این روش برای تدوین راهبرد فناوری هم استفاده می‌شود (Connell, 2010, pp. 10-12) و (انصاری و همکاران ۱۳۹٤، ص. ۱۳۰). بدین منظور پرسشنامه‌ای براساس طیف نه‌گانه (۹–۱) بین خبرگان توزیع شد. از آنجایی که آلفای کرونباخ پرسشنامه‌های جمع‌آوری شده بیش از ۰.۷ بوده لذا پایایی آن مورد تأیید بوده است.

ماتریس جذابیت – توانمندی از طریق تقاطع‌دهی جذابیت‌ها و توانمندی‌های مربوط به هر فناوری، زمینه را برای تصمیم‌گیری در خصوص نوع راهبرد مناسب برای آن فناوری فراهم می‌کند. تحلیل‌های مختلفی بر اساس ماتریس جذابیت – توانمندی می‌توان

انجام داد. در ارتباط با هرکدام از فناوری‌های موجود در این سه ناحیه می‌توان رویکردی راهبردی اتخاذ کرد:

- **ناحیه انتخابی:** فناوری‌های این ناحیه از اهمیت زیادی برخوردارند زیرا جذابیت بالایی دارند و در عین حال توانمندی مناسبی نیز در خصوص آنها وجود دارد. راهبرد مناسب برای فناوری‌های مذکور این است که اولاً با اولویت بالایی در فهرست اکتساب قرار گیرند و ثانیاً به دلیل توانی که در زمینه آنها وجود دارد به‌صورت تحقیق و توسعه داخلی یا مشارکتی کسب شوند.
- **ناحیه بهبود انتخابی:** فناوری‌های این ناحیه دو دسته هستند: ۱) مواردی که از جذابیت بالایی برخوردار بوده و بنابراین مهم هستند، ولی توانمندی در آنها ناچیز است، ۲) فناوری جذابیت بالایی ندارد ولی توانمندی در آنها زیاد است. در خصوص این دو دسته تمرکز ارتقای توانمندی به‌صورت موردی است و صرفاً در صورت دست‌یابی به نشانه‌هایی امیدوارکننده در آینده، مورد انتخاب قرار می‌گیرند.
- **ناحیه چشم‌پوشی:** فناوری‌هایی که در این ناحیه قرار می‌گیرند از جذابیت بالایی برخوردار نبوده و توانمندی نیز در آنها پایین است. این فناوری‌ها غیرضروری هستند؛ راهبرد مناسب، واگذاری به شرکت‌های دیگر و یا عدم تمرکز بر آنهاست.

شکل (۹): ماتریس جذابیت-توانمندی (امکان‌پذیری)



منبع: نویسندگان

برای هریک از شاخه‌های علم کوانتوم، براساس تحلیل پرسشنامه‌های خبرگان، جداول توانمندی- جذابیت به‌دست آمد که به‌عنوان نمونه به جدول مرتبط با شاخه محاسبات کوانتومی اشاره می‌شود:

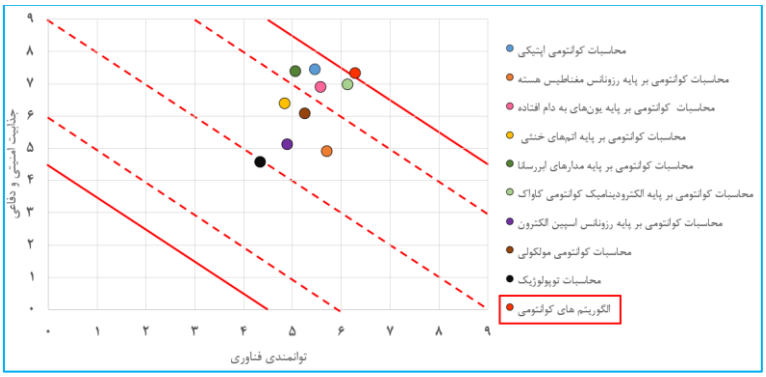
جدول (۵): نمونه‌ای از جداول توانمندی- جذابیت

