دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ هفتم شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۴۰۰)؛ صفحات: ۱۶۹-۱۵۳

مقالهٔ مروری

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.10.3

درصد همانندی: ٪۲

جستاری بر توسعه و کاربردهای فناوری‌های کوانتومی

حسین نیک‌منش [۱*]، محمدرضا بنافیان [۲]، اسماعیل پورجعفرآبادی [۳]

[۱*] نویسنده مسئول، استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر h.nikmanesh@pgu.ac.ir

[۲] دانشجوی کارشناسی، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر mbanafian99@gmail.com

[۲] پژوهشگر، گروه فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز esmaeilporjafarabadi1399@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲ **تاریخ پذیرش:**۱۴۰۱/۰۹/۱۵

چکیده:

علم و دانش همراه با فناوری‌های نوین همواره نقش کلیدی در تأمین نیازهای دفاعی و امنیت ملی ایفا کرده است. فناوری‌های کوانتومی ازجمله فناوری‌های نوظهوری هستند که از قوانین طبیعت برای ارائه قابلیت‌های بی‌سابقه در سنجش، تصویربرداری، ارتباطات و محاسبات استفاده می‌کنند و به‌دلیل کاربرد دوگانه، پتانسیل تغییر شکل جهان و برانگیختن یک مسابقه تسلیحاتی جدید را دارند. این فناوری‌ها توانایی دستیابی به ابزارهایی بسیار دقیق‌تر از آنچه فیزیک کلاسیک پیش‌بینی می‌کند را به ما می دهند. از تحقیقات انجام‌شده، مزایای استفاده از فناوری کوانتومی که از فناوری‌های قبلی به دست نیامده است، ازجمله شناسایی نیروهای پنهان دشمن، نظارت دوربرد، سلاح‌های هدایت‌شونده از راه دور و زیستی، حفاظت از داده‌های محرمانه در برابر حمله‌های دشمن به اثبات رسیده است. بر این اساس، سرمایه‌گذاری‌های عمومی و خصوصی قابل‌ملاحظه‌ای در سراسر جهان برای توسعه این فناوری‌ها، خروج از آزمایشگاه‌ها و ورود به مرحله عملیاتی صورت گرفته است. با توجه به توسعه روزافزون فناوری، تهدیدهای ایجادشده نیز به‌طور فزاینده‌ای متنوع هستند و فناوری‌های کوانتومی احتمالاً زندگی ما را در ۲۰ سال آینده متحول خواهند کرد؛ بنابراین، یک کشور پیشرو و مستقل نیاز به دانش به‌روز همراه با توسعه فناوری کوانتومی برای حمایت از دفاع و امنیت ملی در آینده دارد. در این مقاله مقدمه‌ای کلی دربارهٔ فناوری‌های کوانتومی در حال پیشرفت ارائه می‌شود و کاربردهای نظامی فناوری کوانتومی برای حوزه‌های مختلف دفاعی بررسی می‌شود و درنهایت گزارشی از وضعیت کنونی دستیابی به این فناوری در جهان ارائه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: فناوری کوانتومی؛ کاربردهای نظامی؛ محاسبات کوانتومی؛ جنگ الکترونیک؛ پیشتازان کوانتومی

۱. مقدمه

نظریه کوانتومی برای نخستین بار از ایده‌های ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰ شروع شد و به‌عنوان مهم‌ترین و موفق‌ترین نظریه در فیزیک مدرن شناخته می‌شود. از دیدگاه پلانک اتم‌ها انرژی را تنها در حالت‌های معینی به نام کوانتوم انرژی می‌توانند ساطع کنند. نظریه کوانتومی مشخص کرد که انرژی همزمان هم به‌صورت موج و هم به‌صورت ذره رفتار می‌کند [۱]. نظریه کوانتومی اغلب به دلیل اصول بنیادی غیرشهودی، پیچیدگی در انجام آزمایش‌ها و مشکل در برقراری ارتباط با ویژگی‌های آن با استفاده از اصطلاحات غیر فنی برای چندین دهه مبهم باقی ماند [۱-۴]. گفته شده است که دو ویژگی مهم و گیج‌کننده مکانیک کوانتومی، برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی تنها با استفاده از زبان ریاضیات به‌طور دقیق توصیف می‌شوند. بااین‌حال، این دو ویژگی زیربنای فناوری‌هایی هستند که در گذشته کاربرد دوگانه داشته و پیش‌بینی می‌شود، در آینده نیز بتوانند این کاربرد مفید/مخرب را داشته باشند. مکانیک کوانتومی رشته‌ای است که رفتار ذرات میکروسکوپی را توصیف می‌کند و در فواصل کوچک‌تر از چند نانومتر، تأثیرات فیزیکی جدید که هیچ مشابهتی با تجربه روزمره انسان ندارند، بروز می‌دهند [۲-۴]. مهندسان اکنون شروع به ایجاد چندین نوع دستگاه کرده‌اند که از این اثرات استفاده می‌کنند که بسیار فراتر از توانایی‌های دستگاه‌های موجود هستند. فناوری کوانتومی اصطلاحی گسترده است که این نوع دستگاه‌ها را پوشش می‌دهد که بسیاری از آن‌ها هنوز در مراحل اولیه آزمایش هستند. به‌طورکلی فناوری کوانتومی یک رشته نوظهور از فیزیک و مهندسی است که بر اساس خواص مکانیکی کوانتوم در سیستم‌های کوانتومی منفرد و استفاده از آن‌ها برای کاربردهای عملی استفاده می‌شود و پتانسیل تغییر رفتار جنگ و نتایج نبردها را دارد [۴ - ۵]. تغییرات گسترده و سریع فناوری تهدیدهای جدیدی را به همراه دارد که مستلزم سرمایه‌گذاری مؤثر در علم و فناوری دفاعی و امنیتی است. ازآنجاکه فناوری برای امنیت نظامی و ملی اهمیت فزاینده‌ای دارد، از یک سو، سازمان‌ها را در حوزه دفاعی و امنیتی قادر می‌سازد تا کارآمدتر، مؤثرتر و سازگارتر کار کنند و درعین‌حال، کاربردهای فناوری نیز می‌تواند تهدیدی برای امنیت باشد. به‌عنوان‌مثال، یک بازیگر بدخواه می‌تواند از فناوری زیستی برای توسعه یک سلاح زیستی استفاده کند. اگرچه فناوری‌های کوانتومی کنونی اغلب سطوح آمادگی فناوری (TRL) پایینی دارند، اما باور بر این است که پتانسیل مخرب بسیار بالایی دارند [۶]. تاریخ نشان داده است که فناوری‌های جدید می‌توانند چهره جنگ را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند. امروزه با توجه به سرعت نوآوری و ظهور فناوری‌هایی که با انقلاب صنعتی چهارم امکان‌پذیر شده، حتی نظریه کلاسیک کلاوزویتسی در مورد ماهیت جنگ نیز قابل‌تردید است [۶].

در این مطالعه با اصطلاح جنگ کوانتومی به‌صورت مبسوط آشنا خواهیم شد و احتمالات تأثیر آن بر بخش‌های اطلاعاتی، امنیتی و دفاعی را موردبحث و بررسی قرار می‌دهیم. نسل اول دستگاه‌های کوانتومی، انقلابی در قابلیت‌های دفاعی و امنیتی ایجاد کرد و جامعه را متحول کرد. دو نمونه برجسته از فناوری‌هایی که اساساً به تأثیرات مکانیک کوانتومی متکی هستند، ترانزیستور و لیزر هستند که پایه عصر دیجیتال مدرن ما را تشکیل می‌دهند [۷-۸]. درواقع انقلاب کوانتومی اول همان بنیان‌های فیزیکی برای پیشرفت‌های عظیمی مانند چیپ‌های رایانه‌ای، لیزرها، تصویربرداری رزونانسی مغناطیسی (MRI) و فنّاوری‌های ارتباطی مدرن است. نسل اول فناوری‌های کوانتومی به توسعه سریع خود ادامه داده‌اند و به‌نوبه خود به عوامل کلیدی برای پیشرفت‌های مهندسی موردنیاز برای ایجاد انقلاب کوانتومی بعدی تبدیل شده‌اند. انقلاب کوانتومی دوم با دست‌کاری و کنترل سیستم‌های کوانتومی منفرد (اتم‌ها،

یون‌ها، الکترون‌ها، فوتون‌ها، مولکول‌ها یا شبه ذرات مختلف) مشخص می‌کند که دست یافتن به حد استاندارد کوانتومی ممکن است. فناوری‌های کوانتومی حاصل انقلاب کوانتومی دوم هستند [۸-۱۰]. امروزه درهم‌تنیدگی، پایه و اساس کاربردهای بالقوه جدیدی مانند ارتباطات کوانتومی، سنجش کوانتومی و محاسبات کوانتومی به‌حساب می‌آید. انقلاب کوانتومی دوم، به معنای درک و کاربرد این امکانات جدید است [۱۰]. نقشه‌برداری از کاربردهای نظامی فناوری‌های کوانتومی برای ارزیابی بیشتر تهدیدهای علیه صلح جهانی و در بحث سیاست‌های اخلاقی یا کنترل تسلیحات پیشگیرانه و جنگ‌های نوین مبتنی بر کوانتوم بسیار مهم است. جنگ کوانتومی (QW)، جنگی است که از فناوری‌های کوانتومی برای کاربردهای نظامی استفاده می‌کند که بر قابلیت‌های اطلاعاتی، امنیتی و دفاعی همه جنگ‌ها تأثیر می‌گذارد و راهبردها، دکترین‌ها، سناریوها و همچنین مسائل اخلاقی جدید نظامی را مطرح می‌کند [۱۱ و ۱۰]. قابلیت‌های مختلف فناوری کوانتومی اساساً ویژه سلاح‌های جدید یا سیستم‌های نظامی مستقل نیست، بلکه به‌طور قابل‌توجهی قابلیت اندازه‌گیری، سنجش، دقت و قدرت محاسباتی و کارایی فناوری نظامی فعلی را ارتقا می‌دهد. از این منظر می‌توان فناوری‌های کوانتومی را در یک طبقه‌بندی سه دسته‌ای تعبیه کرد [۱۱]. دسته اول محاسبات کوانتومی و شبیه‌سازی‌ها که شامل رایانه‌های کوانتومی دیجیتال و آنالوگ و کاربردهای آن‌ها مانند شبیه‌سازی سیستم کوانتومی، بهینه‌سازی کوانتومی و مدارهای کوانتومی غیرقابل‌برنامه‌ریزی است. دسته دوم ارتباطات کوانتومی و رمزنگاری شامل شبکه کوانتومی ازجمله عناصر شبکه کوانتومی، توزیع کلید کوانتومی و ارتباطات کوانتومی و رمزنگاری پساکوانتومی است. دسته سوم نیز سنجش کوانتومی و مترولوژی است که شامل مغناطیس‌سنج‌های کوانتومی، گرانش‌سنج‌ها، زمان‌بندی کوانتومی و رادار کوانتومی است [۱۱-۱۳].

