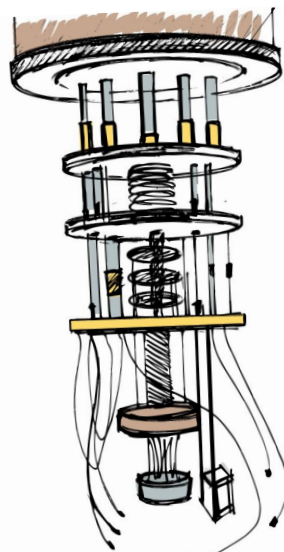




فناوری کوانتومی در کشورهای منتخب و ایران



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

خدای بزرگ بخشایش پریمتختانند

بنام

تاریخ انتشار:
۱۴۰۱/۱۰/۳

شماره مسلسل: ۱۸۶۱۱
کد موضوعی: ۳۱۰



مرکز پژوهش‌های
مجلس شورای اسلامی

عنوان گزارش:

فناوری کوانتومی در کشورهای منتخب و ایران

نام دفتر:

مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه مخابرات و فناوری اطلاعات)

تهیه و تدوین کنندگان:

محمد اسماعیل حسینی جبل کندی، ابوالقاسم رجبی

مدیر مطالعه:

ابوالقاسم رجبی

ناظران علمی:

محمد حسن معادی رودسری، حسن پوراسماعیل

صفحه آرا:

نفیسه حاجی صفری

ویراستار ادبی:

پرنده فیاضی

واژه‌های کلیدی:

۱. فناوری کوانتوم

۲. رایانش کوانتومی

۳. ارتباطات کوانتومی

۴. وضعیت سرمایه‌گذاری در فناوری کوانتوم

۵. برتری کوانتومی



فهرست مطالب

۷

چکیده

۸

خلاصه مدیریتی

۱۰

مقدمه

۱۱

۱. کاربردهای فناوری کوانتومی

۱۳

۲. وضعیت جهانی سرمایه‌گذاری در فناوری کوانتوم

۲۰

جمع‌بندی و پیشنهادات

۲۷

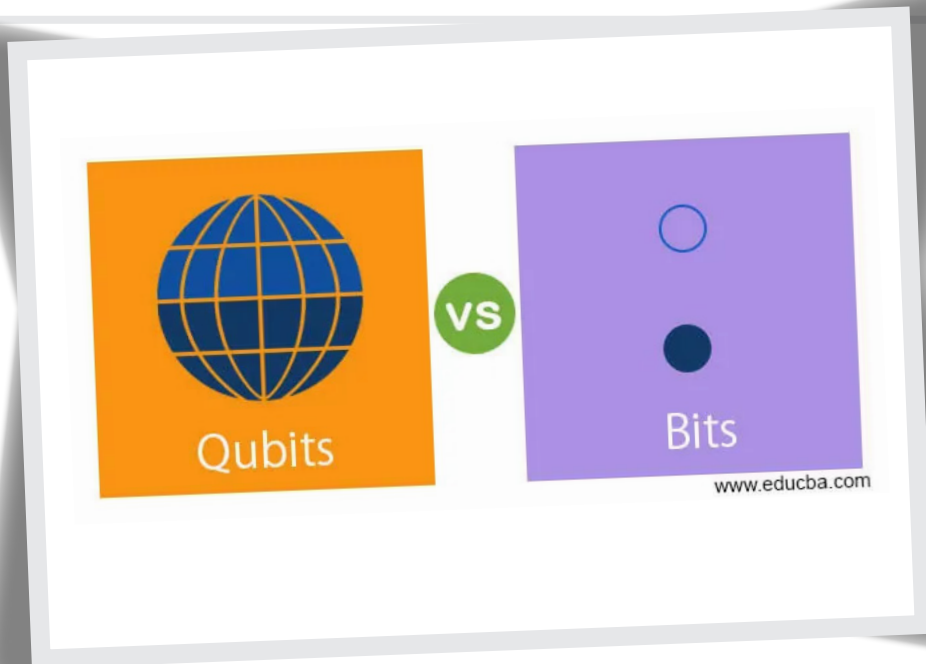
منابع و مآخذ

فهرست جداول

- جدول ۱. آمار فارغ التحصیلان رشته‌های مرتبط با حوزه کوانتوم ۱۵
- جدول ۲. آمار استارت آپ‌های حوزه فناوری کوانتوم ۱۶
- جدول ۳. آمار جهانی استارت آپ‌های جدید در حوزه فناوری کوانتوم ۱۷

فهرست شکلها

- شکل ۱. هزینه‌های دولتی در صنعت کوانتوم (برچسب میلیارد دلار) ۱۳
- شکل ۲. سهم کشورها از مقاله‌های معتبر مرتبط با کوانتوم (سال ۲۰۲۱) ۱۴
- شکل ۳. آمار نسبی اختراعات ثبت شده در حوزه فناوری کوانتوم (درصد) ۱۵
- شکل ۴. فعالیت‌های کوانتومی ژاپن ۱۷
- شکل ۵. نسبت هزینه‌های دولتی عضو اتحادیه اروپا در حوزه فناوری کوانتوم (درصد) ۱۸
- شکل ۶. توزیع جهانی تعداد اختراعات ثبت شده کوانتومی در کشورهای مختلف ۲۰



فناوری کوانتومی در کشورهای منتخب و ایران

چکیده

اختراعات فناوری کوانتومی را به خود اختصاص داده است، پس از آن ژاپن با ۱۵/۲ درصد در رتبه دوم ایستاده است. اتحادیه اروپا و آمریکا با ۱۰ و ۱۱ درصد رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند. در سه سال اخیر هیچ اختراعی در زمینه کوانتوم در ایران به ثبت نرسیده و عمده اختراعات نیز قبل از سال ۱۳۹۷ ثبت شده‌اند در فرایند تصویب نقشه راه کوانتومی کشور ابهام‌هایی مانند نهاد متولی توسعه کاربری فناوری کوانتومی دیده می‌شود. رویکرد به صنعت کوانتوم در برنامه هفتم توسعه قابل بررسی است و سؤالاتی که باید از سوی دستگاه‌های مسئول جهت اتخاذ راهبرد مناسب ملی پاسخ داده شوند در پایان مطرح شده‌اند. با توجه به هزینه‌بر بودن تحقیقات در این حوزه پیشنهاد شده است که برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها یک مرکز فناوری کوانتومی با قابلیت استفاده توسط همه دانشگاه‌ها ایجاد شود.

فناوری کوانتومی شامل رایانش، حسگرها و ارتباطات کوانتومی می‌شود. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۵ این فناوری موجب جهش بزرگی در علوم رایانشی خواهد شد و امنیت بسیاری از سامانه‌های رمزنگاری فعلی را در هم خواهد شکست و انواع جدیدی از ارتباطات ایمن و حسگرهای بسیار دقیق را به وجود خواهد آورد. در عرصه جهانی، رقابت سنگینی در عرصه فناوری کوانتومی در جریان است، چین احتمالاً در فناوری کوانتومی سلطه فناورانه ایالات متحده آمریکا را به چالش خواهد کشید. چین بیش از ۱۵ میلیارد دلار اعتبار جهت برتری کوانتومی در نظر گرفته است. بودجه کوانتومی چین، از مجموع بودجه کوانتومی دولت ایالات متحده آمریکا و کشورهای هم‌پیمان آن بیشتر است، اما ردیف اعتباری مشخصی برای کوانتوم در بودجه ایران در نظر گرفته نشده است. چین به تنهایی نزدیک به ۵۴ درصد از کل



خلاصه مدیریتی

پنجم فناوری ارتباطات همراه، با برنامه‌ریزی جامع و سرمایه‌گذاری عظیم، در فناوری کوانتومی نیز ممکن است سلطه فناوریانه ایالات متحده آمریکا را به چالش بکشد. چین بیش از ۱۵ میلیارد دلار اعتبار جهت برتری کوانتومی در نظر گرفته است، اتحادیه اروپا بیش از ۷ میلیارد و آمریکا نزدیک به ۲ میلیارد دلار و رژیم اشغالگر قدس ۵۰۰ میلیون دلار در این حوزه سرمایه‌گذاری کرده‌اند. بودجه کوانتومی چین، از مجموع بودجه کوانتومی دولت ایالات متحده آمریکا و کشورهای هم‌پیمان آن بیشتر است، با وجود سرمایه‌گذاری در کشورمان اما ردیف اعتباری مشخصی برای توسعه فناوری کوانتومی در قوانین بودجه سنواتی ایران در نظر گرفته نشده است. چین به تنهایی نزدیک به ۵۴ درصد از کل اختراعات فناوری کوانتومی را به خود اختصاص داده است، پس از آن ژاپن با ۱۵/۲ درصد در رتبه دوم ایستاده است. اتحادیه اروپا و آمریکا با ۱۱ و ۱۰ درصد رتبه‌های سوم و چهارم اختراعات ثبت شده کوانتومی را به خود اختصاص داده‌اند. عنوان شده است که ایران در سال ۱۳۹۹ ارتباط کوانتومی را در فاصله ۱۶۵۰ متری با موفقیت آزمایش کرده است. در سه سال اخیر هیچ اختراعی در زمینه کوانتوم در ایران به ثبت نرسیده و عمده اختراعات نیز قبل از سال ۱۳۹۷ ثبت شده‌اند که فارغ از کیفیت اختراعات، ۱۷ صدم درصد از کل اختراعات کوانتومی جهان را شامل می‌شود.

در فرایند تصویب نقشه راه کوانتومی ایران ابهام‌هایی مانند نهاد متولی توسعه کاربری فناوری کوانتومی دیده می‌شود. شورای عالی فضای مجازی در سند راهبردی جمهوری اسلامی ایران در فضای مجازی مصوب ۱۴۰۱/۶/۸، طراحی نظام به کارگیری فناوری‌های نوین فضای مجازی از قبیل پردازش کوانتومی را وظیفه معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری تعیین کرده است و تصویب نهایی این سند

فناوری کوانتومی شامل رایانش، حسگرها و ارتباطات کوانتومی می‌شود. این فناوری در آستانه ایجاد یک تحول عظیم در جهان است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۵ این فناوری موجب جهش بزرگی در علوم رایانشی خواهد شد، به‌صورتی که امنیت بسیاری از سامانه‌های رمزنگاری فعلی را در هم خواهد شکست و انواع جدیدی از ارتباطات ایمن و حسگرهای بسیار دقیق را به وجود خواهد آورد. با توجه به نوپا بودن علم کوانتوم و فناوری کوانتومی، این علم هنوز در حال رشد است و دامنه کاربردهای صنایع کوانتومی به سرعت در حال گسترش است و فعلاً تنها بخشی کوچک از این علم پیمایش شده است. این امر به معنای دو نتیجه بسیار مهم است، نخست اینکه پیشرفت در فناوری کوانتومی، نیازمند تدوین استراتژی کلان‌نگر است و دوم اینکه در آینده کشورهایی که از دسترسی به محصولات کوانتومی محروم باشند (اعم از تولید یا خرید)، از منظر امنیتی به شدت آسیب پذیر خواهند بود. باید آسیب‌های جهان پساکوانتومی به دقت پیش‌بینی شود، برای مثال برخی از مهم‌ترین رمازها مثلاً بیتکوین در برابر رایانه‌های کوانتومی آسیب پذیر هستند (medium.com، ۲۰۱۹). عمدتاً بررسی، کشف و اصلاح این الگوریتم‌ها نیازمند ایجاد سخت‌افزار نیست، بلکه باید رویکرد مدیریتی و علمی مناسبی اتخاذ شود. تحلیل الگوریتم‌های امنیتی و رمزنگاری تمامی زیرساخت‌های رمزنگاری و امنیتی کشور باید در دستور کار قرار گیرد. مهاجم مجهز به رایانش کوانتومی، امنیت سایبری را به راحتی تهدید خواهد کرد، البته با ظهور رایانش کوانتومی نه فقط امنیت، بلکه علوم و فنونی مانند هوش مصنوعی، بهینه‌سازی، مدل‌سازی و... با رایانش کوانتومی متحول خواهند شد.

