



Research Paper

Mapping and Analysis of Quantum Communication Technologies from the Perspective of Technology Management

Mohammad Zamani Miandeshti¹, Seyed Habibollah Tabatabaian², Amir Mohammad Nejad Mohammad³, Naser Bagheri Moghaddam⁴

1. PhD student in Technology Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Allameh Tabataba'i University, Faculty of Management and Accounting, Tehran, Iran.
3. Director of Quantum Optics Laboratory, Advanced Technologies Development Research Institute, Tehran, Iran.
4. Associate Professor, Technology and Innovation Policy Research Group, National Research Institute for Science Policy, Tehran, Iran.

Use your device to scan and read the article online



Citation: ZamaniMiandeshti.M, Tabatabaian.H, NejadMohammad.A,Bagheri Moghaddam.N, (2024).[Mapping and Analysis of Quantum Communication Technologies from the Perspective of Technology Management (Persian)]. *Journal of Governance knowledge*, 02(04), 140-170 .<https://doi.org/10.22034/jokog.2025.480728.1018>



<https://doi.org/10.22034/jokog.2025.480728.1018>



Received: 28 Aug 2024

Revised: 31 Oct 2024

Accepted: 05 Nov 2024

Available Online: 20 Dec 2024

Keywords:

Quantum Communications, Technology Management, Technology Mapping.

ABSTRACT

Quantum technology, as an emerging field, has demonstrated significant potential to drive transformative changes across various domains. Built upon the principles of quantum mechanics, this technology has led to the development of numerous applications in three main areas: quantum communication technologies, quantum sensing technologies, and quantum computing and simulation technologies. Among these, the field of quantum communication is more advanced compared to the others. However, the nature of this technology and its development remains fraught with uncertainties in various scientific, operational, and social dimensions, which has led to ambiguities in its developmental pathways and applications. One critical challenge is the absence of a comprehensive map of technologies and knowledge areas (especially in the domain of quantum communication), which could systematically identify ongoing research, knowledge gaps, and future trajectories. This lack of mapping has contributed to strategic decision-making and development prioritization being plagued by uncertainty. In this research, an initial understanding of the nature of this technology from a technology management perspective has been developed. Subsequently, through an exploratory approach involving a systematic review of the literature and the formation of a focus group, a comprehensive map of quantum communication technologies has been constructed. Finally, the development status of this technology across various branches of quantum communication has been analyzed. The findings of this research indicate that the technologies within the quantum communication domain are at different stages of the life cycle and technology readiness levels, ranging from fundamental protocols and infrastructures to more complex applications like distributed quantum networks. While some areas have achieved relative maturity, many key technologies remain in the stages of research, development, or early experimentation. These findings underscore the importance of effective technology governance and the alignment of scientific and industrial policies to accelerate the development process and enable the widespread implementation of this transformative technology.

* Corresponding Author:

Mohammad Zamani Miandeshti

Address: Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

E-mail: mzamani2009@gmail.com



مقاله پژوهشی

ترسیم نگاشت فناوری‌های حوزه ارتباطات کوانتومی و تحلیل آن از منظر مدیریت فناوری

* محمد زمانی میاندشتی^۱، سید حبیب‌الله طباطباییان^۲، امیرمحمد نژادمحمد^۳، ناصر باقری مقدم^۴

۱. دانشجوی دکتری مدیریت تکنولوژی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

۲. دانشیار، دانشگاه علامه طباطبائی، دانشکده مدیریت و حسابداری، تهران، ایران.

۳. مدیر آزمایشگاه اپتیک کوانتومی، پژوهشگاه توسعه فناوری‌های پیشرفته، تهران، ایران.

۴. دانشیار، گروه پژوهشی سیاست فناوری و نوآوری، مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور، تهران، ایران.

چکیده

فناوری کوانتوم به عنوان یک فناوری نوپا نشان داده است که پتانسیل لازم برای ایجاد تحول در حوزه‌های گوناگون را داراست. این فناوری بر پایه اصول مکانیک کوانتومی بنا نهاده شده است و این اصول منجر به شکل‌گیری کاربردهای فراوانی در سه حوزه اصلی «فناوری ارتباطات کوانتومی»، «فناوری سنجش کوانتومی» و «فناوری محاسبات و شبیه‌سازی کوانتومی» می‌شود که در این میان حوزه ارتباطات کوانتومی نسبت به حوزه‌های دیگر جلوتر است. اما ماهیت این فناوری و توسعه آن همچنان با ابهاماتی در ابعاد مختلف علمی، عملیاتی و اجتماعی مواجه است که موجب بروز ابهاماتی در مسیرهای توسعه و کاربردهای آن شده است. در این میان نبود نگاشتی جامع از فناوری‌ها و حوزه‌های دانشی (به ویژه در حوزه ارتباطات کوانتومی) که به‌طور جامع پژوهش‌های جاری، شکاف‌های دانشی و مسیرهای آینده را شناسایی کند، موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های راهبردی و اولویت‌های توسعه با عدم قطعیت مواجه شوند. بنابراین در این تحقیق تلاش شده است تصویری اولیه نسبت به ماهیت این فناوری از منظر مدیریت فناوری ایجاد شود و در ادامه با استفاده از رویکرد اکتشافی و از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و تشکیل گروه کانونی، تصویری جامع از نگاشت فناوری‌های حوزه ارتباطات کوانتومی ارائه شود و در پایان وضعیت توسعه این فناوری در شاخه‌های مختلف حوزه ارتباطات کوانتومی تحلیل شود. بر این اساس یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد فناوری‌های موجود در حوزه ارتباطات کوانتومی در مراحل مختلف چرخه عمر و سطح آمادگی فناوری قرار دارند و شامل طیفی از پروتکل‌ها و زیرساخت‌های پایه‌ای تا کاربردهای پیچیده‌تر مانند شبکه‌های توزیع شده کوانتومی هستند. در این میان اگرچه برخی از حوزه‌ها به بلوغ نسبی رسیده‌اند، اما بسیاری از فناوری‌های کلیدی همچنان در مراحل تحقیق و توسعه یا آزمایش‌های اولیه باقی مانده‌اند. این یافته‌ها اهمیت حکمرانی صحیح فناوری و هماهنگ‌سازی سیاست‌های علمی و صنعتی برای تسریع فرایند توسعه و پیاده‌سازی گسترده این فناوری را برجسته می‌کند.

تاریخ دریافت: ۰۷ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۰ آبان ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۵ آبان ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۳۰ آذر ۱۴۰۳

کلیدواژه‌ها:

نگاشت فناوری،
ارتباطات کوانتومی،
مدیریت فناوری،
حکمرانی فناوری،
چرخه عمر فناوری،
سطح آمادگی فناوری

* نویسنده مسئول:

محمد زمانی میاندشتی

نشانی: دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

رایانامه: mzamani2009@gmail.com



مقدمه

در این میان فناوری کوانتوم به عنوان یک فناوری نوپا در عرصه جهانی نشان داده است که پتانسیل و ظرفیت لازم برای ایجاد تحول در حوزه‌های گوناگون ملی، دفاعی و امنیتی را داراست (اونو^۱، پرادان و امبوها^۲، ۲۰۲۳، اولپیان^۳ و همکاران، ۲۰۲۴) و نیاز است کشور مانیز به‌منظور بهره‌برداری از ظرفیت‌های بالقوه و بالفعل آن، و نیز عدم از دست رفتن فرصت و جلوگیری از ایجاد شکاف عمیق میان ایران و کشورهای دیگر، برنامه‌ریزی‌های لازم را در این حوزه انجام دهد و یا به عبارت بهتر، با مدیریت صحیح فرایند توسعه فناوری، اقدامات لازم را جهت ایجاد توانمندی فناورانه در کشور انجام دهد. اما چالش اصلی اینجاست که ماهیت این فناوری و توسعه آن همچنان با ابهامات قابل توجهی مواجه است که موجب بروز ابهاماتی در مدل حکمرانی و انتخاب اولویت‌های توسعه شده است. راه اصلی برای فائق آمدن بر این چالش، ایجاد شناخت مناسب از فناوری و ویژگی‌های آن و تحلیل وضعیت فناوری‌های مختلف آن از منظر چرخه مدیریت فناوری و وضعیت آمادگی فناوری است (چیوفالو^۴، اسمرزی^۵ و میشلینی^۶، ۲۰۲۴) و این امر نیز نیازمند ترسیم نگاشتی دقیق از فناوری‌های حوزه کوانتومی و تحلیل آن می‌باشد و در صورت تحقق آن، می‌توان امید داشت حکمرانی توسعه این فناوری در کشور در مسیر درست و صحیحی انجام شود.

بر این اساس آنچه در این مقاله دنبال می‌شود ایجاد تصویری اولیه نسبت با ماهیت این فناوری از منظر مدیریت فناوری، ترسیم تصویری جامع از نگاهت

دهه‌های اخیر در جهان، سال‌های شکل‌گیری باور نقش دانش و فناوری در ایجاد ثروت و توسعه کشورها بوده است. در ایران نیز باتوجه به گسترش اهمیت فناوری در ایجاد ارزش و ترویج مفهوم اقتصاد مبتنی بر دانش و فناوری، در اسناد بالادستی بر تولید ثروت و قدرت براساس علم و فناوری تأکید زیادی شده است. در سند چشم‌انداز بیست ساله جمهوری اسلامی ایران، حداقل در دو بند به‌صورت صریح به موضوع فناوری پرداخته شده است (سند چشم‌انداز بیست ساله جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴، ۱۳۸۲). این موارد نشان‌دهنده نقش پررنگ فناوری‌های راهبردی در تحقق افق سند چشم‌انداز است. همچنین مجمع تشخیص مصلحت نظام نیز سیاست‌های کلی نظام را برای رشد و توسعه فناوری در ۴ ماده و ۲۵ بند به‌تصویب رسانیده است (سیاست‌های کلی علم و فناوری، ۱۳۹۳). در این میان، تأکید بر فناوری در برنامه‌های پنج ساله توسعه کشور، سیر صعودی روند تهیه اسناد جامع توسعه فناوری در کشور، و جذب و بومی‌سازی فناوری‌های نوین مانند فناوری‌های اتمی، نانو، بایو و ... همه نشان از اهمیت جایگاه توسعه فناوری در شرایط اقتصادی - اجتماعی حاضر کشور دارد.

از سوی دیگر در کشورهایی که در مراحل ابتدایی توسعه زیرساخت‌های دانشی خود قرار دارند (کشورهای در حال توسعه)، توسعه یک فناوری را نمی‌توان تنها به دست مکانیزم‌های بازار آزاد سپرد. در این راستا، دولت‌ها می‌بایست با برنامه‌ریزی مناسب، به مداخله هدفمند در توسعه فناوری بپردازند و موفقیت این مداخله در گرو شناسایی صحیح و کامل فناوری از ابعاد مختلف می‌باشد (ناصر باقری مقدم، ۱۳۹۷).

1. Onu
2. Pradhan, & Mbohwa
3. Ulpiani
4. Chiofalo
5. Smerzi
6. Michellini



فاکتورگیری سریع اعداد بزرگ را دارد، به‌طور خاص پتانسیل این فناوری در به چالش کشیدن رمزنگاری مدرن را نشان داده است (اورگلس^۴، گارسیا-راجر^{۱۵}، و مونسرات^{۱۶}، ۲۰۲۴؛ والسالان^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۴). در حوزه سنجش کوانتومی، ابزارهایی توسعه یافته‌اند که با بهره‌گیری از اصول تداخل سنجی کوانتومی، دقت بی‌سابقه‌ای در اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی ارائه می‌دهند. حسگرهای کوانتومی برای کاربردهایی نظیر شناسایی منابع زیرزمینی، پزشکی، و صنایع نظامی استفاده می‌شوند و دقت بالایی در سنجش میدان‌های گرانشی و مغناطیسی دارند (کیم و ماداوی^{۱۸}، ۲۰۲۴؛ کوپوسامی^{۱۹}، هانگر^{۲۰}، روبن^{۲۱}، گلندر^{۲۲} و سرانو^{۲۳}، ۲۰۲۴).

ماهیت نوظهور بودن فناوری کوانتوم و انتظارات از آن

فناوری کوانتوم به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و تحول‌آفرین‌ترین حوزه‌های علمی، توجه گسترده‌ای را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. بر اساس تعریف بن‌مارتین و همکاران، فناوری‌های نوظهور شامل پنج ویژگی اصلی هستند: «نوآوری رادیکال»، «رشد سریع»، «همگرایی و انسجام درونی»، «تأثیر قابل توجه بر حوزه‌های اجتماعی و اقتصادی»، و «ابهام و عدم قطعیت» (روتولو^{۲۴}، هیکس^{۲۵} و مارتین^{۲۶}، ۲۰۱۵). بررسی این ویژگی‌ها

فناوری‌های حوزه ارتباطات کوانتومی و تحلیل آن از منظر چرخه عمر و سطح آمادگی فناوری می‌باشد.

بررسی ماهیت فناوری کوانتومی و ضرورت ترسیم نگاهت فناوری آن

معرفی اجمالی فناوری کوانتومی

فناوری کوانتومی، یکی از پیشرفته‌ترین حوزه‌های علمی و فناوری، با تکیه بر اصول مکانیک کوانتومی نظیر برهم‌نهی^۷، درهم‌تنیدگی^۸ و رونوشت‌ناپذیری^۹، امکان دستیابی به قابلیت‌هایی را فراهم کرده است که پیش‌تر در فیزیک کلاسیک غیرممکن به‌نظر می‌رسیدند (لی^{۱۰}، چوی^{۱۱}، کیم^{۱۲} و لی، ۲۰۲۴). این فناوری با کاربرد در حوزه‌های ارتباطات، رایانش، و سنجش، پتانسیل ایجاد تحولاتی بنیادین در صنایع مختلف را داراست.