نام فناوری ذیل شاخه محاسبات کوانتومی	توانمندی	جذابیت
محاسبات کوانتومی اپتیکی	۵.۴۷	۷.۴۲
محاسبات کوانتومی بر پایه رزونانس مغناطیس هسته	۵.۷۱	۴.۹۰
محاسبات کوانتومی بر پایه یون‌های به دام افتاده	۵.۵۹	۶.۸۸
محاسبات کوانتومی بر پایه اتم‌های خنثی	۴.۸۵	۶.۳۸
محاسبات کوانتومی بر پایه مدارهای ابررسانا	۵.۰۷	۷.۳۸
محاسبات کوانتومی بر پایه الکترودینامیک کوانتومی کاواک	۶.۱۳	۶.۹۵
محاسبات کوانتومی بر پایه رزونانس اسپین الکترون	۴.۹۰	۵.۱۲
محاسبات کوانتومی مولکولی	۵.۲۷	۶.۰۶
محاسبات توپولوژیک	۴.۳۶	۴.۵۷
الگوریتم های کوانتومی	۶.۲۹	۷.۳۳

منبع: نویسندگان

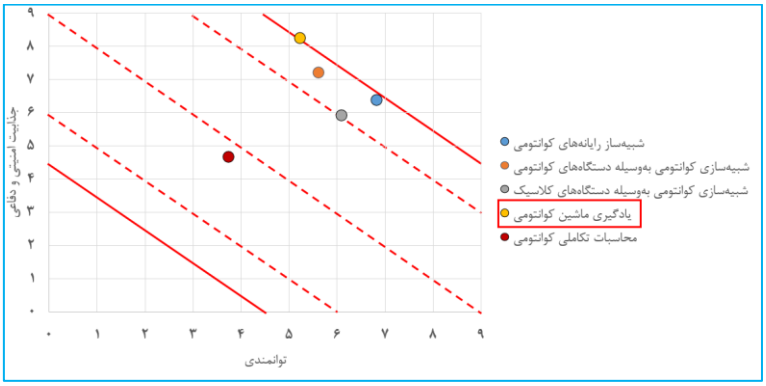
اعداد مندرج در جدول به نمودارهای متناظر منتقل شده و (به منظور رعایت اختصار یک نمونه از آنها نمایش داده می‌شود):