۲. روش تحقیق

این پژوهش با استفاده از روش بررسی پیشینه پژوهش ادبیات انجام شده است. یک مقاله مروری یک ارزیابی کلی و نقادانه از مقاله‌های موجود در این زمینه، اغلب تحلیل موضوعات خاص، شناسایی تمایلات است و به شکاف‌های تحقیقی در مقاله‌های موجود اشاره دارد. پیشینه پژوهش در ادبیات یک روش جمع‌آوری داده است که در آن اطلاعات از اینترنت، مجلات، کتاب‌ها و سایر آثار مکتوب به دست می‌آید. مطالعات ادبیات برای یافتن مسئله‌ای برای تحقیق، جستجوی اطلاعات مرتبط با مسئله موردمطالعه، بررسی چندین نظریه اساسی مرتبط با موضوع موردمطالعه و تعمیق دانش در مورد موقعیت و زمینهٔ موردمطالعه با بررسی نتایج تحقیقات قبلی انجام می‌شود.

۳. علم اطلاعات کوانتومی

علم اطلاعات کوانتومی (QIS) پایه‌های فکری نظریه‌های مکانیک کوانتومی و علم اطلاعات را با تکیه بر مکانیک کوانتومی و عناصر ریاضیات، علوم کامپیوتر، علوم فیزیکی و مهندسی ترکیب می‌کند [۱۴]. نظریه اطلاعات، اطلاعات را برحسب آنتروپی یک متغیر تعریف می‌کند و دستگاه‌های الکترونیکی و محاسباتی مدرن را قادر می‌سازد تا کارآمدتر عمل کنند. علم اطلاعات کوانتومی، جریان اطلاعات کوانتومی را در محاسبات کوانتومی و ارتباطات کوانتومی توصیف می‌کند، اگرچه در مفهوم وسیع‌تری می‌توان آن را در مترولوژی و سنجش کوانتومی به‌کار برد [۱۱ و ۱۴]. در علم اطلاعات کلاسیک مخزن اولیه اطلاعات، یک بیت است که می‌تواند فقط ۰ یا ۱ باشد؛ درحالی‌که در اطلاعات کوانتومی حامل اولیه اطلاعات، بیت کوانتومی است که به‌طور خلاصه کیوبیت است. کیوبیت یک واحد محاسباتی است که از اصل

برهم‌نهی برای رمزگذاری اطلاعات استفاده می‌کند. یک کیوبیت می‌تواند $|0>$ یا $|1>$ باشد یا یک ترکیب خطی مختلط دلخواه از حالت‌های $|0>$ یا $|1>$ که برهم‌نهی کوانتومی نامیده می‌شود [۱۴]. به‌طورکلی برهم‌نهی به توانایی ذرات برای قرار گرفتن هم‌زمان در دو یا چند حالت اشاره دارد. ویژگی مهم دیگر درهم‌تنیدگی کوانتومی است. خاصیتی تعریف می‌شود که در آن دو یا چند شیء کوانتومی در یک سیستم می‌توانند ذاتاً به هم مرتبط شوند به‌طوری‌که وقتی اندازه‌گیری شوند، یک اندازه‌گیری نتایج احتمالی اندازه‌گیری را برای دیگری دیکته می‌کند، صرف‌نظر از اینکه دو جسم چقدر از هم فاصله دارند. درهم‌تنیدگی زیربنای تعدادی زیادی از کاربردهای نظامی بالقوه فناوری کوانتومی است. عدم قطعیت کوانتومی یکی دیگر از ویژگی‌های مهم و کاربردی در دانش فیزیک است که پدیده‌های کوانتومی را توجیه می‌کند. طبق آن، اندازه‌گیری موقعیت و تکانه ذرات به‌طور هم‌زمان غیرممکن است [۱-۲ و ۱۵]. ویژگی دیگر، قضیه عدم شبیه‌سازی است که می‌گوید اطلاعات کوانتومی (کیوبیت) قابل کپی نیست. این قضیه پیامدهای عمیقی برای تصحیح خطای کیوبیت و برای امنیت ارتباطات کوانتومی دارد [۱۵-۱۶].

۴. فناوری‌های کوانتومی

فناوری کوانتومی یک فناوری توانمند کلیدی است و به فناوری‌های حاصل از پدیده‌ها و قوانین فیزیک کوانتومی، مانند برهم‌نهی کوانتومی و درهم‌تنیدگی کوانتومی، اطلاق می‌شود. فناوری‌های کوانتومی، در کنار هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، یکی از مهم‌ترین فناوری‌های قرن ۲۱ به شمار می‌آید که در حال ایجاد انقلاب شگرفی در علم و فناوری است. به‌عنوان‌مثال، الگوریتم‌های کوانتومی را می‌توان در یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی به کار برد [۱۳-۱۷]. ازآنجاکه فناوری کوانتومی بر بخش‌های مختلف تأثیر می‌گذارد، فرصت‌ها نیز متنوع هستند و بسیاری از آن‌ها هنوز ناشناخته هستند. یکی از دستاوردهای علم کوانتوم، توانایی مدل‌سازی مغز انسان روی کامپیوتر است. می‌توانیم از ذهن خود برای کنترل ماشین‌ها استفاده کنیم. اگر کسی دچار فراموشی شود، می‌تواند خاطره مدنظر را از فضای ابری دوباره دانلود کند یا شاید بتوانید توانایی نواختن پیانو یا دانش کوانتوم را روی ذهن خود بارگذاری کنید [۱۴-۱۶]. هم اینک توانسته‌اند برخی از این کارها را با موش‌ها بکنند. یک موش معمای مارپیچ را حل می‌کند. خاطره آن روی مغز موشی دیگر بارگذاری می‌شود. موش دوم در تجربه اول خود، جواب معما را به یاد دارد! به‌این‌ترتیب در آینده به‌جای دانلود آهنگ جدید، توانایی نواختن آن را دانلود می‌کنید و به‌جای گوش دادن به آن، از نواختن اش لذت خواهید برد!

در ادامه توضیحات پایه‌ای از فناوری‌های کوانتومی ارائه می‌شود [۱۴]. ما در اینجا به دنبال چگونگی و اساس کار نیستیم و هیچ پیشینه نظری هم ارائه نمی‌کنیم بلکه فقط اصول، اثرات و وضعیت فعلی توسعه را در صورت لزوم برای پیگیری کاربردهای نظامی موردبحث معرفی می‌کنیم. درحالی‌که محاسبات کوانتومی بیشترین تبلیغات را در مورد فناوری‌های کوانتومی دریافت کرده است، دنیای کاملی از سنجش کوانتومی و ارتباطات کوانتومی وجود دارد که به همان اندازه جذاب و امیدوارکننده است.

۴-۱. محاسبات کوانتومی

محاسبات کوانتومی به استفاده از علم اطلاعات کوانتومی برای انجام محاسبات اشاره دارد که به‌صورت تجاری با تعداد بسیار محدود کیوبیت فیزیکی در دسترس است. نکته اصلی اینجاست که یک واحد بیت کوانتومی یا کیوبیت در هر لحظه می‌تواند هم ۰ و هم ۱ باشد؛ همه این ویژگی‌های پیچیده و کوانتومی به قوانین مربوط به حالت برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی مربوط می‌شود و اگر دستگاهی بتواند از پدیده‌ها و قوانین

