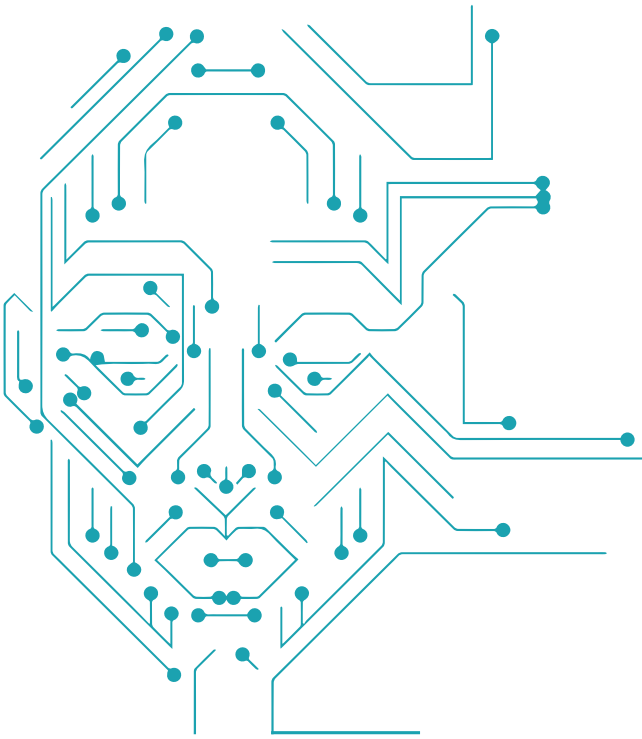
پژوهشگاه ارتباطات
و فناوری اطلاعات
(مرکز تحقیقات مخابرات ایران)

رصدنامه سیاستی اقتصاد دیجیتال و فناوری‌های نوین ـ شماره هفتم ـ اسفند ۱۴۰۴

از حکمرانی تا دیپلماسی در عصر کوانتومی



پژوهشگاه ارتباطات
و فناوری اطلاعات
(مرکز تحقیقات مخابرات ایران)

فهرست

۳ خلاصه مدیریتی

۵ پیشگفتار

۶ خانه کوانتوم؛ پیشران حکمرانی فناوری کوانتوم در زیست‌بوم ارتباطات و اطلاعات کشور

۹ شبکه‌های کوانتومی: ضرورت توسعه، وضعیت کنونی و چشم‌انداز آینده

۱۴ دیپلماسی کوانتومی: ظهور یک عرصه جدید در سیاست علم‌وفناوری جهانی

۲۰ شکاف مهارتی در انقلاب کوانتومی

۲۳ اقتصاد فیزیک کوانتومی در بازارهای مالی: تحلیل مدل‌های کوانتوم مالی

۲۷ فناوری‌های کوآنتومی: بازار، سرمایه‌گذاری و ملاحظات راهبردی

۳۲ بررسی راهبردهای ملی کوانتوم در کشورهای پیشرو و درس‌آموخته‌هایی برای ایران

۳۹ تنظیم‌گری ارتباطات کوانتومی در نظام حقوقی ایران

۴۴ صنعت ۶.۰ و رایانش کوانتومی: فرصت‌ها، چالش‌ها و الزامات حکمرانی فناورانه

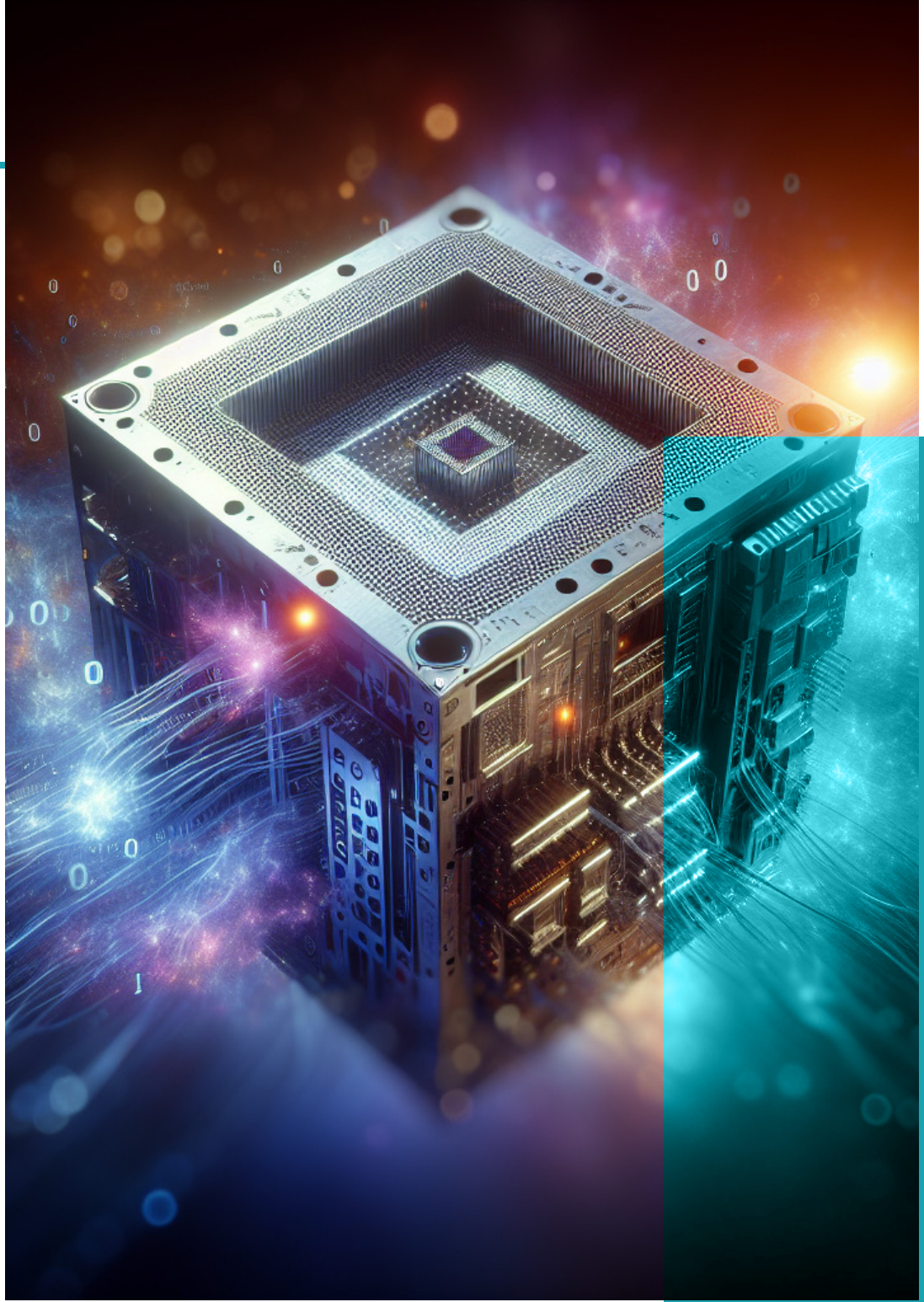
www.itrc.ac.ir

خلاصه مدیریتی

فناوری‌های کوانتومی در آستانه ایجاد تحولی پارادایمی در عرصه‌های ارتباطات، محاسبات و امنیت دیجیتال هستند. در این شماره از رصدنامه، به تحلیل جامع ابعاد راهبردی، اقتصادی و حکمرانی فناوری کوانتوم پرداخته شده است تا بستری برای شکل‌گیری نگاهی نوین در میان علاقه‌مندان و سیاست‌گذاران این حوزه فراهم آید. تمرکز اصلی این تحلیل، بر شناسایی فرصت‌های توسعه ملی، ریسک‌های حکمرانی و الزامات گذار به اقتصاد مبتنی بر کوانتوم است.

کلیدی‌ترین یافته‌های محوری این رصدنامه، بر معرفی «خانه کوانتوم» در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات و تبیین نقش آن در حکمرانی یکپارچه این فناوری و نقش آزمایشگاه‌های ارزیابی کوانتوم در کاهش ریسک فناورانه و پشتیبانی از تنظیم‌گری مبتنی بر شواهد متمرکز است. همچنین تحلیل انقلاب در بازارهای مالی از طریق مدل‌های کوانتوم مالی و بررسی سرمایه‌گذاری‌های جهانی در این حوزه را در بر می‌گیرد. نقش فناوری کوانتوم در تحول بازار کار، بررسی راهبردهای موفق کشورهای پیشرو با تأکید بر آموزش مهارت‌های موردنیاز و استخراج درس‌آموخته‌هایی برای ایران، تحلیل الگوی تنظیم‌گری چابک به‌عنوان عامل کلیدی در پیشرفت و تسهیل نوآوری و در نهایت بررسی همگرایی فناوری‌ها در صنعت ۶.۰ و نقش یکپارچه‌سازی رایانش کوانتومی با اینترنت صنعتی، هوش مصنوعی و رباتیک برای تحول اساسی در فرآیندهای تولید، از دیگر محورهای اساسی این رصدنامه هستند.

فناوری کوانتوم صرفاً یک «فناوری نوظهور» تلقی نمی‌شود، بلکه بنیان آینده اقتصاد دیجیتال و امنیت ملی است. موفقیت ایران در این عرصه، مستلزم خروج از رویکرد واکنشی و اتخاذ راهبرد تهاجمیِ مبتنی بر سرمایه‌گذاری هوشمند، تربیت نیروی انسانی و حکمرانی چابک است. این رصدنامه نشان می‌دهد که با برنامه‌ریزی منسجم و آغاز فوری اقدامات، می‌توان تهدیدهای بالقوه کوانتومی را به فرصت‌های ملموس توسعه تبدیل کرد و جایگاه راهبردی کشور را در نقشه جهانی فناوری‌های پیشرفته تثبیت نمود.



تهیه‌کنندگان برحسب حروف الفبا:

رزیتا اتحادی یزدی، سیده مریم اعتماد، ناهید بزرگ‌خو، عاطفه ترکمن، سارا توفیقی، فرشاد حکمی‌زاده، زهرا داودآبادی، اعظم صادق‌زاده، عاطفه فرازمند، لیلا محمدی، نیلوفر مرادحاصل، اعظم سادات مرتضوی، سیدمحمود نعمت‌اللّٰه‌زاده، آنیتا هادی‌زاده

ویراستاری: زهرا داودآبادی

ناظرین علمی: علیرضا یاری، نیلوفر مرادحاصل

اسفند ۱۴۰۴

پیشگفتار

در عصری که مرزهای دانش با سرعتی بی‌سابقه در حال گسترش است، فناوری‌های کوانتومی به‌عنوان یکی از تحول‌آفرین‌ترین دستاوردهای علمی بشر، در حال بازتعریف مفاهیم پایه‌ای در ارتباطات، محاسبات و امنیت هستند. فناوری‌های کوانتومی با افزایش توان محاسباتی و امنیتی به‌صورت نمایی، نه‌تنها صنایع سنتی مانند داروسازی، مواد پیشرفته و مالی را متحول خواهند کرد، بلکه با ایجاد بازارهای کاملاً جدید در حوزه‌هایی مانند رمزنگاری کوانتومی، سنجش فوق‌پیشرفته و محاسبات ابری کوانتومی، موجی از ارزش‌آفرینی را به همراه می‌آورند. بااین‌حال، این تحول عمیق می‌توانند با ایجاد اختلال در مدل‌های کسب‌وکار موجود، تشدید نابرابری دیجیتال بین کشورها و بخش‌های اقتصادی و جابه‌جایی گسترده مشاغل، تبعات پیچیده‌ای در توزیع ثروت، اشتغال و رقابت‌پذیری جهانی ایجاد کند. در این مسیر، کشورهایی که بتوانند با سرمایه‌گذاری هوشمند، توسعه زیرساخت‌ها و تنظیم مقررات چابک، خود را با این موج نو هماهنگ کنند، به بازیگران اصلی اقتصاد آینده تبدیل خواهند شد و در غیر این صورت، با خطر حاشیه‌نشینی در نظم اقتصادی نوین جهانی مواجه می‌شوند. برای ایران به‌عنوان کشوری با پشتوانه غنی علمی و تاریخی، این تحول نه‌تنها یک فرصت راهبردی برای جهش در عرصه‌های فناورانه و اقتصادی محسوب می‌شود، بلکه غفلت از آن می‌تواند به ایجاد شکافی عمیق و جبران‌ناپذیر در مسیر توسعه ملی بینجامد. این رصدنامه باهدف ترسیم نقشه جامعی از این عرصه نوپا، تحلیل تجارب جهانی و شناسایی ظرفیت‌ها و مخاطرات پیش‌روی کشور، سعی دارد تا با ارائه تصویری واقع‌بینانه و آینده‌نگر، چراغ راهی برای سیاست‌گذاران، پژوهشگران و سرمایه‌گذاران ایرانی باشد و گامی در جهت تبدیل تهدیدهای این انقلاب فناورانه به فرصتی تاریخی برای اعتلای ایران عزیز بردارد.

خانه کوانتوم؛ پیشران حکمرانی فناوری کوانتوم در زیست‌بوم ارتباطات و اطلاعات کشور

لیلا محمدی، عضو شورای سیاست‌گذاری و دبیر اجرایی خانه کوانتوم ایران، mohamady@itrc.ac.ir
سارا توفیقی، عضو هیئت‌علمی گروه ارتباطات نوری s.tofighi@itrc.ac.ir
عاطفه ترکمن، پژوهشگر گروه امنیت اطلاعات و سامانه‌ها، torkaman@itrc.ac.ir
سید محمود نعمت‌اللّه‌زاده، عضو هیئت‌علمی گروه سکوهای فناوری اطلاعات، m.nematzadeh@itrc.ac.ir

فناوری‌های کوانتوم در سال‌های اخیر از مرز پژوهش‌های صرف دانشگاهی عبور کرده و به‌تدریج در حال ورود به لایه‌های زیرساختی کشورها هستند. در اسناد راهبردی کشورهای پیشرو، کوانتوم نه به‌عنوان یک حوزه علمی مجزا، بلکه به‌عنوان توانمندساز امنیت، تاب‌آوری و حاکمیت زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی موردتوجه قرار گرفته است.

در این چارچوب، فناوری‌های کوانتوم مستقیماً با شبکه‌های ارتباطی، مراکز داده، امنیت اطلاعات، خدمات پایه ارتباطی و زیرساخت‌های حیاتی اطلاعاتی پیوند می‌خورند. از همین رو، نقش وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات در این حوزه، نقشی حاشیه‌ای یا صرفاً حمایتی نیست، بلکه نقشی محوری و راهبردی است. عدم ورود فعال، هوشمندانه و مرحله‌بندی شده به این حوزه می‌تواند در افق میان‌مدت، منجر به افزایش ریسک‌های امنیتی، وابستگی فناورانه و تضعیف قدرت تنظیم‌گری کشور شود.

جایگاه فناوری کوانتوم در مأموریت وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات

زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی کشور به طور یکپارچه در حوزه مأموریت وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات تعریف می‌شوند. این مأموریت صرفاً به توسعه شبکه‌های فیزیکی محدود نبوده، بلکه شامل امنیت اطلاعات، محرمانگی ارتباطات، تاب‌آوری شبکه‌ها و حکمرانی داده نیز می‌شود.

در این چارچوب، فناوری‌های کوانتوم در چندلایه کلیدی با مأموریت‌های وزارت ارتباطات هم‌پوشانی مستقیم دارند:

الف) زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی

فناوری‌هایی نظیر فناوری ارتباطات کوانتومی، شبکه‌های هیبرید کوانتوم-کلاسیک و در افق بلندتر شبکه‌های کوانتومی، به‌تدریج در کنار شبکه‌های نوری، IP، مراکز داده و شبکه‌های 5G و فراتر از آن قرار می‌گیرند. حضور رایانه‌های کوانتومی تأثیر به سزایی در سرعت پردازش اطلاعات خواهد داشت. این تحولات مستقیماً با مأموریت‌های مرتبط با توسعه و بهره‌برداری از زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی کشور پیوند دارند.

ب) امنیت اطلاعات و ارتباطات

یکی از مهم‌ترین ابعاد کوانتوم، تأثیر آن بر رمزنگاری و امنیت اطلاعات است. رمزنگاری کوانتومی(QC)، توزیع کلید کوانتومی (QKD) و رمزنگاری پساکوانتوم (PQC) پاسخ‌هایی فناورانه به تهدیدات آینده علیه محرمانگی، دسترس‌پذیری و یکپارچگی داده‌ها هستند. این موضوع مستقیماً در حوزه وظایف وزارت ارتباطات در زمینه امنیت اطلاعات، خدمات ارتباطی امن و زیرساخت‌های حیاتی اطلاعاتی قرار می‌گیرد.

ج) اپراتورها و شرکت مخابرات ایران

اپراتورهای ارتباطی ثابت و سیار و همچنین شرکت مخابرات ایران، بازیگران اصلی پیاده‌سازی این فناوری‌ها خواهند بود. تجربه جهانی نشان می‌دهد که بدون هدایت سیاستی وزارت متولی و بدون چارچوب تنظیم‌گری آینده‌نگر، ورود کوانتوم به شبکه‌ها یا به پروژه‌های نمایشی محدود می‌شود یا با ریسک‌های عملیاتی و امنیتی همراه خواهد بود. ازاین‌رو، وزارت ارتباطات باید نقش فعالی در تعریف نیازهای آینده کوانتومی اپراتورها و مدیریت مسیر گذار ایفا کند.

خانه کوانتوم؛ ابزار حکمرانی فناوری کوانتوم

در چنین بستری، «خانه کوانتوم» در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، نباید به‌عنوان یک مرکز پژوهشی صرف تلقی شود. خانه کوانتوم یک ابزار حکمرانی فناوری است که مأموریت آن ایجاد انسجام، جهت‌دهی و هم‌راستاسازی فعالیت‌های کوانتومی مرتبط با فاوا است.

خانه کوانتوم با ایفای نقش واسط میان سیاست‌گذاری، پژوهش و اجرا، می‌تواند از پراکندگی فعالیت‌ها جلوگیری کرده و مسیر توسعه کوانتوم را با نیازهای واقعی وزارت ارتباطات، اپراتورها و زیست‌بوم فناوری کشور هم‌راستا سازد.

جهت‌دهی فعالیت‌های دانشگاهی و شرکت‌های دانش‌بنیان

یکی از چالش‌های فعلی، عدم تطابق کامل میان فعالیت‌های دانشگاهی در حوزه فناوری‌های کوانتومی و نیازهای آینده زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی کشور است. خانه کوانتوم می‌تواند با تعریف نیازهای آینده وزارت ارتباطات، این فعالیت‌ها را به سمت حل مسائل واقعی سوق دهد.

در این چارچوب:

- دانشگاه‌ها به‌جای پروژه‌های پراکنده، روی مسائل اولویت‌دار متمرکز می‌شوند.
- شرکت‌های دانش‌بنیان مسیر مشخص‌تری برای تبدیل ایده به محصول پیدا می‌کنند.
- حمایت‌های پژوهشی هدفمندتر و اثربخش‌تر می‌شود.

آزمایشگاه‌های ارزیابی؛ ستون فقرات تصمیم‌سازی

باتوجه‌به مأموریت پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، «ایجاد آزمایشگاه‌های ارزیابی و اعتبارسنجی کوانتوم» به‌عنوان یکی از ارکان اصلی «خانه کوانتوم» محسوب می‌شود. این آزمایشگاه‌ها امکان:

- ارزیابی سطح بلوغ فناوری‌های کوانتومی،
- آزمون هم‌زیستی راهکارهای کوانتومی با شبکه‌های ارتباطی و اطلاعاتی موجود
- پشتیبانی از تنظیم‌گری و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد

را فراهم می‌کنند و از این طریق نقش کلیدی در «کاهش ریسک‌های فناورانه» و تسریع توسعه کاربردهای مطمئن این فناوری ایفا می‌کنند.

مدیریت مرحله گذار و اجرای پایلوت‌های عملیاتی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو، مرحله گذار از رمزنگاری کلاسیک به رمزنگاری پساکوانتوم و کوانتومی است.

این گذار نه ناگهانی خواهد بود و نه بدون ریسک. مدیریت این مرحله گذار، به‌ویژه در حوزه امنیت اطلاعات و ارتباطات، نیازمند برنامه‌ریزی، آزمون و پایلوت‌های عملیاتی است. همچنین تجهیزات کوانتومی (مانند QKD) که در کشور ساخته می‌شود و یا وارد می‌شود لازم است قبل از به‌کارگیری در پایلوت تست و عملکردشان سنجیده شود.

خانه کوانتوم می‌تواند بستر طراحی و اجرای پایلوت‌های عملیاتی هدفمند را فراهم کند؛ پایلوت‌هایی که:

- در مقیاس واقعی شبکه‌ها اجرا شوند.
- مشارکت اپراتورها و بهره‌برداران را داشته باشند.
- داده و تجربه لازم برای تصمیم‌سازی سیاستی و تنظیم‌گری را تولید کنند.

جمع‌بندی و افق پیش‌رو

در افق ۵ تا ۱۰ سال آینده، فناوری‌های کوانتوم به‌تدریج به بخشی از واقعیت زیرساخت‌های ارتباطی و اطلاعاتی کشورها تبدیل خواهند شد. کشورهایی که این گذار را از امروز به‌صورت مرحله‌بندی شده و مبتنی بر شواهد مدیریت کنند، قادر خواهند بود حاکمیت فناورانه و امنیت اطلاعات خود را حفظ کنند.

خانه کوانتوم، به‌عنوان پیشران حکمرانی فناوری کوانتوم، می‌تواند تضمین کند که وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات در این مسیر، کنشگر فعال و آینده‌نگر باقی بماند؛ نه واکنش‌گر دیرهنگام.

