

## Principles of Quantum Information Theory and Its Capabilities in Information Retrieval

Pourya Rahat\*

M.Sc. Student in Information Management  
Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Mohsen Haji  
Zeinolabedini

Assistant Professor, Information Science and  
Knowledge Dept, Faculty of Psychology and  
Educational Sciences, Shahid Beheshti  
University, Tehran, Iran

### Abstract

**Objective:** The primary objective of this research is to analyze the capabilities of Quantum Information Theory (QIT) in improving information retrieval processes. The study seeks to address how the fundamental principles of quantum mechanics can be leveraged to overcome the challenges inherent in traditional information retrieval systems.

**Methodology:** This study was conducted using a library method with an analytical-review approach. Through a comprehensive review of theoretical literature, the foundational concepts of QIT were identified, and their conceptual and practical relevance to the field of information retrieval were systematically analyzed.

**Findings:** The findings indicate that Quantum Information Theory, through concepts such as superposition and entanglement, provides a new framework for information representation, processing, and retrieval. The application of phenomena like quantum algorithms and quantum error correction can significantly increase the accuracy and speed of information retrieval. By unifying the representation, ranking, and cognitive aspects of the user, this approach offers solutions for developing more dynamic and context-aware systems.

\* Corresponding Author: [pouryarahat.dir@gmail.com](mailto:pouryarahat.dir@gmail.com)

**How to Cite:** Rahat, P., Hajizeinolabeini, M. (2024). Principles of Quantum Information Theory and Its Capabilities in Information Retrieval. *Journal of Knowledge Retrieval and Semantic Systems*, Unpublished

Received:

Accepted:

ISSN:

eISSN:

**Conclusion:** Despite existing technical and theoretical obstacles, Quantum Information Theory holds the potential to fundamentally transform the field of information retrieval. It is anticipated that with continued research in this area, innovative technologies based on quantum principles will be developed, leading to enhanced efficiency, security, and precision in future information retrieval systems.

## 1. Introduction

Quantum information is a general form of information that can be considered the fundamental material of the universe (Penchev, 2020). Its basic unit is the qubit, which, unlike a classical bit's binary 0 or 1 state, can exist in multiple states simultaneously. This phenomenon, known as superposition, allows a qubit to be a linear combination of states (Nielsen & Chuang, 2010), enabling quantum parallelism and an exponential increase in computational power. Quantum Information Theory (QIT) explores these principles, along with other key concepts such as entanglement, where qubits become interdependent regardless of distance; the no-cloning theorem, which makes it impossible to create an identical copy of an unknown quantum state; and practical applications like quantum error correction and quantum cryptography. While traditional Information Retrieval (IR) is built on core concepts like Boolean, vector space, and probabilistic models (Melucci, 2015; Tunkelang & Thelwall, 2009; Büttcher, Clarke & Cormack, 2010; N. Gudivada, Rao & R. Gudivada, 2018), QIT provides a new framework to enhance it. This theory offers a way to unify the representation, ranking, and cognitive aspects of the user by applying the formalism and mathematics of quantum mechanics. This connection is often inspired by the theory and applied to classical computers, drawing on the broad use of quantum principles in cognitive science, psychology, and decision-making (Ashoori et al., 2018; Lebedev & Khrennikov, 2020). This paper aims to review the fundamental principles of QIT, analyze their relevance to IR, and represent the opportunities and challenges at the intersection of these two fields.

## 2. Literature Review

The intersection of QIT and IR has evolved from foundational theoretical work to practical and evaluative models. Early research by Piwowarski et al. (2010) proposed a quantum framework to address key IR challenges like interaction, novelty, and diversity, a view expanded by van Rijsbergen (2011), who argued that quantum formalism is the appropriate language for modeling the uncertainty inherent in information. Subsequent studies demonstrated the application of quantum mathematics, such as the "Quantum Probability Ranking Principle" for ranking interdependent documents (Zuccon & Azzopardi, 2010) and the use of quantum theory for "quantum-like" modeling (Khrennikov, 2019) and meaning-focused retrieval (Aerts et al., 2013). More recently, the field has moved toward integrating quantum principles with deep learning, as seen in quantum-inspired neural matching models (Jiang et al., 2020), and addressing security through protocols like quantum private

information retrieval (Fang et al., 2023). This progression indicates a shift from purely theoretical explorations (Ashoori & Rudolph, 2018) to the development of practical evaluation frameworks (Ferrari Dacrema et al., 2024) and new contextual search methods (Alodjants et al., 2024).

### 3. Methodology

This study was conducted as fundamental research, employing an analytical-review method appropriate for the theoretical and emerging nature of the topic. Data collection started with documentary research, using defined keywords to systematically gather sources from databases such as Web of Science and Google Scholar. Following the screening and selection of relevant literature, the research utilized an approach of conceptual analysis and literature synthesis. Foundational concepts from Quantum Information Theory were first extracted and broken down. Then, in the synthesis phase, these concepts were systematically linked to the challenges, needs, and processes of Information Retrieval to build a logical and applied bridge between the two fields.

### 4. Results

The results of this analysis are presented in two main parts. First, the foundational concepts of Quantum Information Theory (QIT) are detailed, organized into three categories: fundamental concepts, including qubits, quantum states, superposition, entanglement, and quantum entropy; principles and theories, such as quantum algorithms and the no-cloning theorem; and applications, like quantum error correction, cryptography, and quantum gates. The second part of the results systematically connects these principles to the domain of Information Retrieval (IR). The results demonstrated how concepts like superposition can offer a probabilistic framework for relevance, how quantum algorithms, such as Grover's algorithm, can exponentially speed up search, and how quantum entanglement and error correction can be used to model complex term dependencies and ensure the security and integrity of the retrieval process, respectively.

### 5. Discussion

The theoretical alignment between Quantum Information Theory (QIT) and Information Retrieval (IR) suggests that quantum principles are exceptionally well-suited to address the core limitations of classical IR systems, particularly the complex issues of context, ambiguity, and human cognition. The inherent probabilistic nature of quantum states, governed by superposition, offers a formal mathematical framework for modeling the fuzzy and subjective concept of relevance more dynamically than traditional vector-space models. Furthermore, the concept of entanglement provides a powerful mechanism to model the non-local dependencies between index terms, documents, and user intent, moving beyond simple co-occurrence counts to capture holistic conceptual relationships. We highlighted that while the full power of quantum computing is not always necessary for these benefits—as evidenced by successful quantum-like (QL) models running on classical hardware—the

ultimate, exponential performance gains promised by algorithms like Grover's algorithm for database searching remain the strongest long-term motivation for future IR systems to leverage true quantum hardware.

## 6. Conclusion

By analytically comparing the core principles of Quantum Information Theory (QIT) and identifying their points of convergence with classical information retrieval systems, this research confirms that Quantum Information Theory offers a potent, mathematically grounded framework with the potential to fundamentally transform the field of Information Retrieval. By leveraging quantum principles—such as superposition to model the inherent uncertainty of relevance and entanglement to capture complex, non-local dependencies between terms—future IR systems can overcome the cognitive and structural limitations of classical models. While the full deployment of quantum algorithms like Grover's algorithm on dedicated quantum hardware promises exponential speed and efficiency gains in the long term, even the adoption of QL models on existing classical infrastructure can yield significant, immediate improvements in accuracy, security, and contextual awareness. Despite existing technical and theoretical obstacles, it is anticipated that continued research in this area will lead to innovative technologies based on quantum principles, resulting in enhanced precision and efficiency in future information retrieval systems.

## Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation to all the material and spiritual supporters who contributed to this research.

**Keywords:** Information Retrieval, Quantum Computing, Quantum Information Theory, Quantum Systems, Quantum Mechanics.

## اصول نظریه کوانتومی اطلاعات و قابلیت‌های آن در بازیابی اطلاعات

دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پوریا راحت \* 

استادیار، گروه علم اطلاعات و دانش‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محسن حاجی زین

العابدینی 

### چکیده

**هدف:** این پژوهش با هدف اصلی تحلیل قابلیت‌های نظریه کوانتومی اطلاعات<sup>1</sup> در بهبود فرآیندهای بازیابی اطلاعات انجام شده است. پژوهش به دنبال پاسخ به این مسئله است که چگونه می‌توان از اصول بنیادی مکانیک کوانتومی برای رفع چالش‌های موجود در سیستم‌های بازیابی اطلاعات سنتی بهره برد.

**روش:** پژوهش حاضر با استفاده از روش کتابخانه‌ای و رویکرد تحلیلی-مروری انجام شده است. در این راستا، با مرور جامع ادبیات نظری، مفاهیم بنیادین نظریه کوانتومی اطلاعات شناسایی و سپس ارتباط مفهومی و کاربردی آن‌ها با حوزه بازیابی اطلاعات به صورت نظام‌مند تحلیل گردیده است.

**یافته‌ها:** یافته‌ها نشان می‌دهد که نظریه کوانتومی اطلاعات از طریق مفاهیمی چون درهم‌نهی و درهم‌تنیدگی، چارچوب جدیدی برای نمایش، پردازش و بازیابی اطلاعات فراهم می‌کند. به‌کارگیری پدیده‌هایی مانند الگوریتم‌های کوانتومی و تصحیح خطای کوانتومی می‌تواند به طور چشمگیری دقت و سرعت بازیابی اطلاعات را افزایش دهد. این رویکرد با یکپارچه‌سازی جنبه‌های بازتابی، رتبه‌بندی و شناختی کاربر، راهکارهایی برای توسعه سیستم‌های پویاتر و آگاه به زمینه ارائه می‌دهد.

**نتیجه‌گیری:** علی‌رغم وجود موانع فنی و نظری، نظریه کوانتومی اطلاعات پتانسیل ایجاد یک تحول بنیادین در حوزه بازیابی اطلاعات را داراست. انتظار می‌رود با پیشرفت تحقیقات در این زمینه، فناوری‌های نوینی مبتنی بر اصول کوانتومی توسعه یابند که منجر به افزایش کارایی، امنیت و دقت در سیستم‌های بازیابی اطلاعات آینده خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** بازیابی اطلاعات، رایانش کوانتومی، نظریه کوانتومی اطلاعات، سیستم‌های کوانتومی، مکانیک کوانتومی.

\* نویسنده مسئول: [pouryarahat.dir@gmail.com](mailto:pouryarahat.dir@gmail.com)

1. Quantum information theory (QIT)

## مقدمه

بررسی مسئله اصلی این پژوهش، که بررسی ربط نظریه کوانتومی اطلاعات با بازیابی اطلاعات -با شیوه‌ای که در حال وارد شدن به مجموعه پردازش‌های کلاسیک است- با مفهوم اطلاعات کوانتومی آغاز می‌شود، که آن دلالتی است بر صورت کلی اطلاعات که برای سری‌های محدود تا بی‌نهایت و یا مجموعه‌های مختلف قابل استفاده است؛ می‌توان آن را به عنوان ماده‌ی بنیادی جهان در نظر گرفت (Penchev, 2020). واحد بنیادی اطلاعات کوانتومی، کیوبیت<sup>۱</sup> است که نشان‌دهنده‌ی انتخابی میان مجموعه نامتناهی از جایگزین‌ها<sup>۲</sup> می‌باشد. دنیای فیزیکی، شامل ذرات کوانتومی مانند الکترون‌ها، از کیفیت «انتخاب» برخوردار است، اما دارای «اراده آزاد» نیست. اراده‌ی آزاد شامل کنش هدفمند می‌شود، در حالی که مکانیک کوانتومی<sup>۳</sup> ماهیت نامعینی دارد (Conway & Kochen, 2006; 2009). جهان را می‌توان به عنوان یک رایانه‌ی کوانتومی در نظر گرفت که اطلاعات کوانتومی را در عمیق‌ترین لایه‌های هستی پردازش می‌کند. در این دیدگاه، تمام فرآیندهای فیزیکی ماهیتی اطلاعاتی-کوانتومی دارند. اطلاعات کوانتومی گذشته، حال و آینده را به عنوان یک کمیت فیزیکی قابل اندازه‌گیری، متحد می‌کند.