مختلف و اختصاصی مکانیک کوانتوم پیروی کند، رایانه کوانتومی نامید. محاسبات کوانتومی می‌تواند مشکلات را بسیار سریع‌تر از رایانه‌های کلاسیک حل کند و حتی از عهدهٔ مسائل خاصی که رایانه‌های کلاسیک امروزی نمی‌توانند حل کنند، برمی‌آید [۱۷، ۱۵، ۱۴]. شبیه‌سازی کوانتومی کاربردی خاص از محاسبات کوانتومی است و یک شبیه‌ساز کوانتومی برای یک هدف خاص، شبیه‌سازی‌های اختصاصی دنیای کوانتومی را انجام می‌دهد که امکان کشف و طراحی داروها، مواد شیمیایی و مواد جدید را فراهم می‌کند. محاسبات کوانتومی می‌تواند با کاهش کل زمان اجرای یک الگوریتم، کاهش تکرارهای یادگیری برای بهبود الگوریتم و افزایش ظرفیت شبکه، پیشرفت‌ها در زمینه هوش مصنوعی (یادگیری ماشین) را تحریک کند. یکی از شناخته‌شده‌ترین کاربردهای رایانه کوانتومی، فاکتورسازی اعداد اول بزرگ با افزایش سرعت نمایی است که توسط الگوریتم توضیح داده می‌شود [۱۷]. این تهدیدی برای طرح‌های رمزنگاری کلید عمومی مانند RSA، DH و ECC است [۱۴،۱۷]. طبقه‌بندی رایانه‌های کوانتومی می‌تواند بسیار پیچیده باشد که در اینجا ما طبقه‌بندی را به رایانه کوانتومی دیجیتال جهانی، رایانه کوانتومی آنالوگ و شبیه‌ساز کوانتومی تقلیل می‌دهیم. کامپیوترهای کوانتومی را می‌توان به سه مرحله تکاملی طبقه‌بندی کرد: محاسبات کوانتومی جزء (CQC)، محاسبات کوانتومی در مقیاس متوسط نویز (NISQ) و محاسبات کوانتومی متحمل خطا (FTQC). مرحله CQC نمایشگرهای محاسبات کوانتومی و بلوغ عناصر اساسی را پوشش می‌دهد و قابلیت محاسباتی بسیار محدودی دارد. رایانه کوانتومی مرحله NISQ باید تعداد کافی کیوبیت برای نشان دادن مزایای محاسبات کوانتومی داشته باشد. تحقیقات مستمر باید به افزایش تعداد و کیفیت کیوبیت‌ها منجر شود. مرحله FTQC زمانی شروع می‌شود که یک کیوبیت منطقی کامل به دست می‌آید [۱۷].

شرکت‌های بزرگ فناوری مانند آی.بی.ام.، گوگل و مایکروسافت برای برتری کوانتومی رقابت می‌کنند و یک رایانه کوانتومی زمانی موفق است که بتواند مشکلی را حل کند که هیچ رایانه کلاسیکی نمی‌تواند آن را در هر زمان ممکن حل کند. در اکتبر ۲۰۱۹، گوگل ادعا کرد که در رایانه کوانتومی ۵۳ کیوبیتی خود به برتری کوانتومی دست یافته است [۱۸]. بااین‌حال، منتقدان می‌گویند که مشکل حل شده در آزمایش گوگل هیچ ارزش عملی ندارد و بنابراین رقابت برای برتری کوانتومی همچنان ادامه دارد. رایانه‌های کوانتومی کنونی حدود ۶۰ کیوبیت دارند؛ اما سرعت پیشرفت زیاد است. IBM یک نقشه راه برای توسعه رایانه‌های‌های کوانتومی خود ازجمله هدف ساخت یک کامپیوتر کوانتومی با ۱۰۰۰ کیوبیت تا سال ۲۰۲۳ را اعلام کرده است. گوگل برنامه‌ای برای ساخت یک رایانه کوانتومی یک میلیون کیوبیتی تا سال ۲۰۲۹ دارد [۲۰، ۱۹]. اگر این ادعاها بتواند به تحقق برسد، با رایانه‌های کوانتومی ۱۰۰۰ کیوبیتی، به‌اصطلاح رایانه‌های کوانتومی با مقیاس متوسط نویز (NISQ)، می‌توانیم برخی از کاربردهای عملی ارزشمند را در طراحی مواد، کشف دارو یا تدارکات ببینیم؛ بنابراین پنج تا ده سال آینده برای محاسبات کوانتومی فوق‌العاده هیجان‌انگیز خواهد بود.

۴-۲. ارتباطات کوانتومی و رمزنگاری

ارتباطات کوانتومی به تبادل اطلاعات کوانتومی از طریق شبکه کوانتومی اشاره دارد که از فیبر نوری یا کانال‌های فضای آزاد استفاده می‌کند. کاربرد کوتاه‌مدت اولیه فناوری ارتباطات کوانتومی، امنیت در برابر استراق‌سمع کنندگان با روشی به نام توزیع کلید کوانتومی (QKD) است [۲۱،۲۲]. در QKD، یک کلید رمزگذاری بین دو طرف در ارتباط، به شکل ذرات کوانتومی منتقل می‌شود. در بیشتر موارد، ارتباط کوانتومی با استفاده از فوتون به‌عنوان حامل اطلاعات کوانتومی محقق می‌شود. بیشتر سیستم‌های ارتباطی کوانتومی با فوتون‌های طیف مرئی یا نزدیک به آن کار می‌کنند و شبیه به ارتباطات نوری یا لیزری سنتی هستند. ماهیت کوانتومی این ذرات

موجب می‌شود، هر شنودکننده‌ای که آن‌ها را ره‌گیری کند، اثری در خود جریان داده باقی بگذارد. اگر دستورالعمل‌ها به‌درستی اجرا شود، مشاهده فوتون‌ها بدون تغییر آن‌ها ازنظر فیزیکی غیرممکن است [۲۲]. کانال‌های ارتباطی کوانتومی با دست‌کاری هر فوتون در پرتو تلاش می‌کنند تا ارتباطات بسیار ایمن را ارائه دهند. اگر دو طرف ارتباط یک کلید رمزنگاری را مبادله کنند، می‌توان مطمئن بود که هیچ‌کس انتقال کلید آن‌ها را ره‌گیری نکرده است؛ بنابراین هیچ‌کس نمی‌تواند داده‌های رمزگذاری شده مربوطه را رمزگشایی کند. به‌همین دلیل، گاهی اوقات به ارتباطات امن کوانتومی "غیرقابل هک" می‌گویند؛ بنابراین آینده انتقال امن اطلاعات را برای بانک‌ها، شبکه‌های برق و سایر بخش‌ها نشان می‌دهد [۲۰-۲۲]. در رمزنگاری کوانتومی دو رویکرد وجود دارد. یکی، رویکرد مبتنی بر سخت‌افزار توزیع کلید کوانتومی[1] است که از اصول مکانیک کوانتومی اساسی برای تسهیل ارتباطات ایمن بدون ره‌گیری استفاده می‌کند. روش دیگر، رویکردی نرم‌افزاری برای تکامل پیشرفت رمزنگاری پسا کوانتومی PQC است. (PQC)بر اساس الگوریتم‌های جدیدی است که بر اساس فاکتورگیری یک عدد بزرگ شبه-اول نیست. در آینده، اعداد اول بزرگ توسط رایانه‌های‌های کوانتومی با کارایی بالا قابل شکستن خواهند بود. این باور وجود دارد که هر دو فناوری می‌توانند با هم وجود داشته باشند، زیرا موارد استفاده بسیار متفاوتی وجود دارد که در آن به فناوری رمزنگاری پایدار کوانتومی نیاز است. QKD و PQC اغلب ویژگی‌های متفاوتی دارند که در جدول زیر نمودار مقایسه‌ای این دو فناوری که خلاصه نتایج مقاله‌های مختلف است را در تقابل با یکدیگر قرار می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه فناوری‌های کوانتومیQKD و PQC

معیار مقایسه	PQC	QKD
امنیت	الگوریتم‌ها برای تعیین قابلیت اطمینان سال‌ها موردمطالعه قرار خواهند گرفت. بااین‌حال، هیچ تضمینی ۱۰۰٪ وجود ندارد که کسی درنهایت راهی برای شکستن آن پیدا کند	مکانیک کوانتومی تضمین می‌کند که یک کانال کوانتومی نمی‌تواند بدون شناسایی موفقیت‌آمیز ره‌گیری شود
پیاده‌سازی	اکثر پیاده‌سازی‌ها فقط نرم‌افزاری خواهند بود. به سخت‌افزار تخصصی نیاز ندارد	پیاده‌سازی به سخت‌افزار تخصصی نیاز دارد
رسانه‌های ارتباطی	قابل‌استفاده با هر نوع رسانه ارتباطی دیجیتال ازجمله RF، شبکه‌های سیمی، ارتباطات نوری	فقط با ارتباطات نوری کار می‌کند یا فیبر نوری یا فضای آزاد نوری
هزینه	هزینه نسبتاً کم زیرا راه‌حل‌ها مبتنی بر نرم‌افزار خواهند بود	هزینه بیشتر زیرا سخت‌افزار و زیرساخت ارتباطی جدید موردنیاز خواهد بود
سازگاری با دستگاه تلفن همراه	کاملاً با هر نوع ارتباطی که توسط دستگاه تلفن همراه استفاده می‌شود، سازگار است.	خیلی محدود
سازگاری با امضای دیجیتال	انواع استانداردها به‌طور خاص برای برنامه‌های کاربردی امضای دیجیتال درحال‌توسعه هستند.	به‌طور بالقوه می‌تواند برای امضای دیجیتال استفاده شود، اما استفاده به دلایل دیگر بعید است.

