فصلنامه علمی آماد و فناوری دفاعی، سال ششم، شماره هجدهم، تابستان ۱۴۰۲

چیستی و چرایی تله پورتیشن کوانتومی در جمهوری اسلامی ایران

طیب گلعنبری[۱]، سید نصیب‌اله دوستی‌مطلق[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۰ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۲/۰۵

چکیده

مخابرات کوانتومی شیوه‌ای از ارسال و دریافت اطلاعات است که در آن از پرتوهای نوری دربردارنده فوتون‌های درهم‌تنیده استفاده می‌شود[۳]. یکی از مهم‌ترین شاخه‌های مخابرات کوانتومی، تله پورتیشن کوانتومی است که در سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری از محققان قرارگرفته است. تله پورتیشن کوانتومی به ارسال اطلاعات به‌صورت محرمانه می‌پردازد. به‌طوری‌که ارسال اطلاعات به کمک یک کانال کوانتومی بین فرستنده و گیرنده (کاربرها) صورت می‌پذیرد. در ارسال اطلاعات محرمانه بین کاربرها در پروتکل‌های تله پورتیشن کوانتومی، تعداد کیو بیت‌های بکار گرفته‌شده در طراحی پروتکل و تعداد کیو بیت‌های ارسال‌شده حائز اهمیت است. درواقع هر چه بازده پروتکل کوانتومی بالاتر و پیاده‌سازی آن ساده‌تر باشد، پروتکل بهینه‌تر خواهد بود. در این مقاله با استفاده از کانال‌های کوانتومی ۸ و ۹ کیو بیتی یک پروتکل تله پورتیشن کوانتومی پیشنهاد و به‌منظور میزان بازده و بهینه بودن با پروتکل‌های ارائه‌شده قبلی مقایسه شده است.

سپس بر اساس نظر نخبگان و خبرگان این زمینه، به بررسی راهبردهایی برای جمهوری اسلامی ایران پرداخته‌شده و درنهایت «تدوین برنامه جامع جهت پیشبرد اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی» و «ایجاد زمینه همکاری نخبگان و خبرگان و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات کشورهای پیشرو»، به‌عنوان ۲ راهبرد در اولویت، برای جمهوری اسلامی ایران معرفی‌شده است.

کلیدواژه‌ها: فناوری کوانتومی، ارتباطات کوانتومی، مخابرات کوانتومی، تله پورتیشن کوانتومی، راهبردهای ارتباطات کوانتومی

[۱] پژوهشگر، دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، پژوهشکده آماد و فناوری‌های دفاعی، گروه علوم وفناوری های دفاعی t_golanbari@uok.ac.ir

[۲] استادیار، دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، پژوهشکده آماد و فناوری‌های دفاعی، گروه سایبر الکترونیک Doustimotlagh@chmail.ir

[۳] به طوری که اندازه‌گیری یک فوتون در یک پرتو، بر اندازه‌گیری‌های زوج فوتون درهم‌تنیده آن در پرتو دیگر تأثیر دارد..

مقدمه

فناوری‌های کوانتومی با بهره‌گیری از ویژگی‌های ذاتی مکانیک کوانتومی مانند ذرات در حالت زمینه حرکتی[1]، ویژگی موجی ذرات، برهم‌نهی‌های همدوس[2] و همبستگی‌های غیر کلاسیک[3]، توانایی طراحی و ارائه پروتکل‌های ارتباطات کوانتومی را فراهم آورده‌اند.

فناوری‌های کوانتومی پس از حدود ٤٠ سال فعالیت و پیشرفت به‌صورت نظری اخیراً در آستانه حرکت به‌سوی عملی نمودن و کاربردی کردن در عرصه‌های مختلف اقتصادی، نظامی و سیاسی هستند. کشورهای زیادی علاقه خود را در گسترش کامل پارادایم‌های فناوری کوانتومی نشان دادند چنانکه از میان آن‌ها کشورهای پیشرو در زمینه فناوری‌های کوانتومی سرمایه‌گذاری‌های بسیاری در این زمینه داشته‌اند و چشم‌اندازهای وسیعی را در این حوزه در نظر گرفته و پیگیری می‌نمایند.

مخابرات کوانتومی شیوه‌ای از ارسال و دریافت اطلاعات است که در آن پرتوهای نوری دربردارنده فوتون‌های درهم‌تنیده هستند، به‌طوری‌که صرف‌نظر از فاصله، اندازه‌گیری فوتونی در یک پرتو، بر اندازه‌گیری‌های زوج فوتون درهم‌تنیده آن در پرتو دیگر تأثیر می‌گذارد. اطلاعاتی که باید ارسال شوند، روی فوتون‌هایی سوار می‌شوند که می‌توانند هم در فضای آزاد و هم از طریق فیبرهای نوری کم تلف ارسال شوند. اطلاعات را می‌توان روی سیستم‌های کوانتومی نظیر اتم‌ها، فوتون‌ها و ... ذخیره و پردازش کرد. پردازش اطلاعات کوانتومی با پردازش اطلاعات کلاسیک متفاوت است، زیرا در حالت کوانتومی باید همدوسی کوانتومی در ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات حفظ شود [۱].

در تمامی روش‌های کلاسیک ارسال اطلاعات، ایمنی کامل به‌صورت نظری اثبات نشده است و تمامی روش‌های موجود ارسال و دریافت اطلاعات قابل‌نفوذ است به‌طوری‌که با استفاده از روش‌های مناسب می‌توان به اطلاعات ارسالی دست پیدا کرد. پرواضح است که یکی از چالش‌های معمول در شبکه‌های مخابرات بی‌سیم، شنود شدن سیگنال‌های پخش‌شده از ایستگاه‌های رادیویی توسط استراق‌سمع‌کننده‌ها است [۲]؛ بنابراین تلاش برای پیدا کردن روش‌های نوین و امن ارسال و پردازش اطلاعات با استفاده از نظریه اطلاعات کوانتومی منجر به ظهور مخابرات کوانتومی شد که شامل دو بخش مهم رمزنگاری کوانتومی و تله پورتیشن کوانتومی (تله پورتیشن کوانتومی[4]) است

[1] Motional ground state
[2] Coherent superposition
[3] Non-classical correlations
[4] Quantum teleportation

[۳]. در این شیوه جدید ارسال و پردازش اطلاعات دارای امنیت کامل است. رمزنگاری کوانتومی یکی از موفقیت‌های شگرف دانش اطلاعات و محاسبات کوانتومی است که ارتباط بین کاربران را در ابعاد کوانتومی ایمن می‌سازد. درواقع، رمزنگاری کوانتومی به کمک قوانین مکانیک کوانتوم، تبادل اطلاعات محرمانه بین کاربرها را فراهم می‌آورد، به‌گونه‌ای که استراق سمع کننده نتواند به اطلاعات دسترسی داشته باشد.

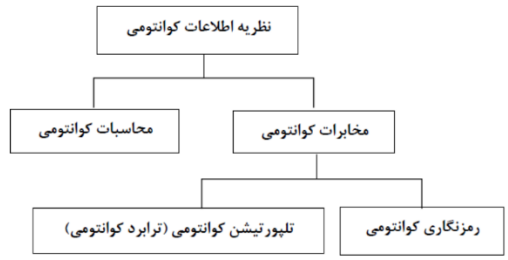
تله پورتیشن کوانتومی فرایندی است که به‌وسیله آن اطلاعات کوانتومی را می‌توان از یک محل به محل دیگر با کمک ارتباطات کلاسیک و حصار کوانتومی مشترک بین محل فرستنده و گیرنده، انتقال داد. تله پورتیشن کوانتومی شیوه‌ای جدید را برای ایجاد ارتباط امن بین فرستنده و گیرنده فراهم می‌کند که دیگر احتیاجی به رمزنگاری وجود ندارد. در این شیوه ارتباط به کمک زوج‌های EPR و تک فوتون‌ها صورت می‌گیرد؛ که با استفاده از قوانین و خصوصیات حاکم برسیستم‌های کوانتومی راهکاری ایمن برای ارسال اطلاعات فراهم می‌شود و حامل‌های اطلاعات انتقال پیدا نمی‌کنند لذا هیچ استراق سمع کننده‌ای نمی‌تواند از پیام ارسالی آگاه شود [۱].

امروزه محرمانه بودن اطلاعات هم در بحث ذخیره‌سازی و هم در مورد ارسال امن و بی‌نقص آن، یکی از نیازهای گریزناپذیر در انواع زمینه به‌ویژه زمینه‌های سیاسی، اقتصادی و نظامی است. در این راستا مخابرات، اینترنت، رایانه و ماهواره‌های کوانتومی که امن‌ترین راه ارتباط، ارسال و ذخیره اطلاعات می‌توانند باشند جزو اولویت‌های تحقیقاتی دنیا است و کشورهای دارای فناوری‌های پیشرفته و همچنین دانشگاه‌های مختلف دنیا بر روی فناوری انتقال اطلاعات به روش کوانتومی بودجه‌های زیادی را در نظر گرفته و در حال تحقیق عملی این موضوع هستند؛ زیرا که این ارتباط قدم مهمی در راستای اطمینان حاصل کردن از امنیت و محرمانه بودن ارتباطات و قراردادهای دولتی است.

عصری که در آن به سر می‌بریم عصر اطلاعات و ارتباطات است و انسان امروزی نیاز روزافزونی به‌سرعت و دقت در تولید، ذخیره‌سازی، انتقال و بازیابی اطلاعات در شبکه‌های ارتباطی دارد؛ که ازجمله آن‌ها می‌توان به شبکه رایانه‌ها، اینترنت و مخابرات اشاره کرد که ارسال داده‌ها با سرعت و امنیت بالا دارای اهمیت فراوانی است. ارسال اطلاعات محرمانه و ارسالی پیام به‌صورت امن و غیرقابل‌دسترس برای نامحرمان، از دیرباز فکر آدمی را به خود مشغول کرده است. به‌طوری‌که بعد از

پیدایش تمدن بشری و اختراع خط و الفبا، جابجا کردن حروف پیام بانظمی خاص و یا استفاده از حروف الفبا به‌جای یکدیگر یک توافق بین طرفین ارتباط، به‌عنوان روش‌های اولیه برای حفظ پنهان اطلاعات بکار برده می‌شد.

اما تمامی روش‌های کلاسیک ارسال اطلاعات، قابل‌نفوذ است به‌طوری‌که با استفاده از روش‌های مناسب می‌توان به اطلاعات ارسالی دست پیدا کرد؛ بنابراین تلاش برای پیدا کردن روش‌های نوین و امن ارسال و پردازش اطلاعات با استفاده از نظریه اطلاعات کوانتومی برای اولین بار در سال ۱۹۸٤ با ارائه اولین پروتکل رمزنگاری کوانتومی و در سال ۱۹۹۳ با ارائه تله پورتیشن کوانتومی [٤] آغاز شد. امروزه این دو روش جدید پایه‌های نوع جدید و کاملاً امنی از مخابرات موسوم به مخابرات کوانتومی را تشکیل می‌دهند. بر این اساس پایه‌های مخابرات کوانتومی یعنی رمزنگاری کوانتومی و تله پورتیشن کوانتومی شکل‌گرفته و موردمطالعه جدی قرار گرفتند. بی‌شک مکانیک کوانتومی در پیشبرد اهداف بشر امروز نقش بی‌بدیلی را به خود اختصاص داده است. مکانیک کوانتومی می‌تواند از راه‌های مختلف در ذخیره و انتقال اطلاعات مورداستفاده قرار گیرد. بنابراین با تلاش دانشمندان از علم مکانیک کوانتومی، نظریه اطلاعات کوانتومی استخراج‌شده است؛ که شاخه‌های مخابرات کوانتومی و محاسبات کوانتومی را از این نظریه گرفته‌اند. بر اساس این مطالب نموداری از نظریه اطلاعات کوانتومی را می‌توان به‌صورت زیر ترسیم کرد [۱].



شکل (۱). درخت نظریه اطلاعات کوانتومی

علم اطلاعات و محاسبات کوانتومی شاخه جدید بین‌رشته‌ای است که با علم کامپیوتر، علم اطلاعات کلاسیک و مکانیک کوانتومی در ارتباط است. به‌کارگیری اطلاعات و محاسبات کوانتومی به ما نحوه تفکر فیزیکی به موضوع محاسبات و ارتباطات را می‌آموزد.

در سال ۱۹٦۵، جی مور [۳] از بنیان‌گذاران شرکت اینتل به‌صورت تجربی بیان کرد که قدرت رایانه‌ها هر ۱۸ ماه به‌طور تقریبی دو برابر می‌شود و طبق این گفته در سال ۲۰۲۰، اندازه ترانزیستورها

روی تراشه‌های سیلیکونی به‌اندازه یک اتم خواهد رسید [٤]. چالشی که در آن زمان مطرح خواهد بود این است که رفتار حاکم بر اتم‌ها قوانین مکانیک کوانتومی است و محاسبات کلاسیکی دیگر پاسخگوی رفتار کوانتومی ذرات نخواهد بود، چراکه در حدود ابعاد نانومتری اثرات کوانتومی بروز می‌کنند [٥]. مطالعه نظریه اطلاعات و محاسبات کوانتومی [٦] می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی برای این امر در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که ایده اصلی ساخت رایانه‌هایی بر مبنای قوانین مکانیک کوانتومی را ر. فاینمن در سال ۱۹۸۱ مطرح کرد [۷].

در حال حاضر فنّاوری‌های روز دنیا در رابطه با ارسال امن اطلاعات به روش کوانتومی در حال آزمایش و توسعه می‌باشند به صورتی که اولین ارتباط کوانتومی بین‌قاره‌ای، بین دو فیزیکدان از چین و اتریش با استفاده از این فناوری بر روی ماهواره انجام شد. درگذشته به دلیل مشکلات فنی، مکالمات با استفاده از این فناوری به مسافت‌های کوتاه محدود بودند؛ اما با فناوری جدید استفاده‌شده بر روی ماهواره مخابراتی کوانتومی چین که برای دولت‌ها و بانک‌ها بسیار ارزشمند است، این مشکل برطرف شده است. ماهواره‌های کوانتومی به‌جای استفاده از روش‌های معمول کدگذاری داده‌ها، از قوانین فیزیک کوانتوم بهره می‌گیرند که رمزگشایی این داده‌ها تنها از طریق ایستگاه‌های زمینی مجاز، امکان‌پذیر است [۸].

به‌طورکلی، می‌توان هر نظریه فیزیکی را به‌عنوان پایه‌ای برای ۱ یک نظریه پردازش اطلاعات به کاربرد. هدف محاسبات کوانتومی، یافتن روش‌هایی برای طراحی ادوات شناخته‌شده‌ای مانند گیت‌ها و ترانزیستورها به صورتی است که بتواند تحت اثرات کوانتومی در محدوده ابعاد زیر اتمی و کوچک‌تر کار کنند. در این راستا نیاز است به دو حوزه اصلی ارتباطات کوانتومی اشاره‌کنیم.