در عرصه جهانی، رقابت سنگینی در عرصه فناوری کوانتومی در جریان است، چین پس از پیشی گرفتن از ایالات متحده آمریکا در عرصه نسل

خلأ و دماهایی هستند که با سردکننده‌های عادی به دست نمی‌آید یا ریز آیین‌ها، ابررسانا یا مشاهده‌گرهای کوانتومی نیازمند فناوری‌های سطح بالا هستند. در نتیجه با سرمایه‌گذاری پراکنده در این حوزه نمی‌توان به نتیجه رسید و لازم است سرمایه‌گذاری‌های سخت‌افزاری در نهادی متمرکز انجام شود و دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دیگر به صورت مشترک از آن استفاده کنند.

در ترسیم نقشه راه باید به سؤالات زیر پاسخ داده شود:

- جزئیات وضعیت کشورهای دیگر (اعم از متحد، رقیب و دشمن) در حوزه کوانتومی چیست؟
- صنایع کوانتومی به نسبت دیگر نیازهای کشور در چه سطحی از اهمیت و فوریت قرار دارد؟
- تا چه اندازه صنایع کوانتومی به رفع نیازهای بنیادین کشور اعم از اقتصاد، بهداشت، رفاه اجتماعی، امنیت و... کمک می‌کند؟
- رشد رایانه‌های کوانتومی در جهان چه تهدیدهایی به همراه دارد؟
- توسعه فناوری کوانتومی سایر کشورها چه آسیب‌های احتمالی برای ایران خواهد داشت و چه اقدام‌هایی باید در کشورمان انجام شود؟
- برای حفظ و تأمین نیروی کار کوانتومی کشور چه باید کرد؟
- با توجه به هزینه‌های بالای فناوری کوانتومی چه میزان مداخله همه‌جانبه در این صنعت ممکن است؟
- کدام حوزه‌های فناوری کوانتومی در اولویت سرمایه‌گذاری همه‌جانبه است؟
- در کدام بخش‌ها دنباله‌روی از کشورهای پیشرو گزینه بهتری است؟
- در چه حوزه‌هایی واردکننده و مصرف‌کننده بودن کفایت می‌کند؟

نیز به کمیسیون عالی تنظیم مقررات فضای مجازی سپرده شده است، دبیرخانه شورای عالی انقلاب فرهنگی به همراه اعضای کارگروه اقتصاد دیجیتال دولت و سازمان صدا و سیما دستگاه‌های همکار تعیین شده‌اند. از سوی دیگر ستاد اجرایی نقشه جامع علمی کشور نیز با کمک دستگاه‌های مختلف قرار است سند ملی فناوری کوانتوم را به شورای عالی انقلاب فرهنگی عرضه کند. مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران نیز مرکزی نوپاست که ذیل سازمان انرژی اتمی فعالیت می‌کند. رویکرد به صنعت کوانتوم در برنامه هفتم توسعه قابل بررسی است.

با توجه به گزارش‌های رسمی از جمعیت فارغ‌التحصیلان دانشگاهی، ایران در کمیت فارغ‌التحصیلان مرتبط با فناوری کوانتوم از کشورهایی است که جایگاه خوبی دارد، در رویکرد آکادمیک برای نیل به اهداف توسعه کوانتومی باید از تولیدات علمی آن حمایت شود.

صنعت کوانتوم یک صنعت پرهزینه است پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۳۵، حجم مالی تزریق شده به این فناوری - در سطح جهانی - به بیش از ۷۰۰ میلیارد دلار برسد. لذا در ترسیم نقشه راه تکنولوژی کوانتومی باید به نکات زیر توجه داشت: اولاً به دلیل نوپا بودن این فناوری این خطر وجود دارد که به راحتی در دام پروژه‌های هزینه‌بر و بی‌کاربرد گرفتار شد و باید احتیاط لازم را داشت. ثانیاً به دلیل هزینه‌های بالای پروژه کوانتومی، باید در تمامی گام‌ها و پروژه‌ها نگاه اقتصادی و توجه به ظرفیت‌های موجود داشت و گزینه ممکن است اقدام‌ها به نتیجه نرسند. نکته آخر اینکه صنعت کوانتوم در سال‌های اخیر درگیر تبلیغات و داستان‌سازی‌های غیرعادی شده است، برخی دانشمندان نیز در این باره هشدارهایی داده‌اند. تولید تجهیزات کوانتومی نیازمند پیش‌نیازها و محصولات مقدماتی متعددی است باید قدم به قدم با یک نقشه راه دقیق پیگیری شود. برای مثال پردازنده‌های کوانتومی نیازمند شرایط



[مقدمه]

کوانتوم، کوچک‌ترین ذره ممکن از هر چیزی است.^۱ برای مثال، کوچک‌ترین ذره نور، «فوتون» یا «کوانتوم نور» نامیده می‌شود. فیزیک کوانتوم نیز علم بررسی ذراتی مانند فوتون یا الکترون است که هیچ جزء ریزتری ندارند. این مواد عملکرد و رفتاری متفاوت با اشیاء عادی دارند که با مشاهده این تفاوت عملکرد و رفتار اشیاء و ذرات بسیار ریز با اشیاء عادی فیزیک کوانتوم آغاز شد. این به تحول در منطق، ریاضیات، ارتباطات، محاسبات و درک بشر از محیط پیرامونش منجر شد. فناوری کوانتوم، فناوری کاربردی‌سازی خواص متفاوت ذرات بسیار ریز در ابعاد اتم و کوچک‌تر از اتم است (Squires, 2022) و (Velusamy, & Rajasekar, 2014, #). در این گزارش پس از معرفی مفاهیم بنیادین فناوری کوانتوم، کاربردهای آن مطرح می‌شوند. در ادامه وضعیت توسعه فناوری کوانتومی در کشورهای جهان از حیث سرمایه‌گذاری، ثبت اختراعات و نیروی انسانی مقایسه می‌شود. سپس وضعیت کشورهای چین، اتحادیه اروپا و آمریکا، ژاپن و رژیم اشغالگر قدس و نهایتاً ایران مرور می‌شود.



مفاهیم بنیادین

کیوبیت: در رایانه‌های فعلی سنتی و کلاسیک، کوچک‌ترین واحد اطلاعات بیت نامیده می‌شود که تنها دو مقدار می‌تواند داشته باشد ۰ یا ۱. اما در فضای کوانتومی، کوچک‌ترین واحد اطلاعات کیوبیت نام دارند، کیوبیت علاوه بر ۰ و ۱ هر مقداری بین صفر و یک را می‌تواند اخذ کند (بعضاً تعبیر می‌شود که همزمان می‌تواند مقادیر ۰ و ۱ را اخذ کند که در فضای کوانتومی تعبیر غلطی نیست که به دلیل تفاوت‌های بنیادین فضای کوانتومی با دنیای عادی است) (What Is a Quantum Bit (Qubit)? - Definition From Techopedia, 2017).

درهمتنیدگی کوانتومی: در ذرات کوانتومی این خاصیت دیده می‌شود که دو (یا چند) ذره کوانتومی به هم وابسته می‌شوند، این ذرات هر میزان که فاصله بگیرند، هر اتفاقی روی یکی از دو ذره، بدون گذر زمان روی ذره دیگر نیز به صورت آنی تأثیر می‌گذارد (Jones, 2019).

۱. نقشه راه توسعه علوم و فناوری‌های کوانتومی با رویکرد امنیتی و دفاعی، دانشگاه عالی دفاع ملی.

۱. کاربردهای فناوری کوانتومی

نیست. هوش مصنوعی کوانتومی به حدی از بلوغ رسیده که امروزه بسته‌های نرم‌افزاری مخصوص آن از طریق خدمات ابری شرکت‌های فناوری (Google, -, #) در دسترس عموم است. تلاش برای حل بحران کرونا با هوش مصنوعی کوانتومی از همان روزهای نخست درگیر شدن آمریکا با ویروس کرونا شروع شد (Press, 2020, #). دسته‌بندی اشیاء، یادگیری ماشین و تحلیل متن از جمله شاخه‌هایی از هوش مصنوعی است که رایانش کوانتومی در آنها تحول جهشی ایجاد خواهد کرد.

■ **بهینه‌سازی:** به یافتن بهترین سیاست یا راهکار برای رسیدن به اهداف یک مسئله مشروط به رعایت همه محدودیت‌های آن، بهینه‌سازی می‌گویند. برای مثال پیدا کردن کوتاه‌ترین و سریع‌ترین مسیر رسیدن از مبدأ به مقصد در یک شبکه حمل و نقل، یافتن مناسب‌ترین ترکیب برای تولید آلیاژ، طراحی معماری مناسب رایانه‌های خادم برای کاهش مصرف منابع رایانشی و کاهش زمان پاسخگویی و... بسیاری از مسائل بهینه‌سازی از نظر محاسباتی مسائلی پیچیده هستند که رایانه‌های عادی عمدتاً برای آنها به یک جواب تخمینی با خطای قابل توجه دست پیدا می‌کنند، اما با استفاده از رایانش کوانتومی مسائل سریع‌تر و با خطای کمتری حل می‌شود. باید توجه داشت که تنها در مسائل بهینه‌سازی حمل و نقل، نظیر مسیریابی (خودرویی، هوایی و دریایی) کاهش چند درصدی مسیر به معنای صرفه‌جویی قابل توجه سوخت، زمان و هزینه‌ها در بلندمدت خواهد بود.

■ **شبیه‌سازی کوانتومی:** یک شبیه‌ساز کوانتومی، سیستم کوانتومی فیزیکی است که با دقت بالایی تهیه شده و یا به نحوی دستکاری شده که بتواند امکان شناخت ویژگی مورد نظر از یک سیستم پیچیده کوانتومی یا کلاسیک دارای برهم‌کنش‌های درونی را فراهم کند. شبیه‌سازی کوانتومی با رایانه‌های عادی قابل انجام نیست یا به لحاظ محاسباتی بسیار دشوار است. شبیه‌سازی کوانتومی بیشتر در شاخه شیمی، داروسازی، صنعت مواد و فیزیک کوانتومی قرار می‌گیرد و یک سیستم پیچیده را به صورت ساده‌سازی شده طراحی می‌کند (ICQTS, 2018). عمده کاربردهای شبیه‌سازی کوانتومی در حوزه داروسازی، فیزیک و صنعت مواد است. شبیه‌ساز کوانتومی، وسیله‌ای برای پردازش کوانتومی اطلاعات است که تنها یک مسئله به خصوص را پردازش می‌کند و رایانه کوانتومی آنالوگ نیز نامیده می‌شود. ساخت رایانه‌های آنالوگ کوانتومی یک گام مهم در تولید رایانه‌ای است که بتواند تمامی توابع، عملگرها و فرایندهای کوانتومی را مدیریت کند و اقدامی مهم در ایجاد رایانه‌های کوانتومی است. (Cirac, 2020, #)

در این گزارش برخی از مهم‌ترین و معروف‌ترین کاربردهای فناوری کوانتومی در زمینه فناوری اطلاعات و ارتباطات شامل رایانش کوانتومی، ارتباطات کوانتومی و حسگرهای کوانتومی معرفی می‌شود، هرچند موضوعاتی مانند شیمی کوانتومی، زیست‌شناسی کوانتومی و شبیه‌سازی کوانتومی نیز ذیل فناوری کوانتومی طبقه‌بندی می‌شوند (مرکز فناوری کوانتومی، ۲۰۲۲).