۴_۳. سنجش و اندازه‌شناسی کوانتومی

سنجش و اندازه‌شناسی کوانتومی، بالغ‌ترین حوزه فناوری کوانتومی است که زمان‌سنجی، سنجش یا تصویربرداری را بهبود می‌بخشد و بر یک یا چند مورد از ویژگی‌های زیر متکی است: سطوح انرژی کوانتومی، همدوسی کوانتومی و درهم‌تنیدگی کوانتومی [۲۲-۲۵]. سنجش کوانتومی از اصول فیزیک کوانتومی در حسگرهای کوانتومی استفاده می‌کند. حسگرهای کوانتومی می‌توانند اطلاعات بسیار دقیقی در مورد سیگنال الکتریکی، ناهنجاری‌های مغناطیسی و جهت‌یابی اینرسی تولید کنند. داده‌های دستگاه‌های حسگر با حساسیت و قابلیت اطمینان بالا که قادر به تشخیص علائم اولیه خرابی تجهیزات هستند را می‌توان با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده تجزیه‌وتحلیل کرد تا بینشی در مورد عملکرد آینده به دست آورد و وضعیت سلامت عملیاتی را با درجه

اطمینان بالاتری ارزیابی کرد [۲۳،۲۴]. تصویربرداری کوانتومی زیرشاخه‌ای از اپتیک کوانتومی است که از همدوسی فوتون‌ها استفاده می‌کند و امکان کاهش نویز و افزایش وضوح جسم تصویر را فراهم می‌کند. دستورالعمل‌های تصویربرداری کوانتومی برای رادار کوانتومی، تشخیص اجسام در محیط غیرقابل نفوذ نوری و در تصویربرداری پزشکی در نظر گرفته می‌شوند. فناوری‌های کوانتومی را می‌توان برای سنجش صدای فوق‌العاده دقیق تا سطح یک فونون با استفاده از تشخیص فوتو اکوستیک استفاده کرد. تشخیص دقیق امواج صوتی برای بسیاری از کاربردها ازجمله تشخیص پزشکی، سونار، ناوبری، سنجش گاز ردیابی و فرایندهای صنعتی ضروری است [۲۳-۲۵]. سنجش کوانتومی فوتونیک، از ماهیت کوانتومی نور برای طیف وسیعی از کاربردهای سنجش، از تشخیص هدف از راه دور تا بازخوانی حافظه نوری، بهره‌برداری می‌کند.

۵. فناوری‌های کوانتومی با کاربرد نظامی

با توجه به اهمیت فناوری‌های کوانتومی نیاز است یک اکوسیستم کوانتومی ملی متشکل از صنعت و مؤسسات دانشگاهی به‌ویژه با هدف توسعه فناوری برای بخش دفاعی وجود داشته باشد. نخستین قدم ایجاد یک نقشه راه فناوری کوانتومی است. نقشه راه باید تمام مراحل بعدی را ازجمله شناسایی راه‌حل‌های کوانتومی مخرب، بررسی بازار، ارزیابی ریسک، توسعه فناوری تا آزمایش نمونه اولیه و درنهایت استقرار فناوری را شامل شود. فناوری‌های کوانتومی مختلف در TRLهای مختلف هستند که در جدول شماره ۱ آمده است. تغییرات TRL و انتظارات افق زمانی در هنگام در نظر گرفتن برنامه‌های کاربردی مختلف و پلتفرم‌های استقرار به‌ویژه برای اهداف نظامی حتی پیچیده‌تر هستند. در اینجا ما TRL و افق زمانی مورد انتظار خود را در جدول ۲ ارائه می‌کنیم که با یافته‌های این کار مطابقت دارد. به‌طورکلی فناوری کوانتومی در TRL پایین است؛ به این معنی که این فناوری هنوز در مرحله توسعه و نه تجاری‌سازی است، اگرچه برخی از کاربردهای این فناوری به‌صورت تجاری در دسترس است [۲۰].

جدول ۲. TRL فناوری‌های کوانتومی و انتظارات افق زمانی

فناوری	TRL	افق زمانی
رایانه‌کوانتومی	۵-۴	۲۰۳۰
رمزنگاری پسا کوانتومی	۸-۷	۲۰۲۵
تصویربرداری کوانتومی	۵	۲۰۳۰-۲۰۲۵
سنجش گرانشی و مغناطیسی کوانتومی	۶-۵	۲۰۲۵
آنتن RF کوانتومی	۴	۲۰۳۰-۲۰۲۵
شبکه ارتباطی کوانتومی	۳-۱	۲۰۳۵-۲۰۳۰
رادار کوانتومی	۲-۱	نامشخص
ساعت کوانتومی	۶-۴	۲۰۳۰
توزیع کلید کوانتومی	۸-۷	۲۰۳۰-۲۰۲۵

استقرار کامل این فناوری‌ها برای اهداف نظامی با توجه به مستلزم بودن غلبه بر موانع تکنولوژیکی و برآورده شدن الزامات نظامی ممکن است زمان‌بر باشد. مکانیسم دفاع با قابلیت کوانتومی در سال‌های آینده یک شبکه توزیع‌شده از حسگرهای کوانتومی، رایانه‌ها و پیوندهای ارتباطی خواهد بود که در همه حوزه‌ها (زمین، دریا، هوا و فضا) نفوذ می‌کند و از صنعت دفاعی تا سازمان‌های استراتژیک و واحدهای عملیاتی و تاکتیکی مستقر را در بر می‌گیرد. دفاع و امنیت ملی احتمالاً جزو اولین حوزه‌هایی هستند که این فناوری‌های نوظهور به‌ویژه ساعت‌های کوانتومی فعال، ناوبرهای کوانتومی، حسگرهای گرانش کوانتومی و تصویربرداری کوانتومی را به کار می‌گیرند [۲۶]. فناوری‌های نظامی نسبت به کاربردهای صنعتی یا عمومی نیازمند احتیاط بیشتری با توجه به استقرار احتمالی در میدان جنگ هستند. فناوری‌های کوانتومی می‌توانند بر تمام حوزه‌های جنگ مدرن تأثیر بگذارند. انقلاب کوانتومی دوم حساسیت و کارایی را بهبود می‌بخشد و

قابلیت‌های جدیدی را معرفی می‌کند و تکنیک‌های جنگی مدرن را به‌جای اینکه به انواع جدید سلاح‌ها منجر شود، تقویت می‌کند [۲۶،۲۷]. این مطالعه، برنامه‌های قابل‌تصور فناوری کوانتومی را برای کاردهای نظامی، امنیتی، فضایی و اطلاعاتی در جنبه‌های مختلف جنگ مدرن ترسیم می‌کند. اگرچه کاربردهای بالقوه مهمی وجود دارد؛ اما باید این واقعیت را در نظر داشت که بسیاری از فناوری‌های کوانتومی هنوز در مرحله نظری یا در مراحل اولیه توسعه هستند. پیشرفت کوانتومی قابل‌توجهی که در آزمایشگاه به دست می‌آید همیشه به پیشرفت مشابه در خارج از آزمایشگاه منجر نمی‌شود [۲۶،۲۷]. حرکت از آزمایشگاه به صنعت برای پذیرش گسترده، چالش‌های مهندسی و تولیدی را به همراه دارد که علاوه بر اعتماد بازار و توسعه زنجیره‌های تأمین، نیازمند جنبه‌های دیگری همچون قابل‌حمل بودن، حساسیت، وضوح، سرعت، استحکام بالا و هزینه است. ادغام فناوری کوانتومی در یک پلتفرم نظامی حتی چالش‌برانگیزتر است. جدای از رایانه‌های کوانتومی که اغلب در مراکز داده به‌طور مشابه برای استفاده غیرنظامی مستقر می‌شوند، ادغام و استقرار سنجش کوانتومی، تصویربرداری و شبکه‌ها با چالش‌های متعددی مواجه است که ناشی از افزایش تقاضای استفاده نظامی است. برای مثال، نیاز سطح نظامی ناوبری دقیق، سرعت اندازه‌گیری بالا را ایجاب می‌کند که می‌تواند برای حس‌گرهای اینرسی کوانتومی فعلی کاملاً محدود باشد [۲۷]. در ادامه برخی از فناوری‌های کوانتومی با کاربرد نظامی را شرح خواهیم داد.

۵-۱. امنیت سایبری کوانتومی

امنیت سایبری حفاظت از سیستم‌های متصل به اینترنت از قبیل سخت‌افزار، نرم‌افزار و داده‌ها از تهدید حمله‌های دیجیتال است. امنیت سایبری شامل یک سری پروتکل است که یک شرکت یا یک فرد برای اطمینان از یکپارچگی، محرمانه و دسترسی اطلاعات خود پیروی می‌کند، این روش توسط افراد و شرکت‌ها برای حفاظت در برابر دسترسی غیرمجاز به مراکز داده‌ها و دیگر سیستم‌های رایانه‌هایی استفاده می‌شود. فناوری کوانتومی امنیت سایبری یک بخش ازنظر فنی جوان است که در آن تعداد زیادی نرم‌افزار کنترل سیستم کوانتومی جدید در حال توسعه است [۲۷]. نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای جدید باگ‌ها و نقض‌های امنیتی بیشتری دارند. به‌عنوان‌مثال، ماهواره های کوانتومی QKD فعلی به‌عنوان تکرارکننده‌های قابل‌اعتماد که با یک رایانه کلاسیک کنترل می‌شوند، می‌توانند یک هدف ایده‌آل برای حمله سایبری باشند. دو تا از مهم‌ترین منافع امنیت ملی که تحت‌تأثیر تحولات فناوری کوانتومی قرار دارند، امنیت سرزمینی و امنیت اقتصادی هستند. در مورد امنیت سرزمینی، عنصر اصلی تحت‌تأثیر امنیت دیجیتال است [۲۸]. فناوری محاسبات کوانتومی قادر خواهد بود استانداردهای رمزگذاری فعلی (نامتقارن) را بشکند. همچنین از راه‌های دیگر، محاسبات کوانتومی می‌تواند حمله‌های سایبری را تسهیل کند که احتمالاً بر امنیت اقتصادی و ثبات اجتماعی و سیاسی نیز تأثیر می‌گذارد [۲۸]. علاوه‌براین، ازآنجاکه جامعه به‌طورکلی و به‌نوبه خود زیرساخت‌های حیاتی مانند پایگاه‌های اطلاعاتی سوابق شخصی و سازمانی دولتی و تأمین آب آشامیدنی به‌طور فزاینده‌ای به فرایندهای دیجیتال متکی هستند، مهم است ارزیابی کنیم که چگونه می‌توان این فرایندها را برای آینده آماده کرد زیرا دسترسی به اطلاعات محافظت‌شده با استفاده از محاسبات کوانتومی آسان‌تر است [۲۰،۲۸].