نظریه اطلاعات کوانتومی به بررسی اصول بنیادی و مفاهیمی می‌پردازد که زیربنای مکانیک کوانتومی هستند و پیامدهای آن‌ها را برای پردازش اطلاعات بررسی می‌کند. بیت از حالات باینری<sup>۴</sup> (صفر و یک) برای نمایش اطلاعات استفاده می‌کند، در حالی که کیوبیت می‌تواند همزمان در چندین حالت مختلف وجود داشته باشد. به نقل از نایلسن و چانگ<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) «حالت‌ها با نمادهای  $|0\rangle$  و  $|1\rangle$  نمایش داده می‌شوند و یک کیوبیت ترکیبی خطی از این حالت‌هاست، به صورت  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  که  $\alpha$  و  $\beta$  اعداد مختلط هستند به شرطی که  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ »، در واقع اصل برهم‌نهی<sup>۶</sup> به کیوبیت‌ها اجازه می‌دهد تا همزمان در چندین حالت باشند و این امر موجب برقراری «همزمانی کوانتومی»<sup>۷</sup> شده و قدرت محاسباتی

1. Qubit
2. alternatives
3. Quantum mechanics (QM)
4. binary
5. Nielsen & Chuang
6. Superposition
7. Quantum parallelism

را به طور نمایی و چشمگیری افزایش می دهد. درهم تنیدگی<sup>۱</sup> پدیده‌ی کلیدی دیگری است که در آن کیویتهای وابستگی متقابل پیدا می کنند و وضعیت یک کیویته می تواند به صورت لحظه‌ای بر وضعیت دیگری تاثیر بگذارد، فارغ از اینکه این دو کیویته چقدر از هم فاصله دارند.

نظریه اطلاعات کوانتومی همچنین شامل قضیه عدم همانندسازی<sup>۲</sup> است که بیان می کند ایجاد یک کپی یکسان از یک حالت کوانتومی ناشناخته دلخواه غیرممکن است. مفاهیم کلیدی دیگر شامل تصحیح خطای کوانتومی<sup>۳</sup> است که از اطلاعات کوانتومی در برابر خطاهای ناشی از ناهمدوسی<sup>۴</sup> و سایر نویزهای کوانتومی محافظت می کند و همچنین رمزنگاری کوانتومی<sup>۵</sup> که از مکانیک کوانتومی برای ایجاد روشهای ارتباطی امن بهره می برد. این اصول اساسی در توسعه فناوریهایی مانند محاسبات کوانتومی و ارتباطات کوانتومی نقش محوری ایفا می کنند.

هسته‌ی اصلی مفاهیم بازیابی اطلاعات، شامل رویکردها و سیستمهای مدل سازی مختلفی است. این مفاهیم عبارتند از: مدل بولی<sup>۶</sup> و منطقی، مدل فضای برداری<sup>۷</sup>، مدل های احتمالی<sup>۸</sup>، یادگیری ماشین<sup>۹</sup> برای رتبه بندی اسناد، طرح وزن دهی تی. اف-آی. دی. اف<sup>۱۰</sup>، چارچوب ارتباط احتمالی<sup>۱۱</sup>، مدل بازیابی استقلال دودویی<sup>۱۲</sup>، نمونه‌ی بی. ام ۲۵<sup>۱۳</sup>، مدل سازی زبان، واگرایی از تصادفی بودن<sup>۱۴</sup>، فهرست نویسی، بازیابی، ارزیابی، پیش پردازش متن، طرحهای وزن دهی واژه، نمایه موقعیتی<sup>۱۵</sup>، پرسشهای ترکیبی و مجاورت، فنون بازخورد ارتباطی، و کتابخانهها و چارچوبهای بازیابی اطلاعات. این مفاهیم در طراحی و اجرای

1. Entanglement
2. No-cloning theorem
3. Quantum error correction
4. Decoherence
5. Quantum cryptography
6. Boolean
7. vector space model
8. probabilistic models
9. Machine learning
10. TF-IDF
11. Probabilistic relevance framework
12. Binary independence retrieval
13. BM25
14. Divergence from randomness
15. Positional index

سیستم‌های بازیابی اطلاعات کارآمد ضروری هستند و اساس فناوری‌های جستجوی مدرن و موتورهای جستجو را تشکیل می‌دهند (Melucci, 2015; Tunkelang & Tehlwall, 2009; Büttcher, Clarke & Cormack, 2010; N. Gudivada, Rao & R. Gudivada, 2018).

نظریه اطلاعات کوانتومی می‌تواند بازیابی اطلاعات را با یکپارچه‌سازی نمایش، رتبه‌بندی، و جنبه‌های شناختی کاربر، استفاده از فرمالیسم احتمالی، و به‌کارگیری چارچوب‌ها و ریاضیات مکانیک کوانتومی ارتقا دهد. این نظریه از طریق ارتباطات ریاضی به بازیابی اطلاعات مرتبط است. با الهام از این نظریه، چنین ارتباطی بر روی اطلاعاتی که در رایانه‌های کلاسیک رمزگذاری، پردازش و به آن‌ها دسترسی پیدا می‌شود، تمرکز دارد (Ashoori et al, 2018). نظریه اطلاعات کوانتومی به طور گسترده در درک شناختی، روانشناسی، تصمیم‌گیری و بازیابی اطلاعات کاربرد دارد که زمینه‌ای امیدوارکننده در علم اطلاعات است (Lebedev & Khrennikov, 2020). این مقاله سعی دارد تا با مروری بر اصول بنیادی نظریه کوانتومی اطلاعات و با گردآوری توضیحات معتبر، ربط حوزه مذکور با مفهوم بازیابی اطلاعات را تحلیل کند و برجسته سازد؛ هدف دیگر آنکه فرصت‌ها و چالش‌های این تلاقی را بازنمایی کند. این مطالعه همچنین در نظر دارد تا پیشرفت‌های اخیر مواجهه این دو مقوله را انتقال دهد، در شکل‌دهی گفتمان آن مشارکت داشته باشد، به ترسیم چشم‌انداز آینده کمک کند و ضرورت ادامه این راه را بررسی کند.

#### پیشینه پژوهش

پیووارسکی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) پژوهشی تحت عنوان «آنچه تئوری کوانتوم به بازیابی اطلاعات ارائه می‌دهد» دارند؛ این چارچوب مبتنی بر تئوری کوانتوم، عملکرد قابل قبولی را در یک کار بازیابی اطلاعات خاص<sup>۲</sup> ارائه می‌دهد. پتانسیل این چارچوب برای پرداختن به سه چالش مهم در بازیابی اطلاعات یعنی تعامل<sup>۳</sup>، تازگی<sup>۴</sup> و تنوع<sup>۵</sup> مورد بحث قرار گرفته است. فرمول بندی احتمالاتی فیزیک کوانتومی، پایه‌ای محکم برای ساختن یک چارچوب اصولی برای بازیابی اطلاعات در نظر گرفته شده است. پیووارسکی و همکاران (۲۰۱۰) اظهار

1. Piwowarski et al.
2. ad-hoc retrieval task
3. interaction
4. novelty
5. diversity

کرده‌اند که چنین چارچوبی می‌تواند بر مفهوم فضای برداری (مبتنی بر بردار) نیاز اطلاعاتی کاربر بنا شود، در این مدل رویدادهایی مانند ارتباط یک سند با پرسش یا برهم‌کنش‌های کاربر، با فضاهای فرعی (زیرفضاها) در آن فضای برداری مطابقت داده می‌شوند.

زوکون و آزوپاردی<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) نشان دادند که چگونه می‌توان از «اصل رتبه‌بندی احتمال کوانتومی» برای رتبه‌بندی اسناد وابسته به یکدیگر بهره برد؛ چالشی که مدل‌های رتبه‌بندی کلاسیک اغلب با آن درگیر هستند. این یک مثال عالی برای کاربرد عملی ریاضیات کوانتومی در یک چالش مشخص بازیابی اطلاعات است.

دیدگاه پیوارسکی و همکاران (۲۰۱۰) که به آن اشاره شد، دیدگاه بنیادینی است که توسط ون رایزبرگن<sup>۲</sup> (۲۰۱۱)، یکی از پیشگامان حوزه، گسترش یافت. او در مقاله‌ای کلاسیک با عنوان «بازیابی اطلاعات کوانتومی چیست؟» به تبیین مبانی نظری و فلسفی این حوزه پرداخت و استدلال کرد که فرمالیسم مکانیک کوانتومی، زبان مناسبی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ساختار پیچیده اطلاعات است. او در این مقاله چارچوب نظری و فلسفی بازیابی اطلاعات کوانتومی<sup>۳</sup> را پایه‌گذاری می‌کند.

آرکوادزه و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با عنوان «مفاهیم کوانتومی در بازیابی اطلاعات» به بررسی رتبه‌بندی مفاهیم فازی، ارزیابی ارتباط و روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود بازیابی اطلاعات با استفاده از مفاهیم کوانتومی می‌پردازند. این مقاله به بررسی شکل‌گیری مفاهیم کوانتومی، نحوه‌ی نمایش و ذخیره‌سازی آن‌ها، و همچنین روش‌های مقایسه برای الگوریتم‌های بازیابی اطلاعات می‌پردازد. در این راستا، آن‌ها به بازنمایی مفاهیم کوانتومی با کیوبیت‌ها و روش‌های مقایسه آن‌ها از طریق گیت‌های منطقی کوانتومی می‌پردازند.

آئرتس و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) مقاله‌ای با عنوان «بازیابی اطلاعات الهام گرفته شده از کوانتوم با تمرکز بر معنا» دارند که به یک چارچوب بازیابی اطلاعات بر اساس «معنای کوانتومی» برای بازیابی پرسش‌های ساختارمند در مجموعه متون و مجموعه داده‌های آزمون استاندارد اشاره می‌کند. این چارچوب بر بازسازی حالت‌های کامل «موجودیت‌ها و مفاهیم

1. Zuccon, G. & Azzopardi, L.

2. van Rijsbergen, K.

3. Quantum Information Retrieval (QIR)

4. Archuadze et al.

5. Aerts et al.

معنا» از حالت‌های فروپاشیده‌ی آن‌ها که به عنوان ردپایی در اسناد مرتبط شناسایی شده‌اند، استوار است.

ملوچی<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) مطالعه‌ای با عنوان «استخراج یک مبنای بازیابی اطلاعات کوانتومی<sup>۲</sup>» دارد. در این مطالعه نشان می‌دهند که اصل رتبه‌بندی احتمالی<sup>۳</sup> و قضیه نایمان-پیرسون<sup>۴</sup> معادل هستند. همچنین، امکان تعریف مبنای بازیابی اطلاعات کوانتومی وجود دارد که حداقل از لحاظ تئوری، رتبه‌بندی مؤثرتر اسناد را نسبت به روش‌های رتبه‌بندی فعلی ارائه می‌دهد.