رمزنگاری کوانتومی یکی از موفقیت‌های شگرف دانش اطلاعات و محاسبات کوانتومی است که ارتباط بین کاربران را در ابعاد کوانتومی ایمن می‌سازد. درواقع، رمزنگاری کوانتومی به کمک قوانین مکانیک کوانتوم، تبادل اطلاعات محرمانه بین کاربران را فراهم می‌آورد، به‌گونه‌ای که استراق سمع کننده نتواند به اطلاعات دسترسی داشته باشد.

مفهوم رمزنگاری کوانتومی اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط وسنر مطرح شد. رمزنگاری دو بخش اساسی کدگذاری و کد برداری را شامل می‌شود. در رمزنگاری کوانتومی، امنیت مطلق انتقال داده با توجه به مفاهیم مکانیک کوانتومی تضمین می‌شود، درحالی‌که در حوزه کلاسیک این امر محقق نمی‌شود.

یکی از روش‌های بالا بردن امنیت کوانتومی استفاده هم‌زمان از هر دو کانال کلاسیک و کوانتومی

است. یکی از روش‌هایی که هر دو حوزه کلاسیک و کوانتومی در آن دخیل است، تله پورتیشن کوانتومی نام دارد. به انتقال ذرات اطلاعات کامپیوتری (کیو بیت‌ها) تله پورتیشن کوانتومی گویند. در حقیقت تله پورتیشن کوانتومی اطلاعات را به کیو بیت تبدیل و سپس منتقل می‌کند. در تله پورتیشن یک حالت کوانتومی نامعلوم (مجهول) با کمک دو پارامتر در هم تنیدگی کوانتومی یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در نظریه اطلاعات کوانتومی است که به نوع خود منحصربه‌فرد بوده و همانند آن در فضای کلاسیک وجود ندارد.

در سال ۱۹۹۳، بنت و همکاران اولین پروتکل تله پورتیشن را با استفاده از حالت‌های بل پیشنهاد کردند [۹]. در دومین قدم تنها محققان با تغییر حالت ورودی این پروتکل توانستند پروتکل‌های جدیدی را ابداع کنند. در سال ۱۹۹۸، کارلسون و همکاران اولین طرح تله پورتیشن کنترلی را با استفاده از حالت EPR پیشنهاد کرد [۱۰]. حضور فرد سومی به‌عنوان کنترل‌کننده و ناظر، خود نوید پیدایش پروتکل‌های بیشتری در زمینه تله پورتیشن بود. همچنین تله پورتیشن کوانتومی ۲ طرفه و تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه کنترلی از شاخه‌های دیگر تله پورتیشن هستند که توجه زیادی را به خود جلب کردند.

روش تحقیق

تحقیق پیش رو از نوع بنیادی-کاربردی است، زیرا به مطالعه و بررسی انواع روش‌های ارتباطات کوانتومی با تأکید بر تله پورتیشن کوانتومی راه‌اندازی شده در دنیا و اصول و روابط ریاضی حاکم بر آن پرداخته می‌شود. همچنین در پی یافتن مفیدترین روش اجرایی تله پورتیشن کوانتومی مطرح‌شده در دنیا است. در پایان به دنبال راهبردهای رسیدن به فناوری ارتباطات کوانتومی برای جمهوری اسلامی ایران است.

روش تحقیق از نوع توصیفی-تحلیلی است و همچنین پارادایم تحقیق از نوع اثباتگرایی-انتقادی با رویکرد ترکیبی از کیفی و کمی است. روش گردآوری اطلاعات و داده‌ها به دو صورت انجام‌گرفته شده است؛

- اسناد، مدارک، مطالعات مقالات و کتاب‌های حوزه مرتبط
- نظرسنجی و مصاحبه با خبرگان و نخبگان.

ابتدا به موضوع تله پورتیشن کوانتومی، کارهای مرتبط و سیر تحولی موضوع پرداخته خواهد شد و سپس به مسئله اصلی مقاله یعنی ارتباطات کوانتومی با تأکید بر یک پروتکل پیشنهادی تله پورتیشن

کوانتومی و راهبردهای ارتباطات کوانتومی برای جمهوری اسلامی ایران پرداخته می‌شود.

تله پورتیشن کوانتومی

مفهوم تله پورتیشن از راه دور می‌تواند بسیار متفاوت باشد. بسته به متن آن، به‌طور کلی‌تر، تله پورتیشن تعریف می‌شود به‌عنوان انتقال یک موضوع با محو کردن آن از یک نقطه در فضا و دوباره ظاهر کردن آن در ناحیه‌ای دیگر. بااین‌حال، تله پورتیشن یک سیستم همچنین می‌تواند به معنی انتقال در فضای اطلاعات باشد که همه ویژگی‌هایش را به‌طور کامل مشخص می‌کند. با این اطلاعات، سپس امکان‌پذیر است که یک کپی از موضوع اصلی را در یک ناحیه متفاوت تعمیم داد. در این موضوع، نیاز نیست اجزای اصلی موضوع را انتقال داد، فقط یک کپی حقیقی از اصل کفایت می‌کند. این تعریف است که تله پورتیشن کوانتومی را مشخص می‌سازد. سیستم‌های کلاسیکی می‌توانند به‌طور کامل با اندازه‌گیری کردن تمام ویژگی‌های مربوط به آن تعریف شوند. یک مثال رایج یک ماشین فاکس است که اطلاعات یک پرونده از یک مکان به مکان دیگر منتقل می‌شود، اگرچه پرونده اصلی در دستان فرستنده باقی می‌ماند. در محدوده علم کوانتوم اطلاعات توسط وضعیت‌های اجزای سیستم مانند اتم‌ها و یا فوتون‌ها داده می‌شوند.

اگرچه، این وضعیت‌ها نمی‌توانند به‌طور کامل با اندازه‌گیری تعریف شوند، زیرا یک اندازه‌گیری از متغیر فیزیکی A سبب خواهد شد که وضعیت به یکی از ویژه‌حالت‌های عملگر A مربوط به همان مقدار فیزیکی رمبش کند؛ بنابراین، آیا امکان‌پذیر است برای علم کوانتوم که یک حالت کوانتومی از یک‌ذره را به دیگری انتقال دهد؟

در ۱۹۹۳، بنت [۹]، ابتدا نشان داد که امکان‌پذیر است، در یک سیستم حالتی را تهیه کرد که هیچ اطلاعاتی درباره آن حالت در مسیر حرکت منتقل شود، به‌جز اندازه‌گیری روی سیستم که منتقل می‌شود. ویژگی نامکان بودن سیستم‌های کوانتومی، کلیدی است که تله پورتیشن کوانتومی را پایدار می‌کند. وجود همبستگی غیر مکانی بین جفت ذره‌ها، معروف به جفت‌های اینشتین- پودولسکی- روسن، یا جفت‌های EPR حالت‌های [۱۲]، انتقال اطلاعات را راحت می‌کند، یا با صراحت بیشتر، خاصیت مهم تله پورتیشن این است که انتقال یک حالت کوانتومی کامل از یک مکان به مکان دیگر توسط یک فرستنده که می‌داند نه حالت و نه موقعیت دریافت‌کننده منتقل نمی‌شوند. تفاوت اساسی دیگر بین تله پورتیشن کوانتومی و مثال کلاسیکی ذکرشده این است که در حالت کوانتومی حالت اصلی ویران می‌شود؛ بنابراین عدم نقض تئوری غیر کپی بودن را موجب می‌شود. اگرچه ما بحثمان

را به فوتون‌ها محدود می‌کنیم، لازم است ذکر کنیم که آزمایش‌های تله پورتیشن به‌طور موفقیت‌آمیزی برای کیو بیت‌های (بیت کوانتومی) اتمی به‌دست‌آمده است.

یک مشاهده‌گر را در نظر بگیرید، آلیس که یک سیستم کوانتومی a در یک حالت خاص $|\Phi\rangle_a$ دارد که برای او ناشناخته است. او می‌خواهد که همان سیستم را به یک گیرنده، باب، انتقال دهد، با ارسال کردن اطلاعات لازمی که به او اجازه می‌دهد که یک کپی دقیق از حالت اصلی سیستم بسازد. فرض می‌کنیم احتمال ندارد که به‌طور مستقیم سیستم کوانتومی را به باب بفرستیم، به دلیل زیان‌هایی در وابستگی کوانتومی در طی کانال‌های کوانتومی قابل‌دسترس بین آلیس و باب نیاز داریم که سیستم کوانتومی را تعریف کنیم. ساده‌ترین حالت یک‌ذره اسپین ۱/۲ است که به یک کیو بیت معروف است. این سیستم در یک فضای هیلبرت دوبعدی است که متغیرهای کوانتومی جدا از هم هستند. یک حالت عمومی و ناشناخته از همان سیستم می‌تواند به‌عنوان یک ترکیب خطی از دو حالت متعامد ممکن آن باشد.

$$|\phi\rangle_a = a|\uparrow\rangle_a + b|\downarrow\rangle_a \quad (۱)$$

که در آن شرط بهنجارش $|a|^2 + |b|^2 = 1$ رعایت می‌شود.

برای انتقال اطلاعات حالت کوانتومی لازم است یک سیستم کمکی مشترک توسط آلیس و باب را در نظر بگیریم. این سیستم وسیله‌ای است که با آن آلیس اطلاعات کوانتمی را برای باب ترسیم می‌کند، بدون خواندن یا حتی دانستن چیزی در مورد آن. سیستم کمکی یک سیستم مرکب است از بیش از یک‌ذره، در توافق با تعداد گیرنده‌ها. در حالت آلیس و باب یک سیستم کمکی دو ذره‌ای است، درحالی‌که برای تله پورتیشن چندمنظوره ذرات بیشتری حضور خواهند داشت. در ابتدا، حالت آن $|\chi\rangle$ شناخته می‌شود و این همان است که حالات کوانتومی از ذرات مرکبش در هم تابیده می‌شود. این مشخصه ویژه از حالت $|\chi\rangle$ اطمینان می‌دهد که هرجایی که سیستم کمکی با ذره با اسپین ۱/۲ برهمکنش می‌دهد در ایستگاه آلیس، یک برخورد در سهم باب از سیستم کمکی وجود دارد بنابراین، بعد از چنین برهمکنشی، سیستم کمکی به یک حالت ناشناخته $|\chi'\rangle$ برده می‌شود. درحالی‌که ذره a در یک حالت $|\Phi'\rangle_a$ است. باحالت $|\chi'\rangle$ و به کار بردن عملگرهای محلی، باب آنگاه می‌تواند کنش‌های اتخاذشده را برگرداند تا یک المثنی از حالت اصلی $|\Phi\rangle_a$ تهیه کند. به‌طور خلاصه، برای اینکه تله پورتیشن امکان‌پذیر باشد، حالت اولیه سیستم کمکی باید ویژگی‌های بسیار خاص داشته باشد که فقط در یک حالت پیچیده حاضر می‌شوند؛ بنابراین، لازم است قبل از اقدام کردن به تعریف

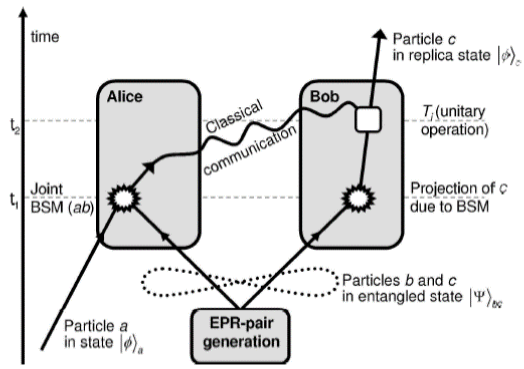
مراحل تله پورتیشن اهمیت پیچیدگی‌ها در سیستم‌های کوانتومی بحث شود. به‌طور خلاصه یکی از نتایج قابل‌توجه نظریه اطلاعات کوانتومی، تله پورتیشن (تله پورتیشن) کوانتومی است [۱۳]؛ که در آن یک حالت کوانتومی نامعلوم با کمک مفهوم درهم تنیدگی و اطلاعات کلاسیک از فرستنده به گیرنده ارسال می‌شود. در این مبحث، اطلاعات کلاسیک فرستنده پیام از طریق کانال کلاسیک ارسال می‌شود. درواقع، دو کانال ارتباطی (کانال کلاسیک و کانال کوانتومی) در تله پورتیشن کوانتومی مطرح است. همان‌طور که در بالا بیان شد بنت و همکاران [۱٤]، اولین پروتکل تله پورتیشن کوانتومی را در سال ۱۹۹۳ با استفاده از حالت‌های EPR پیشنهاد کردند. پس از ارائه اولین طرح در این زمینه، محققان با کمک حالت‌های EPR [۱۵]، GHZ [۱٦]، W [۱۷]، GHZ-like[۱۸] و حالت‌های خوشه‌ای [۱۹] پروتکل‌های زیادی را پیشنهاد کردند.

تله پورتیشن کوانتومی کنترلی[1](CQT) [۲۰]، تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه[2](BQT) [۲۱] و تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه کنترلی[3](CBQT) [۲۲] به‌عنوان شاخه‌هایی از تله پورتیشن کوانتومی در سال‌های اخیر توسط محققان مطرح شدند. ا. کارلسون[4] و همکارانش [۲۳] در سال ۱۹۹۸ اولین طرح تله پورتیشن کوانتومی کنترلی را با استفاده از حالت GHZ پیشنهاد کردند. در طرح ارائه‌شده از سوی آن‌ها، گیرنده تنها با اجازه کنترل‌کننده قادر به دریافت حالت ارسال‌شده است.

مراحل کار تله پورتیشن کوانتومی

در اینجا کار اولیه بنت و همکاران روی تله پورتیشن کوانتومی بیان می‌شود. مراحل کار شامل یک سیستم کوانتومی، ذره a که قرار است تله پورتیشن شود و یک جفت EPR، ذرات b و c است. در شکل زیر می‌توان دیده شود که جفت درهم‌تنیده توسط یک حلقه عرضی نمایش داده می‌شود (خط نقطه‌چین).

[1] Controlled Quantum Teleportation
[2] Bidirectional Quantum Teleportation
[3] Controlled Bidirectional Q. Teleportation
[4] A. Karlsson



شکل (۲). مراحل کار تله پورتیشن کوانتومی بنت و همکاران

یک سیستم کوانتومی مرکب اولیه متشکل از سه ذره که دوتای آن‌ها درهم‌تنیده شده‌اند. ذره a در یک حالت ناشناخته $|\Phi\rangle_a$ است در حالیکه جفت EPR در یکی از چهار حالت بل است. حالت سیستم به‌صورت گروهی می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$|\Psi\rangle_{abc} = |\phi\rangle_a \otimes |\Psi^-\rangle_{bc} = \frac{a}{\sqrt{2}}\left[|\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b|\downarrow\rangle_c - |\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b|\uparrow\rangle_c\right] + \frac{b}{\sqrt{2}}\left[|\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b|\downarrow\rangle_c - |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b|\uparrow\rangle_c\right] \quad (۲)$$

که در آن سیستم bc در حالت $|\Psi^-\rangle_{bc}$ است. ذره اولیه a در دست آلیس و یکی از ذرات EPR ذره b است درحالی‌که ذره EPR دیگر یعنی ذره c به باب داده می‌شود.