مراجع

1. ITU-T, Quantum Information Technology for Networks, Focus Group on Quantum Information Technology
2. NIST, Post-Quantum Cryptography Standards and Migration Guidance
3. European Commission, EU Quantum Flagship and Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)
4. UK Government, National Quantum Strategy
5. ETSI, Quantum-Safe Cryptography and QKD Reports

شبکه‌های کوانتومی: ضرورت توسعه، وضعیت کنونی و چشم‌انداز آینده

سارا توفیقی، عضو هیئت‌علمی گروه ارتباطات نوری s.tofighi@itrc.ac.ir

ظهور رایانه‌های کوانتومی تهدیدی جدی برای امنیت الگوریتم‌های رمزنگاری کلاسیک محسوب می‌شود. در پاسخ به این تهدید، ارتباطات کوانتومی) به‌عنوان راهکاری مبتنی بر قوانین فیزیک برای تأمین امنیت بلندمدت ارتباطات مطرح شده است. بااین‌حال، توسعه ارتباطات کوانتومی در مقیاس بزرگ با چالش‌های اساسی از جمله افت سیگنال در فواصل طولانی و محدودیت نرخ کلید امن مواجه است. در این مقاله به بررسی مسیر توسعه شبکه‌های کوانتومی به‌عنوان راهکاری برای حل این چالش پرداخته شده است.

همچنین وضعیت توسعه فناوری شبکه‌های کوانتومی در جهان و ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

ارتباطات کوانتومی و ضرورت توسعه آن

پیشرفت در علوم و فناوری‌های راهبردی، به‌ویژه فناوری‌های کوانتومی، نقش کلیدی در جایگاه بین‌المللی کشورها دارد [۱]. این فناوری‌ها با بهره‌گیری از اصول مکانیک کوانتومی (مانند برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی)، قابلیت‌هایی فراتر از فناوری‌های کلاسیک ارائه می‌دهند. در این میان، رایانه‌های کوانتومی پتانسیل حل مسائل پیچیده را با کارایی بالاتر دارند [۲] و به‌عنوان فناوری پشتیبان برای شبکه‌های آینده (مثل G6) مطرح هستند [۳]، هرچند هنوز با چالش‌های فنی مهمی مواجه‌اند. تهدید اصلی رایانه‌های کوانتومی، توانایی بالقوه آن‌ها در شکستن الگوریتم‌های رمزنگاری رایج مانند RSA است [۴].

برای مقابله با این تهدید، دو راهکار مکمل مطرح شده است:

- به‌کارگیری رمزنگاری پساکوانتومی به‌عنوان راهکار نرم‌افزاری و کوتاه‌مدت که بر مسائل ریاضی مقاوم در برابر الگوریتم‌های کوانتومی فعلی استوار است [۵]. این روش برای جلوگیری از سناریوی «ذخیره‌سازی حال و رمزگشایی آینده (Harvest Now Decrypt Later)» داده‌های حساس ضروری است. [۶]
- ایجاد ارتباطات و رمزنگاری کوانتومی به‌عنوان راهکاری سخت‌افزاری برای امنیت بلندمدت که امنیت آن مبتنی بر قوانین فیزیک کوانتومی است. هرگونه استراق سمع در این سامانه‌ها ذاتاً قابل آشکارسازی است [۷].

فناوری ارتباطات کوانتومی مجموعه‌ای از زیرفناوری‌های متعددی [۸-۹] است که توزیع کلید کوانتومی (QKD) بالغ‌ترین آنهاست که به مرحله تجاری‌سازی رسیده است و امکان تولید و توزیع امن کلیدهای رمزنگاری (مثلاً برای رمز یک‌بارمصرف (OTP)) را فراهم می‌کند [۱۰] . فرایند QKD شامل دو مرحله اصلی است: در مرحله اول، ارسال بیت‌های کدگذاری شده روی سیگنال‌های کوانتومی از فرستنده به گیرنده؛ مرحله دوم، انجام عملیات غربالگری، تصحیح خطا و تقویت حریم خصوصی از طریق یک کانال کلاسیک احراز اصالت‌شده برای استخراج یک کلید نهایی مشترک و امن [۷].

شبکه‌های کوانتومی و ضرورت توسعه آن

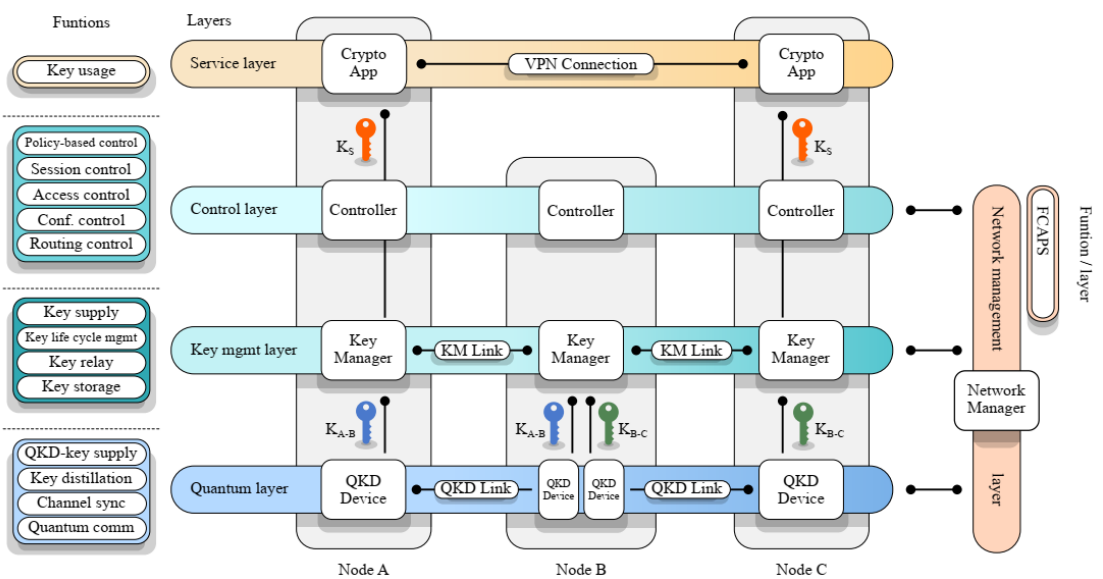
در سامانه‌های تجاری توزیع کلید کوانتومی (QKD)، نرخ کلید امن محدود بوده و با افزایش فاصله‌ی امن، کاهش

می‌یابد[۱۱]. برای برقراری ارتباط امن بین کاربران متعدد در فواصل طولانی، مشابه شبکه‌های کلاسیک با چالش افت و نویز کانال مواجه هستیم. در شبکه‌های کلاسیک از تکرارکننده‌ها برای غلبه بر این مشکل استفاده می‌شود، اما اصل «کپی ممنوع" در مکانیک کوانتومی مانع از پیاده‌سازی مستقیم این روش برای اطلاعات کوانتومی می‌شود. هدف نهایی ارتباطات کوانتومی، انتقال بلندبرد اطلاعات کوانتومی بین رایانه‌های کوانتومی از طریق «تکرارکننده‌های کوانتومی» و تحقق اینترنت کوانتومی است [۱۲]. این تکرارکننده‌ها بر پایه مفاهیمی مانند درهم‌تنیدگی و مبادله آن عمل می‌کنند، اما همچنان در مراحل تحقیقاتی بوده و با چالش‌های فنی مواجه‌اند. انتظار می‌رود اینترنت کوانتومی به‌صورت تدریجی محقق شود [۱۳]. در این چارچوب، مسیر گذار از شبکه‌های ارتباطی کلاسیک به شبکه اینترنت کوانتومی را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- شبکه کوانتومی مبتنی بر گره‌های قابل‌اعتماد
- شبکه کوانتومی مبتنی بر گره‌های نسبتاً قابل‌اعتماد
- شبکه کوانتومی مبتنی بر گره‌های غیرقابل‌اعتماد

در شبکه‌های مبتنی بر گره‌های قابل‌اعتماد، ابتدا کلیدهای امن محلی برای هر پیوند QKD تولید شده و در گره‌هایی که در دو انتهای هر پیوند قرار دارند ذخیره می‌شوند. در این رهیافت، هر گره میانی نقش یک واسط مورداعتماد را برای کاربران مجاور خود ایفا می‌کند. به‌عنوان نمونه، هر یک از کاربران با گره میانی فرآیند توزیع کلید کوانتومی را اجرا می‌کنند. سپس گره میانی، کلید کاربر اول را با استفاده از کلید مشترک با کاربر دوم رمزگذاری کرده و برای او ارسال می‌کند. کاربر دوم با رمزگشایی پیام دریافتی، به کلید کاربر اول دست می‌یابد. بدین ترتیب، یک کلید مشترک میان دو کاربر نهایی برقرار می‌شود؛ درحالی‌که گره میانی نیز به این کلید دسترسی دارد. ازاین‌رو، این گره‌ها باید تحت حفاظت فیزیکی و امنیتی شدید قرار گیرند[۱۴].

برای پیاده‌سازی شبکه توزیع کلید کوانتومی مبتنی بر گره‌های قابل‌اعتماد استاندارد ITU-T یک معماری ۵ لایه‌ای معرفی کرده است که شامل لایه کوانتومی، لایه مدیریت کلید، لایه کنترل، لایه سرویس و لایه مدیریت شبکه می‌باشد که مطابق (شکل ۱) هر لایه عملکرد مشخصی را دارد.



شکل۱: معماری لایه‌ای شبکه توزیع کلید کوانتومی مبتنی بر گره قابل‌اعتماد[۱۴]

در شبکه‌های مبتنی بر گره‌های قابل‌اعتماد، حفاظت کامل فیزیکی و منطقی از هر گره میانی ضروری است. این روش باوجود مقیاس‌پذیری بالا و کاربرد گسترده در پیاده‌سازی‌های عملی QKD، با چالش هزینه بالای حفاظت فیزیکی گره‌ها مواجه است [۱۵]. در شرایطی که تنها اعتماد نسبی به گره‌ها وجود دارد، می‌توان از روش‌هایی مانند بازپخش کلید چندمسیره و کدگذاری شبکه برای افزایش امنیت و اشتراک‌گذاری کلید امن استفاده کرد [۱۶]. در مقابل، شبکه‌های مبتنی بر گره‌های غیرقابل اعتماد از پروتکل‌های پیشرفته‌ای مانند MDI-QKD و TF-QKD استفاده می‌کنند که حتی با فرض کنترل کامل گره میانی توسط استراق‌سمع‌کننده، امنیت توزیع کلید تضمین می‌شود [۱۷]. این پروتکل‌ها فاصله امن را نیز افزایش می‌دهند؛ برای مثال، پروتکل میدان دوقلو تا ۱۲۰۰ کیلومتر در سال ۲۰۲۳ گزارش شده است [۱۸]. با این حال، این شبکه‌ها قابلیت گسترش زنجیره‌ای به فواصل دلخواه را ندارند و عمدتاً برای شبکه‌های شهری مناسب هستند. توسعه در مقیاس بزرگ‌تر مستلزم ترکیب با گره‌های قابل اعتماد است که ممکن است امنیت کلی را کاهش دهد.

در نهایت، هدف بلندمدت شبکه‌های مبتنی بر گره‌های غیرقابل‌اعتماد، گذار به اینترنت کوانتومی است؛ شبکه‌ای که خدمات آن فراتر از توزیع کلید کوانتومی بوده و قابلیت‌هایی نظیر ارتباط امن کوانتومی، رایانش کوانتومی نابینا، رایانش کوانتومی توزیع‌شده و شبکه‌های ساعت‌های فوق‌دقیق هم‌زمان‌شدن را برای کاربران فراهم می‌کند [۱۹]. در جدول ۲ شبکه‌های توزیع کلید کوانتومی بر اساس نوع گره میانی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۲: مقایسه انواع شبکه کوانتومی بر اساس نوع گره میانی [۲۰]

	گره قابل‌اعتماد	گره غیرقابل‌اعتماد	تکرارکننده کوانتومی
فاصله دسترس‌پذیر	دلخواه	نسبتاً بلند	دلخواه
مقیاس‌پذیری	زیاد	نسبتاً کم	زیاد
کاربرد	وسیع	محدود	وسیع
امنیت	نسبتاً کم	زیاد	زیاد
بلوغ	زیاد	نسبتاً کم	کم
نمونه میدانی	موجود	موجود	ناموجود

وضعیت کنونی شبکه‌های کوانتومی در جهان و کشور

در دهه اخیر، شبکه‌های کوانتومی از مرحله نظری به پیاده‌سازی‌های آزمایشگاهی، میدانی و حتی بهره‌برداری تجاری محدود وارد شده‌اند. تاکنون چندین شبکه QKD شهری و بین‌شهری در جهان بر بستر فیبر نوری و با استفاده از گره‌های قابل‌اعتماد یا ترکیبی ایجاد شده است. هدف اصلی این شبکه‌ها، تأمین ارتباطات فوق‌امن برای کاربردهای دولتی، بانکی، نظامی و زیرساخت‌های حیاتی است.

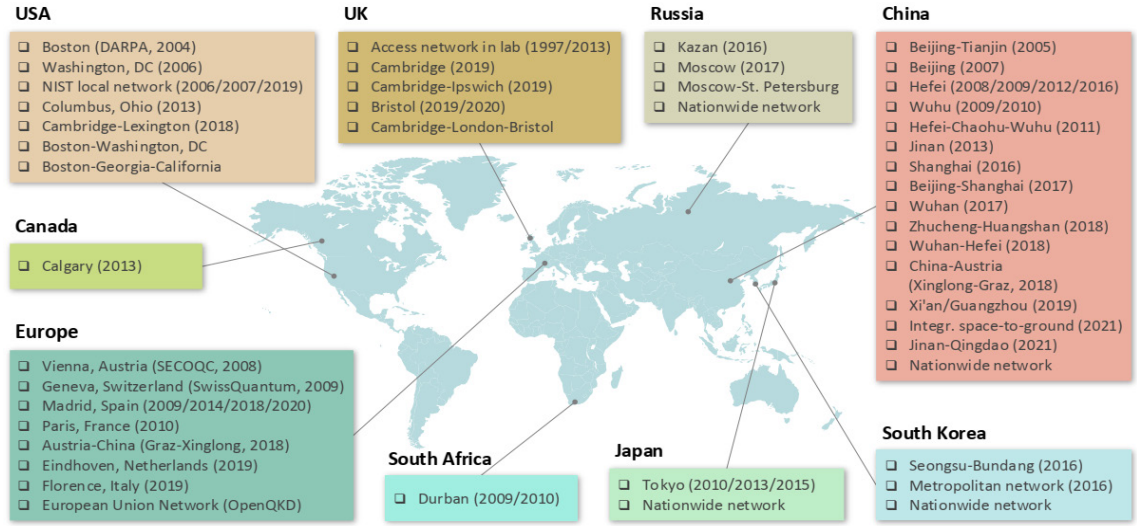


Fig. 6. Overview of QKD network testbeds and field trials around the world.

شکل ۲: شبکه‌های توزیع کلید کوانتومی پیاده‌سازی شده [۲۰]

چین به‌عنوان یکی از پیش‌گامان شبکه‌های کوانتومی، با ایجاد یک شبکه زمینی QKD در مقیاس هزاران کیلومتر و استفاده از ماهواره کوانتومی Micius برای ارتباطات ماهواره‌ای و بین‌قاره‌ای، به معماری هیبریدی (زمینی-فضایی) دست‌یافته است [۲۱]. بااین‌حال، شبکه‌های کوانتومی فعلی عمدتاً به توزیع کلید محدود بوده و از نظر مقیاس و قابلیت اطمینان با شبکه‌های کلاسیک قابل‌مقایسه نیستند. تحقق شبکه‌های کاملاً غیرقابل‌اعتماد مبتنی بر تکرارکننده‌های کوانتومی همچنان با چالش‌های فنی جدی مواجه است [۱۳]. هم‌زمان، استانداردسازی شبکه‌های QKD توسط نهادهایی مانند ITU-T و ETSI در حال انجام است تا گذار از شبکه‌های آزمایشی به استقرار صنعتی تسهیل شود [۲۲و۱۴].

خوشبختانه در سال‌های اخیر در کشور ایران نمونه‌های متعددی از سامانه‌های توزیع کلید کوانتومی توسط دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی مختلف ساخته شده است. اولین پیاده‌سازی آزمایشگاهی شبکه توزیع کلید کوانتومی مبتنی بر گره قابل‌اعتماد توسط پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات با همکاری شرکت تکفن در دست انجام است که تا نیمه سال ۱۴۰۵ از آن رونمایی خواهد شد. پس از این گام، شبکه کوانتومی کشور با سایر نمونه‌های بومی و بین‌المللی در سطح تست‌های میدانی گسترش خواهد یافت.

جمع‌بندی

در حال حاضر، رویکرد غالب شرکت‌های تجاری فعال در حوزه ارتباطات کوانتومی بر راهکارهای کوتاه‌مدت و قابل‌استقرار متمرکز است. شرکت‌های پیشرو نظیر QuantumCTek، Toshiba، ID Quantique و SK Telecom تمرکز اصلی خود را بر توسعه و تجاری‌سازی سامانه‌های QKD مبتنی بر فیبر نوری و یکپارچه‌سازی آن با زیرساخت‌های موجود قرار داده‌اند. هدف این شرکت‌ها ایجاد بازار، کاهش هزینه‌ها و پاسخگویی به نیازهای فوری مشتریان دولتی و صنعتی است. چشم‌انداز آینده شبکه‌های کوانتومی، برخلاف فناوری‌های کلاسیک با رشد انفجاری مواجه بوده‌اند، مسیری تدریجی، مرحله‌ای و کاربرد محور را به دلیل محدودیت‌های بنیادی فیزیکی دنبال می‌کند. در ایران نیز با همت متخصصان، نمونه‌های ارزشمندی از سامانه‌های QKD ساخته شده و پیاده‌سازی شبکه کوانتومی بومی در دست

انجام است. با توسعه این دانش بومی، می‌توان زیرساخت‌های ارتباطی کشور را برای مواجهه با تهدیدات عصر کوانتوم آماده کرد.

مراجع

1. National Science and Technology Council, National Strategic Overview for Quantum Information Science. Washington, DC, USA: The White House, 2018.
2. J. Preskill, “Quantum computing in the NISQ era and beyond,” Quantum, vol. 2, p. 79, 2018.
3. E. Zeydan et al., “Quantum technologies for beyond 5G and 6G networks: Applications, opportunities, and challenges,” arXiv preprint arXiv:2504.17133, 2025.
4. National Institute of Standards and Technology (NIST), Post-Quantum Cryptography and Cybersecurity – The Quantum Threat. 2024.
5. D. J. Bernstein et al., “Post-quantum cryptography,” Nature, vol. 549, pp. 188–194, 2017.
6. National Institute of Standards and Technology (NIST), Post-Quantum Cryptography: Migration Considerations, NISTIR 8413, 2022.
7. A. V. Sergienko, Ed., Quantum Communications and Cryptography. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
8. S. Pirandola et al., “Advances in quantum cryptography,” Advances in Optics and Photonics, vol. 12, pp. 1012–1236, 2020.
9. D. Pan et al., “The evolution of quantum secure direct communication: On the road to the qinternet,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 26, no. 3, pp. 1898–1949, 2024.
10. ID Quantique, Quantum Key Distribution: Commercial Status and Deployments, White Paper, 2021.
11. P.-Y. Kong, “Challenges of routing in quantum key distribution networks with trusted nodes for key relaying,” IEEE Communications Magazine, vol. 62, no. 7, pp. 124–130, 2023.
12. H. J. Kimble, “The quantum internet,” Nature, vol. 453, pp. 1023–1030, 2008.
13. S. Wehner, D. Elkouss, and R. Hanson, “Quantum internet: A vision for the road ahead,” Science, vol. 362, 2018.
14. ITU-T, ITU-T Y.3800; ITU-T Y.3801; ITU-T Y.3802; ITU-T Y.3803.
15. ETSI, Quantum Key Distribution (QKD) Networks, ETSI GS QKD 015, 2021.
16. G. Kato, M. Fujiwara, and T. Tsurumaru, “Advantage of the key relay protocol over secure network coding,” IEEE Transactions on Quantum Engineering, vol. 4, pp. 1–17, 2023.
17. H.-K. Lo, M. Curty, and B. Qi, “Measurement-device-independent quantum key distribution,” Physical Review Letters, vol. 108, 2012.
18. Y. Chen et al., “Twin-field quantum key distribution over 1200 km,” Nature, vol. 615, pp. 48–52, 2023.
19. S. Wehner, “Towards a quantum internet,” Nature Physics, vol. 14, pp. 119–121, 2018.
20. Y. Cao et al., “The evolution of quantum key distribution networks: On the road to the qinternet,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 2, pp. 839–894, 2022.
21. J. Yin et al., “Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers,” Science, vol. 356, pp. 1140–1144, 2017.
22. ETSI, Quantum Key Distribution (QKD); Control Interface for Software Defined Networks, ETSI GS QKD 015 V2.1.1, Apr. 2022

دیپلماسی کوانتومی: ظهور یک عرصه جدید در سیاست علم‌وفناوری جهانی

اعظم صادق‌زاده، پژوهشگر و مدیر دفتر اسناد و منابع علمی، a.sadeghi@itrc.ac.ir

فناوری‌های کوانتومی در حال ورود به مرحله‌ای هستند که پیامدهای آن‌ها دیگر محدود به حوزه پژوهش و نوآوری فناورانه نیست. برخلاف بسیاری از فناوری‌های نوظهور که ابتدا مسیرهای فنی و اقتصادی خود را طی می‌کنند و سپس به موضوع سیاست‌گذاری تبدیل می‌شوند، کوانتوم از همان مراحل اولیه توسعه، به کانون توجه سیاست‌گذاران، نهادهای امنیتی و بازیگران دیپلماسی فناوری راه‌یافته است[۱]. این وضعیت حاصل ترکیب ماهیت دوگانه فناوری‌های کوانتومی، عدم‌قطعیت عمیق در مسیر توسعه و پیوند آن‌ها با زیرساخت‌های حیاتی و امنیت اطلاعات است. در نتیجه، کوانتوم به‌عنوان مسئله‌ای راهبردی در سیاست عمومی جهانی مطرح شده و پرسش‌های اصلی پیرامون آن نه صرفاً به زمان یا حوزه کاربرد، بلکه به بازیگران، چارچوب‌های نهادی و قواعد حاکم بر شکل‌دهی به آینده این فناوری معطوف شده است. در چنین بستری، چارچوب‌های مرسوم سیاست علم‌وفناوری که عمدتاً بر حمایت از پژوهش، نوآوری و تجاری‌سازی تمرکز دارند، برای مواجهه با کوانتوم ناکافی به نظر می‌رسند. کوانتوم به طور هم‌زمان به موضوع سیاست داخلی، سیاست خارجی و حکمرانی جهانی تبدیل شده و مرزهای سنتی میان این حوزه‌ها را کم‌رنگ کرده است. تصمیم‌هایی که در ظاهر فنی به نظر می‌رسند از اولویت‌های پژوهشی تا همکاری‌های علمی و استانداردسازی، می‌توانند پیامدهای ژئوپلیتیکی و نهادی گسترده‌ای به همراه داشته باشند.