۱-۱. رایانش کوانتومی و کاربردهای آن

محاسبات و رایانش کوانتومی یک مدل محاسباتی جدید است که از قوانین مکانیک کوانتومی برای کنترل واحدهای اطلاعات کوانتومی پیروی می‌کند (ITUPP, 2020). به دلیل خاصیت‌های منحصر به فرد فضای اتمی و زیر اتمی، علوم رایانشی متحول خواهد شد و الگوریتم‌هایی ایجاد خواهد شد که پیش از این، در رایانه‌های کلاسیک کاربردی نبودند و بعضی مسائل ریاضی بسیار سریع‌تر حل خواهد شد. برای مثال انجام محاسبات برای مسئله‌ای که هزاران میلیارد سال زمان نیاز داشت تا به جواب برسد، در یک پردازنده کوانتومی در کمتر از یک روز به نتیجه می‌رسد. برای مثال پردازنده کوانتومی گوگل که از نخستین رایانه‌های کوانتومی است و هنوز به بلوغ نرسیده، موفق شده است پردازشی که در قوی‌ترین ابررایانه غیر کوانتومی موجود ۱۱ هزار سال زمان نیاز داشت را در ۱۱ دقیقه به نتیجه برساند (Thomson, 2019). ملاک‌های بررسی برتری یک پردازنده کوانتومی، عواملی مانند تعداد عملگرهای پشتیبانی شده در آن پردازشگر، تعداد ذرات در هم تنیده مدیریت شده در آن و... اشاره کرد. برای مثال پردازنده گوگل حدود ۵۳ کیوبیت در هم تنیده را پشتیبانی می‌کند (Norberg, 2019). از جمله کاربردهای رایانش کوانتومی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

■ **تهاجم به الگوریتم‌های رمزنگاری:** یکی از معروف‌ترین کاربردهای نظریه کوانتومی اطلاعات، کاهش زمان پیدا کردن کلید الگوریتم‌های رمزنگاری است، زیرا الگوریتم‌های رمزنگاری غیر کوانتومی مبتنی بر این طراحی می‌شوند که شکستن آنها نیازمند تحلیل و پاسخ دادن به یک مسئله پیچیده و زمانبر است، اما ممکن است در رایانه کوانتومی مسائل این الگوریتم‌ها به راحتی حل شود. در نتیجه امنیت رمزنگاری‌های فعلی به چالش کشیده می‌شود. یکی از سرفصل‌های نظریه کوانتومی اطلاعات تحلیل الگوریتم‌های موجود و طراحی الگوریتم‌های مقاوم در برابر حملات کوانتومی است. در صورتی که رمزگذاری‌های موجود کشور مثلاً در حوزه امضای الکترونیکی و گواهی الکترونیکی، به روزرسانی نشود امنیت ملی به خطر خواهد افتاد.

■ **هوش مصنوعی کوانتومی:** رایانش کوانتومی می‌تواند مسائلی از هوش مصنوعی را حل کند که در رایانش کلاسیک و رایج فعلی ممکن



۲-۱. ارتباطات کوانتومی و کاربردهای آن

ارتباط کوانتومی دسته‌ای از فناوری جدید ارتباطی است که بر سیگنال‌های کوانتومی بنا شده است (ITUPP, 2020). از مهم‌ترین ویژگی‌های ارتباطات کوانتومی سرعت بسیار بالا و غیرقابل شنود بودن و تقریباً غیرقابل تخریب بودن ارتباطات کوانتومی (Limos, 2020) است. ارتباطات کوانتومی شامل سه زیر حوزه می‌شود (ITUPP, 2020):

توزیع کلید کوانتومی:^۱ یکی از فناوری‌های حوزه امنیت ارتباطات است. در شروع یک ارتباط طرفین ارتباط باید روی کلید رمزگذاری توافق کنند تا پیام‌ها با آن کلید رمزنگاری شود. فرایندی که اعضای جلسه برای رسیدن به یک کلید مشترک طی می‌کنند را توزیع کلید می‌گویند. در فناوری توزیع کلید کوانتومی با استفاده از فیزیک کوانتوم کلیدهای رمزگذاری متقارن ارتباط به صورت ایمن توزیع می‌شود. فناوری کوانتومی اجازه می‌دهد توزیع کلید به نحوی انجام شود که دشمن قادر به شنود یا مختل کردن ارتباط نباشد و در نتیجه کلیدی کاملاً امن تأیید شود. توزیع کلید کوانتومی در بستر فناوری کوانتومی مدت‌هاست مطرح است و اخباری وجود دارد که چین به طور جدی بر روی این تکنولوژی سرمایه‌گذاری کرده و به مرحله عملیاتی رسانده است (مرکز آ‌پا دانشگاه گلستان، ۲۰۱۷).

دورنوردی کوانتومی:^۲ فرایند انتقال (ترابرد) یک کیوبیت اطلاعات (یا ماده) در بستر کوانتومی بدون پیمایش فاصله فیزیکی بین مبدأ و مقصد را دورنوردی کوانتومی می‌گویند (Djordjevic, 2021, #). در دورنوردی کوانتومی از بسترهای انتقال فیزیکی ماده یا اطلاعات استفاده نمی‌شود. چین در سال ۲۰۱۷ موفق شد از ماهواره^۳ با زمین تله‌پورت کوانتومی برقرار کند. در این ارتباط اطلاعات و ماده بین ماهواره و زمین تله‌پورت شدند (technolo-gyreview.com, 2017).

تکرار کننده کوانتوم: تکرار کننده‌ها، پیام را تقویت می‌کنند تا آثار ناشی از تضعیف پیام به دلیل مشکلات کانال ارتباطی جلوگیری کنند. برای مثال ارسال یک کیوبیت به فاصله بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر، در مسیر به حدی خطا در اطلاعات وارد خواهد شد که باید هزاران میلیارد پتاکیوبیت مصرف شود تا یک کیوبیت قابل شناسایی باشد. دلیل این اتفاق نویز کانال (مثلاً فیبرهای نوری) است. تکرار کننده کوانتومی، پیام‌های کوانتومی

را در بین راه تقویت می‌کنند تا پیام به درستی به مقصد برسد. تکرار کننده کوانتومی در یک شبکه کوانتومی ضروری است و بدون تکرار کننده کوانتومی نمی‌توان شبکه کوانتومی داشت (Quantum flagship, -).

در سطح جهانی تلاش‌های زیادی در هر سه حوزه انجام شده است از جمله در ایران، در سال ۱۳۹۹ گزارشی رسمی از یک ارتباط موفق کوانتومی در یک فاصله ۱۶۵۰ متری اعلام شد (مهرانی، ۲۰۲۱، #).

۳-۱. حسگرها و سنجش کوانتومی

فناوری کوانتومی به دلیل ابعاد ریز ذرات کوانتومی و دیگر خواص آن ذرات، اجازه می‌دهد که اندازه‌گیری‌ها، بسیار دقیق‌تر از هر حسگر معمولی انجام شود. حسگر کوانتومی نیز دستگاهی است که مبتنی بر ویژگی‌های کوانتومی ساخته شده تا یک کمیت فیزیکی را اندازه‌گیری کند (Degen, 2016). حسگرهای کوانتومی اعم از ساعت‌های دقیق کوانتومی، دستگاه عکسبرداری از اعصاب بدن، رادارها، مکان‌یاب‌ها و دیگر حسگرهای ممکن، بسیار دقیق‌تر از حسگرهای عادی عمل می‌کنند. تجهیز یک حسگر کوانتومی به هوش مصنوعی کوانتومی می‌تواند به ایجاد ابزارهای بسیار قدرتمند در حوزه‌های پزشکی، نظامی، زمین‌شناسی، هسته‌ای و... منجر شود. برخی از حسگرهای کوانتومی هم‌اکنون عملیاتی هستند و در صنایع گوناگون استفاده می‌شوند و در نتیجه تولید آنها به نسبت رایانه‌های کوانتومی سهل‌الوصول‌تر است، گرچه موفقیت قطعی در این حوزه هم بدون چالش نیست. برای مثال از سال ۲۰۱۷ عنوان شده که رادار کوانتومی چین ایجاد شده است که توانایی شناسایی هواپیماهای پنهان کار ایالات متحده آمریکا را دارد (Wang, 2017, #) و برد آنها ۱۰۰ کیلومتر اعلام شد، اما برخی محققین این ادعا را رد کرده‌اند و عنوان کرده‌اند که چینی‌ها در شرایط آزمایشگاهی و با ایجاد خلأ مصنوعی که با شرایط محیط واقعی متفاوت است این دستاوردها را داشته‌اند، البته امکان‌پذیری این امر در سال‌های آینده مورد اجماع است، اما نکته مهم در مورد رادارهای کوانتومی تنها شناسایی پرنده‌های پنهان کار نیست، بلکه وضوح بالای رادارهای کوانتومی ویژگی مهم این نوع رادارها هستند. با این رادارها شکل ظاهری پرنده، سرعت پروازی و اطلاعات بسیار بیشتری نسبت به رادارهای کنونی قابل تشخیص خواهد بود (Vella, 2019).

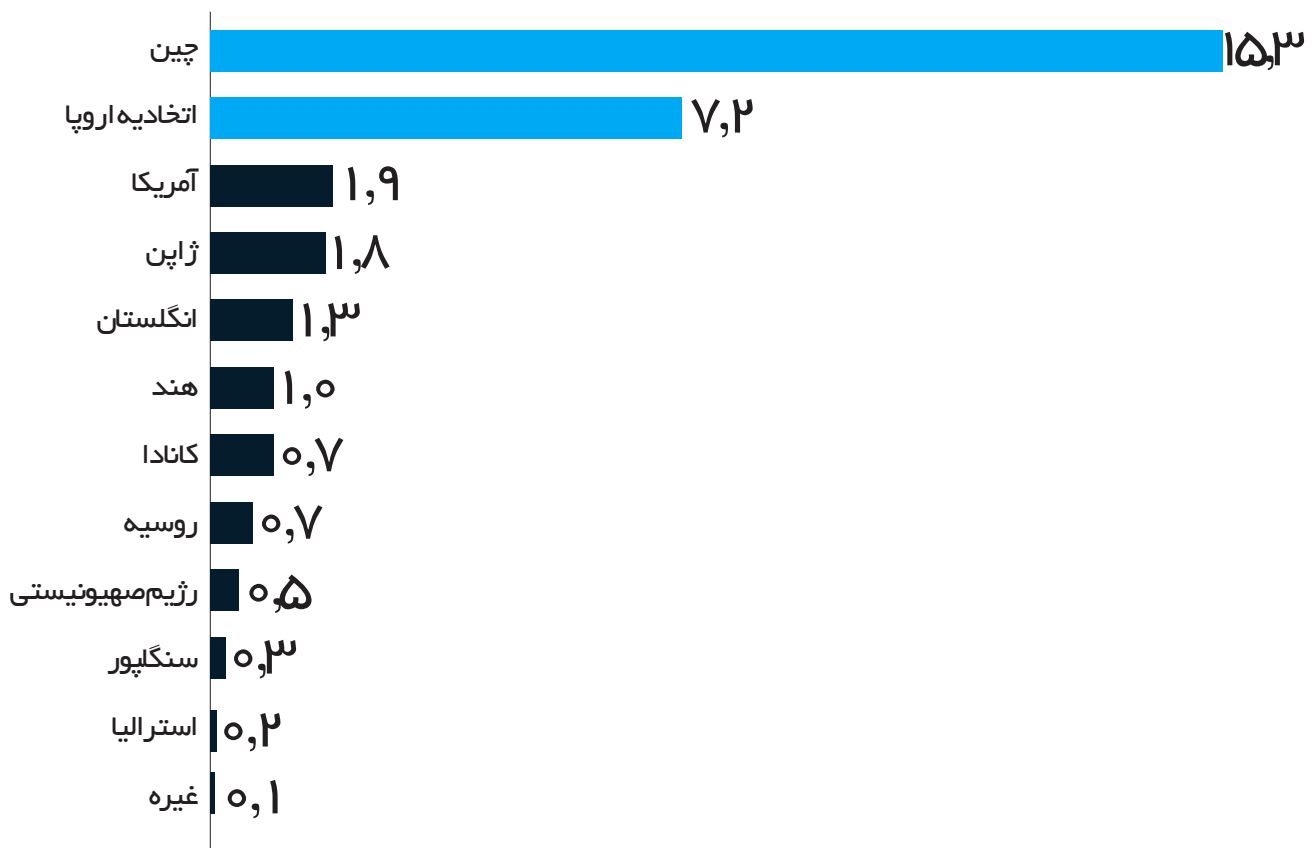
1. Quantum Key Distribution (QKD)
2. Quantum Teleportation
3. Micius

۲. وضعیت جهانی فناوری کوانتوم [

۲-۱. وضعیت جهانی سرمایه‌گذاری در فناوری کوانتوم
کشورهای مختلف در زمینه فناوری کوانتوم در حال سرمایه‌گذاری هستند. شرکت مک‌کنزی در یک گزارش خود به بررسی میزان سرمایه‌گذاری کشورها در حوزه‌های مختلف فناوری کوانتوم پرداخته است. اطلاعات سرمایه‌گذاری‌های کشورهای جهان در شکل ۱ قابل مشاهده است (Masiowski et al., 2022).