در ارتباطات کوانتومی، امنیت اطلاعات به‌طور بنیادین متحول شده است. با استفاده از مفاهیمی مانند توزیع کلید کوانتومی، امکان انتقال اطلاعات به شیوه‌ای فراهم می‌شود که هرگونه تلاش برای دسترسی غیرمجاز شناسایی شود. این ویژگی، ارتباطات کوانتومی را به انتخابی ایده‌آل برای زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه‌های مالی و نظامی تبدیل کرده است (چن^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۴). رایانش کوانتومی، شاخه‌ای دیگر از این فناوری، با بهره‌گیری از توان محاسباتی بی‌نظیر کیوبیت‌ها، قادر به حل مسائل پیچیده‌ای است که کامپیوترهای کلاسیک از عهده آن‌ها برنمی‌آیند. الگوریتم شور، که توانایی

7. Superposition
8. Entanglement
9. No-Cloning
10. Lee
11. Choi
12. Kim
13. Chen

14. Urgelles
15. Garcia-Roger
16. Monserrat
17. Valsalan
18. Madhavi
19. Kuppusamy
20. Hunger
21. Ruben
22. Goldner
23. Serrano
24. Rotolo
25. Hicks
26. Martin



محاسبات کوانتومی به‌عنوان یکی از شاخه‌های پیشرو، در افزایش تعداد مقالات علمی نقش کلیدی داشته است (وانگ، شن و ژو^{۳۴}، ۲۰۲۱). همچنین، مطالعات شایستگی‌گر نشان می‌دهند که از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸، بیش از ۵۴,۰۰۰ مقاله مرتبط با فناوری کوانتومی منتشر شده است. این آمار بیانگر تمرکز گسترده پژوهشگران و دولت‌ها بر این حوزه نوظهور است (شایدستگر، هاونشایدل، بورنمن و اتل، ۲۰۲۱). همچنین، سرمایه‌گذاری‌های کلان از سوی دولت‌ها و شرکت‌های فناوری مانند IBM و گوگل، به توسعه سریع این فناوری کمک کرده‌اند. برنامه ملی کوانتومی ایالات متحده و پروژه‌های پیشرو این شرکت‌ها نمونه‌هایی از این توجه فزاینده هستند (کوچیا^{۳۵}، ۲۰۲۴؛ گوناشار^{۳۶}، ۲۰۲۲). فناوری کوانتوم همچنین نشان‌دهنده همگرایی و انسجام درونی است. این فناوری به دلیل ماهیت میان‌رشته‌ای خود، ترکیبی از فیزیک نظری، علوم کامپیوتر، ریاضیات و مهندسی است. همکاری میان‌رشته‌ای، پروژه‌های بزرگ نظیر شبکه‌های کوانتومی و رمزنگاری کوانتومی را ممکن ساخته است. برای مثال، فناوری رمزنگاری کوانتومی نیازمند تلفیق مفاهیم مکانیک کوانتومی با فناوری شبکه‌های ارتباطی است. انسجام درونی این حوزه، به توسعه جامعه‌ای از پژوهشگران میان‌رشته‌ای منجر شده است که در تسریع پیشرفت‌ها نقشی کلیدی ایفا می‌کنند (کیمیل^{۳۷}، ۲۰۰۸؛ لاد^{۳۸} و همکاران، ۲۰۱۰). از منظر تأثیر اجتماعی و اقتصادی، فناوری

در فناوری کوانتومی، ماهیت نوظهور بودن آن را به‌خوبی آشکار می‌کند

یکی از ویژگی‌های برجسته فناوری‌های نوظهور، نوآوری رادیکال است. فناوری کوانتوم با بهره‌گیری از اصول مکانیک کوانتومی نظیر برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی، توانسته قابلیت‌هایی ایجاد کند که به‌طور کامل از فناوری‌های کلاسیک متمایز هستند. برای مثال، محاسبات کوانتومی امکان انجام محاسبات پیچیده را با سرعتی بسیار بالاتر از کامپیوترهای کلاسیک فراهم کرده است. الگوریتم شور، که قابلیت شکستن رمزنگاری‌های متعارف را دارد، و برتری کوانتومی اعلام‌شده توسط گوگل در سال ۲۰۱۹، نمونه‌هایی از این نوآوری رادیکال هستند (آروت^{۳۷} و همکاران، ۲۰۱۹؛ شور^{۳۸}، ۱۹۹۴). این دستاوردها، پتانسیل عظیم فناوری کوانتوم در حوزه‌هایی نظیر شبیه‌سازی مولکولی، طراحی دارو و هوش مصنوعی را به‌خوبی نشان می‌دهند (مونتارانو^{۲۹}، ۲۰۱۶؛ نیلسن و چوانگ^{۳۰}، ۲۰۱۰). رشد سریع نیز از دیگر ویژگی‌های فناوری‌های نوظهور است که در فناوری کوانتومی به‌وضوح دیده می‌شود. بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از پایگاه‌های علمی معتبر وب آف ساینس^{۳۱} و اسکوپوس^{۳۲}، تعداد مقالات علمی در حوزه فناوری کوانتومی طی دو دهه اخیر رشد سالانه‌ای قابل توجه و میانگین رشد سالانه‌ای بیش از ۲۰ درصد داشته است^{۳۳}. مطالعه‌ای توسط وانگ نشان می‌دهد که

27. Arute

28. Shor

29. Montanaro

30. Nielsen & Chuang

31. Web of Science

32. Scopus

۳۳. بر اساس جستجوی عبارات عبارت کلیدی مانند «quantum technology»، «quantum Communication»

در «quantum Computing»، «quantum Sensing» و غیره در پایگاه داده Scopus و Web of Science

34. Wang, Shen, & Zhou

35. Coccia

36. Gunashekar

37. Kimble

38. Ladd



است: «محرک نوآوری»، «اوج انتظارات متورم»، «سراشیبی نامیدی»، «شیب روشنفکری» و «فلات بهره‌وری» (فن و راسکینو^{۴۳}، ۲۰۰۸). در این میان توسعه کاربردهای فناوری کوانتومی نظیر ارتباطات کوانتومی، رایانش و شبیه‌سازی و سنجش کوانتومی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده و جایگاه دقیق آن در منحنی هایپ نیازمند بررسی دقیق‌تر است (پرسکیل، ۲۰۱۸).

طی سال‌های گذشته شرکت‌هایی نظیر گوگل و IBM با دستیابی به دستاوردهایی همچون «برتری کوانتومی»، انتظارات زیادی ایجاد کرده‌اند (آروت و همکاران، ۲۰۱۹؛ پرسکیل، ۲۰۱۸). با این حال، بسیاری از این وعده‌ها هنوز در مرحله نظری باقی مانده‌اند. چالش‌هایی نظیر پایداری پایین کیوبیت‌ها، نیاز به زیرساخت‌های پیچیده، و نرخ بالای خطا، مانع از تحقق کامل این فناوری شده‌اند. این شرایط نشان‌دهنده حضور فناوری کوانتومی در مرحله «اوج انتظارات متورم» است، جایی که تبلیغات و انتظارات از قابلیت‌های واقعی فراتر رفته‌اند (ازراتی^{۴۴}، ۲۰۲۲). به تدریج، محدودیت‌های عملی آشکارتر شده و فناوری کوانتومی به سمت «سراشیبی نامیدی» حرکت می‌کند. در این مرحله، کاهش انتظارات عمومی و تمرکز بیشتر بر کاربردهای محدود، مانند شبیه‌سازی‌های شیمیایی و بهینه‌سازی، از ویژگی‌های بارز این فناوری است (پیراندولا و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، پیش‌بینی می‌شود که با رفع چالش‌های کلیدی نظیر کاهش هزینه‌های ساخت و بهبود پایداری، فناوری کوانتومی در دهه آینده به مرحله «شیب روشنفکری» وارد شود. در این مرحله، کاربردهای عملی در حوزه‌هایی مانند

کوانتومی نیز تأثیرات چشمگیری دارد. در حوزه اقتصادی، این فناوری می‌تواند صنایع مختلفی نظیر بانکداری، مدیریت سرمایه‌گذاری و بیمه را متحول کند. الگوریتم‌های کوانتومی، سرعت و دقت تحلیل داده‌ها را افزایش داده و به تصمیم‌گیری بهینه کمک می‌کنند (اروس^{۳۹}، موگل و لیزاسو^{۴۰}، ۲۰۱۹). در حوزه اجتماعی نیز، فناوری کوانتومی با ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و تقویت امنیت سایبری، تأثیر بسزایی داشته است (پیراندولا^{۴۱} و همکاران، ۲۰۲۰). با این وجود، ابهام و عدم قطعیت همچنان چالشی جدی در مسیر توسعه فناوری کوانتوم است. اگرچه اصول مکانیک کوانتومی به‌خوبی شناخته شده‌اند، اما تبدیل این اصول به کاربردهای عملی، مانند کاهش خطاهای کوانتومی و افزایش پایداری سیستم‌ها، با چالش‌های بزرگی همراه است. علاوه بر این، اثرات متناقض فناوری کوانتومی بر امنیت سایبری و نبود تصویری جامع از فناوری و حوزه‌های دانشی برای هدایت پژوهش‌ها، بر پیچیدگی این حوزه افزوده است (پرسکیل^{۴۲}، ۲۰۱۸، ونر، الکوس، و هانسون، ۲۰۱۸).

از سوی دیگر فناوری کوانتومی، با وعده‌هایی مانند حل مسائل پیچیده، توسعه الگوریتم‌های سریع‌تر، و روش‌های پیشرفته رمزنگاری، در مرکز توجه جهانی قرار گرفته است که این امر منجر به شکل‌گیری انتظارات فراینده از این فناوری شده است. در این راستا منحنی هایپ گارتر، ابزار تحلیلی شناخته‌شده‌ای است که مسیر تکامل فناوری‌های نوظهور را از منظر «انتظارات از فناوری» تحلیل می‌کند. این منحنی شامل پنج مرحله

39. Orús
40. Mugel, & Lizaso
41. Pirandola
42. Preskill

43. Fenn & Raskino
44. Ezratty



پیچیده باشد (پیراندولا و همکاران، ۲۰۲۰). در حوزه اقتصادی نیز، اگرچه محاسبات کوانتومی پتانسیل بهینه‌سازی فرآیندها را داراست، اما محدودیت‌های موجود در تولید سخت‌افزارهای کوانتومی مانع از بهره‌برداری تجاری گسترده شده است (آروت و همکاران، ۲۰۱۹).

در این میان موضوعی که بر چالش‌های علمی و عملی توسعه فناوری کوانتومی افزوده است کمبود شناخت و ابهامات گسترده پیرامون فناوری کوانتومی و عدم قطعیت در توسعه برخی از شاخه‌های این فناوری است. این فناوری به دلیل ماهیت میان‌رشته‌ای خود، از فیزیک، علوم کامپیوتر، ریاضیات و حتی علوم اجتماعی تغذیه می‌کند (لد^{۴۵} و همکاران، ۲۰۱۰). این گستردگی باعث شده است که مسیرهای تحقیقاتی متعددی در این حوزه وجود داشته باشد که اغلب فاقد هماهنگی و انسجام لازم برای توسعه پایدار هستند. نبود تصویری جامع از فناوری و حوزه‌های دانشی که به‌طور جامع پژوهش‌های جاری، شکاف‌های دانشی و مسیرهای آینده را شناسایی کند، موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری و پژوهشی با عدم قطعیت مواجه شوند (روتولو و همکاران، ۲۰۱۵).

در واقع می‌توان گفت مطالعاتی که تاکنون انجام شده‌اند عمدتاً بر جنبه‌های خاصی از فناوری کوانتومی متمرکز بوده‌اند. برای مثال، برخی تحقیقات بر روی طراحی پروتکل‌های QKD و بهبود امنیت آن‌ها تمرکز داشته‌اند (اسکرانی^{۴۶} و همکاران، ۲۰۰۹)، در حالی که مطالعات دیگر به بررسی شبکه‌های ارتباطی مبتنی بر فیبر نوری یا

الگوریتم‌های بهینه‌سازی و رمزنگاری کوانتومی گسترش یافته و بستر توسعه فناوری‌های مرتبط مانند هوش مصنوعی کوانتومی فراهم خواهد شد (پرسکیل، ۲۰۱۸). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در حال حاضر فناوری کوانتومی در یک دوره گذار بین اوج انتظارات متورم و سراسیمگی ناامیدی قرار دارد.

بررسی ضرورت ترسیم تصویری جامع از فناوری و حوزه‌های دانشی فناوری کوانتومی و انتخاب ابزار مناسب

فناوری کوانتومی به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین فناوری‌های دهه اخیر، همچنان با ابهامات قابل توجهی در ابعاد مختلف علمی، عملیاتی و اجتماعی مواجه است. اگرچه اصول بنیادی این فناوری، یعنی مکانیک کوانتومی، در دهه‌های گذشته به خوبی مطالعه و درک شده‌اند، اما انتقال این دانش از سطح نظری به کاربردهای عملی و گسترده همچنان یکی از چالش‌های اساسی است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که پیچیدگی‌های ذاتی این فناوری، مانند اثرات نویزهای کوانتومی، محدودیت‌های اندازه‌گیری و پایداری کیوبیت‌ها، شناخت کامل از عملکرد سیستم‌های کوانتومی را دشوار کرده است (پیراندولا و همکاران، ۲۰۲۰؛ پرسکیل، ۲۰۱۸).