اگرچه این امکان وابستگی‌های غیر کلاسیکی بین آلیس و باب را می‌دهد، اما جفت EPR اطلاعاتی در مورد حالت ناشناخته $|\Phi\rangle_a$ ندارد. سیستم کلی ۱ محصول خالص است که ۹ وابستگی‌های کلاسیکی و ۹ درهم‌تنیدگی‌های کوانتومی بین‌ذره‌ای که منتقل می‌شود و جفت EPR را درگیر نمی‌کند (اما درهم‌تنیدگی بین b و c را دارد). هیچ اندازه‌گیری یکی یا ۲ تا از ذرات EPR نمی‌تواند به هیچ اطلاعاتی در مورد $|\Phi\rangle_a$ بینجامد. اگرچه، ۱ اندازه‌گیری سیستم مرکب ab، ۲ ذره در دست آلیس، نتایج بدیهی کمتری به ما می‌دهد.

مرحله بعدی، برای آلیس، جفت a و b است. در این عمل، آلیس می‌خواهد ۱ اندازه‌گیری کامل از گونه وون نئومان را روی سیستم الحاقی ab انجام دهد، در پایه عملگر بل $\left\{ \left|\Psi^-\right\rangle_{ab}, \left|\Psi^+\right\rangle_{ab}, \left|\Phi^-\right\rangle_{ab}, \left|\Phi^+\right\rangle_{ab} \right\}$ می‌تواند به‌آسانی دیده شود که این ٤ حالت ۱ پایه متعامد کامل برای سیستم ab هستند، بنابراین حالت داده‌شده می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود.

$$\begin{aligned}\left|\Psi\right\rangle_{abc} = &\frac{1}{2}\begin{bmatrix}\left|\Psi^-\right\rangle_{ab}\left(-a\left|\uparrow\right\rangle_c - b\left|\downarrow\right\rangle_c\right)\\ +\left|\Psi^+\right\rangle_{ab}\left(-a\left|\uparrow\right\rangle_c + b\left|\downarrow\right\rangle_c\right)\end{bmatrix}\\ &+\frac{1}{2}\begin{bmatrix}\left|\Phi^-\right\rangle_{ab}\left(a\left|\downarrow\right\rangle_c + b\left|\uparrow\right\rangle_c\right)\\ +\left|\Phi^-\right\rangle_{ab}\left(a\left|\downarrow\right\rangle_c - b\left|\uparrow\right\rangle_c\right)\end{bmatrix}\end{aligned} \quad (۳)$$

در این عبارت می‌توان دید که بدون توجه به حالت ناشناخته $\left|\Phi\right\rangle_a$ ٤ خروجی ممکن برای اندازه‌گیری آلیس به‌طور مساوی محتمل هستند و مهم‌تر از آن اندازه‌گیری ذره EPR باب یعنی c یکی از ٤ حالت خالص در معادله بالا را نتیجه می‌دهد. همه این حالت‌ها تبدیلات یونیتاری (واحد) از حالت $\left|\Phi\right\rangle_c = a\left|\uparrow\right\rangle_c + b\left|\downarrow\right\rangle_c$ هستند. این تبدیلات یونیتاری پایه ساده چرخش‌ها هستند.

$$\begin{aligned} T_1 &= -\mathrm{I} & T_2 &= \begin{pmatrix}-1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix} = -\sigma_z\\ T_{3=}&\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix} = \sigma_x & T_4 &= \begin{pmatrix}0 & -1\\ 1 & 0\end{pmatrix} = -i\,\sigma_y\end{aligned} \quad (۴)$$

سپس حالت سیستم abc می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود.

$$\left|\Psi\right\rangle_{abc} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\left|\Psi^-\right\rangle_{ab} T_1 + \left|\Psi^+\right\rangle_{ab} T_2\\ +\left|\Phi^-\right\rangle_{ab} T_3 + \left|\Phi^-\right\rangle_{ab} T_4\end{bmatrix} \quad (۵)$$

برای هر یک از خروجی‌های محتمل از اندازه‌گیری بل ذره EPR باب در یک روش ساده به حالت $\left|\Phi\right\rangle_a$ مرتبط می‌شود. تنها چیز باقیمانده برای اینکه تله پورتیشن کوانتومی کامل شود برای آلیس است که نتیجه اندازه‌گیری‌اش را به حالت کلاسیکی مرتبط سازد. با این دانش باب خواهد دانست که کدام تبدیل یونیتاری T_i را بایستی انجام دهد که نتیجه حالت ذره EPR, c را تبدیل کند به یک

نسخه از حالت اصلی آلیس $|\Phi\rangle_a$. همچنین امکان دارد فقط یکی از چهارحالت بل را تعیین و انتخاب کنیم؛ در این حالت تله پورتیشن به‌طور موفقیت‌آمیزی یکی خارج از چهار بار به دست می‌آید. در همه حالات انتقال حالت ذره a به‌وسیله دو کانال به دست می‌آید، یکی کوانتومی و دیگری کلاسیکی. هر کانال خودش حامل اطلاعات در مورد حالت اصلی $|\Phi\rangle_a$ نیست، کانال کوانتومی به‌تنهایی در یک حالت به‌طور کامل مخلوط شده است و کلاسیکی به‌تنهایی خودش بی‌ارزش است، زیرا نتایج اندازه‌گیری با احتمال برابر مستقل از $|\Phi\rangle_a$ رخ می‌دهند. به‌طور خلاصه، حالت ناشناخته ذره آلیس a با استفاده از یک جفت درهم‌تنیده مشترک به موقعیت باب منتقل می‌شود. مهم و قابل‌توجه است که حالت اصلی ذره a خراب می‌شود و متعاقباً نقضی بر تئوری غیر کپی بودن وجود ندارد

درک عملی تله پورتیشن

درک عملی از تله پورتیشن کوانتومی در بخش‌هایی از خصوصیات قطعی اندازه‌گیری می‌شود که کارآمدی و درستی نامیده می‌شود. کارآمدی εاز یک مرحله خاص به نسبت موفقیتش مربوط است. در پروژه بنت، کارآمدی ۱۰۰٪ یا $\varepsilon = 1$، به دست می‌آید وقتی‌که هر چهار حالت بل از ذرات ab می‌تواند به‌طور واحد توسط آلیس توصیف شود. اگرچه، اگر فقط یک یا دو تا از این حالات قابل‌تشخیص هستند، تله پورتیشن هنوز امکان‌پذیر خواهد شد، اما با ۲۵٪ یا ۵۰٪ کارآمدی به ترتیب. فاکتورهای دیگری وجود دارند که همچنین موفقیت تله پورتیشن را تعریف می‌کنند، مانند درجه درهم‌تنیدگی بین جفت EPR، اتلاف‌های درون، آشکارسازی و غیره. با کاهش دادن کارآمدی در هر پایه آزمایش ویژه‌ای، از شرایط ایده‌آل دور می‌شود.

در سناریوی ایده‌آل و زمانی‌که تله پورتیشن موفق است، حالت ناشناخته‌ای که از دست آلیس می‌رود همان است که در موقعیت باب ظاهر می‌شود. با این گفته منظورمان این است که تمام اطلاعات در دسترس در مورد سیستم کوانتومی اولیه که به یک یا دو روش واکنش نشان می‌دهد در یک وضعیت آزمایشگاهی داده‌شده، از یک بخش به بخش دیگر منتقل خواهد شد. بخش A ۳ که درواقع این اطلاعات را می‌داند و محتملاً شخصی که حالت کوانتومی را آماده کرد قادر خواهد بود که دقت ارتباط کوانتومی را بررسی کند. اگرچه، در کمتر از شرایط ایده‌آل مانند هر آزمایشی، حالت ورودی و خروجی متفاوت خواهند بود. حتی اگر حالت ورودی خاص $|\Phi\rangle_{in}$ خالص باشد، محتمل است که

خروجی توسط ۱ عملگر چگالی حالت مخلوط شده نمایش داده شود، $\hat{\rho}_{out}$. درستی F یک مرحله خاص یگ اندازه از تشابه آن‌ها است و به‌سادگی باهمپوشانی آن‌ها داده می‌شود، $F = {}_{in}\langle\Phi|\hat{\rho}_{out}|\Phi_{in}\rangle$ این اندازه رابطه زیر را ارضا می‌کند.

$$F = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow \hat{\rho}_{out} = |\phi\rangle_{in\ in}\langle\phi| \\ 0 \Leftrightarrow \textit{the two state are orthogonal} \end{cases} \quad (۶)$$

درستی روشی است برای کمی کردن یک اندازه‌گیری که با آن نتیجه اندازه‌گیری هر مشاهده‌پذیر روی حالت ورودی منطبق با انجام همان اندازه‌گیری روی حالت خروجی باشد. بایستی تأکید شود که این درستی برای هر مشاهده‌پذیری اطلاعاتی می‌دهد. به‌طور ویژه، اگر بتوان فقط با کانال کلاسیکی کار کرد آنگاه درستی ۱/۲ به دست می‌آید، هر مقداری که از این تجاوز کند یعنی ارتباطات کوانتومی واردشده‌اند. اگر در مرحله‌ای مطمئن شد که ۹ آلیس یا ۹ باب به هیچ‌یک از روش‌ها اطلاعات به دست نیاورده‌اند و به آن‌ها اجازه داد که به حالت ممکن از ذره a برسند پس درستی برای یک کیو بیت منفرد بایستی بالاتر از $F = \frac{2}{3}$ باشد و این اطمینان را می‌دهد که حالت خروجی c یک نتیجه تله پورتیشن کوانتومی حقیقی است. همچنین، داشتن درستی $F = \frac{2}{3}$ یا بالاتر اطمینان می‌دهد که باب بهترین کپی از حالت کوانتومی اصلی را برمی‌گزیند.

درک آزمایشگاهی تله پورتیشن

برای یافتن تله پورتیشن از یک حالت کوانتومی به‌طور عملی، چندین مرحله بایستی دنبال شود. نیاز است که به این چالش‌های عملی کنونی اشاره شود تا مراحل به‌طور کامل درک شوند. در این مراحل داریم:

- آفرینش حالت ذره a
- آفرینش سیستم کمکی، جفت EPR
- اندازه‌گیری حالت بل (BSM)
- تحقق موفق بودن تله پورتیشن کوانتوم

موارد ۲ و ۳ مقداری پیچیده هستند. در حالت ایده‌آل، تله پورتیشن زمانی رخ می‌دهد که حالت ناشناخته خارج‌شده همان است که وارد می‌شود؛ بنابراین، مهم است که تصدیق کنیم چه پارامترهایی یک آزمایش تله پورتیشن کوانتومی ایده‌آل را بایستی تأمین کنند:

- ذره a، حالت اولیه، حالت ورودی، بایستی دلخواه باشد و برای هر دو آلیس و باب ناشناخته باشد. شخص سومی مثلاً ما، باید همان حالت را تکمیل کنیم.
- حالت کوانتومی خروجی، ذره c، حالت نهایی، باید یک کپی لحظه‌ای از حالت ورودی باشد.
- BSM باید قادر باشد که لیست کامل حالت‌های بل متعامد را تشخیص دهد که کارایی ایده‌آل ۱۰۰٪ را قطعی می‌کند. این تله پورتیشن غیرشرطی نامیده می‌شود. یک شرط کمتر سخت‌گیرانه تله پورتیشن شرطی خواهد بود.
- برای هر حالت ورودی داده‌شده تله پورتیشن باید قطعی باشد و ۹ احتمالی.
- مقدار اطلاعات پخش‌شده در کانال کلاسیکی باید بسیار کوچک‌تر از اطلاعات خواسته‌شده برای تأمین حالات ناشناخته باشد.
- آلیس و باب نباید موقعیت یکدیگر را بدانند که مراحل را در طی اجرا انجام دهند.

این اهداف ممکن است بسیار وابسته به کاربرد خاص قرارداد اصلی باشند. آن‌ها برای حالت ایده‌آل یکدست (سیت) هستند و همیشه به‌آسانی به آزمایشگاه برگردانده نمی‌شوند، آزمایش‌ها قادر می‌شوند که بعضی از آن‌ها را بهتر از بقیه نشان دهند. از پروپوزال بنت چندین تیم تحقیق با موفقیت‌های متفاوت ایده تله پورتیشن کوانتومی را دنبال کرده‌اند. پروتکل‌های تله پورتیشن کوانتومی در چهار دسته‌بندی زیر قرار دارند:

۱) ارتباط مستقیم امن کوانتومی کنترل‌شده
۲) تله پورتیشن کوانتومی کنترلی
۳) تله پورتیشن کوانتومی ۲ طرفه
٤) تله پورتیشن کوانتومی ۲ طرفه کنترلی

پروتکل پیشنهادی تله پورتیشن کوانتومی

در این اینجا یک پروتکل در زمینه تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه ارائه می‌شود که در آن با به‌کارگیری مفهوم جابجایی درهم‌تنیدگی، کانالی هشت کیو بیتی با استفاده از حالت GHZ

بررسی‌شده است. در این پروتکل همچنین هریکی از کاربرها یک حالت خالص سه کیو بیتی را می‌توانند به دیگری ارسال نماید.

آلیس و باب به‌طور هم‌زمان دو حالت سه کیو بیتی GHZ خالص را به یکدیگر منتقل می‌کنند، حالت‌ها به‌صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned}\left|\phi\right\rangle_{A_1A_2A_3} &= \alpha_0\left|000\right\rangle + \alpha_1\left|111\right\rangle, \\ \left|\phi\right\rangle_{B_1B_2B_3} &= \beta_0\left|000\right\rangle + \beta_1\left|111\right\rangle,\end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن‌ها $|\alpha_0|^2+|\alpha_1|^2=1$ و $|\beta_0|^2+|\beta_1|^2=1$ این پروتکل به‌صورت زیر انجام می‌شود.

مرحله یک: در این مرحله کانال موردنظر در این پروتکل که بین آلیس وباب منتشر می‌شود را بیان می‌کنیم.