کشورهای جهان در حال سیاست‌گذاری و انجام اقدام‌های متعددی برای توسعه فناوری کوانتومی هستند. در این بخش ابتدا وضعیت جهانی سرمایه‌گذاری در فناوری کوانتومی ذکر می‌شود. سپس مقایسه کشورها از زاویه دید تحقیقات بیان می‌شود و در ادامه جایگاه کشورها در زمینه اختراعات مقایسه می‌شود.

شکل ۱. هزینه‌های دولتی در صنعت کوانتوم (بر حسب میلیارد دلار)



کرده‌اند و با سرمایه‌گذاری‌های کلان در این حوزه، سعی در تثبیت موقعیت‌شان در صنعت کوانتوم دارند. البته این تنها سرمایه‌گذاری‌های آشکار است، بخشی از سرمایه‌گذاری‌ها نیز در تحقیقات محرمانه انجام می‌شود. مثلاً در افشاکری‌های اسنودن فاش شده است که سازمان اطلاعات ملی آمریکا از سال ۱۳۹۲ در حال سرمایه‌گذاری مخفیانه روی کدگشایی و شنود با استفاده از قابلیت‌های کوانتومی بوده است.^۱

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود چین با بیش از پانزده میلیارد دلار به تنهایی بیش از باقی کشورهای جهان در زمینه فناوری کوانتومی سرمایه‌گذاری کرده است. اتحادیه اروپا در ادامه با بیش از ۷ میلیارد دلار در جایگاه دوم قرار گرفته است و ایالات متحده آمریکا با اعتبار کمتر از ۲ میلیارد دلار در رتبه سوم قرار می‌گیرد. سایر کشورهای مطرح شامل ژاپن، انگلستان و هند و کانادا می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کشورهای صنعتی، فناوری کوانتوم را در آینده جهان مهم ارزیابی

1 <https://www.theverge.com/2014/11/2/5267430/nsa-reportedly-secretly-funding-code-breaking-quantum-computer-research>



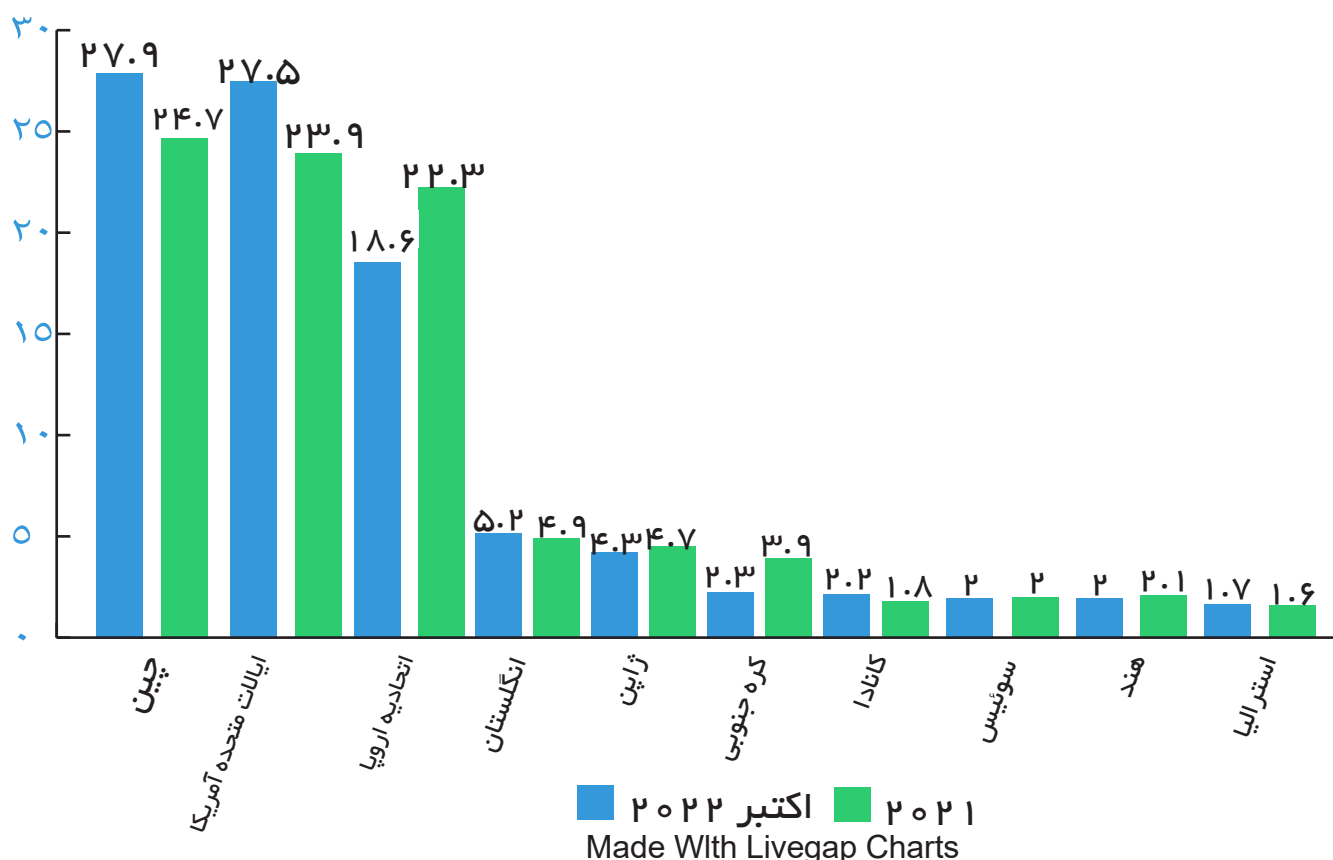
۲-۲. وضعیت جهانی نیروی انسانی فناوری کوانتوم

نیروی انسانی کشورهای دو زاویه کیفیت و کمیت قابل مقایسه است. کیفیت نیروی انسانی به واسطه سهم کشورهای از تحقیقات علمی با کیفیت و کمیت آن به واسطه محاسبه تعداد نیروی انسانی مرتبط با این

حوزه قابل مقایسه است.

در حوزه نشر مقالات علمی در مجلات باکیفیت بالا در حوزه‌های نزدیک به کوانتوم (علوم فیزیک) توسط ۱۰ کشور برتر به ترتیب شاخص نیچر در شکل زیر دیده می‌شود (McKinsey, 2022):

شکل ۲. سهم کشورها از مقاله‌های معتبر مرتبط با کوانتوم (سال ۲۰۲۱)



مآخذ: شرکت مشاوره‌ای مک کنزی و استخراج آمار نیچر توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

جایگاه ۱۷م قرار دارد، ایران با سهم ۰/۰۴ درصدی در جایگاه ۳۲م، عربستان با ۰/۰۶ درصدی در جایگاه ۳۱ و ترکیه با سهم ۰/۰۵ درصدی در جایگاه ۴۰م جهانی از سهم مقالات باکیفیت قرار می‌گیرد. ترکیه و اسرائیل با وجود آمار بسیار پایین مقالات معتبر هر کدام حداقل ۱ و ۲ شرکت نوپای کوانتومی را میزبانی می‌کنند و مقدار کم مقالات علمی این کشورها ممکن است به دلیل ترجیح محرمانگی تحقیقات آنها باشد. آمار فارغ التحصیلان رشته‌های مرتبط با فناوری کوانتوم، یعنی رشته‌های بیوشیمی، شیمی، مهندسی شیمی، IT، ریاضیات و آمار و فیزیک در کشورهای پیشرو در حوزه کوانتوم نیز بخشی دیگر از مجموع نیروی کار قابل استفاده در حوزه کوانتوم را نشان می‌دهد (McKinsey, 2022):

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود در سال گذشته میلادی مؤسسات چین به تنهایی در ۲۴/۷ درصد از کل مقالات از مقالات علمی در مجلات برتر حوزه علوم فیزیک سهم داشته است که در آخرین بررسی مرکز پژوهش‌های مجلس این عدد به ۲۷/۹ درصد رسیده است. ایالات متحده آمریکا و اتحادیه اروپا در ادامه با سهم ۲۷/۵ و ۱۹ درصدی در جایگاه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در ادامه ژاپن و انگلستان قرار دارند. در جایگاه ده کشور برتر چاپ‌کننده مقالات باکیفیت، چین و آمریکا هم در جایگاه برتر قرار دارند و در حال رشد نیز هستند، ولی سهم اتحادیه اروپا به نسبت این دو کشور کاهش یافته است. در منطقه غرب آسیا، رژیم اشغالگر قدس سال گذشته سهم ۱/۱۲ درصدی را از آن خود کرده بود و امسال نیز با سهم ۱/۹ درصدی در

جدول ۱. آمار فارغ التحصیلان رشته‌های مرتبط با حوزه کوانتوم

کشور	جمع فارغ التحصیلان مرتبط (نفر)
اتحادیه اروپا	۱۰۳،۴۰۲
هند	۶۵،۹۱۳
چین	۴۶،۳۱۲
آمریکا	۴۰،۵۶۹
روسیه	۱۸،۶۱۳
انگلستان	۱۱،۲۱۹

در کشور انتقاد کرده‌اند.

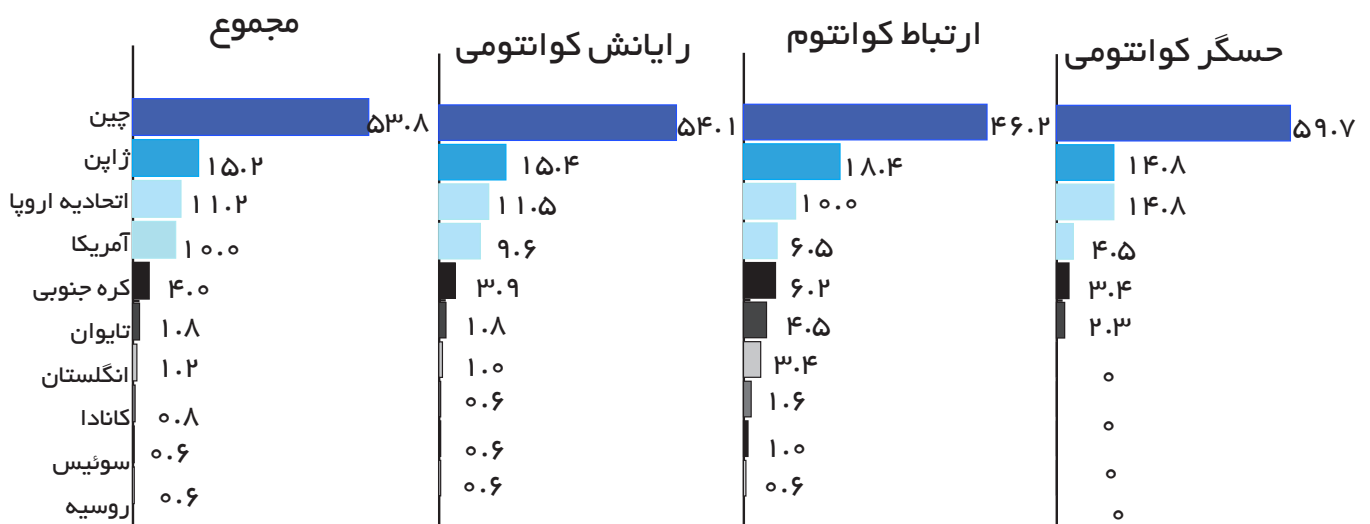
۲-۳. وضعیت جهانی اختراعات در فناوری کوانتوم

آمار اختراعات ثبت شده کوانتومی در حوزه‌های مختلف و کشورهای مختلف نشان دهنده میزان توانایی بالقوه کشورها در تجاری سازی و کاربردی سازی پژوهش‌هاست (Masiowski et al., 2022). شکل ۳ مقایسه سهم کشورها از اختراعات حوزه کوانتوم در سه زیر حوزه مهم حسگرهای کوانتومی، ارتباطات کوانتومی و رایانش کوانتومی را نشان می‌دهد.