عاشوری و رودالف<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) در پژوهشی با عنوان «گزارشی بر بازیابی اطلاعات الهام گرفته شده از نظریه کوانتوم» نشان داده‌اند که مکانیک کوانتومی به صورت ریاضی، نه فیزیکی، در بازیابی اطلاعات استفاده می‌شود و پیشنهاداتی در مورد استفاده از پردازش اطلاعات کوانتومی در بازیابی اطلاعات و تبیینی از این مفاهیم نوظهور در عمل بازیابی را ارائه داده‌اند. این مقاله همچنین سردرگمی بین نظریه کوانتوم و تکنیک‌های بازیابی اطلاعات را روشن می‌کند.

کرنیکف<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) با پژوهشی تحت عنوان «اصول نظریه کوانتوم برای مدل‌سازی کوانتوم‌گونه بازیابی اطلاعات» به سراغ فرمول‌بندی ریاضی و اصول موضوعه مکانیک کوانتومی رفته است. آن‌ها در پژوهش خود نشان داده‌اند که نظریه اندازه‌گیری کوانتومی در بازیابی اطلاعات و تصمیم‌گیری موثر است و تداخل احتمالات آماری در مشاهدات ناسازگار را رفع می‌کند.

لبدف<sup>۷</sup> و کرنیکف (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با عنوان «مروری مقدماتی بر بازیابی اطلاعات کوانتومی» به مرور مختصری بر وضعیت فعلی بازیابی اطلاعات کوانتومی برای تحریک تحقیقات در این زمینه هیجان‌انگیز از علم اطلاعات می‌پردازند. فرمول‌بندی ریاضی نظریه کوانتوم به طور گسترده در شناخت، روانشناسی، تصمیم‌گیری و پردازش اطلاعات استفاده می‌شود. اگرچه این مقاله یک بررسی جامع ارائه نمی‌دهد، اما هدف آن برانگیختن علاقه بیشتر به تحقیق در مورد استفاده از اصول کوانتومی برای پیشرفت در علم اطلاعات است.

1. Melucci, M.
2. Quantum information retrieval basis (QIRB)
3. probability ranking principle
4. Neyman-Pearson lemma
5. Rudolph, T.
6. Khrennikov, A.
7. Lebedev, A.

امریائو، هاوارد و منزفیلد<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) مطالعه‌ای تحت عنوان «مزیت کوانتومی در بازیابی اطلاعات» دارند. این مقاله ویژگی‌ای از سیستم‌های کوانتومی را شناسایی می‌کند که به آن‌ها «مزیت کوانتومی»، در هر کار بازیابی اطلاعات با حافظه‌ی محدود، تحت عنوان «مکانمندی ترتیبی»<sup>۲</sup> می‌دهد. این ویژگی نه تنها برای دستیابی به مزیت کوانتومی ضروری و کافی است، بلکه همچنین میزان این مزیت را نیز تعیین و کمی‌سازی می‌کند.

جیانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل انطباق عصبی الهام گرفته از تداخل کوانتومی برای بازیابی اطلاعات موردی توسعه داده‌اند که نشان از ظرفیت این رویکرد در بهبود معماری‌های پیشرفته بازیابی اطلاعات دارد. این مقاله یک مدل انطباق عصبی<sup>۴</sup> الهام گرفته از مفهوم تداخل کوانتومی برای بازیابی اطلاعات موردی<sup>۵</sup> معرفی می‌کند. این منبع به خوبی نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از اصول کوانتومی برای بهبود مدل‌های یادگیری عمیق در بازیابی اطلاعات استفاده کرد.

آپرتی، جکوماس و سانگ<sup>۶</sup> (۲۰۲۰) در مطالعه خودشان با عنوان «پیمایشی بر رویکردهای بازیابی اطلاعات الهام گرفته شده از نظریه کوانتوم» به این موضوع توجه کرده‌اند که از سال ۲۰۰۴ از تئوری کوانتوم در یکپارچگی و یکپارچه‌سازی جنبه‌های مختلف بازیابی اطلاعات<sup>۷</sup>، از جمله بازنمایی اطلاعات، رده‌بندی و جنبه‌های کاربری و شناخت کاربر استفاده شده است که یک چارچوب کلی برای احتمالات و منطق ارائه می‌دهد و حوزه‌ای امیدوارکننده برای توسعه سیستم‌های پویا، منطبق و آگاه به زمینه به شمار می‌رود. مقاله مذکور مروری در این زمینه است. هدف این مقاله ترسیم چشم انداز این زمینه و ارائه نقشه راهی برای پژوهش‌ها و جهت‌گیری‌های آتی است.

دوالی<sup>۸</sup> (۲۰۲۱) با عنوان «محدودیت‌های ذخیره و بازیابی اطلاعات کوانتومی» محدودیت‌های جهانی در ظرفیت ذخیره اطلاعات کوانتومی و زمان بازیابی را مطرح می‌کند. ظرفیت محدود به مساحت سطح است، زمان بازیابی نیز محدود به حجم؛ او حدود جهانی

1. Emeriau, P., Howard, M. & Mansfield, S.
2. sequential contextuality
3. Jiang et al.
4. Neural Matching
5. Ad-hoc
6. Uperty, S. Gkoumas, D. & Song, D.
7. Information retrieval (IR)
8. Dvali, G.

خاص در ظرفیت ذخیره اطلاعات کوانتومی و در مقیاس زمانی بازیابی آن برای یک سیستم نظری میدان‌های کوانتومی عمومی را ارائه کرده است و بیان کرده که حدود مشابه برای سیستم‌های چندجسمی غیرنسبیتی نیز اعمال می‌شود.

علاوه بر این با تمرکز بر بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی<sup>۱</sup> پژوهش‌هایی انجام شده است. فنگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۳) با پژوهشی با عنوان «بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی از طریق کانال جمعی پرنویز» بیان دارند که پروتکل پیشنهادی دی. اف. اس-کیو. پی. آی. آر از زیرفضای عاری از ناهمدوسی<sup>۳</sup> برای کاهش اثرات نویز در کانال‌های کوانتومی استفاده می‌کند و بدین ترتیب بازیابی ایمن و مطمئن اطلاعات را تضمین خواهد کرد. با رفع نویز واحد جمعی<sup>۴</sup> در کانال‌های کوانتومی، این پروتکل پتانسیل کاربردهای گسترده‌تری در سیستم‌های بازیابی اطلاعات ایمن را نشان می‌دهد. در این مقاله، از زیرفضای عاری از ناهمدوسی<sup>۵</sup> برای پروتکل کیو. پی. آی. آر استفاده شده است تا اثر نویز کانال را روی خطاهای موجود در آیتیم بازیابی شده از بین ببرد.

پژوهش‌های اخیر نشان‌دهنده حرکت این حوزه از مباحث صرفاً نظری به سمت کاربردهای عملی و ارزیابی‌های تجربی است. برای مثال، فراری داکرماء و همکاران (۲۰۲۴) در کنفرانس گروه تخصصی بازیابی اطلاعات<sup>۶</sup> چارچوبی برای استفاده و ارزیابی رایانش کوانتومی (مشخصاً کوانتوم آنیلینگ<sup>۸</sup>) در وظایف بازیابی اطلاعات و سیستم‌های توصیه‌گر ارائه کرده و یک چارچوب ارزیابی به نام کوانتوم سی. ای. اف. را برای این منظور معرفی نموده‌اند. این منبع نشان‌دهنده حرکت جامعه علمی از تئوری به سمت پیاده‌سازی و ارزیابی عملی است.

در همین راستا، الودجانتز<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۲۴) یک رویکرد کاملاً جدید برای جستجو، بازیابی و رتبه‌بندی اسناد متنی مبتنی بر تست بل<sup>۱۱</sup> در فیزیک کوانتومی پیشنهاد داده‌اند که

1. Quantum private information retrieval (QPIR)
2. Fang et al.
3. Decoherence-free subspace-quantum private information retrieval (DFS-QPIR)
4. collective unitary noise
5. Decoherence-free subspace (DFS)
6. Ferrari Dacrema et al.
7. Special Interest Group on Information Retrieval (SIGIR)
8. Quantum Annealing
9. QuantumCLEF
10. Alodjants et al.
11. Bell-like test

نشان‌دهنده پتانسیل بالای اصول کوانتومی برای مدل‌سازی زمینه در بازیابی اطلاعات است. علاوه بر این، پژوهشگران در حال ترکیب اصول کوانتومی با مدل‌های یادگیری عمیق هستند. با توجه به پیشینه پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که تلاقی میان نظریه کوانتومی اطلاعات و بازیابی اطلاعات، یک حوزه تحقیقاتی پویا و امیدوارکننده را شکل داده است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهشگران به صورت هماهنگ بر این باورند که مدل‌های سنتی بازیابی اطلاعات با چالش‌هایی نظیر مدل‌سازی تعاملات پیچیده کاربر، تنوع و تازگی نتایج مواجه هستند. در مقابل، توانمندی اصلی سازوکار کوانتومی در فرمالیسم ریاضیاتی آن نهفته است که با یکپارچه‌سازی بازنمایی، رتبه‌بندی و جنبه‌های شناختی کاربر، چارچوبی کلی برای احتمالات و منطق فراهم می‌آورد.

پیامدهای به کارگیری این رویکرد، توسعه سیستم‌های بازیابی پویاتر، تطبیق‌پذیرتر و آگاه به زمینه است که می‌توانند برتری کوانتومی محسوس، به‌ویژه در وظایف با حافظه محدود، از خود نشان دهند. چشم‌انداز آتی این حوزه، حرکت به سمت پیاده‌سازی پروتکل‌های بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی و بهره‌گیری از مزیت کوانتومی برای افزایش کارایی و امنیت است که باید با ملاحظات اخلاقی، حین توسعه یکپارچه شود. با این حال، موانع موجود نیز قابل توجه هستند؛ از جمله محدودیت‌های فیزیکی در ظرفیت ذخیره‌سازی و زمان بازیابی اطلاعات کوانتومی و تأثیر مخرب نویز در کانال‌های کوانتومی که نیازمند راهکارهایی قطعی، قابل تکرار و قابل اطمینان چون فضای فرعی عاری از ناهم‌دوسی است.

مقایسه نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌ها از بررسی‌های نظری اولیه برای به کارگیری ریاضیات کوانتومی در بازیابی اطلاعات به سمت مدل‌سازی‌های عملی‌تر و امنیتی حرکت کرده‌اند. علی‌رغم این پیشرفت‌ها، خلاءهای تحقیقاتی مهمی همچنان باقی است. شکاف میان مدل‌های نظری الهام‌گرفته از کوانتوم و پیاده‌سازی عملی آن‌ها بر روی سخت‌افزارهای کوانتومی واقعی، یک مورد مسکوت‌مانده و حیاتی است. علاوه بر این، پژوهشی که به صورت نظام‌مند و جامع، اصول نظریه کوانتومی اطلاعات را در بستر بازیابی اطلاعات در ایران تحلیل کند، یافت نشد که این خود یک خلاء تحقیقاتی منطقه‌ای را برجسته می‌سازد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، یک پژوهش بنیادی است و برای اجرای آن از روش تحلیلی-مروری بهره گرفته شده است. با توجه به ماهیت نظری و نوظهور موضوع تلاقی نظریه کوانتومی اطلاعات و بازیابی اطلاعات، این رویکرد به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد؛ زیرا پیش از هرگونه پژوهش تجربی، نیازمند ایجاد یک چارچوب مفهومی منسجم از طریق شناسایی، تحلیل و ترکیب نظام‌مند ادبیات موجود هستیم.

