TEEGES

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Review Article (2026) 4(4):100-122

A Review of Simulator Platforms for Quantum Key Distribution Systems

Ali Mehri-Toonabi[1], *PhD*

[1] *Faculty of Applied Sciences, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran*

Abstract:

One of the crucial methods to achieve guaranteed secure communication is the implementation of Quantum Key Distribution (QKD). In fact, QKD, as an interdisciplinary security technology, utilizes the principles of quantum mechanics to share a one-time-pad encryption key. From an architectural perspective, QKD systems are complex and costly physical systems composed of hardware components (including optical, laser, electro-optical, electronic, etc.) and software elements. The design and analysis of these systems require skills and expertise in various fields such as quantum optics, information theory, electrical engineering (electronics and telecommunications), and computer science. One of the fundamental needs related to the practical implementation of a QKD system is using a simulation platform. More precisely, conducting simulations before practical implementation plays a significant role in analyzing and identifying model bottlenecks, mitigating risks, increasing speed, and reducing setup costs. Additionally, by employing simulations, the selection of optimal subsystems is also facilitated. This article presents the requirements and considerations for a mathematical model and a suitable simulation platform for QKD systems. A comprehensive review of various computer software, programming languages, packages, and toolboxes for simulating QKD systems is conducted. The most important virtual labs and quantum games suitable for the education and design of QKD systems are discussed. The advantages and limitations of each laboratory are stated and compared with each other.

Keywords: Quantum cryptography, Simulation of quantum key distribution (QKD), Quantum optics, Teaching quantum mechanics, Quantum game

Received: 05 October 2024
Revised: 03 November 2024
Accepted: 02 December 2024
Corresponding Author: Dr. Ali Mehri-Toonabi, amtoonabi@mut-es.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1185967

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله مروری

مروری بر سکوهای شبیه‌ساز سامانه‌های توزیع کلید کوانتومی

علی مهری تونابی[1]، دکتری

۱- مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی نوین، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده: یکی از روش‌های مهم جهت دستیابی به ارتباط امن تضمین‌شده، به‌کارگیری توزیع کلید کوانتومی (QKD) است. درواقع، QKD به‌عنوان یک فناوری امنیتی میان‌رشته‌ای، از قوانین مکانیک کوانتوم جهت اشتراک‌گذاری کلید رمزنگاری یک‌بارمصرف استفاده می‌کند. از دیدگاه معماری، سامانه‌های QKD، سیستم‌های فیزیکی پیچیده و پرهزینه‌ای هستند که از قطعات سخت‌افزاری (شامل قطعات اپتیکی، لیزری، الکترواپتیکی، الکترونیکی و ..) و مؤلفه‌های نرم‌افزاری تشکیل شده‌اند. طراحی و تحلیل این سامانه‌ها نیاز به مهارت و تخصص در زمینه‌های مختلفی همچون اپتیک کوانتومی، نظریه اطلاعات، مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات) و علوم کامپیوتر دارد. یکی از نیازهای اساسی مرتبط با اجرای چیدمان عملی یک سامانه QKD، استفاده از یک سکوی شبیه‌ساز است. به‌طور دقیق‌تر، انجام شبیه‌سازی قبل از چیدمان عملی، نقش مهمی در تحلیل و استخراج گلوگاه‌های مدل، حذف ریسک، افزایش سرعت و کاهش هزینه برپایی سامانه دارد. علاوه بر این، با به‌کارگیری شبیه‌سازی، امکان انتخاب زیرسامانه‌های بهینه نیز فراهم می‌گردد. در این مقاله، ملزومات و ملاحظات یک مدل ریاضی و یک سکوی شبیه‌ساز مناسب برای سامانه‌های QKD ارائه شده است. یک بررسی جامع بر روی انواع نرم‌افزارهای رایانه‌ای، زبان‌های برنامه‌نویسی، بسته‌ها و جعبه‌ابزارهای شبیه‌سازی سامانه‌های QKD صورت گرفته است. مهم‌ترین آزمایشگاه‌های مجازی و بازی‌های کوانتومی مناسب برای آموزش و طراحی سامانه‌های QKD بیان شده است. مزیت‌ها و محدودیت‌های هر آزمایشگاه بیان و با یکدیگر مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: رمزنگاری کوانتومی، شبیه‌سازی توزیع کلید کوانتومی، اپتیک کوانتومی، آموزش مکانیک کوانتومی، بازی کوانتومی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی مهری تونابی، amtoonabi@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1185967

CC BY

۱- مقدمه

فناوری توزیع کلید کوانتومی[1] (QKD) [۱-۶] یک رویکرد نوین در حوزه ارتباطات است که امنیت آن بر مبنای قوانین پایه‌ای کوانتوم و نه بر مبنای پیچیدگی‌های محاسباتی تضمین می‌شود [۷]. درواقع، QKD به‌عنوان یک فناوری امنیتی نوظهور، به‌منظور اشتراک‌گذاری کلید رمزنگاری یک‌بارمصرف استفاده می‌شود.

دو حوزه QKD و انرژی سبز در نگاه اول ممکن است حوزه‌های جداگانه‌ای به نظر برسند، اما در عصر دیجیتال و با پیشرفت فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر، ارتباطات مهم و معناداری بین این دو به وجود آمده است. دایره این ارتباط به‌قدری گسترش پیدا کرده که اخیراً گرایش جدیدی در تحقیقات مربوط به حوزه QKD، به نام QKD سبز[2] با رویکرد استفاده از معماری‌های منطبق بر انرژی سبز جهت انتقال هم‌زمان اطلاعات کوانتومی و انرژی فوتون‌ها ایجاد شده‌است [۸]. از دیگر کاربردهای QKD در سیستم‌های انرژی سبز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

امنیت در شبکه‌های هوشمند[3] انرژی: شبکه‌های هوشمند از فناوری‌های ارتباطی و اطلاعاتی برای مدیریت کارآمدتر تولید، توزیع و مصرف انرژی استفاده می‌کنند. این شبکه‌ها امکان ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد را فراهم می‌کنند. داده‌های حساس در این شبکه‌ها، مانند میزان تولید و مصرف، فرمان‌های کنترلی و اطلاعات تجاری، باید به‌صورت امن منتقل شوند تا از سوءاستفاده و حملات سایبری در آن‌ها جلوگیری شود. ازآنجاکه QKD امکان ایجاد کانال‌های ارتباطی بسیار امن و مقاوم در برابر استراق سمع و حملات دست‌کاری را فراهم می‌کند، این امنیت بالا می‌تواند در خدمت حفظ پایداری و اعتماد به شبکه‌های هوشمند انرژی قرار گیرد. استفاده از QKD در این ارتباطات می‌تواند امنیت انتقال داده‌ها را تضمین کند، به‌ویژه زمانی که این داده‌ها برای متعادل‌سازی شبکه و مدیریت بار استفاده می‌شوند.

حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی انرژی: با دیجیتالی شدن زیرساخت‌های انرژی، خطر حملات سایبری افزایش یافته است، که این امر می‌تواند به قطع گسترده انرژی یا دست‌کاری در سیستم‌های توزیع منجر شود. با بهره‌گیری از QKD، امنیت ارتباطات به سطحی می‌رسد که هرگونه تلاش برای شنود را قابل‌شناسایی می‌کند. این امر برای حفاظت از زیرساخت‌های انرژی سبز که برای پایداری محیط‌زیست حیاتی هستند، بسیار مهم است.

افزایش بهره‌وری انرژی از طریق فناوری‌های کوانتومی: الگوریتم‌های رمزنگاری سنتی نیاز به محاسبات پیچیده دارند و مصرف انرژی را افزایش می‌دهند. فناوری‌های کوانتومی می‌توانند به کاهش این مصرف کمک کنند. همچنین به‌طورکلی، تحقیقات در زمینه کوانتوم می‌تواند به کشف مواد جدیدی منجر شود که در تولید یا ذخیره‌سازی انرژی سبز کارآمدتر هستند. تعامل بین محققان در زمینه کوانتوم و انرژی سبز می‌تواند راه‌حل‌های جامع‌تری برای چالش‌های فعلی ارائه دهد.

ازلحاظ ساختاری، یک سامانه QKD از سه بخش ارسال‌کننده، کانال ارتباطی (تار نوری [۱۱-۹] یا هوای آزاد [۱۲]) و دریافت‌کننده تشکیل می‌شود. سامانه پیوندی QKD از دو کانال ارتباطی مجزا جهت ارتباط امن بین دو کاربر استفاده می‌کند: یکی کانال کوانتومی که ازآن جهت انتقال اجزاء کلید کوانتومی کدگذاری شده توسط خواص فوتونی مشخص، همانند قطبش[4] فوتون [۱۳,۱۴]، فاز[5] فوتون [۱۵] و یا ترکیب آن‌ها [۱۸-۱۶] استفاده می‌شود و دیگری کانال کلاسیک (عمومی) که جهت تائید تبادل بدون نقص اجزاء کلید و انتقال داده‌های رمزگذاری شده، استفاده می‌گردد [۱۹,۲۰].

هرچند تحلیل‌های نظری بیانگر امنیت تضمین‌شده و بدون قید و شرط برای سامانه‌های ارتباطی مبتنی بر رویکرد QKD می‌باشد [۲۱]، بااین‌وجود، متأسفانه به دلیل محدودیت‌های فناوری در حوزه قطعات و تجهیزات کوانتومی، ساخت یک سامانه ایده‌آل مبتنی بر مبانی نظری عملاً غیرممکن است [۲۴-۲۲]. بنابراین درواقع هر پیاده‌سازی از سامانه‌های QKD تنها یک تقریب از دستگاه ایده‌آل مورد انتظار در رویکردهای نظری خواهد بود. از طرفی، طراحی عملی یک سامانه QKD با توجه به نیازها و کاربردهای مختلف مورد انتظار، هزینه‌های تأمین قطعات سخت‌افزاری، هزینه‌های آزمودن سامانه و موارد مختلف دیگر، یک سؤال اساسی در برابر محققان این حوزه قرار داده است: «با توجه به محدودیت‌ها و موانع فوق‌الذکر، چگونه می‌توان یک سامانه QKD مناسب با رویکرد موردنظر را طراحی و ارزیابی کرد و آن را توسعه داد؟»

دو پارامتر اصلی خروجی هر سامانه QKD عبارت‌اند از: نرخ تولید کلید و مسافت انتقال امن [۲۸-۲۵]. در حالت کلی، دو روش به‌منظور دستیابی به مقادیر بهینه این پارامترها، بر اساس انتخاب پارامترهای ورودی آن (شامل مشخصه‌های چشمه نوری، کانال

کوانتومی و مشخصه‌های آشکارساز کوانتومی) وجود دارد: (۱) اجرای متعدد سامانه QKD به‌طور تجربی و تغییر پارامترها و سپس بهینه‌سازی آن‌ها. بدیهی است که این روش هزینه گزافی خواهد داشت. (۲) اجرای نرم‌افزاری سامانه توسط شبیه‌سازی عملکرد آن و پیش‌بینی و بهینه‌سازی مشخصات قطعات به‌منظور دستیابی به نرخ و مسافت تبادل کلید مطلوب.

با توجه به محدودیت‌های فناوری، پیچیدگی‌های ذاتی نظری و همچنین نوظهور بودن این دانش، تمرکز واقعی مجامع علمی، صنعتی و دانش‌بنیان مرتبط، بیشتر بر پیش‌طراحی و ارائه شبیه‌سازهای نرم‌افزاری برای این سامانه‌ها جهت تحلیل دقیق رفتار آن‌ها و استخراج ویژگی‌ها و ملزومات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط، قبل از طراحی و ساخت نمونه‌های (حتی در مقیاس آزمایشگاهی) می‌باشد. اجرای موفق این ایده، علاوه بر دستاوردهای آموزشی قابل‌توجه، می‌تواند در طراحی و مهندسی سامانه‌های ارتباطی و مخابراتی امن، با لحاظ کردن همه شرایط، ازجمله وجود انواع نویز محیطی، ناکامل بودن قطعات و انواع مداخله‌های دشمن، با کمترین هزینه زمانی و مالی، بسیار مفید باشد. بررسی اقدامات انجام‌گرفته در این راستا، موضوع این مقاله است.

ساختار این مقاله بدین‌صورت است: در بخش دوم، الزامات و ملاحظات شبیه‌سازی سامانه‌های فیزیکی، ازجمله سامانه‌های QKD، بیان شده است. در بخش سوم، چارچوب مدل‌بندی ریاضی در شبیه‌سازی سامانه‌های QKD ارائه شده است. در بخش چهارم، انواع زبان‌های برنامه‌نویسی، بسته‌ها و جعبه‌ابزارهای متداول و مطرح در زمینه شبیه‌سازی سامانه‌های کوانتومی (ازجمله سامانه‌های QKD) معرفی و بررسی شده است. در بخش پنجم، دو نمونه از سامانه‌های شبیه‌ساز کوانتومی که به‌عنوان آزمایشگاه مجازی اپتیک کوانتومی و فناوری‌های مرتبط با آن به کار می‌روند، معرفی و جزییات مربوط به نحوه عملکرد آن‌ها تشریح شده است. نهایتاً در بخش هفتم، نتایج مقاله بیان شده است.