هم‌زمان، نگرانی‌ها درباره شکل‌گیری «شکاف کوانتومی» افزایش‌یافته است؛ شکافی که صرفاً به فاصله فناورانه میان کشورها محدود نمی‌شود، بلکه به تفاوت در ظرفیت مشارکت در فرآیندهای تصمیم‌سازی، استانداردگذاری و حکمرانی آینده کوانتوم اشاره دارد[۱]. در صورت تثبیت چنین شکافی، نظم آینده علم‌وفناوری می‌تواند نابرابر و بازگشت‌ناپذیر شود.

در پاسخ به این چالش‌ها، نشانه‌هایی از ورود زودهنگام نهادهای بین‌المللی و ابتکارات چندجانبه به حوزه کوانتوم مشاهده می‌شود. این تحولات را می‌توان تلاشی برای مدیریت هم‌زمان عدم قطعیت فناورانه، ریسک‌های امنیتی و پیامدهای توسعه‌ای کوانتوم دانست؛ رویکردی که در ادبیات جدید از آن با عنوان «دیپلماسی کوانتومی» یاد می‌شود و بر گفت‌وگو، پیش‌نگری و چارچوب‌سازی نهادی پیش از تثبیت مسیرهای فناورانه تأکید دارد[۳].

این مطالعه با تمرکز بر مفهوم دیپلماسی کوانتومی نشان می‌دهد که کوانتوم نه‌تنها یک فناوری نوظهور، بلکه یک مسئله سیاست عمومی جهانی است. در ادامه، تحول مفهومی دیپلماسی کوانتومی، منطق سیاسی فناوری‌های کوانتومی، مسئله شکاف کوانتومی و نقش نهادهای بین‌المللی در شکل‌دهی به حکمرانی این حوزه بررسی می‌شود.

از دیپلماسی کلاسیک تا دیپلماسی کوانتومی

دیپلماسی در شکل کلاسیک خود بر استفاده از علم به‌عنوان ابزاری برای همکاری، اعتمادسازی و حل‌وفصل مسائل فراملی استوار بوده است. بااین‌حال، ظهور فناوری‌های نوظهور با ظرفیت‌های برهم‌زننده به‌ویژه فناوری‌هایی که با امنیت، زیرساخت‌های حیاتی و قدرت ملی پیوند خورده‌اند، این پیش‌فرض را با چالش مواجه کرده است. در چنین شرایطی، علم دیگر صرفاً امری «خنثی» تلقی نمی‌شود، بلکه به بخشی از معادلات قدرت و سیاست تبدیل می‌گردد

و همین تحول، گذار به «دیپلماسی فناوری» را رقم زده است[۱].

فناوری‌های کوانتومی در این میان جایگاهی متمایز دارند. برخلاف بسیاری از فناوری‌های دیجیتال که پس از تجاری‌سازی گسترده وارد عرصه سیاست‌گذاری شدند، کوانتوم از همان مراحل اولیه توسعه با ملاحظات امنیتی و راهبردی همراه بوده و پیش از بلوغ صنعتی، به‌عنوان دارایی بالقوه راهبردی تلقی شده است. این وضعیت، چارچوب‌های دیپلماسی کلاسیک را ناکافی می‌سازد و زمینه طرح مفهوم «دیپلماسی کوانتومی» را فراهم می‌کند؛ مفهومی که ناظر به بازتعریف رابطه علم، فناوری و سیاست در شرایط هم‌زمانِ عدم قطعیت فناورانه و حساسیت امنیتی است.

دیپلماسی کوانتومی، برخلاف علم دیپلماسی سنتی، ماهیتی واکنشی ندارد. این دیپلماسی در زمانی شکل می‌گیرد که مسیرهای فناورانه هنوز تثبیت نشده‌اند و قواعد بازی در حال شکل‌گیری است. ازاین‌رو، تمرکز آن نه بر حل تعارض‌های موجود، بلکه بر پیشگیری از تعارض‌های آینده، مدیریت عدم قطعیت و شکل‌دهی زودهنگام به چارچوب‌های نهادی و سیاستی است. از این منظر، دیپلماسی کوانتومی را می‌توان نشانه‌ای از یک تغییر پارادایمی در سیاست علم‌وفناوری دانست؛ تغییری که در آن، علم دیگر صرفاً ابزار دیپلماسی نیست، بلکه خود به موضوع دیپلماسی و حکمرانی تبدیل می‌شود[۱].

منطق سیاست‌گذاری توسعه فناوری‌های کوانتومی

فناوری‌های کوانتومی از معدود حوزه‌هایی هستند که منطق سیاست‌گذاری آن‌ها پیش از تثبیت منطق فناورانه و اقتصادی شکل‌گرفته است. درحالی‌که در بسیاری از فناوری‌های نوظهور، ابتدا مسیرهای فنی و بازارهای اولیه مشخص می‌شوند و سپس سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری به‌تدریج شکل می‌گیرد، در مورد کوانتوم این روند تا حد زیادی معکوس شده است[۱].

نخستین عامل این وضعیت، ماهیت دوگانه فناوری‌های کوانتومی است. بسیاری از قابلیت‌های موردانتظار این فناوری‌ها از ارتباطات فوق امن تا توان پردازشی بی‌سابقه به طور هم‌زمان دارای کاربردهای غیرنظامی و نظامی هستند. این هم‌پوشانی موجب می‌شود تصمیم‌هایی که در ظاهر فنی یا پژوهشی به نظر می‌رسند، به‌سرعت به موضوعات امنیتی و سیاسی تبدیل شوند.

عامل دوم، عدم قطعیت ساختاری در مسیر توسعه کوانتوم است. هنوز اجماع روشنی درباره زمان‌بندی، مقیاس و حتی ماهیت کاربردهای غالب این فناوری وجود ندارد؛ مشخص نیست کدام شاخه‌ها به بلوغ خواهند رسید، کدام معماری‌ها پایدار خواهند ماند و کدام کاربردها توجیه اقتصادی پیدا خواهند کرد. این سطح از عدم قطعیت، سیاست‌گذاری را از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد تثبیت‌شده خارج کرده و آن را به حوزه «سیاست‌گذاری تحت عدم‌قطعیت» سوق می‌دهد. در چنین شرایطی، سیاست‌گذار با یک دوراهی ساختاری مواجه است: مداخله زودهنگام و محدودکننده می‌تواند نوآوری را کند نماید، درحالی‌که تعلل در سیاست‌گذاری ممکن است به ریسک‌های امنیتی، نهادی و وابستگی‌های بلندمدت منجر شود.

عامل سوم، پیوند فناوری‌های کوانتومی با حاکمیت فناورانه و رقابت ژئوپلیتیکی است. بسیاری از دولت‌ها، کوانتوم را نه صرفاً یک فرصت فناورانه، بلکه بخشی از ظرفیت راهبردی آینده خود تلقی می‌کنند. این برداشت، به سیاست‌هایی مانند کنترل صادرات، محدودیت انتقال دانش و حساسیت نسبت به همکاری‌های بین‌المللی انجامیده

است. در نتیجه، کوانتوم به عرصه‌ای تبدیل شده که در آن، همکاری علمی و رقابت راهبردی به طور هم‌زمان و گاه متناقض حضور دارند.

براین‌اساس، منطق سیاست‌گذاری فناوری‌های کوانتومی را می‌توان ترکیبی از سه مؤلفه حساسیت امنیتی، عدم قطعیت فناورانه و رقابت ژئوپلیتیکی دانست. چنین منطقی، زمینه را برای ظهور رویکردهایی مانند دیپلماسی کوانتومی فراهم می‌کند؛ رویکردهایی که می‌کوشند پیش از تثبیت مسیرهای فناورانه، چارچوب‌های گفت‌وگو، همکاری و حکمرانی را شکل دهند[۱].

شکاف کوانتومی

مفهوم «شکاف کوانتومی» صرفاً به نابرابری در دسترسی به یک فناوری نوظهور اشاره ندارد، بلکه ناظر به شکل‌گیری نابرابری‌های ساختاری در نظم آینده علم‌وفناوری است. این شکاف، تفاوت در ظرفیت‌های دانشی، زیرساختی، نهادی و سیاسی کشورها را در بر می‌گیرد و می‌تواند موقعیت آن‌ها را در بلندمدت تثبیت یا تضعیف کند[۱].

برخلاف شکاف دیجیتال که تا حدی با کاهش هزینه‌ها و گسترش بازار تعدیل شد، شکاف کوانتومی ماهیتی عمیق‌تر و بالقوه پایدارتر دارد. فناوری‌های کوانتومی به زیرساخت‌های پیچیده، سرمایه انسانی بسیار تخصصی و محیط‌های نهادی پیشرفته نیاز دارند. یکی از پیامدهای این وضعیت، برگشت‌ناپذیری نسبی شکاف کوانتومی است: کشورهایی که در مراحل اولیه از فرآیندهای یادگیری، شبکه‌سازی و استانداردسازی عقب می‌مانند، در مراحل بعدی با موانع به‌مراتب بالاتری برای ورود مواجه خواهند شد.

عامل تشدیدکننده دیگر، پیوند شکاف کوانتومی با ملاحظات امنیتی و حاکمیتی است. ازآنجاکه بسیاری از اجزای زیرساخت و دانش کوانتومی در چارچوب‌های کنترل صادرات و محدودیت‌های همکاری قرار می‌گیرند، دسترسی آزاد و مبتنی بر منطق بازار عملاً امکان‌پذیر نیست. در نتیجه، شکاف کوانتومی نه‌تنها فناورانه یا اقتصادی، بلکه به‌شدت سیاسی است[۲].

همین ویژگی‌هاست که شکاف کوانتومی را به مسئله‌ای برای حکمرانی جهانی تبدیل می‌کند. ورود زودهنگام نهادهای بین‌المللی به حوزه کوانتوم را می‌توان پاسخی به این نگرانی دانست که در صورت فقدان قواعد، هنجارها و سازوکارهای همکاری از ابتدا، نابرابری‌های موجود به‌سرعت تعمیق خواهند شد. در این چارچوب، حکمرانی کوانتوم نه برای کنترل یک فناوری بالغ، بلکه برای هدایت یک فناوری نامطمئن و جلوگیری از تثبیت نابرابری ساختاری طراحی می‌شود[۳]. براین‌اساس، شکاف کوانتومی نتیجه مستقیم نحوه سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری و دیپلماسی فناوری است. کشورهایی که از فرآیندهای نهادی و گفت‌وگوهای چندجانبه فاصله می‌گیرند، نه‌تنها از دسترسی فناورانه، بلکه از امکان اثرگذاری بر قواعد آینده محروم می‌شوند. به این معنا، شکاف کوانتومی پیش از آنکه فناورانه باشد، شکافی در مشارکت نهادی و سیاستی است؛ تحلیلی که زمینه را برای بررسی نقش نهادهای بین‌المللی در حکمرانی کوانتوم فراهم می‌کند.

نهادهای بین‌المللی و شکل‌گیری حکمرانی کوانتوم

ورود نهادهای بین‌المللی به حوزه فناوری‌های کوانتومی بازتاب درک پیامدهای حکمرانی و ژئوپلیتیکی این فناوری است. در چنین وضعیتی، نقش نهادهای بین‌المللی بیش از تنظیم‌گری کلاسیک، بر چارچوب‌سازی هنجاری، تسهیل

تعامل و هماهنگی تدریجی میان بازیگران متنوع متمرکز می‌شود[۳]. در این میان، ITU از نخستین نهادهایی است که کوانتوم را در پیوند با مأموریت‌های خود در حوزه ارتباطات و استانداردسازی قرار داده است. تأکید ITU بر ابتکار «Quantum for Good» نشان می‌دهد که این نهاد، کوانتوم را نه صرفاً یک فناوری پیشرفته، بلکه بخشی از زیرساخت‌های ارتباطی آینده و مرتبط با اهداف توسعه پایدار می‌داند. ایجاد زبان مشترک سیاستی و توجه به استانداردهای باز و فراگیر، در این چارچوب، تلاشی برای جلوگیری از انحصاری‌شدن مسیرهای توسعه کوانتوم تلقی می‌شود[۳].

در کنار این رویکرد، ابتکارات جدیدتری شکل‌گرفته‌اند که تمرکز آن‌ها کمتر بر استانداردسازی فنی و بیشتر بر نهادسازی نرم و گفت‌وگوی چندجانبه است. در این میان، نقش Geneva Science and Diplomacy Anticipator و ابتکار آن، یعنی Open Quantum Institute، اهمیت ویژه‌ای دارد. OQI بستری نهادی برای پیوند میان جامعه علمی، سیاست‌گذاران، نهادهای بین‌المللی و سایر ذی‌نفعان به شمار می‌رود. هدف اصلی این ابتکار، دسترسی فراگیر به ظرفیت‌های کوانتومی و جلوگیری از حاشیه رانده‌شدن کشورها و بازیگرانی است که فاقد زیرساخت‌های پیشرفته یا منابع مالی گسترده‌اند. تمرکز بر ابزارهایی مانند رایانش کوانتومی ابری، آموزش و پروژه‌های مشترک، پیوند این ابتکار با اهداف توسعه پایدار را تقویت می‌کند[۲]. از منظر حکمرانی، اهمیت OQI در رویکرد پیش‌نگر آن نهفته است؛ رویکردی که قبل از بروز بحران‌ها یا تعارض‌های فناورانه، از طریق گفت‌وگوی زودهنگام و شبکه‌سازی نهادی، مسیرهای همکاری را از پیش ترسیم می‌کند. در نتیجه، کوانتوم به موضوعی برای دیپلماسی پیش‌نگر تبدیل می‌شود که هدف آن نه حل اختلافات موجود، بلکه جلوگیری از شکل‌گیری شکاف‌ها و تعارض‌های آینده است[۲].

در مجموع، تجربه نهادهایی مانند ITU و ابتکاراتی چون Open Quantum Institute نشان می‌دهد که حکمرانی کوانتوم در حال شکل‌گیری بر پایه الگوهای نرم، تدریجی و مشارکتی است. این الگوها، به‌ویژه برای کشورهایی که در مراحل اولیه توسعه کوانتوم قرار دارند، امکان حضور و اثرگذاری در نظم آینده این فناوری را بدون ورود به رقابت پرهزینه فناورانه فراهم می‌کند. در این چارچوب، دیپلماسی و حکمرانی کوانتوم را می‌توان به‌صورت یک معماری چندسطحی فهم کرد که در آن، نهادهای بین‌المللی نقش چارچوب‌سازی و پیش‌نگری را ایفا می‌کنند، همکاری‌های منطقه‌ای حلقه میانی هماهنگی‌اند، و سیاست‌های ملی در تعامل با این دو سطح شکل می‌گیرند (شکل ۱).

شکل ۱- معماری چندسطحی حکمرانی کوانتوم

دیپلماسی کوانتومی در عمل: تجربه همکاری‌های منطقه‌ای در جنوب شرق آسیا

بررسی دیپلماسی کوانتومی در سطح منطقه‌ای نشان می‌دهد که این رویکرد صرفاً یک چارچوب نظری نیست، بلکه پاسخی عملی به محدودیت‌های ساختاری کشورها در مواجهه با فناوری‌های کوانتومی است. تجربه جنوب شرق آسیا نمونه‌ای شاخص از این وضعیت است؛ منطقه‌ای که بسیاری از کشورها فاقد منابع مالی، زیرساختی و انسانی لازم برای توسعه مستقل فناوری‌های کوانتومی هستند، اما درعین‌حال نمی‌خواهند از نظم آینده این فناوری کنار گذاشته شوند[۱].

در این منطقه، کشورهایی مانند سنگاپور، مالزی، تایلند و فیلیپین رویکردهای متفاوت اما مکملی اتخاذ کرده‌اند. سنگاپور به‌عنوان بازیگر پیشرو، از ظرفیت نهادی و سرمایه‌گذاری خود برای توسعه راهبرد ملی کوانتوم و میزبانی شبکه‌های همکاری استفاده کرده است. در مقابل، کشورهایی مانند مالزی و تایلند به‌جای رقابت مستقیم فناورانه، بر ایجاد شبکه‌های علمی، توانمندسازی سرمایه انسانی و تعریف مسیرهای مشارکت منطقه‌ای تمرکز کرده‌اند[۱]. شکل‌گیری شبکه‌های منطقه‌ای کوانتوم و ابتکارات مشترک علمی-سیاستی، یکی از نمودهای اصلی این رویکرد است. این شبکه‌ها به‌جای تمرکز بر توسعه زیرساخت‌های پرهزینه، بر اشتراک دانش، هماهنگی سیاستی و تعریف اولویت‌های مشترک متمرکزند و به کشورها امکان می‌دهند بدون ورود به رقابت پرریسک، در شکل‌دهی به دستور کار کوانتوم منطقه‌ای مشارکت داشته باشند.

هم‌زمان، برگزاری نشست‌های منطقه‌ای، پنل‌های سیاستی و گفت‌وگوهای چندذی‌نفعی نشان می‌دهد که دیپلماسی کوانتومی در جنوب شرق آسیا به‌تدریج در حال نهادمند شدن است. این فضاها امکان طرح موضوعاتی مانند شکاف کوانتومی، دسترسی نابرابر و پیامدهای امنیتی را فراهم کرده و به کشورها اجازه می‌دهد مواضع خود را پیش از تثبیت قواعد جهانی هماهنگ کنند[۴].

در مجموع، تجربه جنوب شرق آسیا نشان می‌دهد که همکاری‌های منطقه‌ای جایگزین توسعه ملی کوانتوم نیستند، بلکه آن را بازتعریف می‌کنند. تمرکز بر تقسیم کار دانشی، یادگیری نهادی و مشارکت فعال در فرآیندهای گفت‌وگویی، به‌عنوان راهبردی واقع‌گرایانه، امکان حضور مؤثر کشورها در نظم آینده فناوری‌های کوانتومی را بدون ورود به رقابت پرهزینه فناورانه فراهم می‌سازد[۱].

پیامدهای سیاستی و جمع‌بندی تحلیلی

ظهور دیپلماسی کوانتومی را می‌توان نشانه‌ای از یک تغییر عمیق‌تر در منطق سیاست علم‌وفناوری دانست. در این تحول، فناوری‌های نوظهور دیگر صرفاً موضوع سیاست‌گذاری داخلی یا برنامه‌ریزی پژوهشی نیستند، بلکه به مؤلفه‌هایی از سیاست خارجی، امنیت ملی و حکمرانی جهانی تبدیل شده‌اند. یکی از پیامدهای کلیدی این تحول، کم‌رنگ‌شدن مرز میان سیاست داخلی و سیاست خارجی فناوری است. کوانتوم نمونه‌ای روشن از حوزه‌ای است که تصمیم‌های مربوط به آموزش، پژوهش، تنظیم‌گری و همکاری علمی، پیامدهای مستقیم دیپلماتیک و ژئوپلیتیکی دارند. در چنین شرایطی، عدم هماهنگی نهادی در سطح ملی می‌تواند به ضعف ساختاری در سطح بین‌المللی منجر شود.

پیامد دوم، افزایش اهمیت مشارکت در فرآیندهای نهادی و گفت‌وگوهای چندجانبه است. در جهانی که مسیرهای توسعه فناوری‌های کوانتومی هنوز تثبیت نشده‌اند، حضور فعال در فضاهای گفت‌وگویی و هنجارساز، می‌تواند

به‌اندازه سرمایه‌گذاری فناورانه اهمیت داشته باشد. غیبت از این فرآیندها، به معنای واگذاری تدریجی نقش در شکل‌دهی به قواعد، استانداردها و اولویت‌های آینده است.

در چنین شرایطی، مشارکت در گفت‌وگوهای نهادی، ابتکارات چندجانبه و فرآیندهای پیش‌نگر حکمرانی، نه مکمل سیاست فناورانه، بلکه بخشی از آن به‌شمار می‌رود. تجربه نهادهای بین‌المللی و همکاری‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که حضور یا غیبت کشورها در این مراحل اولیه، می‌تواند پیامدهای بلندمدتی بر جایگاه آن‌ها در نظم آینده فناوری‌های کوانتومی داشته باشد. به این معنا، دیپلماسی کوانتومی یکی از تصمیم‌گیری‌های مهم سیاستی در عصر فناوری‌های پیچیده است؛ تصمیمی که آثار آن ممکن است امروز شفاف نباشد، اما در آینده تعیین‌کننده خواهد بود.