فرایند انجام این پژوهش در چند مرحله مشخص صورت گرفت:

۱. گردآوری داده‌ها: در مرحله اول، از روش کتابخانه‌ای برای گردآوری منابع علمی استفاده شد. تمرکز اصلی بر روی پایگاه‌های استنادی معتبر بین‌المللی نظیر وب آو ساینس<sup>۱</sup> و گوگل اسکالر<sup>۲</sup> قرار گرفت تا از اعتبار و کیفیت علمی منابع اطمینان حاصل شود. می‌توان در پژوهش‌های آتی از ابزارهای هوش مصنوعی متنوع نیز بهره برد.

۲. راهبرد جستجو و انتخاب منابع: جستجوی منابع با استفاده از یک راهبرد نظام‌مند انجام شد که جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است. کلیدواژه‌های اصلی شامل «کوانتوم»، «نظریه کوانتومی اطلاعات» و «بازیابی اطلاعات» با استفاده از عملگرهای بولی ترکیب شدند. پس از اجرای جستجوها، منابع بازیابی شده مورد غربالگری قرار گرفتند؛ ابتدا رکوردهای تکراری حذف و سپس با بررسی عنوان و چکیده، مقالات غیرمرتبط کنار گذاشته شدند تا در نهایت مجموعه‌ای متمرکز و مرتبط برای تحلیل نهایی انتخاب شود.

۳. روش تحلیل: در این پژوهش از رویکرد تحلیل مفهومی<sup>۳</sup> و سنتز ادبیات<sup>۴</sup> استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا مفاهیم بنیادین، اصول و کاربردهای نظریه کوانتومی اطلاعات از دل منابع معتبر استخراج و به اجزای تشکیل دهنده‌شان شکسته شدند. سپس در مرحله سنتز، هر یک از این مفاهیم به صورت نظام‌مند به چالش‌ها، نیازها و فرآیندهای حوزه بازیابی اطلاعات پیوند داده شد. هدف از این کار، صرفاً مرور مفاهیم نبود، بلکه ایجاد ارتباطی منطقی و کاربردی میان این دو حوزه و برجسته‌سازی قابلیت‌های بالقوه حاصل از این تلاقی بود. مقاله حاضر حاصل این تحلیل و سنتز نظام‌مند است. پس از برآورد رکوردهای تکراری

1. Web of Science
2. Google Scholar
3. Conceptual Analysis
4. Literature Synthesis

بازیابی شده از وب آو ساینس و گوگل اسکالر و حذف رکوردهای غیرمرتبط، ۱۶ پژوهش برای پیشینه مقاله حاضر انتخاب شد.

جدول ۱. راهبرد جستجو برای مرور پیشینه

| "Quantum" OR "Quantum Information Theory" OR "Quantum Information" AND "Information Retrieval" |      |                       |                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------|----------------------------------|
| Quantum                                                                                        | *AND | Information Retrieval | تعداد نتایج جستجو در وب آو ساینس |
| *OR                                                                                            |      |                       | ۳۳                               |
| Quantum Information Theory                                                                     |      |                       |                                  |
| *OR                                                                                            |      |                       |                                  |
| Quantum Information                                                                            |      |                       |                                  |

این مقاله از حیث تحلیلی به دو بخش اصلی تقسیم شده است، در بخش اول قصد داریم تا مفاهیم اساسی موجود در بطن نظریه کوانتومی اطلاعات را با ارجاع به منابع و متون توضیح دهیم. این مفاهیم به سه مقوله: ۱. مفاهیم بنیادی؛ ۲. اصول و نظریات؛ ۳. کاربردها و تکنولوژی، تفکیک شده‌اند. در بخش دوم مطالعه، مفاهیم اساسی حوزه نظریه اطلاعات کوانتومی به مفهوم بازیابی اطلاعات ربط داده شده‌اند -البته صرفاً آن دسته از مفاهیمی که در نتیجه و برطبق مرور صورت گرفته شده، تا زمان انجام این مطالعه، ارتباط مستقیم یا نزدیکی با مفهوم بازیابی اطلاعات داشته‌اند- تا از دل این ارتباطات، به برجسته کردن کاربردها پرداخته شود که می‌تواند برای کشف ایده‌های نو مفید واقع شود.

## یافته‌ها

### اصول و مفاهیم اساسی نظریه کوانتومی اطلاعات

در این بخش قصد داریم تا مفاهیم اساسی موجود در بطن نظریه کوانتومی اطلاعات را با ارجاع به منابع و متون توضیح دهیم. این مفاهیم به سه مقوله: ۱. مفاهیم بنیادی؛ ۲. اصول و نظریات؛ ۳. کاربردها و تکنولوژی، تفکیک شده‌اند.

#### ۱. مفاهیم بنیادی:

حالت‌های کوانتومی و کیوبیت

حالات کوانتومی وضعیت یک سیستم کوانتومی را توصیف می‌کنند. یک کوبیت یک سیستم کوانتومی دو حالته است که می‌تواند به صورت خارجی کنترل شود و به آن اجازه می‌دهد بین حالت‌ها تغییر کند (Averin et al, 1999; Brańczyk et al, 2006; Cole et al, 2001). فراتر از کوبیت‌ها، حالات کوانتومی با ابعاد بالا (کیودیت‌ها) منابع غنی‌تری را برای شبکه‌های کوانتومی و ارتباطات ارائه می‌دهند، اگرچه انتقال قابل‌اعتماد آن‌ها همچنان چالش برانگیز است (Cozzolino et al, 2018). کوبیت‌ها توسط اشیاء فیزیکی کوانتومی مانند فوتون‌ها، الکترون‌ها یا اتم‌ها نشان داده می‌شوند و برای محاسبات کوانتومی و پردازش اطلاعات کوانتومی ضروری هستند؛ این واحدها توانایی وجود در دو حالت و دستکاری برای محاسبات کوانتومی را دارند. حالات کوانتومی، که این کوبیت‌ها را توصیف می‌کنند، می‌توانند با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مختلف کنترل و تفکیک شوند. حالات کوانتومی با ابعاد بالا و پردازش اطلاعات کوانتومی با متغیرهای پیوسته مسیرهای اضافی را برای بهبود شبکه‌ها و کاربردهای کوانتومی ارائه می‌دهند. تحقیق و توسعه در حال انجام در این زمینه‌ها راه را برای سیستم‌های محاسباتی و ارتباطی کوانتومی کاربردی هموار می‌کند. حالت‌های کوانتومی به پیکربندی‌های منحصربه‌فردی اشاره دارند که کوبیت‌ها می‌توانند در آن‌ها وجود داشته باشند، و از برهم‌نهی و درهم‌تیدگی برای انجام عملیات فراتر از توانایی‌های محاسبات کلاسیک استفاده می‌کنند. این حالت‌ها ظریف و در برابر تداخلات محیطی آسیب‌پذیر هستند و منجر به از دست رفتن اطلاعات و فروپاشی حالت‌های کوانتومی می‌شوند.

#### برهم‌نهی کوانتومی

اصل سوپروپوزیشن برای درک رفتار اجسام کوانتومی ضروری است و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا خواص موجی از خود نشان دهند و به طور همزمان در چندین مکان وجود داشته باشند. این یک اصل بنیادی در مکانیک کوانتومی است که بیان می‌کند هر دو (یا بیشتر) حالت کوانتومی را می‌توان با هم جمع کرد (برهم‌نهی) و نتیجه یک حالت کوانتومی معتبر دیگر خواهد بود (Dmytrovych & Volodymyrovich, 2017; Gudder, 1970). این اصل یک خاصیت اساسی از تابع موج است که دامنه احتمال موقعیت و سایر متغیرهای یک ذره را توصیف می‌کند (Dmytrovych & Volodymyrovich, 2017). این مفهوم

درک کلاسیک ما از واقعیت را به چالش می‌کشد و پیامدهای عمیقی برای محاسبات کوانتومی، اپتیک کوانتومی و درک گذار کلاسیک-کوانتوم دارد. این اصل که مکانیک کوانتومی را از مکانیک کلاسیک متمایز می‌کند، زیرا نیازمند پذیرش عدم قطعیت در نتایج مشاهدات است (Duff, 1964). این اصل زیربنای بسیاری از پیش‌بینی‌های منحصر به فرد و غیرشهودی نظریه کوانتومی است، مانند وجود حالت‌هایی که ماهیتا احتمالی هستند تا قطعی و جبری. با این حال، این اصل تابع محدودیت‌های نظری است و پیامدهای عمیقی برای تفسیر مکانیک کوانتومی، به ویژه در مقیاس‌های ماکروسکوپی دارد. البته باید گفت رویکردهایی منطقی به این اصل وجود دارند که به چالش‌ها و تناقضات مفهومی مانند آنچه در تمثیل گربه شرودینگر نشان داده شده است، می‌پردازد. از سویی، چنین مقوله‌ای امکان یادگیری ماشین چند خصوصیتی را فراهم می‌کند و به مدل‌های کوانتومی اجازه می‌دهد تا به طور همزمان داده‌ها را از منابع مختلف پردازش و یاد بگیرند که منجر به بهبود عملکرد نسبت به یادگیری تک و یژگی کلاسیک می‌شود (Nguyen et al, 2022). این اصل در شبکه‌های عصبی کوانتومی و حتی در زمینه نظریه‌های جامعه‌شناسی، جایی که به عنوان «سوپرپوزیشن اجتماعی» برای توضیح تغییر اجتماعی از طریق ترکیب حالات اجتماعی مختلف، به کار گرفته شده است (Kurizki, 2020).

#### درهم‌تنیدگی کوانتومی

مفهومی بنیادی در فیزیک کوانتومی است که در آن، حالت‌های کوانتومی ذرات، فارغ از فاصله‌ی آن‌ها، به هم وابسته می‌شوند و منجر به همبستگی‌های غیرموضعی می‌گردد (Wong, 2020; Niknamian et al, 2019; Maiolo et al, 2006). اروین شرودینگر<sup>۱</sup>، این پدیده را «جوهر مکانیک کوانتومی» توصیف کرده است. درهم‌تنیدگی با پارادوکس‌ها و پدیده‌های خلاف شهود متعددی مرتبط است و مفاهیم سنتی مکان و جداسازی را به چالش می‌کشد (Zeilinger, 1998; Melnikov et al, 2018). نقشی حیاتی در ارتباطات، رمزنگاری و محاسبات کوانتومی ایفا می‌کند. پیشرفت‌های اخیر بر درهم‌تنیدگی چند ذره‌ای و کاربردهای آن در فناوری‌های پیشرفته متمرکز است. جنبه‌ای عمیق و مرموز از دنیای کوانتومی که پیامدهای آن از فیزیک بنیادی تا کاربردهای عملی در زمینه‌های مختلف را در بر می‌گیرد. حالت و اندازه‌گیری یک ذره به طور آنی بر حالت ذره

1. Erwin Schrödinger

دیگر موثر است. مفهوم غیرموضعی بودن، بر ماهیت منحصر به فرد درهم‌تنیدگی کوانتومی تاکید می‌کند (Kurizki, 2020). این مفهومی محوری، نظری و عملی در علوم اطلاعات است که امکان برقراری ارتباطات پیشرفته، محاسبات و پروتکل‌های رمزنگاری را فراهم می‌کند. در تعریفی دیگر، این پدیده باعث می‌شود جفت یا گروهی از ذرات به گونه‌ای به هم مرتبط می‌شوند که حالت کوانتومی هر ذره را نمی‌توان مستقل از حالت دیگری توصیف کرد (Niknamian et al, 2019). نسیت خاص محدودیت‌هایی را بر انتقال اطلاعات بین سیستم‌های دوردست اعمال می‌کند؛ آلبرت اینشتین به طرز مشهوری از این پدیده به عنوان «عمل شیخ‌وار از راه دور» یاد کرد (Polzik, 2002). این اصل منجر به بحث‌ها و تناقض‌هایی در بین فیزیکدانان در مورد پیامدهای آن، به ویژه در رابطه با برقراری ارتباط سریع‌تر از نور شده است. برخی از محققان نتیجه‌گیری کرده‌اند که چنین ارتباطی غیرممکن است (Xue, 2021). به علاوه این جنبه‌ای مرکزی و گیج‌کننده از نظریه کوانتوم است و ذرات را به روشی به هم پیوند می‌دهد که با شهود کلاسیک در مورد فضا و زمان در تضاد تلقی می‌شود. این پدیده پیامدهای قابل توجهی برای درک ما از جهان و توسعه فناوری‌های آینده دارد (Kohnle & Deffebach, 2015; Xinye, 2021; Xue, 2021).