همان طور که در جدول ۱ دیده می‌شود چین و آمریکا فارغ التحصیل کمتری به نسبت هند و اتحادیه اروپا دارند، ولی در زمینه ثبت اختراعات و نگارش مقالات با کیفیت در حوزه کوانتوم جایگاه بالاتری دارند. در جدول بالا رشته‌های علوم پایه در زمره رشته‌های مرتبط با فناوری کوانتوم محاسبه شده است. با توجه به اینکه در ایران، دانش آموزان نخبه تمایل بیشتری به تحصیل در رشته‌های مهندسی دارند تا علوم پایه، باید سیاستگذاری صحیحی در این حوزه انجام شود.

مقام معظم رهبری نیز چندین بار در بیاناتشان به اهمیت جایگاه علوم پایه در کشور پرداخته‌اند و نسبت به غفلت از علوم پایه و عدم توجه کافی به این علوم

شکل ۳. آمار نسبی اختراعات ثبت شده در حوزه فناوری کوانتوم (درصد)



Source: McKinsey, 2022.



اختراع، در نهایت به عملکرد بهتر شبکه نسل پنجم چین منجر شد^۱ به نظر می‌رسد چین در زمینه فناوری‌های کوانتومی نیز سلطه فناورانه ایالات متحده آمریکا را عملاً به چالش بکشد. در سامانه ثبت اختراعات ایرانیان، ۳۵ اختراع با کلیدواژه کوانتوم دیده می‌شود که در مقایسه با ۱۹۵۷۱ اختراع ثبت شده در جهان (Mateo Aboyet.all, 2022) تا پایان سال ۲۰۲۱، سهم ایران حداکثر ۰/۱۷ درصد خواهد بود.

۴-۲. آمار جهانی شرکت‌های نوپا

آمار جهانی استارت‌آپ‌های فعال در سه حوزه پرطرفدار فناوری‌های کوانتومی نیز نشان از جایگاه ویژه اقتصادی این فناوری است (McKinsey, 2022):

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، تعداد اختراعات ثبت شده آمریکا از چین بسیار کمتر است در حالی که بیشترین تعداد شرکت‌های کوانتومی در ایالات متحده آمریکا قرار دارد. از جمله دلایلی که می‌تواند دلیل این موضوع باشد توصیه نهاد‌های امنیتی آمریکا به فعالان کوانتومی این کشور است که فعالیت‌هایشان در این حوزه را محرمانه نگه دارند. این یعنی احتمالاً بخش عمده‌ای از فعالیت‌های آمریکایی‌ها مخفیانه است (Vicens, 2021). با توجه به ابزارها، اختراعات و تولید علم چینی‌ها در صنعت کوانتوم، تحلیل‌هایی وجود دارد که چین در رقابت کوانتومی از آمریکا پیشی گرفته و آمریکا تا امروز بازنده این رقابت است (Garisto, 2021)، البته این نظر، مخالفینی نیز دارد (Smalley, 2022). اما همان‌طور که در زمینه توسعه استانداردهای نسل پنجم مخابرات، برتری چین بر ایالات متحده آمریکا در زمینه حق

جدول ۲. آمار استارت‌آپ‌های حوزه فناوری کوانتوم

جمع	ارتباط کوانتومی	حسگر کوانتومی	رایانش کوانتومی	
۳۹۷	۱۱۱	۵۸	۲۲۸	تعداد استارت‌آپ‌ها
۴/۱ میلیارد دلار	۰/۷ میلیارد دلار	۰/۴ میلیارد دلار	۳ میلیارد دلار	سرمایه‌گذاری اولیه
۱۱ تا ۱۰۶ میلیارد دلار	۱ تا ۶ میلیارد دلار	۱ تا ۷ میلیارد دلار	۹ تا ۹۳ میلیارد دلار	برآورد بازار

امکان تحقق بازار بزرگ احتمال شکست پروژه‌ها نیز بالاست. مک‌کنزی گزارش کرده که در سال ۲۰۲۱ بیش از ۱/۴ میلیارد دلار در استارت‌آپ‌های کوانتومی صرف شده (که دو برابر سال ۲۰۲۰ است) و پیش‌بینی می‌کند این عدد تا سال ۲۰۳۵ به ۷۰۰ میلیارد دلار خواهد رسید. جالب این که طبق این گزارش هیچ کشور یا اتحادیه‌ای در جهان نیست که در ۶ سال گذشته تعداد استارت‌آپ‌های فعالش در حوزه فناوری‌های کوانتومی در تمامی زیرشاخه‌های اصلی آن، روندی نزولی داشته باشد. آمریکا با ۶۱ استارت‌آپ در حوزه رایانش کوانتومی، ۱۹ استارت‌آپ در حوزه ارتباط کوانتومی و ۱۳ استارت‌آپ در حوزه حسگرهای کوانتومی بیشترین تعداد استارت‌آپ در جهان را پشتیبانی می‌کند. در غرب آسیا، ترکیه و رژیم صهیونیستی به ترتیب ۲ و ۵ استارت‌آپ فعال در حوزه‌های مختلف فناوری کوانتومی دارد. روند کلی استارت‌آپ‌های حوزه رایانش کوانتومی در ۴ سال گذشته میلادی به شرح جدول ۳ است (McKinsey, 2022):

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود رایانش کوانتومی بزرگ‌ترین بازار حوزه فناوری کوانتوم به‌شمار می‌رود و پس از آن حسگرها و ارتباطات کوانتومی قرار دارند. همچنین، رایانش کوانتومی بیشترین جذب سرمایه‌گذاری را در این میان داشته است. اما ارتباطات کوانتومی با توجه به تأثیری که بر امنیت ارتباطات می‌گذارد می‌تواند نتیجه بخش‌تر باشد. نکته حائز اهمیت در آمارهای جدول ۲ این است که هزینه‌های برآورد شده مربوط به پروژه‌های آشکار و علنی است و پروژه‌های محرمانه در این محاسبات لحاظ نشده‌اند. این یعنی هزینه‌های صرف شده و بازار این فناوری احتمالاً بسیار بیشتر از چیزی باشد که در این جدول دیده می‌شود. این فناوری نوپا در همین سال‌های نخست با کمتر از ۴۰۰ استارت‌آپ در این حوزه، موفق شده بین ۱۱ الی ۱۰۶ میلیارد دلار چرخه مالی در بازار ایجاد کند، مشخصاً در اقتصاد آینده جهان جایگاهی ویژه خواهد داشت. تفاوت بسیار زیاد برآورد بازار پیشنهادی نشان‌دهنده مخاطره بالای فعالیت در این حوزه است، زیرا نشان می‌دهد که علاوه بر

۱. در سال ۲۰۲۲ طبق آمار اسپیدتست متوسط سرعت شبکه اینترنت نسل پنجم ارتباطات همراه در اپراتور دارای سهم غالب بازار ایالات متحده آمریکا ای تی اند تی ۵۸ مگابیت بر ثانیه و در اپراتور برتر چین چاینا موبایل ۲۰۲ مگابیت بر ثانیه است.

جدول ۳. آمار جهانی استارت‌آپ‌های جدید در حوزه فناوری کوانتوم

سال	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱
تعداد استارت‌آپ‌های جدید	۴۳	۳۹	۲۵	۱۵

از این جدول می‌توان نتیجه گرفت در طی چهار سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱، بازار کوانتوم تا حدودی تثبیت شده و سرعت رشد شرکت‌های کوانتومی کم شده، کشورها سیاست‌های خود را با کوانتوم مشخص کرده‌اند و این صنعت از هیجان اولیه شکل‌گیری یک فناوری جدید فاصله گرفته است. ورود به این صنعت هم به لحاظ علمی و هم به لحاظ نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا بسیار دشوار است و دلیل دیگر کاهش سرعت رشد شرکت‌های کوانتومی می‌تواند این امر باشد.

۲-۵. وضعیت فناوری کوانتوم در چین

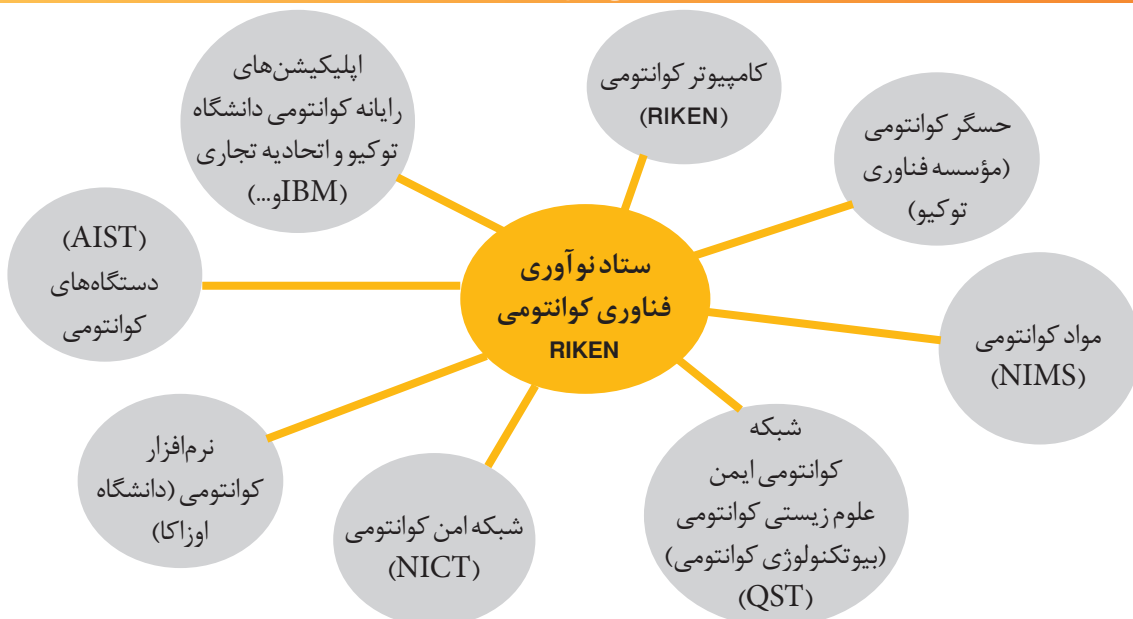
همان‌طور که در بخش آمار کلی مشاهده شد، چین در میزان سرمایه‌گذاری دولتی، تعداد ثبت اختراع و تعداد مقاله علمی منتشر شده در حوزه فناوری کوانتومی رتبه یک جهان است. چین موفق شده رادار کوانتومی بسازد و تله‌پورت کوانتومی را بین زمین و فضا انجام بدهد. قوی‌ترین رایانه کوانتومی جهان نیز در حال حاضر در اختیار چین است. چین در سال ۲۰۱۹ اعلام کرد که ۴٪ از تولید ناخالص ملی را صرف آموزش می‌کند و موضوع کوانتوم یکی از ۴ حوزه اصلی مورد توجه چین اعلام شد. در چین ۳۲ شرکت و ۱۲ مؤسسه در حوزه کوانتوم فعالیت دارند. ۳۰۰ میلیون دلار از بودجه ۱۵۳ میلیارد دلاری کوانتومی چین، صرف استارت‌آپ‌های کوانتومی چین و ثبت اختراعات در این حوزه شده است.