مراجع

1. Choong, P. S., Mohd Shah, N., & Yap, Y. S. (2025). Quantum diplomacy within the Southeast Asia quantum ecosystem. Institute for Mathematical Research, University Putra Malaysia.
2. Geneva Science and Diplomacy Anticipator (GESDA) & Open Quantum Institute (OQI). (2023). Intelligence Report on the multilateral governance of quantum computing for the SDGs.
3. Advancing quantum technology for good. https://www.itu.int/hub/2025/03/advancing-quantum-technology-for-good/
4. SAMENA Council (2025) Panel discussion on quantum technologies and regional cooperation, https://www.linkedin.com/posts/samena-council_at-the-recent-panel-in-malaysia-the-ceo-activity-7360987992234016768-6Z1V

شکاف مهارتی در انقلاب کوانتومی

نیلوفر مرادحاصل، معاون پژوهشکده مطالعات راهبردی فاوا و اقتصاد دیجیتال، nmoradhasel@ itrc.ac.ir

انقلاب کوانتومی در حال شکل‌دهی به اقتصادی نوین است که در آن، مرزهای کارایی و نوآوری به‌گونه‌ای بی‌سابقه جابه‌جا می‌شود. به‌طوری که پیشرفت سریع فناوری کوانتومی (QT) تقاضای فزاینده‌ای را برای نیروی کار متخصص در دانشگاه و صنعت ایجاد کرده است. اگرچه فناوری‌های کوانتومی، به‌ویژه محاسبات کوانتومی، پتانسیل بالایی در حوزه‌هایی چون امنیت سایبری، مواد، داروسازی و مالی دارند، دستیابی به بلوغ تجاری آنها مستلزم سرمایه‌گذاری عظیم، تخصص فنی و تحول فرهنگی است. یک چالش محوری در این مسیر، شکاف نیروی کار ماهر است. با حرکت این فناوری از آزمایشگاه به سمت تجاری‌سازی، تقاضا برای متخصصان با مهارت‌های فنی (همچون کدنویسی، الکترونیک و الگوریتم‌های کوانتومی) و همچنین مهارت‌های نرم (مانند حل مسئله و درک کسب‌وکار) به‌سرعت درحال‌رشد است. مطالعات مختلف نشان می‌دهند نقش‌های مهندسی و عملی، بیشترین تقاضا را در صنعت دارند، اما نیاز به نقش‌های نظری و تخصص‌های غیرکوانتومی نیز روبه‌افزایش است[۱].

اقدامات و تجربیات کشورهای منتخب

بررسی تجربه کشورهای مختلف در زمینه تربیت نیروی کار کوانتومی، الگوهای متفاوتی را نشان می‌دهد که عمدتاً حول محور «یکپارچه‌سازی آموزش‌های آکادمیک با نیازهای صنعت» و «ایجاد مسیرهای متنوع مهارت‌آموزی» می‌چرخد. یافته‌ها نشان‌دهنده حضور قوی بازار کار فناوری کوانتومی در ایالات متحده و اروپا است که با افزایش تقاضای شرکت‌ها برای مهندسان، توسعه‌دهندگان نرم‌افزار و محققان سطح دکترا همراه است. باوجود کاربردهای روبه‌رشد در صنعت، این بخش همچنان در مراحل اولیه خود است و تحت سلطه شرکت‌های بزرگ فناوری قرار دارد و نیاز به سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در آموزش و توسعه نیروی کار دارد. در حال حاضر کشورهایی که به سمت فناوری کوانتومی رفته‌اند این کشورها نیاز به برنامه‌های آموزشی هدفمند، همکاری بین‌رشته‌ای و مشارکت‌های صنعت و دانشگاه برای پر کردن شکاف نیروی کار در حوزه فناوری کوانتومی دارند.

جدول (۱). مقایسه کشورهای منتخب در کاهش شکاف نیروی کار در حوزه فناوری کوانتومی[۲].

ردیف	منطقه	سازوکارهای کلیدی و اقدامات	سطح و دامنه آموزش	تمرکز
۱	آمریکا	انجام طرح ملی نیروی کار در سال ۲۰۲۱ ایجاد ابتکارات آموزشی	آموزش از مدارس تا آموزش عالی	آماده‌سازی افراد بیشتر برای مشاغل مرتبط با فناوری کوانتوم و توسعه استعدادها برای صنایع آینده
۲	اتحادیه اروپا	جامعه آموزشی QTedu پروژه هماهنگی ۲۴ مؤسسه(DigiQ) پروژه آموزش تخصصی تجاری(QTindu) مرکز آمادگی کوانتومی (ردیابی نیازهای نیروی کار)	از مدارس راهنمایی تا آموزش عالی و آموزش‌های تخصصی صنعتی	جامعیت و ساختار چندلایه؛ تأکید بر نیازهای غیرفنی صنعت (مدیریت، بازاریابی، فروش) و نیازسنجی مستمر.
۳	کانادا	استراتژی ملی کوانتومی برنامه‌های CREATE ، Mitacs از NSERC برنامه QSciTech در دانشگاه شربروک	آموزش عالی (کارشناسی‌ارشد و دکترا) و کارآفرینی	پیوند علم‌وفناوری؛ هدف: تربیت دانشمندان، مهندسان و کارآفرینان آینده.

ردیف	منطقه	سازوکارهای کلیدی و اقدامات	سطح و دامنه آموزش	تمرکز
۴	بریتانیا	برنامه ملی فناوری‌های کوانتومی(NQTP) ایجاد مراکز مهارت و مراکز آموزش دکترا (CDT) شبکه مراکز فناوری کوانتومی	آموزش تخصصی در سطوح پیشرفته و توسعه شغلی	تغییر تأکید از دکترا به سمت مهندسی؛ پاسخگویی به نیاز روبه‌رشد صنعت برای مهندسان و متخصصان عملیاتی.
۵	استرالیا	استراتژی ملی کوانتومی بورسیه دکترا، بررسی طبقه‌بندی‌های مهارتی ادغام کوانتوم در برنامه‌های STEM و آموزش فنی و حرفه‌ای (VET)	از مدارس و دانشگاه تا آموزش حرفه‌ای و جذب استعداد جهانی	نگاه یکپارچه از مدرسه تا صنعت؛ تأکید بر آموزش فنی و حرفه‌ای به‌عنوان یک مسیر مهم.
۶	ژاپن	برنامه‌های تحقیقاتی (FIRST, ImPact, Q-LEAP) پروژه Qacademy به‌عنوان رابط برنامه توسعه منابع انسانی تحت Q-LEAP	آموزش عالی، کارآموزی در شرکت‌ها، آموزش مربیان	تلفیق پایدار تحقیقات دیرینه با آموزش؛ نقش آکادمی به‌عنوان پل ارتباطی بین دانشگاه و صنعت.
۷	کره جنوبی	استراتژی ملی کوانتومی (۲۰۲۳) تأسیس مدرسه کوانتوم در دانشگاه کره تأسیس مرکز تحقیقات اطلاعات کوانتومی QCenter	آموزش تخصصی (هدف: ۲۵۰۰ متخصص و ۱۰۰۰۰ حرفه‌ای تا ۲۰۳۵)	اهداف کمیِ مشخص و بلندپروازانه؛ ایجاد نهادهای آموزشی متمرکز و اختصاصی.
۸	سنگاپور	برنامه استعداد کوانتومی پشتیبانی دفتر ملی کوانتوم بورسیه‌ها و دوره‌های آزاد	برگزاری دوره‌های آزاد، تدوین منابع آموزشی، بورسیه‌های تحصیلات تکمیلی	دسترسی‌پذیری و ترویج گسترده؛ تمرکز بر ایجاد پایگاه وسیع دانش در جامعه
۹	روسیه	مدرسه بین‌المللی سالانه دانشگاه لومونوسوف مسکو برنامه‌های ترویجی مرکز کوانتومی دانشگاه تومسک (TSU)	از دانشجویان اولیه تا تحصیلات تکمیلی (به‌ویژه تأکید بر سطوح عالی)	تمرکز بر آموزش آکادمیک و نخبه‌پروری در مراکز دانشگاهی برتر؛ مدل سنتی‌تر با محوریت علم پایه.

جمع‌بندی و پیشنهادات

باتوجه‌به طیف گسترده رویکردهای آموزشی و ساختاری موجود در دنیا، تدوین الگویی بومی و کارآمد برای توسعه صنعت کوانتوم در ایران ضروری است. این الگو باید ساختارهای حکمرانی یکپارچه و برنامه‌های آموزشی چندسطحه را هم‌زمان پوشش دهد. از یک سو، ایجاد نهاد هماهنگ‌کننده‌ای مشابه «خانه کوانتوم» می‌تواند سیاست‌گذاری، سرمایه‌گذاری و هم‌افزایی بین دانشگاه، صنعت و دولت را سامان بخشد. ازسوی‌دیگر، طراحی دوره‌های آموزشی باید ترکیبی از «آموزش آکادمیک عمیق» (در راستای مدل روسی) و «مهارت‌های عملی و مهندسی موردنیاز صنعت» (مانند تأکید بریتانیا و اروپا) باشد.

در زمینه اشتغال، باتوجه‌به اینکه مطالعات جهانی نقش‌های مهندسی و فنی را پرتقاضاترین بخش نیروی کار کوانتومی معرفی می‌کنند، برنامه‌ریزی ایران نیز باید بر تربیت مهندسان سخت‌افزار و نرم‌افزار کوانتومی، متخصصان ادغام سیستم‌ها و تحلیل‌گران امنیت کوانتومی متمرکز شود. این مشاغل عمدتاً در مراکز تحقیق‌وتوسعه شرکت‌های فناور، آزمایشگاه‌های تخصصی دولتی و خصوصی، شرکت‌های فعال در حوزه ارتباطات امن و بانکداری، و هسته‌های نوآوری در حوزه‌های انرژی و دارو قابل‌تصور هستند. البته باید به این نکته توجه داشت که بازتاب این تقاضا در بازار کار ایران منوط به بلوغ اولیه صنعت و ایجاد چرخه اقتصادی پیرامون فناوری کوانتوم است. در کوتاه‌مدت، جذب این نیروها بیشتر توسط پروژه‌های پژوهشی پیش‌ران و مراکز زیرساختی دولتی انجام خواهد شد و با رشد فناوری و تجاری‌سازی، بخش خصوصی نقش پررنگ‌تری خواهد یافت؛ بنابراین، موفقیت در انعکاس نیاز بازار به این

تخصص‌ها، مستلزم همگام‌سازی دقیق برنامه‌های آموزشی با نقشه راه توسعه صنعتی کشور و ایجاد مشوق‌هایی برای جذب سرمایه‌گذاری خصوصی در این حوزه است.

مراجع

1. Dpaulla,M.(2024). Shaping the Future of Work: The Impact of AI and Quantum Computing on Employment,https://askmarcio.com/shaping-the-future-of-work-the-impact-of-ai-and-quantum-computing-on-employment/

2. Goorney,S., Karydi,E., Munoz,B and Santesson,O,(2025). The Quantum Technology Job Market: A Quantitative Investigation, License: CC BY 4.0, DOI:10.48550/arXiv.2503.19004, https://www.researchgate.net/publication/390176617_The_Quantum_Technology_Job_Market_A_Quantitative_Investigation.

اقتصاد فیزیک کوانتومی در بازارهای مالی: تحلیل مدل‌های کوانتوم مالی

زهرا داودآبادی پژوهشگر گروه اقتصاد دیجیتال، z.davoudabadi@ itrc.ac.ir

اقتصادِ فیزیک (econophysics) شاخه‌ای از اقتصاد است که تلاش می‌کند روش‌ها و مفاهیم فیزیک را برای تحلیل و مدل‌سازی رفتار بازارهای مالی به کار گیرد. یکی از زیرشاخه‌های مهم و بحث‌برانگیز آن، کوانتومِ مالی (Quantum Finance) است؛ رویکردی که می‌کوشد ابزارهای ریاضی مکانیک کوانتومی را در تحلیل قیمت‌ها، نوسانات و رفتار تصادفی بازار به کار گیرد. دو مدل شاخص در این حوزه، یعنی مدل‌های ایلینسکی (۲۰۰۱) و باکی (۲۰۰۴، ۲۰۰۹، ۲۰۱۸)، بیشترین تأثیر را بر ادبیات اقتصاد فیزیک کوانتومی داشته‌اند. این مدل‌ها در عمل تطابق عددی خوبی با داده‌های واقعی بازار نشان می‌دهند، اما همچنان این پرسش نظری جدی مطرح است که در این مدل‌ها دقیقاً چه چیزی کوانتومی است؟[۱]

مسئله اصلی و چالش نظری

در اقتصاد فیزیک کلاسیک که مبتنی بر فیزیک آماری است؛ استعاره‌ها و الگوهای فیزیکی توجیه‌پذیرند، زیرا تعداد زیاد معامله‌گران به رفتار جمعی و پویایی‌هایی منجر می‌شود که شباهت‌هایی با سامانه‌های پیچیده فیزیکی، مانند گذارهای فاز یا مدل‌های چندعاملی، دارند. اما در اقتصاد فیزیک کوانتومی، چنین توجیه فیزیکی‌ای وجود ندارد. بازارهای مالی و مؤلفه‌های آن یعنی قیمت، معامله‌گران و دارایی‌ها، ذرات کوانتومی نیستند. همچنین هیچ پدیده قابل مشاهده‌ای مشابه تداخل، برهم‌نهی، تحول فازی یا درهم‌تنیدگی در بازار وجود ندارد. همین نکته اساس این پرسش را شکل می‌دهد: آیا مدل‌های پیشنهادی کوانتوم مالی واقعاً ماهیت کوانتومی دارند یا صرفاً از ساختار ریاضی فرمالیسم کوانتومی الهام گرفته‌اند؟[۱].

مقایسه ساختاری دو رویکرد: ایلینسکی و باکی

الف) مدل ایلینسکی (۲۰۰۱)

ایلینسکی تلاش می‌کند عدم قطعیت ذاتی قیمت‌ها و مسیرهای تصادفی بازار را شبیه به رفتار سیستم‌های کوانتومی و مشابه حرکت «ذرات کوانتومی» تحلیل کند. او مفاهیمی مانند میدان گیج آربیتراژ (gauge field of arbitrage) را برای توصیف تعامل اوراق بهادار معرفی می‌کند و با بهره‌گیری از رویکرد انتگرال مسیر فاینمن، احتمال مسیرهای قیمتی را فرموله می‌سازد.

اما یک تفاوت بنیادین و تعیین‌کننده در مدل او وجود دارد: در فرمول‌بندی ایلینسکی، عدد موهومی i که عنصر اصلی در لاگرانژی و تکامل زمانی در نظریه کوانتوم است، حذف شده است. نبود این مؤلفه، پیوند واقعی با مکانیک کوانتومی را از بین می‌برد و مدل در نهایت به معادلاتی شباهت پیدا می‌کند که رفتارهای تصادفی کلاسیک را توصیف می‌کنند، نه دینامیک کوانتومی را.

ب) مدل باکی (۲۰۰۴، ۲۰۰۹، ۲۰۱۸)

باکی گامی فراتر می‌گذارد و معادله بلک-شولز(Black-Scholes) را بازنویسی می‌کند تا ظاهری مشابه معادله شرودینگر(Schr¨odinger equation) پیدا کند و تحول قیمت را در قالب یک معادله شبه‌کوانتومی نمایش می‌دهد. بااین‌حال، درست مانند ایلینسکی، در این معادله نیز عدد موهومی i غایب است و در نتیجه هیچ تحول فازی یا الگوی تداخلی ایجاد نمی‌شود.

باوجود تفاوت در مبانی، هر دو مدل بر یک قیاس فرضی میان رفتار بازار و مکانیک کوانتومی استوارند.

- باکی از مدل‌های پذیرفته‌شده مالی شروع کرده و آن‌ها را «کوانتومی‌سازی ریاضی» می‌کند.
- ایلینسکی مسیر بنیادی‌تری انتخاب کرده و بر فرض وجود آربیتراژ باقیمانده و ناکارآمدی بازار تکیه می‌کند تا به یک فرمالیسم مبتنی بر انتگرال مسیر برسد.

در نتیجه، هرچند این دو مدل از مسیرهای متفاوتی آغاز می‌شوند؛ اما هر دو در نهایت به یک ساختار ریاضی مشابه می‌رسند: یک نسخه «غیرکوانتومی» از انتگرال مسیر فاینمن که برای محاسبه احتمال‌های گذار مالی به کار می‌رود. این احتمال‌ها در شبیه‌سازی پویایی‌های مالی عملکرد خوبی بر جای می‌گذارند.

باوجود موفقیت تجربی، این مدل‌ها با انتقاداتی مواجه شده‌اند. ریکلز (۲۰۰۷، ۲۰۱۱) معتقد است که مدل‌های باکی و ایلینسکی ارتباط واقعی با ساختارهای بازار ندارند و صرفاً رویکردهایی پدیدارشناسانه هستند. همچنین ادعا می‌شود که این مدل‌ها قادر به توضیح برخی «حقایق شناخته‌شده» مانند چاقی دُم توزیع‌ها (fat tails phenomenon) یا عدم تصادفی بودن قیمت‌ها (لوکس-هیتگر۲۰۰۱) نیستند. بااین‌حال، چنین نقدی قابل پاسخ‌گویی است. برای مثال، پاولینلی و آریولی (۲۰۱۸) نسخه اصلاح‌شده‌ای از مدل ایلینسکی ارائه کردند که شبیه‌سازی‌های آن با داده‌های واقعی مطابقت مناسبی داشت[۱].

نقش روش‌شناسی کوانتومی در برخورد با عدم قطعیت مالی

به‌زعم شینکوس (۲۰۱۴)، فرمالیسم کوانتومی یک شیوه کارآمد برای مواجهه با تصادفی بودن ارائه می‌دهد؛ در کوانتوم، تصادفی بودن ذاتی است، نه ناشی از ناآگاهی. اینکه چگونه این نوع مواجهه را به بازار مالی تعمیم دهیم، به رویکرد خاص پژوهشگر بستگی دارد.

- باکی نوعی رابطه جابه‌جایی هایزنبرگی میان قیمت اختیار و نرخ تغییرات آن پیشنهاد می‌دهد و از این طریق عدم قطعیت را ویژگی ذاتی قیمت‌گذاری معرفی می‌کند.
- ایلینسکی با الهام از سوروس (۱۹۸۷)، عدم قطعیت را نتیجه طبیعی تعاملات در بازار می‌داند و نه صرفاً ناآگاهی عاملان. او تصادفی‌بودن رفتارهای مالی را نه به‌عنوان نویز بیرونی، بلکه به‌مثابه برآیند تجمیع هم‌زمان مسیرهای ممکن تحول بازار تفسیر می‌کند؛ برداشتی که از نظر مفهومی به منطق انتگرال مسیر فاینمن نزدیک است.

در هر دو چارچوب، می‌توان شرایط کلاسیک را نیز بازیابی کرد: باکی در حالت نوسان صفر و ایلینسکی در حالت بازار کاملاً عقلانی و قطعی[۱].

نبود مؤلفه‌های واقعی کوانتومی

ساختار ریاضی مکانیک کوانتومی بر ویژگی‌هایی استوار است که ماهیتاً در فیزیک کلاسیک وجود ندارند؛ از جمله:

حضور اعداد موهومی در دینامیک (i)، تداخل و برهم‌نهی فازها، موقعیت ویژه تابع موج با نُرم واحد، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ و تحول فاز در زمان. در کوانتوم مالی اما: تابع حالت به‌جای تابع موج، تابع احتمال است، هیچ تداخل فازی ایجاد نمی‌شود، از i برای تعریف دینامیک استفاده نمی‌شود و روابط عدم قطعیت تنها شبه‌کوانتومی و استعاری هستند. به همین دلیل مدل‌ها از نظر فیزیکی کوانتومی نیستند، بلکه تنها از ساختار ریاضی ساده‌سازی شده نظریه کوانتوم استفاده می‌کنند[۱].

چرا این مدل‌ها باوجود غیر کوانتومی بودن موفق‌اند؟

موفقیت تجربی این مدل‌ها، واقعیتی غیرقابل‌انکار است. تطابق آن‌ها با داده‌های بازار – دست‌کم در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت – چشمگیر است. دلایل این موفقیت را می‌توان چنین خلاصه کرد:

الف) حذف ویژگی‌های پیچیده فیزیک کوانتومی: با کنارگذاشتن مؤلفه‌هایی مانند فاز و تداخل، مدل‌ها تبدیل به معادلات ریاضی ساده‌تر و پایدارتر می‌شوند که برای تحلیل داده‌های مالی مناسب‌ترند.

ب) استفاده از فرمالیسم قوی برای مدیریت عدم قطعیت: مکانیک کوانتومی ابزارهای مؤثر و قدرتمندی برای توصیف سیستم‌های دارای عدم قطعیت بنیادی ارائه می‌دهد. این ابزارها - باوجود حذف مؤلفه‌های فیزیکی - برای توصیف عدم قطعیت مالی بسیار کارآمدند.

ج) امکان سازگاری با داده‌های واقعی از طریق تنظیم پارامترها: پاولینلی و آریولی (۲۰۱۸)، نسخه اصلاح‌شده‌ای از مدل ایلینسکی ارائه دادند که با شبیه‌سازی رایانه‌ای مطابقت قابل‌توجهی با داده‌های بازار نشان داده است [۱].