#### آنتروپی و اطلاعات کوانتومی

این حیطه به اندازه‌گیری تصادفی بودن و تمایز در حالات کوانتومی می‌پردازد. برای تعریف و اندازه‌گیری آنتروپی کوانتومی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است، مانند استفاده از جفت‌های مزدوج مشاهده‌پذیرها که فضای فاز کوانتومی را تشکیل می‌دهند (De Julio, 2022). نظریه اطلاعات منطقی این مفهوم را به سیستم‌های کوانتومی گسترش می‌دهد (Anza & Crutchfield, 2022). این چارچوب‌ها به دنبال آن هستند که جنبه‌های احتمالی و غیرکلاسیک سیستم‌های کوانتومی را ثبت کنند و ماهیت پیچیده آنتروپی و اطلاعات کوانتومی را روشن سازند.

آنتروپی کوانتومی معیاری برای سنجش عدم قطعیت، تصادفی بودن یا بی‌نظمی در یک سیستم کوانتومی است. این مفهوم مشابه آنتروپی کلاسیک عمل می‌کند، اما در مورد حالات کوانتومی به کار می‌رود. آنتروپی کوانتومی میزان اطلاعات گم‌شده را زمانی که تنها از حالت کوانتومی سیستم اطلاع داریم، کمیت‌سازی می‌کند. در اینجا، اطلاعات در یک چارچوب کوانتومی کدگذاری شده و از طریق کانال‌های کوانتومی قابل پردازش و انتقال

است (Watanabe & Ohya, 2010; Uttam, 2012). آنتروپی کوانتومی در عین حال که شباهت‌هایی با همتای کلاسیک خود دارد، ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیک کوانتومی را نیز نشان می‌دهد، مانند تاثیر پدیده‌هایی مانند اثر آهارونوف-بوم (Lima et al, 2023). علاوه بر این، آنتروپی کوانتومی را می‌توان از طریق اصل لاندائر<sup>۱</sup> به ترمودینامیک مرتبط کرد، که پاک کردن اطلاعات را به اتلاف گرما مرتبط می‌کند (Lent, 2018).

این مفاهیم برای درک ارتباطات کوانتومی ضروری هستند. آن‌ها همچنین در توسعه فناوری‌های کوانتومی مانند رمزنگاری کوانتومی و محاسبات کوانتومی نقش اساسی دارند. این اصل را به عنوان یک کلاس هم‌ساخت‌شناسی کلی در نظر می‌گیرند که احتمالات کلاسیک و کوانتومی و عملگرهای مشاهده‌پذیر را تعمیم می‌دهد (Baudot et al, 2015). آنتروپی منطقی، مشتق شده از منطق پارتیشن‌بندی، مفهوم طبیعی اطلاعات را برای نظریه اطلاعات کوانتومی فراهم می‌کند که بر تمایز حالات کوانتومی تمرکز دارد (Ellerman et al, 2018). به نظریه اطلاعات که توسط شانون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۴۸ و جی‌نز<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۷ پایه‌گذاری شد، متصل است (Tsallis, 2022).

در زمینه مکانیک کوانتومی به طور خاص، آنتروپی کوانتومی مفهومی مشابه آنتروپی اطلاعات را نشان می‌دهد، اما برای توصیف عدم قطعیت در حالات کوانتومی. این عدم قطعیت ناشی از اصول مکانیک کوانتومی مانند اصل عدم قطعیت هایزنبرگ<sup>۴</sup> است که محدودیت‌هایی را برای اندازه‌گیری همزمان خواص فیزیکی ذرات کوانتومی ایجاد می‌کند. تاثیر اندازه‌گیری‌های کوانتومی بر آنتروپی اساسی است؛ این اصل با نظریه اطلاعات منطقی در تعامل است.

#### کانال‌های کوانتومی و نویز

کانال‌های کوانتومی در ارتباطات کوانتومی ضروری هستند و مسیر انتقال اطلاعات کوانتومی را فراهم می‌کنند. این کانال‌ها تحت تاثیر نویز قرار دارند که مانعی مهم در برقراری ارتباطات کوانتومی در مسافت‌های طولانی و شبکه‌های کوانتومی توزیع شده است.

1. Landauer principle
2. Shannon
3. Jaynes
4. Heisenberg

پژوهشگران، شبکه‌های عصبی کوانتومی را برای مطالعه و تشخیص نویز در کانال‌های کوانتومی به کار گرفته‌اند و به دقت بالایی در مدل‌سازی رفتار کانال‌های نویزی دست یافته‌اند. امکان پیاده‌سازی رمزگشاهای کوانتومی وجود دارد که کارایی قابل مقایسه‌ای با الگوریتم‌های کلاسیک را نشان می‌دهد، علی‌رغم محدودیت‌های رایانه‌های کوانتومی در مقیاس میانی پرنویز<sup>۱</sup> (Hamidi-rad & Kaewell, 2022). نویز در کانال‌های کوانتومی به هر گونه درهم‌کنش ناخواسته بین سیستم کوانتومی و محیط آن اشاره دارد که می‌تواند منجر به خطا در انتقال اطلاعات کوانتومی شود. این نویز می‌تواند ناشی از ناهم‌دوسی<sup>۲</sup> و سایر منابع نویز کوانتومی باشد و بر وفاداری<sup>۳</sup> حالت کوانتومی در حال انتقال تاثیر بگذارد (Li, 2020; Melvin, 2023). در حالی که کانال‌های کوانتومی و نویز اغلب به عنوان عوامل مخرب در نظر گرفته می‌شوند، آن‌ها همچنین در رمزنگاری کوانتومی و تصحیح خطا<sup>۴</sup> نقش ایفا می‌کنند (Kretschmann et al, 2008). علاوه بر این، اطلاعات هم‌دوس<sup>۵</sup> یک کانال کوانتومی پرنویز، کمیتی است که با پردازش کوانتومی قابل افزایش نیست و با ظرفیت این کانال برای تصحیح خطای کوانتومی مرتبط است (Nielsen & Schumacher, 1996). مطالعه این مفاهیم بر توسعه کدهای تصحیح خطا و پروتکل‌های ارتباطی امن تاثیر می‌گذارد. درک ماهیت کانال‌های کوانتومی و کاهش نویز برای پردازش قابل اعتماد اطلاعات کوانتومی و تحقق سیستم‌های محاسباتی کوانتومی عملی ضروری است (Hirche et al, 2016; Hirche, 2015; Holbrook et al, 2015; Holevo, 1997; ) Khalifa et al, 2021; Kretschmann et al, 2008, Li, 2020; Melvin, 2023, (Nielsen, 2000; Nielsen & Schumacher, 1996).

مثلاً استفاده از یک سوئیچ کوانتومی که به ذرات کوانتومی اجازه می‌دهد، تا در یک درهم‌نهی از نظم‌های مختلف حرکت کنند، می‌تواند ارتباط بدون نویز را از طریق کانال‌های پرنویز امکان‌پذیر سازد (Caleffi et al, 2019). شبکه‌های عصبی کوانتومی به عنوان روشی کارآمد برای مدل‌سازی و تشخیص نویز در کانال‌های کوانتومی پیشنهاد شده‌اند و اثربخشی بالایی را در آموزش و مشخصه‌یابی نویز نشان می‌دهند (Junyang-Song et al, 2023).

1. NISQ
2. decoherence
3. fidelity
4. error correction
5. coherent information

## ۲. اصول و نظریات

### الگوریتم‌های کوانتومی (عملیات و مدل‌های رایانش)

عملیات کوانتومی شامل دستکاری کیوبیت‌ها از طریق گیت‌های کوانتومی برای انجام محاسبات است (Mizukami & Koga, 2023). الگوریتم‌ها، عملیات و مدل‌های محاسباتی کوانتومی با مهار پدیده‌های کوانتومی برای افزایش قدرت و کارایی محاسبات، پارادایم‌های محاسبات سنتی را متحول می‌کنند. الگوریتم‌های کوانتومی توالی‌هایی از گیت‌های منطقی کوانتومی هستند که روی کیوبیت‌ها اعمال می‌شوند تا وظایف محاسباتی را انجام دهند. این الگوریتم‌ها از پدیده‌هایی مانند درهم‌نهی بهره می‌برند (Ralescu & Mayfield, 2005; Tasnim, Rahmi & Shamanta, 2012). عملیات کوانتومی به دستکاری کیوبیت‌ها در یک رایانه کوانتومی با استفاده از گیت‌های کوانتومی مانند گیت هادامارد<sup>۱</sup> و گیت‌های پاولی<sup>۲</sup> اشاره دارد که می‌توان آن‌ها را در یک چارچوب واحد از گیت‌ها خلاصه کرد (Ralescu & Mayfield, 2005; Slepy, 2006).

مدل‌های محاسبات کوانتومی اساس نظری برای محاسبات کوانتومی را فراهم می‌کنند. مدل مدار کوانتومی یکی از این چارچوب‌ها است، که در آن پژوهشگران محاسبه را به صورت یک توالی از عملیات گیت روی کیوبیت‌ها نمایش می‌دهند (Wootton, 2024). الگوریتم‌های کوانتومی مجموعه رویه‌های محاسبات کوانتومی، عملیات کوانتومی انجام شده روی داده‌های کوانتومی و مدل‌های محاسباتی و در واقع چارچوب‌هایی انتزاعی هستند که اصول و ساختار زیربنایی محاسبات کوانتومی را توصیف می‌کنند. این عناصر برای زمینه محاسبات کوانتومی که قرار است قابلیت‌های محاسباتی را برای مسائل پیچیده خاصی متحول کند، ضروری هستند.

### قضیه تکثیرناپذیری<sup>۳</sup> کوانتومی

قضیه تکثیرناپذیری در نظریه اطلاعات کوانتومی بیان می‌کند که ایجاد نسخه‌های کپی دقیق و یکسان از حالات کوانتومی ناشناخته دلخواه غیرممکن است. این اصل بنیادی در رمزنگاری کوانتومی اهمیت دارد. این قضیه ارتباط نزدیکی با مفهوم عدم تلهپورت دارد،

1. Pauli

2. Hadamard

3. No-Cloning theorem

جایی که ارسال حالت‌های کوانتومی از طریق کانال‌های کلاسیک بدون درهم‌تنیدگی از پیش به اشتراک گذاشته شده ممنوع است (Girling, Cirstoiu & Jennings, 2023). این قضیه منحصر به فرد بودن اطلاعات کوانتومی را تضمین می‌کند و زیربنای امنیت رمزنگاری کوانتومی را تشکیل می‌دهد (Bergou & Hillery, 2013; Lovett & Kok, 2010). قضیه تکثیرناپذیری نه تنها یک مفهوم مستقل است، بلکه با سایر اصول کوانتومی نیز ارتباط عمیقی دارد. برای مثال، این قضیه معادل این اصل است که درهم‌تنیدگی نمی‌تواند تحت عملیات محلی و ارتباطات کلاسیک افزایش یابد (Horodecki & Horodecki, 1997). ارتباطات این قضیه با سایر پدیده‌های کوانتومی، ماهیت منسجم تئوری کوانتومی و نقش بنیادی آن در این زمینه را برجسته می‌کند.