۲- الزامات و ملاحظات شبیه‌سازی سامانه‌های فیزیکی

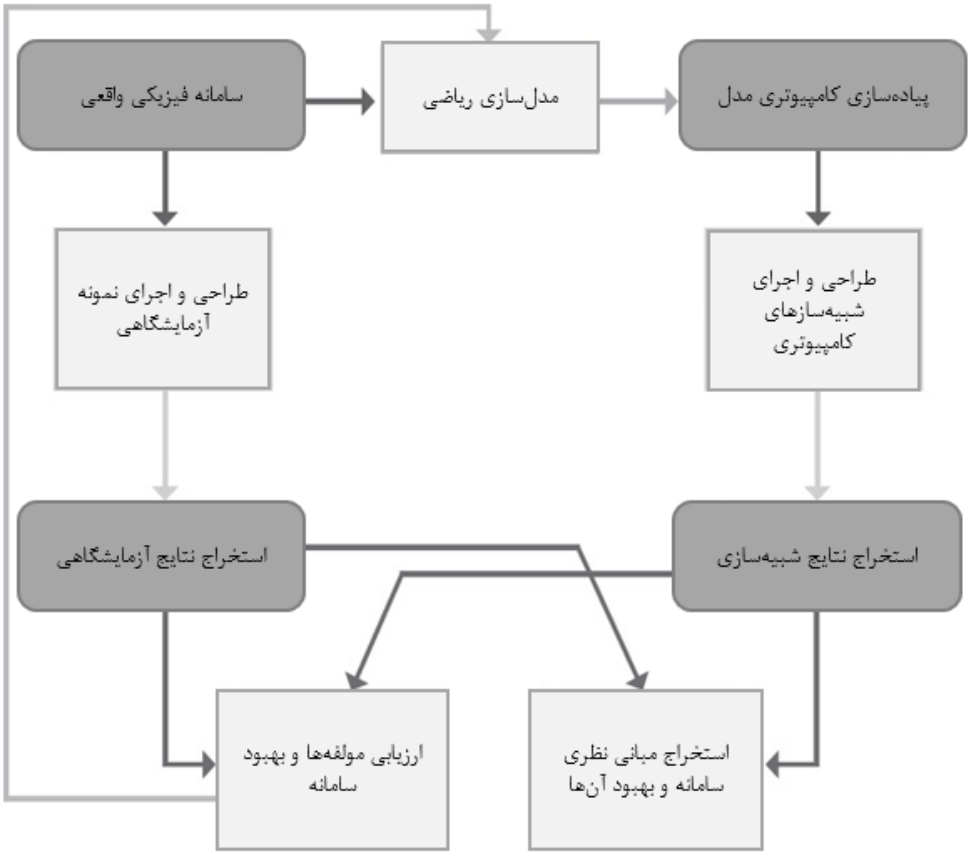
درک و آموزش مکانیک کوانتومی و علوم و فناوری‌های مرتبط با آن کاملاً دشوار است. در حالت ایده‌آل، می‌توان به آزمایشگاه رفت و پدیده‌های کوانتومی را دست‌اول کشف کرد، اما این همیشه عملیاتی نیست. یک راه‌حل بالقوه، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی با اطمینان بالا است که با کمک آن‌ها بتوان دنیای کوانتومی را کشف کرد. چنین رویکردی درواقع می‌تواند مزایای عملی و آموزشی زیادی داشته باشد. شبیه‌سازها باید تعادل درستی بین سادگی و واقع‌گرایی برقرار کنند و درعین‌حال به کاربران آزادی کافی برای کاوش بدهند. شبیه‌سازی‌هایی که بیش‌ازحد ایده‌آل یا انتزاعی هستند ممکن است بینش‌های عمیقی که ممکن است هنگام کار با آزمایش‌های واقعی به دست آید را از بین ببرند.

یکی از مهم‌ترین رویکردها در تحلیل پدیده‌های طبیعی و رخدادهای فیزیکی، ارائه پیش‌سامانه‌های شبیه‌سازی‌شده از مدل واقعی آن‌ها است. در طراحی این شبیه‌سازها، تلاش می‌شود تا حد ممکن از در نظر گرفتن برخی مؤلفه‌ها و اجزاء غیرضروری مدل واقعی اجتناب شود. این رویکرد هرچند سبب عدم قطعیت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقابل مدل واقعی می‌شود، بااین‌وجود هزینه‌های محاسباتی، پیچیدگی‌های مدل‌بندی و پردازشی و همچنین زمان اجرا را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. در شکل (۱) یک نمای کلی از نحوه مواجهه با پیاده‌سازی و تولید یک سامانه پیچیده فیزیکی در حالت کلی ارائه شده است. مدل‌سازی مناسب ریاضی و همچنین طراحی و پیاده‌سازی دقیق نرم‌افزاری از مهم‌ترین ملزومات ارائه یک شبیه‌ساز رایانه‌ای مطلوب در پیش‌طراحی سامانه‌های فیزیکی است.

می‌توان الزامات یک سکوی شبیه‌ساز سامانه‌های فیزیکی را از نظرگاه کاربر نهایی در چهار حوزه عمده زیر طبقه‌بندی کرد که هرکدام دارای زیرمجموعه‌ها و معیارهای مخصوص به خود است:

الف) حوزه فنی سامانه:

- **میزان وفاداری نسبت به مدل واقعی:** یکی از مهم‌ترین الزامات فنی یک شبیه‌ساز مناسب، میزان تطابق فنی آن با کلیت مدل واقعی، زیرسامانه‌ها و اجزاء آن است. این مورد باید در طراحی سامانه‌های شبیه‌ساز موردتوجه دقیق قرار گیرد تا ازیک‌طرف با اجتناب از پرداختن به مؤلفه‌های غیرضروری سبب کاهش پیچیدگی مدل شود، از طرف دیگر بیشترین انطباق را با مدل واقعی داشته باشد.
- **سرعت اجرای شبیه‌ساز:** ازآنجاکه سامانه‌های فیزیکی معمولاً سامانه‌های حجیم و با پیچیدگی‌های زمانی و محاسباتی بالا هستند، بنابراین یکی از مؤلفه‌های فنی مهم در طراحی شبیه‌سازهای آن‌ها، سرعت بالا در اجرا و پیاده‌سازی است.



شکل (۱): نمای کلی پیش‌طراحی و اجرای یک سامانه فیزیکی واقعی

- **رابط زبان برنامه‌نویسی عمومی:** یکی دیگر از مؤلفه‌های فنی مؤثر در طراحی شبیه‌سازهای کارا، قابلیت استفاده از رابط‌های زبان‌های برنامه‌نویسی متنوع (ازجمله C، C++، جاوا[۶] و پایتون[۷]) جهت استفاده از مزایا و قابلیت‌های منحصربه‌فرد هریک از این زبان‌های برنامه‌نویسی است.
- **انعطاف‌پذیری در دریافت داده‌ها:** یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم در شبیه‌سازها، قابلیت و انعطاف‌پذیری سامانه در دریافت انواع داده و اطلاعات ورودی توسط کاربر با فرمت‌های مختلف و از منابع و پایگاه متنوع است.
- **قابلیت ارتقاء توسط کاربر:** ازآنجاکه سامانه‌های کوانتومی و دانش مرتبط با آن‌ها نوظهور و مدرن هستند، لذا معرفی پروتکل‌های جدید و ارتقای زیرساخت‌های سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و الگوریتم‌های محاسباتی مرتبط با آن‌ها به‌صورت روزانه و با شتاب فراوان صورت می‌گیرد. بنابراین یک سامانه شبیه‌ساز مناسب باید به‌گونه‌ای طراحی شود که امکان ارتقاء آسان، سریع و مؤثر زیرسامانه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط با آن توسط کاربر فراهم باشد. یک سامانه شبیه‌ساز ایده‌آل باید به‌گونه‌ای طراحی شود که یک کاربر غیرحرفه‌ای و ناآشنا با اصول برنامه‌نویسی رایانه‌ای نیز به‌آسانی به اجزاء زیرسامانه دسترسی داشته باشد و بتواند آن‌ها را مورد بازبینی قرار دهد.
- **قابلیت دسترسی به نتایج و تحلیل‌ها:** یکی از الزامات مهم در شبیه‌سازهای فیزیکی، قابل‌دسترس بودن نتایج و تحلیل‌ها در هر زمان می‌باشد.

ب) کاربردپذیری:

منظور از کاربردپذیری در حوزه مدل‌بندی ریاضی و شبیه‌سازی، میزان سهولت، سرعت و شهودی بودن عملیات با استفاده از مدل ریاضی معرفی‌شده یا سامانه شبیه‌سازی‌شده است. کاربردپذیری یک سامانه، ترکیبی از عوامل ساختاری و طراحی است که با مدنظر قرار دادن توانایی کاربر برای انجام موفق وظایف، امکان مواجهه آسان او با اشکالات سامانه را فراهم می‌آورد. برخی از

مهم‌ترین زیرمجموعه‌ها و معیارهای مرتبط با کاربردپذیری یک سامانه شبیه‌ساز فیزیکی عبارت‌اند از:

- **تحلیل آماری:** یک سامانه شبیه‌ساز کارا باید دارای زیرالگوریتم‌های آماری جهت ارائه نتایج و تحلیل‌های قابل‌درک، به‌صورت گراف‌ها و نمودارهای آماری به‌منظور تحلیل آسان نتایج باشد.
- **رابط گرافیکی:** یک سامانه شبیه‌ساز کارا باید دارای رابط گرافیکی جهت کاربری آسان باشد.
- **دفترچه راهنما:** بدون شک از مهم‌ترین معیارهای کاربردپذیری یک سامانه شبیه‌ساز، داشتن مستندات و دفترچه راهنمای کاربر می‌باشد که مشخصات فنی و نحوه کار با سامانه را ارائه دهد.
- **گزارش عملکرد:** در یک سامانه شبیه‌ساز کارا می‌بایست امکان بررسی عملکرد سامانه توسط کاربر در هرلحظه فراهم باشد. برای این منظور باید امکان دریافت گزارش عملکرد از سامانه در هر زمان فراهم باشد.
- **مدیریت اطلاعات خروجی:** سامانه شبیه‌ساز باید قادر به ارائه گزارش مربوط به نتایج و اطلاعات خروجی در هر فرمت موردنیاز کاربر باشد.
- **امکان ارتباط با طراحان:** یکی از ملزومات سامانه‌های شبیه‌ساز کاربردپذیر، امکان در دسترس بودن و ارتباط با طراحان سامانه جهت پشتیبانی فنی و آموزشی از آن است.

ج) انعطاف‌پذیری:

برخی از ملاک‌ها و زیرمجموعه‌های مرتبط با انعطاف‌پذیر بودن یک سامانه شبیه‌ساز فیزیکی عبارت‌اند از:

- **قابلیت ماژولار و ترکیب‌پذیری:** یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های سامانه‌های شبیه‌ساز فیزیکی، امکان طراحی زیر ماژول‌های مستقل و ترکیب آن‌ها با یکدیگر جهت طراحی زیرسامانه‌های بزرگ‌تر است. این قابلیت باعث افزایش کارایی، قدرت، انعطاف‌پذیری و سرعت ارتقاء سامانه شبیه‌ساز می‌شود.
- **قابلیت پیکربندی مجدد**[۸]: از دیگر مؤلفه‌های مؤثر در انعطاف‌پذیری شبیه‌سازها، قابلیت پیکربندی مجدد زیرسامانه‌ها توسط کاربر، جهت بررسی و تحلیل نتایج با تغییر پارامترهای مدل است.
- **قابلیت جابجایی:** یکی از شاخص‌های مهم در انعطاف‌پذیری مناسب یک سامانه شبیه‌ساز، امکان استفاده و به‌کارگیری آن بر روی دستگاه‌های سخت‌افزاری و ماشین‌های محاسباتی مختلف است.

د) هزینه کل مالکیت[۹]:

یکی از زیر حوزه‌های اصلی که باید در طراحی سامانه‌های شبیه‌ساز فیزیکی به‌شدت مورد توجه قرار گیرد، مفهوم هزینه کل مالکیت (TCO) است که اصطلاحاً شامل هزینه خرید، راه‌اندازی و نگهداری می‌باشد و تمام هزینه‌های مربوط به تدارک، اجرا و مالکیت سیستم را دربر می‌گیرد. توجه شود که معمولاً هزینه‌های مرتبط با آموزش، ارتقاء، مدیریت اجرایی و قیمت خرید تدارکات نیز از زیرمجموعه‌های هزینه کل مالکیت است. برخی از مهم‌ترین معیارها و زیرمجموعه‌های مرتبط با TCO عبارت‌اند از:

- **سیستم‌عامل موردنیاز**: یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در کاهش هزینه‌ها، طراحی سامانه‌های شبیه‌ساز باقابلیت پیاده‌سازی و اجرا بر روی انواع سیستم‌عامل‌ها است.
- **نرم‌افزارهای کاربردی مورداستفاده:** یک شاخص مهم در طراحی سامانه‌های شبیه‌ساز کارا، امکان طراحی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزارها و برنامه‌های رایانه‌ای منبع‌آزاد و رایگان است.
- **در دسترس‌بودن مستندات فنی:** امکان دسترسی آزاد به مستندات و گزارش‌های فنی موردنیاز جهت طراحی زیرسامانه‌های مرتبط، به‌منظور استفاده در ارتقاء و تعمیر سامانه، یک شاخص مهم در طراحی سامانه‌های شبیه‌ساز کارا است.
- **قابلیت پشتیبانی سامانه:** یک سامانه کارا باید دارای یک گروه پشتیبانی قوی جهت رفع اشکالات احتمالی، تعمیر و توسعه سامانه باشد.
- **هزینه زیرسامانه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط**
- **هزینه پایین مجوز (لایسنس) زیرسامانه‌ها**
- **هزینه پایین آموزش**

۳- چارچوب مدل‌بندی ریاضی در شبیه‌سازی سامانه‌های QKD

هرچند استفاده از شبیه‌سازها قبل از طراحی فیزیکی یک چیدمان QKD، به میزان قابل‌توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بااین‌حال، عدم توجه کافی به زیرمولفه‌های اصلی مدل واقعی ممکن است سبب کسب نتایج و تحلیل‌های غیرواقعی و گمراه‌کننده شود. با توجه به ماهیت سامانه‌های QKD، انتخاب و استخراج یک مدل ریاضی مناسب و طراحی شبیه‌ساز مبتنی بر آن بسیار حائز اهمیت است. به‌عنوان‌مثال، در فرایند اجرای یک سامانه QKD واقعی، صدها میلیون پالس نوری تولید و در طول سامانه انتشار می‌یابد. بنابراین اگر در سامانه شبیه‌ساز، هر پالس به‌صورت واقعی و توسط یک موج زمان-پیوسته نمایش داده شود، پیچیدگی‌های محاسباتی زیاد آن عملاً اجرای فرایند را در یک زمان منطقی غیرممکن می‌سازد. برای رفع این مشکل، می‌توان پالس‌های نوری را به‌صورت تقریبی و مبتنی بر مؤلفه‌ها و اشیاء پارامتری و انتزاعی مدل واقعی مدل‌بندی کرد و نمایش داد. در این صورت، سامانه در یک زمان منطقی و با پیچیدگی محاسباتی مناسب قادر به انجام فرایندها و تبدیلات ساده، مانند میرایی و یا احیای موج‌های پالس نوری زمان–پیوسته و یا تبدیلات پیچیده‌تری همانند تداخل امواج خواهد بود. بنابراین از دیدگاه مدل‌بندی ریاضی، برای مدل‌سازی سامانه‌های QKD، به شبیه‌سازهای رویدادمحور[۱۰] مبتنی بر پارامترهای مستخرج از مدل واقعی نیاز است.