۲-۶. وضعیت فناوری کوانتوم در ژاپن

ژاپن از حدود سال ۱۹۸۵ به صنعت کوانتوم ورود کرد (Tomita, 2021).

جایگاه جهانی خود دارد. بهترین عملکرد در سطح جهانی در موضوع تجاری‌سازی فناوری کوانتومی را داشته باشد. این کشور با تدوین راهبردهای ملی و همکاری‌های بین‌المللی سعی در بهبود جایگاه جهانی خود دارد. برای مثال دانشگاه توکیو با آی بی ام در حوزه فناوری کوانتوم همکاری می‌کند (japantimes.co.jp, 2021). این کشور در حوزه کوانتوم با آلمان و استرالیا نیز همکاری‌هایی داشته است (Mennicken, 2021). یک شرکت کوانتومی ژاپن به دلیل همکاری با ایران در لیست تحریم‌های ایالات متحده وارد شده است. ژاپن در سند ملی کوانتوم خود می‌خواهد به یک رایانه کوانتومی دست پیدا کند که ۱۰ میلیون کاربر داشته باشد (Kau- & Raj, 2022). شکل ۴، پروژه کوانتومی ژاپن را نشان می‌دهد که در کنار عنوان پروژه‌ها، مرکز یا نهادی که پروژه مذکور را پیگیری می‌کند نیز نوشته شده است:

شکل ۴. فعالیت‌های کوانتومی ژاپن (japantimes.co.jp, 2021)





فوتو-الکترونیک (با مبلغ ۲۰ میلیون دلار، از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۲) **MEXT**: ابرسازها برای رایانش کوانتومی، سنسورهای خاص کوانتومی و لیزرهای پیشرفته (با مبلغ ۲۰۰ میلیون دلار، از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۸).

MIAC: ماهواره با رمزنگاری کوانتومی.

NEDO: نسل بعدی رایانه‌های کوانتومی (با مبلغ ۵ میلیون دلار، از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۲).

JST:

□ کنترلگر حالات کوانتومی (از سال ۲۰۱۶).

□ عملیاتی‌سازی کوانتومی و نرم‌افزارهای کوانتومی (شامل دو بخش که بخش نخست از سال ۲۰۱۶ و بخش دوم از سال ۲۰۱۹).

□ ژیروسکوپ‌ها و ساعت‌های خاص کوانتومی (شامل دو بخش که یک بخش از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۹ و دیگری از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۸ زمانبندی شده است).

۲-۷. وضعیت فناوری کوانتوم در اتحادیه اروپا

هزینه‌هایی که در اروپا شده به تفکیک کشورها نیز در شکل ۵ قابل مشاهده است:

چشم‌اندازی که ژاپن در سند توسعه از صنعت کوانتوم بیان کرده عبارتند از:

۱. ترویج همکاری‌های بین‌المللی مانند برگزاری کارگاه‌های بین‌المللی و تحقیقات مشترک بین‌المللی.

۲. به اشتراک‌گذاری استراتژی‌ها در مورد مدیریت مالکیت معنوی و استانداردسازی بین‌المللی.

۳. ارتقای همکاری صنعت - دانشگاه - دولت از جمله تحقیقات مشترک از طریق پذیرش مهندسان بخش خصوصی.

۴. مشارکت پژوهشگران جوان و تقویت منابع انسانی بین‌رشته‌ای و بین‌سازمانی.

۵. حمایت از تحقیق و توسعه از طریق استفاده متقابل از امکانات تحقیقاتی، اشتراک‌گذاری خارجی امکانات.

ژاپن تاکنون هزینه‌های قابل توجهی در صنعت کوانتوم داشته و پروژه‌های مختلفی را اجرا کرده است که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره داشت (Tomita, 2019):

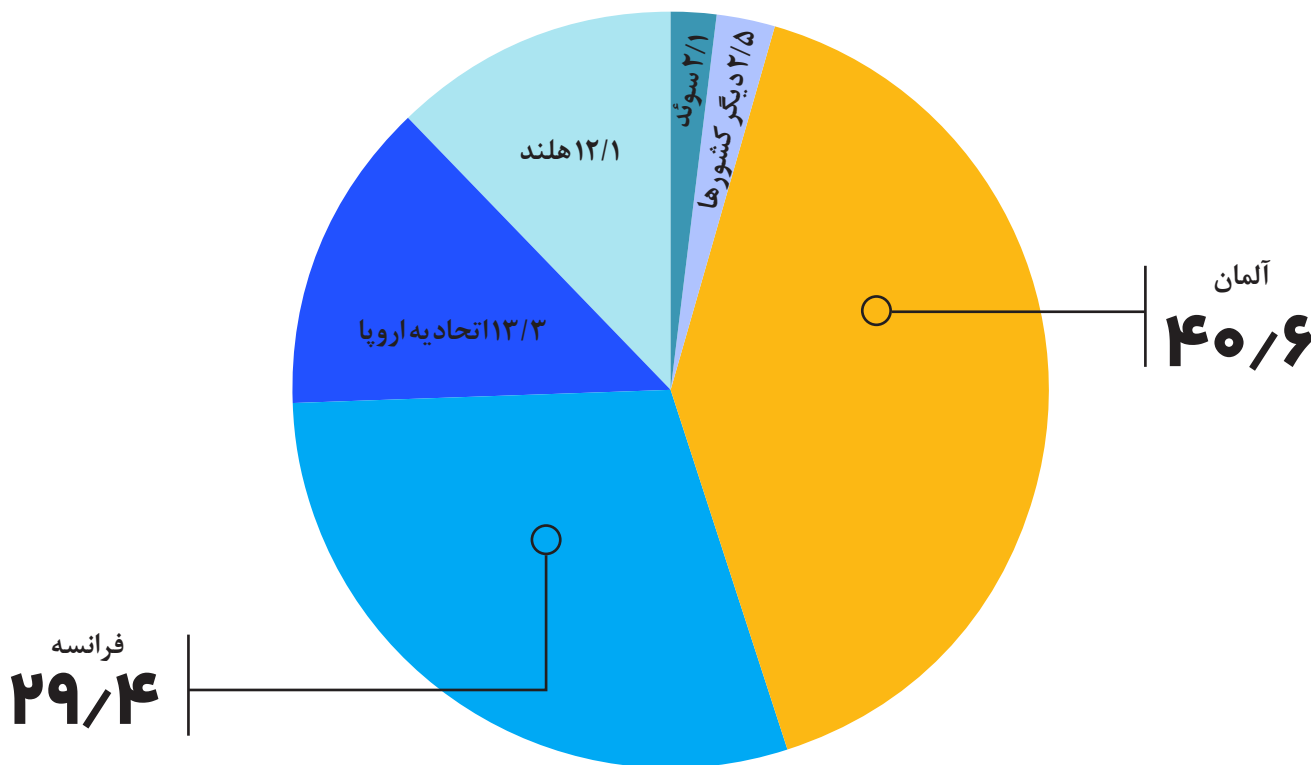
■ پروژه CAO:

□ **ImPACT**: شبکه عصبی کوانتومی، شبیه‌سازی کوانتومی، شبکه

امن کوانتومی (با مبلغ ۲۰ میلیون دلار، از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۱۸)

□ **SIP**: پردازش لیزری، رمزنگاری کوانتومی، پردازش کوانتومی

شکل ۵. نسبت هزینه‌های دولتی عضو اتحادیه اروپا در حوزه فناوری کوانتوم (درصد)



۱۰-۲. وضعیت فناوری کوانتوم در ایران

در سال ۱۳۹۸ نخستین نقشه راه فناوری کوانتوم تدوین شد و سپس جهت تصویب به شورای عالی انقلاب فرهنگی و مجلس شورای اسلامی تقدیم شد (سلام نو، ۲۰۱۹) که مصوب نشد و سند دیگری در شورای عالی انقلاب فرهنگی در این حوزه در حال تدوین است (شورای عالی انقلاب فرهنگی، ۲۰۲۰). به موازات شورای عالی انقلاب فرهنگی، سندی دیگر نیز در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات در حال تدوین است (سیتنا، ۲۰۱۹). همچنین دانشگاه عالی دفاع ملی نیز یک نقشه راه جامع کوانتومی تدوین کرده است. البته در سند راهبردی جمهوری اسلامی ایران در فضای مجازی مصوب شورای عالی فضای مجازی مورخ ۱۴۰۰/۳/۱۷ معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری به عنوان دستگاه متولی پردازش کوانتومی معرفی شده است. به طور کلی اصلی ترین نهادهای فعال در کشور در حوزه علوم و فناوری های کوانتومی عبارتند از:

- مرکز فناوری های کوانتومی ایران ذیل سازمان انرژی اتمی
- پژوهشکده ریاضیات و فیزیک پژوهشگاه دانش های بنیادی
- مجموعه غیردولتی شبکه توسعه علوم و فناوری های کوانتومی (شبکه کوانتک)
- مرکز تحقیقات راهبردی دفاعی
- پژوهشکده فوتونیک و فناوری های کوانتومی
- پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (ارتباطات کوانتومی نوری)
- معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری

امروزه سرفصل های دروس مرتبط با علم اطلاعات کوانتومی و کاربردهای آن در دانشگاه ها تدریس می شود. طبق اسناد ایران داک ۱۴۴۲ پایان نامه ارشد و دکترا با موضوعی مرتبط با کوانتوم نوشته شده است. همچنین پژوهشگاه لیزر و پلاسما در دانشگاه شهید بهشتی از سال ۱۳۷۲ در موضوعات کوانتومی شروع به فعالیت کرد و از سال ۱۳۸۱ رشته فوتونیک در این دانشکده تأسیس شد، از سال ۱۳۹۳ نیز این پژوهشکده پذیرش دانشجوی دوره دکترا در حوزه پلاسما را آغاز کرد، هر چند پلاسما مستقیماً مرتبط با کوانتوم نیست، ولی پذیرش دانشجوی دکترا در این مرکز گامی اساسی در اهداف آموزشی این پژوهشگاه بود. طبق اسناد ثبت شده در سازمان ثبت اسناد کشور، ۳۵ اختراع با کلیدواژه کوانتوم، ثبت داخلی شده است که از علم مواد تا محاسبه گر کوانتومی را شامل می شوند که ۱۷ صدم درصد از کل اختراعات کوانتومی جهان را شامل می شود. اما آخرین اختراعات ثبت شده در این پایگاه مربوط به سه سال پیش است. نقشه زیر بر حسب تعداد اختراعات ثبت شده کوانتومی رنگ آمیزی شده است، هر چه تعداد اختراعات کوانتومی یک کشور بیشتر باشد، آن کشور رنگی تیره تر دارد که رنگ ایران در این نقشه سفید است.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود آلمان، فرانسه، سوئد و هلند در بین کشورهای اتحادیه اروپا بیشترین بودجه را در صنعت کوانتوم دارند، چنانکه ۴۱٪ از بودجه مصرفی در اتحادیه اروپا در حوزه کوانتوم توسط آلمان تأمین شده است. ۱۳/۳٪ از بودجه کوانتومی در اتحادیه اروپا از طرف اتحادیه اروپا برای پروژه های مشترک اتحادیه تخصیص داده شده است. کشورهای عضو اتحادیه اروپا مشترکاً پروژه های دانش بنیان مهمی در ابعاد اتمی و زیر اتمی اجرا کرده اند که معروف ترین آن پروژه سرن است. با توجه به تجربه پیشینی در پروژه های مشترک علمی اتحادیه اروپا این احتمال وجود دارد که پروژه های مرتبط با حوزه کوانتوم در اتحادیه اروپا - مانند برنامه پردازی کوانتومی (digital-strategy.ec.europa.eu, 2022) - اهمیتی بنیادین و استراتژیک در این فناوری داشته باشد.