۵-۲. جنگ الکترونیک کوانتومی

مقوله جنگ الکترونیک به‌واسطه فناورانه محور بودن به‌شدت تحت‌تأثیر فناوری‌هایی همچون فناوری کوانتومی قرار خواهد گرفت و ماهیت جنگ‌های الکترونیک آینده تغییر خواهد کرد. جنگ الکترونیک کوانتومی (QEW) را می‌توان به جنگ الکترونیک کلاسیک تقویت‌شده کوانتومی و QEW با تمرکز بر اقدامات متقابل، ضد اقدام و پشتیبانی در برابر کانال‌های کوانتومی تقسیم کرد [۱۱، ۲۰، ۲۹]. سیستم‌های

کلاسیک QEW برای اقدامات پشتیبانی الکترونیکی می‌توانند از آنتن کوانتومی و محاسبات کوانتومی بهره‌مند شوند و تحلیل‌گرهای طیف فرکانس ماکروویو بهبود یافته را برای جنگ الکترونیکی ارائه می‌کنند که در آن بهینه‌سازی‌های کوانتومی و تکنیک‌های ML/AI کوانتومی می‌توانند اعمال شود. سیستم‌های فعلی QEW از زمان‌بندی کوانتومی نیز بهره خواهند برد. زمان‌بندی کوانتومی می‌تواند قابلیت‌هایی مانند هوشمندی سیگنال‌ها، ضد DRFM (حافظه فرکانس رادیویی دیجیتال) و سایر سیستم‌های QEW را که به زمان‌بندی دقیق نیاز دارند؛ مثل قابلیت‌های پارازیت ضدرادار را افزایش دهد [۲۹].

۵-۳. جنگ فضایی کوانتومی

در آینده‌ای نزدیک، فضا میدان جنگ کشورهای پیشرفته خواهد بود. البته قبلاً هم فضا به دلیل اهداف نظامی مکان مورداستفاده برای ماهواره‌ها و برای ناوبری، نقشه‌برداری، ارتباطات و نظارت بود. امروزه استفاده از فضا در حال تبدیل‌شدن به‌نوعی سلاح نوین است [۳۰]؛ به‌عنوان‌مثال، ماهواره‌هایی با سلاح‌های لیزری یا ماهواره‌های "کامیکاز" در مدار زمین قرار می‌گیرند و جنگ ضد ماهواره‌ای به موازات آن در حال رشد است. همچنین فضا برای قرار دادن سنجش کوانتومی و فناوری ارتباطی در ماهواره‌ها و همچنین برای اقدامات متقابل فضایی کلیدی خواهد بود [۳۱]. جنگ فضایی به فناوری‌های کوانتومی جدید مانند رادار، لیدار و جنگ الکترونیک کوانتومی برای استقرار در فضا منجر خواهد شد. رادار کوانتومی فضایی برای ردیابی اجسام کوچک، تاریک و سریع مانند ماهواره‌ها، زباله‌های فضایی یا شهاب‌سنگ‌ها بسیار مفید است. سرعت بسیار زیاد رایانه‌های کوانتومی برای بهینه‌سازی الگوریتم‌های چالش‌برانگیز، آن‌ها را قادر می‌سازد تا در مدیریت مأموریت‌های نظامی و اکتشافات اعماق فضا نیز استفاده شوند [۳۱].

۵-۴. جنگ زیر آب کوانتومی

فناوری‌های کوانتومی با تشخیص مغناطیسی پیشرفته زیردریایی یا مین‌های زیر آب، ناوبری جدید زیردریایی اینرسی و سونارهای دقیق تقویت‌شده کوانتومی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی در جنگ زیر آب دخالت کنند. به‌طورکلی در محیط دریایی، سنجش بر اساس آشکارسازهای کوانتومی، رادار، لیدار، مغناطیس‌سنج یا گرانش‌سنج را می‌توان اعمال کرد [۳۲]. زیردریایی‌های بزرگ احتمالاً می‌توانند یکی از نخستین پذیرندگان ناوبری اینرسی کوانتومی باشند؛ زیرا می‌توانند تجهیزات کوانتومی بزرگ‌تر ازجمله خنک‌کننده برودتی را نصب کنند. علاوه‌براین، مغناطیس‌سنج‌ها و گرانش‌سنج‌های کوانتومی حساس می‌توانند بدون استفاده از سونار که به‌راحتی قابل تشخیص است، به نقشه‌برداری از محیط‌های اطراف مانند دره‌های زیردریایی، کوه‌های یخ و کف دریا کمک کنند [۳۳].

۵-۵. رقابت محاسبات کوانتومی

استفاده از رایانه‌های کوانتومی یک نگرانی برای گسترش تسلیحات نظامی در آینده است. به این دلیل که رایانه‌های کوانتومی از قطعات منحصربه‌فرد برای اجرای الگوریتم‌ها و حل مسائل ریاضی و رایانه‌ای استفاده می‌کنند که حل آن‌ها با سرعت بالا برای رایانه‌های کلاسیک بسیار دشوار است [۱۴، ۲۰]. این رایانه‌ها می‌توانند اهداف سلاح‌های خودران را بدون نیاز به تعامل انسانی در جنگ، بهتر شناسایی کنند. یکی دیگر از کاربردهای خاص محاسبات کوانتومی، الگوریتم‌های تشخیص الگوی پیشرفته برای تشخیص وسایل نقلیه دشمن در فیلم‌های دوربین پهپاد است. برخی از تحلیلگران گفته‌اند که رایانه‌های کوانتومی می‌توانند پیشرفت‌هایی را در یادگیری ماشین که زیرشاخه ای از هوش مصنوعی است، فراهم کنند. چنین پیشرفت‌هایی می‌تواند باعث بهبود تشخیص الگو و شناسایی هدف مبتنی بر ماشین شود. این به نوبه خود می‌تواند توسعه سیستم‌های تسلیحاتی مرگبار دقیق‌تر یا سلاح‌هایی را که

قادر به انتخاب و درگیری اهداف بدون نیاز به کنترل دستی انسان یا عملیات از راه دور هستند را امکان‌پذیر کند. رایانه‌های کوانتومی مجهز به هوش مصنوعی به‌طور بالقوه می‌توانند با حسگرهای کوانتومی جفت شوند تا کاربردهای "اطلاعات، نظارت، شناسایی" نظامی را بیشتر تقویت کنند. برای رسیدن به این هدف، برآوردها نشان می‌دهد که برای شکستن روش‌های رمزگذاری فعلی به یک رایانه‌های کوانتومی با حدود ۲۰ میلیون کیوبیت نیاز است. بااین‌حال، پیشرفته‌ترین کامپیوترهای کوانتومی امروزی اغلب بیش از ۲۵۶ کیوبیت ندارند که هم‌اکنون امری ناممکن به نظر می‌رسد [۱۷، ۱۴].

۵-۶. شبکه ارتباطی کوانتومی

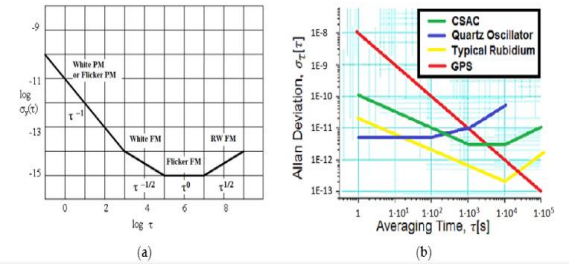
ارتباطات کوانتومی برای دولت‌ها و آژانس‌های دفاعی برای محافظت از مقادیر زیادی از داده‌های طبقه‌بندی‌شده با حساسیت طولانی‌مدت، مفید است. تنها راه مؤثر برای اطمینان از محافظت در برابر تهدید دائمی حمله‌های سایبری و جاسوسی، تبادل کلیدهای کوانتومی نشکن است. فناوری‌های ارتباطی کوانتومی، همچنین می‌توانند از توزیع کلید کوانتومی (QKD) برای محافظت از ارتباطات رمزگذاری شده حساس در برابر ره‌گیری خصمانه و محافظت از داده‌های بلندمدت در برابر حمله‌های رایانه‌های کوانتومی آتی استفاده کنند. اینترنت کوانتومی یعنی مؤثرترین راه ارتباط بین رایانه‌های کوانتومی، مخفف یک شبکه کوانتومی با خدمات مختلف است که پیامدهای مهم و نه‌تنها امنیتی دارد [۳۴]. شبکه‌های ارتباطی کوانتومی شالوده اینترنت کوانتومی را تشکیل خواهند داد که به ما امکان می‌دهد، رایانه‌های کوانتومی و فناوری‌های حسگر را به هم متصل کنیم، درست مانند آنچه در حال حاضر دستگاه‌های کلاسیک را از طریق اینترنت متصل می‌کنیم [۳۵]. بااین‌حال، بسیاری از برنامه‌های کاربردی شبکه‌های ارتباطی کوانتومی مترقی نیازمند درهم‌تنیدگی کوانتومی هستند. یک شبکه کوانتومی که از درهم‌تنیدگی کوانتومی استفاده می‌کند، به همگام‌سازی دقیق‌تری از ساعت شبکه خواهد رسید، به‌ویژه زمانی که ساعت‌های کوانتومی به کار گرفته شوند. از تکرارکننده‌های کوانتومی می‌توان برای توزیع درهم‌تنیدگی در فواصل طولانی‌تر استفاده کرد؛ اما این تحقیق هنوز در مراحل اولیه است. ترکیب‌های آینده فیبر نوری و کانال‌های فضای آزاد، گره‌های انتهایی مختلفی مانند پهپادها، هواپیماها، کشتی‌ها، وسایل نقلیه، سربازان، مراکز فرماندهی و غیره را به هم متصل خواهند کرد [۳۵، ۳۴، ۱۷].