جمع‌بندی نظری

در این گزارش، پرسش «چه مؤلفه‌ای در اقتصاد فیزیک کوانتومی واقعاً کوانتومی است؟» را در چارچوب رویکردهایی که توسط باکی و ایلینسکی در حوزه کوانتوم مالی ارائه شده‌اند، بررسی کردیم. ابتدا به شباهت‌های ادعایی میان مکانیک کوانتومی و نظام‌های مالی که مبنای این مدل‌ها هستند پرداختیم، سپس ویژگی‌های کلیدی دو مدل موردمطالعه را مرور کرده و در ادامه آن‌ها را به‌صورت انتقادی مقایسه نمودیم.

جمع‌بندی تحلیل نشان می‌دهد که اقتصادِ فیزیکِ کوانتومی در به‌کارگیری ابزارهای ریاضی الهام‌گرفته از فیزیک کوانتوم معنا پیدا می‌کند، اما در ذات خود به دنیای تجربی و غیر کوانتومی بازارهای مالی وفادار باقی می‌ماند. در اقتصاد فیزیک کوانتومی، آنچه «کوانتومی» به نظر می‌رسد بیشتر به ابزارهای ریاضی و رویکردهای مدل‌سازی اقتباس‌شده از مکانیک کوانتومی بازمی‌گردد، نه به وجود پدیده‌های واقعاً کوانتومی در بازار. ازیک‌طرف، این ابزارها کمک می‌کنند عدم قطعیت و نوسان بازارها بهتر مدیریت و مدل‌سازی شود؛ و از طرف دیگر، تفاوت‌های ساختاری، به‌ویژه حذف عدد موهومی i نشان می‌دهد که این مدل‌ها صرفاً استعاره‌ها و تکنیک‌های ریاضی هستند و نه بازتابی از رفتارهای فیزیکی جهان کوانتوم.

ازاین‌رو، پاسخ پرسش اصلی «دقیقاً چه چیزی در اقتصاد فیزیک کوانتومی، کوانتومی است» پاسخ دوگانه دارد:

۳. از یک سو، روش‌های الهام‌گرفته از کوانتوم در مواجهه با عدم قطعیت و نوسانات ذاتی بازارها، ابزارهایی کارآمد و انعطاف‌پذیر ارائه می‌کنند که برای تحلیل رفتار تصادفی فرایندهای مالی بسیار سودمند هستند.

۴. ازسوی‌دیگر، تفاوت صوری بنیادینی میان نظریه کوانتوم و مدل‌های مالی مورد بحث وجود دارد؛ به‌ویژه حذف

واحد موهومی i در مدل‌های باکی و ایلینسکی نشان می‌دهد که این چارچوب‌ها بیشتر کاربردی و توصیفی‌اند تا بازتاب‌دهنده پدیده‌های منحصراً کوانتومی. ازاین‌رو، این مدل‌ها می‌توانند داده‌های مالی را به طور مؤثر تحلیل کنند، بی‌آنکه مدعی پیش‌بینی رفتارهایی باشند که صرفاً در جهان فیزیک کوانتوم مشاهده می‌شود.

مراجع

1. Gianni Arioli - Giovanni Valente , «What is really quantum in quantum econophysics?» , Department of Mathematics, Politecnico di Milano P.zza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano Italy, Philosophy of Science, Volume 88 , Issue 4 , October 2021 , pp. 665 – 685

فناوری‌های کوآنتومی: بازار، سرمایه‌گذاری و ملاحظات راهبردی

عاطفه فرازمند، مدیرگروه برنامه‌ریزی تحول دیجیتال، a.farazmand@itrc.ac.ir
فرشاد حکمی زاده، عضو هیئت‌علمی گروه برنامه‌ریزی تحول دیجیتال، hakami@itrc.ac.ir

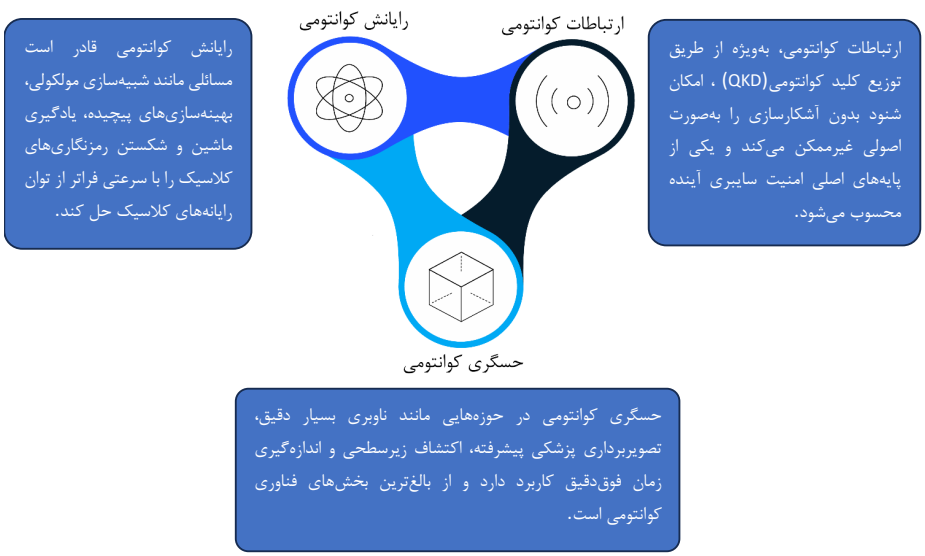
فناوری‌های کوانتومی (Quantum Technologies) در آستانه ورود به مرحله‌ای تازه از بلوغ قرار گرفته‌اند؛ مرحله‌ای که در آن این فناوری‌ها به‌تدریج از محیط‌های آزمایشگاهی خارج شده و به کاربردهای صنعتی، تجاری و راهبردی نزدیک می‌شوند. به رسمیت شناختن سال ۲۰۲۵ به‌عنوان «سال بین‌المللی علم و فناوری کوانتوم» از سوی سازمان ملل متحد، نشانه‌ای روشن از اهمیت روزافزون این حوزه در سطح جهانی است.

بر اساس تحقیقات مؤسسه مک‌کنزی، تحولات سال‌های اخیر، نقطه عطفی در مسیر توسعه فناوری‌های کوانتومی بوده‌اند؛ به‌گونه‌ای که تمرکز اصلی از افزایش صرف تعداد کیوبیت‌ها، به سمت پایداری، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری سیستم‌های کوانتومی تغییر یافته است. این تغییر جهت، پیام روشنی برای صنایع حیاتی و دولت‌ها دارد: فناوری کوانتوم به‌تدریج در حال تبدیل شدن به یک زیرساخت قابل اتکا برای آینده اقتصاد دیجیتال است.

هدف این گزارش، ارائه تصویری اجمالی و ساختاریافته از وضعیت کنونی فناوری‌های کوانتومی در جهان، روندهای سرمایه‌گذاری، اندازه بازار، و پیامدهای راهبردی آن بر اساس گزارش‌های «Quantum Technology Monitor» مک‌کنزی در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۵ است.

چارچوب مفهومی فناوری‌های کوانتومی

مطابق با چارچوب تحلیلی مک‌کنزی، فناوری‌های کوانتومی مطابق شکل ۱ بر سه ستون اصلی رایانش کوانتومی (Quantum Computing)، ارتباطات کوانتومی (Quantum Communication) و حسگری کوانتومی (Quantum Sensing) استوار هستند.



شکل ۱- چارچوب مفهومی فناوری‌های کوانتومی[۱].

رایانش کوانتومی مهم‌ترین و بزرگ‌ترین محرک اقتصادی این حوزه به شمار می‌رود و انتظار می‌رود بیشترین سهم از ارزش بازار آینده را به خود اختصاص دهد. ارتباطات کوانتومی نقشی کلیدی در امنیت اطلاعات و زیرساخت‌های حیاتی ایفا می‌کند، درحالی‌که حسگری کوانتومی کاربردهای مهمی در حوزه‌هایی مانند تصویربرداری پیشرفته، ناوبری دقیق و اندازه‌گیری‌های فوق حساس دارد.

این تقسیم‌بندی، مبنای تحلیل بازار، سرمایه‌گذاری و سیاست‌گذاری در بسیاری از کشورهای پیشرو در حوزه کوانتوم قرار گرفته است.

اندازه بازار و چشم‌انداز اقتصادی فناوری کوانتوم

بر اساس برآوردهای مک‌کنزی، مجموع ارزش بازار جهانی فناوری‌های کوانتومی می‌تواند تا سال ۲۰۳۵ به حدود ۹۷ میلیارد دلار برسد. این رقم شامل بازه‌ای از عدم‌قطعیت است و به متغیرهایی مانند سرعت پیشرفت فناوری، نرخ پذیرش صنعتی و سیاست‌های حمایتی دولت‌ها وابسته است.

تقسیم‌بندی تقریبی بازار تا سال ۲۰۳۵ به شرح زیر است:

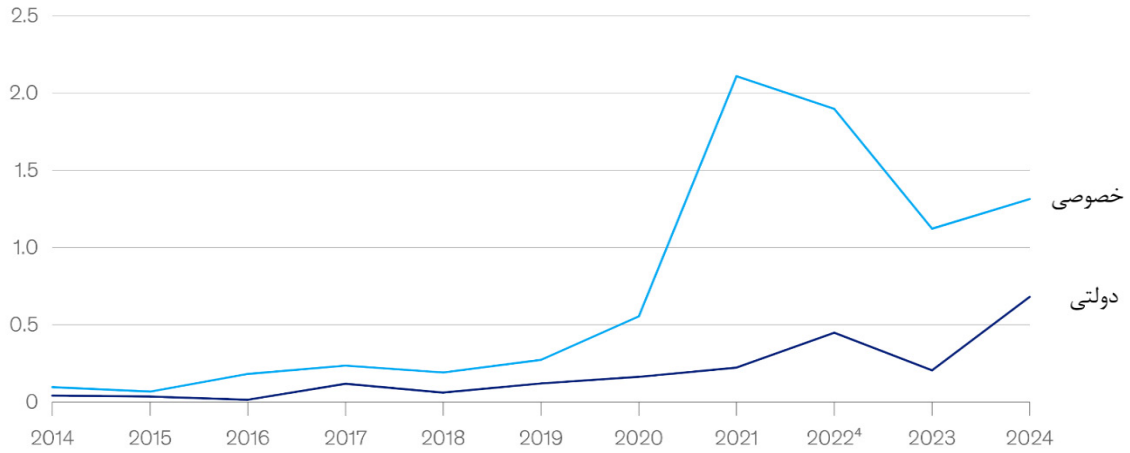
- رایانش کوانتومی: ۲۸ تا ۷۲ میلیارد دلار
- ارتباطات کوانتومی: ۱۱ تا ۱۵ میلیارد دلار
- حسگری کوانتومی: ۷ تا ۱۰ میلیارد دلار

همچنین پیش‌بینی می‌شود که در صورت تداوم روند فعلی رشد، ارزش کل بازار فناوری‌های کوانتومی تا سال ۲۰۴۰ به حدود ۱۹۸ میلیارد دلار افزایش یابد. صنایع شیمی، علوم زیستی، خدمات مالی و حمل‌ونقل هوشمند از جمله صنایعی هستند که بیشترین منافع بالقوه را از تجاری‌سازی فناوری‌های کوانتومی خواهند برد [۲].

روندهای سرمایه‌گذاری و نقش دولت‌ها

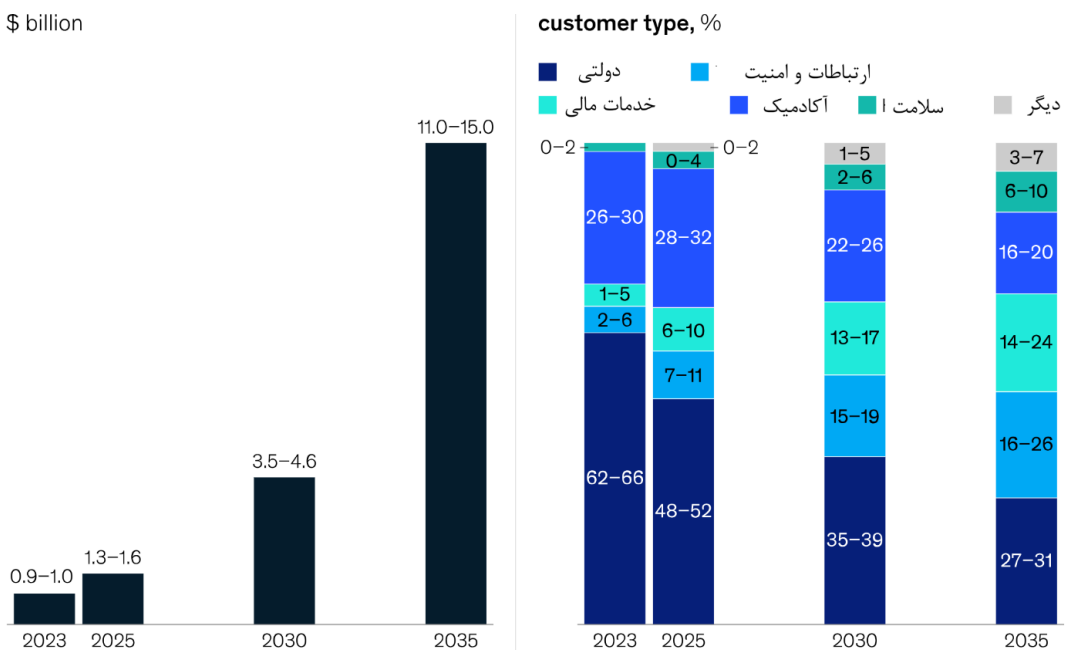
روندهای سرمایه‌گذاری در حوزه فناوری کوانتومی طی سال‌های اخیر شتاب گرفته است. در سال ۲۰۲۴، مجموع سرمایه‌گذاری انجام‌شده در استارت‌آپ‌های کوانتومی در سطح جهانی به نزدیک به ۲ میلیارد دلار رسید که نسبت به ۱.۳ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۳، رشد ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد.

بررسی ترکیب این سرمایه‌گذاری‌ها نشان می‌دهد که بخش خصوصی همچنان نقش اصلی را حفظ کرده و حدود دو سوم کل سرمایه‌گذاری‌ها معادل حدود ۱.۳ میلیارد دلار از طریق سرمایه‌گذاری‌های خطرپذیر و سهام خصوصی تأمین شده است. چنانچه مشاهده می‌شود مطابق نمودار، سرمایه‌گذاری عمومی و دولتی به طور معناداری افزایش‌یافته و با افزایش ۱۹ درصدی نسبت به سال ۲۰۲۳، به ۳۴ درصد از کل تأمین مالی استارت‌آپ‌های کوانتومی در سال ۲۰۲۴ معادل ۶۸۰ میلیون دلار رسیده است (شکل ۱). این روند نشان‌دهنده افزایش فوریت دولت‌ها برای سرمایه‌گذاری راهبردی در فناوری کوانتومی و تلاش برای تضمین حضور و ظرفیت ملی در این حوزه نوظهور است. این الگو حاکی از آن است که دولت‌ها به‌ویژه در مراحل پرریسک‌تر و بلندمدت‌تر توسعه استارت‌آپ‌های کوانتومی، نقش پررنگ‌تری در تأمین مالی ایفا می‌کنند.



شکل ۲- میزان سرمایه گذاری در فناوری کوانتوم به تفکیک بخش های خصوصی و دولتی [میلیارد دلار] [۳].

ازآنجاکه فناوری‌های ارتباطات کوانتومی امکان انتقال امن اطلاعات را فراهم می‌کنند، بازار این فناوری سریعاً درحال‌رشد است. اندازه کل بازار ارتباطات کوانتومی در سال ۲۰۲۴ برابر ۱.۲ میلیارد دلار بوده و برآورد می‌شود تا سال ۲۰۳۵ به ۱۰.۵ میلیارد تا ۱۴.۹ میلیارد دلار افزایش یابد [۲].



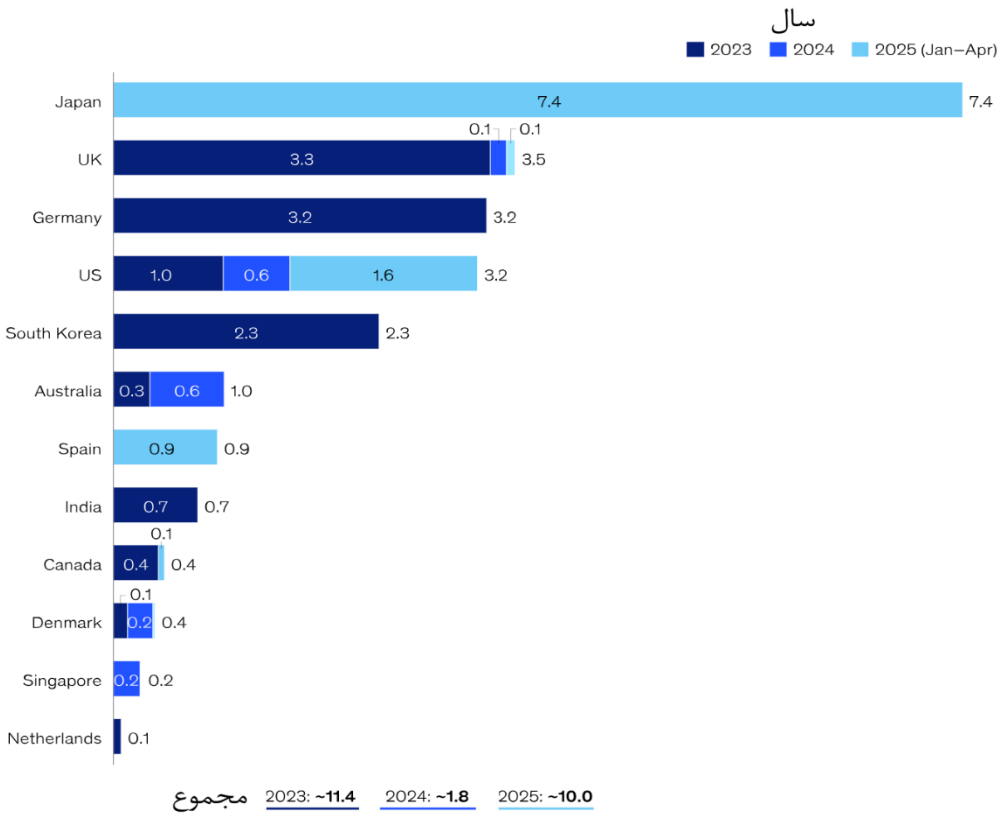
شکل ۳- برآورد رشد بازار ارتباطات کوانتومی و سهم بخش های مختلف از این بازار تا سال ۲۰۳۵ [میلیارد دلار] [۲].

بر اساس گزارش‌های Quantum Technology Monitor مک‌کنزی، توسعه فناوری کوانتوم به طور فزاینده‌ای در قالب خوشه‌های نوآوری متمرکز شکل می‌گیرد که ترکیبی از دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی، شرکت‌های نوپا، سرمایه‌گذاران و حمایت‌های دولتی هستند.

داده‌های مک‌کنزی نشان می‌دهد که روند تأمین مالی دولتی در حوزه کوانتوم در سال ۲۰۲۴ شتاب گرفته و در ماه‌های ابتدایی ۲۰۲۵ به اوج رسیده است. در این دوره، دولت‌ها بیش از ۱۰ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری عمومی جدید

در فناوری‌های کوانتومی را اعلام کرده‌اند که عمدتاً توسط ابتکارات بزرگ در ژاپن، اسپانیا و ایالات متحده هدایت شده است.

به طور مشخص، دولت ژاپن در ابتدای سال ۲۰۲۵ سرمایه‌گذاری ۷.۴ میلیارددلاری در حوزه کوانتوم را اعلام کرده و اسپانیا نیز تعهد ۹۰۰ میلیون‌دلاری خود را برای توسعه فناوری‌های کوانتومی ارائه داده است. این سرمایه‌گذاری‌ها، در کنار ابتکارات ملی در کشورهایی مانند ایالات متحده، آلمان، چین، کانادا و استرالیا، نشان‌دهنده آن است که رقابت در حوزه کوانتوم ماهیتی ژئوپلیتیکی و راهبردی به خود گرفته است[۲].



شکل ۴- نمودار سرمایه گذاری کشورهای منتخب در توسعه فناوری‌های کوانتومی[۳].

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یافته‌های گزارش‌های مک‌کنزی نشان می‌دهد که فناوری‌های کوانتومی به نقطه‌ای تعیین‌کننده در چرخه عمر خود رسیده‌اند. تمرکز اکوسیستم جهانی از افزایش صرف تعداد کیوبیت‌ها به سمت پایداری، تصحیح خطا، توسعه نرم‌افزار و کاربردهای صنعتی مشخص تغییریافته است؛ تغییری که نشانه‌ای روشن از نزدیک‌شدن این فناوری‌ها به مرحله بلوغ اقتصادی و ورود تدریجی به بازارهای واقعی است.

افزایش نقش دولت‌ها به‌عنوان ریسک‌پذیران اولیه، رشد سرمایه‌گذاری‌های عمومی، و شکل‌گیری خوشه‌های نوآوری منطقه‌ای بیانگر آن است که کوانتوم دیگر صرفاً یک فناوری تحقیقاتی نیست، بلکه به یک زیرساخت راهبردی قرن بیست ویکم در حوزه‌های اقتصاد دیجیتال، امنیت اطلاعات، صنایع پیشرفته و رقابت ژئوپلیتیکی تبدیل شده است.