در دانش مدل‌سازی ریاضیاتی، به‌منظور استخراج یک مدل ریاضی مناسب جهت توصیف یک پدیده فیزیکی و یا طبیعی، باید نوع رفتار و مؤلفه‌های پدیده واقعی به‌درستی شناسایی و استخراج شود. مدل‌های ریاضی جهت توصیف پدیده‌ها و ساختارهای فیزیکی به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۲۹]:

الف) پویا یا ایستا:

سامانه‌های پویا، سامانه‌هایی هستند که در آن‌ها مقادیر خروجی هر مرحله وابسته به نتایج گام قبل است، درحالی‌که در سامانه‌های ایستا، نتایج هر گام مستقل از گام قبل و صرفاً با توجه به موقعیت آن مرحله استخراج می‌شود. سامانه‌های QKD مدل‌های پویا هستند.

ب) پایا یا تغییرپذیر نسبت به زمان:

یک سامانه پایا نسبت به زمان به سامانه‌ای گفته می‌شود که رفتار و نوع پاسخ آن به یک ورودی مشخص، به زمان وابسته نیست. با این تعریف، سامانه‌های QKD واقعی نسبت به زمان تغییرپذیر هستند. بااین‌وجود، می‌توان این رفتار زمانی را با استفاده از بازه‌های زمانی گسسته بسیار کوتاه که در حین آن‌ها سیستم تغییر بسیار کمی دارد، اصلاح کرد. بنابراین در طراحی سامانه‌های شبیه‌ساز QKD، سیستم در طول هر بازه زمانی گسسته به‌صورت پایا بازمان در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که رفتار آن بین بازه‌های زمانی تغییر می‌کند.

ج) خطی یا غیرخطی:

در سامانه‌های خطی مقادیر خروجی یک تابع خطی از ورودی‌ها است. در نقطه مقابل، خروجی سامانه‌های غیرخطی، تابع غیرخطی از مقادیر ورودی است. ازآنجاکه بسیاری از پارامترهای اساسی مدل‌بندی در سامانه‌های کوانتومی رفتار غیرخطی دارند، بنابراین سامانه‌های QKD در دسته سیستم‌های غیرخطی قرار می‌گیرند.

د) رویداد محور یا زمان محور:

در اصول مدل‌بندی ریاضی و شبیه‌سازهای عددی، با توجه به ساختار و ماهیت رفتار پدیده فیزیکی حاکم، دو رویکرد کلی رویداد محور و زمان محور ارائه می‌شود. در شبیه‌سازهای رویداد محور، رفتار سیستم به‌صورت توالی زمانی از رخداد حوادث و پیشامدها توصیف می‌گردد. درواقع هر رویداد در یک‌لحظه زمانی رخ می‌دهد و سبب تغییر در حالت سیستم می‌شود. ازآنجاکه انتشار پالس‌های نوری در سامانه QKD را می‌توان توسط یک دنباله از رویدادهای گسسته توصیف کرد، بنابراین رویکرد مورداستفاده در طراحی سامانه‌های QKD از نوع رویداد محور خواهد بود.

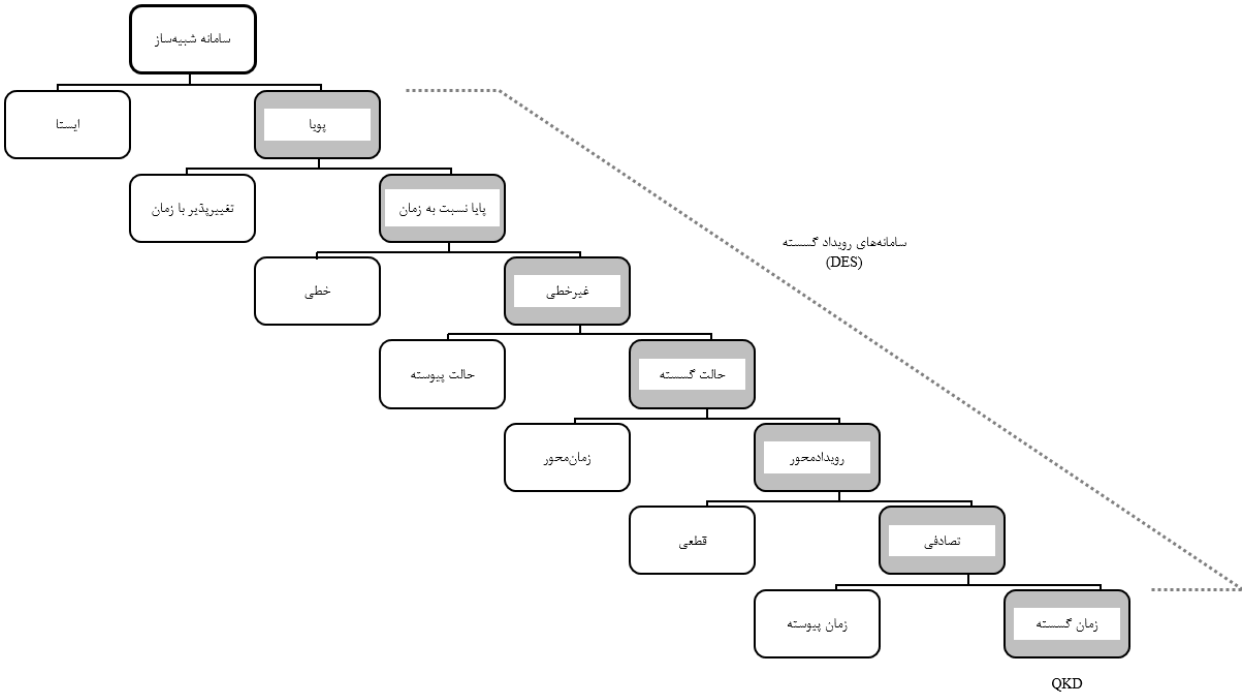
ه) تصادفی یا قطعی:

مدل‌بندی ریاضی و شبیه‌ساز مبتنی بر آن، با توجه به ماهیت رفتار پدیده می‌تواند به دودسته عمده قطعی و یا تصادفی طبقه‌بندی شود. در مدل‌های تصادفی، یک یا چند پارامتر و متغیر اصلی مدل، غیرقطعی و تصادفی است. به‌وضوح سامانه‌های QKD تصادفی هستند.

و) گسسته یا پیوسته:

مدل‌های ریاضی متناظر با پدیده‌های فیزیکی می‌توانند نسبت به بعد زمان، گسسته و یا پیوسته باشند. در مدل‌های گسسته، مدل دارای یک یا چند پارامتر اساسی است که مقادیر آن‌ها به‌صورت نمونه‌هایی سنجش شده، در زمان‌های خاص و به‌صورت گسسته در دسترس هستند. هرچند ماهیت رفتاری سامانه‌های واقعی QKD زمان پیوسته است، بااین‌وجود به‌منظور افزایش کارایی و تحلیل و پردازش سریع سامانه، معمولاً این سامانه‌ها به‌صورت مدل‌های زمان گسسته شبیه‌سازی می‌شوند.

طبقه‌بندی سامانه‌های شبیه‌ساز بر اساس موارد ذکرشده، در شکل (۲) نشان داده‌شده است. با توجه به مجموعه این موارد، می‌توان گفت که بهترین و مناسب‌ترین رویکرد جهت مدل‌بندی ریاضی و ارائه یک شبیه‌ساز دقیق از سامانه‌های واقعی QKD، طراحی یک مدل ریاضی پویا، پایا نسبت به زمان، غیرخطی، رویداد محور، تصادفی و زمان گسسته است. معمولاً مدل‌های ریاضی با این نوع ویژگی‌ها را سامانه‌های رویداد گسسته[۱۱] (DES) می‌نامند.



شکل (۲): طبقه‌بندی سامانه‌های شبیه‌ساز [۲۹]

۴- زبان‌های برنامه‌نویسی و نرم‌افزارهای قابل‌استفاده در شبیه‌سازی سامانه‌های کوانتومی

در این بخش، انواع رویکردها، زبان‌های برنامه‌نویسی، بسته‌ها و جعبه‌ابزارهای متداول و مطرح در زمینه شبیه‌سازی سامانه‌های کوانتومی، ازجمله سامانه‌های QKD معرفی و بررسی شده است.

الف) جعبه‌ابزارهای مبتنی بر متلب[۱۲]:

در سال‌های اخیر، در موارد متعدد از زبان برنامه‌نویسی متلب جهت طراحی پروتکل‌ها و سامانه‌های QKD در مقیاس‌های آموزشی و آزمایشگاهی استفاده شده است. یکی از ابتدایی‌ترین شبیه‌سازهای QKD انجام‌شده با زبان برنامه‌نویسی متلب، توسط هیو[۱۳] و ژیائو[۱۴] جهت شبیه‌سازی پروتکل BB84 در یک کانال برهم‌زننده قطبش ارائه شده است [۳۰] که نتایج شبیه‌سازی آن‌ها بر پیش‌بینی‌های تحلیلی و نظری مورد انتظار منطبق است.

تاکنون چارچوب‌ها، جعبه‌ابزارها و پلتفرم‌های متنوعی مبتنی بر نرم‌افزار متلب جهت انجام محاسبات و شبیه‌سازهای تخصصی در حوزه کوانتوم معرفی شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- **QCFlibrary**[۱۵]:

یک جعبه‌ابزار رایگان است که جهت اجرای ساده و تجسم مطلوب عملگرها و توابع کوانتومی در حوزه محاسبات و نظریه اطلاعات کوانتومی طراحی‌شده است.

- **QETLAB**[16]:

یک جعبه‌ابزار و پلتفرم رایگان است که جهت بررسی نظریه درهم‌تنیدگی کوانتومی طراحی‌شده و به‌طور مداوم توسط گروه تحقیقاتی تولیدکننده ارتقاء می‌یابد[۱۷]. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های فراوان در طراحی و تحلیل انواع سامانه‌های کوانتومی است.

- **Quack!**[18]:

یک جعبه‌ابزار رایگان است که جهت طراحی و شبیه‌سازی محاسبات کوانتومی در رایانه‌های کوانتومی معرفی و توسعه داده‌شده است.

- **Qubit4matlab**[19]:

یک جعبه‌ابزار رایگان است که جهت معرفی و تجسم‌سازی عملگرها و توابع مرتبط با اپتیک کوانتومی و نظریه اطلاعات کوانتومی معرفی‌شده است [۳۱].

- **Qotoolbox**[20]:

یک جعبه‌ابزار کامل و توسعه‌یافته، شامل انواع عملگرها و زیرساخت‌های لازم جهت شبیه‌سازی اپتیک کوانتومی، محاسبات و ارتباطات کوانتومی است. دسترسی به این جعبه‌ابزار رایگان بوده و به‌سادگی می‌توان بسیاری از سامانه‌های کوانتومی، ازجمله سامانه‌های QKD را با استفاده از دستورات آن شبیه‌سازی کرد.

- **A Quantum Optics Toolbox for Matlab 5**[21]:

یک جعبه‌ابزار فراگیر بوده که انواع عملگرها و روابط موردنیاز جهت طراحی سامانه‌های اپتیک کوانتومی را معرفی کرده است. این جعبه‌ابزار به‌وفور در طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های ارتباط کوانتومی مورداستفاده قرارگرفته است.

هرچند متلب از پرطرفدارترین زبان‌های برنامه‌نویسی در دانشگاه‌ها و سایر مراکز آموزشی است، بااین‌وجود چون به معنای واقعی یک کامپایلر نبوده و درواقع یک مفسر رایانه‌ای است، بنابراین در مواجهه با ساختارهای بزرگ و حجیم (ازجمله نمونه‌های کاربردی سامانه‌های QKD)، ضعیف و در مواقعی غیرقابل استفاده عمل می‌کند. به‌منظور شبیه‌سازی سامانه‌های QKD در مقیاس کاربردی و عملیاتی، می‌بایست از زبان‌های برنامه‌نویسی کامپایلر استفاده کرد. یکی از قدرتمندترین زبان‌های برنامه‌نویسی که برای این هدف مناسب است، زبان C یا نسخه توسعه‌یافته و شیءگرای آن، یعنی C++ می‌باشد.

ب) جعبه‌ابزارهای مبتنی بر C (C++):

در سال‌های اخیر از زبان‌های C و C++ به‌وفور در طراحی و شبیه‌سازی انواع محاسبات کوانتومی، زیرسامانه‌های نظریه اطلاعات کوانتومی و ارتباطات کوانتومی (ازجمله سامانه‌های QKD) استفاده شده است. در [۳۲] از یک رویکرد برنامه‌نویسی مبتنی بر C به‌منظور پیاده‌سازی نرم‌افزاری پروتکل BB84 در رایانه‌های استاندارد و کلاسیک استفاده شده است. همچنین در [۳۳]، شبیه‌سازی رفتار پروتکل BB84 در یک کانال کوانتومی دومسیره با استفاده از یک رویکرد برنامه‌نویسی پیشرفته شیءگرا مبتنی بر C++ ارائه شده است.

ازجمله مهم‌ترین جعبه‌ابزارها و بسته‌های نرم‌افزاری رایگان در حوزه کوانتومی که مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی C یا C++ هستند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **QuEST**[22]:

یک بسته نرم‌افزاری متن‌باز و رایگان مبتنی بر کتابخانه‌های C++/C است که از یک رویکرد محاسباتی فوق‌پیشرفته در بستر پردازنده‌های گرافیکی جهت طراحی مدارهای کوانتومی، بردارهای حالت و ماتریس‌های چگالی استفاده می‌کند. گزارش فنی مرتبط با این بسته نرم‌افزاری در [۳۴] ارائه شده است.

- **Quantum++**[23]:

یک بسته نرم‌افزاری جامع در حوزه نظریه و محاسبات کوانتومی است که به‌صورت متن‌باز و رایگان و مبتنی بر کتابخانه‌های C++/C طراحی‌شده است.

- **Libquantum**[24]:

یک کتابخانه متن‌باز مبتنی بر C است که جهت انجام انواع محاسبات کوانتومی طراحی شده است.

- **Quantum Computer Language**[25]:

یک زبان برنامه‌نویسی توسعه‌یافته مبتنی بر C است که به‌طور تخصصی جهت اجرای انواع محاسبات و عملیات کوانتومی طراحی شده است.