علاوه بر این، توانایی‌های بالقوه فناوری کوانتومی در حل مسائل پیچیده، خود موجب بروز ابهاماتی در مسیرهای توسعه و کاربردهای آن شده است. برای مثال، در حوزه رمزنگاری، فناوری کوانتومی می‌تواند به‌طور همزمان سیستم‌های رمزنگاری فعلی را بی‌اثر کرده و راه‌حل‌های نوینی برای امنیت اطلاعات ارائه کند. این دوگانگی موجب شده است که آینده امنیت سایبری، در مواجهه با فناوری کوانتومی، نامطمئن و

45. Ladd

46. Scarani



هستند (آراستی و مقدم، ۲۰۱۰). در واقع این روش، امکان شناسایی مسیرهای توسعه، اولویت بندی تحقیقات و تسهیل همکاری‌های میان‌رشته‌ای را فراهم می‌کند. از طریق نگاشت فناوری می‌توان ابعاد ناشناخته و پتانسیل‌های این فناوری را به صورت سیستماتیک بررسی کرد و از این طریق برنامه‌ریزی راهبردی دقیق تری برای توسعه آن ارائه داد (هتانپا^{۴۸}، ۲۰۲۵). همچنین این روش نه تنها امکان شناسایی فناوری‌ها، زیرسیستم‌ها و کاربردهای مختلف را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند به شناسایی شکاف‌های دانشی و تسهیل همکاری‌های میان‌رشته‌ای کمک کند (گوپتا، داوان و ممداپور، ۲۰۲۱). برای مثال، در پژوهشی که توسط Rotolo et al. (۲۰۲۴) انجام شده، مشخص شده است که استفاده از نگاشت فناوری می‌تواند کمک کند تا چالش‌هایی مانند محدودیت برد ارتباطات یا نیاز به حافظه‌های کوانتومی پیشرفته بهتر شناسایی و اولویت بندی شوند. همچنین این روش به سیاست‌گذاران امکان می‌دهد تا با دیدی سیستماتیک، سرمایه‌گذاری‌ها و همکاری‌های علمی را هماهنگ کرده و برنامه‌های راهبردی موثری را برای این حوزه تدوین کنند (فیگوایردو، فریرا، و آندره، ۲۰۲۴).

روش تحقیق

این مطالعه به منظور ترسیم نگاشت فناوری حوزه ارتباطات کوانتومی از روش تحقیق اکتشافی ترکیبی استفاده کرده است که شامل جمع‌آوری داده‌های اولیه و ثانویه از طریق مرور نظام مند ادبیات و تشکیل گروه کانونی می‌شود. این رویکرد ترکیبی، به ویژه برای حوزه‌های میان‌رشته‌ای مانند فناوری‌های کوانتومی، امکان بررسی عمیق‌تر

ماهواره‌های کوانتومی پرداخته‌اند (یین^{۴۷} و همکاران، ۲۰۱۷). هرچند این پژوهش‌ها نقش مهمی در پیشبرد دانش موجود داشته‌اند، اما عدم وجود یک تصویر جامع از فناوری و حوزه‌های دانشی که ارتباط بین این شاخه‌ها و شکاف‌های دانشی موجود را مشخص کند، چالشی بزرگ به شمار می‌رود.

یکی از دلایل این کمبود، ماهیت چندبعدی و میان‌رشته‌ای فناوری کوانتومی است. این فناوری، مفاهیمی از فیزیک، علوم کامپیوتر، مهندسی الکترونیک و حتی علوم اجتماعی را دربرمی‌گیرد، که همین امر باعث شده است تحقیقات در این حوزه پراکنده و فاقد هماهنگی لازم باشند (لد و همکاران، ۲۰۱۰). علاوه بر این، توسعه سریع فناوری و پیچیدگی ذاتی آن، ترسیم تصویری جامع و به‌روز را دشوار کرده است (روتولو و همکاران، ۲۰۱۵).

بنابراین، نیاز به تهیه یک تصویری جامع از فناوری و حوزه‌های دانشی که تمام جنبه‌های فناوری کوانتومی در حوزه ارتباطات، از توسعه پروتکل‌ها تا زیرساخت‌های شبکه و چالش‌های پیاده‌سازی، را شامل شود، به شدت احساس می‌شود. این تصویر نه تنها می‌تواند به شناسایی شکاف‌های دانشی موجود کمک کند، بلکه به عنوان ابزاری استراتژیک برای سیاست‌گذاران و محققان در تعیین اولویت‌های تحقیقاتی و سرمایه‌گذاری عمل کند. حال از میان روش‌های مختلفی که می‌توان برای شناسایی فناوری و ترسیم تصویر آن استفاده نمود (مانند نگرش زنجیره ارزش، فرآیندی و QFD)، روش نگاشت فناوری به دلیل توانایی در ترسیم ارتباطات پیچیده و ارائه دیدگاه‌های کلان، بهترین گزینه برای حوزه‌هایی مانند ارتباطات کوانتومی به شمار می‌رود که نیازمند شناسایی و تحلیل در سطح ملی یا بخشی

48. Hatanpää

47. Yin



بررسی جهت‌گیری کشورهای مختلف در توسعه فناوری‌های ارتباطات کوانتومی، اسناد راهبردی سایر کشورها از قبیل آمریکا، بریتانیا، اتحادیه اروپا، چین و غیره مورد بررسی دقیق قرار گرفت. با توجه به آنکه یکی از اهداف انجام مطالعات تطبیقی، کمک به تکمیل نگاشت اولیه فناوری بود، کشورهای پیشرو و دارای برنامه منسجم در توسعه فناوری کوانتومی به عنوان هدف انجام مطالعه انتخاب شدند. در این راستا سوالاتی که مطالعات تطبیقی به دنبال یافتن پاسخ آن بوده است عبارتند از: «درخت فناوری مورد استفاده در سند کدام است؟»، «در بخش اهداف و اولویت‌بندی حوزه‌های فناوریانه، کدام فناوری‌ها به عنوان اولویت اصلی برای توسعه فناوری انتخاب شده‌اند؟» و غیره؛ با توجه به نتایج حاصل از انجام مطالعات تطبیقی، نواقص موجود در نگاشت شناسایی و اصلاح گردید.

۳. انجام مصاحبه و تهیه پرسشنامه برای جمع‌آوری داده‌ها: پس از تهیه نگاشت اولیه از فناوری حوزه ارتباطات کوانتومی، ابزارهای «پرسشنامه» و «مصاحبه» به عنوان روش‌های مکمل در جمع‌آوری داده‌های جدید و صحت‌گذاری بر داده‌های قبلی به کار گرفته شد. در این راستا پرسشنامه طراحی شده با هدف اعتبارسنجی نگاشت اولیه و جمع‌آوری نظرات خبرگان در این حوزه استفاده گردید که در آن با طرح سوالاتی نظر خبرگان در مورد جامعیت فناوری‌های شناسایی شده و صحت نحوه چیدمان نگاشت فناوری‌ها احصاء گردید؛ سوالاتی نظیر «به نظر شما آیا فناوری دیگری در حوزه ارتباطات کوانتومی وجود دارد که در نگاشت اولیه جای آن خالی

مفاهیم پیچیده و شناسایی روابط میان آن‌ها را فراهم می‌کند و هدف آن تحقیق، کشف مفاهیم نوین، شناسایی الگوها و روابط بین عناصر مختلف و ایجاد پایه‌ای علمی برای سیاست‌گذاری‌های آینده و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک است (کرسول و کرزول، ۲۰۱۷ و بین و همکاران، ۲۰۱۷). بر این اساس، مراحل ذیل به منظور شناسایی و ترسیم نگاشت فناوری انجام شده است:

۱. مرور منابع علمی و ایجاد نگاشت اولیه: در این مرحله، با جستجوی عباراتی نظیر «نگاشت فناوری ارتباطات کوانتومی»، «درخت فناوری ارتباطات کوانتومی»، در پایگاه‌های داده علمی نظیر اسکوپوس^{۴۹}، ساینس دایرکت^{۵۰}، جی استور^{۵۱} نسبت به جمع‌آوری و تحلیل مقالات و کتب علمی معتبر در حوزه ارتباطات کوانتومی اقدام گردید. در این فرایند تیم انجام مطالعات موفق به شناسایی بیش از ۷۰۰ مقاله علمی معتبر و بیش از ۸۰ کتاب علمی معتبر و مرتبط با هدف این پژوهش گردید؛ در ادامه پس از دسته‌بندی و بررسی اولیه، از میان مقالات شناسایی شده، ۱۰۰ مقاله و ۲۰ جلد کتاب جهت بررسی دقیق‌تر شاخه‌های مختلف ارتباطات کوانتومی انتخاب گردید. در پایان با جمع‌بندی محتوای استخراج شده از منابع علمی، تصویری اولیه از نگاشت فناوری‌ها و کاربردهای حوزه ارتباطات کوانتومی ایجاد گردید.

۲. بکارگیری روش تحلیل تطبیقی: به منظور تکمیل نواقص موجود در نگاشت اولیه و نیز

49. Scopus

50. Science Direct

51. JSTOR



شد. داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل مصاحبه و پرسشنامه، اطلاعات ارزشمندی را در مورد فناوری‌ها و نحوه چیدمان آن‌ها ارائه داد و به‌روزرسانی نگاشت فناوری را ممکن ساخت.

۴. شکل‌دهی گروه‌های خبرگی متمرکز^{۵۲}: با توجه به نوظهور بودن فناوری کوانتومی از یک سو و تخصصی بودن حوزه‌های مختلف فناوری کوانتومی از سوی دیگر، یافتن خبرگانی که نسبت به تمامی حوزه‌های فناوری کوانتومی اشراف کاملی داشته باشد کاری بسیار سخت و دشواری می‌باشد. به ویژه آنکه عمر توسعه این فناوری در کشور به یک دهه نمی‌رسد و فعالیت‌های تحقیق و توسعه کمی در کشور

باشد؟» و «آیا محل قرار گیری فناوری‌ها در درخت اولیه صحیح می‌باشد؟»، «آیا چیدمان دیگری را می‌توان برای ترسیم نگاشت فناوری در حوزه ارتباطات تصویر نمود؟» و «وضعیت فناوری از منظر چرخه عمر در چه جایگاهی قرار دارد؟»، «وضعیت فناوری از منظر سطح آمادگی فناوری در چه مرحله قرار دارد؟»، «کشورهای مختلف کدام یک از شاخه‌های موجود در نگاشت فناوری را به عنوان اولویت توسعه انتخاب نموده‌اند و دلایل این انتخاب چیست؟». همچنین در قالب مصاحبه‌های برنامه‌ریزی شده، نظر خبرگان حوزه کوانتوم پیرامون صحت و دقت نگاشت اولیه اخذ

جدول ۱. نهادهای مشارکت‌کننده در فرایند ترسیم نگاشت فناوری حوزه ارتباطات کوانتومی

ردیف	نهادهای مشارکت‌کننده
۱	وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات
۲	وزارت دفاع
۳	سازمان انرژی اتمی
۴	سپاه پاسداران انقلاب اسلامی
۵	دانشگاه شریف
۶	دانشگاه تهران
۷	دانشگاه امیرکبیر
۸	دانشگاه علم و صنعت
۹	دانشگاه شهید بهشتی
۱۰	دانشگاه امام حسین (ع)
۱۱	دانشگاه امام علی (ع)
۱۲	دانشگاه عالی دفاع ملی
۱۳	سایر نهادها

52. Focus Group



نتایج تحقیق

شیوه‌نامه‌های توزیع کلید کوانتومی آن دسته از شیوه‌نامه‌های تبادل داده کوانتومی را توصیف می‌کنند که در آن، افراد حاضر در ارتباط یک رشته کلید دودویی را بین خود به اشتراک می‌گذارند. در حقیقت در این نوع از ارتباط، صرفاً یک کلید به اشتراک گذاشته شده و در ادامه با استفاده از یک شیوه‌نامه ی کلاسیک دیگر، امنیت ارتباط ارتقاء می‌یابد (غلابی، ۲۰۱۹؛ ژنگ، چانگ، یان، و ژانگ، ۲۰۲۰). شیوه‌نامه‌های توزیع کلید کوانتومی خود به سه دسته ی شیوه‌نامه‌های توزیع کلید کوانتومی با استفاده از متغیر گسسته^۴، متغیر پیوسته^{۵۵}، مرجع فاز توزیع شده^{۵۶} و نیمه کوانتومی دسته‌بندی می‌شوند. شیوه‌نامه‌های مبتنی بر استفاده از متغیر گسسته آن دسته از شیوه‌نامه‌هایی هستند که معمولاً از کمیت‌های گسسته فیزیکی برای کدگذاری و کدگشایی داده‌ها استفاده می‌کنند (امر، گارگ، و کراوک، ۲۰۲۲؛ ما، بائو، لی، و چو، ۲۰۱۶). خود این دسته از شیوه‌نامه‌ها، به دو دسته مبتنی بر استفاده از تک فوتون و زوج فوتون‌های درهم تنیده و نیز نسخه‌های ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شود که در درخت فناوری فوق به بعضی از مصادیق آن اشاره شده است. متغیرهای پیوسته نیز همچنان که از نام آن پیداست، کدگذاری و کدگشایی را بر روی متغیرهای پیوسته ی فیزیکی مانند دامنه و فاز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پیاده‌سازی می‌کنند (مین‌هاس، ۲۰۲۴؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). سایر شیوه‌نامه‌هایی که در درخت فناوری به آن‌ها اشاره شده است، ترکیبی از موارد فوق می‌باشند و یا اینکه بخشی از آن‌ها به صورت کلاسیک پیاده‌سازی می‌شود که در این صورت به این دسته از شیوه‌نامه‌ها، شیوه‌نامه‌های نیمه کوانتومی گفته می‌شود (باریرو، کراوچ، ماتئوس، پاونکوویچ، و

مطابق با نتایج حاصل از انجام مطالعات کارشناسی و اخذ نظرات خبرگان می‌توان گفت (مطابق با روش تحقیق تشریح شده) نگاشت فناوری حوزه ی ارتباطات کوانتومی را می‌توان از دو بعد مورد بررسی قرار داد و ترسیم نمود. بعد اول، «شیوه‌نامه‌های (پروتکل‌های) ارتباط کوانتومی» است که در حقیقت الگوریتم‌های نظری است که بر مبنای آن‌ها سازوکار تبادل داده بین فرستنده و گیرنده یا گروهی از آن‌ها تنظیم می‌شود. بعد دوم، ناظر بر «ابعاد عملی‌تر پیاده‌سازی یک شیوه‌نامه ی ارتباطات کوانتومی» نظیر نوع شبکه‌ی ارتباطاتی، بستر پیاده‌سازی ارتباط و مسائل مربوطه است (مک کنزی و همکاران، ۲۰۲۴؛ استیلینسکی و پاتر، ۲۰۲۴). در ادامه نتایج حاصل از نگاشت فناوری در هر دو بعد ارائه می‌گردد.