شکل (۱۰): ماتریس جذابیت – توانمندی علوم و فناوری‌های حوزه محاسبات کوانتومی



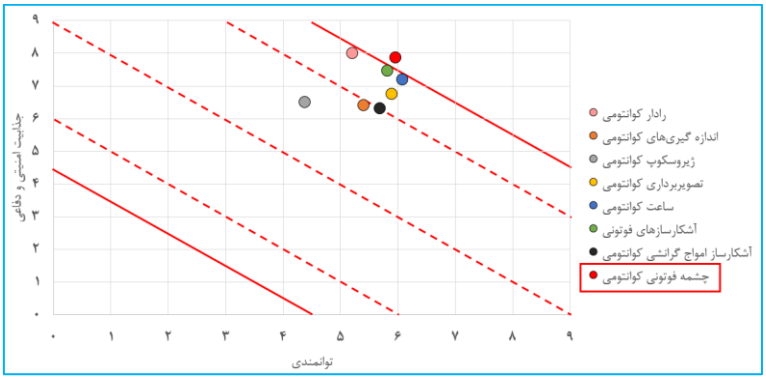
منبع: نویسندگان

شکل (۱۱): ماتریس جذابیت – توانمندی علوم و فناوری‌های حوزه شبیه‌سازی کوانتومی



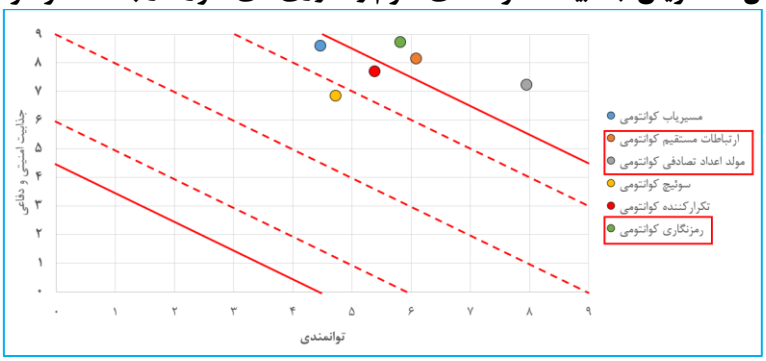
منبع: نویسندگان

شکل ۵: ماتریس جذابیت – توانمندی علوم و فناوری‌های حوزه حسگری کوانتومی



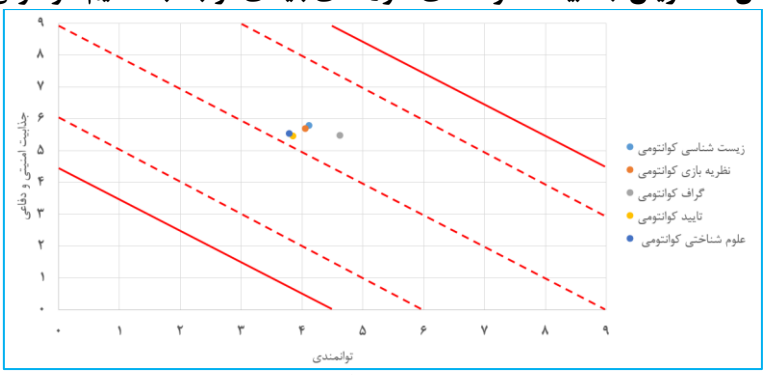
منبع: نویسندگان

شکل ٦: ماتریس جذابیت – توانمندی علوم و فناوری‌های حوزه ارتباطات کوانتومی



منبع: نویسندگان

شکل ۷: ماتریس جذابیت – توانمندی حوزه‌های بنیادی مرتبط با مفاهیم کوانتومی



منبع: نویسندگان

هدف‌گذاری‌های توسعه‌ای علوم و فناوری‌های کوانتومی با توجه به اولویت‌ها و نیازها، در سه سطح کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت، به شرح جدول ذیل تنظیم شد:

هدف‌گذاری‌های توسعه‌ای کوتاه‌مدت (افق تا ۵ سال)	
• آشکارسازهای تک‌فوتونی • مولد اعداد تصادفی کوانتومی	• توزیع کلید کوانتومی
هدف‌گذاری‌های توسعه‌ای میان‌مدت (افق ۵ تا ۱۵ سال)	
• تولید ماژول‌های محاسبات کوانتومی • توسعه فضای ابری کوانتومی در مقیاس استارتاپی • توسعه الگوریتم‌های کوانتومی	• آشکارساز امواج گرانشی کوانتومی • تصویربرداری کوانتومی • ژیروسکوپ کوانتومی • چشمه‌های فوتونی

• حل مسائل پیچیده با الگوریتم‌های کوانتومی • یادگیری ماشین کوانتومی • شبیه‌ساز یارانه‌های کوانتومی • ساعت کوانتومی	• تکرارکننده کوانتومی • رمزنگاری کوانتومی
هدف‌گذاری‌های توسعه‌ای بلندمدت (افق بیش از ۱۵ سال)	
• اکتساب فناوری و توسعه رایانه کوانتومی • ایجاد فضای سایبر کوانتومی • شبیه‌سازی کوانتومی به‌وسیله دستگاه‌های کلاسیک • شبیه‌سازی کوانتومی به‌وسیله دستگاه‌های کوانتومی	• ناوبری کوانتومی • رادار و تصویربرداری نظامی کوانتومی • ارتباط مستقیم کوانتومی • شبکه ارتباطی کوانتومی

منبع: نویسندگان

در مرحله چهارم، ویرایش اولیه نقشه راه از طریق هم‌اندیشی بین پژوهشگران اصلی تحقیق تدوین گردید. در این قسمت مبتنی بر اولویت‌بندی‌های انجام شده در قسمت قبل، نقشه راه کلان توسعه علوم و فناوری‌های کوانتومی ترسیم می‌شود و بر اساس آن، هدف‌گذاری‌های کلان کوتاه‌مدت (۰ تا ۵ سال)، میان‌مدت (۵ تا ۱۵ سال) و بلندمدت (بیشتر از ۱۵ سال) توسعه علوم و فناوری‌های کوانتومی تبیین می‌شود. در خصوص فرآیند ارائه نقشه راه و تعیین اهداف، نکات زیر می‌بایست مورد توجه قرار گیرد:

- در ساختار کلی نقشه راه، فناوری‌هایی که در سطح اول (فناوری‌های اولویت‌دار) قرار گرفته‌اند، مبنای هدف‌گذاری‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت قرار می‌گیرند و فناوری‌هایی که در سطح دوم (فناوری‌های بهبود انتخابی) قرار گرفته‌اند، مبنای هدف‌گذاری بلندمدت قرار می‌گیرند.
- با توجه به ماهیت نوظهور علوم و فناوری‌های کوانتومی، اکثر فناوری‌های این حوزه فاصله زیادی با سطح توانمندی فناوری ۹ (آمادگی فناوری ۹) دارند و در عین حال گام‌های پایانی آمادگی فناوری آنها حائز ابهامات و عدم قطعیت‌های فراوانی هستند. به همین دلیل نیز افق توسعه‌ای بسیاری از فناوری‌های اولویت‌دار به‌منظور تحقق توانمندی فناوری کامل، بلندمدت خواهد بود.