در این چارچوب، کشورهایی که رویکردی فعال، هدفمند و واقع‌بینانه به کوانتوم اتخاذ کنند، قادر خواهند بود جایگاه خود را در زنجیره ارزش آینده تثبیت کنند؛ در مقابل، تأخیر یا پراکندگی سیاستی می‌تواند به وابستگی فناورانه و ازدست‌رفتن فرصت‌های راهبردی منجر شود.

پیامدهای راهبردی و پیشنهادهای سیاستی برای جمهوری اسلامی ایران

باتوجه‌به ماهیت زیربنایی فناوری کوانتوم و سرمایه‌گذاری‌های گسترده کشورهای پیشرو، عدم ورود هدفمند به این حوزه می‌تواند در میان‌مدت جایگاه ایران را در اقتصاد دانش‌بنیان تضعیف کند. بر اساس تحلیل‌های مک‌کنزی و واقعیات داخلی، رویکرد پیشنهادی برای ایران باید مرحله‌بندی شده، انتخاب‌محور و مبتنی بر مزیت‌های نسبی باشد.

الف) تمرکز بر حوزه‌های کم‌ریسک‌تر و نزدیک‌تر به بلوغ

در کوتاه‌مدت، به‌جای ورود پرهزینه به رایانش کوانتومی با قابلیت تحمل خطا، تمرکز بر حوزه‌هایی با بازده عملیاتی سریع‌تر توصیه می‌شود:

- حسگری کوانتومی: با کاربردهای مستقیم در ناوبری مستقل از سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی(GNSS)، تصویربرداری پزشکی و اندازه‌گیری‌های دقیق صنعتی.
- ارتباطات کوانتومی: به‌عنوان ابزار راهبردی برای ارتقای امنیت زیرساخت‌های حیاتی و داده‌های حساس.

ب) توسعه هدفمند سرمایه انسانی چندرشته‌ای

کمبود نیروی انسانی چندرشته‌ای، مهم‌ترین گلوگاه اکوسیستم کوانتوم است. اقدامات پیشنهادی:

- ایجاد رشته‌ها و گرایش‌های میان‌رشته‌ای در مقاطع تحصیلات تکمیلی.
- حمایت از پروژه‌های دکتری و پسادکتری مأموریت‌محور در حوزه کوانتوم.

ج) ایجاد خوشه ملی کوانتوم

تمرکز زیرساخت‌های گران‌قیمت در قالب یک یا دو خوشه ملی، با دسترسی مشترک دانشگاه‌ها، پژوهشگاه‌ها و شرکت‌های نوپا، می‌تواند از اتلاف منابع جلوگیری کرده و هم‌افزایی واقعی ایجاد کند. این خوشه‌ها باید دسترسی کنترل‌شده به سخت‌افزار و بسترهای ابری کوانتومی را فراهم نمایند.

در مجموع، فناوری کوانتوم برای ایران یک انتخاب راهبردی بلندمدت است که نیازمند تصمیم‌گیری هوشمندانه، فازبندی شده و مبتنی بر واقعیت‌های ملی و جهانی خواهد بود.

مراجع

1. McKinsey & Company, Quantum Technology Monitor, June 2023
2. McKinsey & Company, Quantum Technology Monitor, June 2025
3. https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-year-of-quantum-from-concept-to-reality-in-2025

بررسی راهبردهای ملی کوانتوم در کشورهای پیشرو و درس‌آموخته‌هایی برای ایران

اعظم سادات مرتضوی کهنگی، مدیرگروه مطالعات تنظیم‌گری و سازماندهی فاوا، mahsa.mortazavi@itrc.ac.ir
آنیتا هادی‌زاده، پژوهشگر گروه مطالعات تنظیم‌گری و سازماندهی فاوا، hadizadeh@itrc.ac.ir

فناوری‌های کوانتومی در سال‌های اخیر از مرزهای آزمایشگاهی به عرصه اقتصاد ملی و رقابت‌های بین‌المللی وارد شده‌اند. این فناوری‌ها می‌توانند در حوزه‌های ارتباطات امن، رمزنگاری، محاسبات بسیار سریع، حسگرهای پیشرفته و شبکه‌های ارتباطی نسل آینده نقش‌آفرین باشند. در رقابت‌های فناورانه، کشورهایی که فناوری‌های کوانتومی را به‌درستی در برنامه‌های توسعه خود جای دهند، از مزیت‌های رقابتی و امنیتی قابل‌توجهی برخوردار خواهند شد. این فناوری‌ها نه‌تنها بخش‌های فناورانه اقتصاد دیجیتال را متحول می‌کنند، بلکه می‌توانند ساختار امنیت ملی، خدمات مالی، شبکه‌های ارتباطی و زیرساخت‌های حیاتی را نیز دگرگون سازند. بسیاری از کشورهای جهان با تدوین و اجرای راهبردهای ملی کوانتوم، کوشیده‌اند تا ضمن ایجاد اکوسیستم فناوری مناسب، زیرساخت‌های نهادی و قانونی هم برای مدیریت و بهره‌برداری از این فناوری ایجاد کنند [۱]. اتحادیه اروپا به همراه کشورهای پیشرو، مانند ایالات متحده، چین، ژاپن و کره جنوبی، با تدوین راهبردهای ملی جامع برای توسعه این فناوری‌ها برنامه‌ریزی کرده‌اند تا هم از مزایای اقتصادی بهره‌مند شوند و هم از تهدیدات امنیتی مانند شکست سیستم‌های رمزنگاری فعلی جلوگیری کنند[۲]. ایران نیز در سال‌های اخیر اقداماتی در این زمینه آغاز کرده است، اما هنوز فاقد یک نقشه راه منسجم در سطح ملی در حوزه کوانتوم است. این موضوع می‌تواند چالش‌هایی برای رقابت‌پذیری کشور در اقتصاد دیجیتال آینده ایجاد کند. در این مقاله، به بررسی تجربه کشورها و استخراج درس‌آموخته‌های کلیدی برای توسعه سیاست‌های ملی ایران در حوزه کوانتوم پرداخته می‌شود.

مطالعه تطبیقی: راهبردهای ملی کوانتوم

ایالات متحده

ایالات متحده از سال ۲۰۱۸ با تصویب برنامه ملی کوانتوم، مسیر توسعه فناوری‌های کوانتومی را آغاز کرد. برنامه‌ای که با افزایش بودجه فدرال، ایجاد مراکز تحقیقاتی متعدد و تأسیس نهاد هماهنگ‌کننده دولت فدرال پیگیری می‌شود. هدف اصلی این برنامه، تقویت رقابت‌پذیری اقتصادی و امنیت ملی در برابر پیشرفت‌های فناورانه دیگر کشورها است. آمریکا به‌صورت دستگاهی و با تمرکز بر هماهنگی میان وزارتخانه‌های کلیدی (مثل وزارت علوم، انرژی و دفاع) راهبرد ملی کوانتوم را پیش برده است. راهبرد آمریکا اهداف گوناگونی از جمله ارتقای توان محاسباتی کوانتومی، توسعه ارتباطات کوانتومی امن و تقویت کاربست‌های صنعتی دارد. همچنین آمریکا از ابزارهای بودجه‌های نهادی برای پژوهش، گرنت‌های پروژه‌ای برای حرکت از تحقیق به کاربرد، تدارکات عمومی برای حمایت از فناوری‌های کوانتومی در نظام‌سازی و تأمین مالی سهام‌محور برای استارت‌آپ‌ها و شرکت‌ها برای پیشبرد اهداف سیاستی بهره می‌برد.

راهبرد ملی ایالات متحده بر پایه هماهنگی نهادی و مجموعه سیاست‌های چندجانبه شکل‌گرفته تا رقابت فناورانه و امنیت ملی را هم‌زمان تقویت کند. با ایجاد نهادهای سیاستی اختصاصی و تخصیص بودجه قابل‌توجه برای

پژوهش، آموزش و کاربست صنعتی، آمریکا توانسته اکوسیستم کوانتومی پیوسته و متصل به بازار بسازد. این رویکرد با اقدامات نظارتی فراتر از پژوهش محض و گسترش به حوزه‌های صنعتی و تجاری، یکی از نمونه‌های برجسته سیاست‌گذاری کوانتومی است[۱].

ژاپن

ژاپن برنامه‌های استراتژیک جامعی برای کوانتوم دارد که توسعه نیروی انسانی، همکاری دانشگاه - صنعت و کاربردهای اقتصادی را با مشارکت گسترده آنها در برمی‌گیرد. ژاپن اهداف متنوعی مانند توسعه نیروی متخصص، افزایش توان محاسباتی کوانتومی و تکیه بر کاربردهای صنعتی بنیادی در بخش‌های انرژی و سلامت را در نقشه راه خود تعیین کرده است. همچنین این کشور از ابزارهایی شامل گرنت‌های پژوهشی، حمایت از صنایع نوپا، و توسعه نیروی انسانی در سطوح مختلف برای پیشبرد اهداف سیاستی خود استفاده کرده است. می‌توان گفت که ژاپن باتکیه‌بر مشارکت نزدیک دولت، دانشگاه و بخش خصوصی، استراتژی گسترده و برنامه‌ریزی‌شده‌ای برای توسعه فناوری‌های کوانتومی ایجاد کرده و با تمرکز بر پرورش نیروی متخصص و ترکیب اهداف اقتصادی با برنامه‌های تحقیقاتی کاربردی این کشور را در سطح جهانی به‌عنوان یکی از پیش‌گامان این حوزه مطرح نموده است. توجه ویژه به برنامه‌های آموزشی بلندمدت و سرمایه‌گذاری هدفمند در حوزه‌های صنعتی، یکی از مؤلفه‌های کلیدی راهبرد ژاپن است[۱].

اتحادیه اروپا

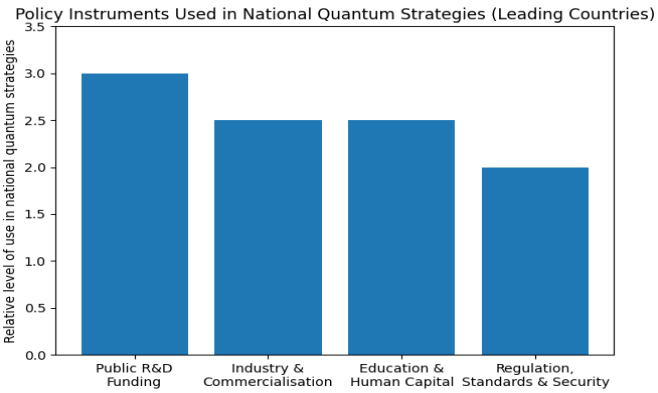
اتحادیه اروپا استراتژی Quantum Europe را تصویب کرده که هدف آن ایجاد اکوسیستم مبتنی بر تحقیق، توسعه و تجاری‌سازی فناوری‌های کوانتومی در کل قاره است. برنامه‌هایی مانند Quantum Flagship به‌عنوان چارچوب کلان شامل اهداف بلندپروازانه برای پژوهش، توسعه و استانداردسازی است. این برنامه با بودجه چند میلیارد یورویی، تمرکز ویژه‌ای بر زیرساخت‌ها، پژوهش و تبدیل یافته‌های دانشگاهی به محصولات صنعتی دارد. در اتحادیه اروپا، کشورها با یکدیگر و با نهادهای اتحادیه همکاری دارند و مشارکت ذی‌نفعان شامل دولت‌های ملی، دانشگاه‌ها و شرکت‌های صنعتی است[۳]. در اتحادیه اروپا، ابزارهای اصلی برای پیشبرد اهداف سیاستی شامل حمایت مالی از پژوهش‌های بنیادی و کاربردی، حمایت از تجاری‌سازی فناوری‌ها و ایجاد زیرساخت‌های مشترک برای ارتباطات کوانتومی می‌باشد. راهبرد اتحادیه اروپا رویکرد شبکه‌ای و متحد است که با انسجام کشورهای عضو و تأمین مالی ساختاری از طریق برنامه‌هایی مثل Quantum Flagship به توسعه همه‌جانبه فناوری‌های کوانتومی می‌پردازد. این هدایت استراتژیک به‌ویژه در بخش‌های پژوهش، زیرساخت و ارتباطات کوانتومی، علاوه بر همکاری‌های بین‌المللی، مجهز به ابزارهای مشترک اتحادیه اروپا است که امکان شکل‌دهی بازار و استانداردهای صنعتی را فراهم می‌کند.

مقایسه راهبرد کشورها

توزیع ابزارهای سیاستی مورداستفاده در راهبردهای ملی فناوری‌های کوانتومی:

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است (تهیه شده بر اساس تحلیل تطبیقی گزارش OECD از راهبردها و سیاست‌های ملی کوانتوم تهیه برای نشان دادن الگوهای غالب استفاده از ابزارهای سیاستی در کشورهای پیشرو) بیشترین تمرکز کشورهای دارای راهبرد ملی کوانتوم بر ابزارهای حمایت مالی پژوهش‌محور نظیر گرنت‌های تحقیقاتی

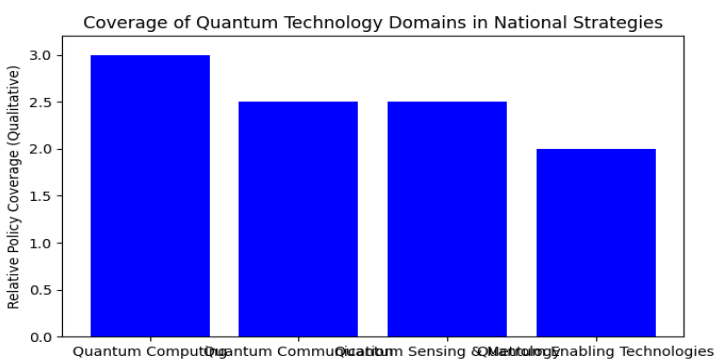
و سرمایه‌گذاری دولتی مستقیم است. در مقابل، استفاده از ابزارهای تنظیم‌گری، استانداردسازی و تدارکات عمومی سهم محدودتری در سبد سیاستی کشورها دارد. این موضوع نشان‌دهنده غلبه رویکرد توسعه فناوری بر تنظیم‌گری بازار و حکمرانی فناوری در مراحل اولیه بلوغ سیاستی کوانتوم است.



شکل ۱- ابزارهای سیاستی مورد استفاده در راهبردهای ملی فناوری‌های کوانتوم(کشورهای پیشرو) (منبع: ۲۰۲۵,OECD)

میزان پوشش حوزه‌های مختلف فناوری کوانتومی در راهبردهای ملی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است (ترسیم شده بر اساس تحلیل تطبیقی راهبردهای ملی کوانتوم در کشورهای پیشرو و با اتکا به گزارش‌های OECD و نشانگر سطح توجه سیاستی به حوزه‌های اصلی فناوری کوانتومی به‌صورت کیفی و نسبی) محاسبات کوانتومی بیشترین سطح توجه را در راهبردهای ملی کشورهای پیشرو به خود اختصاص داده است، در حالی که ارتباطات کوانتومی در جایگاه دوم و حسگرها و سنجش کوانتومی در جایگاه سوم و فناوریهای توانمندساز کم‌پوشش‌ترین حوزه محسوب می‌شوند. این الگو بیانگر تمرکز سیاست‌گذاران بر حوزه‌هایی با قابلیت تجاری‌سازی سریع‌تر و کاربردهای گسترده‌تر در اقتصاد دیجیتال و امنیت سایبری است.



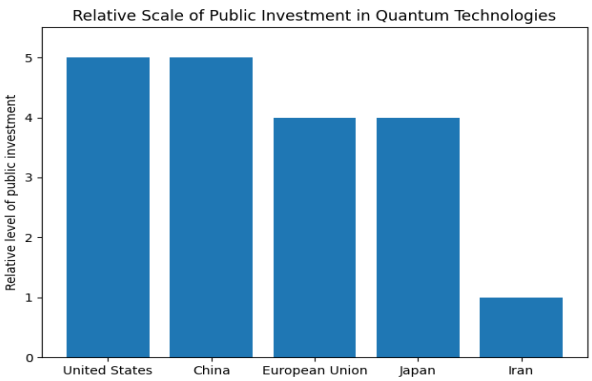
شکل ۲- پوشش حوزه‌های مختلف فناوری کوانتومی در راهبردهای ملی(منبع: ۲۰۲۵,OECD)

وضعیت ایران در مقایسه با کشورهای پیشرو

در ایران نیز در سال‌های اخیر اقداماتی برای توسعه فناوری کوانتوم مشاهده شده است. به‌عنوان‌مثال، سند ملی علم‌وفناوری کوانتوم و برنامه‌هایی برای راه‌اندازی شبکه ملی کوانتومی تا سال ۲۰۲۶ در دست اجراست. این سند

نقش نقشه راه را در توسعه تحقیقات، فناوری و تجاری‌سازی ایفا می‌کند و قرار است با تشکیل ستادهای تخصصی و مشارکت نهادهای مختلف اجرایی شود. بااین‌حال، مقیاس سرمایه‌گذاری و ترکیب ساختار نهادی در ایران هنوز به‌مراتب کمتر از کشورهای پیشرو است.

مقایسه بودجه ملی کوانتوم



شکل ۳- مقایسه سطوح سرمایه‌گذاری دولتی در کوانتوم در کشورهای منتخب (منبع: تحقیق حاضر)

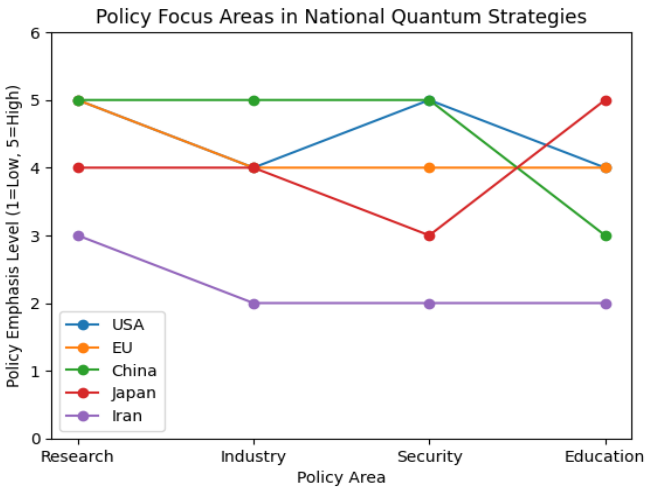
شکل ۳ بر اساس برآوردهای تحلیلی گزارش‌های OECD صرفاً بیانگر مقیاس نسبی سرمایه‌گذاری‌ها است و نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری ایران در فناوری‌های کوانتومی در مقایسه با کشورهای پیشرو، چندین مرتبه کمتر است(اطلاعات کشورها در این نمودار از گزارش OECD و اطلاعات ایران از اطلاعات موجود نظیر سند ملی توسعه علوم و فناوری های کوانتومی برگرفته شده است). مقیاس نسبی در این گزارش برای سرمایه‌گذاری بسیار بالا و نظام‌مند(۵)، برای سرمایه‌گذاری بالا با برنامه ملی(۴) ... برای فعالیت‌های پراکنده و نوپا(۱) می‌باشد.

موضوعی که بیانگر فاصله قابل‌توجه کشور با رقابت جهانی در اقتصاد دیجیتال مبتنی بر کوانتوم است. گزارش OECD اشاره می‌کند که تا اکتبر ۲۰۲۵ بیش از ۵۵.۷ میلیارد دلار از سوی دولت‌ها در سراسر جهان برای علوم و فناوری کوانتومی اختصاص‌یافته است که نشان‌دهنده مقیاس سرمایه‌گذاری است[۱]. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که شکاف بسیار عمیق بین کشورهای پیشرو و ایران وجود دارد به‌طوری که چین و آمریکا کوانتوم را در سطح سرمایه‌گذاری راهبردی ملی دیده‌اند؛ اما ایران هنوز در مرحله سرمایه‌گذاری محدود پژوهشی قرار دارد.

بلوغ راهبردهای ملی کوانتوم

ایران در مقایسه با کشورهای پیشرو هنوز در مراحل ابتدایی بلوغ راهبرد ملی کوانتوم قرار دارد، درحالی‌که این کشورها وارد فاز پیاده‌سازی، بازارسازی و استانداردگذاری شده‌اند. گزارش OECD شرح می‌دهد که ۱۸ عضو OECD به‌علاوه اتحادیه اروپا تا پایان ۲۰۲۵ راهبرد ملی کوانتوم را اتخاذ کرده‌اند و به‌تدریج از مراحل آگاهی به سمت اجرای عملیاتی حرکت می‌کنند[۲]. ایران هنوز در سطح آغازین قرار دارد و عدم اجرای هماهنگ و تجاری‌سازی نیز از چالش‌های این موضوع است.

تمرکز سیاستی در راهبردهای ملی کوانتوم



شکل ۴- توزیع تمرکز سیاستی در راهبردهای ملی فناوری‌های کوانتومی (تحقیق، صنعت، امنیت، آموزش) (منبع: تحقیق حاضر)

مطابق شکل ۴، راهبردهای ملی کوانتوم در کشورهای پیشرو بر ترکیبی متوازن از تحقیق، صنعت، امنیت و آموزش استوار است در حالی که در ایران، تمرکز سیاستی در تمامی این حوزه‌ها محدود و پراکنده است(اطلاعات کشورها در این نمودار از گزارش OECD و اطلاعات ایران از اطلاعات موجود نظیر سند ملی توسعه علوم و فناوری های کوانتومی برگرفته شده است). در بخش‌های مختلف گزارش OECD اشاره شده که سیاست‌های ملی کوانتوم شامل حوزه‌های کلیدی مانند تحقیق و توسعه، استانداردسازی، توسعه نیروی انسانی و امنیت است. در بخشی دیگر OECD به پروژه‌های زیرساختی مانند شبکه ارتباطات کوانتومی در اتحادیه اروپا و چین اشاره می‌کند که نشان‌دهنده تمرکز سیاستی در محورهای مختلف است[۱].