نگاشت فناوری شیوه‌نامه‌های (پروتکل‌های) ارتباطات کوانتومی

مطابق با روش تحقیق تشریح شده، نگاشت مربوط به بعد اول یعنی حوزه ی شیوه‌نامه‌های (پروتکل‌های) ارتباطات کوانتومی در شکل ۱ آورده شده است.

بر این اساس مجموعه شیوه‌نامه‌های ارتباطات کوانتومی را می‌توان به پنج حوزه کلی دسته‌بندی کرد. شیوه‌نامه‌های توزیع کلید کوانتومی، شیوه‌نامه‌های ارتباطات مستقیم کوانتومی، شیوه‌نامه‌های اصالت سنجی کوانتومی، شیوه‌نامه‌های هماهنگ سازی کوانتومی و نهایتاً شیوه‌نامه‌های رایانش توزیع شده کوانتومی (ژائو، شی، و روان، ۲۰۲۱؛ ی-اچ، ژو، کین، شی، و یانگ، ۲۰۲۲).

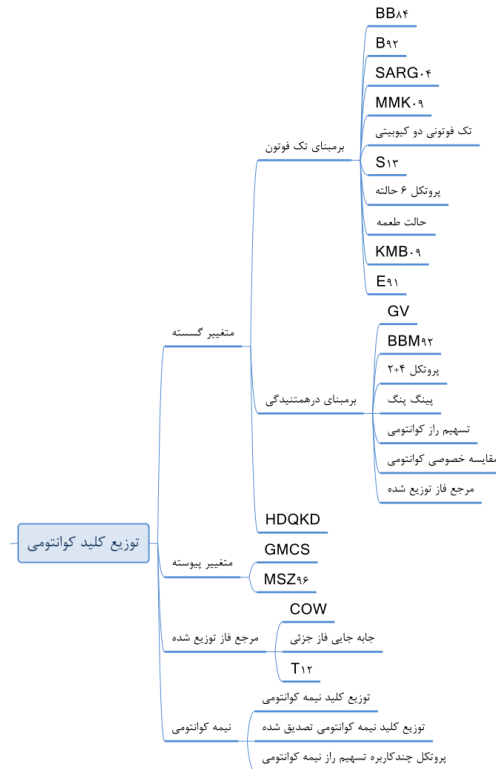
نگاشت فناوری شیوه‌نامه‌های توزیع کلید کوانتومی^{۵۴}

54. Discrete Variable (DV)

55. Continuous Variable (CV)

56. Distributed Phase Reference (DPR)

53. Quantum Key Distribution



شکل ۲. نکاشت فناوری شیوه‌نامه‌های توزیع کلید کوانتومی

سوتو، ۲۰۲۲؛ آجی کومار و گرھوال، (۲۰۲۱).

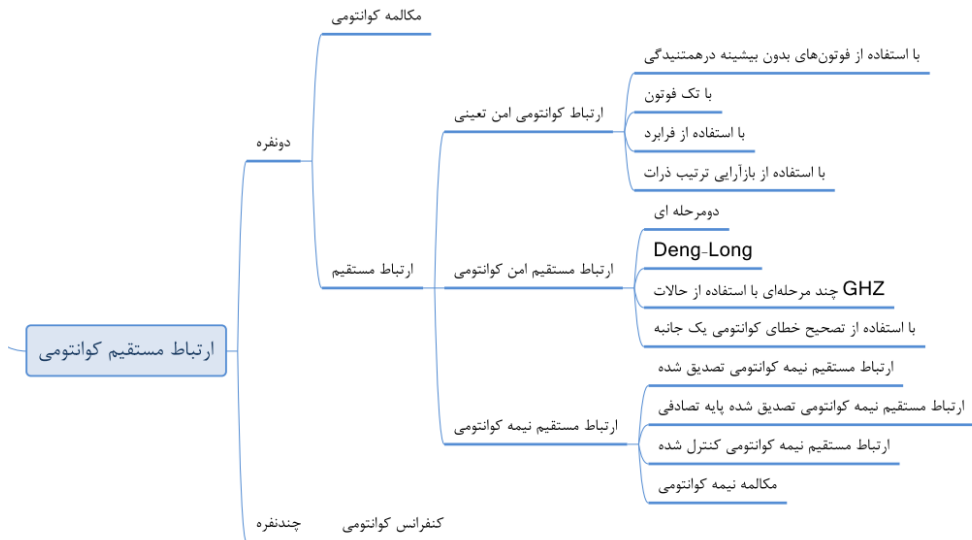
نکاشت فناوری شیوه‌نامه‌های ارتباط مستقیم کوانتومی^{۵۷}

شیوه‌نامه‌های ارتباط مستقیم کوانتومی آن دسته از شیوه‌نامه‌ها هستند که در صورت پیاده‌سازی امکان تبادل اطلاعات امن را به کاربران می‌دهند و نیازی به رمزنگاری اضافه در این دسته از شیوه‌نامه‌ها

نیست و امنیت آن‌ها به واسطه قوانین بنیادین مکانیک کوانتومی تضمین می‌شود. این ویژگی به آن‌ها قابلیت منحصر به فردی برای کاربردهای حساس می‌دهد (هوانگ، رونگ، زو، و او^{۵۸}، ۲۰۲۱، ی. ه. ژو^{۵۹} و همکاران، ۲۰۲۲). این شیوه‌نامه‌ها خود به دو دسته دو نفره و چند نفره دسته‌بندی می‌شوند (شوکل، تاپلیال، و پاتاک، ۲۰۱۷؛ آر. جی. ژو و ژانگ، ۲۰۲۱). همچنین این شیوه‌نامه به دو

58. Huang, Rong, Zou, & He
59. Y.-H. Zhou

57. Direct Quantum Communication Protocols



شکل ۳. نگاشت فناوری شیوه‌نامه‌های ارتباط مستقیم کوانتومی

در درخت فناوری شیوه‌نامه‌های ارتباطات کوانتومی آورده شده است.

نگاشت فناوری شیوه‌نامه‌های اصالت سنجی کوانتومی^{۶۳}

شیوه‌نامه‌های اصالت‌سنجی کوانتومی به مجموعه‌ای از پروتکل‌ها اشاره دارند که هدف آن‌ها اطمینان از ارتباط امن میان طرفین مشروع و واجد صلاحیت است. این شیوه‌نامه‌ها تضمین می‌کنند که طرفین ارتباط نه تنها اطلاعات را با اطمینان مبادله می‌کنند، بلکه از هویت صحیح مخاطبان خود نیز مطمئن هستند. چنین پروتکل‌هایی در بسیاری از کاربردهای عملی نظیر امنیت اطلاعات، ارتباطات حساس و تبادلات الکترونیکی استفاده می‌شوند (میشرا و پاتاک، ۲۰۲۳؛ ی، ژو، لو، نایاک، و چن،

نوع مکالمه کوانتومی و ارتباط مستقیم کوانتومی تقسیم می‌شوند که مورد آخر خود به سه دسته ی ارتباط کوانتومی امن تعیینی^{۶۰}، ارتباط کوانتومی مستقیم امن^{۶۱} و ارتباط مستقیم نیمه کوانتومی^{۶۲} تقسیم‌بندی می‌شوند (السایدی، ۲۰۲۰؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۲۱). ارتباط کوانتومی امن تعیینی از روش‌هایی استفاده می‌کند که در آن اطلاعات بدون نیاز به رمزنگاری ثانویه مستقیماً منتقل می‌شود. در ارتباط مستقیم نیمه کوانتومی، برخی از عملیات‌ها به صورت کلاسیک انجام می‌شود، که این موضوع استفاده از آن را در شبکه‌هایی با تجهیزات محدودتر تسهیل می‌کند (ال-سی. ژو، چن ژو و گونگ، ۲۰۲۰؛ آر.جی. ژو و ژانگ، ۲۰۲۱). انواع شیوه‌نامه‌های مطرح در هر یک از موارد گفته شده

60. Deterministic Secure Quantum Communication

61. Secure Direct Quantum Communication

62. Semi-Quantum Direct

63. Quantum Authentication Protocols



شکل ۴. نگاهت فناوری شیوه‌نامه اصالت‌سنجی کوانتومی

دلیل استفاده از خواص مکانیک کوانتومی، مقاومت بالایی در برابر حملات دارند و برای کاربردهای حساس نظیر قراردادهای الکترونیکی مناسب‌اند (ی. زو، لی، وانگ و ژو، ۲۰۲۱؛ آر.جی. ژو و ژانگ، ۲۰۲۱). در انتخابات برخط کوانتومی^{۶۵}، امکان رأی‌گیری امن و ناشناس فراهم می‌شود. این روش‌ها با استفاده از حالات کوانتومی برای رمزگذاری اطلاعات رأی‌ها، حریم خصوصی و امنیت کامل را تضمین می‌کنند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این پروتکل‌ها می‌توانند در سیستم‌های رأی‌گیری جهانی کاربردی باشند (مشرا و پاتاک، ۲۰۲۳).

مزایده کوانتومی^{۶۶} رویکردی جدید برای اجرای مزایده‌های آنلاین است که در آن اطلاعات مربوط

این شیوه‌نامه‌ها را می‌توان به شش دسته کلی تقسیم کرد: احراز هویت کوانتومی کاربر، احراز هویت کوانتومی پیام، امضای دیجیتال کوانتومی، برگزاری انتخابات سراسری برخط کوانتومی، مزایده کوانتومی و احراز هویت نیمه کوانتومی. در احراز هویت کوانتومی کاربر، هدف اطمینان از هویت واقعی کاربران در سیستم‌های توزیع‌شده است، در حالی که احراز هویت کوانتومی پیام بر صحت و درستی پیام‌های مبادله شده تمرکز دارد (شوگلا و همکاران، ۲۰۱۷).

امضای دیجیتال کوانتومی^{۶۴} یکی از فناوری‌های پیشرفته در این دسته است که امکان تأیید اصالت پیام‌ها را با امنیت بالا فراهم می‌کند. این فناوری‌ها به

65. Quantum Voting Protocols

66. Quantum Auction Protocols

64. Quantum Digital Signatures



فوتون‌های درهم‌تنیده برای انتقال دقیق زمان میان ایستگاه‌های مختلف استفاده می‌کنند و باعث بهبود عملکرد سامانه‌هایی مانند GPS و سیستم‌های ناوبری دیگر می‌شوند (هالدار و همکاران، ۲۰۲۳؛ شن و همکاران، ۲۰۱۲).

هماهنگی سامانه‌های تلسکوپی یکی دیگر از حوزه‌های کلیدی این شیوه‌نامه‌ها است. در پروژه‌هایی که از تلسکوپ‌های رادیویی توزیع شده برای مشاهدات هم‌زمان استفاده می‌کنند، هم‌زمان‌سازی دقیق اطلاعات نوری یا سیگنال‌های دریافت شده، یک پیش‌نیاز حیاتی محسوب می‌شود. این فرآیند با کمک پروتکل‌های کوانتومی و استفاده از حالات درهم‌تنیده انجام می‌شود و دقت فوق‌العاده‌ای را فراهم می‌آورد (دشهنس^{۶۹} و همکاران، ۲۰۱۶ و کنگ و همکاران، ۲۰۱۸).

در نهایت، شیوه‌نامه‌های تایید موقعیت کوانتومی به کاربران اجازه می‌دهند تا موقعیت‌های جغرافیایی دقیق را با امنیت بالا تایید کنند. این پروتکل‌ها در کاربردهایی نظیر نظامی، مدیریت بحران و تحقیقاتی که به دقت بالا نیاز دارند، استفاده می‌شوند. برای مثال، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که این شیوه‌نامه‌ها می‌توانند دقت موقعیت‌یابی را به مراتب بیشتر از سیستم‌های سنتی ارتقا دهند (کالتن باک^{۷۰} و همکاران، ۲۰۲۱ و پیکاریلو^{۷۱} و همکاران، ۲۰۲۴).