۸-۲. وضعیت فناوری کوانتوم در آمریکا

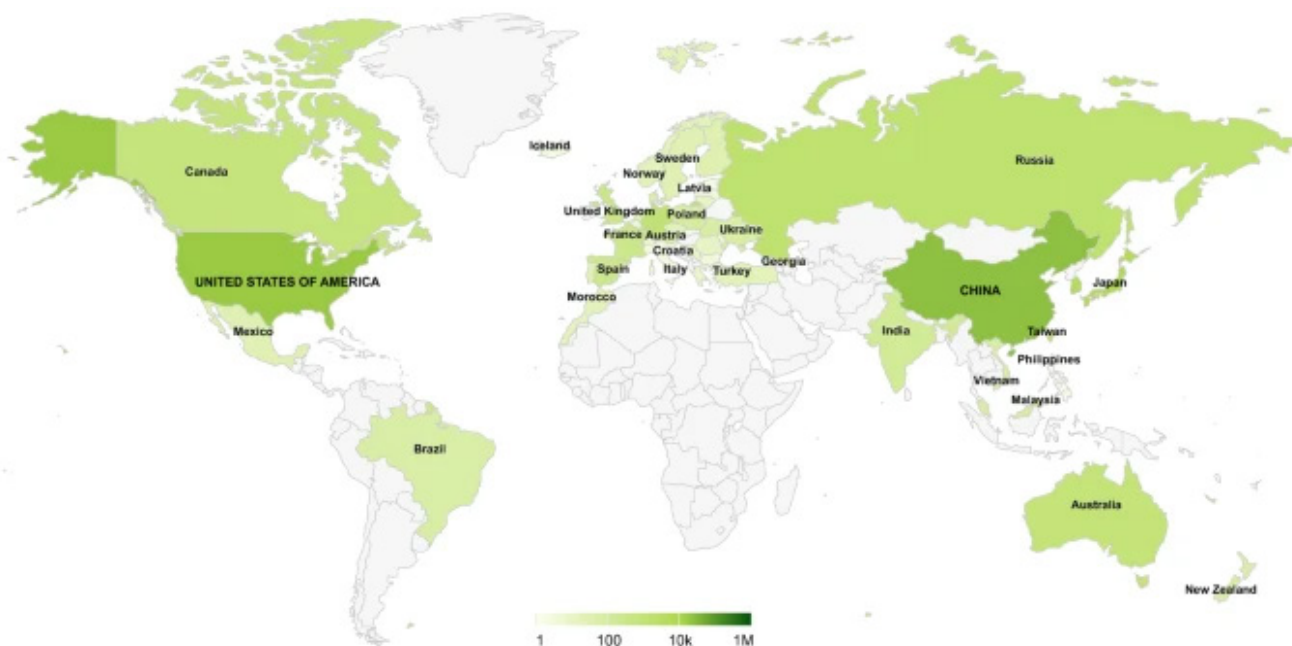
بخش خصوصی آمریکا در حوزه فناوری های کوانتومی بسیار فعال است، چندین پردازشگر کوانتومی در شرکت های مختلف تولید شده که از جمله آنها می توان به نخستین پردازنده کوانتومی یعنی D-Wave اشاره کرد. در دوران ترامپ، آمریکا هزینه تحقیقات کوانتومی را ۲۰٪ افزایش داد و ۲۳۷ میلیون دلار برای این منظور تخصیص داده شد، در دوران ریاست جمهوری بایدن نیز ۱۵۳ میلیون دلار برای تحقیقات کوانتومی تخصیص یافت که این بودجه به سه نهاد وزارت انرژی، سازمان ملی استاندارد و بنیاد ملی علوم تعلق یافت (Wong, 2022). آمریکا چشم انداز دستیابی به کامپیوتر کوانتومی ۱۰۲۴ کیوبیتی تا سال ۲۰۲۵ را در برنامه ریزی هایش دارد. این کشور تاکنون ۱/۹ میلیارد دلار صرف فناوری کوانتومی کرده است که ۵۷/۶٪ از این بودجه صرف رایانش کوانتومی، ۱۳/۹٪ ارتباط کوانتومی و ۲۸/۵٪ صرف حسگر های کوانتومی شده است. آمریکا بیش از ۴۰ هزار فارغ التحصیل مرتبط با علم کوانتوم دارد و بیشترین تمرکز استارت آپ های کوانتومی در جهان متعلق به این کشور است.

تحریم های آمریکا علیه فعالیت های کوانتومی در چین، پاکستان، روسیه و حتی ژاپن بخش دیگری از سیاست این کشور است. در این زمینه حداقل ۲۸ مورد تحریم ثبت شده است و بهانه های این تحریم ها از همکاری با ایران و کره شمالی تا تحریم ها علیه ارتش آزاد ملی چین و... را شامل می شود.

۹-۲. وضعیت فناوری کوانتوم در رژیم اشغالگر قدس

رژیم صهیونیستی با هزینه ۵۰۰ میلیون دلاری یکی از دو کشور غرب آسیاست که در حوزه کوانتوم فعالیت می کند (کشور دیگر ترکیه است). این رژیم ۴ پروژه استارت آپ در حوزه رایانش کوانتومی دارد و یک استارت آپ در دیگر بخش های فناوری کوانتومی را پیگیری می کند. این رژیم با بودجه ۶۹ میلیون دلاری فعالیت کوانتومی اش را شروع کرد و با هدف گذاری رسیدن به رایانه کوانتومی ۲۰ کیوبیتی وارد این عرصه شد (insidequantumtechnology.com, 2022).

شکل ۶. توزیع جهانی تعداد اختراعات ثبت شده کوانتومی در کشورهای مختلف



شرکت‌های دانش بنیان در زمینه تولید کوانتوم‌دات‌های^۲ پایه کربنی با کاربرد در زیست‌شناسی کوانتومی و پزشکی فعال هستند (مهران، ۲۰۲۰)، همان‌طور که مشاهده شد طبق گزارش‌های بین‌المللی (McKinsey, ۲۰۲۲) و (Dargan, ۲۰۲۱) و بررسی اطلاعات پایگاه‌های استنادی داخلی، کشور ایران در زمینه تجاری‌سازی و بهره‌گیری از فناوری کوانتوم با دیگر کشورهای فعال در این حوزه مورد مقایسه قرار نگرفته است.

سازمان انرژی اتمی ایران در سال ۱۳۹۹ که آزمایش ارتباط کوانتومی با برج میلاد را رسماً اعلام کرد، تلاش برای رمزنگاری در هوای آزاد و بستر فیبر، حوزه‌هایی مدارهای مجتمع نوری، نوبری کوانتومی، متروپولوژی کوانتومی و رادار کوانتومی، ساعت اتمی، شبیه‌ساز اتمی و زیست‌شناسی کوانتومی را نیز با اولویت در دستور کار اعلام کرده است. اولویت دادن به صنعت کوانتوم و تخصیص منابع مالی در این زمینه خواست مشترک انجمن‌های علمی^۱ و نهادهای اجرایی است (dolat.ir, ۲۰۲۰). همچنین بعضی

[جمع‌بندی و پیشنهادها]

خواهد کرد، البته با ظهور رایانش کوانتومی نه فقط امنیت، بلکه علوم و فناوری مانند هوش مصنوعی، بهینه‌سازی، مدل‌سازی و... با رایانش کوانتومی متحول خواهند شد.

با توجه به نوپا بودن علم کوانتوم و فناوری کوانتومی، این علم هنوز در حال رشد است و دامنه کاربردهای صنایع کوانتومی به سرعت در حال گسترش است و فعلاً تنها بخشی کوچکی از این علم پیمایش شده است. این امر به معنای دو نتیجه بسیار مهم است، نخست اینکه پیشرفت در فناوری کوانتومی، نیازمند تدوین استراتژی کلان‌نگر است و دوم اینکه در آینده کشورهایی که از دسترسی به محصولات کوانتومی محروم باشند (اعم از تولید یا خرید)، از منظر امنیتی به شدت آسیب پذیر خواهند بود.

فناوری کوانتومی اطلاعات به‌عنوان یک زیربخش از فناوری کوانتومی، رایانش و محاسبات را متحول کرد. در نتیجه این تحول، امنیت الگوریتم‌های رمزنگاری کلاسیک و رایج فعلی در برابر مهاجم مجهز به کامپیوتر کوانتومی مخدوش شد. لذا باید آسیب‌های جهان‌پساکوانتومی به‌دقت پیش‌بینی شود، برای مثال برخی از مهم‌ترین رمزها مثلاً بیتکوین در برابر رایانه‌های کوانتومی آسیب‌پذیر هستند (medi-um.com, 2019). عمدتاً بررسی، کشف و اصلاح این الگوریتم‌ها نیازمند ایجاد سخت‌افزار نیست، بلکه باید رویکرد مدیریتی و علمی مناسبی اتخاذ شود. تحلیل الگوریتم‌های امنیتی و رمزنگاری تمامی زیرساخت‌های رمزنگاری و امنیتی کشور باید در دستور کار قرار گیرد. مهاجم مجهز به رایانش کوانتومی، امنیت سایبری را به‌راحتی تهدید

۱. رجوع شود به دیدگاه شورای اجرایی شاخه علوم و فناوری اطلاعات کوانتومی درباره علوم و فناوری کوانتومی در ایران (۱۴/۰۴/۱۳۹۹).

در این حوزه نمی‌توان به نتیجه رسید و لازم است سرمایه‌گذاری‌های سخت‌افزاری در نهادی متمرکز انجام شود و دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دیگر به صورت مشترک از آن استفاده کنند.

در ترسیم نقشه راه باید به سؤالات زیر پاسخ داده شود:

- جزئیات وضعیت کشورهای دیگر (اعم از متحد، رقیب و دشمن) در حوزه کوانتومی چیست؟
- صنایع کوانتومی به نسبت دیگر نیازهای کشور در چه سطحی از اهمیت و فوریت قرار دارد؟
- تا چه اندازه صنایع کوانتومی به رفع نیازهای بنیادین کشور اعم از اقتصاد، بهداشت، رفاه اجتماعی، امنیت و... کمک می‌کند؟
- رشد رایانه‌های کوانتومی در جهان چه تهدیدهایی به همراه دارد؟
- توسعه فناوری کوانتومی سایر کشورها چه آسیب‌های احتمالی برای ایران خواهد داشت و چه اقدام‌هایی باید در کشورمان انجام شود؟
- برای حفظ و تأمین نیروی کار کوانتومی کشور چه باید کرد؟
- با توجه به هزینه‌های بالای فناوری کوانتومی چه میزان مداخله همه‌جانبه در این صنعت ممکن است؟
- کدام حوزه‌های فناوری کوانتومی در اولویت سرمایه‌گذاری همه‌جانبه است؟
- در کدام بخش‌ها دنباله‌روی از کشورهای پیشرو گزینه بهتری است؟
- در چه حوزه‌هایی واردکننده و مصرف‌کننده بودن کفایت می‌کند؟

با توجه به گزارش‌های رسمی از جمعیت فارغ‌التحصیلان دانشگاهی، ایران در کمیت فارغ‌التحصیلان مرتبط با فناوری کوانتوم از کشورهای است که جایگاه خوبی دارد، در رویکرد آکادمیک برای نیل به اهداف توسعه کوانتومی باید از تولیدات علمی آن حمایت شود.