- ماهیت فناوری‌های استخراج شده در این حوزه، از روابط پیش‌نیازی و پس‌نیازی متعددی برخوردار بوده و توسعه برخی فناوری‌ها، محصولات و خدمات نیازمند توسعه پیش‌بینی فناوری‌های دیگری است. به همین دلیل ممکن است توسعه برخی فناوری‌های اولویت‌دار –علیرغم سطح اهمیت بسیار بالایی که دارند– از سال ابتدایی برنامه‌ریزی شروع نشود و شروع توسعه آنها بر اساس وضعیت فناوری‌های پیش‌نیاز تعیین شود.
- همچنین ممکن است برخی از فناوری‌هایی که به‌خودی خود فاقد جذابیت هستند، پیش‌نیاز یکسری فناوری‌های اولویت‌دار دیگر باشند. به همین دلیل نیز توسعه این فناوری‌ها می‌بایست در ابتدای دوره برنامه‌ریزی آغاز شوند.

با توجه به ملاحظات فوق، در ادامه و در شکل ذیل نمای کلی نقشه راه کلان توسعه علوم و فناوری‌های کوانتومی ارائه شده است.

شکل ۸: نقشه راه فناوری اولیه کوانتوم جمهوری اسلامی ایران در افق ۲۵ ساله

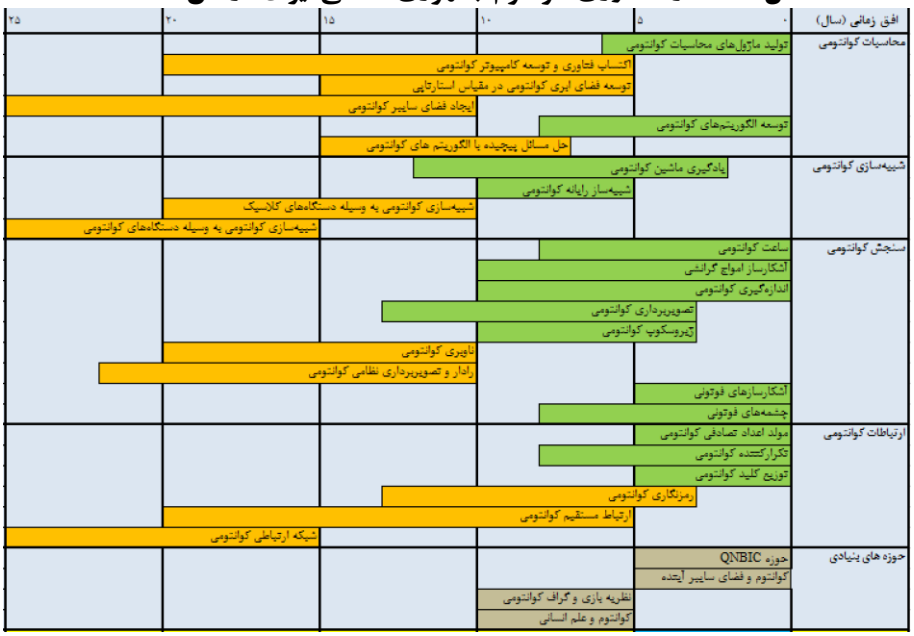
منبع: یافته‌های تحقیق

در مرحله پنجم و آخر، نقشه تهیه شده طی جلسات دلفی مورد نقد قرار گرفته و ضمن اصلاح و تکمیل آن به نسخه نهایی نقشه برای افق زمانی ۲۵ ساله رسیدیم که در شکل ذیل به صورت کلی نشان داده می‌شود:

به منظور فهم بهتر این نقشه راه، به نکات زیر توجه شود:

- بازه‌های توسعه‌ای که با رنگ سبز مشخص شده‌اند، مربوط به توسعه فناوری هستند.
- بازه‌های توسعه‌ای که با رنگ نارنجی مشخص شده‌اند، مربوط به توسعه فناوری-محصول هستند.