نگاشت فناوری پیاده‌سازی ارتباطات کوانتومی

ارتباطات کوانتومی در مقام پیاده‌سازی به دو دسته اصلی ارتباطات دو نقطه‌ای کوانتومی و شبکه‌های کوانتومی تقسیم می‌شوند. ارتباطات کوانتومی دو نقطه‌ای، روشی پایه‌ای برای انتقال اطلاعات کوانتومی

به پیشنهادها به صورت رمزگذاری شده و ناشناس مبادله می‌شوند. این روش‌ها با استفاده از امضای دیجیتال کوانتومی و دیگر پروتکل‌های امنیتی، حریم خصوصی کاربران و امنیت فرآیند مزایده را تضمین می‌کنند (رانگ، کیو، مائوس و زو، ۲۰۲۱).

در نهایت، احراز هویت نیمه‌کوانتومی^{۶۷}، ترکیبی از روش‌های کوانتومی و کلاسیک است که برای سیستم‌هایی طراحی شده‌اند که تمام کاربران به تجهیزات پیشرفته کوانتومی دسترسی ندارند. این پروتکل‌ها انعطاف‌پذیری بالایی دارند و در مواردی که دسترسی به فناوری‌های پیشرفته محدود است، مفید هستند (باریرو و همکاران، ۲۰۲۲؛ آجی کومار و گرهوال، ۲۰۲۱).

نگاشت فناوری شیوه‌نامه‌های هماهنگ‌سازی کوانتومی^{۷۸}

شیوه‌نامه‌های هماهنگ‌سازی کوانتومی، به‌منظور هم‌زمان‌سازی دقیق در سیستم‌های پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شیوه‌نامه‌ها برای کاربردهای حساس نظیر هم‌زمان‌سازی ساعت‌های اتمی در سیستم‌های توزیع شده، هماهنگی سامانه‌های تلسکوپی و تایید موقعیت‌های دقیق طراحی شده‌اند. این شیوه‌نامه‌ها نقش کلیدی در بهبود عملکرد سیستم‌های مخابراتی، شبکه‌های سنسوری و ناوبری ایفا می‌کنند (دای و همکاران، ۲۰۲۰؛ ونر و همکاران، ۲۰۱۸).

یکی از مهم‌ترین کاربردهای این شیوه‌نامه‌ها، هم‌زمان‌سازی ساعت‌های اتمی است که برای دستیابی به دقت زمانی در حد نانو ثانیه یا حتی پیکوثانیه طراحی شده‌اند. این پروتکل‌ها از

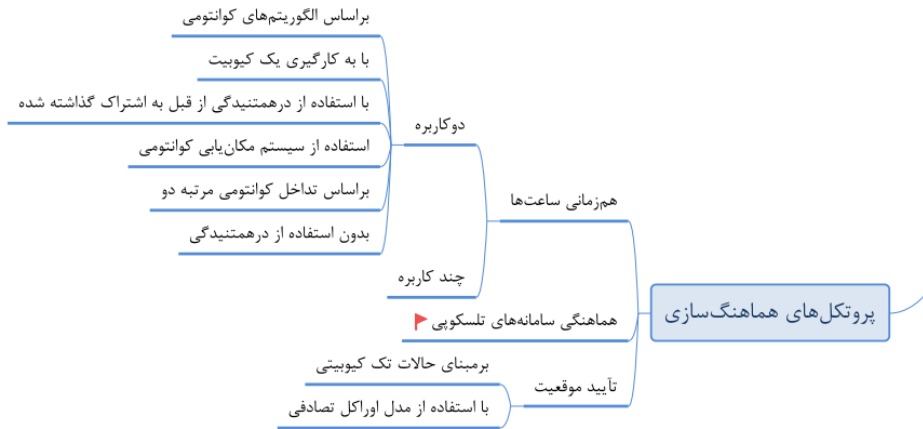
69. Deschênes

70. Kaltenbaek

71. Picciariello

67. Semi-Quantum Authentication Protocols

68. Quantum Synchronization Protocols



شکل ۵. نگاشت فناوری شیوه‌نامه‌های هماهنگ‌سازی کوانتومی

اتلاف فوتون‌ها در فیبرهای نوری را کاهش می‌دهند و امکان برقراری شبکه‌های جهانی کوانتومی را فراهم می‌کنند (آدارش کومار، د ژسوس پاچکو، کاوشیک، و رودریگز، ۲۰۲۲؛ رضوی، تامپسون، فرمانبر، پیانی، و لوتکنهاوس، ۲۰۰۹).

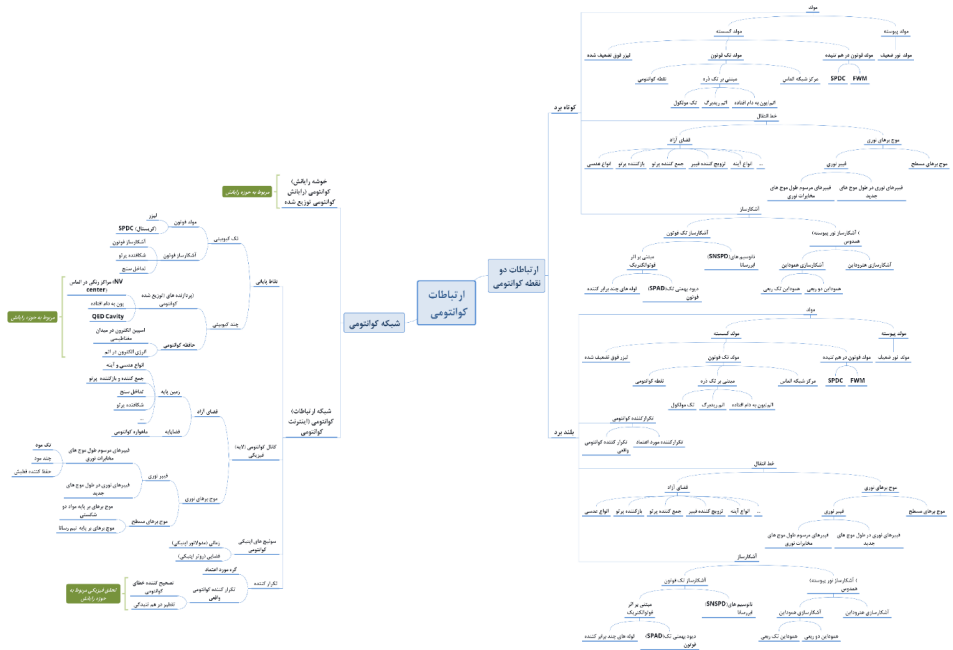
نگاشت فناوری ارتباطات کوانتومی، به عنوان ابزاری جامع، این دسته‌بندی‌ها را به‌خوبی نمایش می‌دهد و انواع مختلف این روش‌ها و فناوری‌های زیرساختی مرتبط با آن‌ها را مشخص می‌کند. شبکه‌های کوانتومی، برخلاف ارتباطات دو نقطه‌ای، شامل ارتباطات چندگانه و توزیع شده در میان گره‌های مختلف هستند. این شبکه‌ها ساختار پیچیده‌تری داشته‌اند و از تکرارکننده‌های کوانتومی برای اطمینان از اتصال پایدار استفاده می‌کنند (ون لوک و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژانگ، لای، پیپرزیک، و پان، ۲۰۲۲).

ارتباط کوانتومی بین دو نقطه‌ی کوتاه‌برد، برای تحقق نیاز به سه جزء اصلی دارد: مولد حامل اطلاعات کوانتومی، خط انتقال کوانتومی و آشکارساز

بین دو موقعیت جغرافیایی است. این روش‌ها خود به دو نوع کوتاه‌برد و بلندبرد تقسیم می‌شوند که تفاوت اصلی آن‌ها در وجود یا عدم وجود تکرارکننده‌های کوانتومی^{۷۲} است. این تکرارکننده‌ها امکان افزایش فاصله ارتباطات را بدون افت کیفیت فراهم می‌کنند (دای و همکاران، ۲۰۲۰؛ کمین، شوکین، اشمیت، و ون لوک، ۲۰۲۳).

ارتباطات کوتاه‌برد کوانتومی معمولاً برای فواصل درون‌شهری یا مسافت‌های کمتر از یک کیلومتر استفاده می‌شود. این روش‌ها به دلیل کاهش نویز و اتلاف، مناسب ارتباطات بسیار ایمن در سیستم‌های حساس نظیر بانکداری یا ارتباطات دولتی هستند (مارتین و همکاران، ۲۰۲۱). در مقابل، ارتباطات بلندبرد کوانتومی با استفاده از تکرارکننده‌های کوانتومی، برای فواصل طولانی‌تر، نظیر ارتباطات بین شهری یا ارتباطات ماهواره‌ای، کاربرد دارند. این روش‌ها به طور قابل توجهی محدودیت‌های ناشی از

72. Quantum Repeaters



شکل ۶. نگاهت فناوری روش‌های پیاده‌سازی ارتباطات کوانتومی

تضعیف یک پالس اپتیکی تولید می‌کنند. مولدهای گسسته‌ای مستقیم به دو دسته تقسیم می‌شوند: مولدهایی که با استفاده از فرآیند پایین تبدیل پارامتری خودبخودی دو تک فوتون را که با هم درهم‌تنیدگی دارند، تولید می‌کنند، و مولدهایی که با استفاده از نقاط کوانتومی، الماس یا تم‌ها تک فوتون را به‌صورت مستقیم تولید می‌کنند (کویات، و همکاران، ۱۹۹۵؛ سنلارت، سولومون، و آیت، ۲۰۱۷).

خط انتقال کوانتومی، که بعضاً به آن بستر ارتباط نیز گفته می‌شود، به دو نوع موج‌برهای نوری و هوای آزاد دسته‌بندی می‌شود. موج‌برهای نوری، محیط‌های الکترومغناطیسی هستند که امکان

حامل اطلاعات کوانتومی. مولدهای حامل اطلاعات کوانتومی به دو نوع گسسته و پیوسته تقسیم‌بندی می‌شوند. مولدهای گسسته، مولدهایی هستند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم تک فوتون تولید می‌کنند. در مقابل، مولدهای پیوسته، مولدهای پالس‌های اپتیکی بسیار کم‌توانی هستند که برای کدگذاری و انتقال اطلاعات در سیستم‌های ارتباطی کوتاه‌برد به کار می‌روند (ایسامان، فن، میگدال و پولیاکوف، ۲۰۱۱). یک مولد گسسته زمانی به‌صورت مستقیم تک فوتون تولید می‌کند که به ازای یک ورودی مشخص، در خروجی خود دقیقاً یک تک فوتون را به‌صورت کنترل‌شده تولید کند. در مقابل، نوع غیرمستقیم این مولدها تک فوتون را از طریق



در حفاصل بین فرستنده و گیرنده خوانده و آن را برای ارسال به گیرنده تکرار می‌کنند. به همین دلیل، این گره‌های واسط باید خود امن باشند (آزوما، تاماکی، و لو، ۲۰۱۵؛ سانگوار، سایمون، دی ریدماتن، و گیسین، ۲۰۱۱). در مقابل، تکرارکننده‌های غیرقابل اعتماد، انواع پیچیده‌تری از تکرارکننده‌ها هستند. این نوع تکرارکننده‌ها قادرند با انجام عملیات اندازه‌گیری بل و صرف چند جفت درهم‌تنیده، جفت‌های درهم‌تنیده را در فواصل دورتر آماده کنند. در این حالت، با به اشتراک گذاری این جفت‌ها بین فرستنده و گیرنده‌ی اصلی، نیازی نیست گره‌ی تکرارکننده لزوماً امن باشد (بریگل، دور، سیراک و زولر، ۱۹۹۸).

آنچه شبکه‌های ارتباطات کوانتومی را از ارتباطات دو نقطه‌ای متمایز می‌کند، وجود سوئیچ‌های اپتیکی است. سوئیچ‌های اپتیکی خود به دو نوع زمانی، که همان مدولاتورهای اپتیکی هستند، و مکانی، که روترهای اپتیکی هستند، تقسیم‌بندی می‌شوند. سوئیچ‌های زمانی برای مدیریت زمان‌بندی داده‌ها و سوئیچ‌های مکانی برای مدیریت مسیرهای مختلف اطلاعات کوانتومی به کار می‌روند (وهنر و همکاران، ۲۰۱۸).

شبکه‌های پیشرفته‌تر کوانتومی علاوه بر جابه‌جایی فوتون‌ها بین گره‌های مختلف، پردازش داده‌ها را نیز امکان‌پذیر می‌کنند. چنین شبکه‌هایی که به حافظه‌های کوانتومی مجهزند، علاوه بر تجهیزات رایج مانند تکرارکننده‌ها، به کامپیوترهای کوانتومی نیز نیاز دارند و از شیوه‌نامه‌های مخصوصی مبتنی بر روش‌های محاسبات کوانتومی بهره می‌برند (لووفسکی، سندرز و تیتل، ۲۰۰۹؛ سیمون و همکاران، ۲۰۱۰).