درحالی‌که کشورهای پیشرو در حوزه کوانتوم از سبدی متنوع از ابزارهای سیاستی شامل حمایت‌های مالی، مشارکت‌های دولت–صنعت، برنامه‌های توسعه مهارت و نیز ابزارهای تنظیم‌گری و استانداردسازی بهره می‌برند، سیاست‌های مرتبط با فناوری‌های کوانتومی در ایران عمدتاً به حمایت‌های محدود پژوهشی و پروژه‌محور خلاصه شده است. فقدان استفاده نظام‌مند از ابزارهایی نظیر تدارکات عمومی فناورانه، چارچوب‌های تنظیم‌گری پیش‌دستانه و سیاست‌های تحریک بازار موجب شده است پیوند میان پژوهش‌های کوانتومی و کاربردهای اقتصادی و صنعتی در کشور شکل نگیرد. این مطالعه نشان می‌دهد که چالش اصلی ایران صرفاً کمبود منابع نیست، بلکه ضعف در تنوع و طراحی ابزارهای سیاستی متناسب با زنجیره ارزش فناوری کوانتوم است.

همچنین کشورها باوجود تمرکز بیشتر بر محاسبات کوانتومی، به طور هم‌زمان ارتباطات کوانتومی و حسگرهای کوانتومی را نیز به‌عنوان اجزای مکمل اکوسیستم فناوری مدنظر قرار داده‌اند. در مقابل، در ایران هنوز تمرکز مشخص و اولویت‌بندی سیاستی روشنی در هیچ‌یک از این حوزه‌ها شکل نگرفته و فعالیت‌ها عمدتاً پراکنده و دانشگاه‌محور باقی‌مانده‌اند. این وضعیت خطر عقب‌ماندگی مضاعف را ایجاد می‌کند؛ چراکه بدون انتخاب حوزه‌های اولویت‌دار و پیوند آن‌ها با نیازهای امنیتی، صنعتی و زیربنایی کشور، امکان هم‌راستایی با روندهای جهانی توسعه فناوری‌های کوانتومی فراهم نخواهد شد؛ لذا می‌توان گفت مقایسه ایران با کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که فاصله کشور در حوزه کوانتوم بیش از آنکه فناورانه باشد، ماهیتی سیاستی، نهادی و تنظیم‌گری دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ایران

بررسی تطبیقی راهبردها و سیاست‌های ملی کوانتوم در کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که موفقیت در این حوزه صرفاً حاصل پیشرفت‌های فناورانه، نیست؛ بلکه نتیجه وجود راهبرد ملی منسجم، ابزارهای سیاستی متنوع و سازوکارهای حکمرانی و تنظیم‌گری مؤثر است. کشورهای پیشرو با عبور از مرحله حمایت‌های پژوهشی صرف، به سمت ایجاد اکوسیستم کامل فناوری‌های کوانتومی شامل پژوهش، بازارسازی، استانداردسازی و تنظیم‌گری پیش‌دستانه حرکت کرده‌اند. در مقابل، وضعیت ایران نشان‌دهنده شکاف معنادار در سطح بلوغ سیاستی است؛ به‌گونه‌ای که علی‌رغم وجود ظرفیت‌های علمی و دانشگاهی، نبود اولویت‌بندی شفاف در حوزه‌های فناوری کوانتومی و محدود بودن ابزارهای سیاستی، مانع از تبدیل این ظرفیت‌ها به دستاوردهای اقتصادی، امنیتی و زیربنایی شده است. تداوم این وضعیت می‌تواند منجر به عقب‌ماندگی ساختاری ایران در یکی از فناوری‌های پیشران اقتصاد دیجیتال آینده شود.

توصیه‌های سیاستی برای ایران

۱- ایجاد نهاد هماهنگ‌کننده حکمرانی کوانتوم

تجربه کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که وجود نهاد یا سازوکار هماهنگ‌کننده در سطح ملی برای سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری و پایش پیشرفت‌ها ضروری است. در ایران، می‌تواند از موازی‌کاری جلوگیری کرده و انسجام تصمیم‌گیری در حوزه کوانتوم را تقویت کند.

۲- تنوع‌بخشی به ابزارهای سیاستی فراتر از حمایت‌های پژوهشی

ایران نیازمند گذار از سیاست‌های صرفاً پژوهش‌محور به استفاده از سبدی متنوع از ابزارهای سیاستی است. از جمله مشارکت‌های دولت–صنعت، تدارکات عمومی فناورانه، حمایت از تجاری‌سازی و طراحی چارچوب‌های تنظیم‌گری پیش‌دستانه. این تنوع ابزارها می‌تواند پیوند میان علم، صنعت و بازار را تقویت کند.

۳- اولویت‌دهی راهبردی به حوزه ارتباطات کوانتومی

باتوجه‌به نقش حیاتی ارتباطات کوانتومی در امنیت سایبری، زیرساخت‌های حیاتی و حاکمیت داده، پیشنهاد می‌شود این حوزه به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی سیاستی ایران انتخاب شود تا مزیت نسبی ایران را در قیاس با برخی کشورهای منطقه تقویت کند.

۴- توسعه سرمایه انسانی و مهارت‌های میان‌رشته‌ای

توسعه فناوری‌های کوانتومی بدون سرمایه انسانی متخصص امکان‌پذیر نیست. لازم است برنامه‌های آموزشی و مهارتی هدفمند در سطوح دانشگاهی و حرفه‌ای طراحی شود تا پیوند میان فیزیک، مهندسی، علوم کامپیوتر و سیاست‌گذاری فناوری تقویت گردد.

۵- حرکت تدریجی به‌سوی تنظیم‌گری پیش‌دستانه و استانداردسازی

ایران باید هم‌زمان با توسعه فناوری، به طراحی چارچوب‌های تنظیم‌گری اولیه، مشارکت در فرایندهای استانداردسازی

بین‌المللی و رصد تحولات حقوقی جهانی در حوزه کوانتوم توجه کند تا از انفعال تنظیم‌گری در آینده جلوگیری شود.

مراجع

1. OECD. (2025). An Overview of National Strategies.
2. Rand, L. (2022). Quantum Technology: A Primer on National Security and Policy Implications.
3. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum

تنظیم‌گری ارتباطات کوانتومی در نظام حقوقی ایران

سیده مریم اعتماد، عضو هیئت‌علمی گروه مطالعات تنظیم‌گری و سازماندهی فاوا، sm.etemad@itrc.ac.ir
رزیتا اتحادی یزدی، پژوهشگر گروه مطالعات تنظیم‌گری و سازماندهی فاوا، ettehadi@itrc.ac.ir
اعظم سادات مرتضوی کهنگی، مدیرگروه مطالعات تنظیم‌گری و سازماندهی فاوا، mahsa.mortazavi@itrc.ac.ir

باتوجه‌به سرعت فزاینده تکامل فناوری‌های کوانتومی، ایجاد مقرراتی مبتنی بر اصول که تعادلی میان ترویج نوآوری و کاهش خطرات برقرار کند، ضروری است. عدم وجود چارچوب‌های تنظیم‌گری شفاف، چالش‌های مهمی از قبیل مسائل حریم خصوصی و امنیت داده‌ها، مالکیت فکری، دسترسی نابرابر، هزینه‌های بالا و دشواری در تعیین مسئولیت را به همراه دارد. در مقابل، تدوین قوانین شفاف منجر به افزایش اعتماد عمومی، کاهش سوءاستفاده و تسهیل همکاری‌های بین‌المللی و بین‌بخشی می‌شود.

بررسی اقدامات سایر کشورها همچون ایالات متحده، چین، هلند و اتحادیه اروپا، حاکی از تلاش جهانی در جهت تدوین استراتژی‌های ملی، سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه، ایجاد همکاری‌های بین‌المللی و ارائه راهکارهایی برای نوآوری توأم با کاهش ریسک است. ماهیت تحول‌آفرین فناوری‌های نوظهور از جمله فناوری‌های کوانتومی، مستلزم بازنگری و تطبیق مستمر قوانین برای تنظیم دقیق روابط اجتماعی و پرهیز از پیامدهای ناخواسته است.

نظام حقوقی ایران فاقد چارچوب‌های اختصاصی برای تنظیم‌گری این فناوری در ابعاد قانون‌گذاری، نظارت و سیاست‌گذاری است. این خلأ قانونی موجب شده مفاهیم کلیدی نظیر «رمزنگاری کوانتومی» یا «شبکه‌های کوانتومی» در ادبیات حقوقی کشور تعریف‌نشده باقی بمانند. براین‌اساس، در این بخش با رویکردی تحلیلی و تطبیقی، تنظیم‌گری حقوقی ارتباطات کوانتومی در ایران بررسی و پیشنهادهای سیاستی و تقنینی برای رفع این چالش‌ها ارائه شده است.

اهمیت و ضرورت وجود چارچوب‌های قانونی شفاف در فناوری‌های کوانتومی

با ادامه تکامل فناوری‌های کوانتومی، سیاست‌گذاران باید با ذی‌نفعان همکاری نزدیکی داشته باشند تا مقررات تطبیقی و مبتنی بر اصول را توسعه دهند که تعادلی بین ترویج نوآوری و کاهش خطرات برقرار کند. علاوه بر این، نمی‌توان از تأثیرات اجتماعی و اخلاقی محاسبات کوانتومی غافل شد؛ اولویت‌بندی برنامه‌هایی که منافع اجتماعی قابل‌توجهی را ارائه می‌دهند و ایجاد دستورالعمل‌های اخلاقی قوی و شفاف بسیار مهم خواهد بود[۱]. وجود قوانین و مقررات شفاف که نقش‌ها، مسئولیت‌ها و حقوق مختلف ذی‌نفعان را در ارتباط با فناوری‌های کوانتومی مشخص می‌کند می‌تواند باعث اعتماد بیشتر مردم و ذی‌نفعان به این فناوری‌ها می‌شود[۲].

از مزایای وجود قوانین و مقررات شفاف می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- **اعتماد عمومی:** وجود چارچوب‌های شفاف و قانونی می‌تواند به افزایش اعتماد عمومی نسبت به فناوری‌های کوانتومی کمک کند. وقتی افراد بدانند که قوانین و مقررات مشخصی برای استفاده از این فناوری‌ها وجود دارد، احتمال بیشتری وجود دارد که از آن‌ها استقبال کنند[۳].
- **کاهش سوءاستفاده:** با تعریف دقیق مسئولیت‌ها و حقوق، می‌توان مانع از سوءاستفاده‌های احتمالی شد. در

یک محیط قانونی شفاف، مهندسان، محققان و شرکت‌ها نسبت به پیامدهای حقوقی و اخلاقی اقدامات خود مطلع‌تر خواهند بود[۲].

- **تسهیل همکاری:** شفافیت قوانین و مقررات می‌تواند همکاری‌های بین‌المللی و همکاری بین بخش‌های مختلف (مانند دانشگاه‌ها، صنایع و دولت‌ها) را تسهیل کند و به همسو شدن تلاش‌ها در جهت توسعه و بهره‌برداری از فناوری‌های کوانتومی کمک کند[۳].

بررسی چالش‌ها و مشکلات حقوقی فناوری‌های کوانتومی

فناوری‌های کوانتومی به‌عنوان یک پیشرفت انقلابی در حوزه‌های محاسبات، ارتباطات و حسگری به شمار می‌آیند، اما هم‌زمان با پتانسیل بالای خود، چالش‌ها و مشکلات حقوقی فراوانی را نیز به همراه دارند. در کنار تمامی پیشرفت‌ها و کاربردهای مثبت فناوری‌های کوانتومی، استفاده از این فناوری‌ها نگرانی‌های اخلاقی و حقوقی زیادی را به همراه دارد. به‌عنوان نمونه، توانایی فناوری‌های کوانتومی در شکستن رمزنگاری‌های امنیتی که زیربنای ارتباطات آنلاین امن محسوب می‌شود می‌تواند حریم خصوصی افراد و سازمان‌ها را به خطر بیندازد و موجب آسیب‌های گسترده در جوامع دیجیتالی شود. یکی دیگر از مشکلات احتمالی مرتبط با این فناوری‌ها به دلیل پیچیدگی بالای این الگوریتم‌ها، دشواری در نسبت‌دادن مسئولیت برای نتایج آن‌ها است. این مسئله موجب ایجاد شکاف مسئولیت در استفاده از فناوری‌های کوانتومی می‌شود؛ بنابراین توجه به چالش‌های اخلاقی و حقوقی آن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است[۴].

در این بخش به بررسی مهم‌ترین چالش‌ها و نیز اقداماتی که کشورهای مختلف در پاسخ به آن انجام می‌دهند پرداخته می‌شود.

- **عدم وجود چارچوب‌های تنظیم‌گری شفاف و معین:** فناوری‌های کوانتومی به‌سرعت درحال‌توسعه هستند و هنوز چارچوب‌های تنظیم‌گری قوی، شفاف و مشخصی برای این فناوری‌ها وجود ندارد. این عدم شفافیت می‌تواند منجر به عدم اعتماد عمومی و سوءاستفاده‌های احتمالی از این فناوری‌ها شود[۳].
- **مسائل حریم خصوصی و امنیت داده‌ها:** تهدیدات امنیتی ناشی از قابلیت‌های پردازش بسیار بالا در رایانه‌های کوانتومی، می‌تواند تکنیک‌های رمزنگاری معاصر را تضعیف کند. این امر نیاز به تدوین قوانین سخت‌گیرانه‌تری برای حفاظت از داده‌ها و حریم خصوصی دارد [۲].
- **مالکیت فکری و حقوق مالکیت معنوی:** به دلیل نوآوری‌های سریع و پیچیده در فناوری‌های کوانتومی، مسئله تعیین مالکیت بر اختراعات و ابداعات جدید می‌تواند به چالش‌هایی جدی منجر شود. چارچوب‌های حقوقی موجود برای ثبت اختراعات ممکن است قادر به پوشش‌دادن نیازهای خاص این فناوری نباشند[۳].
- **مسائل مربوط به دسترسی و هزینه‌ها:** فناوری‌های کوانتومی معمولاً نیازمند سخت‌افزار و زیرساخت‌های پیچیده و گران‌قیمتی هستند که می‌تواند به عدم دسترسی برابر به این فناوری‌ها در کشورهای مختلف و در داخل جوامع منجر شود. اگر شرکت‌ها یا دولت‌ها نتوانند خدمات لازم را با قیمت‌های عادلانه ارائه دهند، ممکن است با دعاوی حقوقی مطرح شده از طرف کاربران یا صنایع روبه‌رو شوند. در نهایت، چالش‌های مربوط به دسترسی و هزینه‌ها نه‌تنها می‌توانند بر روی بازار فناوری‌های کوانتومی تأثیر بگذارند، بلکه مسائل حقوقی پیچیده‌ای را نیز به وجود می‌آورند که نیاز به توجه و پاسخگویی مناسب دارند[۲].

- **پاسخگویی نسبت به خطرات ناشی از فناوری‌های نوظهور:** رویکرد تنظیم‌گری و پاسخگویی نسبت به پیامدها و خطرات حاصل از استفاده از فناوری‌های کوانتومی هنوز به طور کامل مشخص نشده است و این می‌تواند منجر به بحران‌های غیرقابل‌پیش‌بینی شود[۳].

اقدامات سایر کشورها در پاسخگویی به چالش‌ها

- **توسعه چارچوب‌های حقوقی و تنظیم‌گری:** کشورهای مانند ایالات متحده، چین و کشورهای اروپایی در حال کار بر روی تدوین قوانین و دستورالعمل‌های خاصی برای فناوری‌های کوانتومی هستند. برای مثال، ایالات متحده برنامه‌ای برای توسعه یک «استراتژی ملی کوانتومی» تدوین کرده است که شامل جوانب اخلاقی، حقوقی و اجتماعی فناوری‌های کوانتومی می‌باشد[۲].
- **سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه:** بسیاری از کشورها به‌ویژه چین، به طور گسترده در این حوزه سرمایه‌گذاری کرده‌اند تا رهبری خود را در حوزه فناوری‌های کوانتومی حفظ کنند. این کشورها نه‌تنها به تحقیق‌وتوسعه می‌پردازند؛ بلکه برنامه‌های آموزشی و تحصیلی نیز برای نیروهای کار در زمینه فناوری‌های کوانتومی راه‌اندازی کرده‌اند[۳].
- **ایجاد همکاری‌های بین‌المللی:** باتوجه‌به جهانی بودن این فناوری‌ها، همکاری‌های بین‌المللی در راستای ایجاد دستورالعمل‌ها و استانداردهای جهانی، اهمیت زیادی پیدا کرده است. سازمان‌های بین‌المللی مانند OECD و اتحادیه اروپا به بررسی و تطبیق سیاست‌ها و مقررات و دستورالعمل‌ها و استانداردهایی را دراین‌خصوص تدوین می‌کنند[۲].
- **پیشنهادات برای نوآوری و کاهش ریسک:** برخی از کشورها در حال تدوین استراتژی‌های خاصی هستند که به تعادل بین نوآوری و نیاز به امنیت حقوقی می‌پردازند. این استراتژی‌ها معمولاً از طریق تعامل مستقیم با ذی‌نفعان مختلف از جمله صنعت، دانشگاه و جامعه مدنی تدوین می‌شود[۳].

بررسی موضوع در نظام حقوقی ایران در مقایسه با سایر کشورها

ماهیت نوآورانه اکثر فناوری‌های دیجیتال، درک این واقعیت را که قوانین منسوخ می‌شوند و تنظیم روابط اجتماعی نیازمند تحول و تطبیق آن است تأیید می‌کند. ویژگی فناوری‌های کوانتومی، می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر توسعه روابط اجتماعی تأثیر بگذارد، به همین دلیل وظیفه پیش‌روی قانون پیچیده‌تر می‌شود. نکته قابل‌توجه این است که محققان نظام‌های حقوقی مختلف به طور فعال مفهوم قانون محاسبات کوانتومی و اخلاق فناوری‌های کوانتومی را شرح می‌دهند یا جنبه‌های قانونی کاربرد فناوری‌های کوانتومی را در حوزه‌های خاص فقهی بررسی می‌کنند. درعین‌حال، برخی کشورها بر تدوین چارچوب مفهومی و طبقه‌بندی در حوزه فناوری‌های کوانتومی و همچنین ایجاد مبانی تنظیم قانونی این فناوری‌ها و ویژگی‌های تنظیم آنها تمرکز دارند.

در جمهوری خلق چین؛ طرح ملی «ساخت چین ۲۰۲۵» و چهاردهمین برنامه پنج‌ساله توسعه اجتماعی - اقتصادی چین (۲۰۲۱-۲۰۲۵) پیشرفت‌های بزرگ از جمله در حوزه فناوری‌های کوانتومی را تصریح کرده‌اند. بودجه دولتی امکان دستیابی به موفقیت‌های قابل‌توجه در توسعه فناوری‌های کوانتومی را فراهم می‌کند که صنعت فناوری چین را به رهبر بازار جهانی تبدیل خواهد کرد. این بودجه عمدتاً باهدف تجاری‌سازی فناوری‌های ارتباطات کوانتومی و همچنین

توزیع کلید کوانتومی تأمین می‌شود.

در ماه مه ۲۰۱۶، اتحادیه اروپا از راه‌اندازی یک برنامه بزرگ - ابتکار عمل پرچم‌دار کوانتومی - خبر داد. این سند هم شامل تحقیقات در حوزه فناوری‌های کوانتومی و هم سازماندهی و اجرای مجموعه‌ای گسترده از اقدامات باهدف آزمایش فناوری‌های کوانتومی است. میزان بودجه تعیین شده توسط کمیسیون اروپا، ۱ میلیارد یورو است.

در هلند؛ دستور کار ملی فناوری کوانتومی در سال ۲۰۱۹ تصویب شد. این قانون ایجاد کنسرسیومی از تنظیم‌کنندگان، ذینفعان و دانشگاه‌ها را که تلاش‌های خود را برای توسعه فناوری‌های کوانتومی متحد می‌کنند، تصریح می‌کند.

دولت فدرال آلمان؛ در برنامه چارچوبی «فناوری‌های کوانتومی - از اصول اولیه تا بازارها» اهدافی را برای دولت فدرال تعیین کرده که عبارت‌اند از: تثبیت موقعیت‌های قوی آلمان در حوزه تحقیقات فیزیک کوانتومی و راهیابی به سمت کاربردها با استفاده از فناوری‌های کوانتومی؛ ایجاد شرایط چارچوبی برای آمادگی برای فرصت‌ها و بازارهای اقتصادی جدید؛ ایجاد مبنایی محکم برای نقش رهبری آلمان در استفاده صنعتی از فناوری‌های کوانتومی؛ توسعه همکاری‌های بین‌المللی در حوزه ایجاد فناوری‌های کوانتومی؛ برای آگاه‌سازی مردم آلمان و مشارکت‌دادن آنها در ترویج فناوری کلیدی جدید.