### ۳. کاربردها و تکنولوژی

#### تصحیح و تاب‌آوری خطا

شامل طراحی الگوریتم‌ها و تکنیک‌هایی مانند تصحیح خطای کوانتومی<sup>۱</sup> برای محافظت از اطلاعات کوانتومی در برابر خطا و ناهم‌دوسی است (Khan, 2023). این حوزه برای افزایش پایداری و یکپارچگی مدارهای کوانتومی بر روی گیت‌های جامع و پارامترهایی مانند احتمال خطا و فاصله کدهای تصحیح خطا تمرکز می‌کند.

این شامل کدگذاری اطلاعات کوانتومی در یک فضای هیلبرت<sup>۲</sup> بزرگتر است به طوری که علی‌رغم وقوع خطاهای خاص، اطلاعات اصلی قابل بازیابی باشد (Munro et al., 2009). بحث تحمل خطا از سویی، این مفهوم را بسط می‌دهد؛ آن هم با اطمینان از اینکه کل فرآیند محاسبات کوانتومی، از جمله مراحل تصحیح خطا، حتی زمانی که اجرای سیستم خود در معرض خطا قرار می‌گیرند، به درستی پیش می‌رود (Terhal, 2015).

تصحیح خطای کوانتومی و تحمل خطا برای تحقق عملی سیستم‌های محاسباتی و ارتباطی کوانتومی اساسی هستند. چنین مقوله‌هایی با ممکن ساختن بازیابی اطلاعات کوانتومی و اطمینان از استحکام محاسبات کوانتومی در برابر نویز و نقص در اجرای سیستم،

1. Quantum Error Correction (QEC)

2. Hilbert space

به حساسیت سیستم‌ها به خطا می‌پردازند. تحقیق و توسعه مداوم در این زمینه‌ها برای پیشبرد این حوزه به سمت فناوری‌های کوانتومی مقیاس‌پذیر و قابل اعتماد ضروری است.

### رمزنگاری کوانتومی<sup>۱</sup>

از اصول فیزیک کوانتومی برای برقراری ارتباط امن با جلوگیری از دسترسی غیرمجاز به داده‌های ارسالی استفاده می‌کند. این فناوری از پروتکل‌های توزیع کلید کوانتومی<sup>۲</sup> برای ایجاد کلیدهای رمزگذاری امن استفاده می‌کند (مانند پروتکل بی.بی. ۸۴<sup>۳</sup>) و بدین ترتیب، رمزنگاری یا رمزگشایی اطلاعات در حال انتقال را برای شنودگران بالقوه بسیار دشوار می‌سازد. رمزنگاری کوانتومی امنیت بالاتری را نسبت به روش‌های رمزنگاری سنتی ارائه می‌دهد، به ویژه با توجه به ظهور قابلیت‌های رایانه‌های کوانتومی که می‌توانند تکنیک‌های رمزنگاری متعارف را به خطر بیندازند (Bernstein, 2023; Kavuri et al, 2023; Giroti & Malhotra, 2022; Frigiyik, 2022). این رویکرد به امنیت داده با ارائه سطح جدیدی از محافظت در برابر تهدیدات سایبری، مقولات مختلفی مانند رای گیری آنلاین، بانکداری و تولید را متحول خواهد کرد. سطح جدیدی از امنیت که الگوریتم‌های کلاسیک ممکن است در مواجهه با تهدید بالقوه رایانه‌های کوانتومی از آن برخوردار نباشند.

### توزیع کلید کوانتومی

یک روش امن است که دو طرف، بر فرض آلیس و باب، را قادر می‌سازد تا یک کلید مخفی مشترک را بر کانال کوانتومی ایجاد کنند و بدین ترتیب امنیت بی‌فید و شرط در برابر استراق سمع را تضمین می‌کند (Bassi et al, 2023; Malavolta & Wahler, 2023). البته با فرض وجود کانال‌های کلاسیک تایید شده برای پیاده سازی عملی.

پیشرفت‌های اخیر، الگوریتم‌های رمزنگاری پساکوانتوم<sup>۴</sup> را با کیو.کی. دی ادغام کرده‌اند که باعث ساده‌سازی ساختارهای شبکه و تسهیل افزودن کاربران جدید می‌شود؛ بدون خدشه‌دار کردن امنیت. علاوه بر این، کیو.کی. دی عمدتاً در ارتباطات نقطه به نقطه مورد استفاده قرار گرفته است، اما تلاش‌هایی برای گسترش کاربرد آن به شبکه‌های چند

---

1. quantum cryptography  
2. quantum key distribution (QKD)  
3. BB84  
4. Post-quantum cryptography (PQC)

کاربره در حال انجام است (Techateerawat, 2012). این موارد نشان‌دهنده پیشرفت قابل توجه در تکنیک‌های رمزنگاری و روشی برای توزیع کلید امن است که از لحاظ تئوری در برابر حملات، از جمله حملات رایانه‌های کوانتومی، مصون باشد. ادغام آن با رمزنگاری پساکوانتوم قابلیت اعمال آن را در شبکه‌های بزرگتر افزایش می‌دهد، که نشان‌دهنده آینده امیدوارکننده‌ای برای ارتباطات امن کوانتومی است.

#### گیت‌ها و مدارهای کوانتومی

گیت‌های کوانتومی روی کیوبیت‌ها عمل می‌کنند و حالت بردارهای آن‌ها را از طریق عملیات‌هایی مانند گیت‌نات<sup>۱</sup>، گیت‌های پاولی و گیت هادامارد<sup>۲</sup> تغییر می‌دهند (Baaquie, 2023). این مدارها از کیوبیت‌های ابررسانا تشکیل شده‌اند که تحت تاثیر تشدیدگرها، میدان‌های مغناطیسی و سایر برهم‌کنش‌ها قرار می‌گیرند و اطلاعات را از طریق حالات مکانیکی کوانتومی - به جای ولتاژهای بالا و پایین کلاسیک - منتقل می‌کنند.

گیت‌های کوانتومی همانند گیت‌های منطقی کلاسیک در رایانه‌های معمولی، بلوک‌های سازنده بنیادی در محاسبات کوانتومی هستند. آن‌ها روی تعداد کمی از کیوبیت‌ها عمل می‌کنند؛ این گیت‌ها از پدیده‌های مکانیک کوانتومی مانند برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی استفاده می‌کنند. مدارهای کوانتومی از اتصال آنبثاری یا سلسله‌مراتبی این گیت‌های کوانتومی تشکیل شده‌اند که با دستکاری کیوبیت‌ها، که حاملان اطلاعات کوانتومی هستند، برای انجام محاسبات پیچیده و اجرای الگوریتم‌ها مرتب می‌شوند. توسعه و بهینه‌سازی این گیت‌ها و مدارهای کوانتومی برای پیشرفت محاسبات کوانتومی و برای پیشرفت مدارهای فوتونیک کوانتومی مجتمع ضروری است، زیرا آن‌ها زیربنای پتانسیل پردازش اطلاعات کوانتومی در مقیاس بزرگ را تشکیل می‌دهند.

#### تله‌پورت (انتقال از راه دور) کوانتومی و کدگذاری فوق چگال

تله‌پورت کوانتومی فرآیندی است که در آن حالت یک سیستم کوانتومی از یک مکان به مکان دیگر منتقل می‌شود، بدون اینکه خود سیستم کوانتومی به صورت فیزیکی منتقل شود. این امر از طریق درهم‌تنیدگی ممکن می‌شود که در بخش‌های قبلی مقاله توضیح داده شد؛ از سوی دیگر، کدگذاری فوق چگال یک پروتکل ارتباطی کوانتومی است که با بهره‌گیری

1. NOT

2. Hadamard gate

از خواص درهم‌تنیدگی کوانتومی، امکان انتقال دو بیت اطلاعات کلاسیک را تنها با ارسال یک کیوبیت فراهم می‌کند. مطالعات انجام شده رویکردها و پیشرفت‌های مختلفی را برای این پروتکل‌ها ارائه می‌دهند. برای مثال، نمودارهای اتصال زنجیره‌ای معکوس‌کننده<sup>۱</sup> دیدگاهی هندسی در مورد درهم‌تنیدگی کوانتومی ارائه می‌کنند که برای تله‌پورت کوانتومی و کدگذاری فوق چگال اساسی است. علاوه بر این، استفاده از یک حالت پنج کیوبیتی در جهت تسهیل تله‌پورت کامل و همزمان برای کدگذاری فوق چگال، کارآمد نشان داده شده است که نسبت به روش‌های سنتی تراکم اطلاعاتی بالاتری دارد. همچنین، سیستم‌های درهم‌تنیده کوانتومی با تعداد کیوبیت فرد، که از جفت‌های گرینبرگر-هورن-زایلینگر<sup>۲</sup> و بل<sup>۳</sup> تشکیل شده‌اند، برای این پروتکل‌ها مفید شناخته شده‌اند؛ در واقع قابلیت ارسال « $2N + 1$ » بیت کلاسیک با انتقال « $N + 1$ » کیوبیت را دارند (Buot & Otadoy, 2023; Muralidharan & Panigrahi, 2008; Panigrahi & Muralidharan, 2007; Saha & Panigrahi, 2011).

این پروتکل‌ها در زمینه‌های مختلفی از جمله «کیودیت‌های توپولوژیکی»<sup>۴</sup> که توسط «آنیون‌ها»<sup>۵</sup> تحقق می‌یابد، مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده تطبیق‌پذیری و کاربردهای بالقوه آن‌ها در پردازش اطلاعات کوانتومی است (Oschsner, 2023). این دو مقوله در اصل دو پروتکل هستند که از ویژگی‌های منحصر به فرد درهم‌تنیدگی کوانتومی برای دستیابی به انتقال اطلاعات و وظایف ارتباطی استفاده می‌کنند؛ کاری که با سیستم‌های کلاسیک امکان‌پذیر نیست. همچنان تحقیقات در این زمینه به بررسی حالات و سیستم‌های کوانتومی جدید، برای بهبود کارایی و قابلیت‌های این پروتکل‌های پیشرفته ادامه دارد و این امر با در نظر داشتن کاربردهای بالقوه در ارتباطات و محاسبات کوانتومی در جریان است.

ارتباط اصول و مفاهیم اساسی کیو. آی. تی با مفهوم بازیابی اطلاعات در این بخش قصد داریم تا با تعمیم اصول نظریه کوانتومی اطلاعات به مفهوم مطلق بازیابی اطلاعات، نگاهی به ترکیبات موجود در این حوزه داشته باشیم و رویکردهای نو را متصور شویم.