تحلیل نتایج

عبور نور با تضعیف بسیار پایین را فراهم می‌کنند. فیبرهای نوری و موج‌برهای سطحی نمونه‌هایی از این فناوری هستند که برای ارتباطات کوتاه‌برد با کمترین میزان اتلاف مناسب‌اند. انتشار نور در فضای آزاد نیز به‌عنوان یکی دیگر از بسترهای جابه‌جایی حامل کوانتومی اطلاعات، به‌ویژه در کاربردهای خاص نظیر ارتباطات ماهواره‌ای استفاده می‌شود (اورسین و همکاران، ۲۰۰۷؛ یین و همکاران، ۲۰۱۷).

آشکارسازهای کوانتومی نیز به‌دو دسته‌ی آشکارسازهای حامل گسسته و حامل پیوسته تقسیم‌بندی می‌شوند. آشکارسازهای حامل گسسته تجهیزاتاتی هستند که می‌توان با استفاده از آن‌ها تک فوتون را آشکارسازی کرد. این نوع آشکارسازها به‌دو نوع مبتنی بر اثر فوتوالکتریک و مبتنی بر ابررسانایی تقسیم می‌شوند. آشکارسازهای تک فوتون فوتوالکتریک شامل فوتولوله‌های چندبرابرکننده و دیودهای بهمنی تک فوتونی هستند. آشکارسازهای پیوسته نیز به دو نوع هم‌آمیز و دگرآمیز دسته‌بندی می‌شوند و دارای فناوری پیاده‌سازی مشابهی هستند که امکان تشخیص تغییرات کوچک در دامنه یا فاز نور را فراهم می‌آورند (هدفیلد، ۲۰۰۹؛ لیتا، میلر، و نام، ۲۰۰۸).

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تنها تفاوت در ارتباط کوانتومی بین دو نقطه‌ی بلندبرد و کوتاه‌برد وجود عنصری به نام تکرارکننده در ارتباطات بلندبرد است. تکرارکننده‌ها خود به دو دسته‌ی مورد اعتماد و غیرقابل اعتماد تقسیم‌بندی می‌شوند. منظور از تکرارکننده‌های مورد اعتماد، تکرارکننده‌هایی هستند که فناوری‌ای متمایز از آنچه در یک گیرنده‌ی کوانتومی وجود دارد، در اختیار ندارند. این تکرارکننده‌ها صرفاً نقش واسطی را ایفا می‌کنند که به دلیل محدودیت‌های فیزیکی موجود، اطلاعاتی را



حل چالش‌های فناوری‌ها و اقتصاد است که در ساختار نگاشت به‌وضوح دیده می‌شوند در این راستا برای تحلیل فناوری‌های این حوزه از منظر چرخه عمر فناوری، ضروری است که هر مرحله از این چرخه با تمرکز بر ساختار درخت‌های فناوری مورد بررسی قرار گیرد. این تحلیل یک دیدگاه کلان و جامع‌نگر را به مخاطب ارائه می‌دهد که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود.

تحلیل «مرحله تحقیق و توسعه»

مرحله تحقیق و توسعه، زیربنای تمامی پیشرفت‌ها و نوآوری‌های بعدی در فناوری‌های کوانتومی را تشکیل می‌دهد. بررسی نگاشت فناوری نشان می‌دهد که در این مرحله، تلاش‌های گسترده‌ای برای توسعه مؤلفه‌های پایه‌ای و مفاهیم بنیادین صورت گرفته است. در این نگاشت، گره‌های مرتبط با تحقیقاتی مانند درهم‌تنیدگی کوانتومی، تولید فوتون‌های منفرد، و روش‌های تقویت انتقال داده‌های کوانتومی به‌وضوح برجسته هستند (لوگوسکی و همکاران، ۲۰۲۳). در این مرحله، محققان عمدتاً به توسعه و بهینه‌سازی ابزارهایی می‌پردازند که توانایی ایجاد و مدیریت اطلاعات کوانتومی را دارند. برای مثال، طراحی و توسعه حافظه‌های کوانتومی و منابع فوتون‌های درهم‌تنیده از جمله فعالیت‌های اساسی است که در تحقیقات اولیه این حوزه شکل گرفته‌اند. این ابزارها به‌طور مستقیم در پروژه‌های امنیت اطلاعات مبتنی بر توزیع کلید کوانتومی (QKD) استفاده می‌شوند (لوگوسکی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، بررسی ساختار نگاشت فناوری نشان می‌دهد که برخی فناوری‌های نوظهور مانند ارتباطات مبتنی بر ماهواره‌های کوانتومی، در مرحله تحقیق و توسعه تمرکز ویژه‌ای داشته‌اند. پروژه‌هایی مانند شبکه ماهواره‌ای کوانتومی Mozi که توسط

می‌توان گفت توسعه فناوری کوانتوم به عنوان یک فناوری نوپا در عرصه جهانی رانمی‌توان تنها به دست مکانیزم‌های بازار آزاد سپرد و دولت‌ها می‌بایست با برنامه‌ریزی مناسب، به مداخله هدفمند در توسعه فناوری بپردازند (ناصر باقری مقدم، ۱۳۹۷). این مداخله هدفمند در گام نخست نیازمند شناسایی فناوری و کاربردهای آن می‌باشد که در بخش قبل نگاشت آن ارائه گردید؛ اما در گام بعد با هدف حکمرانی صحیح فرایند توسعه این فناوری نیاز است فناوری‌های موجود در نگاشت، از منظر مدیریت و سیاست‌گذاری فناوری مورد بررسی قرار گرفته تا وضعیت آن بر اساس معیارهای مختلف من جمله چرخه عمر فناوری و سطح آمادگی فناوری مورد تحلیل قرار گیرد تا شناختی جامع نسبت به وضعیت توسعه فناوری در شاخه‌های مختلف بدست آید. در ادامه بر اساس نتایج حاصل از فرایند تشریح شده در بخش روش تحقیق این فناوری از ابعاد مختلف مرود بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل نگاشت حوزه ارتباطات از منظر چرخه عمر فناوری^۳

نگاشت فناوری در حوزه ارتباطات کوانتومی، تصویر جامعی از اجزا، مسیرها و روندهای پیشرفت این فناوری‌ها ارائه می‌کند. بررسی فناوری کوانتومی ارتباطات از منظر چرخه عمر فناوری، نشان می‌دهد که این فناوری هنوز در مراحل اولیه رشد قرار دارد و مسیر طولانی برای بلوغ کامل پیش رو دارد. نگاشت فناوری تهیه شده، تصویری جامع از روند پیشرفت این فناوری‌ها ارائه می‌دهند و نشان‌دهنده تمرکز بر توسعه ابزارهای پایه‌ای، گسترش شبکه‌ها، و مقیاس‌پذیری هستند. با این حال، موفقیت در بهره‌برداری از پتانسیل کامل این فناوری، نیازمند

73. Technology Life Cycle (TLC)



اکنون در سطح ملی و بین‌المللی توسعه یافته‌اند (داس، پالسی، کیم، و پانده، ۲۰۲۴).

یکی از شاخص‌ترین شاخه‌های درخت فناوری، پروژه‌های مرتبط با اینترنت کوانتومی است. اینترنت کوانتومی با استفاده از شبکه‌های کوانتومی توزیع شده و گره‌های پردازش کوانتومی، هدف اتصال زیرساخت‌های موجود به یک بستر امن‌تر و سریع‌تر را دنبال می‌کند. تلاش‌هایی که توسط شرکت‌های بزرگی مانند IBM و Google در این زمینه انجام شده، گویای رشد سریع فناوری در این مرحله است (داس و همکاران، ۲۰۲۴).

تحلیل «مرحله بلوغ»

نگاشت فناوری نشان می‌دهد که فناوری کوانتومی ارتباطات هنوز به مرحله بلوغ کامل نرسیده است، اما مسیرهای احتمالی این مرحله در ساختار درخت‌ها مشخص شده‌اند. در آینده، فناوری‌هایی مانند اینترنت کوانتومی به زیرساختی حیاتی تبدیل خواهند شد و نقش کلیدی در اقتصاد دیجیتال جهانی ایفا خواهند کرد. با این حال، برخی گره‌ها نشان‌دهنده چالش‌هایی مانند پایداری بلندمدت فناوری و ظهور فناوری‌های جایگزین هستند. برای مثال، رمزنگاری پساکوانتومی که بر الگوریتم‌های مقاوم در برابر محاسبات کوانتومی تکیه دارد، می‌تواند در آینده به رقیب فناوری‌های فعلی تبدیل شود (ابوغانم، ۲۰۲۴).

تحلیل نگاشت حوزه ارتباطات از منظر سطح آمادگی فناوری^{۷۴}

فناوری کوانتومی به‌عنوان یکی از پیشروترین حوزه‌های نوآوری در عصر جدید، شامل مجموعه‌ای

چین راه‌اندازی شده، نمونه‌ای از این تلاش‌هاست. این پروژه با هدف تقویت انتقال امن داده‌ها در مقیاس‌های جهانی، به‌عنوان یک پیشگام در این حوزه شناخته می‌شود (ممون، آل احمد و پچت، ۲۰۲۴).

تحلیل «مرحله معرفی به بازار و توسعه کاربردها»

مرحله معرفی به بازار یکی از حساس‌ترین مراحل در چرخه عمر فناوری است که در آن فناوری‌ها از آزمایشگاه به دنیای واقعی انتقال داده می‌شوند. تحلیل نگاشت فناوری نشان می‌دهد که در این مرحله، برخی از فناوری‌های ارتباطات کوانتومی به بهره‌برداری عملی رسیده‌اند. گره‌های مرتبط با پروتکل‌های QKD، مانند پروتکل BB84 و پیاده‌سازی آن در شبکه‌های فیبر نوری، نمونه‌های برجسته‌ای از این پیشرفت هستند (سینگ و همکاران، ۲۰۲۴). به‌عنوان مثال، شبکه کوانتومی پکن-شانگهای که در چین توسعه یافته، نشان‌دهنده گذار از مرحله تحقیق به مرحله کاربردی است. این شبکه که نگاشت فناوری آن را به‌عنوان یکی از شاخه‌های کلیدی نشان داده است، امکان برقراری ارتباط امن بین شهرهای بزرگ را فراهم کرده و از فناوری QKD برای رمزنگاری استفاده می‌کند (شولتن و همکاران، ۲۰۲۴).

تحلیل «مرحله رشد» (گسترش شبکه‌ها و توسعه بازار)

مرحله رشد، دوره‌ای است که فناوری‌ها از بازارهای محدود به کاربردهای گسترده‌تر توسعه می‌یابند. درخت‌های فناوری تحلیل شده نشان می‌دهند که در این مرحله، تمرکز بر گسترش شبکه‌های کوانتومی و مقیاس‌پذیری فناوری است. شبکه‌های ارتباطی کوانتومی که ابتدا در مقیاس محلی راه‌اندازی شدند،

74. Technology Readiness Level (TRL)



نظیر BB۸۴ و E۹۱ توسعه یافته‌اند. این فناوری‌ها از فاز آزمایشگاهی وارد محیط‌های کنترل شده شده‌اند و آزمون‌های اولیه موفقیت‌آمیزی را تجربه کرده‌اند. باین حال، نیاز به بهبودهایی در حوزه استقامت در برابر نویزهای محیطی و افزایش بازدهی در مسافت‌های طولانی همچنان وجود دارد (چاندراسکارا و همکاران، ۲۰۱۷).

تحلیل سطوح بالای توسعه - پیاده‌سازی و تجاری‌سازی (TRL ۱-۷)

برخی از فناوری‌های کوانتومی، به‌ویژه در حوزه ارتباطات نقطه‌به‌نقطه، به مراحل بالای TRL رسیده‌اند. سیستم‌های عملیاتی QKD که در شبکه‌های مخابراتی استاندارد ادغام شده‌اند، نمونه‌ای از این فناوری‌ها هستند که در محیط‌های واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کاربردها در حوزه‌هایی مانند بانکداری و امنیت نظامی تأثیرات قابل توجهی داشته‌اند. به‌عنوان مثال، پروژه‌هایی نظیر شبکه کوانتومی پکن-شانگهای در چین و آزمایش‌های ارتباط کوانتومی بین ماهواره و ایستگاه‌های زمینی نشان‌دهنده موفقیت در این مرحله هستند (ارهارد و همکاران، ۲۰۲۱).

تحلیل نداشت حوزه ارتباطات از منظر تمرکز کشورهای پیشرو

فناوری کوانتومی در حوزه ارتباطات، به‌عنوان یکی از حوزه‌های استراتژیک و رقابتی در سطح بین‌المللی، به‌طور گسترده‌ای توسط کشورهای پیشرو در علم و فناوری مورد توجه قرار گرفته است. نداشت فناوری، نمای جامعی از تمرکز فناوری‌های مختلف در این حوزه و توزیع جغرافیایی این فعالیت‌ها ارائه می‌دهد. با بررسی این داده‌ها، می‌توان به تمایزات و اولویت‌های کشورهای مختلف در زمینه توسعه

از فناوری‌ها است که در مراحل مختلف چرخه توسعه و آمادگی فناوری (TRL) قرار دارند. تحلیل این فناوری‌ها از منظر سطح آمادگی فناوری، دید جامعی در رابطه با سطح بلوغ، قابلیت پیاده‌سازی، و چالش‌های پیش‌روی آن‌ها ارائه می‌دهد. یکی از چالش‌های اصلی در مسیر حرکت فناوری‌های کوانتومی در سطوح مختلف TRL، نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته، از جمله فیبرهای نوری بهینه‌شده و ماهواره‌های اختصاصی برای انتقال اطلاعات کوانتومی است. به‌علاوه، هزینه‌های بالای توسعه و عدم تطابق با سیستم‌های مخابراتی کنونی از جمله موانعی هستند که باید با سیاست‌گذاری‌های مناسب و سرمایه‌گذاری‌های کلان برطرف شوند (بدینگتون و همکاران، ۲۰۱۵؛ جوشی و اورسین، ۲۰۱۸).