شکل ۹: نقشه راه فناوری کوانتوم جمهوری اسلامی ایران در افق ۲۵ ساله



منبع: (یافته‌های تحقیق)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

علوم و فناوری‌های کوانتومی پس از طی چند مرحله فراز و فرود در بیش از یک سده اخیر، اکنون به‌عنوان یک فناوری مهم نوظهور شناخته می‌شود که می‌تواند به‌عنوان فناوری مرزشکن[۲۴]، تحول‌آفرین[۲۵] و فناوری برافکن[۲۶] و تغییردهنده[۲۷] تلقی شود. پیش‌بینی‌های

مختلف حاکی از اثرگذاری بنیادین و عمیق این فناوری‌ها در شئون مختلف سیاسی، اجتماعی و اقتصادی دنیا می‌باشد. با وجود تمام ابهامات و عدم قطعیت‌های متعددی که فراروی مسیر توسعه‌ای حوزه فناورانه وجود دارد، دامنه گسترده اثرگذاری بالقوه این فناوری، ایجاب می‌کند که هر کشوری متناسب با نیازمندی‌ها و توانمندی‌های خود، چشم‌انداز توسعه‌ای علوم و فناوری‌های کوانتومی خود را به تصویر بکشد و مبتنی بر آن برای آینده این فناوری برنامه‌ریزی نماید.

موقعیت ویژه و راهبردی جمهوری اسلامی ایران در مناسبات بین‌المللی، ایجاب می‌کند که نسبت به علوم و فناوری‌های کوانتومی و حوزه اثر مختلف آن اعم از تجاری، دفاعی و امنیتی آگاهی کامل داشته و با رویکردی فعالانه نسبت به هدف‌گذاری و برنامه‌ریزی پیشگامانه در آن اقدام نماید. ازاین‌رو در تحقیق حاضر تلاش شده است با استفاده از تدوین نقشه راه فناوری و تطابق‌دهی آن با ماهیت علوم و فناوری‌های کوانتومی، هدف‌گذاری‌های توسعه‌ای این علوم و فناوری‌ها استخراج شوند. با وجود این هدف‌گذاری‌ها، می‌توان امید داشت که مسیر توسعه‌ی فناوری کوانتوم در ایران و کاربرد آن در عرصه‌های مختلف تجاری و دفاعی کشور به‌صورت هدفمند و مستمر طی شود و اثربخشی تخصیص منابع و ظرفیت‌ها افزایش قابل‌توجهی پیدا کند.

خروجی نقشه راه توسعه علوم و فناوری‌های کوانتومی در این طرح، نشان‌دهنده آن است که از بین چهار دسته اصلی این حوزه، دسته ارتباطات کوانتومی دامنه اثر عمیق‌تری در عرصه امنیت و دفاع دارند و می‌بایست مورد توجه جدی قرار گیرند. این دسته با توانمندی‌های خود می‌تواند طیف گسترده‌ای از نیازمندی‌های کشور –علی‌الخصوص در حوزه‌های امنیت سایبری، حفاظت اطلاعات و امنیت و عمومی و نیروی هوایی– را پاسخ‌گو باشد.

پس از این دسته نیز، دسته حسگری یا سنجش کوانتومی قرار دارد که می‌تواند زمینه تحولات اساسی در قابلیت‌های فناورانه کشور را فراهم کند. این دسته در صورت بالفعل کردن توانمندی‌های بالقوه خود، قابلیت دارد به طیف گسترده‌ای از نیازمندی‌های کشورمان علی‌الخصوص در حوزه‌های نیروی هوایی و نیروی زمینی پاسخ‌های برافکن و تحول‌آفرینی بدهد.

البته در کنار اهمیت این دو دسته، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری هدفمند در دو دسته محاسبات و شبیه‌سازی کوانتومی نیز به‌منظور بهره‌برداری از سرریزهای این دو حوزه حائز اهمیت خواهد بود. با توجه به اینکه فناوری‌های ذیل دسته حوزه‌های بنیادی مرتبط با مفاهیم کوانتومی، در سطوح پایین‌تر آمادگی فناوری قرار دارند، در خصوص کاربردهای آنها و جذابیت آنها در پاسخ‌گویی به نیازمندی‌های کشور نیز همچنان ابهام و تردید وجود دارد و این دسته می‌بایست در آینده مورد پایش مجدد قرار گیرد.