- **QuCoSi**[26]:

یک کتابخانه متن‌باز مبتنی بر C++ است که جهت طراحی و شبیه‌سازی انواع سامانه‌های کوانتومی معرفی شده است.

- **Quantum Network Computing**[27]:

یک نرم‌افزار توسعه‌یافته بر پایه کتابخانه‌های C است که قابلیت طراحی انواع شبیه‌سازهای کوانتومی را دارا می‌باشد.

- **OMNeT++**[28]:

یک نرم‌افزار متن‌باز و رایگان مبتنی بر C++ است که جهت شبیه‌سازی انواع شبکه به کار می‌رود. همان‌طور که اشاره شد، سامانه‌های QKD از دیدگاه مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی، از دسته مدل‌های DES هستند. یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سامانه‌های DES، نرم‌افزار OMNeT++ است. این نرم‌افزار ابزارها، توابع و مجموعه دستورات سودمندی برای توصیف ساختار یک سیستم واقعی شبکه ارتباطی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. یک مدل شبیه‌سازی‌شده در OMNeT++ شامل مجموعه‌ای از ماژول‌های خاص است که به‌صورت گرافیکی نشان داده می‌شوند و هر ماژول می‌تواند خود شامل ماژول دیگری نیز باشد. از طرفی، در این نرم‌افزار، محدودیتی در رابطه با انتخاب تعداد ماژول‌ها وجود ندارد. بنابراین می‌تواند ساختار یک سیستم شبکه واقعی را به‌صورت گرافیکی به‌خوبی نشان دهد. در سال‌های اخیر، از OMNeT++ در شبیه‌سازی انواع پدیده‌های مدل‌سازی ترافیک شبکه، مدل‌سازی پروتکل‌ها، مدل‌سازی شبکه‌های صف‌بندی، مدل‌سازی میکرو پردازنده‌ها و دیگر سامانه‌های سخت‌افزاری شبکه، ارزیابی عملکرد سیستم‌های نرم‌افزاری پیچیده و ... به‌وفور استفاده شده است. مطالعات و تحقیقات انجام‌شده توسط موسسه فناوری نیروی هوایی آمریکا[29] نشان داده است که OMNeT++ یکی از برترین پلتفرم‌های نرم‌افزاری جهت استخراج پارامترهای فیزیکی سامانه‌های QKD، طراحی و شبیه‌سازی قطعات اپتیک کوانتومی، کانال‌های تار نوری و فضای آزاد، پالس‌های نوری و اجرای پروتکل‌های QKD است [۳۵]. می‌توان از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی سامانه‌های QKD جهت استخراج مؤلفه‌های فیزیکی و اپتیکی سیستم و درک اثرات ناشی از غیر ایده‌آل بودن قطعات مورداستفاده (از قبیل لیزرها، آشکارسازها، مدولاتورها، شکافنده‌های پرتو، کانال‌های کوانتومی و ...) بر روی عملکرد و امنیت این سامانه‌ها استفاده کرد. متأسفانه استفاده از OMNeT++ تنها برای اهداف دانشگاهی و علمی مجاز است. نسخه تجاری این نرم‌افزار، OMNEST نام دارد که دارای برخی امکانات و پشتیبانی‌های بیشتر نسبت به OMNeT++ است.

- **QKDNetSim**[30]:

یک بسته نرم‌افزاری بسیار قدرتمند و کارا مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی C++ است. این بسته نرم‌افزاری، متن‌باز و رایگان بوده، باهدف درک بهتر توپولوژی فناوری و زیرساخت‌های مرتبط با سامانه‌های QKD طراحی شده است [۳۶].

ج) جعبه‌ابزارهای مبتنی بر پایتون:

برخی از مهم‌ترین بسته‌های نرم‌افزاری مبتنی بر پایتون در حوزه نظریه کوانتومی و شبیه‌سازی محاسبات و ساختارهای کوانتومی عبارت‌اند از:

- **QuTiP**[31]:

یک نرم‌افزار با محیط کاربرپسند است که جهت شبیه‌سازی عددی انواع ساختارهای کوانتومی پیچیده، ازجمله سامانه‌های اپتیک کوانتومی، مدارهای ابررسانا، رزوناتورهای نانومکانیکی کوانتومی و سامانه‌های کوانتومی پویا طراحی شده است. اخیراً از این نرم‌افزار رایگان و متن‌باز جهت طراحی، شبیه‌سازی و استخراج پارامترهای فیزیکی و ملزومات زیرساختی سامانه‌های QKD توسط افراد و گروه‌های تحقیقاتی مختلف استفاده شده است[۳۲].

- **Cirq**[33]:

یک کتابخانه نرم‌افزاری قدرتمند و متن‌باز است که جهت طراحی، ایجاد، مدیریت و بهینه‌سازی مدارهای کوانتومی و

پیاده‌سازی و اجرای آن‌ها در بستر رایانه‌ها و شبیه‌سازهای کوانتومی معرفی شده است. این کتابخانه دارای کارایی و عملکرد بسیار مطلوب در زمینه شبیه‌سازی QKD می‌باشد.

- **Strawberry Fields**[34]:

یک کتابخانه نرم‌افزاری جامع و کامل است که جهت طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدارهای اپتیک کوانتومی مبتنی بر متغیرهای پیوسته مورداستفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این کتابخانه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دارای یک معماری نرم‌افزاری متن‌باز جهت محاسبات کوانتومی فوتونی است.
- یک پلتفرم جامع نرم‌افزاری تحت پایتون برای مواجهه با ساختارهای کوانتومی متغیر پیوسته است.
- یک پلتفرم نرم‌افزاری جالب جهت طراحی و مدیریت بصری مدارهای کوانتومی است.
- امکان دسترسی و به‌کارگیری پلتفرم تحت وب و استفاده از آن در هرکجای دنیا به‌سادگی فراهم است.

- **SQUANCH**[35]:

یک کتابخانه متن‌باز است که جهت اجرا و شبیه‌سازی پردازش اطلاعات کوانتومی توزیع‌شده ایجاد شده است. این کتابخانه شامل ویژگی‌ها و زیرسیستم‌های متنوع جهت تحلیل و انجام انواع شبیه‌سازهای مرتبط با محاسبات کوانتومی می‌باشد. بااین‌وجود، این کتابخانه به‌طور ویژه جهت شبیه‌سازی انواع ساختارها در شبکه‌های ارتباط کوانتومی، بهینه‌سازی و ارتقاء داده‌شده است. مشخصات فنی و عملیاتی این کتابخانه در [۳۷] معرفی و بررسی‌شده است.

د) جعبه‌ابزارهای مبتنی بر نرم‌افزارهای محاسباتی نمادین[۳۶]:

یک رده مهم از نرم‌افزارهای محاسباتی، نرم‌افزارهایی با رویکرد نمادین به محاسبات هستند. این رویکرد سبب انعطاف‌پذیری و سادگی در استفاده از این نرم‌افزارها می‌شود. نرم‌افزارهای میپل[۳۷] و متمتیکا[۳۸] از مهم‌ترین نرم‌افزارهای محاسباتی نمادین هستند. در سال‌های اخیر از این دسته نرم‌افزارهای رایانه‌ای جهت شبیه‌سازی محاسبات و سامانه‌های کوانتومی نیز استفاده شده است. البته باید توجه داشت که علی‌رغم سادگی و انعطاف‌پذیری بالای این نرم‌افزارها، عملکرد آن‌ها در مواجهه با مسائل حجیم و کاربردی ضعیف است. بنابراین از این نرم‌افزارها بیشتر در جهت آموزش و پیاده‌سازی‌های مختصر در واحدهای دانشگاهی استفاده می‌شود. برخی از مهم‌ترین بسته‌های نرم‌افزاری مبتنی بر میپل یا متمتیکا عبارت‌اند از:

- **OpenQUACS**[39]:

یک بسته نرم‌افزاری متن‌باز مبتنی بر میپل است که برای شبیه‌سازی محاسبات کوانتومی به کار می‌رود.

- **Quantavo**[40]:

یک بسته نرم‌افزاری متن‌باز مبتنی بر میپل است که شامل رده وسیعی از عملگرها و محاسبات موردنیاز جهت طراحی سامانه‌های اپتیک کوانتومی (ازجمله محاسبه، سنجش، انتشار و درهم‌تنیدگی حالت‌های پایه کوانتومی) است. یک راهنمای جامع در رابطه با معرفی دستورات و توابع و نحوه به‌کارگیری این بسته نرم‌افزاری جهت مواجهه با سامانه‌های اپتیک کوانتومی در [۳۸] ارائه شده است.

- **qmatrix**[41]:

یک بسته نرم‌افزاری تحت متمتیکا است که شامل مجموعه‌ای از دستورات و توابع جهت انجام محاسبات پیچیده در نظریه اطلاعات کوانتومی می‌باشد.

- **QDENSITY**[42]:

یک بسته نرم‌افزاری جامع مبتنی بر متمتیکا است که شامل مجموعه‌ای از ماژول‌های طراحی‌شده جهت تولید و شبیه‌سازی عناصر پایه تشکیل‌دهنده مدارهای کوانتومی می‌باشد. مفاهیم نظری و تحلیلی مرتبط با این بسته نرم‌افزاری در [۳۹] ارائه شده است.

- **QuantumUtils**[43]:

یک کتابخانه نرم‌افزاری مبتنی بر متمتیکا است که شامل دسته وسیعی از عملگرها، توابع و دستورات مهم و اساسی در نظریه اطلاعات کوانتومی می‌باشد. اغلب توابع و عملگرهای موردنیاز جهت شبیه‌سازی سیستم‌ها و ساختارهای کوانتومی (ازجمله

کیوبیت‌ها، مدارهای کوانتومی، اسپین‌ها و کاواک‌ها، کانال‌های کوانتومی چند فازی، شبیه‌سازی عددی و نمادین سامانه‌های تحول کوانتومی بسته و باز) و همچنین نمایش‌های بصری از برخی مؤلفه‌های کوانتومی (همانند ماتریس‌ها، حالت‌ها و داده‌های کوانتومی) در این بسته نرم‌افزاری در نظر گرفته شده است.

در سال‌های اخیر از نرم‌افزارهای محاسباتی نمادین به‌وفور جهت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی رایانه‌ای برخی از زیرسیستم‌ها و محاسبات کوانتومی استفاده‌شده است. به‌عنوان نمونه، یک شبیه‌سازی عددی و رایانه‌ای مبتنی بر متمتیکا جهت تحلیل یک سامانه QKD دارای عوامل و مؤلفه‌های غیر ایده‌آل در [۴۰] ارائه شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان یک سامانه QKD را قبل از طراحی و برپایی تجربی، با دقت مناسب بر روی رایانه‌های کلاسیک شبیه‌سازی کرد و مؤلفه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مرتبط با آن را به‌صورت بهینه استخراج نمود.

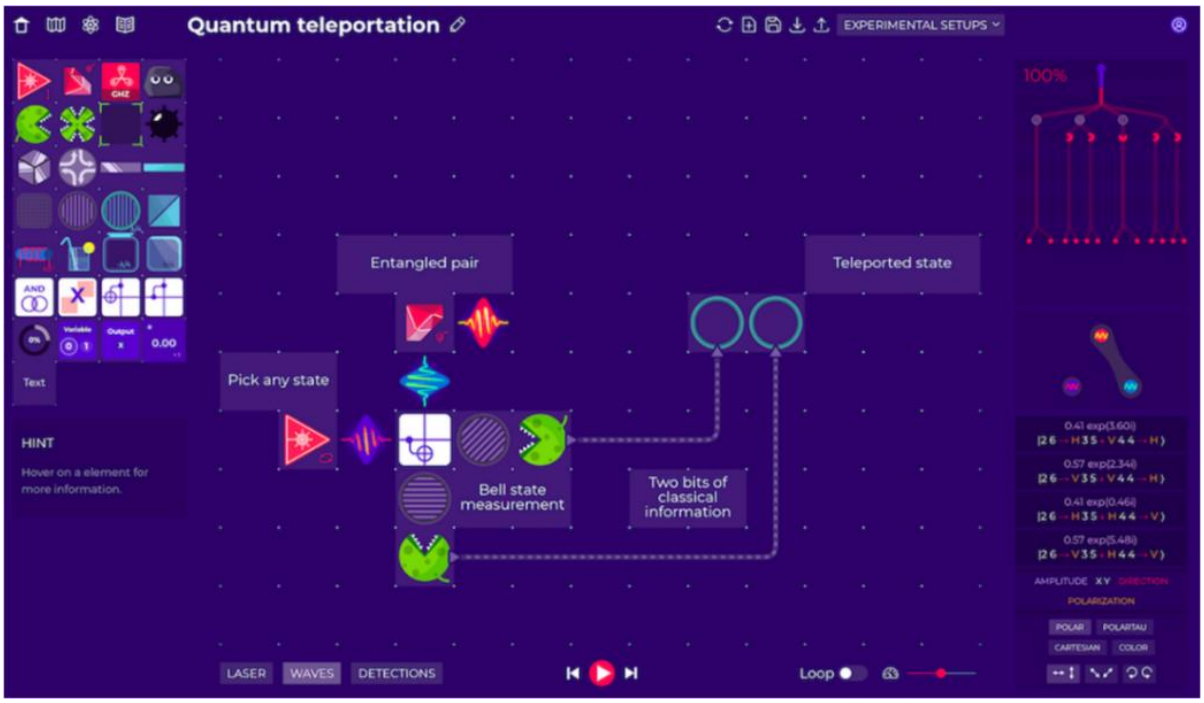
۵- آزمایشگاه‌های مجازی QKD و بازی‌های کوانتومی

می‌توان از ابزارهای شبیه‌سازی برای ایجاد و توسعه یک سکوی شبیه‌ساز سامانه‌های QKD و کاربرد آن به‌عنوان یک آزمایشگاه مجازی جهت آموزش موضوعات مرتبط با فناوری ارتباطات کوانتومی و طراحی و مهندسی سامانه‌های QKD، با دقت و تنوع بالا استفاده کرد. تاکنون چند نمونه ازاین‌گونه چارچوب‌های نرم‌افزاری کوانتومی توسط شرکت‌ها و دانشگاه‌های بزرگ دنیا عرضه شده است. ازجمله آن‌ها می‌توان به QuTiP [۴۱]، Penny Lane [۴۲]، Strawberry Fields [۴۳] و Pulser [۴۴] اشاره کرد. این بسته‌ها امکانات مختلف و متنوعی ازجمله اطلاعات عمومی کوانتومی، مدارهای کوانتومی، بهینه‌سازی کوانتومی، قابلیت‌های رسم، دسترسی به پیاده‌سازی فیزیکی الگوریتم‌ها و قابلیت اجرای دستگاه‌های کوانتومی را در اختیار کاربر می‌گذارند. این چارچوب‌ها عمدتاً از رابط پایتون استفاده می‌کنند. بااین‌حال، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که برنامه‌های نوشته‌شده در این چارچوب‌ها مستعد خطا هستند و درصد بالایی از خطاهای موجود در کدهای آن‌ها مستقیماً با مکانیک کوانتومی مرتبط است [۴۵,۴۶]. در ادامه، دو نمونه از سامانه‌های شبیه‌ساز کوانتومی که به‌عنوان آزمایشگاه مجازی اپتیک کوانتومی و فناوری‌های مرتبط با آن به کار می‌روند، معرفی و جزییات مربوط به نحوه عملکرد آن‌ها تشریح شده است.