صنعت کوانتوم یک صنعت پرهزینه است، چین به تنهایی بیش از ۱۵ میلیارد دلار در فناوری کوانتومی هزینه کرده است. پیش‌بینی‌هایی وجود دارد که تا سال ۲۰۳۵، حجم مالی تزریق شده به این فناوری - در سطح جهانی - به بیش از ۷۰۰ میلیارد دلار برسد. لذا در ترسیم نقشه راه تکنولوژی کوانتومی باید به نکات زیر توجه داشت: اولاً به دلیل نوپا بودن این فناوری این خطر وجود دارد که به راحتی در دام پروژه‌های هزینه‌بر و بی‌کاربرد گرفتار شد و باید احتیاط لازم را داشت. ثانیاً به دلیل هزینه‌های بالای پروژه کوانتومی، باید در تمامی گام‌ها و پروژه‌ها نگاه اقتصادی و توجه به ظرفیت‌های موجود داشت و گر نه ممکن است اقدام‌ها به نتیجه نرسند. نکته آخر اینکه صنعت کوانتوم در سال‌های اخیر درگیر تبلیغات و داستان‌سازی‌های غیرعادی شده است، برخی دانشمندان نیز در این باره هشدارهایی داده‌اند (Das, 2022). تولید تجهیزات کوانتومی نیازمند پیش‌نیازها و محصولات مقدماتی متعددی است باید قدم به قدم با یک نقشه راه دقیق پیگیری شود. برای مثال پردازنده‌های کوانتومی نیازمند شرایط خلأ و دماهایی هستند که با سردکننده‌های عادی به دست نمی‌آید یا ریزآبینه‌ها، ابررسانا یا مشاهده‌گرهای کوانتومی نیازمند فناوری‌های سطح بالا هستند. در نتیجه با سرمایه‌گذاری پراکنده

[منابع و مآخذ]

۱. مرکز آ‌پا دانشگاه گلستان، (August 16, 2017)، اتصال غیر قابل هک ماهواره کوانتومی چین، مرکز تخصصی آ‌پا دانشگاه گلستان، Retrieved September 5, 2022, from <https://b2n.ir/n02256>
۲. سلام نو، (September 14, 2019)، نقشه راه کوانتومی کشور تدوین شده، سلام نو. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.salameno.com/news/29522797>
۳. سیتنا، (November 2, 2019)، دنیای آینده متعلق به کوانتوم است/ فناوری کوانتوم در میانه، سیتنا، Retrieved September 5, 2022, from <https://www.citna.ir/news/236343>
۴. شورای عالی انقلاب فرهنگی، (September 2, 2020)، ارائه سند توسعه فناوری کوانتوم تقدیر از برنامه‌های وزیر آموزش پرورش برای برگزاری کلاس‌های حضوری مدارس ارائه گزارش وضعیت خروج نخبگان، شورای عالی انقلاب فرهنگی. Retrieved September 5, 2022, from <https://sccr.ir/news/14449/1>
۵. تسنیم، (۲۰۲۱، ۲۷۱). آزمایش برج میلاد. ایران در جمع ۶ کشور برتر. Retrieved 98, 2022, from <https://tn.ai/2441125>
۶. مرکز فناوری کوانتومی، (۲۰۲۲، ۵۶). مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.icqts.ir>
۷. مهران، ف. (September 5, 2020)، ایران صاحب فناوری تولید کوانتوم دات‌های پایه کربنی شد، شرکت شیمی صنعت. Retrieved September 8, 2022, from <https://shimisanat.com/2020/09/05/carbon-based-quantum-dots>
۸. مهرانی، م. ترابرد کوانتومی از برج میلاد به برج آزادی! کسی صدای من رو می‌شنوه؟ سیتپور، 2021. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.sitpor.org/2021/05/quantum-teleportation>

9. China's growing investment in quantum computing. (2018, April 29). ID Quantique. Retrieved September 3, 2022, from <https://www.idquantique.com/chinas-growing-investment-in-quantum-computing/>
10. Cirac, J. I. (2020). Quantum computing and simulation. *Nanophotonics*, 10(1). <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2020-0351/html>
11. Dargan, J. (2021, April 29). 15 Leading Quantum Computing Countries in 2022. *The Quantum Insider*. Retrieved September 8, 2022, from <https://thequantuminsider.com/2021/04/29/leading-quantum-computing-countries/>
12. Degen, C. L. (2016, November 8). [1611.02427] Quantum sensing. *arXiv*. Retrieved September 5, 2022, from <https://arxiv.org/abs/1611.02427>
13. digital-strategy.ec.europa.eu. (2022, June 7). Quantum Technologies Flagship | Shaping Europe's digital future. *Shaping Europe's digital future*. Retrieved September 7, 2022, from <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>
14. Djordjevic, I. (2021). *Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction: An Engineering Approach*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821982-9.00016-2>
15. dolat.ir. (2020, September 27). انتشار وضعیت فناوری کوانتومی در ستاد راهبری اجرای نقشه جامع علمی کشور. دولت. Retrieved September 7, 2022, from <https://dolat.ir/detail/347866>
16. Garisto, D. (2021, July 15). China Is Pulling Ahead in Global Quantum Race, New Studies Suggest. *Scientific American*. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.scientificamerican.com/article/china-is-pulling-ahead-in-global-quantum-race-new-studies-suggest/>
17. Google. (-). Quantum tools for programmers. *google*. <https://quantumai.google/>
18. ICQTS. (2018, May 8). کوانتومی / شبیه‌سازی کوانتومی. مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.icqts.ir/portal/home/?news/255068/255243/255250/>
19. insidequantumtechnology.com. (2022, March 18). Israel national security project developing quantum computer for 'quantum independence'. *Inside Quantum Technology*. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.insidequantumtechnology.com/news-archive/israel-national-security-project-developing-quantum-computer-for-quantum-independence/>
20. Israel Innovation Authority Selects Quantum Machines to Establish the Israeli quantum computing center. (2022, July 19). *Israel Defense |*. Retrieved September 3, 2022, from <https://www.israeldefense.co.il/en/node/55219>
21. ITUPP. (2020, 9 1). Quantum communication. *ITU*. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/qit4n/Pages/ToR.aspx>
22. ITUPP. (2021, March 23). Quantum standards. *ITU*. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2021/0323/Documents/Peter%20Knight%20.pdf?csf=1&e=yAWDDi>
23. japantimes.co.jp. (2021, July 31). Japan's first commercial-use quantum computer starts operations. *The Japan Times*. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.japantimes.co.jp/news/2021/07/31/national/science-health/japan-quantum-computer/>
24. JNVDFIST. (-, --). *the Development of Future Industry and Social Transformation*. 11_Part2 Chapter2. Retrieved September 7, 2022, from https://www.mext.go.jp/en/content/20210315-mxt_kouhou02-000013440-13.pdf
25. Jones, A. Z. (2019, July 3). EPR Paradox in Physics - Definition and Explanation. *ThoughtCo*. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.thoughtco.com/epr-paradox-in-physics-2699186>
26. Kaur, D., & Raj, A. (2022, April 18). Japan's first domestic quantum computer targets 10m users by 2030. *Tech Wire Asia*. Retrieved September 7, 2022, from <https://techwireasia.com/2022/04/japans-first-domestic-quantum-computer-targets-10m-users-by-2030/>
27. Limos, M. A. (2020, December 23). NASA Just Quantum-Teleported Data Faster Than the Speed of Light. *Esquire Philippines*. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.esquiremag.ph/culture/tech/nasa-just-quantum-teleported-data-faster-than-the-speed-of-light-a00293-20201223>

28. Masiowski, M., Mohr, N., Soller, H., & Zesko, M. (2022, June 15). Quantum computing talent not on pace with funding. McKinsey. Retrieved September 6, 2022, from <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern>
29. Mateo Aboyet. all. (2022, 7 6). Mapping the Patent Landscape of Quantum Technologies: Patenting Trends, Innovation and Policy Implications. Mapping the Patent Landscape of Quantum Technologies: Patenting Trends, Innovation and Policy Implications. Retrieved 9 8, 2022, from <https://link.springer.com/article/10.1007/s40319-022-01209-3>
30. McKinsey. (2022, June 1). Quantum Technology Monitor. McKinsey. Retrieved September 6, 2022, from <https://b2n.ir/n09528>
31. medium.com. (2019, June 11). The Quantum Attack on Bitcoin. The countdown to the imminent collapse... | by Editor | DRIVE Insider. Medium. Retrieved September 5, 2022, from <https://medium.com/drive-insider/the-quantum-attack-on-bitcoin-d676017024bc>
32. Mennicken, L. (2021, June 21). Quantum Technology – Research in Japan. DWIH Tokyo. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.dwih-tokyo.org/en/2021/06/21/quantum-technology-research-in-japan/>
33. Norberg, L. (2019). First Ever Commercial Quantum Computer Now Available for \$10 Million. sci360.org. <https://www.extremetech.com/computing/84228-first-ever-commercial-quantum-computer-now-available-for-10-million>
34. Norberg, L. (2019, December 18). Google's Quantum Computer Works On 53 Qubits. Science 360. Retrieved September 3, 2022, from <https://sci360.org/googles-quantum-computer-works-on-53-qubits/>
35. Press, G. (2020). Calling On AI And Quantum Computing To Fight The Coronavirus. forbes.com. <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2020/04/14/calling-on-ai-and-quantum-computing-to-fight-the-coronavirus/?sh=7fbc5f4e66c4>
36. Quantum flagship. (-, --). Quantum Repeaters - Quantum Technology. Quantum Flagship. Retrieved September 5, 2022, from <https://qt.eu/discover-quantum/underlying-principles/quantum-repeaters/>
37. Rajasekar, S., & Velusamy, R. (2014). Quantum Mechanics II: Advanced Topics. CRC Press, Taylor & Francis Group.
38. Smalley, S. (2022, May 16). White House cyber official: U.S. beating China in race to quantum supremacy. CyberScoop. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.cyberscoop.com/white-house-u-s-china-quantum-jonah-force-hill/>
39. Squires, G. L. (2022, August 22). quantum mechanics | Definition, Development, & Equations. Britannica. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.britannica.com/science/quantum-mechanics-physics>
40. technologyreview.com. (2017, July 10). First Object Teleported from Earth to Orbit. MIT Technology Review. Retrieved September 5, 2022, from <https://www.technologyreview.com/2017/07/10/150547/first-object-teleported-from-earth-to-orbit/>
41. Thomson, A. (2019, October 23). Google Says Quantum Computer Beat 10,000-Year Task in Minutes. Yahoo Finance. Retrieved September 5, 2022, from <https://finance.yahoo.com/news/google-says-quantum-computer-beat-111008541.html>
42. Tomita, A. (2019, June 5). Activities on Quantum Information Technology in Japan. ITU. Retrieved September 7, 2022, from https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019060507/Documents/Akihisa_Tomita_Presentation.pdf
43. US laying groundwork for a quantum internet. (2020, April 27). CNBC. Retrieved September 3, 2022, from <https://www.cnbc.com/2020/04/27/us-laying-groundwork-for-a-quantum-internet.html>
44. Vicens, A. (2021, October 22). US warns that Beijing uses 'wide variety' of methods to steal trade secrets. CyberScoop. Retrieved September 7, 2022, from <https://www.cyberscoop.com/china-ai-quantum-national-security/>
45. Wang, B. (2017). More technical details about China's Quantum Radar claims and quantum radar lab work. nextbigfuture.com. More technical details about China's Quantum Radar claims and quantum radar lab work



46. What is a Quantum Bit (Qubit)? - Definition from Techopedia. (2017, June 1). Techopedia. Retrieved September 4, 2022, from <https://www.techopedia.com/definition/2742/quantum-bit-qubit>
47. Wong, T. (2022, August 9). Quantum in the CHIPS and Science Act of 2022. National Quantum Initiative. Retrieved September 3, 2022, from <https://www.quantum.gov/quantum-in-the-chips-and-science-act-of-2022/>



مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاسداران، روبروی پارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۵۸۷۵-۵۸۵۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وبسایت: rc@majles.ir