۵-۷. موقعیت‌یابی، ناوبری و زمان‌بندی کوانتومی

سنجش کوانتومی می‌تواند چندین قابلیت نظامی را افزایش دهد. به‌عنوان‌مثال، سنجش کوانتومی می‌تواند سیستم‌های موقعیت‌یابی، ناوبری و زمان‌بندی (PNT) و به‌ویژه ناوبری اینرسی را به‌طور قابل‌توجهی گسترش دهد که در تئوری به ارتش اجازه می‌دهد تا در محیط‌هایی که با کاهش یا رد GPS مواجه هستند، با عملکرد کامل به عملیات خود ادامه دهند. دو رویکرد اساساً متفاوت برای PNT وجود دارد: یکی شامل انتقال و دریافت سیگنال‌های خارجی و دیگری که مانند سیستم‌های اینرسی بر حس خودکفایی حرکت تکیه دارند [۳۶]. استانداردهای زمان و انتقال فرکانس (TFT) یک سرویس اساسی است که زمان‌بندی دقیقی را برای ارتباطات، اندازه‌شناسی، همچنین سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) ارائه می‌دهد [۳۶،۳۷]. فناوری‌ها و رویکردهای مبتنی بر کوانتوم از توسعه ابزارهای دقیق و حساس برای PNT پشتیبانی می‌کنند. مزیت فناوری کوانتومی برای محیط‌های عملیاتی چالش‌برانگیز یا نداشتن GPS آشکار می‌شود و عملیات‌هایی بسیار دقیق را ممکن می‌سازد. نمونه‌هایی از چنین محیط‌هایی، محیط زیر آب و زیرزمینی یا محیط‌های تحت پارازیت GPS هستند [۳۶،۳۷].

در سال‌های اخیر وجود نسل جدیدی از ساعت‌های اتمی مقیاس کوچک، (CSAC) که به‌صورت تجاری در دسترس هستند باعث می‌شود که ارائه‌دهندگان سیستم‌های

ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) یک CSAC را در محصولات پیشرفته خود بگنجانند، این مهم به‌ویژه برای سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) (Symmetricom GPS-2700 و GPS-2750) به‌منظور بهبود عملکرد راه‌حل‌های ناوبری آن‌ها گسترش یافته است [۳۷]. واریانس آلن یک تکنیک شناخته شده است که برای اندازه‌گیری پایداری نوسانگرها و ساعت‌های اتمی استفاده می‌شود. این روش برای تخمین پایداری ناشی از فرایندهای نویز (شکل ۲)، مانند white PM (مدولاتور فاز) یا Flicker PM (مرتبط با نویز کوانتومی)، white FM (مدولاتور فرکانس) که به‌نام انتخاب تصادفی زاویه نیز شناخته می‌شود، مناسب است. Flicker FM همچنین BIAS instability و RW FM (Random Walk Frequency Modulator) را نام‌گذاری کرد. در شکل زیر یک نمودار بین ساعت‌های اتمی مختلف آورده شده است [۳۷].



شکل ۱. نمودار انحراف آلن: (الف) یک نمودار عمومی و (ب) یک مورد خاص ازجمله ساعت‌های کوانتومی جدید CSAC و GPS و ساعت روبیدیوم و کوارتز [۳۷]

۵-۸. رادار کوانتومی و لیدار

رادار کوانتومی اصولاً مشابه رادار کلاسیک عمل می‌کند، به این معنا که یک سیگنال باید به سمت هدف ارسال شود و سیستم رادار باید منتظر سیگنال منعکس شده باشد. باوجوداین ازلحاظ نظری دقت بهبودیافته و قابلیت‌های جدید را می‌توان با رویکرد مکانیکی کوانتومی به‌دست آورد [۳۸]. رادار کوانتومی، پتانسیل منسوخ کردن فناوری‌های پنهان‌کاری، ارائه شناسایی دقیق‌تر هدف و امکان شناسایی عملیات‌های نظارت مخفی را دارد. دو روش شناخته شده برای سنجش از راه دور تقویت‌شده کوانتومی وجود دارد: یا با استفاده از تداخل سنجی کوانتومی یا با استفاده از الگویی برای تشخیص هدف که از درهم‌تنیدگی کوانتومی بین مدهای الکترومغناطیسی سیگنال و غیرفعال (ایدلر) استفاده می‌کند. این حسگرها اندازه‌گیری دقیق‌تر و حساس‌تر و استفاده از توان بسیار کمتر را برای کاربردهایی مانند شناسایی، ردیابی اهداف کوچک و پنهانی امکان‌پذیر می‌کنند [۳۸]. بر اساس فهرستی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد رادار کوانتومی، می‌تواند یک فناوری مخرب قدرتمند باشد که امکان تغییر قوانین جنگ مدرن را دارد و حداکثر برد رادار را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد؛ به‌ویژه در برابر هواپیماهای رادارگریز مؤثر باشد؛ بنابراین با وجود ناپختگی فناوری و تردیدهای فراوان در مورد اینکه آیا رادار کوانتومی می‌تواند به عنوان رادار نظارت اولیه استاندارد کار کند یا خیر، توجه به این موضوع در سطح بین‌المللی مورد توجه قرار گرفته است [۳۸، ۲۰]. جدا از قیمت بالا، شک و تردید در مورد شناسایی اهداف پنهان یا مقاومت در برابر پارازیت نیز وجود دارد. رادار کوانتومی می‌تواند در برابر فرستنده‌های پارازیت سودمند باشد، اما معلوم نیست که در برابر حافظه فرکانس رادیویی دیجیتال یا دیگر مسدودکننده‌های هوشمند مفید باشد [۳۸]. به‌طور خلاصه، دستیابی به رادار کوانتومی دوربرد حتی به‌عنوان یک چشم‌انداز بلندمدت بعید است. برای تحقق آن، باید فناوری جدیدی را توسعه داد که برودت‌های کوچک‌تر، تابشگر کوانتومی فرکانس رادیویی کارآمد در دمای بالاتر یا خنک‌کننده برودتی کارآمدتر را ممکن می‌سازد.

۵-۹. اطلاعات، نظارت، دستیابی و شناسایی هدف

اطلاعات، نظارت، اکتساب هدف و شناسایی (ISTAR) یک قابلیت حیاتی ارتش مدرن برای عملیات بسیار دقیق است. فناوری‌های کوانتومی این پتانسیل را دارند که به‌طور چشمگیری آگاهی موقعیتی میدان‌های نبرد چند حوزه‌ای را بهبود بخشند. به‌طورکلی می‌توان از محاسبات کوانتومی انتظار داشت که به دستیابی در داده‌های اطلاعاتی جدید، پردازش داده‌های بزرگ از نظارت و شناسایی و شناسایی اهداف با استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی کوانتومی کمک کند [۳۹]. جدای از پردازش بخش ISTAR، پیشرفت چشمگیری را می‌توان از سنجش کوانتومی که بر روی وسایل نقلیه زمینی، دریایی، هوایی و ماهواره‌های مدار پایین قرار می‌گیرد، انتظار داشت. یک زمینه جالب برای ISTAR، تصویربرداری کوانتومی است. تصویربرداری کوانتومی کاربردهای بسیار متنوعی را ارائه می‌دهد؛ به‌عنوان‌مثال رادار کوانتومی، دستگاه‌های تصویربرداری برای پزشکی، دوربین سه‌بعدی، فاصله‌یاب مخفی و غیره [۳۹].

۵-۱۰. مگنتوآنسفالوگرافی

اسکنر مگنتوآنسفالوگرافی (MEG) یک سیستم تصویربرداری پزشکی است که با اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی تولیدشده با جریانی که از مجموعه‌های عصبی عبور می‌کند، آنچه را که مغز انجام می‌دهد به تصویر می‌کشد [۴۰]. اسکنرهای MEG نیاز به حسگرهای ابررسانای کوانتومی دارند تا بتواند بخشی از کلاه ایمنی یک سرباز برای نظارت و تشخیص پزشکی مداوم و از راه دور در صورت آسیب در زمانی کوتاه باشد [۴۰].

۵-۱۱. شبیه‌سازی و تشخیص شیمیایی و بیولوژیکی

شبیه‌سازی‌های شیمیایی و بیولوژیکی مرتبط با دفاع در درجه اول برای آزمایشگاه‌های نظامی و ملی، صنایع دفاع شیمیایی یا نیروهای دفاعی CBRN (شیمیایی، بیولوژیکی، رادیولوژیکی و هسته‌ای) جالب است. تحقیقات بر داروهای جدید و مواد شیمیایی مبتنی بر شبیه‌سازی کوانتومی به یک رایانه کوانتومی پیشرفته نیاز دارد. شبیه‌سازی‌های کوانتومی برای عوامل شیمیایی و بیولوژیکی جنگ شیمیایی همان الزامات تحقیقات غیرنظامی را دارند [۴۱]. تشخیص فوتوآکوستیک با لیزر آبشار کوانتومی به‌عنوان یک آشکارساز شیمیایی مؤثر خواهد بود. به‌عنوان‌مثال، آشکارسازهای شیمیایی کوانتومی می‌توانند عناصر TNT و تری استون تری پراکسید مورداستفاده در وسایل انفجاری دست‌ساز را که یک سلاح رایج مورداستفاده در درگیری‌های نامتقارن هستند، شناسایی کنند. از همین سیستم برای تشخیص استون می‌توان برای کشف چمدان و مسافران دارای مواد منفجره در هواپیما استفاده کرد. به‌طورکلی، تشخیص مواد شیمیایی کوانتومی را می‌توان علیه عوامل جنگ شیمیایی یا مواد شیمیایی صنعتی سمی استفاده کرد [۴۱،۴۲].