1. Inverter-chain link (ICL)
2. Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)
3. Bell
4. topological qudits
5. anyons

### کیویت و حالت‌های کوانتومی در بازیابی اطلاعات

کیویت‌ها و حالت‌های کوانتومی، ارکان اصلی در زمینه علم اطلاعات کوانتومی<sup>۱</sup>، زیرشاخه بازیابی اطلاعات را نیز در بر می‌گیرد. حالت‌های کوانتومی، پیکربندی‌هایی هستند که کیویت‌ها می‌توانند به خود بگیرند و نقش مهمی در ذخیره‌سازی و بازیابی اطلاعات در سیستم‌های کوانتومی ایفا می‌کنند (Flarend & Hilborn, 2022; Gerry & Bruno, 2012; Liu et al, 2022; Archuadze et al, 2012). در حالی که حالت‌های کوانتومی و کیویت‌ها بخش جدایی‌ناپذیر بازیابی اطلاعات کوانتومی هستند، اما لی (۲۰۲۳) فرضیه فیزیکی بودن کیویت‌ها را به چالش می‌کشد و پیشنهاد می‌کند که آن‌ها سازه‌های ریاضی هستند که مشابه فیزیکی مستقیمی ندارند. برعکس، کورسباکن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹) و بنهلم<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۹) نمونه‌هایی از سیستم‌های فیزیکی مانند کیویت‌های شار یا ناپایا و یون‌های به دام افتاده را ارائه می‌کنند که در آن‌ها کیویت‌ها برای همدوسی کوانتومی پردازش اطلاعات ساخته و دستکاری می‌شوند. این دو مقوله روش‌های جدیدی را برای نمایش، ذخیره و دسترسی به اطلاعات ارائه می‌دهند. با وجود بحث نظری در مورد فیزیکی بودن کیویت‌ها، پیاده‌سازی‌های عملی<sup>۴</sup> کاربرد آن‌ها را در فناوری‌های اطلاعات کوانتومی نشان می‌دهد. بنابراین، رابطه بین این سه هم‌بنیادی و هم در حال تکامل است و تحقیقات در حال انجام به درک و کاربرد ما از این مفاهیم در حوزه کوانتوم کمک می‌کند.

حالت‌های کوانتومی نقش اساسی در پروتکل‌های بازیابی اطلاعات کوانتومی ایفا می‌کنند. بازیابی اطلاعات کوانتومی خصوصی به کاربران این امکان را می‌دهد تا حالت‌های کوانتومی خاصی را با ایمنی و کارآمدی از سرورها و سیستم‌های اطلاعاتی بازیابی کنند بدون اینکه فاش شود به کدام حالت دسترسی پیدا کرده‌اند، و بدین ترتیب حریم خصوصی و امنیت را افزایش می‌دهد. استفاده از زیرفضای عاری از ناهمدوسی در بازیابی اطلاعات کوانتومی خصوصی حتی در حضور کانال‌های کوانتومی نویزدار، اطمینان، امنیت پایگاه داده و حریم خصوصی کاربر را تضمین می‌کند و از تقلب و بازیابی‌های نادرست جلوگیری می‌نماید. علاوه بر این، سیستم‌های کوانتومی به دلیل ویژگی‌هایی مانند بافت متوالی<sup>۴</sup>، در کارهای بازیابی اطلاعات (Fnag, 2023) نسبت به روش‌های کلاسیک برتری نشان

1. Quantum information science (QIS)
2. Korsbakken
3. Benhelm
4. sequential contextuality

می دهند که قدرت استراتژی های کوانتومی را در سناریوهای بازیابی با حافظه محدود نشان می دهد.

#### بازیابی اطلاعات و برهم نهی

برهم نهی پیامدهای قابل توجهی برای فرآیندهای بازیابی اطلاعات دارد. از خواص این اصل می توان برای بهبود کارایی و امنیت روش های بازیابی اطلاعات استفاده کرد (Kovachy et al, 2015; Liu et al, 2022). برای مثال، رمزنگاری کوانتومی از ویژگی های برهم نهی کوانتومی برای ایمن سازی پایگاه های داده ابری استفاده می کند و امکان رمزگذاری اطلاعات کوانتومی و تضمین حریم خصوصی را در هنگام بازیابی اطلاعات مبتنی بر سرور فراهم می کند (Liu et al, 2022). گرچه ایجاد برهم نهی ها، به ویژه برای حالت های کوانتومی ناشناخته، تحت محدودیت های خاص و قضایای عدم توانایی<sup>۱</sup> قرار دارد که چالش هایی را برای کاربرد عملی آنها در سیستم های بازیابی اطلاعات ایجاد می کند (Bandyopadhyay, 2020; Oszmaniec et al, 2016).

برهم نهی با ارائه یک چارچوب احتمالاتی در کنار منطق کلی بازیابی اطلاعات، جنبه های نمایش، رتبه بندی و شناختی کاربر را در سیستم های بازیابی اطلاعات یکپارچه می کند و آنها را ارتقا می دهد، تطبیق پذیرتر و از متن آگاه تر می سازد. علاوه بر این، برهم نهی کنترل شده کوانتومی در آشکارسازها می تواند اطلاعاتی را در مورد همبستگی های میدان استخراج کند که در غیر این صورت غیرقابل دسترسی است و پر کمیت های نظریه اطلاعات مانند درهم تنیدگی و اطلاعات متقابل نیز تاثیر می گذارد (Henderson et al, 2020).

#### اطلاعات و آنتروپی کوانتومی در امر بازیابی

سیستم های نظریه میدان کوانتومی دارای محدودیت در ظرفیت ذخیره سازی اطلاعات هستند، آنتروپی ریز حالت توسط مساحت سطح جسم در واحدهای ثابت فروپاشی گلدستون محدود می شود و زمان بازیابی به حجم در همان واحدها مرتبط است (Dvali, 2021). معیارهای بازیابی اطلاعات و از دست دادن اطلاعات<sup>۲</sup> رابطه سود-زیان را در حین اندازه گیری ها نشان می دهند و چگونگی تکامل حالات کوانتومی و از دست دادن اطلاعات

1. no-go theorems

2. Information loss (IL)

را به تصویر می‌کشند (Wang, 2019). آنتروپی کوانتومی، به ویژه آنتروپی فون نویمان، معیاری از عدم قطعیت یا محتوای اطلاعاتی یک حالت کوانتومی است (Wilde, 2013). در زمینه بازیابی اطلاعات، آنتروپی کوانتومی را می‌توان از نظر مفهومی به عدم قطعیت یا میزان اطلاعاتی که می‌توان از یک سیستم کوانتومی استخراج کرد، مرتبط کرد.

کاربرد مکانیک کوانتوم در بازیابی اطلاعات عمدتاً ماهیت ریاضیاتی دارد و از فرمالیسم‌های تئوری کوانتومی برای مدل‌سازی جنبه‌هایی از بازیابی اطلاعات مانند ارتباط و درهم‌تنی حالات سند استفاده می‌کند (Ashoori & Rudolph, 2018; Lebedev & Khrennikov, 2020). در حالی که آنتروپی کوانتومی مفهومی اساسی در نظریه اطلاعات کوانتومی است، کاربرد مستقیم آن در سیستم‌های بازیابی اطلاعات کلاسیک ساده نیست. بازیابی اطلاعات کوانتومی پتانسیل تئوری کوانتوم را برای بهبود سیستم‌های بازیابی اطلاعات کلاسیک بررسی می‌کند، اما لزوماً به اجرای فیزیکی رایانه‌های کوانتومی نیاز ندارد (Ashoori & Rudolph, 2018).

این دو مفهوم از طریق چارچوب نظری که نظریه اطلاعات کوانتومی ارائه می‌دهد، به بازیابی اطلاعات مرتبط هستند. از این چارچوب می‌توان برای مدل‌سازی و بهبود بالقوه سیستم‌های بازیابی اطلاعات کلاسیک استفاده کرد، اگرچه کاربرد عملی فرآیندهای فیزیک کوانتومی در بازیابی اطلاعات همچنان زمینه‌ای برای تحقیق و توسعه در حال انجام است.

#### الگوریتم‌های کوانتومی و بازیابی اطلاعات

محاسبات کوانتومی روی چندین عنصر به طور همزمان عملیات انجام می‌دهند و در نتیجه نیاز به استفاده گسترده از حافظه رم<sup>۱</sup> را کاهش می‌دهد (Naskar, 2023). چارچوب کلی منطق و احتمال نظریه کوانتومی از سال ۲۰۰۴ در بازیابی اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است (Fang et al, 2023). استراتژی‌های کوانتومی در وظایف بازیابی اطلاعات، مانند استراتژی بازی اژدر<sup>۲</sup>، مزایای قابل توجهی را نشان داده‌اند که برتری کوانتومی در وظایف با حافظه محدود و اهمیت ویژگی‌هایی مانند «زمینه‌مندی متوالی» برای دستیابی به برتری کوانتومی در بازیابی اطلاعات را برجسته می‌کند (Uperty, 2020).

1. Random-access memory
2. Torpedo game

الگوریتم گروور<sup>۱</sup> می‌تواند یک پایگاه داده مرتب نشده را دو برابر سریعتر از هر الگوریتم کلاسیکی جستجو کند، که این امر به ویژه برای بازیابی اطلاعات که سرعت در آن حیاتی است، مفید است (Giri & Korepin, 2017; Kwon et al, 2022; Shrivastava et al, 2019). الگوریتم‌های کوانتومی سرعت جستجوهای پیچیده را افزایش می‌دهند، این لزوماً به معنای کاهش هزینه منابع پویا مانند کاهش مصرف انرژی در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک نیست. این موضوع جنبه ظریفی از محاسبات کوانتومی را برجسته می‌کند که در آن مزایای ممکن است وابسته به زمینه باشد (Perlner & Liu, 2017). الگوریتم‌های کوانتومی را می‌توان در سرویس‌های ابری اعمال کرد و با اطمینان از محرمانگی و امنیت از طریق روش‌های رمزگذاری کوانتومی، قابلیت‌های سیستم‌های بازیابی اطلاعات را ارتقا داد (Kwon et al, 2022; Liu et al, 2022).

#### کانال‌های کوانتومی، نویز و بازیابی اطلاعات

رابطه بین کانال‌های کوانتومی، نویز و بازیابی اطلاعات پیچیده و چندوجهی است. نویز به طور معمول چالشی است که باید کاهش یابد، اما در شرایط خاص می‌تواند برای بهبود ارتباط به کار گرفته شود. ظرفیت کانال‌های کوانتومی برای انتقال اطلاعات تحت تاثیر ماهیت نویز و استراتژی‌های به کار رفته برای مدیریت آن است و تحقیقات، هم محدودیت‌ها و هم فرصت‌هایی را برای بهینه‌سازی بازیابی اطلاعات در شبکه‌های ارتباطات کوانتومی نشان می‌دهند.

مطالعات حالات کوانتومی پرنویز، بر اهمیت تبیین نمودن اطلاعات کلاسیک قابل بازیابی، و به حداقل رساندن هزینه‌های بازیابی اطلاعات تاکید می‌کند (Zhao et al, 2022). تحقیقات روی دستگاه‌های ذخیره و بازیابی احتمالی که برای گیت‌های فاز بهینه شده‌اند، مقاومت متفاوتی نسبت به انواع مختلف نویز را نشان می‌دهند، به طوری که نویز فاززدایی نسبت به نویز قطبی‌زدایی قابل مدیریت‌تر است و بر عملکرد دستگاه در حضور نویز تاثیر می‌گذارد (Pavličko & Ziman, 2022).