تحلیل مراحل ابتدایی توسعه - پژوهش‌های بنیادی و اولیه (TRL ۱-۳)

در مراحل ابتدایی TRL، مفاهیمی همچون تولید جفت فوتون‌های درهم‌تنیده از طریق فرآیندهای غیرخطی مانند SPDC (تبدیل پارامتری خودبه‌خودی) قرار دارند. این فناوری‌ها هنوز در سطح آزمایشگاهی مورد بررسی هستند و تحقیقات اولیه جهت اثبات اصول عملکردی آن‌ها ادامه دارد. این فناوری‌ها به‌عنوان زیربنای توسعه سیستم‌های ارتباطی کوانتومی، نقشی کلیدی در آینده این حوزه ایفا می‌کنند (گرامگنا، دژیووانی، کالونیکو، لوی و کالیگوارو، ۲۰۲۴).

تحلیل سطوح میانی توسعه - تأیید و اثبات در محیط‌های کنترلی (TRL ۴-۶)

در این مرحله، فناوری‌هایی مانند سیستم‌های توزیع کلید کوانتومی (QKD) و پروتکل‌های پیشرفته



دانشگاه‌هایی نظیر دانشگاه علم و فناوری چین (USTC) در توسعه شیوه‌نامه‌های ارتباطی نوین مانند BB^{۸۴} و E^{۹۱} نقش کلیدی ایفا می‌کنند (یو و همکاران، ۲۰۲۳).

اتحادیه اروپا: هماهنگی در استانداردسازی و پژوهش‌های مشترک

اتحادیه اروپا از طریق برنامه‌هایی نظیر Quantum Flagship، به دنبال تقویت همکاری‌های میان کشورهای عضو است. این برنامه، تمرکز ویژه‌ای بر توسعه استانداردهای فناوری‌های کوانتومی و تقویت ارتباطات کوانتومی در سطح قاره دارد. کشورهای پیشرو اروپایی مانند آلمان، فرانسه، و هلند در زمینه‌های تحقیقاتی مانند تکرارکننده‌های کوانتومی و شبکه‌های هیبریدی فعال هستند. آلمان به‌ویژه در توسعه تجهیزات مبتنی بر درهم‌تنیدگی کوانتومی برای امنیت اطلاعات نقش بسزایی ایفا می‌کند (پوترانتو، واردانی، جی، و کیم، ۲۰۲۴).

کشورهای آسیایی دیگر: ژاپن و کره جنوبی

ژاپن و کره جنوبی نیز در حال سرمایه‌گذاری بر توسعه فناوری‌های کوانتومی در حوزه ارتباطات هستند. ژاپن در توسعه حسگرهای کوانتومی و کاربردهای صنعتی، تمرکز بیشتری دارد. از سوی دیگر، کره جنوبی در زمینه امنیت سایبری و استفاده از پروتکل‌های نیمه کوانتومی^{۷۵} پیشرفت‌هایی داشته است. این کشورها از همکاری‌های دانشگاهی و صنعتی برای تسریع توسعه فناوری‌های کوانتومی بهره می‌برند (شوف، ۲۰۲۲؛ شهرول، حنغه، مسروکی، یعقوب، و محمد^{۷۶}).

ارتباطات کوانتومی پی برد. تحلیل نگاشت فناوری و تمرکز کشورهای مختلف بر فناوری‌های ارتباطات کوانتومی نشان می‌دهد که رقابت جهانی در این حوزه با سرعت زیادی در حال گسترش است و کشورهای پیشرو نظیر ایالات متحده، چین و اتحادیه اروپا بر استانداردسازی و تجاری‌سازی فناوری‌ها تمرکز دارند (کائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ شوف، ۲۰۲۲).

ایالات متحده: تمرکز بر کاربردهای نظامی و تجاری

ایالات متحده به‌عنوان یکی از پیشروان فناوری کوانتومی، سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای در توسعه پروتکل‌های امنیتی، مانند توزیع کلید کوانتومی (QKD) و زیرساخت‌های شبکه‌های کوانتومی انجام داده است. دولت آمریکا از طریق برنامه‌هایی نظیر National Quantum Initiative Act، تلاش دارد تا همکاری‌های میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های خصوصی و مراکز دولتی را تقویت کند. شرکت‌هایی نظیر IBM، Google، و Honeywell در توسعه سامانه‌های مبتنی بر کوانتوم نقش فعالی دارند. این کشور همچنین در توسعه حافظه‌های کوانتومی و تکرارکننده‌های کوانتومی برای بهبود انتقال داده در مسافت‌های طولانی پیشرو است (کراز، ۲۰۲۳).

چین: برتری در شبکه‌های کوانتومی و ماهواره‌های کوانتومی

چین در سال‌های اخیر، با راه‌اندازی پروژه‌هایی نظیر شبکه کوانتومی پکن-شانگهای و ماهواره کوانتومی Mozi، به یکی از قدرت‌های برتر در این حوزه تبدیل شده است. این کشور به‌طور خاص بر ایجاد شبکه‌های گسترده فیبر نوری و زیرساخت‌های مبتنی بر ماهواره تمرکز کرده است. هدف اصلی این پروژه‌ها، افزایش امنیت ارتباطات ملی و ایجاد یک شبکه کوانتومی بین‌المللی است. علاوه بر این،

75. Semi-Quantum Protocols

76. Schoff, 2022; Shahrul, Hanefah, Masruki, Yaakub, & Mohamad



جمع‌بندی

راهبردی این حوزه در رقابت‌های فناورانه جهانی است.

نتایج این تحقیق حاکی از آن است که توسعه فناوری‌های ارتباطات کوانتومی، مستلزم شناسایی دقیق شکاف‌های دانشی، تدوین استانداردهای مشترک، و تسریع در تجاری‌سازی دستاوردها است. همچنین، استفاده از ابزارهایی مانند نگاشت فناوری، کمک شایانی به سیاست‌گذاران علمی در تدوین استراتژی‌های تحقیق و توسعه و تعیین اولویت‌های سرمایه‌گذاری خواهد کرد. در نهایت، توسعه این فناوری نه تنها می‌تواند تأثیرات عمیقی بر زیرساخت‌های ارتباطی و امنیت اطلاعات بگذارد، بلکه فرصت‌های اقتصادی و اجتماعی جدیدی را نیز ایجاد خواهد کرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تمامی اصول اخلاقی در پژوهش این مقاله رعایت شده‌اند.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی ندارد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به یک اندازه در نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

فناوری کوانتومی به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین حوزه‌های فناوری در دهه‌های اخیر، پتانسیل قابل توجهی در تحول زیرساخت‌های ارتباطی، امنیت اطلاعات و توسعه شبکه‌های پیشرفته دارد. این مقاله با هدف شناسایی و تحلیل فناوری‌های مرتبط با ارتباطات کوانتومی، ابتدا به معرفی ویژگی‌ها و کاربردهای این فناوری پرداخته و در ادامه، با استفاده از رویکرد نگاشت فناوری، تصویری جامع از اجزاء، روابط و روندهای توسعه این حوزه ارائه داده است.

نگاشت فناوری ارائه‌شده نشان می‌دهند که فناوری کوانتومی ارتباطات در مراحل مختلف چرخه عمر و سطح آمادگی فناوری قرار دارد و شامل طیفی از پروتکل‌ها و زیرساخت‌های پایه‌ای تا کاربردهای پیچیده‌تر مانند شبکه‌های توزیع‌شده کوانتومی است. تحلیل ساختار این فناوری‌ها نشان داد که گرچه برخی از مؤلفه‌ها به بلوغ نسبی رسیده‌اند، اما بسیاری از فناوری‌های کلیدی همچنان در مراحل تحقیق و توسعه یا آزمایش‌های اولیه باقی مانده‌اند. این یافته‌ها اهمیت برنامه‌ریزی‌های راهبردی و هماهنگ‌سازی سیاست‌های علمی و صنعتی برای تسریع توسعه و پیاده‌سازی گسترده این فناوری را برجسته می‌کند.

نگاشت فناوری‌های ارتباطات کوانتومی همچنین نشان داد که این فناوری، ترکیبی میان‌رشته‌ای از مفاهیم مکانیک کوانتومی، علوم کامپیوتر، و مهندسی شبکه است که برای توسعه آن نیاز به همکاری‌های علمی و فنی بین‌المللی است. به‌طور خاص، تمرکز کشورهایی مانند چین، ایالات متحده و اتحادیه اروپا بر توسعه شبکه‌های فیبر نوری کوانتومی و ماهواره‌های ارتباطی کوانتومی، نشان‌دهنده اهمیت



منابع

منابع فارسی

سند چشم‌انداز بیست ساله جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴. (۱۳۸۲). [لینک]

دفتر حفظ و نشر آثار حضرت آیت‌الله العظمی خامنه‌ای (۱۳۹۳)، ابلاغ سیاست‌های کلی «علم و فناوری». [لینک]

ناصر باقری مقدم، س. س. ق. ن.، عنایت‌الله معلمی، مسلم موسوی درچه، (۱۳۹۷). روش‌شناسی تدوین اسناد ملی فناوری‌های راهبردی: مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور.

Reference

- AbuGhanem, M. (2024). Photonic Quantum Computers. arXiv preprint arXiv:2409.08229.
- Amer, O., Garg, V., & Krawec, W. O. (2022). A Standardized Design for Sifting in Quantum Key Distribution Software. Paper presented at the 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps).
- Araști, M. R., & Moghaddam, N. B. (2010). Use of technology mapping in identification of fuel cell sub-technologies. *international journal of hydrogen energy*, 35(17), 9516-9525.
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., . . . Buell, D. A. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505-510.
- Azuma, K., Tamaki, K., & Lo, H.-K. (2015). All-photonic quantum repeaters. *Nature communications*, 6(1), 1-7.
- Barreiro, R., Krawec, W. O., Mateus, P., Paunković, N., & Souto, A. (2022). Semi-Quantum Conference Key Agreement (SQCKA).
- Bedington, R., Zhongkan, T., Chandrasekara, R., Cheng, C., Chuan, T. Y., Durak, K., . . . Oi, D. (2015). Small photon entangling quantum system (SPEQS) enabling space based quantum key distribution (QKD). Paper presented at the International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel.
- Briegel, H.-J., Dür, W., Cirac, J. I., & Zoller, P. (1998). Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication. *Physical Review Letters*, 81(26), 5932.
- Cao, Y., Zhao, Y., Wang, Q., Zhang, J., Ng, S. X., & Hanzo, L. (2022). The evolution of quantum key distribution networks: On the road to the qinternet. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(2), 839-894.
- Chandrasekara, R. C., Bedington, R., Bai, X., Ilangoan, K., Sean, Y. Y., Naughton, D., . . . Ling, A. (2017). Demonstrating Miniaturised, entangled photon-pair sources on board nano satellites to enable future QKD missions. arXiv preprint arXiv:1710.03907.
- Chen, J., Cui, C., Lawrie, B., Xue, Y., Guha, S., Eichenfield, M., . . . Yan, X. (2024). Low-Dimensional Solid-State Single-Photon Emitters. arXiv preprint arXiv:2410.22106.
- Chiofalo, M. L., Smerzi, A., & Micheli, M. (2024). Editorial: Responsible research and innovation in quantum science and technologies. *Frontiers in Quantum Science and Technology*, 3. doi:10.3389/frqst.2024.1424698
- Coccia, M. (2024). Dynamics of Converging Scientific and Technological Development in Artificial Intelligence and Quantum Technologies.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*: Sage publications.
- Dai, H., Shen, Q., Wang, C.-Z., Li, S.-L., Liu, W.-Y., Cai, W.-Q., . . . Chen, Y.-A. (2020). Towards satellite-based quantum-secure time transfer. *Nature Physics*, 16(8), 848-852.
- Das, A., Palesi, M., Kim, J., & Pande, P. P. (2024). Chip and Package-Scale Interconnects for General-Purpose, Domain-Specific and Quantum Computing Systems-Overview, Challenges and Opportunities. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*.
- Deschênes, J.-D., Sinclair, L. C., Giorgetta,