۵-۱- آزمایشگاه کوانتومی Virtual Lab

آزمایشگاه کوانتومی Virtual Lab که توسط Quantum Flytrap توسعه داده‌شده [۴۷]، محصول مرکز فناوری‌های کوانتومی دانشگاه ملی سنگاپور است. سکوی Virtual Lab یک آزمایشگاه رایگان مبتنی بر مرورگر است که در شمای یک میز اپتیکی برخط و بدون نیاز به کد نویسی، پدیده‌های کوانتومی را به‌صورت تعاملی و شهودی ارائه می‌دهد. این آزمایشگاه یک تجربه پایان‌باز است که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار آموزشی یا تحقیقاتی استفاده شود. این سکوی شبیه‌ساز، ورود مبتدیان به دنیای رازآلود کوانتوم را ساده می‌کند و می‌تواند اولین گام آن‌ها برای کسب سواد کوانتومی باشد. برای مربیان در قالب یک ابزار کمک‌آموزشی تعاملی و شهودی ایفای نقش می‌کند و درنهایت، برای فیزیکدانان و مهندسان نرم‌افزار کوانتومی راهی برای بررسی کارآمد پدیده‌های پیشرفته اطلاعات کوانتومی و نمونه‌های اولیه آزمایش‌ها ارائه می‌دهد. نمای اصلی این آزمایشگاه مجازی در شکل (۳) نشان داده شده است.

آزمایشگاه Virtual Lab از شبیه‌سازی‌های بی‌درنگ[۴۴] و در لحظه، با حداکثر سه فوتون درهم‌تنیده پشتیبانی می‌کند. کاربران می‌توانند اجزاء و عناصر نوری معمولی (مانند تقسیم‌کننده‌های پرتو، قطبش‌گرها، چرخاننده‌های فارادی و آشکارسازها) را با یک رابط گرافیکی از نوع کشیدن و رها کردن روی میز اپتیکی قرار دهند. این آزمایشگاه دارای یک بخش بازی کوانتومی است که به‌عنوان مقدمه‌ای برای آشنایی با ویژگی‌ها و امکانات آزمایشگاه مجازی عمل می‌کند و برای کاربرانی که با مکانیک کوانتومی آشنا نیستند قابل‌استفاده و مفید است. در این آزمایشگاه یک نمایش بصری از حالات درهم‌تنیده و معیارهای درهم‌تنیدگی ارائه شده است. این تجسم‌های کوانتومی را می‌توان برای هر سیستم کوانتومی گسسته، ازجمله مدارهای کوانتومی با کیوبیت‌ها و زنجیره‌های اسپین بکار برد. این آزمایشگاه امکان کاوش در ماهیت فیزیک کوانتومی (تحول حالت‌ها، درهم‌تنیدگی و اندازه‌گیری)، شبیه‌سازی محاسبات کوانتومی، استفاده از رمزنگاری کوانتومی، کاوش در پدیده‌های کوانتومی غیرشهودی و غیرعادی (مانند دوربری کوانتومی و نقض نامساوی بِل) و بازسازی آزمایش‌های تاریخی (مانند تداخل‌سنج مایکلسون-مورلی) را فراهم می‌سازد.



شکل (۳): نمای اصلی آزمایشگاه کوانتومی Virtual Lab [۴۷]: میز کار (مرکز)، جعبه‌ابزار قطعات (سمت چپ)، کنترل‌های آزمایش (پایین)، ابزارهای ارزیابی حالت کوانتومی (راست)، و گزینه‌هایی برای ذخیره و ویرایش آزمایش‌ها (بالا)

آزمایشگاه Virtual Lab جانشین بازی کوانتومی Quantum Game with Photons (2014-2016) شده است که یک بازی جورچین منبع‌باز با ۳۴ سطح است[۴۵]. این بازی با بیش از ۱۰۰.۰۰۰ بازیکن، در مقاله "بازی‌سازی مرتبط با نظریه کوانتومی" به‌عنوان برترین بازی انتخاب شده است[۴۶]. این بازی بعداً با عنوان Quantum Game with Photons 2 در مرکز فناوری‌های کوانتومی دانشگاه ملی سنگاپور توسعه یافت [۴۷].

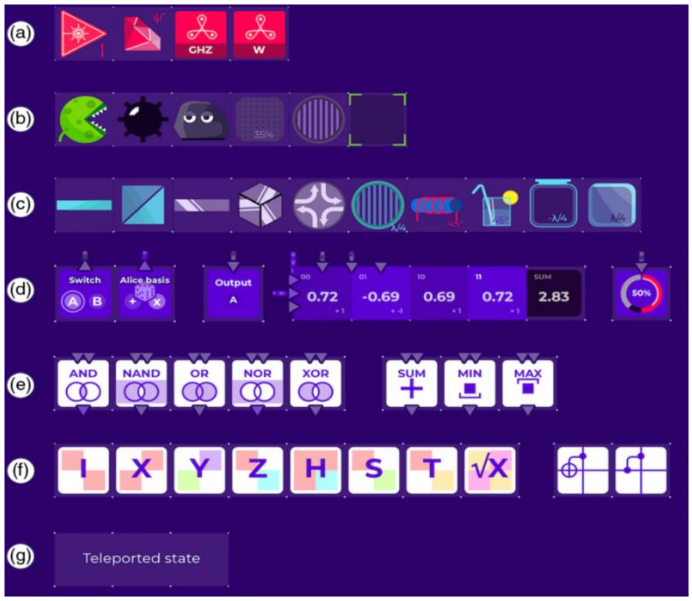
سکوی Virtual Lab مبتنی بر یک موتور عددی است. برخلاف مفاهیم انتزاعی و ذهنی که صرفاً بر روی کیوبیت‌ها متمرکز هستند، در این سکو بر روی پیاده‌سازی سخت‌افزارهای واقعی تمرکز شده است و موتور آن می‌تواند برای شبیه‌سازی تمام واقعیت‌های فیزیکی پیشرو، ازجمله: (۱) اتم‌ها و یون‌های خنثی به دام افتاده توسط نور، (۲) ابررساناها و (۳) فوتون‌ها استفاده شود. شبیه‌سازی کلاسیک سیستم‌های کوانتومی با افزایش تعداد ذرات، به‌طور تصاعدی دشوارتر می‌شود. در Virtual Lab، شبیه‌سازی یک فوتون منفرد به ۱۰۰۰ عدد مختلط نیاز دارد (همه ترکیبات ممکن از موقعیت در میز کار شبکه‌ای، قطبش و جهت آن). بنابراین یک شبیه‌سازی سه فوتونی به یک میلیارد بعد نیاز دارد.

سکوی Virtual Lab به‌صورت یک برنامه مبتنی بر وب ایجاد شده است تا برای طیف وسیعی از مخاطبان در دسترس باشد. ماهیت بدون نصب آن به کاربران اجازه می‌دهد که فوراً کار با آن را شروع کنند. این کار همچنین اشتراک‌گذاری آزمایش‌های ایجادشده توسط کاربر را تسهیل می‌کند. می‌توان از آن در رایانه‌های رومیزی و دستگاه‌های تلفن همراه با مرورگرهای مدرن، بدون توجه به سیستم‌عامل آن‌ها استفاده کرد.

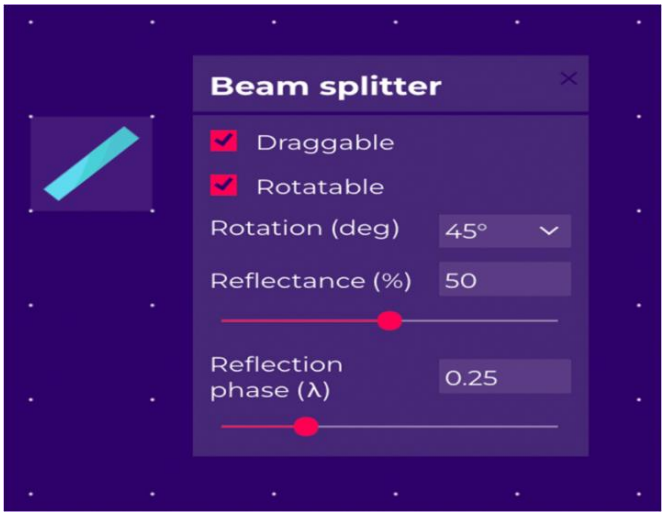
سکوی Virtual Lab راهی برای ذخیره و به اشتراک‌گذاری چیدمان‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. ذخیره آزمایش‌ها مستلزم ایجاد یک حساب کاربری است. به هر چیدمان آزمایشگاهی می‌توان یک نام اختصاص داد، آن را به‌صورت عمومی یا فهرست‌نشده تنظیم کرد و با یک پیوند به اشتراک گذاشت[۴۸]. مشاهده نیازی به راه‌اندازی یک حساب کاربری ندارد. این انتخاب برای تسهیل دسترسی و توزیع آسان‌تر انجام شده است.

قطعات و المان‌ها در Virtual Lab بر اساس نسخه‌های ایده‌آلی از قطعات اپتیکی هستند که می‌توانند روی میز اپتیکی در آزمایشگاه استفاده شوند. مطابق شکل (۴)، از نمادهای تصویری برای نمایش نمادین این المان‌ها و همچنین نمایش عملگرهای منطقی استفاده شده است. این رویکرد نمادگرا باعث شده است که Virtual Lab معرفی جذاب‌تر و خوشایندتری از فیزیک

کوانتومی عرضه کند و قابلیت فهم را افزایش دهد. بسیاری از المان‌ها دارای ویژگی‌های فیزیکی اضافی هستند که می‌توان آن‌ها را در کادر و راهنمای ابزاری مشابه شکل (۵)، که پس از کلیک راست باز می‌شود، اصلاح کرد.



شکل (۴): المان‌های موجود در Virtual Lab که بر اساس نوع، گروه‌بندی‌شده و از چپ به راست معرفی شده‌اند [۴۷]. (a) منابع و چشمه‌های فوتونی؛ (b) المان‌های اندازه‌گیری؛ (c) المان‌های نوری غیرجذبی؛ (d) المان‌های ورودی و خروجی نور؛ (e) درگاه‌های منطقی کلاسیک و عملیات محاسباتی؛ (f) درگاه‌های کوانتومی یک کیوبیتی و دو کیو بیتی؛ (g) توضیح متنی



شکل (۵): پارامترهای قابل تنظیم برای یک شکافنده پرتو غیر قطبشی: چرخش، بازتاب و فاز بازتاب از یک‌طرف آن [۴۷]

۵-۲- آزمایشگاه کوانتومی Virtual Quantum Optics Laboratory (VQOL)

آزمایشگاه کوانتومی VQOL [۴۸] یک نرم‌افزار مبتنی بر وب است که می‌تواند برای طراحی و اجرای شبیه‌سازی‌های واقعی آزمایش‌های اپتیک کوانتومی استفاده شود. رابط گرافیکی کاربر[۴۹] (GUI) این سکو به فرد اجازه می‌دهد تا به‌سرعت انواع آزمایش‌های اپتیکی مختلف را بچیند و از قابلیت‌های منحصربه‌فرد محیط اجرای نرم‌افزار، برای تجسم و تجزیه‌وتحلیل آزمایش خود بهره ببرد. تمام المان‌های نوری خطی استاندارد و همچنین چشمه حالت‌های گاوسی (اعم از گرمایی، همدوس و حالت‌های درهم‌تنیده) در این سکو در دسترس هستند. یکی از جنبه‌های منحصربه‌فرد VQOL، معرفی اندازه‌گیری‌های غیر گاوسی با

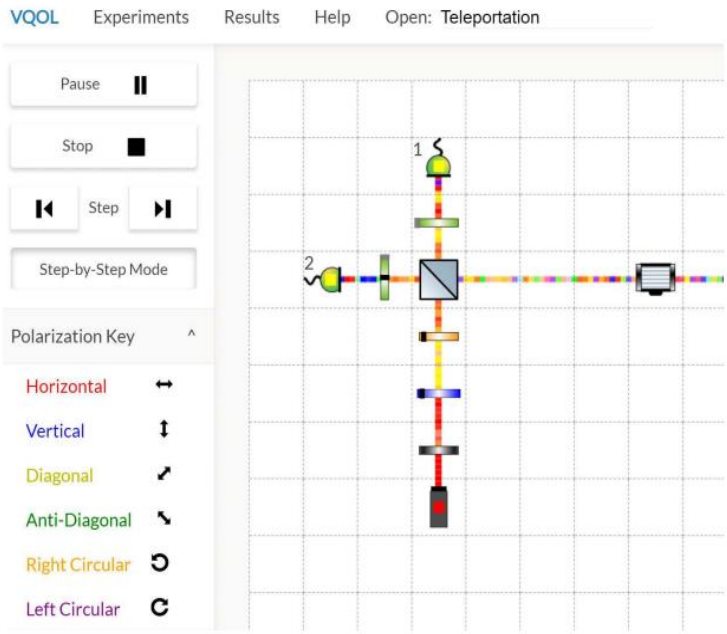
استفاده از آشکارسازهایی است که به‌عنوان دستگاه‌های قطعی (غیر احتمالاتی) مدل‌سازی شده‌اند و زمانی که دامنه نور از یک آستانه معین بالاتر می‌رود، تیک می‌کنند. می‌توان گفت که VQOL یک نمایش قابل‌اعتماد از بسیاری از پدیده‌های اپتیک کوانتومی تجربی ارائه می‌کند و می‌تواند هم به‌عنوان یک ابزار آموزشی مفید برای دانش‌پژوهان و هم به‌عنوان یک ابزار تحقیقاتی ارزشمند برای متخصصین عمل کند [۴۸].