در نهایت پیشنهاد می‌شود که هر سه الی پنج سال، تحولات جدید فناوریهای کوانتوم بررسی شده و در صورت نیاز نقشه راه پیشنهاد شده براساس آخرین یافته های علمی به روز شود.

یادداشت‌ها

1. https://isti.ir/aboutcouncil
2. Quantum Computing
3. Superposition
4. Entanglement
5. Quantum Turing Machine
6. Universal Quantum Computer
7. Quantum Simulation
8. Richard Phillips Feynman
9. Versailles
10. Quantum Communication
11. Quantum Verification
12. Quantum Supremacy
13. Crystallization
14. Sectoral
15. Strategic Planning Synchronization
16. Robert Phaal
17. Expanding The IBM Quantum Roadmap To Anticipate The Future Of Quantum- Centric Supercomputing
18. Mixed Method
19. Archival And Documentary Research
20. Survey
21. Expert Panel
22. Capability – Attractiveness Matrix
23. Attractiveness-Competitiveness Matrix
24. Breakthrough Technology

25. Transformative Technology
26. Disruptive Technology
27. Game Changer Technology

کتابنامه

اخروی، امیرحسین و علیرضا شکیبامنش (۱۳۹۸). ارائه مدل تدوین نقشه راه فناوری‌های یک سامانه پیشرفته. *فصلنامه مدیریت توسعه فناوری هفتم*. (۱). ۱۱۸-۹۱.

اکبری، محمدرضا؛ امیرحسین سوهانکار و حمید حیدری (۱٤۰۰). نقشه راه تأسیس وزارت انرژی در ایران. *رهیافت*. ۳۱ (۲). ۸۷-۱۰٤.

انصاری، رضا؛ جواد سلطان‌زاده؛ امیر شریفیان؛ مرتضی ناطقیان و سعید فارابی خانقاهی (۱۳۹٤). ماتریس ارزیابی جذابیت - توانمندی ابزار تدوین راهبرد فن آوری (مورد مطالعه: فن آوری فرآیند احیای آهن). *بهبود مدیریت*. ۹ (۳). ۱۳۵-۱۰۹.

حسینی‌نسب، سیدمحمدرضا؛ حسن جوادی و بهروز ارباب شیرانی (۱۳۸۹). مرور و مقایسه برخی کاربردهای نقشه راه فناوری. *توسعه تکنولوژی صنعتی*. ۸ (۱٦). ۳۸-۳۱.

دوستی‌مطلق، سید نصیب‌اله؛ مرتضی جادریان و اشکان دیوبند (۱٤۰۱). *درخت فناوری‌های کوانتومی: حوزه‌های بنیادی مرتبط با مفاهیم کوانتومی*. تهران: دانشگاه عالی دفاع ملی.

دهقان نیری، محمود؛ عادل آذر، آذر و شایان جاوید میلانی (۱۳۹۸). ترسیم نقشه راه فناوری با بهره‌گیری از رویکرد توسعه و تحلیل گزینه‌های راهبردی: شرکت مزارع نوین ایرانیان. *بهبود مدیریت*. ۱۳ (۳). ۱-۲۲.

صادقی فسایی، سهیلا و ایمان عرفان‌منش (۱۳۹٤). مبانی روش‌شناختی پژوهش اسنادی در علوم اجتماعی؛ مورد مطالعه: تأثیرات مدرن‌شدن بر خانواده ایرانی. *فصلنامه علمی پژوهشی راهبرد فرهنگ*. ۲۹ (۸). ٦۱-۹۱.

طهماسبی، سیامک؛ فاطمه کیانی، فرهاد نظری‌زاده؛ منوچهر معصومی و فیروز. پایروند (۱٤۰۰). دیده‌بانی و تحلیل روند فناوری‌های صنایع راهبردی؛ مطالعه موردی ریزپرنده‌ها. *سیاست علم و فناوری*. ۱٤ (۳). ۷۰-۹۰.

فارسی، ابوالقاسم؛ منوچهر منطقی؛ حسن فارسیجانی و چنگیز والمحمدی (۱٤۰۱). ترسیم ره نگاشتی برای تسهیل و تسریع وقوع همپایی فناورانه در صنعت پتروشیمی ایران. *بهبود مدیریت*. ۱٦ (۲). ۱-۳٤.