این کانال شامل هشت کیو بیت است که شش کیو بیت آن به‌عنوان کیو بیت هدف معرفی می‌شود. کیو بیت‌های هدف همان کیو بیت‌هایی هستند که درنهایت با کمک دو کیو بیت دیگر، کیو بیت‌های ارسالی آلیس و باب روی آن‌ها بازسازی می‌شود. کانال هشت کیو بیتی موردنظر ما در این طرح به‌صورت زیر است:

$$\left|G\right\rangle_{a_1b_1b_2b_3a_2a_3a_4b_4} = \frac{1}{2}\left[\left|00000000\right\rangle + \left|00001111\right\rangle + \left|11110000\right\rangle + \left|11111111\right\rangle\right] \quad (۸)$$

$$\left|\phi\right\rangle_{a_1b_1b_2b_3a_2a_3a_4b_4A_1A_2A_3B_1B_2B_3} = \left|G\right\rangle_{a_1b_1b_2b_3a_2a_3a_4b_4} \otimes \left|\phi\right\rangle_{A_1A_2A_3} \otimes \left|\phi\right\rangle_{B_1B_2B_3}, \quad (۹)$$

که در آن کیو بیت‌های $a_1a_2a_3a_4$ متعلق به آلیس و کیو بیت‌های $b_1b_2b_3b_4$ متعلق به باب هستند. پس‌ازآنکه آلیس و باب هشت کیو بیت درهم‌تنیده را به اشتراک گذاشتند، می‌توانیم حالت اولیه سیستم کامل را به‌صورت رابطه (۸) بیان کنیم:

مرحله ۲: در این مرحله دو کاربر یک عملگر CNOT را اعمال می‌کنند که در آن به ترتیب، کیو بیت‌های A_1 و B_1 کیو بیت‌های کنترل و کیو بیت‌های a_1 و b_4 کیو بیت‌های هدف هستند. پس از اعمال عملگر توسط آلیس و باب به‌صورت جداگانه، حالت کامل سیستم به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$
\begin{aligned}
&\left|\phi_1\right\rangle_{a_1b_1b_2b_3a_2a_3a_4b_4A_1A_2A_3B_1B_2B_3} = \\
&\frac{1}{2}\Bigg[\left(\left|00000000\right\rangle + \left|00001111\right\rangle + \left|11110000\right\rangle + \left|11111111\right\rangle\right)\alpha_0\beta_0\left|000000\right\rangle \\
&+\left(\left|00000001\right\rangle + \left|00001110\right\rangle + \left|11110001\right\rangle + \left|11111110\right\rangle\right)\alpha_0\beta_0\left|000111\right\rangle \\
&+\left(\left|10000000\right\rangle + \left|10001111\right\rangle + \left|01110000\right\rangle + \left|01111111\right\rangle\right)\alpha_0\beta_0\left|111000\right\rangle \\
&+\left(\left|10000001\right\rangle + \left|10001110\right\rangle + \left|01110001\right\rangle + \left|01111110\right\rangle\right)\alpha_0\beta_0\left|111111\right\rangle\Bigg].
\end{aligned}
\qquad (۱۰)
$$

مرحله ۳: در این مرحله آلیس و باب اندازه‌گیری تک کیو بیتی بر پایه Z را به ترتیب روی کیو بیت‌های a_1و b_4 و اعمال می‌کنند. نتایج این اندازه‌گیری و حالت فروپاشی شده کیو بیت‌های دیگر را می‌توان در جدول (۱) مشاهده کرد.

نتایج آلیس	نتایج باب	حالت فروپاشی شده کیو بیت‌های
۰	۰	$\alpha_0\beta_0\|000000\rangle\|000000\rangle+\alpha_0\beta_1\|000111\rangle\|000111\rangle$ $+\alpha_1\beta_0\|111000\rangle\|111000\rangle+\alpha_1\beta_1\|111111\rangle\|111111\rangle$
۰	۱	$\alpha_0\beta_0\|000111\rangle\|000000\rangle+\alpha_0\beta_1\|000000\rangle\|000111\rangle$ $-\alpha_1\beta_0\|111111\rangle\|111000\rangle+\alpha_1\beta_1\|111000\rangle\|111111\rangle$
۱	۰	$\alpha_0\beta_0\|111000\rangle\|0000...00\rangle+\alpha_0\beta_1\|111111\rangle\|000111\rangle$ $+\alpha_1\beta_0\|000000\rangle\|111000\rangle+\alpha_1\beta_1\|000111\rangle\|111111\rangle$
۱	۱	$\alpha_0\beta_0\|111111\rangle\|000000\rangle+\alpha_0\beta_1\|111000\rangle\|000111\rangle$ $+\alpha_1\beta_0\|000111\rangle\|111000\rangle+\alpha_1\beta_1\|000000\rangle\|111111\rangle$

جدول (۱). نتایج اندازه‌گیری آلیس و باب بر مبنای Z

مرحله ٤: در این مرحله آلیس و باب همدیگر را از نتایج به‌دست‌آمده خودآگاه کرده و بر اساس این نتایج عملگر یکانی مناسبی را بر روی کیو بیت‌های باقیمانده اعمال می‌کنند. نتایج اعمال این عملگرها را می‌توانید در جدول (۲) مشاهده کنید.

عملگرهای اعمالی آلیس بر روی کیو بیت‌های $a_2a_3a_4$	حالت فروپاشی شده کیو بیت‌های	نتایج اندازه‌گیری باب	نتایج اندازه‌گیری آلیس
III	*III*	۰	۰
XXX	*III*	۱	۰
III	*XXX*	۰	۱
XXX	*XXX*	۱	۱

جدول (۲). اعمال عملگر مناسب بر پایه نتایج اندازه‌گیری

مرحله ٥: در این مرحله آلیس و باب به ترتیب روی کیو بیت‌های $A_1A_2A_3$ و کیو بیت‌های $B_1B_2B_3$ ٦ اندازه‌گیری تک کیو بیتی بر پایه X انجام می‌دهند. پس از انجام این اندازه‌گیری‌ها در هم تنیدگی شکسته شده و کیو بیت‌های آلیس و باب از یکدیگر جدا می‌شوند. نتایج این اندازه‌گیری و حالت فروپاشی شده کیو بیت‌های دیگر را می‌توان در جدول (۳) در صفحه بعد، مشاهده کرد.

مرحله ٦: در این مرحله آلیس و باب بر اساس نتایج اندازه‌گیری، برای اینکه بتوانند کیو بیت‌های ارسالی را بازسازی کنند، طبق جدول (۲) ستون عملگرهای اعمالی، عملگرهای مناسب خود را

اعمال می‌کنند. پس از اعمال عملگر مناسب توسط آلیس و باب، حالت فروپاشی شده و نهایی کیو بیت‌های هدف به‌صورت رابطه (۱۱) درمی‌آید:

$$\begin{aligned}&(\alpha_0\beta_0|000000\rangle+\alpha_0\beta_1|000111\rangle\\&+\alpha_1\beta_0|111000\rangle+\alpha_1\beta_1|111111\rangle)_{b_1b_2b_3a_2a_3a_4}\\&=(\alpha_0|000\rangle+\alpha_1|111\rangle)(\beta_0|000\rangle+\beta_1|111\rangle).\end{aligned}\quad (۱۱)$$

درنهایت با توجه به اینکه درهم تنیدگی بین کیو بیت‌های آلیس و باب از بین رفته است، آن‌ها می‌توانند کیو بیت‌های خود را به‌صورت زیر استخراج کنند. همان‌طور که در رابطه (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود آلیس و باب توانستند کیو بیت‌های خود را به یکدیگر منتقل کنند.

$$\text{کیو بیت‌های آلیس} = |\phi\rangle_{a_2a_3a_4}=\beta_0|000\rangle+\beta_1|111\rangle. \quad (۱۲)$$

$$\text{کیو بیت‌های باب} = |\phi\rangle_{b_1b_2b_3}=\alpha_0|000\rangle+\alpha_1|111\rangle. \quad (۱۳)$$

عملگرهای اعمالی		حالت فروپاشی شده کیو بیت‌های $b_1b_2b_3a_2a_3a_4$	تمامی حالت‌های ممکنه در اندازه‌گیری		
عملگر اعمالی باب	عملگر اعمالی آلیس		نتایج اندازه‌گیری باب	نتایج اندازه‌گیری آلیس	ردیف
III	*III*	$+\alpha_1\beta_0\|000111\rangle$ $+\alpha_1\beta_1\|111111\rangle$ کیو بیت‌های دست آلیس	$\|+++\rangle$	$\|+++\rangle$	۱
			$\|+--\rangle$	$\|+++\rangle$	۲
			$\|-+-\rangle$	$\|+++\rangle$	۳
			$\|--+\rangle$	$\|+++\rangle$	۴
			$\|+++\rangle$	$\|+--\rangle$	۵
		کیو بیت‌های دست باب	$\|+--\rangle$	$\|+--\rangle$	۶
			$\|-+-\rangle$	$\|+--\rangle$	۷
			$\|--+\rangle$	$\|+--\rangle$	۸

جدول (۳): اندازه‌گیری بر پایه $\boldsymbol{X}$ و حالت فروپاشی شده کیو بیت‌های دیگر و عملگرهای اعمالی باب و آلیس برای بازسازی کیو بیت‌ها

می‌توان با یک تغییر جزئی در پروتکل دوطرفه، هرکدام از هشت حالت GHZ را به‌صورت جداگانه منتقل کرد. تمام حالت‌های GHZ به‌صورت زیر است:

$$|\psi_{000}\rangle=\frac{|000\rangle+|111\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۱۴)$$

$$|\psi_{100}\rangle = \frac{|100\rangle + |011\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۱۵)$$

$$|\psi_{001}\rangle = \frac{|001\rangle + |110\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۱۶)$$

$$|\psi_{101}\rangle = \frac{|101\rangle + |010\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۱۷)$$

$$|\psi_{010}\rangle = \frac{|010\rangle + |101\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۱۸)$$

$$|\psi_{110}\rangle = \frac{|010\rangle + |101\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۱۹)$$

$$|\psi_{011}\rangle = \frac{|011\rangle + |100\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۲۰)$$

$$|\psi_{111}\rangle = \frac{|011\rangle + |100\rangle}{\sqrt{2}} \quad (۲۱)$$

در پروتکل ارائه‌شده، حالت ارسالی باب و آلیس حالت خالص رابطه (۱٤) بود که ضرایب آن به‌صورت دلخواه قابل‌تغییر بود. در این طرح حالت کوانتومی استفاده‌شده به‌عنوان کانال طبق رابطه (۸) کیو بیت‌های $b_1b_2b_3a_2a_3a_4$ به‌عنوان کیو بیت‌های هدف بیان شدند و درنهایت کیو بیت‌های ارسالی آلیس و باب روی این کیو بیت‌ها بازسازی شدند. دو کیو بیت دیگر (a_1 و b_4) تنها نقش کمکی برای جابجایی درهم تنیدگی را دارند و شامل چهار حالت $|00\rangle,|01\rangle,|10\rangle$ و $|11\rangle$ است که با تغییر حالت ارسالی GHZ تغییری نمی‌کنند. البته همان‌طور که در رابطه (۸) مشاهده می‌شود کیو بیت‌های هدف و دو کیو بیت دیگر درهم‌تنیده هستند و قابل جداسازی نیستند و فقط به‌منظور توضیح کامل‌تر آن‌ها را جداگانه بررسی می‌کنیم. با جداسازی کیو بیت‌های هدف آن‌ها به‌صورت رابطه (۲۲) درمی‌آیند.

$$\begin{aligned} &|000000\rangle \\ &+|000111\rangle \\ &+|111000\rangle \\ &+|111111\rangle_{b_1b_2b_3a_2a_3a_4} \end{aligned} \quad (۲۲)$$

اگر در این رابطه اقدام به جداسازی کیو بیت‌های آلیس و باب کنیم طبق روابط (۱۹) و (۲۰) مشاهده می‌شود که حالت به‌دست‌آمده در دست هر کاربر همان حالت ارسالی آلیس و باب بدون ضرایب دلخواه است.

$$(|000\rangle + |111\rangle)_{a_2a_3a_4} \quad (۲۳)$$

$$(|000\rangle + |111\rangle)_{b_1b_2b_3} \quad (۲۴)$$

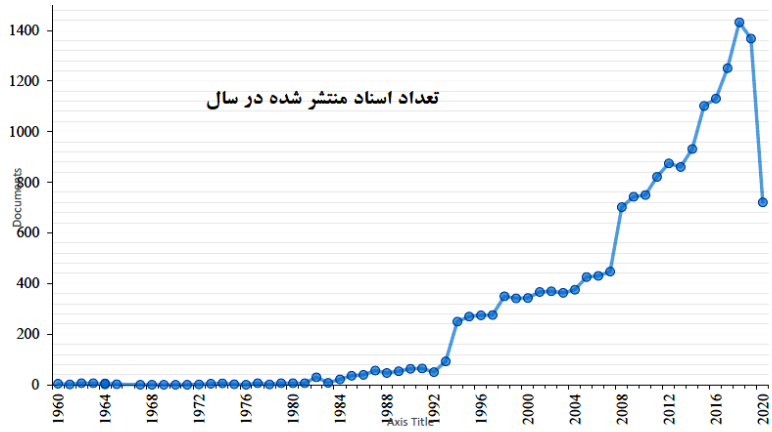
با توجه به این کیو بیت‌ها، می‌توان به رابطه کانال و حالت ارسالی آلیس و باب دست‌یافت و از روی آن برای تمامی حالات GHZ کانال مناسب را پیدا نمود.

تحلیل فناوری ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

در این قسمت به تحلیل فناوری ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی می‌پردازیم که بررسی‌ها شامل ۲ بخش تحلیل پتنت و مقالات و سطح آمادگی فناوری است.

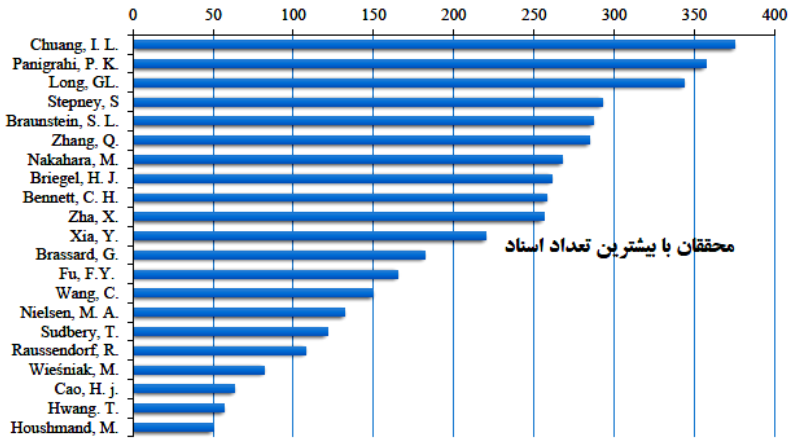
تحلیل مقالات و پتنت‌ها

در این قسمت به تحلیل آماری مقالات و پتنت‌ها در دو حوزه ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی پرداخته می‌شود. در شکل (۳). الف) تعداد مقالات و اسناد چاپ‌شده درزمینه ارتباطات کوانتومی و نیز نام افرادی که در این زمینه فعالیت دارند، آورده شده است. همان‌گونه که پیداست روند این مقالات رو به افزایش گذاشته است که این مطلب نشان از بروز نوعی انقلاب کوانتومی و توجه هر چه بیشتر به این زمینه است. همان‌گونه که دیده می‌شود از سال ۱۹۸۵ با شکل‌گیری تحول در حوزه فناوری‌های کوانتومی گرایش شدیدی در این زمینه‌ها به وجود آمده است. اگرچه در بررسی روند می‌توان برخی کاهش‌ها و افزایش‌ها وجود دارد اما روند کلی آن به‌سوی تحقیق و تحقیق‌های بیشتر است به‌گونه‌ای که در ۲۰ سال اخیر تقریباً رشد ۵ برابری در تعداد مقالات دیده می‌شود.