آزمایشگاه مجازی VQOL یک تلفیق منحصربه‌فرد از اپتیک کلاسیک و کوانتومی بر اساس دو اصل ساده است: (۱) مدهای خلأ اپتیک کوانتومی، رسماً به‌عنوان تابش الکترومغناطیسی تصادفی واقعی (و نه مجازی) مربوط به میدان نقطه صفر[۵۰] در نظر گرفته می‌شوند. (۲) آشکارسازها به‌عنوان دستگاه‌های قطعی مدل‌سازی می‌شوند که وقتی شدت نور فرودی، شامل سهم ناشی از خلأ، بالاتر از آستانه‌ای که کاربر تعریف می‌کند قرار بگیرد، «کلیک» می‌کنند. نشان داده‌شده است که این دو جزء، قادر به بازسازی بسیاری از پدیده‌هایی هستند که در آزمایش‌های کوانتومی واقعی مشاهده می‌شوند [۵۱-۴۹].

همان‌طور که پیش‌ازاین نیز گفته شد، منابع زیادی برای شبیه‌سازی اپتیک کوانتومی وجود دارد که از بازی‌های آموزشی گرفته تا ابزارهای تحقیقاتی پیچیده را شامل می‌شود [۵۲،۵۳]. در اینجا عملکرد چند مورد مطرح از آن‌ها، که ازنظر ساختاری به هم نزدیک هستند، با VQOL مقایسه شده است.

اولین مورد، Strawberry Fields است. در Strawberry Fields هسته‌ها و سرورهای سامانه شبیه‌ساز به کاربر اجازه می‌دهند که حالت‌های کوانتومی را از طریق دنباله‌ای از درگاه‌های یکانی بسازند و هردوی اندازه‌گیری‌های گاوسی (مانند هموداین) و غیر گاوسی (مانند شمارش فوتون) را اعمال کنند. سکوی VQOL از این نظر شبیه Strawberry Fields است که تنها از حالت‌های گاوسی (اعم از حرارتی، همدوس یا درهم‌تنیده) به‌عنوان منبع نوری استفاده می‌کند، اما ازنظر تمرکز بر طراحی آزمایشگاهی، برخلاف عملیات درگاهی انتزاعی و در نظر گرفتن آشکارسازها به‌عنوان دستگاه‌های غیرایده‌آل، با آن متفاوت است.

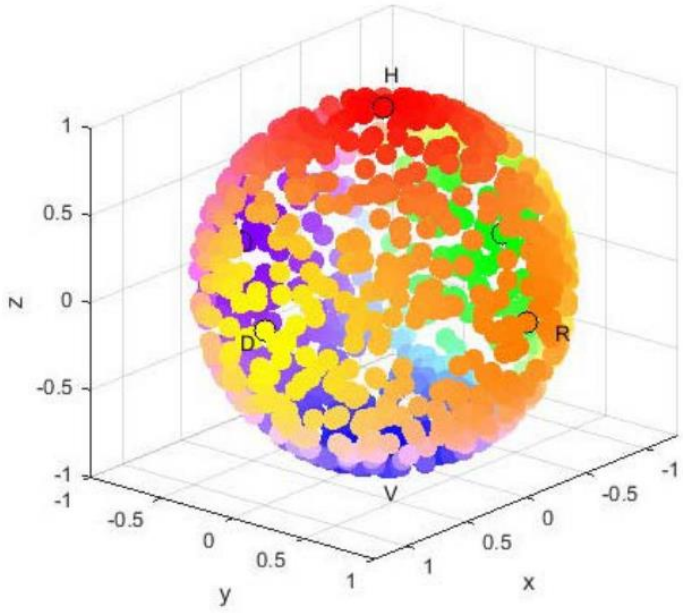
مورد بعدی، QuantumLab است که توسط دانشگاه ارلانگن-نورنبرگ[۵۱] توسعه داده‌شده است. سکوی QuantumLab یک منبع مبتنی بر وب است که از Adobe Flash-Player برای نشان دادن آزمایش‌های مختلف اپتیک کوانتومی در دنیای واقعی استفاده می‌کند. آزمایش‌ها در یک آزمایشگاه واقعی و تحت پیکربندی و تنظیمات پارامترهای مختلف انجام می‌شوند. کاربران می‌توانند از میان گزینه‌های آن انتخاب کنند و داده‌های واقعی (نه شبیه‌سازی‌شده) را که واقعاً به‌دست آمده‌اند، تجسم کنند. سکوی QuantumLab یک منبع عالی برای نشان دادن پدیده‌های اپتیک کوانتومی در دنیای واقعی است، اما فاقد انعطاف‌پذیری ارائه‌شده توسط VQOL به کاربر، جهت آزادی عمل در طراحی و انجام آزمایش‌های خود است.



شکل (۶): نحوه پیاده‌سازی آزمایش دوربری کوانتومی در VQOL [۴۸]. همان‌طور که در راهنمای قطبش نشان داده‌شده است، رنگ‌ها حالت‌های متفاوت قطبش را نشان می‌دهند.

در VQOL، با استفاده از یک ویرایشگر متن یا رابط گرافیکی، کاربر می‌تواند یک آزمایش را با قرار دادن (و در صورت دلخواه، جهت‌دهی و پیکربندی کردن) دستگاه المان‌های مختلف بر روی یک میز اپتیکی مجازی شبکه‌بندی (نقطه‌گذاری) شده تعریف کند. شکل (۶) رابط این نرم‌افزار و اجرای یک آزمایش دوربری کوانتومی[۵۲] در آن را نشان می‌دهد. چند نمونه آزمایش آماده در این نرم‌افزار ارائه شده است، اما کاربر آزاد است که طراحی خودش را انجام دهد.

ازآنجاکه قطبش در بسیاری از آزمایش‌های اپتیک کوانتومی حائز اهمیت است، از رنگ برای نمایش قطبش در VQOL استفاده شده است؛ اگرچه استفاده از رنگ برای نشان دادن قطبش می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا رنگ باید در اصل برای نشان‌دادن طول‌موج یا فرکانس مورداستفاده قرار گیرد، اما می‌توان گفت که این امر باعث سردرگمی چندانی نمی‌شود و نسبت به ارائه یک تصویر دوبعدی از میدان الکتریکی که ممکن است ازنظر بصری مبهم باشد ترجیح داده می‌شود. شش حالت اصلی قطبش (و رنگ‌های متناظر)، افقی (قرمز)، عمودی (آبی)، قطری (زرد)، غیر قطری (سبز)، دایروی راست (نارنجی) و دایروی چپ (بنفش) هستند. سایر قطبش‌های بیضوی عمومی، با رنگی نشان داده می‌شوند که ترکیبی از این شش رنگ است. تصویری از این رنگ‌های مختلف، بر روی کره بلوخ[۵۳] (یا به‌طور معادل، بر روی کره پوانکاره[۵۴])، در شکل (۷) نشان داده‌شده است. انتخاب این رنگ‌ها به‌گونه‌ای انجام‌شده است که افراد دارای اختلال جزئی در درک رنگ، عموماً قادر باشند یکی از دو قطبش متعامد را تشخیص دهند، هرچند که ممکن است در تمایز بین قطبش‌های غیر متعامد مشکل داشته باشند.



شکل (۷): رنگ‌های استفاده‌شده در VQOL، برای نشان دادن حالت‌های مختلف قطبش بر روی کره بلوخ [۴۸]

دکمه‌های کنترل به کاربر اجازه می‌دهند آزمایش را شروع، مکث یا متوقف کند. همچنین گزینه‌هایی برای اجرای آزمایش در حرکت آهسته، گام به جلو یا به عقب وجود دارد. بازگشت به عقب و سپس به جلو همان نتیجه را ایجاد می‌کند. آزمایش‌ها برای زمان پیش‌فرض ۱ میلی‌ثانیه (در زمان شبیه‌سازی، نه زمان واقعی) اجرا می‌شوند، اما می‌توان این زمان را تغییر داد. با توجه به این‌که سکوی VQOL در بازه‌های زمانی ۱ میکروثانیه عمل می‌کند، بنابراین زمان پیش‌فرض ۱ میلی‌ثانیه متناظر با ۱۰۰۰ نمونه زمانی خواهد بود. زمان اجرای واقعی یک آزمایش به قدرت پردازشگر کاربر و پیچیدگی آزمایش بستگی دارد. یک آزمایش ۱ میلی‌ثانیه‌ای معمولاً در حدود ۱۵ ثانیه زمان حقیقی اجرا می‌شود. تنظیم زمان دقیقاً بر روی ۱ میکروثانیه چیزی به دست می‌دهد که شبیه یک تک‌فوتون است، اگرچه این‌گونه نیست که VQOL واقعاً نور کوانتومی را مدل‌سازی کند. در VQOL می‌توان شبیه‌سازی را بدون تولید هیچ‌گونه گرافیک انیمیشنی اجرا کرد. این می‌تواند برای انجام شبیه‌سازی‌های طولانی که در آن‌ها کاربر فقط نتایج نهایی آزمایش را می‌خواهد مفید باشد، زیرا این دسته از شبیه‌سازی‌ها در حالت کلی، بسیار سریع‌تر اجرا می‌شوند. درهرصورت، پس از اتمام آزمایش، نتایج نمایش داده می‌شوند و به‌منظور تجزیه‌وتحلیل‌های بعدی، ذخیره می‌شوند.

۵-۳- مقایسه ابزارهای موجود در دو آزمایشگاه Virtual Lab و VQOL برای شبیه‌سازی یک سامانه QKD نوعی

در این بخش، برای درک بهتر موضوع، به‌عنوان یک مثال کاربردی، ابزارهای موجود در دو آزمایشگاه مجازی Virtual Lab و VQOL برای شبیه‌سازی یک سامانه QKD نوعی باهم مقایسه شده است. به‌طورکلی، برای شبیه‌سازی عملکرد یک سامانه QKD می‌بایست با در نظر گرفتن عیوب و نواقص واقعی دستگاه‌ها، المان‌های فیزیکی و فرایندهای متفاوتی را مدل‌سازی کرد. این موارد در جدول (۱) دسته‌بندی شده‌اند.

جدول (۱): فهرست المان‌ها و فرایندهای فیزیکی که لازم است برای شبیه‌سازی یک پروتکل QKD نوعی مدل‌سازی شوند.

چشمه تولید تک فوتون و فوتون‌های درهم‌تنیده	آشکارسازهای تک فوتون (مناسب برای متغیرهای گسسته)	آشکارسازهای همودین و هترودین (مناسب برای متغیرهای پیوسته)
مولدهای اعداد تصادفی	کانال کوانتومی (فیبر نوری یا فضای آزاد)	ماژول‌های شمارش تک فوتون و زوج فوتون‌ها
مدولاتورها و کنترل‌کننده‌های قطبش	مدولاتورهای فاز	انواع تأخیرانداز فاز
تقسیم‌کننده‌های پرتو (قطبشی و غیر قطبشی)	جفت‌کننده‌های پرتو	انواع آینه و عدسی
انواع فیلتر نوری	مدارهای الکترونیک و زمان‌بندی	انواع کابل و اتصالات الکترونیک

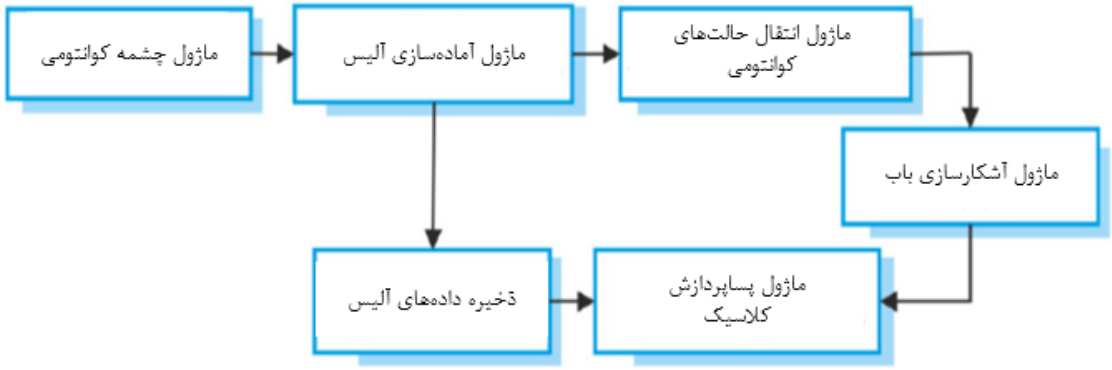
برای شبیه‌سازی یک سامانه QKD دلخواه، می‌بایست پس از شناخت و تحلیل درست نحوه عملکرد سامانه و تعیین مشخصات المان‌ها و فرایندهای به‌کاررفته در آن، در بخش انتخاب‌های مربوط به چشمه‌ها، آشکارسازها و المان‌های عبوری (ازجمله کانال کوانتومی)، ورودی‌های مناسب را قرار داد. انتخاب‌های مختلف برای ورودی‌های عمومی، جهت شبیه‌سازی یک سامانه QKD نوعی، در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): انتخاب ورودی‌ها برای یک پروتکل QKD نوعی

انتخاب‌ها	ورودی‌ها (برای یک مثال نوعی)
نوع پروتکل	پروتکل BB84
نوع چشمه	چشمه SPDC نوع II هم‌خط تبهگن
نوع کانال انتقال	فضای آزاد
فاصله انتقال	۱۰۰۰ متر
نوع آشکارساز	آشکارسازهای تک فوتون بر پایه فیبر و TCSPMC
زمان اجرای پروتکل	۲۰ اجرا در هر ۱ ثانیه
پارامتر امنیتی	QBER آستانه
شرایط آزمایشگاهی	در آزمایشگاه (در زمان شب و روز)

ماژول‌های مختلف موردنیاز و نحوه ارتباط آن‌ها جهت شبیه‌سازی سامانه موردنظر، در شکل (۸) نشان داده شده است. ماژول‌ها بر اساس یک جریان منطقی به هم متصل می‌شوند و مسیر طی شده توسط فوتون‌ها در یک برپایی آزمایشگاهی واقعی را بازسازی می‌کنند. خروجی ماژول "چشمه کوانتومی" به ماژول "آماده‌سازی آلیس" منتقل می‌شود. حالت‌های کوانتومی برای انتقال کدگذاری می‌شوند و به "ماژول انتقال" فرستاده می‌شوند. ماژول انتقال، انتقال تک فوتون‌ها در کانال کوانتومی بین آلیس و باب را شبیه‌سازی می‌کند و آشکارسازی حالت‌های سیگنال دریافتی در ماژول "آشکارسازی باب" شبیه‌سازی می‌شوند. داده‌های ذخیره‌شده مربوط به آماده‌سازی آلیس و خروجی‌های ماژول آشکارسازی باب به ماژول "پساپردازش کلاسیک" وارد می‌شوند. درنهایت، نرخ کلید غربال‌شده، نرخ خطای بیت کوانتومی (QBER) و دو کلید مشابه به‌عنوان خروجی به دست می‌آیند.