کریمی، تورج؛ عادل‌آذر، بهاره‌محبان و روح‌اله قاسمی (۱٤۰۱). تدوین نقشه راه فناوری حمل‌ونقل هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا در صنایع غذایی دارای زنجیره تأمین سرد. *مدیریت صنعتی*. ۱٤ (۲). ۱۹۵-۲۱۹.

معادی‌رودسری، محمدحسن و حسن‌پور، اسماعیل (۱٤۰۱). *فناوری کوانتومی در کشورهای منتخب و ایران*. تهران: مرکز پژوهش‌های مجلس.

Acín, A., I. Bloch, H. Buhrman, T. Calarco, C. Eichler, J. Eisert, D. Esteve, et al. (2018). The quantum technologies roadmap: a European community view. *New Journal of Physics*. 20 (8). 080201.

Bjergstrom, K. N., T. Cross, V. M. Dwyer, M. J. Everitt, M. Henshaw, P. John, and J. Pritchard (2016). *Towards a UK co-operative for the advancement of quantum technology*.

Coccia, Mario, Saeed Roshani, and Melika Mosleh (2022). *Evolution of Quantum Computing: Theoretical and Innovation Management Implications for Emerging Quantum Industry*. IEEE Transactions on Engineering Management.

Connell, Richard B. (2010). The attractiveness-competitiveness matrix: a methodology used to assist policy makers select priorities for industrial development initiatives. *International Journal of Business and Management*. 5 (7). 3-13.

Daley, A. J., I. Bloch, C. Kokail, S. Flannigan, N. Pearson, M. Troyer, and P. Zoller. (2022). Practical quantum advantage in quantum simulation. *Nature* 607(7920). 667-676.

Feynman, R. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*. 467-488.

Gambetta, Jay. (2022). Expanding the IBM Quantum roadmap to anticipate the future of quantum-centric supercomputing. https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap-2025.

Gambetta, Jay. (2020). IBM's roadmap for scaling quantum technology.

Ghazinoory, Sepehr, Nasrin Dastranj, Fatemeh Saghafi, Arun Kulshreshtha, and Alireza Hasanzadeh. (2017). Technology roadmapping architecture based on technological learning: Case study of social banking in Iran. *Technological Forecasting and Social Change*. 122. 231-242.

Gill, S. S., A. Kumar, H. Singh, M. Singh, K. Kaur, M. Usman, and R. Buyya. (2022). Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions. *Software: Practice and Experience*. 52 (1). 66-114.

Hayashi, M. (2006). *Quantum Information: An Introduction*. Berlin: Springer.

IQCI. (2020). Institute for Quantum Computing Impact Report. https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing-impact-report/.

IQST. (2019). IQST Annual Report. Institute for Quantum Science and Technology.

John P. Holdren, Afua Bruce, at all. (2018). *Quantum Computing Market, Industry & Technologies*. 2018-2024. Washington DC: HSRC.

Krane, K. (2012). *Modern Physics*. John Wiley & Sons.

LaPierre, Ray. (2021). *Introduction to Quantum Computing*. Springer International Publishing. 2023. Lens.org. https://www.lens.org/.

Lu, Hsi Peng, and Chien I. Weng. (2018). Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry. *Technological Forecasting and Social Change*. 133. 85-94.

Mohammadzadeh, Sara, Nima Garoosi Mokhtarzadeh, and Mohammad Reza Rasaei. (2021). Strategic Technology Selection for Oil Production: An Application of Attractiveness–Capability Matrix of Technology. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*. 10 (1). 66–79.

Moody, G., Sorger, V. J., Blumenthal, D. J., P. W. Juodawlkis, W. Loh, C. Sorace-Agaskar, and R. M. Camacho. (2022). Roadmap on integrated quantum photonics. *Journal of Physics: Photonics*. 4 (1). 012501.

Nakahara, M., and T. Ohmi. (2008). *Quantum Computing*. CRC Press, Cambridge.

Nielsen, M. A., and I. L. Chuang. (2000). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.

Park, Hyunkyu, Rob Phaal, Jae-Yun Ho, and Eoin O'Sullivan. (2020). Twenty years of technology and strategic roadmapping research: A school of thought perspective. *Technological Forecasting and Social Change*. 154.

Phaal, R, C. J. Farrukh, and D. R. Probert. (2004). Technology roadmapping—a planning framework for evolution and revolution. *Technological forecasting and social change*. 71 (1-2). 5-26.