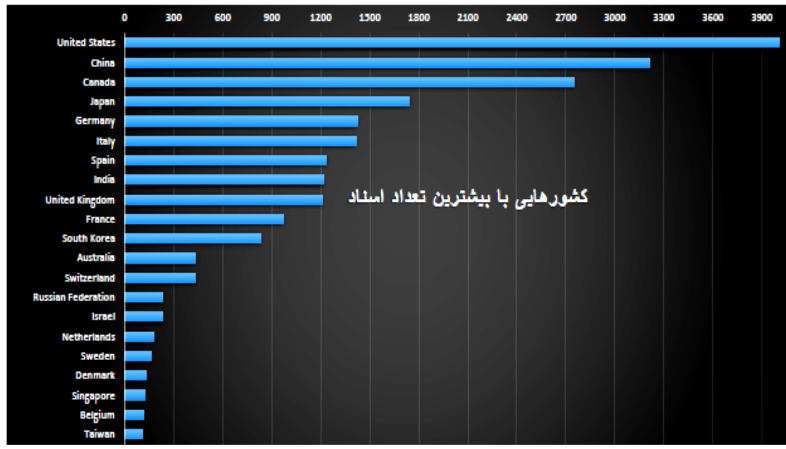
شکل (۳). الف) تعداد اسناد انجام‌شده درزمینهٔ ارتباطات کوانتومی (محقق این تحقیق ۱۳۹۹)

بررسی و شناخت افراد کلیدی در این فناوری بسیار مهم است برای انجام تحقیق در هر حوزه باید اشخاص فعال در آن زمینه به‌خوبی شناسایی شده باشند. در شکل (۳). ب) افراد فعال درزمینه ارتباطات کوانتومی با توجه به تعداد مقالات آورده شده است.

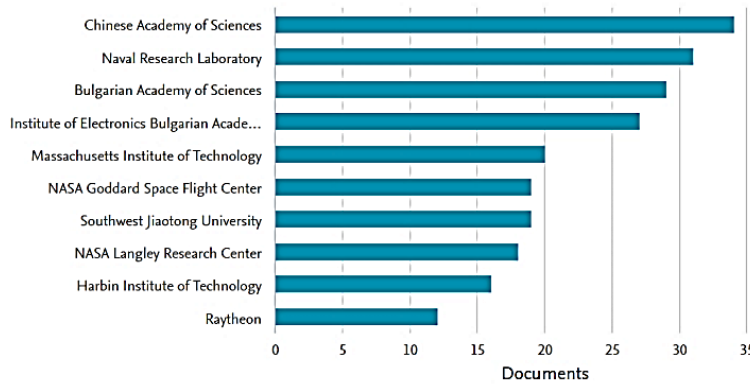


شکل (۳). ب) تعداد اسناد انجام‌شده افراد فعال درزمینهٔ ارتباطات کوانتومی (محقق این تحقیق ۱۳۹۹)

در شکل (٤) الف) و ب) مراکز و کشورهای فعال درزمینه ارتباطات کوانتومی آورده شده است؛ بنابراین زمینه ارتباطات کوانتومی آکادمی علوم چین و آزمایشگاه تحقیقات دریایی آمریکا در این حوزه بیش‌ترین فعالیت را داشته‌اند. با توجه به این نمودارها کشورهای آمریکا و چین پیشگامان این حوزه هستند. آمار دانشگاه‌ها و یا موسسه‌هایی که بر روی این فناوری‌ها سرمایه‌گذاری می‌کنند می‌تواند دارای اهمیت بسیاری برای ما باشد و می‌تواند اطلاعات مهمی را به تحلیل گران ارائه دهد.

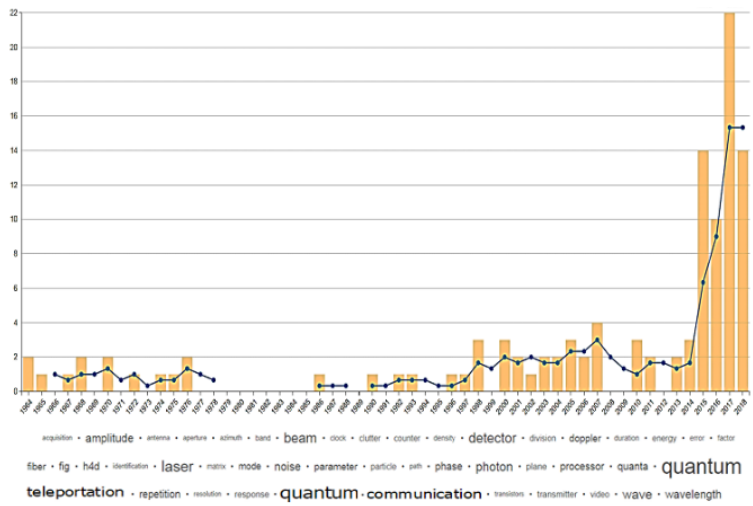


شکل (٤). الف) مراکز و کشورهای فعال درزمینه ارتباطات کوانتومی (محقق این تحقیق ۱۳۹۹)



شکل (٤). ب) مراکز و کشورهای فعال درزمینه ارتباطات کوانتومی (محقق این تحقیق ۱۳۹۹)

ازآنجایی‌که یک پتنت بر پایه ساختار پیچیده خود دارای بخش‌های گوناگونی از فناوری‌ها است بنابراین نمی‌توان تنها از یک بخش برای بررسی آن استفاده کرد. در اینجا تلاش بر این بوده است که ارتباط بین کلماتی که در یک پتنت ارائه‌شده است نیز موردسنجش قرار گیرد تا تصمیم گیران شناخت بهتری نسبت به آن پتنت‌ها داشته باشند. نکته مهم این است که روند چندساله اخیر در حوزه فناوری‌های ارتباطات کوانتومی را چگونه می‌توان ارزیابی کرد. در شکل (۵) سال انتشار پتنت و تعداد آن‌ها به همراه کلیدواژه‌های مربوطه برای ارتباطات کوانتومی داده‌شده است. همان‌طور که دیده می‌شود روند این پتنت‌ها افزایشی است.



شکل (۵). سال انتشار پتنت و تعداد آن‌ها به همراه کلیدواژه‌های مربوطه برای ارتباطات کوانتومی

ارزیابی فناوری‌های حوزه ارتباطات کوانتومی

سطح آمادگی فناوری سنجه‌ای برای ارزیابی وضعیت توسعه فنی ۱ فناوری نوظهور است. این الگو در دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط ناسا نگارش شد و پس‌ازآن، تعداد و تعاریف سطوح آمادگی تااندازه‌ای تغییر کرده است. در اینجا، الگویی ۹ مرحله‌ای داده‌شده در زیر برای تعیین سطح آمادگی فناوری به کار گرفته‌شده است:

TRL1- مشاهده و درک اصول علمی پایه و گزارش آن‌ها.

TRL2- مدل‌سازی ایده اصلی فناوری و کاربرد آن.

TRL3- اثبات عملکرد در سطح مدل ریاضیاتی و آزمایش‌های اولیه.

TRL4- دستیابی به نمونه آزمایشگاهی کارآمد در محیط آزمایشگاهی.

TRL5- دستیابی به نمونه آزمایشگاهی کارآمد در محیطی که به محیط عملکرد واقعی شباهت دارد.

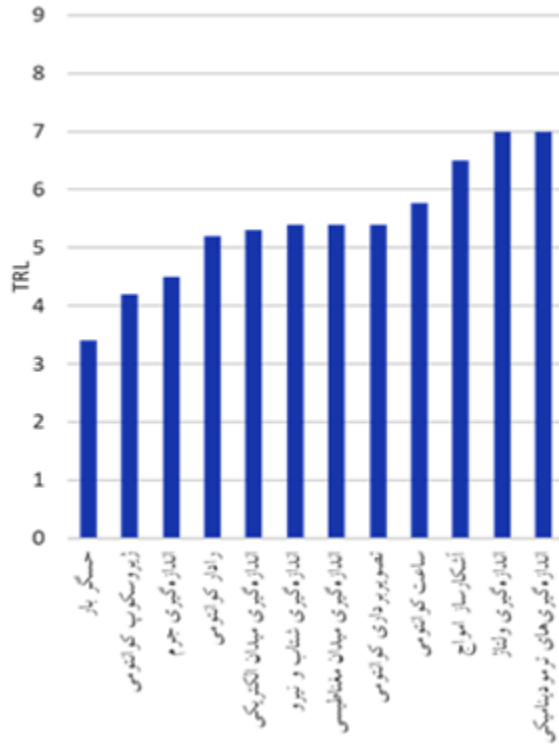
TRL6- دستیابی به نمونه اولیه کارآمد در محیطی که به محیط عملکرد واقعی شباهت دارد.

TRL7- اثبات عملکرد نمونه اولیه در محیط واقعی.

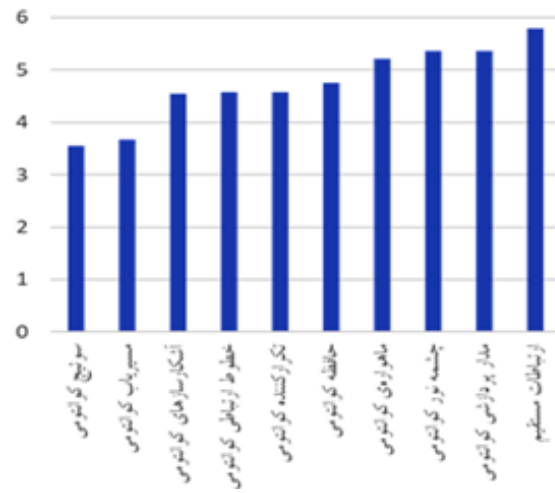
TRL8- تکمیل سامانهٔ نهایی و دستیابی به شرایط لازم برای کاربرد عملیاتی/ افزایش مقیاس تولید به سطح تولید پایلوت.

TRL9- راه‌اندازی سامانه نهایی در محیط واقعی/ راه‌اندازی خط تولید.

برای سنجش سطح آمادگی فناوری از ۲ روش دلفی و پرسشنامه حاصل از روش دلفی استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی اطلاعات در جدول زیر برای برخی از مهم‌ترین فناوری‌های کوانتومی از جمله ارتباطات و تله پورتیشن آورده شده است. در شکل (٦). الف) و ب) سطوح آمادگی فناوری به‌صورت صعودی بیان شده است تا بتوان بر روی آن‌ها تحلیل‌های دقیق‌تری انجام شود.



شکل (٦). الف) سال انتشار پتنت و تعداد آن‌ها به همراه کلیدواژه‌های مربوطه برای ارتباطات کوانتومی



شکل (٦). ب) سال انتشار پتنت و تعداد آن‌ها به همراه کلیدواژه‌های مربوطه برای ارتباطات کوانتومی

تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از پرسشنامه

برای آشنایی با رقبای کشور در این حوزه و بررسی نقاط ضعف، قوت، تهدید و فرصت با استفاده از روش AHP ماتریس بررسی رقابت برای مقایسه شرایط کشور با کشورهای انگلیس، چین و ایالات متحده و اتحادیه اروپا ایجادشده است. در این راستا جلساتی با نخبگان و خبرگان برگزار شد و با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در فصول قبل و تحلیل پتنت و مقالات صورت گرفته در قسمت قبل، وضعیت رقبای کشور در داشتن نیروی متخصص و کارشناس، سرمایه‌گذاری و حمایت دولت برای ایجاد زیرساخت‌های لازم، در اختیار داشتن تجهیزات مناسب، در اختیار داشتن برنامه و نقشهٔ راه برای دستیابی به این فناوری‌ها و وجود ارتباط دانشگاه با صنعت موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول‌های زیر نشان داده‌شده است:

جدول (٤). ماتریس بررسی رقابت / CPM

شماره	معیارهای تعیین ویژگی‌های کشورهای رقیب و ایران (عوامل تعیین‌کننده موفقیت)	وزن از طریق AHP	ایران		امریکا		انگلیس		اتحادیه‌ی اروپا		چین	
			امتیاز جایگاه رقابتی	نمره نهایی	امتیاز جایگاه رقابتی	نمره نهایی	امتیاز جایگاه رقابتی	نمره نهایی	امتیاز جایگاه رقابتی	نمره نهایی	امتیاز جایگاه رقابتی	نمره نهایی
۱	داشتن نیروی متخصص و کارشناس	0.2	2.6	0.6	4.3	1.10	4.5	1.0	4.1	1.01	4.1	1.0
۲	سرمایه‌گذاری و حمایت دولت برای ایجاد زیرساخت‌های لازم	0.2	2.1	0.4	4.4	1.02	4.5	0.9	4.4	1.02	4.3	0.9
۳	در اختیار داشتن تجهیزات مناسب	0.2	1.1	0.2	4.3	1.01	4.6	0.9	4.3	0.89	4.5	0.9
۴	در اختیار داشتن برنامه و نقشه‌ی راه برای دستیابی به این فناوری‌ها	0.2	1.6	0.3	4.3	0.85	4.7	0.9	4.5	0.91	4.4	0.9
۵	ارتباط صنعت و دانشگاه	0.18	1.2	0.2	4.3	0.7	4.3	0.7	4.0	0.71	4.3	0.8
	جمع			1.8		4.7		4.5		4.54		4.5

جدول (۵). وزن‌های ماتریس مقایسه زوجی از تکنیک AHP

عوامل	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱	۱،۱	۰،۹	۱،۲	۱،۴
۲	۰،۹	۱	۱،۳	۱،۱	۰،۹
۳	۱	۰،۷	۱	۱،۲	۱،۴
۴	۰،۸	۰،۸	۰،۸	۱	۱،۵
۵	۰،۶	۱	۰،۶	۰،۶	۱
جمع	۴،۳	۴،۶	۴،۶	۵	۶،۳

جدول (٦). ماتریس نرمال شده از تکنیک **AHP**

عوامل	۱	۲	۳	۴	۵	میانگین حسابی سطرها (وزن)
۱	۰،۲	۰،۲	۰،۲	۰،۲	۰،۲	۰،۲
۲	۰،۲	۰،۲	۰،۲	۰،۲	۰،۱	۰،۱۸
۳	۰،۲	۰،۱	۰،۲	۰،۲	۰،۲	۰،۱۸
۴	۰،۲	۰،۱	۰،۱	۰،۲	۰،۲	۰،۱۶
۵	۰،۱	۰،۲	۰،۱	۰،۱	۰،۲	۰،۱

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده داشتن نیروی متخصص و کارشناس مهم‌ترین عامل در این بررسی است و وزن بیشتری را نسبت به بقیهٔ عوامل دارد اگرچه تفاوت معناداری بین وزن‌های عوامل نیست. در بین رقبا کشور آمریکا، چین، انگلیس و اتحادیهٔ اروپا به ترتیب بیشترین امتیاز را به دست آورده‌اند؛ و کشور ما تفاوت بسیاری با این کشورها در این عوامل دارد.