هرکدام از ماژول‌ها با کمک چندین زیرماژول ساخته می‌شوند. هر زیرماژول با المان‌ها و فرایندهای فیزیکی مختلفی مرتبط است که در برپایی آزمایشگاهی پروتکل نقش مهمی را ایفا می‌کنند. ورودی‌های ماژول‌ها را می‌توان به "ورودی‌های کاربر"، "پارامترهای تنظیم" و "خروجی‌های به‌دست‌آمده از ماژول‌های قبلی" دسته‌بندی کرد. ورودی‌های کاربر به انتخاب‌های خاصی اشاره دارد که توسط کاربر انجام می‌شود، درحالی‌که پارامترهای تنظیم به مشخصات المان‌های مختلفی که چیدمان از آن‌ها تشکیل شده‌است، اشاره دارد.



شکل (۸): ساختار شبیه‌سازی یک پروتکل QKD نوعی

ابزارهای موجود در دو آزمایشگاه مجازی Virtual Lab و VQOL برای شبیه‌سازی یک سامانه QKD نوعی، در جدول (۳) باهم مقایسه شده‌است. انتخاب بین این دو آزمایشگاه به سطح دانش و حوزه علاقه‌مندی کاربر بستگی دارد. اگر کاربر به دنبال یادگیری مفاهیم پایه مکانیک کوانتومی است، آزمایشگاه کوانتومی Virtual Lab گزینه مناسب‌تری خواهد بود. اما اگر به‌طور تخصصی درزمینه اپتیک کوانتومی فعالیت می‌کند، VQOL ابزارهای قدرتمندتری در اختیار او خواهد گذاشت.

جدول (۳): مقایسه ابزارهای موجود در دو آزمایشگاه کوانتومی مجازی Virtual Lab و VQOL برای شبیه‌سازی یک سامانه QKD نوعی

پارامتر	آزمایشگاه مجازی *Virtual Lab*	آزمایشگاه مجازی *VQOL*
حوزه تمرکز	شبیه‌سازی و آموزش تخصصی در حوزه اپتیک کوانتومی و فوتونیک	آموزش و شبیه‌سازی مفاهیم کلی مکانیک کوانتومی و آزمایش‌های مجازی ساده
رابط کاربری	معمولاً تعاملی، ممکن است نیاز به دانش پیشین داشته باشد	تعاملی، کاربرپسند با قابلیت کشیدن و رها کردن عناصر
سطح آموزشی	مناسب برای دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد و پژوهشگران	مناسب برای دانش‌آموزان و دانشجویان مبتدی تا متوسط
نحوه دسترسی	ممکن است نیاز به نصب نرم‌افزار یا دسترسی خاص داشته باشد	وب‌سایت رسمی، نیاز به ثبت‌نام ندارد
هزینه دسترسی	معمولاً رایگان برای اهداف آموزشی	رایگان یا با نسخه‌های پریمیوم برای امکانات بیشتر
پلتفرم‌ها	ممکن است نرم‌افزاری برای دسکتاپ یا مبتنی بر وب باشد	مبتنی بر وب، دسترسی از طریق مرورگرهای وب
مزیت‌های اصلی	- شبیه‌سازی تجربیات اپتیک کوانتومی پیشرفته - تحلیل پدیده‌های نوری و فوتون	- شبیه‌سازی سیستم‌های کوانتومی ساده - بصری‌سازی حالات کوانتومی - استفاده از ابزارهای آموزش تعاملی
ویژگی کلی قطعات و المان‌ها	ارائه یک نمایش نزدیک به واقع، برای قطعات و المان‌ها	بر اساس نسخه‌های ایده‌آل از قطعات
میز کار	یک میز اپتیکی مجازی مشبک که کاربران می‌توانند المان‌ها را در آن قرار دهند و شبیه‌سازی را مشاهده کنند	یک میز اپتیکی مجازی مشبک که کاربران می‌توانند المان‌ها را در آن قرار دهند و شبیه‌سازی را مشاهده کنند
قطعات و المان‌های در دسترس	- تمام المان‌های نوری خطی استاندارد - المان‌های نوری غیرفعال - منابع و چشمه‌های نوری تک فوتون و درهم‌تنیده - دستگاه‌های اندازه‌گیری	- منابع و چشمه‌های نوری تک فوتون و درهم‌تنیده - المان‌های اندازه‌گیری - المان‌های نوری غیر جذبی - المان‌های ورودی و خروجی نور - درگاه‌های منطقی کلاسیک و عملیات محاسباتی - درگاه‌های کوانتومی یک کیوبیتی و دو کیو بیتی
چشمه‌های نوری	در دسترس بودن تمام چشمه‌های حالت‌های گاوسی (اعم از گرمایی، همدوس و حالت‌های درهم‌تنیده) به‌صورت منابع نوری نزدیک به‌واقع	- مدل‌سازی لیزرها به‌عنوان منابع تک فوتونی ساده و گسیل کننده بر اساس تقاضا - مدل‌سازی بلورهای غیرخطی به صورت منبعی از جفت فوتون‌های درهم‌تنیده ایده‌آل

آشکارسازها	- آشکارسازهای غیرایده‌آل و دارای نقص و ناکاملی - ارائه اندازه‌گیری‌های غیر گاوسی با استفاده از آشکارسازهایی که به‌عنوان دستگاه‌های قطعی (غیر احتمالاتی) مدل‌سازی شده‌اند و زمانی که دامنه نور از یک آستانه معین بالاتر می‌رود، تیک می‌کنند	- دارای بازدهی کامل و بدون شمارش تاریک - با رویدادهای آشکارسازی تصادفی که از قانون بورن پیروی می‌کنند
استفاده از رنگ در نمایش	از رنگ برای نمایش قطبش استفاده شده است	در تجسم بردارها و ماتریس‌ها، از رنگ برای نشان دادن فاز استفاده شده است
زمان و سرعت اجرا	- آزمایش‌ها برای زمان پیش‌فرض ۱ میلی‌ثانیه (در زمان شبیه‌سازی، نه زمان واقعی) اجرا می‌شوند، اما می‌توان این زمان را تغییر داد - در هر ۱ میکروثانیه یک نمونه زمانی گرفته می‌شود، بنابراین زمان پیش‌فرض ۱ میلی‌ثانیه متناظر با ۱۰۰۰ نمونه زمانی خواهد بود	- مقیاس زمانی نوعی شبیه‌سازی آزمایش‌ها ۳۰ تا ۱۵۰ میکروثانیه است. - زمان اجرای اندازه‌گیری شده در مرورگر، تنها ۱/۵ برابر کندتر از زمان اجرای کد اصلی است.

۶- نتیجه‌گیری

توزیع کلید کوانتومی (QKD) با ارائه امنیت بی‌نظیر در ارتباطات، نقش مهمی در حمایت از زیرساخت‌های انرژی سبز و شبکه‌های هوشمند ایفا می‌کند. این امنیت بالا نه تنها از تهدیدات سایبری جلوگیری می‌کند، بلکه اعتماد به سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد و به انتقال به سوی آینده‌ای پایدارتر کمک می‌کند. به طور کلی، ادغام فناوری‌های کوانتومی با بخش انرژی می‌تواند به بهبود بهره‌وری، امنیت و پایداری سیستم‌های انرژی کمک کند، که همگی از اهداف اصلی حرکت به سمت انرژی سبز هستند.

ارائه یک شبیه‌ساز مناسب و معتبر برای سامانه‌های QKD مستلزم توجه به دو زیر بخش مهم و اساسی "مدل‌سازی ریاضی مطلوب" و "پیاده‌سازی نرم‌افزاری و اجرای رایانه‌ای دقیق" است. بنابراین در این مقاله، ابتدا ملزومات و ملاحظات ویژه یک سامانه QKD از دیدگاه کاربر بررسی شد. از طرفی، با توجه به ملاحظات مطرح‌شده و ماهیت رفتار واقعی و طبیعی سامانه‌های QKD، بیان شد که بهترین و مناسب‌ترین رویکرد جهت مدل‌بندی بهینه این سامانه‌ها، استفاده از یک مدل ریاضی پویا، پایا نسبت به زمان، غیرخطی، رویداد محور، تصادفی و زمان گسسته است که در حالت کلی به‌عنوان مدل‌های رویداد گسسته (DES) شناخته می‌شوند. همچنین یک بررسی جامع بر روی انواع رویکردهای برنامه‌نویسی رایانه‌ای و پیاده‌سازی نرم‌افزاری مدل‌های ریاضی توصیف‌کننده فرایند QKD انجام گرفت. در این راستا، زبان‌های برنامه‌نویسی مختلفی همچون متلب، C (C++)، پایتون و نرم‌افزارهای محاسباتی نمادین که به‌منظور شبیه‌سازی سامانه‌های QKD ارائه‌شده‌اند، معرفی و نقاط قوت و ضعف هرکدام از آن‌ها تشریح شد. بدون شک مناسب‌ترین رویکرد برای شبیه‌سازی و پیاده‌سازی نرم‌افزاری سامانه‌های QKD، استفاده از ترکیب نقاط قوت هریک از این زبان‌های برنامه‌نویسی و کتابخانه‌های ارائه‌شده، در قالب یک نرم‌افزار واحد است. خوشبختانه زبان برنامه‌نویسی پیشرفته پایتون امکان فراخوانی و ادغام انواع برنامه‌ها و کتابخانه‌های نوشته‌شده با زبان‌های مختلف را در بستر یک برنامه واحد فراهم می‌سازد. از طرفی، نرم‌افزار رایانه‌ای OMNeT++ نیز می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین معتبر و البته ساده‌تر، برای شبیه‌سازی سامانه‌های QKD مورداستفاده قرار گیرد. همچنین در این مقاله، آزمایشگاه‌های کوانتومی مجازی Virtual Lab و VQOL به‌عنوان دو منبع ساده و مهم برای آموزش مبانی مکانیک کوانتومی و آشنایی با نحوه طراحی سامانه‌های QKD بیان شدند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از داوران محترم، بخاطر نظرات سازنده آن‌ها در ویرایش و اصلاح مقاله، کمال سپاسگزاری و قدردانی را دارند.

مراجع

[1] C. H. Bennett and G. Brassard, “Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing,” *Theoretical Computer Science*, vol. 560, no. 1, pp. 7–11, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.tcs.2014.05.025.

[2] A. K. Ekert, “Quantum Cryptography Based on Bell’s Theorem,” *Physical Review Letters*, vol. 67, no. 6, pp. 661–663, Aug. 1991, doi: 10.1103/physrevlett.67.661.
[3] C. H. Bennett, “Quantum Cryptography Using any Two Nonorthogonal States,” *Physical Review Letters*, vol. 68, no. 21, pp. 3121–3124, May 1992, doi: 10.1103/physrevlett.68.3121.
[4] D. Stucki, N. Brunner, N. Gisin, V. Scarani, and H. Zbinden, “Fast and Simple One-Way Quantum Key Distribution,” *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 19, pp. 41081–41083, Nov. 2005, doi: 10.1063/1.2126792.
[5] V. Zapatero, W. Wang, and M. Curty, “A Fully Passive Transmitter for Decoy-State Quantum Key Distribution,” *Quantum Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 25014–25032, Feb. 2023, doi: 10.1088/2058-9565/acbc46.
[6] S. Dong, S. Mi, Q. Hou, Y. Huang, J. Wang, Y. Yu, Z. Wei, Z. Zhang, and J. Fang, “Decoy State Semi-Quantum Key Distribution,” *EPJ Quantum Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 1–15, May 2023, doi: 10.1140/epjqt/s40507-023-00175-0.
[7] H. Inamori, N. Lütkenhaus, and D. Mayers, “Unconditional Security of Practical Quantum Key Distribution,” *European Physical Journal D*, vol. 41, no. 3, pp. 599–627, Mar. 2007, doi: 10.1140/epjd/e2007-00010-4.
[8] R. Chaturvedi, A. Misra, S. Bitragunta, A. Bhatia, K. Tiwari, “Simultaneous Quantum Information and Power Transfer-Based Green QKD Receiver Architectures,” in *2024 16th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, 2024, pp. 782–785, doi: 10.1109/COMSNETS59351.2024.10427492.
[9] G. Guarda, D. Ribezzo, D. Salvoni, C. Bruscino, P. Ercolano, M. Ejrnaes, and L. Parlato, “Decoy-State Quantum Key Distribution Over Long-Distance Optical Fiber,” *Quantum Computing, Communication, and Simulation IV*, vol. 12911, no. 1, pp. 120–125, Mar. 2024, doi: 10.1117/12.3003698.
[10] Y. Liu, W. J. Zhang, C. Jiang, J. P.Chen, C. Zhang, W. X. Pan, and D. Ma, “Experimental Twin-Field Quantum Key Distribution Over 1000 km Fiber Distance,” *Physical Review Letters*, vol. 130, no. 21, pp. 210801–210847, May 2023, doi: 10.1103/physrevlett.130.210801.
[11] M. Zahidy, D. Ribezzo, C. D. Lazzari, I. Vagniluca, N. Biagi, R. Müller, and T. Occhipinti, “Practical High-Dimensional Quantum Key Distribution Protocol Over Deployed Multicore Fiber,” *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 1651–1656, Feb. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-45876-x.
[12] M. M. Hassan, K. Reaz, A. Green, N. Crum, and G. Siopsis, “Experimental Free-Space Quantum Key Distribution Over a Turbulent High-Loss Channel,” in *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 2023, pp. 1182–1186, doi: 10.1109/qce57702.2023.00133.
[13] C. Z. Peng, J. Zhang, D. Yang, W. B. Gao, H. X. Ma, H. Yin, H. P. Zeng, T. Yang, X. B. Wang, and J. W. Pan, “Experimental Long-Distance Decoy-State Quantum Key Distribution Based on Polarization Encoding,” *Physical Review Letters*, vol. 98, no. 1, pp. 10505–10509, Jan. 2007, doi: 10.1103/physrevlett.98.010505.
[14] Y. Liu, T. Y. Chen, J. Wang, W. Q. Cai, X. Wan, L. K. Chen, J. H. Wang, S. B. Liu, H. Liang, L. Yang, and C. Z. Peng, “Decoy-State Quantum Key Distribution with Polarized Photons Over 200 km,” *Optics Express*, vol. 18, no. 8, pp. 8587–8594, Apr. 2010, doi: 10.1364/oe.18.008587.
[15] P. D. Townsend, J. G. Rarity, and P. R. Tapster, “Single Photon Interference in 10 km Long Optical Fibre Interferometer,” *Electronics Letters*, vol. 29, no. 7, pp. 634–635, Apr. 1993, doi: 10.1049/el19930424.
[16] A. M. Toonabi, M. D. Darareh, and S. Janbaz, “A Two-Dimensional Quantum Key Distribution Protocol Based on Polarization-Phase Encoding,” *International Journal of Quantum Information*, vol. 17, no. 7, pp. 1950058–1950078, Oct. 2019, doi: 10.1142/s0219749919500588.
[17] A. M. Toonabi, M. D. Darareh, and S. Janbaz, “High-Dimensional Quantum Key Distribution Using Polarization-Phase Encoding: Security Analysis,” *International Journal of Quantum Information*, vol. 18, no. 06, pp. 2050031–2050055, Sep. 2020, doi: 10.1142/s0219749920500318.
[18] A. M. Toonabi and M. D. Darareh, “Introducing a Decoy-State Version of the High-Dimensional Polarization-Phase (PoP) Quantum Key Distribution Protocol and Explaining its