۵-۱۲. طراحی مواد جدید

علم مدرن با بهره‌برداری از خواص فیزیکی، مغناطیس و جذب امواج مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی و عایق توپولوژیکی، مواد جدیدی را طراحی و تولید می‌کند که خواص غیرمعمولی از خود بروز می‌دهند [۴۳-۴۶]. مواد به‌عنوان یک سیستم کوانتومی می‌توانند به‌وسیلهٔ رایانه‌های کوانتومی شبیه‌سازی شوند. کاربردهای در نظر گرفته شده می‌تواند به‌عنوان‌مثال، ابررسانای دمای اتاق، باتری‌های بهتر و بهبود ویژگی‌های مواد خاص باشد. برای صنعت دفاعی، فرصت‌هایی برای تحقیق در مورد مواد جدید مانند استتار بهتر، پنهان‌کاری (جذب الکترومغناطیسی)، ذره‌های فوق سخت یا طراحی مواد با تحمل دمای بالا در نظر گرفته شده است، بدون اینکه جزئیاتی فاش شود [۴۳-۴۷].

۵-۱۳. لیزر آبشار کوانتومی

لیزر یعنی نور تک‌فامی که تنها یک طول‌موج دارد و می‌تواند سیگنال‌های پرتوان تولید کند. اساس کار لیزر «گسیل تحریکی» است؛ پدیده‌ای کوانتومی که در آن یک فوتون با طول‌موج مشخص با یک الکترون برانگیخته برخورد می‌کند و براثر این برخورد، الکترون از حالت برانگیخته خارج می‌شود که در نتیجه آن یک فوتون دیگر با خواص یکسان تشکیل می‌شود، به فوتون اول ملحق و به‌این‌ترتیب سیگنال تقویت می‌شود. استفاده از لیزر برای مقاصد نظامی رو به افزایش است. ارتش‌های بسیاری از کشورهای مختلف از انواع مختلفی از سیستم‌های لیزری برای وظایف و اقدامات رزمی خاص خود استفاده می‌کنند. نیروهای زمینی، توپخانه، پدافند هوایی و نیروهای هوانوردی امروزه لیزر را به‌عنوان یک عنصر عملیاتی اصلی در افزایش دقت و اثربخشی عملیات رزمی می‌شناسند. همچنین لیزر بخشی از جلسات آموزشی مختلف در روند آموزشی سربازان در مدارس و دانشگاه‌های نظامی است. لیزرهای آبشار کوانتومی، لیزرهای نیمه‌هادی‌ای هستند که بر اساس انتقال درون زیر باندی در ساختارهای ناهمگون چند چاه کوانتومی بر پایه تکنیک‌های رشد لایه‌نشانی ساخته شده‌اند [۴۲]. در بیست سال گذشته، لیزرهای آبشار کوانتومی نه‌تنها پیشرفت سریعی در صنعت و تجهیزات نظامی داشته‌اند بلکه تبدیل به منابع کاربردی مادون‌قرمز میانی شده‌اند. امروزه از این لیزرها به‌عنوان یک دستگاه بسیار پیشرفته و حساس برای برنامه‌های کاربردی نظیر طیف‌سنجی در زمینه‌های نظارت بر محیط‌زیست، فرایندهای صنعتی، امنیتی و نظامی استفاده می‌شود [۲۰،۴۲].

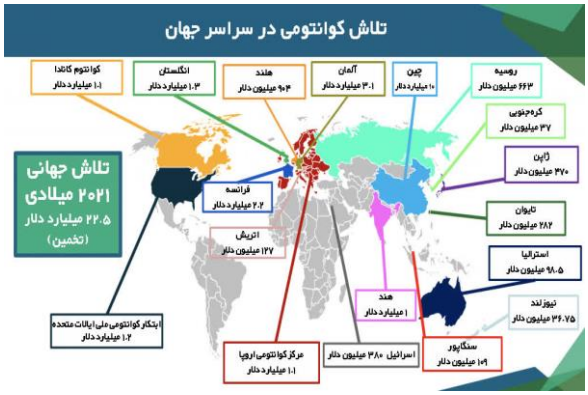
۵-۱۴. سلاح‌های بیولوژیکی نسل جدید

محققان دانشگاه کمبریج انگلستان با انتشار گزارشی در سال ۲۰۱۹ مدعی شدند سلاح‌های بیولوژیک در آینده از هوش مصنوعی بهره‌مند خواهند شد و توانایی دست‌کاری ژنتیکی را پیدا خواهند کرد؛ به‌طوری‌که می‌توان با استفاده از آن‌ها نوع خاصی از DNA را هدف قرار داد و جمعیت‌های مدنظر را بدون آسیب رساندن به جوامع دیگر از بین برد [۴۷]. محققان با لحنی نگران‌کننده در مورد سلاح‌های بیولوژیک پیشرفته می‌گویند: "فناوری روزبه‌روز پیچیده‌تر و ارزان‌تر شده و امکان آسیب‌رسانی سریع‌تر و خطرناک‌تر را فراهم کرده است. به‌وسیله سلاح‌های بیولوژیک آینده می‌توان برخی نژادها را بر اساس اطلاعات ژنتیکی آن‌ها هدف قرار داد." آن‌ها هشدار می‌دهند که هوش مصنوعی می‌تواند در آینده به سلاح بسیار آسیب‌زننده و غیرقابل‌مهار تبدیل شود [۴۷،۴۸].

۶. پیشتازان کوانتومی

بریتانیا، اتحادیه اروپا و ایالات‌متحده در سال‌های اخیر برنامه‌هایی را برای ایفای نقش رهبری در مسابقه جهانی علم و فناوری کوانتومی دنبال کرده‌اند (شکل ۲). اروپا در حال تلاش برای توسعه اینترنت کوانتومی است. در حال حاضر کاربرد نظامی چنین سیستمی دشوار است، اما برخی از آژانس‌های دفاعی در حال تلاش برای توسعه این شکل جدید از اینترنت با این دیدگاه هستند که چنین سیستمی غیرقابل هک خواهد بود، قطعاً به‌عنوان یک سرمایه نظامی در آینده ظاهر خواهد شد [۴۷-۵۰]. دفتر تحقیقات ارتش ایالات‌متحده تحقیقات گسترده‌ای را درزمینهٔ انفورماتیک کوانتومی دنبال می‌کند. نیروی هوایی ایالات‌متحده فناوری کوانتومی را به‌عنوان یک تغییردهنده بازی درزمینهٔ اطلاعات و جنگ فضایی می‌داند. از سوی دیگر، برنامه ملی کوانتومی چین تا سال ۲۰۲۰ محرمانه بود. چین در دهه دوم به‌طور مشخص پیشتاز کوانتومی شد. چین با کمک اتریش یک ماهواره کوانتومی در سال ۲۰۱۶ پرتاب کرد. این ماهواره به نام Micius با موفقیت یک ارتباط

فوق‌العاده امن بین دو ایستگاه زمینی با فاصله بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر، برقرار کرد. چین در حوزه ارتباطات کوانتومی پیشرفت قابل‌توجهی داشته است و در آینده انتظار می‌رود، نیروهای دفاعی آن‌ها تا حد زیادی از چنین نوآوری‌هایی سود ببرند [۵۱]. در اواخر سال ۲۰۲۱، گزارشی از دانشگاه هاروارد اعلام کرد که چین در محاسبات کوانتومی، ارتباطات کوانتومی و سنجش کوانتومی در حال عقب‌نشینی است و در برخی موارد قبلاً از آمریکا پیشی گرفته است. روسیه و استرالیا نیز در حال سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کوانتومی هستند. در سرمایه‌گذاری‌های آن‌ها، تأکید نظامی به‌آرامی برجسته‌تر می‌شود. اسرائیل از حدود سال ۲۰۱۸ شروع به تمرکز بر حوزه فناوری کوانتومی کرده است. آژانس‌های آن‌ها مانند TELEM (مرکز ملی تحقیق و توسعه) و MAFAT (وزارت دفاع) اغلب در انجام تحقیقات در زیرشاخه‌های مختلف علوم کوانتومی مشارکت دارند. در ابتدا کل سرمایه‌گذاری آن‌ها حدود ۲۷ میلیون دلار بود، اما در عرض دو سال، آن‌ها یک برنامه پنج‌ساله حدود ۳۶۲ میلیون دلاری را به مرحله اجرا گذاشتند. در اوایل سال ۲۰۲۲، مقامات تحقیق و توسعه تسلیحات و نوآوری اسرائیل احتمال شرکت در اولین مناقصه ساخت یک رایانه کوانتومی را به‌عنوان بخشی از پروژه عظیمی که قصد دارد به اسرائیل «قابلیت‌های استراتژیک» بدهد، نشان داده‌اند. این یک پروژه ۶۱٫۹ میلیون دلاری خواهد بود که توسط سازمان نوآوری اسرائیل، سازمان تحقیقات تسلیحات و زیرساخت‌های فناوری با کمک صنعت اجرا می‌شود. همچنین کانادا در زمینه فناوری کوانتومی به‌ویژه در دانشگاه واترلو، پیشرو در جهان است [۵۰-۵۲]. آن‌قدر استارت‌آپ‌های کوانتومی در اطراف واترلو توسعه یافته‌اند که این منطقه به دره کوانتومی معروف است و یک صندوق سرمایه‌گذاری خطرپذیر مرتبط، با نام سرمایه‌گذاری دره کوانتومی اختصاص داده شده است.