برای تعیین عوامل بیرونی و درونی مؤثر بر فناوری ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی در جمهوری اسلامی حدود ٦٣ عامل شناسایی‌شده‌اند. خبرگان نظر خود را دربارهٔ اینکه عامل مورد پرسش تا چه اندازه می‌تواند در دستیابی سازمان به مأموریت خود ضروری باشد را از میان گزینه‌ها انتخاب کردند؛ به‌عبارت‌دیگر میزان موافقت یا مخالفت خود را بااینکه عامل x در دستیابی سازمان به مأموریت خود ضروری است اعلام داشتند. سپس بر اساس ماتریس راهبرد و پس از بررسی کامل

پرسشنامه‌ها برای تحقق هرکدام از اهداف که همان بهبود نقاط ضعف و کاهش تهدیدها هستند از فرصت‌ها و نقاط قوت مشخص بهره گرفته‌شده است؛ که فرصت‌ها در اینجا ابزار و نقاط قوت منابع هستند. درنهایت دو راهبرد زیر به‌عنوان راهبردهای در اولویت انتخاب شدند

راهبرد ۱: تدوین برنامه جامع جهت پیشرفت اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی در داخل کشور

راهبرد ۲: ایجاد زمینه همکاری نخبگان و خبرگان و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات کشورهای پیشرو

نتایج و بحث

با توجه به پروتکل‌های ارائه‌شده توسط دیگران و پروتکل‌های ارائه‌شده در این مقاله، می‌توان نتیجه گرفت در سال‌های اخیر توجهات زیادی توسط سازمان‌های سرمایه‌گذار و محققان به تله پورتیشن و رمزنگاری کوانتومی صورت گرفته است. چراکه در کنار تحقیقات نظری کشورهای پیشرو در حال آزمایش‌های این زمینه هستند. لذا نتیجه و مقایسه پروتکل پیشنهادی در مقاله که در قسمت ۲. (قسمت قبلی) مقاله به آن پرداخته شد در این قسمت به‌صورت جدول بیان می‌شود.

در کارهای قبلی صورت گرفته در زمینه تله پورتیشن دوطرفه و تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه کنترلی، کاربرها تنها یک حالت تک کیو بیتی را می‌توانند به یکدیگر ارسال کنند. درحالی‌که در این پروتکل، کاربرها قادر هستند حالت GHZ خالصی که یک حالت سه کیو بیتی است را به یکدیگر در کانل هشت کیو بیتی ارسال نمایند. به‌علاوه، کانال کوانتومی که در تمام پروتکل‌های تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه پیشنهادشده‌اند، حالت‌های خوشه‌ای و یا حالت‌های برون هستند. این حالت‌ها در عمل به‌مراتب پیچیده‌تر از حالت GHZ است. جزئیات مقایسه پروتکل جدید و پروتکل‌های ارائه‌شده در این زمینه در جدول (۷) آورده شده است

جدول (۷). مقایسه پروتکل مقاله با پروتکل‌های قبلی در زمینه تله پورتیشن دوطرفه

نام پروتکل	نوع پروتکل	تعداد کاربرها	نوع کانال	حالت ارسال‌شده
مقاله حاضر	BQT	۲	GHZ_8	دو کیو بیتی
[۲۴]	BQT	۲	GHZ_6	دو کیو بیتی
[۲۵]	BQT	۲	$Cluster_4$	تک کیو بیتی
[۲۶]	$CBQT$	۳	$Brown_5$	تک کیو بیتی
[۲۷]	$CBQT$	۳	$Cluster_4$	تک کیو بیتی
[۲۸]	$CBQT$	۳	$Cluster_6$	تک کیو بیتی
[۲۹]	$CBQT$	۳	۶ کیو بیتی	تک کیو بیتی
[۳۰]	$CBQT$	۳	$Brown_5$	تک کیو بیتی
[۳۱]	$CBQT$	۳	۷ کیو بیتی	تک کیو بیتی
[۳۲]	$CBQT$	۳	۶ کیو بیتی	تک کیو بیتی

بدون شک در آینده نه‌چندان دور با حضور ابزارها و فناوری‌های کوانتومی در زندگی روزمره روبرو خواهیم بود که در زمینه‌های اقتصادی، سیاسی و نظامی مطمنا نقش تعیین‌کننده خواهد داشت. لذا ارتباطات کوانتومی به که یکی از مهم‌ترین زمینه‌های فناوری‌های کوانتومی است در آینده ارتباطات دنیای پیرامون را تشکیل خواهد داد. چراکه اختلاف و مزایای ارتباطات کوانتومی در برابر ارتباطات کلاسیک به‌مثابه اختلاف و مزایای ارتباط اینترنتی در برابر ارتباط کاغذی و نامه‌رسانی سنتی و حتی بیشتر است. لذا غرق شدن زندگی و جوامع در ارتباطات کوانتومی در آینده ناگزیر است؛ بنابراین جهت‌گیری علم و فناوری در دنیا نیز به این سمت است. در این تحقیق به بررسی مخابرات کوانتومی (ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی) و همچنین راهبردهای ارتباطات کوانتومی به‌عنوان یک فناوری جدید (به انقلاب دوم مکانیک کوانتومی معروف است) پرداخته شد.

در این راستا پرسش‌های زیر نیز مطرح است که پاسخ آن‌ها در جهت پربار شدن و پرواضح‌تر شدن موضوع در قسمت نتیجه‌گیری به تفسیر بیان‌شده است.

۱) تفاوت مخابرات کوانتومی با مخابرات کلاسیک چیست و اجرای آنچه مزایای ویژه‌ای دارد؟

۲) مخابرات کوانتومی بر چه پایه‌هایی استوار است و هریک چگونه بر ج. ا. ایران تأثیرگذار

هستند؟

۳) ارائه تله پورتیشن کوانتومی و پروتکل‌های موجود تا چه حد موفق بوده‌اند؟

٤) چگونه می‌توان راهکار و روشی جدید برای پایه‌های مخابرات کوانتومی ارائه داد که به توسعه و پیشرفت علمی و فناوری ج. ا. ایران کمک کند؟

٥) نظر نخبگان این حوزه در رابطه با ضرورت‌ها و اهمیت‌های مخابرات کوانتومی در کشور چیست؟ و راهبردهای لازم به ج. ا. ایران جهت دستیابی به این فناوری‌ها کدامند؟

نتیجه‌گیری

. در این مقاله ابتدا به بیان مخابرات و ارتباطات کوانتومی پرداخته شد و سپس با استفاده از کانال‌های کوانتومی هشت کیو بیتی یک پروتکل تله پورتیشن کوانتومی پیشنهاد و به‌منظور میزان بازده و بهینه بودن نسبت به پروتکل‌های ارائه‌شده قبلی در قسمت نتایج در جدولی مقایسه شد. همچنین بر اساس نظر نخبگان و خبرگان این زمینه، با بررسی پرسشنامه و همچنین مطالعه سطوح فناوری دو راهبرد «تدوین برنامه جامع جهت پیشبرد اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی» و «ایجاد زمینه همکاری نخبگان و خبرگان و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات کشورهای پیشرو»، به‌عنوان راهبردهای در اولویت، برای جمهوری اسلامی ایران پیشنهاد شد.

در اینجا برای شفاف شدن بیشتر موضوع و جمع‌بندی نهایی به پاسخ پرسش‌های ارائه‌شده در قسمت ۳. (نتایج و بحث) به تفسیر پرداخته خواهد شد

تفاوت مخابرات کوانتومی با مخابرات کلاسیک چیست و اجرای آنچه مزایای ویژه‌ای دارد؟

تمامی روش‌های کلاسیک ارسال اطلاعات، قابل‌نفوذ است به‌طوری‌که با استفاده از روش‌های مناسب می‌توان به اطلاعات ارسالی دست پیدا کرد. برای بیان موضوع بهتر ساختار سیستم مخابرات کلاسیک بیان شود.

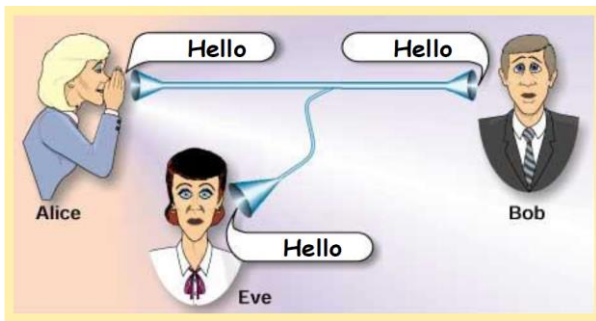
مقصود از مخابرات عبارت است از انتقال و ارسال علائم، نوشته‌ها، تصاویر، صداها و هرگونه اطلاعات دیگر به‌وسیله سیم یا بدون سیم و یا نور و یا هر رویه الکترومغناطیسی دیگر؛ و آن فرآیند شامل سه جزء اصلی زیر است:

فرستنده

کانال مخابراتی

گیرنده

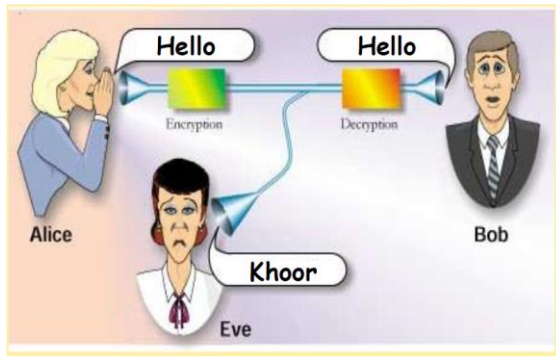
در تمامی روش‌های کلاسیک ارسال اطلاعات، ایمنی کامل به‌صورت نظری اثبات نشده و تمامی روش‌های موجود ارسال و دریافت اطلاعات قابل‌نفوذ هستند لذا تلاش برای راهکاری غیر قابل‌نفوذ برای تبادل اطلاعات منجر به پیدایش پدیده مخابرات کوانتومی شده است. در شکل (۷) نمایی شماتیک از مخابرات کلاسیک آمده است.



شکل (۷). نمایی شماتیک از مخابرات کلاسیک (مرکز تحقیقات نانوپترونیکس، ۱۳۹۸)

مخابرات کوانتومی به‌صورتی است که ازنظر نظری امنیت اطلاعات ارسالی کاملاً تضمین‌شده است. مخابرات کوانتومی هم مانند کلاسیک دارای ساختار سیستمی فرستنده، کانال ارسالی و گیرنده است. مخابرات کوانتومی شامل حوزه‌های مختلفی از جمله دو بخش مهم رمزنگاری کوانتومی و تله پورتیشن کوانتومی (تله پورتیشن کوانتومی) است. تله پورتیشن کوانتومی فرایندی است که به‌وسیله آن اطلاعات کوانتومی را می‌توان از یک محل به محل دیگر با کمک ارتباطات کلاسیک و حصار

کوانتومی مشترک بین محل فرستنده و گیرنده انتقال داد. تله پورتیشن کوانتومی شیوه‌ای جدید را برای ایجاد ارتباط امن بین فرستنده و گیرنده فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که ارسال اطلاعات در مخابرات کلاسیک در سرعت‌های خیلی پایین‌تر از سرعت نور اتفاق می‌افتد اما یک دیدگاه رایج آن است که مخابرات کوانتومی نوعی وای-فایِ کوانتومی پرسرعت است و مسئله عجیب آن است که (به نظر) اطلاعات کوانتومی به‌طور آنی (و درنتیجه، سریع‌تر از سرعت نور) فرستاده می‌شوند چراکه دو ذره درهم‌تنیده ارتباطی آنی باهم دارند که در شکل (۸) نمایی شماتیک از مخابرات کوانتومی رسم شده است.



شکل (۸) نمایی شماتیک از مخابرات کوانتومی (مرکز تحقیقات نانوپترونیکس، ۱۳۹۸)

در پایان باید گفت که ارتباطات کوانتومی هنوز یک فناوری بالغ نیست و تابه‌حال بیشتر ازلحاظ نظری موردبررسی قرارگرفته است. بخش‌های اصلی ارتباطات کوانتومی همچنان در حال تحقیق و بررسی است اما یقیناً که ارتباطات کوانتومی با توسعه فناوری در آینده کاملاً عملی است. واضح است که ارتباطات کوانتومی پتانسیل قابل‌توجهی دارد و بسیار موردتوجه کشورهای کانادا، چین و ایالات‌متحده است به‌صورتی که چین چندین آزمایش موفق در ابعاد بین‌قاره‌ای را عملی کرده است. همان‌طور که بیان شد تاکنون تحقیقات نظری و عملی زیادی در رابطه با مخابرات کوانتومی انجام‌شده و این تحقیقات در حال گسترش و توسعه بوده و در ردیف فناوری‌های اولویت‌دار دنیا قرارگرفته است. لذا اجرای مخابرات کوانتومی در پیشبرد اهداف کلان و همچنین پیشرو بودن ازلحاظ اقتصادی، سیاسی و نظامی تأثیر حیاتی بر کشور دارد به‌گونه‌ای که عقب ماندن از این فناوری‌ها به معنای عقب‌ماندگی کشور در حفظ و توسعه شرایط اقتصادی، سیاستی و نظامی از دیگر کشورها در آینده خواهد بود. همچنین با توجه به حساسیت کشورهای غربی به پیشرفت و توسعه

کشورهای اسلامی مخصوصاً ایران ایجاد و اجرای مخابرات کوانتومی در آینده از مهم‌ترین اهداف کشور خواهد شد.

در این راستا فرستادن ماهواره‌های مجهز به فناوری‌های کوانتومی به فضا، نخستین گام به‌سوی یک شبکه ارتباطی کوانتومی جهانی است. انجام آزمایش‌های مکانیک کوانتومی در فواصل طولانی با به‌کارگیری ماهواره‌های کوانتومی امکان‌پذیر خواهد بود. این فناوری همچنین می‌تواند در ارسال پیام و ویدئو رمزگذاری شده کوانتومی بین‌قاره‌ای و ارسال پیام‌های کوانتومی از طریق فضا، شبکه‌های ساعت و ناوبری و انجام آزمایش‌های بنیادی فیزیک در فضا مأموریت‌هایی را دنبال می‌کنند که کشور چین از پیشگامان در این آزمایش‌ها بوده‌اند. در زیر توضیحات بیشتر در مورد تفاوت مخابرات کوانتومی بیان می‌شود.