Implementation," *Electronic and Cyber Defense*, vol. 12. no. 2, pp. 1–9, Sep. 2024, doi: ECDJ/2310/1531.

[19] Q. Li, D. Le, X. Wu, X. Niu, and H. Guo, "Efficient Bit Sifting Scheme of Post-Processing in Quantum Key Distribution," *Quantum Information Processing*, vol. 14, no. 1, pp. 3785–3811, Oct. 2015, doi: 10.1007/s11128-015-1035-8.

[20] E. Kiktenko, A. Trushechkin, Y. Kurochkin, and A. Fedorov, "Post-Processing Procedure for Industrial Quantum Key Distribution Systems," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 741, no. 1, pp. 12081–12087, Aug. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012081.

[21] C. Portmann and R. Renner, "Security in Quantum Cryptography," *Reviews of Modern Physics*, vol. 94, no. 2, pp. 25008–25070, Apr. 2022, doi: 10.1103/revmodphys.94.025008.

[22] G. Brassard, N. Lütkenhaus, T. Mor, and B. C. Sanders, "Limitations on Practical Quantum Cryptography," *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 6, pp. 1330–1333, Aug. 2000, doi: 10.1103/physrevlett.85.1330.

[23] S. Sun and A. Huang, "A Review of Security Evaluation of Practical Quantum Key Distribution System," *Entropy*, vol. 24, no. 2, pp. 260–278, Feb. 2022, doi: 10.3390/e24020260.

[24] N. Jain, H. M. Chin, H. Mani, C. Lupo, D. S. Nikolic, A. Kordts, and S. Pirandola, "Practical Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Composable Security," *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 4740–4747, Aug. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-32161-y.

[25] Z. Li and K. Wei, "Improving Parameter Optimization in Decoy-State Quantum Key Distribution," *Quantum Engineering*, vol. 2022, no. 1, pp. 9717591–9717599, Feb. 2022, doi: 10.1155/2022/9717591.

[26] C. X. Zhang, D. Wu, P. W. Cui, J. C. Ma, Y. Wang, and J. M. An, "Research Progress in Quantum Key Distribution," *Chinese Physics B*, vol. 32, no. 12, pp. 124207–124210, Sep. 2023, doi: 10.1088/1674-1056/acfd16.

[27] V. Zapatero, T. V. Leent, R. A. Friedman, W. Z. Liu, Q. Zhang, H. Weinfurter, and M. Curty, "Advances in Device-Independent Quantum Key Distribution," *npj Quantum Information*, , vol. 9, no. 1, pp. 10–20, Feb. 2023, doi: 10.1038/s41534-023-00684-x.

[28] W. Li, L. Zhang, H. Tan, Y. Lu, S. K. Liao, J. Huang, and H. Li, "High-Rate Quantum Key Distribution Exceeding 110 Mb s^{-1}," *Nature Photonics*, vol. 17, no. 5, pp. 416–421, May 2023, doi: 10.1038/s41566-023-01166-4.

[29] C. G. Cassandras and S. Lafortune, "Introduction to Discrete-Event Simulation," in *Introduction to Discrete Event Systems*, *Springer International Publishing*, 2021, pp. 593–651, doi: 10.1007/978-3-030-72274-6_10.

[30] H. Qiao and C. Xiao, "Simulation of BB84 Quantum Key Distribution in Depolarizing Channel," in *Proceedings of 14th Youth Conference on Communication*, 2009, pp. 123–129, doi: 978-1-935068-01-3 © 2009 SciRes.

[31] G. Tóth, "QUBIT4MATLAB V3. 0: A Program Package for Quantum Information Science and Quantum Optics for MATLAB," *Computer Physics Communications*, vol. 179, no. 6, pp. 430–437, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.cpc.2008.03.007.

[32] R. K. Sinha, M. Mishra, and S. S. Sahu, "Quantum Key Distribution: Simulation of BB84 Protocol in C," *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System*, vol. 6, no. 1, pp. 661–666, Aug. 2017, doi: IJEECS/6.1/2017.661-666.

[33] K. Manish and R. C. Poonia, "Simulation of BB84 and Proposed Protocol for Quantum Key Distribution," *Journal of Statistics and Management Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 661–666, Jul. 2018, doi:10.1080/09720510.2018.1475075.

[34] T. Jones, A. Brown, I. Bush, and S. Benjamin, "QuEST and High Performance Simulation of Quantum Computers," *Scientific reports*, vol. 9, no.1, pp. 10736–10747, Jul. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-47174-9.

[35] J. D. Morris, D. D. Hodson, M. R. Grimaila, D. R. Jacques, and G. Baumgartner, "Towards the Modeling and Simulation of Quantum Key Distribution Systems," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 829–838, Feb. 2014, doi: 2250-2459/2014. 829-838.

[36] M. Mehic, O. Maurhart, S. Rass, and M. Voznak, "Implementation of Quantum Key Distribution Network Simulation Module in the Network Simulator NS-3," *Quantum Information Processing*, vol. 16, no. 10, pp. 1–23, Oct. 2017, doi: 10.1007/s11128-017-1702-z.

[37] B. Bartlett, "A Distributed Simulation Framework for Quantum Networks and Channels," *ArXiv preprint*, Aug. 2018, doi: arXiv: 1808.07047.
[38] A. Feito, "Quantavo: a Maple Toolbox for Linear Quantum Optics," *ArXiv preprint*, Jun. 2008, doi: arXiv: 0806.2171.
[39] F. Tabakin, "Model Dynamics for Quantum Computing," *Annals of Physics*, vol. 383, no. 1, pp. 33–78, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.aop.2017.04.013.
[40] S. Shafi, M. S. Monir, and M. S. Rahman, "Numerical Modeling and Simulation of Quantum Key Distribution Systems under Non-Ideal Conditions," in *2017 IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP)*, 2017, pp. 38–42, doi: 978-1-5386-3374-8/17.
[41] J. R. Johansson, P. D. Nation, and F. Nori, "QuTiP: an Open-Source Python Framework for the Dynamics of Open Quantum Systems," *Computer physics communications*, Vol. 183, no. 8, pp. 1760–1772, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.cpc.2012.02.021.
[42] V. Bergholm, J. Izaac, M. Schuld, C. Gogolin, S. Ahmed, V. Ajith, M. S. Alam, G. Alonso-Linaje, B. AkashNarayanan, A. Asadi, and J. M. Arrazola, "PennyLane: Automatic Differentiation of Hybrid Quantum-Classical Computations," *ArXiv preprint*, Nov. 2018, doi: 10.48550/arXiv.1811.04968.
[43] N. Killoran, J. Izaac, N. Quesada, V. Bergholm, M. Amy, and C. Weedbrook, "Strawberry Fields: a Software Platform for Photonic Quantum Computing," *Quantum*, vol. 3, no. 1, pp. 129–156, Mar. 2019, doi: 10.22331/q-2019-03-11-129.
[44] H. Silvério, S. Grijalva, C. Dalyac, L. Leclerc, P. J. Karalekas, N. Shammah, M. Beji, L. P. Henry, and L. Henriet, "Pulser: an Open-Source Package for the Design of Pulse Sequences in Programmable Neutral-Atom Arrays," *Quantum*, vol. 6, no. 1, pp. 629–650, Jan. 2022, doi: 10.22331/q-2022-01-24-629.
[45] M. Paltenghi and M. Pradel, "Bugs in QQuantum Computing Platforms: an Empirical Study," *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, vol. 6, no. OOPSLA1, pp. 1–27, Apr. 2022, doi: 10.1145/3527330.
[46] J. Luo, P. Zhao, Z. Miao, S. Lan, and J. Zhao, "A Comprehensive Study of Bug Fixes in Quantum Programs," in *2022 IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)*, 2022, pp. 1239–1246, doi: 10.1109/saner53432.2022.00147.
[47] P. Migdał, K. Jankiewicz, P. Grabarz, C. Decaroli, and P. Cochin, "Visualizing Quantum Mechanics in an Interactive Simulation – Virtual Lab by Quantum Flytrap," *Optical Engineering*, vol. 61, no. 8, pp. 81808–81826, Aug. 2022, doi: 10.1117/1.oe.61.8.081808.
[48] B. R. Lacour, M. Maynard, P. Shroff, G. Ko, and E. Ellis, "The Virtual Quantum Optics Laboratory," in *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 2022, pp. 677–687, doi: 10.1109/QCE53715.2022.00091.
[49] B. R. La Cour and M. C. Williamson, "Emergence of the Born Rule in Quantum Optics," *Quantum*, vol. 4, no. 1, pp. 350–379, Oct. 2020, doi: 10.22331/q-2020-10-26-350.
[50] B. R. Lacour and T. W. Yudichak, "Entanglement and Impropriety," *Quantum Studies: Mathematics and Foundations*, vol. 8, no. 3, pp. 307–314, Aug. 2021, doi: 10.1007/s40509-021-00246-w.
[51] B. R. Lacour and T. W. Yudichak, "Classical Model of a Delayed-Choice Quantum Eraser," *Physical Review A*, vol. 103, no. 6, pp. 62213–62225, Jun. 2021, doi: 10.1103/physreva.103.062213.
[52] Z. C. Seskir, P. Migdał, C. Weidner, A. Anupam, N. Case, N. Davis, C. Decaroli, İ. Ercan, C. Foti, P. Gora, and K. Jankiewicz, "Quantum Games and Interactive Tools for Quantum Technologies Outreach and Education," *Optical Engineering*, vol. 61, no. 8, pp. 81809–81809, Aug. 2022, doi: 10.1117/1.oe.61.8.081809.
[53] J. R. Johansson, P. D. Nation, and F. Nori, "QuTiP 2: A Python Framework for the Dynamics of Open Quantum Systems," *Computer Physics Communications*, vol. 184, no. 4, pp. 1234–1240, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.cpc.2012.11.019.

زیرنویس‌ها

[1] Quantum Key Distribution (QKD)
[2] Green QKD

[3] Smart Grids
[4] Polarization
[5] Phase
[6] Java
[7] Python
[8] Reconfigurable
[9] Total Cost of Ownership (TCO)
[10] Event-based
[11] Discrete-Event System
[12] Matlab
[13] Hui
[14] Xiao
[15] https://qcf.soft112.com/
[16] Quantum Entanglement Theory LABoratory (QETLAB)
[17] http://qetlab. com
[18] http://www.physics.uq.edu.au/people/rohde/blog/?page_id=20
[19] http://bird.szfki.kfki.hu/~toth/qubit4matlab.html
[20] http://www.qo.phy.auckland.ac.nz/qotoolbox.html
[21] http://copilot.caltech.edu/documents/230-qousersguide.pdf
[22] https://quest.qtechtheory.org
[23] https://github.com/vsoftco/qpp
[24] http://www.enyo.de/libquantum/
[25] http://tph.tuwien.ac.at/~oemer/qcl.html
[26] http://qucosi.sourceforge.net/
[27] http://sourceforge.net/projects/qnc/
[28] Objective Modular Network Testbed in C++ (OMNeT++)
[29] Air Force Institute of Technology
[30] http://www.qkdnetsim.info/
[31] http://qutip.org/
[32] https://www.qkdsimulator.com/about
http://dancingphysicist.com/blog/using-python-to-simulate-quantum-key-distribution
[33] https://pypi.org/project/cirq/
[34] https://strawberryfields.readthedocs.io/en/stable/
[35] Simulator for Quantum Networks and Channels (https://github.com/att-innovate/squanch)
[36] Symbolic
[37] Maple
[38] Mathematica
[39] http://userpages.umbc.edu/~cmccub1/quacs/quacs.html
[40] http://www3.imperial.ac.uk/quantuminformation/research/downloads
[41] http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/1893/
[42] http://www.pitt.edu/~tabakin/QDENSITY/
[43] https://github.com/QuantumUtils/quantum-utils-mathematica
[44] Real-time
[45] https://github.com/Quantum-Game/quantumgame-2
[46] https://digitalcommons.chapman.edu/scs_articles/ 541
[47] https:// github.com/stared/quantum-game.
[48] https://lab.quantumflytrap.com/u/ (accessed 9 June 2022)
[49] Graphical User Interface (GUI)
[50] Zero-point field
[51] University of Erlangen-Nuremberg
[52] Quantum teleportation
[53] Bloch sphere
[54] Poincare´ sphere