در ایالات متحده آمریکا؛ قانون ابتکار ملی کوانتومی مورخ ۱۳ دسامبر ۲۰۱۸، وظیفه حفظ رهبری فناوری ایالات متحده در حوزه فناوری‌های کوانتومی را در میان‌مدت و بلندمدت بر عهده دارد. این قانون شامل یک برنامه ۱۰ ساله برای توسعه و ترویج فناوری‌های کوانتومی در کشور است. از جمله اقدامات لازم، ایجاد آژانس‌ها و کمیته‌های ویژه برای سازماندهی تحقیقات در حوزه فناوری‌های کوانتومی و تدوین استانداردها در این حوزه است. سند مهم دیگر در این حوزه، یادداشت امنیت ملی در مورد ارتقای رهبری ایالات متحده در محاسبات کوانتومی ضمن کاهش خطرات سیستم‌های رمزنگاری آسیب‌پذیر است. این سند، مراحل کلیدی مورد نیاز برای حفظ مزیت رقابتی کشورها در حوزه انفورماتیک کوانتومی و کاهش همزمان خطرات مرتبط با ظهور رایانه‌های کوانتومی برای امنیت سایبری، اقتصادی و ملی را تصریح می‌کند [۵].

جدول ۱- اقدامات کشورها در تعیین چارچوب قانونی حوزه کوانتوم[۵]

کشور	برنامه	بازیگران	اقدامات	بودجه
جمهوری خلق چین	چهاردهمین برنامه پنج‌ساله توسعه اجتماعی - اقتصادی چین؛ طرح ملی «ساخت چین ۲۰۲۵»	عمدتاً دولت	توسعه پروژه‌های نوآورانه ملی، ایجاد آزمایشگاه‌ها؛ آموزش پرسنل	۱۵.۳ میلیارد دلار
ایالات متحده آمریکا	قانون ابتکار ملی کوانتومی؛ یادداشت امنیت ملی	بخش دولتی و خصوصی	سازماندهی و نگهداری تحقیقات، تدوین استانداردها	۲.۵ میلیارد دلار
اتحادیه اروپا	ابتکار عمل پرچم‌دار کوانتومی؛ بیانیه کوانتومی	بخش دولتی و خصوصی	عمومی-خصوصی کمک‌های بلاعوض، کنسرسیوم‌ها	۱ میلیارد دلار
پادشاهی هلند	دستور کار ملی برای فناوری کوانتومی	بخش دولتی و خصوصی	ایجاد کنسرسیومی متشکل از نهادهای نظارتی، ذی‌نفعان و دانشگاه‌ها	۸۵۰ میلیون دلار
جمهوری فدرال آلمان	برنامه چارچوبی دولت فدرال آلمان «فناوری‌های کوانتومی - از مبانی تا بازارها»	دولتی	حمایت از تحقیق و توسعه همکاری	۲.۴ میلیارد دلار

در دنیای امروز، کشورهای پیشرو مانند چین، آمریکا و اتحادیه اروپا به‌سرعت درحال‌توسعه «چارچوب‌های قانونی و تنظیم‌گری» برای فناوری ارتباطات کوانتومی هستند. تمرکز اصلی آن‌ها بر استفاده ایمن از این فناوری، به‌ویژه در راستای تضمین امنیت سایبری و حریم خصوصی است. در مقابل، کشور ایران هنوز به شکل جدی به موضوع تنظیم‌گری حقوقی در حوزه ارتباطات کوانتومی وارد نشده است. این غفلت در نظام قانون‌گذاری و همچنین در حوزه علمی و پژوهشی کشور (که با فقدان منابع مکتوب نیز مشهود است) دیده می‌شود و نشان‌دهنده عدم توجه کافی به اهمیت استراتژیک این فناوری است.

نتیجه‌گیری

فناوری‌های کوانتومی با پتانسیل‌های انقلابی خود، روزبه‌روز در حال پیشرفت هستند، اما هم‌زمان با این پیشرفت، چالش‌ها و مشکلات حقوقی متعددی را نیز به همراه دارند. عدم وجود چارچوب‌های تنظیم‌گری مشخص، مسائل حریم خصوصی، مالکیت فکری و خطرات امنیتی از جمله چالش‌های اساسی هستند که نیاز به توجه دارند. کشورهای مختلف با توسعه قوانین و افزایش همکاری‌های بین‌المللی به دنبال مدیریت این چالش‌ها هستند. به‌منظور بهره‌برداری بهینه از این فناوری‌ها، تدوین سیاست‌ها و مقررات مؤثر و همکاری‌های جهانی برای مدیریت قانونی و حقوقی این فناوری‌ها بسیار حیاتی است[۳]؛ لذا باید گفت با روند تکامل شگرف فناوری‌های کوانتومی، به‌خصوص در حوزه ارتباطات، ضرورت بازنگری و تدوین چارچوب‌های حقوقی متناسب با آن در نظام حقوقی ایران ضروری است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که عدم وجود قوانین و مقررات شفاف در این حوزه، علاوه بر ایجاد شکاف مسئولیت و تسهیل سوءاستفاده، می‌تواند منجر به کاهش اعتماد عمومی و کندی روند همکاری‌های علمی و بین‌المللی شود. چالش‌های ذاتی فناوری‌های کوانتومی، از جمله تهدید امنیت داده‌ها و رمزنگاری‌های موجود، و پیچیدگی‌های مربوط به مالکیت فکری و دسترسی عادلانه، لزوم اقدام فوری را ایجاب می‌کند.

درحالی‌که کشورهای پیشرو در عرصه جهانی، با اتخاذ رویکردهای استراتژیک، سرمایه‌گذاری‌های هنگفت، و تقویت همکاری‌های بین‌المللی، در حال شکل‌دهی به اکوسیستم حقوقی فناوری‌های کوانتومی خود هستند، نظام حقوقی ایران همچنان با خلأهای جدی در این زمینه مواجه است؛ بنابراین، اتخاذ رویکردی فعالانه و پیشگیرانه، شامل تدوین قوانین و مقررات شفاف، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های علمی - حقوقی، و ایجاد سازوکارهای همکاری بین‌بخشی، امری حیاتی برای همگام‌شدن با تحولات جهانی و تضمین بهره‌مندی ایمن و مسئولانه از پتانسیل‌های ارتباطات کوانتومی در ایران محسوب می‌شود.

مراجع

1. Kasim Balarab. (2025). Quantum computing and the law: Navigating the legal implications of a quantum leap. European Journal of Risk Regulation, 1-20
2. Regulating Quantum Technology Applications. (2024). Cross-cutting challenges and lessons from Artificial Intelligence (AI)
3. Balarab, K. (2025). Quantum computing and the law: Navigating the legal implications of a quantum leap. European Journal of Risk Regulation, 1(4), 803-808.
4. www.imna.ir (last visited 2026,01.18).
5. Elizaveta Gromova, Petrenko, (2023).Quantum Law: The Beginning. Journal of Digital Technologies and Law 1(1):5-25.

صنعت ۶.۰ و رایانش کوانتومی: فرصت‌ها، چالش‌ها و الزامات حکمرانی فناورانه

ناهید بزرگ‌خو، پژوهشگر گروه برنامه‌ریزی تحول دیجیتال N.Bozorgkhou@itrc.ac.ir
عاطفه فرازمند، مدیرگروه برنامه‌ریزی تحول دیجیتال a.farazmand@itrc.ac.ir

صنعت ۶.۰ به‌عنوان چشم‌انداز نسل آینده تحولات صنعتی، فراتر از اتوماسیون و اتصال صرف، بر هوشمندی آگاهانه، تاب‌آوری، پایداری و هم‌زیستی نظام‌مند فناوری با انسان و محیط‌زیست تمرکز دارد. برخلاف صنعت ۴.۰ که بر اینترنت اشیاء و تحلیل داده استوار بود و صنعت ۵.۰ که همکاری انسان و ماشین را برجسته ساخت، صنعت ۶.۰ به دنبال شکل‌دهی اکوسیستم‌های صنعتی هوشمند، خودسازگار و اخلاق‌محور است که توان تصمیم‌سازی پیشرفته در شرایط پیچیده و پویا را دارا باشند [۱,۲].

در این چارچوب، رایانش کوانتومی به‌عنوان یکی از فناوری‌های بنیادین و توان‌افزای صنعت ۶.۰ مطرح می‌شود؛ نه به‌عنوان جایگزین محاسبات کلاسیک، بلکه به‌مثابه مکمل راهبردی در کنار هوش مصنوعی، دوقلوهای دیجیتال و سیستم‌های سایبر فیزیکی [۱]. توان پردازشی متمایز رایانش کوانتومی، که مبتنی بر کیوبیت‌ها و پدیده‌هایی نظیر برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی کوانتومی است، امکان بررسی هم‌زمان فضای بزرگی از حالت‌های محاسباتی را فراهم می‌کند و بدین‌ترتیب، حل برخی مسائل صنعتی با پیچیدگی بالا را از نظر محاسباتی عملی‌تر می‌سازد.

این قابلیت‌ها، افق‌های تازه‌ای را برای شبیه‌سازی مواد در مقیاس اتمی، بهینه‌سازی سامانه‌های صنعتی پیچیده و تقویت مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی می‌گشایند؛ حوزه‌هایی که در آن‌ها رویکردهای صرفاً کلاسیک با محدودیت‌های جدی مواجه‌اند. از این منظر، رایانش کوانتومی صرفاً یک «ابزار محاسباتی سریع‌تر» نیست، بلکه بخشی از یک پارادایم نوین محاسباتی و تصمیم‌سازی است که می‌تواند دقت، کارایی و خلاقیت سامانه‌های صنعتی را در چارچوب صنعت ۶.۰ ارتقا دهد [۱,۲].

جایگاه رایانش کوانتومی در صنعت ۶.۰

بر اساس چارچوب ارائه‌شده توسط Das و Pan، رایانش کوانتومی به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی پشتیبان صنعت ۶.۰، در کنار اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، سیستم‌های سایبر فیزیکی و دوقلوهای دیجیتال تعریف می‌شود و نقش آن در قالب همگرایی فناورانه معنا می‌یابد، نه به‌صورت یک فناوری مستقل یا جایگزین محاسبات کلاسیک [۱].

مزیت اصلی رایانش کوانتومی در این چارچوب، بهره‌گیری از پدیده‌هایی نظیر برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی کوانتومی برای گسترش فضای حالت‌های محاسباتی است؛ قابلیتی که در برخی مسائل صنعتی دامنه‌خاص، امکان تحلیل هم‌زمان تعداد بسیار زیادی از متغیرها و سناریوها را فراهم می‌سازد و محدودیت‌های محاسبات کلاسیک را کاهش می‌دهد.

مطابق چارچوب ISGM، صنعت ۶.۰ بر توسعه سیستم‌های آگاه، مقاوم و بازتولیدپذیر استوار است. در این سطح، رایانش کوانتومی می‌تواند به‌ویژه در لایه‌های تصمیم‌سازی پیشرفته، شبیه‌سازی‌های پیچیده و پشتیبانی از سیستم‌های خودسازگار نقشی توان‌افزا ایفا کند و دقت و عمق تحلیل سامانه‌های صنعتی را ارتقا دهد [۲].

کاربردهای محوری رایانش کوانتومی در صنعت ۶.۰

رایانش کوانتومی در صنعت ۶.۰ تقریباً بر تمامی بخش‌ها تأثیر شگرف خواهد گذاشت. مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد آن عبارت‌اند از [۱]:

الف) کشف و طراحی مواد و داروهای نوین:

- **شبیه‌سازی کوانتومی مولکول‌ها:** رایانه‌های کوانتومی می‌توانند رفتار الکترون‌ها در مولکول‌ها را بادقت بی‌نظیری شبیه‌سازی کنند. این امر منجر به کشف سریع‌تر مواد با خواص خاص (مانند ابررساناهای دمای اتاق، کاتالیزورهای کارآمد برای تولید کود) و طراحی داروهای شخصی شده با حداقل عوارض جانبی می‌شود.
- **بهینه‌سازی فرمولاسیون‌های شیمیایی:** در صنایع شیمیایی و غذایی، کوانتوم می‌تواند ترکیبات بهینه را برای دستیابی به حداکثر کارایی، پایداری و کمترین هزینه شناسایی کند.

ب) بهینه‌سازی سامانه‌های پیچیده:

- **زنجیره تأمین و لجستیک ضدشکننده:** کوانتوم قادر است هزاران متغیر (مانند تقاضا، مسیرهای حمل‌ونقل، موجودی انبار، اختلالات) را به طور هم‌زمان تحلیل کرده و بهینه‌ترین شبکه توزیع پویا و مقاوم را طراحی کند. این همان هسته مفهوم "تولید ضدشکننده" در صنعت ۶.۰ است.
- **مدیریت انرژی و شبکه‌های هوشمند:** بهینه‌سازی تولید، ذخیره و توزیع انرژی در شبکه‌های عظیم مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، یک مسئله محاسباتی غول‌آساست که با کوانتوم قابل‌حل است.

ج) هوش مصنوعی و یادگیری ماشین کوانتومی:

- **تولید الگوریتم‌های هوش مصنوعی باقدرت شناختی بالا:** رایانش کوانتومی می‌تواند معماری‌های کاملاً جدیدی از شبکه‌های عصبی خلق کند که در تشخیص الگوهای پیچیده، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری شهودی بر اساس داده‌های حجیم (مثل داده‌های بیومتریک یا تصاویر پزشکی) توانمندتر باشند.
- **ارتقای دوقلوهای دیجیتال:** دوقلوهای دیجیتال در صنعت ۶.۰ با تغذیه از الگوریتم‌های کوانتومی، به موجوداتی زنده و پیش‌بین تبدیل می‌شوند که می‌توانند رفتار سیستم فیزیکی را با جزئیاتی بی‌سابقه شبیه‌سازی و نتایج احتمالی را پیش‌بینی کنند.

زیرساخت، چالش‌ها و الزامات همگرایی کوانتوم

پیاده‌سازی موفق رایانش کوانتومی در صنعت ۶.۰ مستلزم ایجاد زیرساخت‌ها و غلبه بر چالش‌های بزرگی است [۱]:

زیرساخت‌های کلیدی:

- **سخت‌افزار کوانتومی پایدار و مقیاس‌پذیر:** توسعه کیوبیت‌های با نویز کم و عمر کافی برای انجام محاسبات پیچیده.
- **نرم‌افزار و الگوریتم‌های کوانتومی:** ایجاد زبان‌های برنامه‌نویسی و کتابخانه‌های الگوریتمی ویژه صنایع مختلف.
- **اتصال کوانتومی-کلاسیک:** طراحی معماری‌های هیبریدی کارآمد که در آن پردازش‌های سنگین توسط پردازنده

کوانتومی و کارهای روزمره توسط پردازنده‌های کلاسیک انجام شود.

- **شبکه‌های ارتباطی کوانتومی:** کاهش ریسک شنود و حملات در ارتباطات حیاتی و امکان اتصال ایمن میان پردازنده‌های کوانتومی در مقیاس شبکه.

چالش‌های کلیدی در گذار به رایانش کوانتومی صنعتی

باوجود ظرفیت‌های تحول‌ساز رایانش کوانتومی، مسیر ادغام آن در صنعت ۶.۰ با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی، انسانی، امنیتی و اقتصادی روبه‌روست. درک این چالش‌ها برای طراحی نقشه راه واقع‌بینانه ضروری است.

- **چالش‌های فنی:**

نویز بالا، زمان انسجام محدود کیوبیت‌ها و دشواری در مقیاس‌پذیری سخت‌افزار از موانع اصلی توسعه رایانش کوانتومی در کاربردهای صنعتی محسوب می‌شوند. پایداری سامانه و تصحیح خطای کوانتومی همچنان از مسائل باز مهندسی‌اند که پیش از بهره‌برداری گسترده باید بر آنها غلبه شود [۱]. افزون بر این، زیرساخت‌های خنک‌سازی، کنترل کوانتومی و ارتباطات پرظرفیت نیز نیازمند سرمایه‌گذاری و استانداردسازی بین‌المللی هستند.

- **چالش‌های انسانی و سازمانی:**

ادغام فناوری‌های کوانتومی در صنعت ۶.۰ مستلزم نیروهای متخصص در مرز میان علم کوانتوم، هوش مصنوعی، سیستم‌های سایبر-فیزیکی و حکمرانی فناورانه است. طبق ISGM، این امر بدون تحول بنیادین در آموزش عالی، ایجاد رشته‌های میان‌رشته‌ای و بازآفرینی فرهنگ‌سازمانی امکان‌پذیر نیست [۱,۲]. کمبود مهارت‌های ترکیبی میان علم، مهندسی و اخلاق فناورانه، یکی از موانع کلیدی است.

- **امنیت و حکمرانی:**

توان بالقوه رایانه‌های کوانتومی در تضعیف الگوریتم‌های رمزنگاری کلاسیک، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های دیجیتال فعلی ایجاد می‌کند. ازاین‌رو، گذار تدریجی به رمزنگاری پساکوانتومی و طراحی چارچوب‌های حکمرانی شفاف، مقاوم و اخلاق‌محور ضروری است [۲,۱]. افزون بر امنیت فنی، لازم است حکمرانی کوانتومی نیز با اصول شفافیت، پاسخ‌گویی و اعتماد اجتماعی هم‌راستا شود.

- **هزینه و دسترسی:**

هزینه‌های سرمایه‌ای بالا، پیچیدگی فنی و نیاز به زیرساخت‌های خاص می‌تواند به شکل‌گیری «شکاف کوانتومی» میان کشورها و صنایع منجر شود [۱]. بر این اساس، الگوهای دسترسی ابری و اشتراکی و سیاست‌های تسهیل‌گر نوآوری باز می‌توانند به توزیع منصفانه‌تر این فناوری کمک کنند. هم‌چنین ایجاد اکوسیستم‌های مشارکتی میان دولت، صنعت و دانشگاه برای اشتراک دانش و منابع ضروری است [۱].

آینده‌نگری و جمع‌بندی: جهش به‌سوی عصر کوانتومی صنعتی

صنعت ۶.۰ را می‌توان به طور واقع‌بینانه آغاز دوره صنعت کوانتوم‌بنیان دانست؛ دوره‌ای که در آن رایانش کوانتومی نه به‌عنوان جایگزین کامل محاسبات کلاسیک، بلکه به‌مثابه یک شتاب‌دهنده راهبردی در کنار سامانه‌های کلاسیک، داده‌محور و هوش مصنوعی ایفای نقش می‌کند. همان‌گونه که در چارچوب‌های Industry ۶.۰ تأکید شده است،

مزیت کوانتوم ماهیتی دامنه‌خاص دارد و عمدتاً در کلاس‌هایی مشخص از مسائل شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و یادگیری پیشرفته می‌تواند جهش‌های کیفی ایجاد کند. این ظرفیت می‌تواند مسیر دستیابی به اهدافی نظیر شخصی‌سازی در مقیاس، تولید تاب‌آور و پایداری عمیق صنعتی را هموار سازد، مشروط بر آنکه پیشرفت‌های فنی و نهادی به‌صورت هم‌زمان محقق شوند.

- از منظر افق زمانی، انتظار می‌رود در کوتاه‌مدت (۵ تا ۱۰ سال آینده)، معماری‌های هیبریدی کوانتوم-کلاسیک برای حل مسائل بهینه‌سازی دامنه‌خاص و شبیه‌سازی مولکول‌های کوچک، به‌ویژه در صنایع دارویی و شیمیایی، به کار گرفته شوند.
- در میان‌مدت (۱۰ تا ۱۵ سال آینده)، با بهبود مقیاس‌پذیری سخت‌افزار و پیشرفت‌های اولیه در تصحیح خطای کوانتومی، مؤلفه‌های کوانتومی به‌تدریج در دوقلوهای دیجیتال هیبرید و برخی کاربردهای منتخب هوش مصنوعی ادغام شده و به بخشی از فرایندهای طراحی محصول و بهینه‌سازی صنعتی تبدیل خواهند شد.
- در بلندمدت (۲۰ سال به بعد)، در صورت دستیابی به کیوبیت‌های منطقی پایدار و زیرساخت‌های مقیاس‌پذیر، امکان تحقق برتری عملی کوانتومی در چند حوزه کلیدی صنعتی به‌ویژه شبیه‌سازی مواد، شیمی محاسباتی و مسائل پیچیده بهینه‌سازی وجود خواهد داشت؛ امری که می‌تواند به خلق مواد، داروها و سامانه‌های صنعتی با قابلیت‌هایی فراتر از توان محاسباتی کنونی منجر شود.

در مجموع، صنعت ۶.۰ بدون بهره‌گیری هدفمند از رایانش کوانتومی، احتمالاً به نسخه‌ای پیشرفته‌تر از تحولات پیشین محدود خواهد ماند. ادغام سنجیده کوانتوم با سامانه‌های کلاسیک و داده‌محور است که می‌تواند عمق تحلیلی، هوشمندی تصمیم‌گیری و توان جهش کیفی را به صنعت آینده ببخشد. تحقق این چشم‌انداز مستلزم سرمایه‌گذاری بلندمدت، همکاری‌های بین‌المللی در پژوهش و توسعه، تربیت نیروی انسانی میان‌رشته‌ای، و تدوین چارچوب‌های اخلاقی، امنیتی و حکمرانی فناورانه هم‌راستا با اصول Industry ۶٫۰ است. کشورها و سازمان‌هایی که از امروز بسترهای لازم برای این همگرایی را فراهم کنند، در موقعیت بهتری برای اثرگذاری و رقابت در موج بعدی انقلاب صنعتی قرار خواهند گرفت.

مراجع

1. T. P. Soumyajit Das,Tanushree Pan “A strategic outline of Industry 6.0: Exploring the Future,”
2. Department of Industrial Engineering and Management, West Bengal, India 2025.
3. Attia Hussien Gomaa, Transforming Manufacturing from Industry 4.0 to Industry 6.0: A Comprehensive Review, Gap Analysis and Strategic Framework, ISGM Vol. 1 (2025).
4. Extended policies from ISGM :A strategic outline of Industry 6.0: Exploring the Future, 2025.

پژوهشگاه ارتباطات
و فناوری اطلاعات
(مرکز تحقیقات مخابرات ایران)