تفاوت اساسی مخابرات کوانتومی در مقایسه با مخابرات کلاسیک بر پایه نوع اطلاعات ارسال شونده است. در مخابرات کوانتومی اطلاعات در حالات کوانتومی قرار دارند و اساس مخابرات کوانتومی ارسال و دریافت این حالات کوانتومی است. از حالات کوانتومی که در مخابرات کوانتومی قابل‌استفاده‌اند می‌توان به اسپین الکترون و پلاریزاسیون فوتون اشاره کرد. در گیرنده و فرستنده سیستم مخابرات کوانتومی نیازمند پردازش اطلاعات کوانتومی هستیم. برای این منظور متناظر باحالت کلاسیک در پردازش اطلاعات کوانتومی نیز گیت‌های کوانتومی تعریف می‌شوند. در پردازش اطاعات کوانتومی چهار گیت اصلی وجود دارد که تمام پردازش‌های کوانتومی به‌وسیله این چهار گیت قابل پیاده‌سازی هستند. به‌طور مختصر این گیت‌ها عبارت‌اند از [۱]:

گیت CNOT

گیت هادامارد

گیت انتقال فاز

گیت چرخش

همچنین در انتقال اطلاعات کوانتومی، به‌جای بیت از کیو بیت‌ها استفاده می‌شود. درواقع انتقال کوانتومی، مکانیسمی از حرکت کیو بیت از یک محل به محل دیگر بدون نیاز به انتقال فیزیکی ذره متضمنی که کیو بیت به آن متصل است، ارائه می‌کند. همانند ابداع تلگراف که انتقال بیت‌های

کلاسیک با سرعت‌بالا بین قاره‌ها را امکان‌پذیر ساخت، انتقال کوانتومی این نوید را دارد که یک روز کیو بیت‌ها نیز این‌چنین حرکت می‌کنند. بااین‌حال از تاریخ ۲۰۱۳، تنها فوتون‌ها و اتم‌های یگانه انتقال‌یافته‌اند. حرکت کیو بیت‌ها به حرکت «اشیاء» نیاز ندارد؛ به‌ویژه پروتکل انتقال واقعی ملزم می‌دارد که یک حالت کوانتومی پیچیده یا حالت بل ایجاد شود و دو جزء آن بین دو محل را به اشتراک گذاشت. اساساً نوع معینی از «کانال کوانتومی» بین دو محل بایستی ایجاد شود تا کیو بیت بتواند حرکت کند. انتقال همچنین نیاز به ایجاد لینک اطلاعات کلاسیک است زیرا که دو بیت کلاسیک بایستی همراه با یک کیو بیت انتقال یابند. نیاز برای چنین لینک‌هایی ممکن است در مرحله اول نخست ناامیدکننده به نظر برسد؛ بااین‌حال این امر برخلاف ارتباطات عادی است که نیازمند سیم، رادیو یا لیزر دارند. علاوه براین، حالت‌های بل (یک نوع اندازه‌گیری دو کیو بیتی) به‌سادگی با استفاده از فوتون‌های لیزرها به اشتراک گذاشته می‌شوند و ازاین‌رو انتقال را می‌توان از طریق فضای باز انجام داد.

مفاهیم بسیار مهم و البته عجیب همدوسی، تله پورتیشن و درهم‌تنیدگی فوتون‌ها در مخابرات کوانتومی استفاده می‌شود؛ که در مخابرات کلاسیک چنین مفاهیمی وجود ندارد و در این نوع مخابرات (کلاسیکی)، فوتون‌ها در یک کانال، دچار تلفات می‌شوند، اما در مخابرات کوانتومی می‌توان این فواصل را به فواصل کوچک‌تری تقسیم کرد و از تله پورتیشن (تله پورتیشن) کوانتومی استفاده کرد تا فوتون‌ها دچار تلفات نشوند. به‌طور خلاصه می‌توان تفاوت‌های مخابرات کوانتومی و کلاسیک را به‌صورت زیر نوشت:

«تفاوت اساسی مخابرات کوانتومی در مقایسه با مخابرات کلاسیک نوع اطلاعات ارسال شونده است.»

در مخابرات کوانتومی اطلاعات در حالات کوانتومی قرار دارند و اساس مخابرات کوانتومی ارسال و دریافت این حالات کوانتومی است. از حالات کوانتومی که در مخابرات کوانتومی قابل‌استفاده‌اند می‌توان به اسپین الکترون و پلاریزاسیون فوتون اشاره کرد. سیستم مخابرات کوانتومی در گیرنده و فرستنده نیازمند پردازش اطلاعات کوانتومی است. همچنین مقایسه‌ای بین مخابرات کوانتومی و کلاسیک به زبان ساده به‌صورت زیر است:

ماهیت سیستم‌های ریزمقیاس با سیستم‌های بزرگ‌مقیاس کاملاً متفاوت است. در سیستم‌های

ریزمقیاس دنیای مکانیک کوانتومی در حال حکمرانی است. برای انتقال اطلاعات آن‌ها باید ابزارهایی برای خواندن اطلاعات و انتقال آن در مقیاس مکانیک کوانتومی داشته باشیم. از منظر کلاسیک اطلاعات یک موجود کلاسیک را با یک خط تلفن به‌راحتی می‌توان ارسال کرد. این اطلاعات در زبان ماشین به‌صورت علامت‌های ۰ و ۱ درمی‌آیند و توسط بیت‌های کلاسیک ذخیره‌سازی می‌شوند و انتقال می‌یابند. در مبدأ هم این صفر و یک‌ها خوانده می‌شوند و اطلاعات بازیابی می‌شوند. یک بیت یا صفر است و یا یک است. حالت بینابینی ندارد. آشناترین دستگاهی که تله پورت کلاسیک انجام می‌دهد دستگاه دورنگار است. به مدد تولید پرینترهای سه‌بعدی اکنون ما قادر به دورنگار اجسام سه‌بعدی هستیم و به لحاظ علمی هیچ‌گونه محدودیتی در انتقال اطلاعات یک جسم به‌طرف دیگر وجود ندارد و اگر چاپگر سه‌بعدی در طرف دیگر این قابلیت را به لحاظ مهندسی داشته باشد که بتواند از همه اتم‌ها استفاده کند قادر به دورنگار هر جسمی خواهیم بود؛ اما باید این موضوع را در ذهن داشت که هر جسم کلاسیک قادر به ارسال است؛ مثلاً اگر اطلاعات یک ساعت مچی گرفته می‌شود. جنس، اندازه و هر چیز از قطعات آن گرفته و به‌صورت اعداد ۰ و ۱ ارسال می‌شود در طرف دیگر یک دستگاه پرینتر سه‌بعدی دقیقاً همه این‌ها را گرفته و اقدام به بازنشانی هر اتم از اطلاعات دریافتی می‌کند؛ اما این دستگاه کلاسیکی قادر به کپی کردن اطلاعات کوانتومی هر اتم مثل اسپین الکترون‌ها و یا ... نیست. به‌تازگی دانشمندان به این نکته پی برده‌اند که رفتار تفکر و محاسبات در مغز نمی‌تواند کلاسیکی باشد. البته این موضوع جای بحث دارد اما اگر صحت این موضوع به اثبات برسد به‌صورت کاملاً دقیق می‌توان گفت تله پورت موجودات زنده به لحاظ کلاسیکی میسر نیست. در نقطه مقابل تله پورت کوانتومی بر پایه ارسال اطلاعات یک موجود کوانتومی استوار است این اطلاعات بر روی کیو بیت‌ها ذخیره می‌شوند. هر کیو بیت به‌صورت ترکیبی خطی از ۰ یا ۱ است. درواقع هر حالتی بین صفر و یک را می‌گیرد. مهم‌ترین تفاوت بین تله پورت کلاسیک و تله پورت کوانتومی همین نکته است. در دنیای کلاسیک ما چیزی بنام درهم‌تنیدگی و برهم‌نهی نداریم اما در مکانیک کوانتومی سیستم‌ها می‌توانند درهم‌تنیده باشند. بدان معنا که اندازه‌گیری روی یک سیستم در نتایج اندازه‌گیری روی سیستم دیگر اثر بگذارد. در دنیای کلاسیک خواندن اطلاعات یک بیت نمی‌توانست اطلاعات بیت دیگر را تغییر دهد حال‌آنکه در دنیای کوانتومی برای سیستم‌های درهم‌تنیده این اتفاق رخ می‌دهد. نکته بسیار مهم دیگر در تله پورت کلاسیک این موضوع است که ماهیت اندازه‌گیری کلاسیک هیچ چالشی را ایجاد نمی‌کند. به‌مجرد آنکه مفهوم کمیت قابل‌اندازه‌گیری مشخص شود و ابزار اندازه‌گیری طراحی شود عمل اندازه‌گیری به سهولت انجام

می‌پذیرد حال‌آنکه مبانی اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی همه‌چیز را تغییر می‌دهد. اندازه‌گیری باعث خراب شدن حالت سیستم و رفتن حالت سیستم در یکی از مقادیر ویژه اسباب اندازه‌گیری می‌شود.

مخابرات کوانتومی بر چه پایه‌هایی استوار است و هریک چگونه بر ج. ا. ایران تأثیرگذار هستند؟

روش‌های نوین و امن ارسال و پردازش اطلاعات با استفاده از نظریه اطلاعات کوانتومی برای اولین بار در سال ۱۹۸٤ با ارائه اولین پروتکل رمزنگاری کوانتومی و در سال ۱۹۹۱ با ارائه تله پورتیشن کوانتومی آغاز شد. امروزه این دو روش جدید پایه‌های نوع جدید و کاملاً امنی از مخابرات موسوم به مخابرات کوانتومی را تشکیل می‌دهند که در شکل ۳-۵ نمایی از آن رسم شده است. بر این اساس پایه‌های مخابرات کوانتومی یعنی رمزنگاری کوانتومی و تله پورتیشن کوانتومی شکل‌گرفته و موردمطالعه جدی قرارگرفته‌اند؛ که در زیر به‌طور خلاصه به این پایه‌ها اشاره می‌شود.

تله پورتیشن کوانتومی فرایندی است که به‌وسیله آن اطلاعات کوانتومی را می‌توان از یک محل به محل دیگر با کمک ارتباطات کلاسیک و حصار کوانتومی مشترک بین محل فرستنده و گیرنده انتقال داد.

از طرفی رمزنگاری کوانتومی یکی از موفقیت‌های شگرف دانش اطلاعات و محاسبات کوانتومی است که اطلاعات ارتباطی بین کاربران را در ابعاد کوانتومی ایمن می‌سازد. درواقع، رمزنگاری کوانتومی به کمک قوانین مکانیک کوانتومی، تبادل اطلاعات محرمانه بین کاربرها را فراهم می‌آورد، به‌گونه‌ای که استراق سمع کننده نتواند به اطلاعات دسترسی داشته باشد.

با توجه به اینکه تله پورتیشن یا تله پورتیشن کوانتومی ارتباط کوانتومی را میسر می‌کند و رمزنگاری هم ایمن بودن اطلاعات را تضمین می‌کند لذا پایه‌های مخابرات کوانتومی در ایجاد امنیت در روابط اقتصادی، سیاسی و نظامی کشور نقش تعیین‌کننده خواهند داشت و استفاده و اجرای پایه‌های مخابرات کوانتومی در کشور در آینده از الزامات خواهد بود.

ارائه تله پورتیشن کوانتومی و پروتکل‌های موجود تا چه حد موفق بوده‌اند؟

خوشبختانه تله پورتیشن کوانتومی که یکی از پایه‌های مخابرات کوانتومی است در سال‌های اخیر توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است چراکه آزمایش‌های تله پورتیشن توسط گروه‌هایی از محققان در بعضی کشورهای پیشرو انجام و نتایج قابل‌توجه فیزیکدانان، دانشمندان و شرکت‌های

سرمایه‌گذار را به دنبال داشته است. لذا تله پورتیشن کوانتومی تا به امروز نسبت به دیگر زمینه‌های فناوری‌های کوانتومی تا حدودی پیشرو بوده و نتایج مفیدی را به دنبال داشته است. کلیه پروتکل‌های تله پورتیشن کوانتومی را می‌توان در سه دسته‌بندی زیر قرار داد:

۱. ارتباط مستقیم امن کوانتومی کنترل‌شده
۲. تله پورتیشن کوانتومی و کوانتومی کنترلی
۳. تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه و دوطرفه کنترلی

ارتباط مستقیم امن کوانتومی کنترل‌شده: ارتباط مستقیم امن کوانتومی کنترل‌شده (CQSDC) به‌عنوان شاخه‌ای بسیار مهم از ارتباط مستقیم امن کوانتومی، موردتوجه محققان در سال‌های اخیر قرارگرفته است. در پروتکل‌های ارائه‌شده در این زمینه، کاربرها تنها با اجازه کنترل‌کننده قادر به برقراری ارتباط باهم هستند.

تله پورتیشن کوانتومی، کنترلی و دوطرفه کنترلی: در این نوع از تله پورتیشن علاوه بر فرستنده و گیرنده، کاربر یا کاربران دیگری وجود دارند. کارل سون و همکارش، در سال ۱۹۹۸ اولین طرح تله پورتیشن کوانتومی کنترلی را با استفاده از حالت GHZ مطالعه شد. در طرح ارائه‌شده از سوی آن‌ها، گیرنده تنها با اجازه کنترل‌کننده قادر به دریافت حالت ارسال‌شده است. همچنین در تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه، دو کاربر می‌توانند حالت کوانتومی ارسال‌شده دیگری را به‌طور هم‌زمان دریافت کنند.

چگونه می‌توان راهکار و روشی جدید برای پایه‌های مخابرات کوانتومی ارائه داد که به توسعه و پیشرفت علمی و فناوری ج. ا. ایران کمک کند؟

در این مقاله با توجه به کارهای قبلی در زمینه تله پورتیشن که یکی از پایه‌های اصلی مخابرات کوانتومی است، دو پروتکل به‌عنوان راهکار و روش جدید در این زمینه ارائه‌شده است که را جهت توسعه علمی و فناوری کشور است و زمینه‌ای برای کارهای آینده است که در انتهای فصل به‌عنوان پیشنهادها بیان خواهد شد. در خلاصه‌ای کارهای جدید در زیر بیان‌شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه ارتباطات کوانتومی به‌ویژه مخابرات و تله پورتیشن در آینده قابل‌اجرا و در دسترس خواهد بود و از طرفی در امور اقتصادی، سیاسی و نظامی نقش ایفا می‌کنند. بنابراین راهکار و روش جدید در زمینه تله پورتیشن بر توسعه علم و فناوری ج. ا. ایران تأثیر بسزایی دارد.

پروتکل اول در زمینه تله پورتیشن کوانتومی دوطرفه ارائه‌شده است که در آن با به‌کارگیری مفهوم

جابجایی درهم تنیدگی، کانالی هشت کیو بیتی با استفاده از حالت GHZ بررسی‌شده است. در این پروتکل همچنین هر یک از کاربرها یک حالت EPR خالص که حالتی سه کیو بیتی است را می‌توانند به دیگری ارسال نماید.