شکل ۲. پیشتازان کوانتومی در جهان

۷. نتیجه‌گیری

فناوری کوانتومی، یک فناوری ضروری در آینده است که تأثیر قابل‌توجهی بر بخش دفاع و امنیت ملی دارد. با توجه به مزایای مختلف فناوری کوانتومی، توسعه و مطالعه عمیق‌تر آن از سوی یک کشور برای بهبود دفاع و امنیت ملی خود در آینده بسیار مهم است. فناوری‌های کوانتومی با کاربردهای نظامی این پتانسیل را دارند که قابلیت‌های کنونی را تقویت کنند. بااین‌حال، ازآنجاکه فناوری کوانتومی هنوز در مراحل ابتدایی خود است، چالش‌های کاربرد عملی آن باید برطرف شود. می‌توان انتظار داشت که فناوری‌های کوانتومی اثرات راهبردی و بلندمدتی داشته باشند. باوجوداین، احتمال غافلگیری‌های تکنولوژیکی بر نیروهای نظامی و دفاعی وجود دارد. بحث در مورد فناوری کوانتومی و کاربرد آن در امور نظامی باید ادامه یابد و به‌دقت تأثیر آن را بر امنیت ملی در نظر گرفت. البته بعید است فناوری کوانتومی تا سال ۲۰۳۰ سیاست امنیتی را متحول کند. حداقل این چیزی است که نظرسنجی‌های کارشناسان انجام‌شده در سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بر اساس این بررسی‌ها، تعداد زیادی فناوری‌های نوظهور و مخرب دیگر وجود دارند که در حال حاضر ازنظر استراتژی نظامی بسیار دست‌یافتنی‌تر از فناوری‌های کوانتومی هستند. علی‌رغم این واقعیت که فناوری‌های کوانتومی فقط

سلاح‌های جدیدی تولید نمی‌کنند، پیشرفت آن‌ها در فناوری نظامی کنونی، چنین قابلیت‌هایی را تشدید می‌کند و زمان حمله، هشدار و تصمیم‌گیری را کوتاه می‌کند. بهترین راه برای جلوگیری از غافلگیری، پرورش دانش فناوری کوانتومی، نظارت بر توسعه و اشتغال فناوری کوانتومی است. داشتن دانش و آگاهی دقیق از فناوری کوانتومی، نقش بیمه کوانتومی را ایفا می‌کند. در پایان، با توجه به پیشرفت‌هایی که در تحقیقات فناوری کوانتومی در چند سال اخیر صورت گرفته است، منطقی است که نسبت به کاربردهای نظامی فناوری کوانتومی در آینده هوشیار باشیم.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی دانشگاه خلیج‌فارس انجام شده است، به این وسیله از همه کسانی که در انجام دادن این تحقیق ما را یاری کردند؛ کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

[1] Zettili N. Quantum mechanics: concepts and applications. American Association of Physics Teachers; 2003.

[2] Böhm A. Quantum mechanics: foundations and applications: Springer Science & Business Media; 2013.

[3] Paris MG. The modern tools of quantum mechanics. The European Physical Journal Special Topics. 2012;203(1):61-86.

[4] Yariv A. An introduction to theory and applications of quantum mechanics: Courier Corporation; 2013.

[5] Andås HE. Emerging technology trends for defence and security. 2020.

[6] Inglesant P, Jirotka M, Hartswood M. Responsible Innovation in Quantum Technologies applied to Defence and National Security. NQIT (Networked Quantum Information Technologies). 2018.

[7] Ahmed SA, Mohsin M, Ali SMZ. Survey and technological analysis of laser and its defense applications. Defence Technology. 2021;17(2):583-92.

[8] Castelvecchi D. Quantum computers ready to leap out of the lab in 2017. Nature. 2017;541(7635).

[9] Dong D, Petersen IR. Quantum control theory and applications: a survey. IET control theory & applications. 2010;4(12):2651-71.

[10] Dowling JP, Milburn GJ. Quantum technology: the second quantum revolution. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2003;361(1809):1655-74.

[11] Gambetta J. IBM's roadmap for scaling quantum technology. 2020.

[12] Adesso G, Bromley TR, Cianciaruso M. Measures and applications of quantum correlations. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 2016;49(47):473001.

[13] Neumann NM, van Heesch MP, Phillipson F, Smallegange AA, editors. Quantum Computing for Military Applications. 2021 International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS); 2021: IEEE.

[14] Kauffman L, Lomonaco SJ. Mathematics of quantum computation and quantum technology: CRC Press; 2007.

[15] Barad K. Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning: duke university Press; 2007.

[16] Park JL. The concept of transition in quantum mechanics. Foundations of physics. 1970;1(1):23-33.

[17] Steane A. Quantum computing. Reports on Progress in Physics. 1998;61(2):117.

[18] Arute F, Arya K, Babbush R, Bacon D, Bardin JC, Barends R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature. 2019;574(7779):505-10.

[19] Finke D. Google Goal: Build an Error Corrected Computer with 1 Million Physical Qubits by the End of the Decade. Quantum Computing report. 2020.

[20] Krelina M. Quantum technology for military applications. EPJ Quantum Technology. 2021;8(1):24.

[21] Pirandola S, Andersen UL, Banchi L, Berta M, Bunandar D, Colbeck R, et al. Advances in quantum cryptography. Advances in optics and photonics. 2020;12(4):1012-236.

[22] Sergienko AV. Quantum communications and cryptography: CRC press; 2018.

[23] Degen CL, Reinhard F, Cappellaro P. Quantum sensing. Reviews of modern physics. 2017;89(3):035002.

[24] Pirandola S, Bardhan BR, Gehring T, Weedbrook C, Lloyd S. Advances in photonic quantum sensing. Nature Photonics. 2018;12(12):724-33.

[25] Mehrabi M, Zahedifar M, Hasanloo S, Nikmanesh H, Gheisari R, Li Y. Preparation and characterization of Li2B4O7 nanoparticles co-doped with Mg and Cu for thermoluminescence dosimetry of gamma-rays. Radiation Physics and Chemistry. 2022;194:110057.

[26] Knight P, Walmsley I. UK national quantum technology programme. Quantum Science and Technology. 2019;4(4):040502.

[27] Smith III FL. Quantum technology hype and national security. Security dialogue. 2020;51(5):499-516.

[28] Wallden P, Kashefi E. Cyber security in the quantum era. Communications of the ACM. 2019;62(4):120.

[29] Yepez J. Type-II quantum computers. International Journal of Modern Physics C. 2001;12(09):1273-84.

[30] Kuplic BS. The Weaponization of Outer Space: Preventing an Extraterrestrial Arms Race. NCJ Int'l L & Com Reg. 2013;39:1123.

[31] Kaltenbaek R, Acin A, Bacsardi L, Bianco P, Bouyer P, Diamanti E, et al. Quantum technologies in space. Experimental Astronomy. 2021;51(3):1677-94.

[32] Lanzagorta M, Uhlmann J, editors. Space-based quantum sensing for low-power detection of small targets. Radar Sensor Technology XIX; and Active and Passive Signatures VI; 2015: SPIE.

[33] Lanzagorta M. Underwater Communications (Synthesis Lectures on Communications), Morgan and Claypool Publishers, San Rafael, California (USA), 129. 2012.

[34] Ningsih SJ, Wadjdi AF, Budiyanto S. The Importance of Quantum Technology in National Defense in the Future.

[35] Proctor TJ, Knott PA, Dunningham JA. Multiparameter estimation in networked quantum sensors. Physical review letters. 2018;120(8):080501.

[36] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum-enhanced positioning and clock synchronization. Nature. 2001;412(6845):417-9.

[37] Fernández E, Calero D, Parés ME. CSAC characterization and its impact on GNSS clock augmentation performance. Sensors. 2017;17(2):370.

[38] Daum F. Quantum radar cost and practical issues. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020;35(11):8-20.

[39] Johnson J. Artificial intelligence & future warfare: implications for international security. Defense & Security Analysis. 2019;35(2):147-69.

[40] Supek S, Aine CJ. Magnetoencephalography: Springer; 2016.

[41] Emani PS, Warrell J, Anticevic A, Bekiranov S, Gandal M, McConnell MJ, et al. Quantum computing at the frontiers of biological sciences. Nature Methods. 2021;18(7):701-9.

[42] Chen X, Guo D, Choa F-S, Wang C-C, Trivedi S, Fan J, editors. Quantum cascade laser based standoff photoacoustic detection of explosives using ultra-sensitive microphone and sound reflector. Quantum Sensing and Nanophotonic Devices X; 2013: SPIE.

[43] Jawhar I, Mohamed N, editors. A hierarchical and topological classification of linear sensor networks. 2009 Wireless Telecommunications Symposium; 2009: IEEE.

[44] Nikmanesh H, Moradi M, Bordbar GH, Alam RS. Synthesis of multi-walled carbon nanotube/doped barium hexaferrite nanocomposites: An investigation of structural, magnetic and microwave absorption properties. Ceramics International. 2016;42(13):14342-9.

[45] Nikmanesh H, Hoghoghifard S, Hadi-Sichani B, Moradi M. Erbium-chromium substituted strontium hexaferrite particles: Characterization of the physical and Ku-band microwave absorption properties. Materials Science and Engineering: B. 2020;262:114796.

[46] Devi A. Introduction To Wireless Sensor Network and its Applications. International Journal of Engineering, Science and Mathematics. 2018;7(2):404-12.

[47] Chin W. Technology, war and the state: past, present and future. International Affairs. 2019;95(4):765-83.

[48] O'Hanlon M. Forecasting Change in Military Technology. 2020; 2018.

[49] Altmann J. New military technologies: dangers for international security and peace. S&F Sicherheit und Frieden. 2020;38(1):36-42.

[50] Venegas-Gomez A. The Quantum Ecosystem and Its Future Workforce: A journey through the funding, the hype, the opportunities, and the risks related to the emerging field of quantum technologies. PhotonicsViews. 2020;17(6):34-8.

[51] Biever C. China’s quantum space pioneer: we need to explore the unknown. Nature. 2016.

[52] Seskir ZC, Migdał P, Weidner C, Anupam A, Case N, Davis N, et al. Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education. Optical Engineering. 2022;61(8):081809.

پی نوشت

1. Quantum Key Distribution (QKD)