- F. R., Swann, W. C., Baumann, E., Bergeron, H., . . . Newbury, N. R. (2016). Synchronization of distant optical clocks at the femtosecond level. *Physical Review X*, 6(2), 021016.
- Eisaman, M. D., Fan, J., Migdall, A., & Polyakov, S. V. (2011). Invited review article: Single-photon sources and detectors. *Review of scientific instruments*, 82(7).
- Elsayed, T. A. (2020). Deterministic secure quantum communication with and without entanglement. *Physica Scripta*, 96(2), 025101.
- Erhard, M., Hochrainer, A., Fink, M., Handsteiner, J., Herbst, T., & Scheidl, T. (2021). How to choose the best QKD network technology: three different satellite based scenarios compared. Paper presented at the International Conference on Space Optics—ICSO 2020.
- Ezratty, O. (2022). Mitigating the quantum hype. arXiv preprint arXiv:2202.01925.
- Fenn, J., & Raskino, M. (2008). *Mastering the hype cycle: how to choose the right innovation at the right time*: Harvard Business Press.
- Figueiredo, G., Ferreira, R. A., & André, P. S. (2024). Enhancing secret key distribution through advanced color modulation in visible light communication. *Journal of Optical Communications and Networking*, 16(8), D1-D9.
- Ghalaii, M. (2019). *Continuous Variable Quantum Key Distribution over Long Distances*. University of Leeds.
- Gramegna, M., Degiovanni, I., Calonico, D., Levi, F., & Callegaro, L. (2024). EMN-Q-Strategic Research Agenda and Quantum Technologies Roadmaps.
- Gunashekar, S. (2022). *Using Quantum Computers and Simulators in the Life Sciences*.
- Gupta, B. M., Dhawan, S. M., & Mamdapur, G. M. N. (2021). Quantum communication & networking (QCN): a scientometric assessment of global publications during 1997-20. *International Journal of Information Dissemination and Technology*, 11(2), 71-79.
- Hadfield, R. H. (2009). Single-photon detectors for optical quantum information applications. *Nature photonics*, 3(12), 696-705.
- Haldar, S., Agullo, I., Brady, A. J., Lamas-Linares, A., Proctor, W. C., & Troupe, J. E. (2023). Towards global time distribution via satellite-based sources of entangled photons. *Physical Review A*, 107(2), 022615.
- Hatanpää, B. H. J. (2025). *High-Field Charge Transport and Fluctuation Phenomena in Semiconductors from First Principles*. California Institute of Technology.
- Huang, Z., Rong, Z., Zou, X., & He, Z. (2021). Semi-quantum secure direct communication in the curved spacetime. *Quantum Information Processing*, 20(11), 375.
- Joshi, S. K., & Ursin, R. (2018). Nanobob: a CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration.
- Kaltenbaek, R., Acin, A., Bacsardi, L., Bianco, P., Bouyer, P., Diamanti, E., . . . Rasel, E. (2021). Quantum technologies in space. *Experimental Astronomy*, 51(3), 1677-1694.
- Kamin, L., Shchukin, E., Schmidt, F., & van Loock, P. (2023). Exact rate analysis for quantum repeaters with imperfect memories and entanglement swapping as soon as possible. *Physical Review Research*, 5(2), 023086.

- Kim, T. H., & Madhavi, S. (2024). Quantum intrusion detection system using outlier analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 27114.
- Kimble, H. J. (2008). The quantum internet. *Nature*, 453(7198), 1023-1030.
- Kong, X., Xin, T., Wei, S.-J., Wang, B., Wang, Y., Li, K., & Long, G.-L. (2018). Demonstration of multiparty quantum clock synchronization. *Quantum Information Processing*, 17, 1-17.
- Krause, J. (2023). Shaping the quantum internet: Evidence of US-Chinese strategic competition over quantum technologies from interviews and patent data ERGMs. University of Southampton,
- Kumar, A., de Jesus Pacheco, D. A., Kaushik, K., & Rodrigues, J. J. (2022). Futuristic view of the internet of quantum drones: review, challenges and research agenda. *Vehicular Communications*, 36, 100487.
- Kumar, A., & Garhwal, S. (2021). State-of-the-art survey of quantum cryptography. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 3831-3868.
- Kuppusamy, S. K., Hunger, D., Ruben, M., Goldner, P., & Serrano, D. (2024). Spin-bearing molecules as optically addressable platforms for quantum technologies. *Nanophotonics*, 13(24), 4357-4379.
- Kwiat, P. G., Mattle, K., Weinfurter, H., Zeilinger, A., Sergienko, A. V., & Shih, Y. (1995). New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs. *Physical Review Letters*, 75(24), 4337.
- Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., Monroe, C., & O'Brien, J. L. (2010). Quantum computers. *Nature*, 464(7285), 45-53.
- Lee, E., Choi, H., Kim, S., & Lee, C.-W. (2024). Room Temperature Single-Photon Source of Colloidal Quantum Dots.
- Lita, A. E., Miller, A. J., & Nam, S. W. (2008). Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency. *Optics express*, 16(5), 3032-3040.
- Lougovski, P., Parekh, O., Broz, J., Byrd, M., Chapman, J. C., Chembo, Y., . . . Larson, J. (2023). Report for the ASCR Workshop on Basic Research Needs in Quantum Computing and Networking. Retrieved from
- Lvovsky, A. I., Sanders, B. C., & Tittel, W. (2009). Optical quantum memory. *Nature photonics*, 3(12), 706-714.
- Ma, H.-X., Bao, W.-S., Li, H.-W., & Chou, C. (2016). Quantum hacking of two-way continuous-variable quantum key distribution using Trojan-horse attack. *Chinese Physics B*, 25(8), 080309.
- Martin, V., Brito, J. P., Escribano, C., Menchetti, M., White, C., Lord, A., . . . Genay, N. (2021). Quantum technologies in the telecommunications industry. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), 19.
- McKenzie, W., Richards, A. M., Patel, S., Gerrits, T., Akin, T., Peil, S., . . . Li-Baboud, Y.-S. (2024). Clock synchronization characterization of the Washington DC metropolitan quantum network (DC-QNet). *Applied Physics Letters*, 125(16).
- Memon, Q. A., Al Ahmad, M., & Pecht, M. (2024). Quantum Computing: Navigating the Future of Computation, Challenges, and Technological Breakthroughs. *Quantum Reports*, 6(4), 627-663.
- Minhas, N. (2024). A Survey on Quantum Cryptography, its Protocols, Applications, and Challenges.
- Mishra, S., & Pathak, A. (2023). Quantum and semi-quantum lottery: strategies and advantages. *Quantum Information Processing*, 22(7), 290.
- Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms:



- an overview. *npj Quantum Information*, 2(1), 1-8.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*: Cambridge university press.
- Onu, P., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2023). *Industry 4.0 and Beyond: Enabling Digital Transformation and Sustainable Growth in Industry X*. 0. Paper presented at the 2023 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM).
- Orús, R., Mugel, S., & Lizaso, E. (2019). Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*, 4, 100028.
- Picciariello, F., Vedovato, F., Orsucci, D., Dominguez, P. N., Zechel, T., Avesani, M., . . . Dequal, D. (2024). Quantum-secured time transfer between precise timing facilities: a field trial with simulated satellite links. *GPS Solutions*, 28(1), 48.
- Pirandola, S., Andersen, U. L., Banchi, L., Berta, M., Bunandar, D., Colbeck, R., . . . Ottaviani, C. (2020). Advances in quantum cryptography. *Advances in optics and photonics*, 12(4), 1012-1236.
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79.
- Putranto, D. S. C., Wardhani, R. W., Ji, J., & Kim, H. (2024). A Deep Inside Quantum Technology Industry Trends and Future Implications. *IEEE Access*.
- Razavi, M., Thompson, K., Farmanbar, H., Piani, M., & Lütkenhaus, N. (2009). Physical and architectural considerations in quantum repeaters. Paper presented at the Quantum Communications Realized II.
- Rong, Z., Qiu, D., Mateus, P., & Zou, X. (2021). Mediated semi-quantum secure direct communication. *Quantum Information Processing*, 20, 1-13.
- Rotolo, D., Hicks, D., & Martin, B. R. (2015). What is an emerging technology? *Research policy*, 44(10), 1827-1843.
- Sangouard, N., Simon, C., De Riedmatten, H., & Gisin, N. (2011). Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. *Reviews of Modern Physics*, 83(1), 33-80.
- Scarani, V., Bechmann-Pasquinucci, H., Cerf, N. J., Dušek, M., Lütkenhaus, N., & Peev, M. (2009). The security of practical quantum key distribution. *Reviews of Modern Physics*, 81(3), 1301-1350.
- Scheidsteger, T., Haunschild, R., Bormann, L., & Ettl, C. (2021). Quantum technology 2.0-topics and contributing countries from 1980 to 2018. *arXiv preprint arXiv:2105.08750*.
- Schoff, J. L. (2022). US-Japan technology policy coordination: balancing technonationalism with a globalized world: Carnegie Endowment for International Peace.
- Scholten, T. L., Williams, C. J., Moody, D., Mosca, M., Hurley, W., Zeng, W. J., . . . Gambetta, J. M. (2024). Assessing the benefits and risks of quantum computers. *arXiv preprint arXiv:2401.16317*.
- Senellart, P., Solomon, G., & White, A. (2017). High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources. *Nature nanotechnology*, 12(11), 1026-1039.
- Shahrul, N. S., Hanefah, M. M., Masruki, R., Yaakub, N. A., & Mohamad, N. AWARENESS AND READINESS ON QUANTUM COMMUNICATION TECHNOLOGY AMONG THE REGULATORS, INDUSTRY PLAYERS AND ACADEMICIANS IN MALAYSIA. *Management*, 9(35), 21-37.

- Shen, Q., Liao, S., Liu, S., Wang, J., Liu, W., Peng, C., & An, Q. (2012). Time interval analyzer with FPGA-based TDC for free space quantum key distribution: Principle and validation with prototype setup. Paper presented at the 2012 18th IEEE-NPSS Real Time Conference.
- Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Paper presented at the Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science.
- Shukla, C., Thapliyal, K., & Pathak, A. (2017). Semi-quantum communication: protocols for key agreement, controlled secure direct communication and dialogue. *Quantum Information Processing*, 16, 1-19.
- Simon, C., Afzelius, M., Appel, J., Boyer De La Giroday, A., Dewhurst, S., Gisin, N., . . . Müller, J. (2010). Quantum memories: a review based on the European integrated project "qubit applications (QAP)". *The European Physical Journal D*, 58, 1-22.
- Singh, P., Dasgupta, R., Singh, A., Pandey, H., Hassija, V., Chamola, V., & Sikdar, B. (2024). A survey on available tools and technologies enabling quantum computing. *IEEE Access*.
- Stilinski, D., & Potter, K. (2024). Quantum Key Distribution (QKD) for Secure Communication Networks.
- Ulpiani, P., Proietti, M., Sabetta, L., Livi, L. F., Zanforlin, U., Romanelli, R., & Dispenza, M. (2024). AI-enhanced non-line of sight imaging. Paper presented at the Quantum Technologies 2024.
- Urgelles, H., Garcia-Roger, D., & Monserrat, J. F. (2024). Quantum-Based Maximum Likelihood Detection in MIMO-NOMA Systems for 6G Networks. *Quantum Reports*, 6(4), 533-549.
- Ursin, R., Tiefenbacher, F., Schmitt-Manderbach, T., Weier, H., Scheidl, T., Lindenthal, M., . . . Trojek, P. (2007). Entanglement-based quantum communication over 144 km. *Nature Physics*, 3(7), 481-486.
- Valsalan, P., ul Hasan, N., Baig, I., Zghaibeh, M., Farooq, U., & Suhail, S. (2024). Unleashing the Potential: The Joint of 5G and 6G Technologies in Enabling Advanced IoT Communication and Sensing Systems: A Comprehensive Review and Future Prospects. *Journal of Communications*, 19(11).
- van Loock, P., Alt, W., Becher, C., Benson, O., Boche, H., Deppe, C., . . . Michler, P. (2020). Extending quantum links: modules for fiber-and memory-based quantum repeaters. *Advanced quantum technologies*, 3(11), 1900141.
- Wang, J., Shen, L., & Zhou, W. (2021). A bibliometric analysis of quantum computing literature: mapping and evidences from scopus. *Technology analysis & strategic management*, 33(11), 1347-1363.
- Wehner, S., Elkouss, D., & Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412), eaam9288.
- Xu, L.-C., Chen, H.-Y., Zhou, N.-R., & Gong, L.-H. (2020). Multi-party semi-quantum secure direct communication protocol with cluster states. *International Journal of Theoretical Physics*, 59, 2175-2186.
- Xu, Y., Li, Z., Wang, C., & Zhu, H. (2021). Quantum sealed-bid auction protocol for simultaneous ascending auction with GHZ states. *Quantum Information Processing*, 20, 1-14.
- Ye, T., Zhou, N., Luo, M., Nayak, A., & Chen, X. (2023). Multiparty secure quantum and semiquantum computations: *Frontiers*



Media SA.

- Yin, J., Cao, Y., Li, Y.-H., Liao, S.-K., Zhang, L., Ren, J.-G., . . . Dai, H. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*, 356(6343), 1140-1144.
- Yu, Y., Liu, S., Lee, C.-M., Michler, P., Reitzenstein, S., Srinivasan, K., . . . Liu, J. (2023). Telecom-band quantum dot technologies for long-distance quantum networks. *Nature nanotechnology*, 18(12), 1389-1400.
- Zhang, Q., Lai, H., Pieprzyk, J., & Pan, L. (2022). An improved quantum network communication model based on compressed tensor network states. *Quantum Information Processing*, 21(7), 253.
- Zhao, W., Shi, R., & Ruan, X. (2021). High-efficiency continuous-variable quantum digital signature protocol for signing multi-bit messages. *Laser Physics Letters*, 18(3), 035201.
- Zheng, T., Chang, Y., Yan, L., & Zhang, S.-B. (2020). Semi-quantum proxy signature scheme with quantum walk-based teleportation. *International Journal of Theoretical Physics*, 59(10), 3145-3155.
- Zhou, R.-G., & Zhang, X. (2021). Controlled deterministic secure semi-quantum communication. *International Journal of Theoretical Physics*, 60(5), 1767-1782.
- Zhou, Y.-H., Qin, S.-F., Shi, W.-M., & Yang, Y.-G. (2022). Measurement-device-independent continuous variable semi-quantum key distribution protocol. *Quantum Information Processing*, 21(8), 303.