نظر نخبگان این حوزه در رابطه با ضرورت‌ها و اهمیت‌های مخابرات کوانتومی در کشور چیست؟ و راهبردهای لازم به ج. ا. ایران جهت دستیابی به این فناوری‌ها کدامند؟

با توجه به نظر نخبگان و خبرگان متغیرهایی به‌عنوان عوامل بیرونی و درونی به دست آمد. عوامل بیرونی یعنی فرصت‌ها و تهدیدهای دستیابی ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی ازنظر ایشان در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی
جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی	جدول (۸). فهرست فرصت‌ها و تهدیدهای به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

افزون بر این فهرست نقاط قوت و ضعف با توجه به نظر نخبگان و خبرگان و بررسی‌های انجام‌گرفته در جدول زیر آورده شده‌اند:

جدول (۸). فهرست نقاط قوت و ضعف به‌دست‌آمده در دستیابی به ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

متغیر	شرح نقاط ضعف یا قوت
S2	سیاست‌گذاری دولت درزمینهٔ فناوری‌های کوانتومی به‌ویژه ارتباطات کوانتومی و همچنین تخصیص بودجه در این راستا
S8	توجه و اهمیت به فناوری‌های کوانتومی در اسناد بالادستی
S18	ارتباط و هماهنگی بین مراکز علمی و صنعت
S19	وجود برنامه مدون و جامع برای پیشرفت در حوزهٔ فناوری‌های کوانتومی
S21	جذب کارشناسان، نخبگان و متخصصین ایرانی خارج از کشور
S42	داشتن انگیزه و اعتمادبه‌نفس برای دستیابی به فناوری‌های کوانتومی
S46	داشتن تجربه بومی‌سازی فناوری‌هایی از جمله نانو و هسته‌ای در کشور
S54	حمایت از فناوری‌های کوانتومی مثل حمایت از نانو فناوری
S62	داشتن زیرساخت‌های لازم (کلاسیک) برای استفاده از فناوری کوانتومی (ازجمله ارتباطات کوانتومی) در مراکز مهم

متغیر	شرح نقاط ضعف یا قوت
W7	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W13	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W26	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W28	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W33	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W51	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W52	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.
W58	به دلیل طبقه‌بندی موارد فوق، مشروح این نقاط در دبیرخانه فصلنامه موجود است.

راهبردهای دستیابی به فناوری ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

بر اساس ماتریس راهبرد برای تحقق هرکدام از اهداف که همان بهبود نقاط ضعف و کاهش تهدیدها هستند از فرصت‌ها و نقاط قوت مشخص بهره گرفته‌شده است. فرصت‌ها در اینجا ابزار و نقاط قوت منابع هستند. با بررسی انجام‌گرفته در پرسشنامه‌ها راهبردهای پیشنهادی در ناحیهٔ WO، به همراه اهداف، ابزار و منابع تحقق در جدول زیر تدوین‌شده است.

ردیف	راهبرد	هدف	ابزار	منبع
راهبرد ۱	تدوین برنامه جامع جهت پیشرفت اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی در داخل	T14 T60 W33 W26 W51	O27	S54 S19 S21 S62 S8
راهبرد ۲	ایجاد زمینه همکاری نخبگان و خبرگان و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات کشورهای پیشرو	T31 T15 W33 W13	O27 O9 O6	S21 S44 S18 S2

راهبرد ۱: تدوین برنامه جامع جهت پیشرفت اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی در داخل کشور:

فرض‌های راهبرد ۱:

- اتاق فکر و نیروهای متخصص جهت تدوین برنامه وجود دارند
- دولت و نهادهای مرتبط پای ثابت حمایت هستند.

با توجه به هزینه‌بر بودن آزمایش‌ها و زیرساخت‌های مورداستفاده وجود یک برنامه جامع در این فناوری بسیار ضروری به نظر می‌رسد. با حمایت دولت و تدوین این برنامه منابع به‌درستی هزینه می‌شود. وجود این برنامه صرف منابع را هدفمند می‌کند و نیز در کنار آن هماهنگی و ارتباط

دانشگاه‌ها و صنعت، شرکت‌های دانش‌بنیان نیز رشد خواهد کرد و سرانجام یک سامانه جامع اطلاعاتی نیز می‌تواند پیدا کند. برنامه می‌تواند شامل حمایت از طرح‌ها و ایده‌های نو در زمینه‌های ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی و دیگر زمینه‌های وابسته به آن‌ها باشد. در این برنامه می‌توان با توجه به اینکه زیرساخت‌های کلاسیک این فناوری‌ها در کشور وجود دارد گذار از فناوری کلاسیک به همتای کوانتومی را در نظر گرفت. همچنین حمایت از سرمایه‌های انسانی با به‌کارگیری آن‌ها در پروژه‌های تعریف‌شده در جهت برنامه بسیار ضروری است. در این برنامه دستیابی به فناوری ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی را می‌توان در حوزه‌های مختلف و در پروژه‌هایی کوچک‌تر به دانشگاه‌ها و مؤسسات علمی و فناوری داد، افزون بر این می‌توان از نخبگان ایرانی در این پروژه‌ها کمک گرفت. در تدوین این برنامه می‌توان از تجربه‌های فناوری‌هایی مانند هسته‌ای و نانو استفاده کرد.

راهبرد ۲: ایجاد زمینه همکاری نخبگان و خبرگان و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات کشورهای پیشرو:

فرض‌های راهبرد ۲:

- **کم تأثیر بودن تحریم‌های بین‌المللی در ارائهٔ دستاوردهای فناوری‌های ارتباطات کوانتومی**
- **حساسیت برای تعامل با دنیا در این زمینه‌ها کم است.**

باید یادآور شد که در این حوزه فاصله زیادی با کشورهای پیشرو وجود دارد و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات خارجی در این حوزه‌ها بسیار ضروری است. نیاز به خرید تجهیزات بسیار پیشرفته برای انجام آزمایش‌ها و آگاه شدن از مرزهای دانش می‌طلبد که حضوری فعال در عرصه‌های بین‌المللی در این زمینه‌ها داشت. به دید اقتصادی نیز می‌توان این حوزه‌ها را نگاه کرد و در صورت تولید محصول این ارتباطات زمینه‌ساز فروش محصولات به بازارهای جهانی خواهد بود؛ که خود می‌تواند سرمایه‌گذاری خارجی را نیز در پی داشته باشد.

اولویت‌بندی راهبردهای دستیابی به فناوری ارتباطات و تله پورتیشن کوانتومی

اولویت‌بندی راهبردهای ۱ و ۲ در جدول زیر آمده است:

جدول (۹). اولویت‌بندی راهبردهای ارائه‌شده از دیدگاه خبرگان

همان‌طور که از جدول بالا دیده می‌شود راهبرد اول که همان تدوین برنامه جامع جهت پیشرفت اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی در داخل کشور است از دیدگاه نخبگان بیشترین امتیاز را به دست آورده است و بنابراین راهبرد اصلی ما در این تحقیق خواهد بود. همچنین راهبرد دوم امتیازی نزدیک دارد.

پیشنهادهایی برای آینده

با توجه به پروتکل‌های ارائه‌شده توسط دیگران و پروتکل‌های ارائه‌شده در این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت در سال‌های اخیر توجهات زیادی توسط سازمان‌های سرمایه‌گذار و محققان به تله پورتیشن و رمزنگاری کوانتومی صورت گرفته است. چراکه در کنار تحقیقات نظری کشورهای پیشرو در حال آزمایش‌های این زمینه هستند. لذا باید با توجه به پیشرفت علم و توجه به این زمینه در آینده به پروتکل‌های بیشتری نوجه کرد؛ بنابراین به نظر می‌رسد بررسی پروتکل‌های زیر دارای اهمیت فراوان باشند.

۱. بررسی پروتکل‌هایی در کانال ۹ کیو بیتی و ارسال هم‌زمان حالت‌های برون، حالت‌های W و ... که ازلحاظ دوام در یک فضای نویزی و مقایسه و بهبود نسبت به سایر پروتکل‌ها بازدهی بهتری دارند
۲. تله پورتیشن دوطرفه باقابلیت ارسال n کیو بیت در یک کانال ۹ و ۱۶ کیو بیتی

ایجاد زیرساخت‌های لازم در کنار تدوین برنامه جامع جهت اجرای پروژه مخابرات کوانتومی

به‌جز چند آزمایش موفق توسط
کشورهای پیشرو تاکنون بیشتر زمینه مخابرات کوانتومی نظری بوده است (گرچه این حوزه دارای حساسیت بوده و غالب کشورها برنامه‌های خود در مرحله عملیات را اعلام نمی‌کنند.) تحقق تجربی مخابرات کوانتومی نیازمند وجود یک برنامه قابل‌اجرا است. لذا راه‌اندازی و ایجاد زیرساخت‌های فناوری کوانتومی در کنار تدوین برنامه جامع جهت پیشرفت و نیل به اهداف آن لازم و ضروری

است که به نظر در آینده از الزامات در کشور خواهد بود.

مطالعه و بررسی پروتکل‌های بیشتر در تله پورتیشن و رمزنگاری کوانتومی که پایاهای اصلی مخابرات کوانتومی هستند.

		مناسب بودن	عملی بودن	قابل‌پذیرش بودن	سازگاری با سیاست‌ها	تناسب داخلی روش و هدف	تناسب داخلی روش و منابع
راهبرد ۱	تدوین برنامه جامع جهت پیشرفت اهداف فناوری ارتباطات کوانتومی در داخل کشور	4.3	4.1	3.7	3.9	3.6	3.7
راهبرد ۲	ایجاد زمینه همکاری نخبگان و خبرگان و ارتباط با دانشگاه‌ها و مؤسسات کشورهای پیشرو	4.1	3.5	3.7	3.7	3.6	3.4

. مراجع

[1]mouhamad Nezhad, sh. ICOP 2007, 6-8 February 2007, ITRC, https://civilica.com/doc/52721/ (In Persian)

Isapour, R. and Naseri. M. https://civilica.com/doc/403647/ (In Persian)

[2] Golestani, Ali, Mohammadpour, Kamal, Habibi Bastami, Ali. Electronic and Cyber Defense, 2015; 3 (2): (In Persian)

[3] Sayed Nasibollah Dousti Motlagh. Electronic and Cyber Defense, 9, 2, 1400, 29-49. (In Persian)

Aris Aghanians; Sayed Nasibollah Dousti Motlagh. Electronic and Cyber Defense, 9, 1, 1400, 125-136. (In Persian)

[4] Charles, G. B. Bennet, H. "Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing", in Proceeding of IEEE International Conference on Computer System and Signal Processing, New York, pp. 175-179, 1984.

Ekert, A. K. "Quantum cryptography based on Bell's theorem", Phys. Rev. Lett. vol. 67, No. 6, 1991.

Moore, G. E. "Cramming more components onto integrated circuits", Electronics Magazine, vol. 38, 1965.

Nielsen, M. A. Chuang, I. L, "Quantum computation and quantum information", Cambridge university press, 2001.

[5] Spiller, T. P. Munro, W. Barrett, S. Kok, P. "An introduction to quantum information processing: applications and realizations", Contemporary Physics, vol. 46, pp. 407-436, 2005.

[6] Marinescu, D. C. Marinescu, G. M. “Approaching quantum computing”, Prentice Hall, 2004.

[7] Nakahara M. Ohmi T. “Quantum computing”, CRC Press, 2008.

[8] Feynman, R. P. "Simulating physics with computers", International Journal of Theoretical Physics, vol. 21, pp. 467-488, 1982.

[9] Shor, P. W. "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring", In Foundations of Computer Science, 1994 Proceedings. 35th Annual Symposium on, pp. 124-134. IEEE, 1994.

[10] Grover, L. K. "A Fast quantum mechanical algorithm for database search", In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), pp. 212-219, 1996.

[11] Wiesner, S. Conjugate coding manuscript written crica 1970, Unpublished until it appeared in sigact News, vol. 15, pp. 78-88, 1983.

[12] Bennett. C. H. Brassard, G. "Quantum cryptography: public-key distribution and coin tossing", Proceedings of the International Conference on Computers, Systems and Signal Processing Bangalore press. (India), pp. 175-179, 1984.

[13] Beige, A. Engler, B. G. Kurtsiefer, C. Weinfurter, H. "Secure communication with a publicly known key", Acta Physica Polonica A, vol. 101, pp. 357, 2002.

[14] Lu, H. Guo, G. C. "Teleportation of a two-particle entangled state via entanglement swapping", Phys. Lett. A, vol. 276, pp. 209-2012, 2000.

[15] Long, G. L. Liu, X. S. "Theoretically efficient high-capacity quantum key distribution scheme", Phys. Rev. A, vol. 65, No. 3, 2002.

[16] Houshmand, M. Hosseini-Khayat, S. "An entanglement-based quantum key distribution protocol", International ISC Conference on Information Security and Cryptology, Sep. 2011.

[17] Beige, A. Engler, B. G. Kurtsiefer, C. Weinfurter, H. Secure communication with a publicly known key", Acta Phys. Pol. A, vol. 101, p. 357, 2002.

[18] Deng, F. G. Long, G. L. Secure direct communication with a quantum one time pad", Phys. Rev. A, vol. 69, p. 052319, 2004.

[19] Wang, J. Zhang, Q. Tang, C. J. Quantum secure direct communication based on order rearrangement of single photons", Phys. Lett. A, Vol. 358, pp. 256-258, 2006.

[20] Boström, K. Felbinger, T. "Deterministic secure direct communication using entanglement", Phys. Rev. Lett. vol. 89, p. 187902, 2002.

[21] Deng, F. G. Long, G. L. Liu, X. S. "Two-step quantum direct communication protocol using the Einstein-Podolsky-Rosen pair block", Phys. Rev. A, vol. 68, p. 042317, 2003.

[22] Yan, F. L. Zhang, X. Q. "Secure direct communication using Einstein-Podolsky-Rosen pairs and teleportation", Euro. Phys. J. B, vol. 41, pp.75-78, 2004.

[23] Xia, Y. Fu, C. B. Li, F. Y. Zhang, S. "Controlled secure direct communication by using GHZ entangled state", J. Korean Phys. Soc. vol. 47, pp. 753-756, 2005.

[24] Fu, H. Z. Tian, X. L. Hu, Y. "A general method of selecting quantum channel for bidirectional quantum teleportation", Int. J. Theor. Phys, vol. 53, pp. 1840-1847, 2014.

[25] Zha, X. W. Song, H. Y. Ma, G. L. "Bidirectional swapping quantum controlled teleportation based on maximally entangled five-qubit state", arXiv: 1006.0052 [quant-ph], 2010.

[26] Zha, X. W. Zou, Z. C. Qi, J. X. Song, H. Y. "Bidirectional Quantum Controlled Teleportation via Five-Qubit Cluster State", Int J Theor Phys, vol. 52, pp. 1740–1744, 2013.

[27] Yan, A. "Bidirectional Controlled Teleportation via Six-Qubit Cluster State", Int J Theor Phys, vol. 52, pp. 3870–3873, 2013.

[28] Sun, X. M. Zha, X. W. "A scheme of bidirectional quantum controlled teleportation via six-qubit maximally entangled state", Acta. Photonica. Sinica, vol. 48, pp. 1052-1056, 2013.

[29] Chen, Y. "Bidirectional Controlled Quantum Teleportation by Using Five-Qubit Entangled State", Int J Theor Phys, vol. 53, pp. 1454–1458, 2014.

[30] Duan, Y. J. Zha, X.W. Sun, X.M. Xia, J. F. "Bidirectional Quantum Controlled Teleportation via a Maximally Seven-qubit Entangled State", Int J Theor Phys, vol. 53, pp. 2697-2707, 2014.

[31] Duan, Y. J. Zha, X. W. "Bidirectional Quantum Controlled Teleportation via a Six-qubit Entangled State", Int J Theor Phys, April 2014.