Phaal, Robert, and Clive Kerr. (2021). Guest Editorial: New Perspectives on Roadmapping: Foreword. IEEE *Transactions on Engineering Management*. 69 (1). 3-5.

Phaal, Robert, and Gerrit Muller. (2009). An architectural framework for roadmapping: Towards visual strategy. *Technological forecasting and social change*. 76 (1). 39-49.

Phaal, Robert, Clare Farrukh, and David Probert. (2001). Technology Roadmapping: linking technology resources to business objectives. *Centre for Technology Management*. University of Cambridge 1-18.

Pritchard, J., and S. Till. (2016). *UK Quantum Technology Landscape*. Defence Science and Technology Laboratory.

QIC. (2018). *National Strategic Overview for Quantum Information Science*. National Science and Technology Council.

Saunders, Mark, Philip Lewis, and Adrian Thornhill. (2019). *Research methods forbusiness students. Eighth edition*. Essex: Prentice Hall: Financial Times.

SBQMI. (2020). *Stewart Blusson Quantum Matter Institute Annual Report*. The University of British Columbia.

Singh, S. K., A. E. Azzaoui, M. M. Salim, and J. H. Park. (2020). Quantum communication technology for future ICT-review. *Journal of Information Processing Systems*. 16 (6). 1459-1478.

Vinayavekhin, Sukrit, Robert Phaal, Thananunt Thanamaitreejit, and Kimitaka Asatani. (2021). Emerging trends in roadmapping research: A bibliometric literature review. *Technology Analysis & Strategic Management*. 1-15.

Okhravi, A., & shakibamanesh, A. (2019). Provide the model of technology roadmapping for an advanced system. *Journal of Technology Development Management*. *7* (1). 91-118. doi: 10.22104/jtdm.2019.2860.1966 (in Persian)

Akbari, M., Souhankar, A., & Heidari, H. (2021). The Roadmap to Establish the Ministry of Energy in Iran. *Rahyaft*. *31* (82). 87-104. doi: 10.22034/rahyaft.2021.10884.1267 (in Persian)

Ansari, R., Soltanzadeh, J., Sharifian, A., Nateghian, M., & Farabi Khanqahi, S. (2015). Attractiveness-Competitiveness Matrix as a Technology Strategy Making Tools (Case Study: Ironmaking Technology). *Journal of Improvement Management*. 9 (3). 109-135. (in Persian)

Hosseini-nasab, M.; Javadi, H.; Arbab-Shirani, B. (2010). The review and comparison of some applications of technology road map. *Quarterly journal of Industrial Technology Development*. 8 (16). 31-38. (in Persian)

Dostimotalaq, Seyed Nusibaleh, Morteza Jadrian, and Ashkan Deoband. (2022). Quantum technology tree: fundamental domains related to quantum concepts. Tehran: Supreme National Defense University. (in Persian)

Dehghan Nayeri, M., Azar, A., & Javid Milani, S. (2019). Technology Road Mapping (TRM) based on Strategic Option Development and Analysis: Mazare Novin Iranian Company. *Journal of Improvement Management*. *13* (3). 1-22. (in Persian)

Sadeghi-fasaei, Soheila.; Erfanmanesh, Iman; (2015) Methodological Principles of Documentary Research in Social Sciences; Case of Study: Impacts of Modernization on Iranian Family. *Strategy for Culture*. 29 (8). 61-91. (in Persian)

Tahmasebi, S., Kiani, F., Nazarizadeh, F., Masoumi, M., & Payervand, F. (2021). Technology Scouting and Trend Analysis in Strategic Industries; The Case of Small UAV. *Journal of Science and Technology Policy*. *14* (3). 70-90. doi: 10.22034/jstp.2021.14.3.1298 (in Persian)

Farsi, A., Manteghi, M., Farsijani, H., & Valmohammadi, C. (2022). Drawing a roadmap to facilitate and accelerate the occurrence of technological catch-up in the Iranian petrochemical industry. *Journal of Improvement Management*. *16* (2). 1-34. doi: 10.22034/jmi.2022.312675.2689 (in Persian)

Karimi, T., Azar, A., Mohebban, B., & Ghasemi, R. (2022). Developing an Internet of Things-based Intelligent Transportation Technology Roadmap in the Food Cold Supply Chain. *Industrial Management Journal*. *14* (2). 195-219. doi: 10.22059/imj.2021.319427.1007825 (in Persian)