---

1. Grover's algorithm

وجود نویز گاوسی<sup>۱</sup> بر حداکثر ویژگی‌های اطلاعاتی کانال‌های ارتباطات کوانتومی تاثیر می‌گذارد و روش‌های مختلف آشکارسازی (هترودین، همودین و آشکارسازی فوتونی<sup>۲</sup>) در سطوح مختلف نویز عملکرد بهینه دارند (Hall, 1994). ظرفیت انتقال اطلاعات کانال‌های کوانتومی ثابت نبوده و وابسته به شرایطی است. پدیده‌هایی مانند «فزون‌جمع‌پذیری» نشان می‌دهد که ظرفیت ترکیبی دو کانال، می‌تواند از مجموع ظرفیت‌های فردی آن‌ها بیشتر باشد و نویز نیز می‌تواند وابسته به شرایط باشد (Nema et al, 2023). نویز به طور کلی محدودیت‌هایی را برای نرخ انتقال اطلاعات اعمال می‌کند، اما برای مثال، استفاده از حالات حرارتی همبسته و چند حالتی، می‌تواند نرخ انتقال اطلاعات کوانتومی را در کانال‌های گاوسی افزایش دهد (Noh et al, 2020).

#### درهم‌تنیدگی کوانتومی در نگاه بازیابی اطلاعات

تحقیقات سانگ، لگال و هایاشی<sup>۳</sup> (۲۰۲۳)، شکافی نمایی در پیچیدگی ارتباطی، بین سناریوهای درهم‌تنیده و غیر درهم‌تنیده در کیو. پی. آی. آر برای پیام‌های کوانتومی را برجسته می‌کند. علاوه بر این، مطالعات سانگ و هایاشی (۲۰۲۱) کارآمدی پروتکل‌های کیو. پی. آی. آر تک سرور را زمانی که کاربران و سرورها درهم‌تنیدگی را به اشتراک می‌گذارند، نشان می‌دهد که منجر به فرآیندهای بازیابی اطلاعات مؤثرتر می‌شود. درهم‌تنیدگی کوانتومی فرآیندهای بازیابی اطلاعات امن و کارآمد را امکان‌پذیر می‌کند و راه را برای پیشرفت در وظایف ارتباطات کوانتومی هموار می‌کند. در پروتکل‌های ارتباط مستقیم ایمن، حالات درهم‌تنیده به عنوان کانال‌های کوانتومی عمل می‌کنند، جایی که ذرات ارسالی، خودشان پیام‌های مخفی را حمل نمی‌کنند و بدین ترتیب امنیت را افزایش می‌دهند (Zhan et al, 2009). سیستم‌های درهم‌تنیده همبستگی‌هایی را از خود نشان می‌دهند که می‌توان از آن‌ها برای بازیابی اطلاعات در فرایندهای اطلاعات کوانتومی بهره برد (Das et al, 2022).

البته باید گفت در حالی که درهم‌تنیدگی کوانتومی برای بازیابی اطلاعات محوری است، اما چالش‌هایی را نیز به همراه دارد. به عنوان مثال، حالات درهم‌تنیدگی وابسته، که شکلی از درهم‌تنیدگی هستند، برای پردازش اطلاعات به سختی تقطیر می‌شوند و بدست می‌آیند،

1. Gaussian noise

2. heterodyne, homodyne, and photodetection

3. Song, Le Gall & Hayashi

اما می‌توانند از طریق درهم‌شدگی اطلاعات کوانتومی فعال شوند، که بر توزیع درهم‌تنیدگی درون یک سیستم تاثیر می‌گذارد (Sinha, 2023).

علاوه بر این، تفاسیر دیگری از مکانیک کوانتومی وجود دارد که امکان استفاده از درهم‌تنیدگی برای بازیابی اطلاعات را زیر سوال می‌برند و پیشنهاد می‌کنند که درهم‌تنیدگی به معنای تاثیرات غیر موضعی نیست، که این موضوع برخی از طرح‌های محاسبات و ارتباطات کوانتومی را رد می‌کند (Guowen, 2005).

#### تصحیح خطای کوانتومی در بازیابی اطلاعات

تصحیح خطای کوانتومی یا کیو.ای.سی، با اطمینان از صحت و بازیابی اطلاعات کوانتومی، با بازیابی اطلاعات مرتبط است. امکان تشخیص و تصحیح خطا در کیوبیت‌ها را فراهم می‌کند که برای بازیابی اطلاعات کوانتومی دقیق، پس از محاسبه یا انتقال، ضروری است (Aoki et al, 2009). از طرفی قضیه تکثیرناپذیری، کپی کردن حالات کوانتومی ناشناخته را ممنوع می‌کند. علاوه بر این، وجود نویز همدوس در سیستم‌های کوانتومی و تاثیرش بر بازیابی اطلاعات را باید در نظر داشت (Zhao & Liu, 2023).

این مفهوم با شکندگی ذاتی حالات کوانتومی و ناهمدوسی که می‌تواند اطلاعات را فروشکند، مبارزه می‌کند. توسعه کدهای تصحیح خطای کوانتومی و درک عملکرد آنها تحت مدل‌های نویز مختلف برای پیشبرد رایانش کوانتومی و بازیابی دقیق اطلاعات کوانتومی حیاتی است. طراحی کدهای تصحیح خطا، مانند کدهای تثبیت‌کننده<sup>۱</sup> نظیر کد سطح<sup>۲</sup>، با هدف افزایش پایداری مدارهای کوانتومی صورت می‌گیرد. آن‌هم با تعیین تعداد خطاهای قابل تصحیح و کمیت‌سازی احتمال وقوع خطاهایی که از طریق پارامتری مانند فاصله کد یا احتمال خطا، انجام می‌شود (Gushanskiy, Potapov & Bozhich, 2022). تصحیح خطای کوانتومی نه تنها از اطلاعات کوانتومی در طول ارتباطات و محاسبات کوانتومی محافظت می‌کند، بلکه به طراحی تاب‌آور در برابر خطا نیز کمک می‌کند و امکان تصحیح خطاها را بدون برهم‌زدن حالت محافظت‌شده، فراهم می‌سازد.

#### بحث و نتیجه‌گیری

1. Stabilizer codes
2. Surface code

این پژوهش با هدف تحلیل و برجسته‌سازی قابلیت‌های بنیادین نظریه کوانتومی اطلاعات در حوزه بازیابی اطلاعات انجام شد. نتایج این مطالعه تحلیلی-مروری نشان می‌دهد که این حوزه نوظهور، صرفاً یک بهبود تدریجی بر روش‌های سنتی نیست، بلکه پتانسیل ایجاد یک تحول پارادایمی در نحوه بازنمایی، پردازش و بازیابی اطلاعات را داراست. در ادامه، ضمن مقایسه رویکرد کوانتومی با چالش‌های ذاتی مدل‌های کلاسیک، یافته‌های پژوهش در راستای اهداف آن تشریح شده و چشم‌انداز آینده و خلاءهای تحقیقاتی موجود ترسیم می‌گردد. مقاله حاضر در دو بخش تنظیم شد و توسعه یافت. در بخش اول مفاهیم اساسی نظریه کوانتومی اطلاعات تشریح شد، در ادامه و در بخش دوم با تعمیم این اصول به مفهوم بازیابی اطلاعات، سعی شد تا علاوه بر کشف ارتباط منطقی میان این دو حوزه، نگاهی به پیشرفت‌های موجود در این زمینه نیز بشود. تحلیل‌های مبتنی بر متون در این مطالعه، فرصت‌ها و موانع پیوست دو حوزه را برجسته کرد.

مقایسه رویکردهای کوانتومی و سنتی؛ فراتر از محدودیت‌های کلاسیک  
ذکر شد که الگوریتم‌های بازیابی اطلاعات سنتی، با وجود کارایی بالا در بسیاری از کاربردها، با چالش‌های بنیادینی مواجه هستند. مدل‌های کلاسیک مانند فضای برداری یا مدل‌های احتمالی، اغلب در درک و مدل‌سازی روابط معنایی پیچیده و وابستگی‌های متنی<sup>۱</sup> دچار محدودیت هستند (Melucci, 2015; Tunkelang & Tehlwall, 2009; Büttcher, Clarke & Cormack, 2010; N. Gudivada, Rao & R. Gudivada, 2018). این مدل‌ها اطلاعات را در فضایی کلاسیک و قطعی بازنمایی می‌کنند که در آن یک سند یا به یک پرسش مرتبط است یا خیر. این رویکرد دو گانه، از پس ظرافت‌های نیاز اطلاعاتی کاربر و ابهام ذاتی زبان طبیعی به خوبی برنمی‌آید.

در مقابل، همانطور که در این مقاله نشان داده شد، نظریه کوانتومی اطلاعات چارچوبی ذاتاً احتمالی و چندوجهی ارائه می‌دهد. اصل برهم‌نهی به یک سند اجازه می‌دهد تا به طور همزمان در چندین حالت ارتباط با یک پرسش قرار گیرد (Dmytrovych & Volodymyrovich, 2017; Gudder, 1970; Henderson et al, 2020) و این امر بازنمایی بسیار غنی‌تری از عدم قطعیت را ممکن می‌سازد. علاوه بر این، پدیده درهم‌تنیدگی

1. context-dependency

می تواند برای مدل سازی وابستگی های غیرموضعی بین مفاهیم و واژگان در اسناد به کار رود (Das et al, 2022)؛ قابلیت که پیاده سازی آن در مدل های کلاسیک بسیار دشوار و پرهزینه است. همچنین ذکر شد که الگوریتم هایی مانند الگوریتم گرور نیز مزیت محاسباتی چشمگیری در سرعت جستجو در پایگاه های داده نامرتب ارائه می دهند که به طور مستقیم بر کارایی بازیابی اطلاعات تاثیر گذار است (Kwon et al, 2022).

#### ارتباط یافته ها با اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، پاسخ به این پرسش بود که قابلیت های نظریه کوانتومی اطلاعات در بازیابی اطلاعات چیست. یافته های این مقاله به طور مستقیم به این هدف پاسخ می دهند:

- در سطح بازنمایی اطلاعات: تحلیل شد که چگونه کیوبیت ها به جای بیت های کلاسیک، می توانند اطلاعات را در فضایی بسیار بزرگتر و پیچیده تر ذخیره و پردازش کنند.
- در سطح پردازش و رتبه بندی: نشان داده شد که الگوریتم های کوانتومی می توانند فرآیندهای محاسباتی سنگین در بازیابی اطلاعات را تسریع بخشند و چارچوب های جدیدی برای رتبه بندی اسناد بر اساس احتمالات کوانتومی ارائه دهند.
- در سطح امنیت و دقت: بررسی مفاهیمی چون تصحیح خطای کوانتومی و رمزنگاری کوانتومی نشان داد که این رویکردها می توانند به طور همزمان دقت و امنیت بازیابی اطلاعات را، به ویژه در سیستم های حساس و توزیع شده، تضمین کند.

بنابراین، این پژوهش با مرتبط ساختن اصول نظری اطلاعات کوانتومی، به نیازهای عملی حوزه بازیابی اطلاعات، به هدف خود دست یافته و نشان داد که این تلاقی، راه را برای نسل جدیدی از سیستم های بازیابی اطلاعات هوشمندتر، سریع تر و امن تر هموار می کند.

#### چشم انداز آینده و تحولات پیش رو

با پیشرفت رایانش کوانتومی، می توان انتظار داشت که شاهد توسعه فناوری های نوینی باشیم که مستقیماً بر حوزه بازیابی اطلاعات تأثیر می گذارند. سیستم های بازیابی اطلاعات آگاه به زمینه و کاربر که قادرند حالت شناختی و نیاز اطلاعاتی پویای کاربر را مدل سازی کنند، یکی از این چشم اندازهاست. اینکه کاربر بدون فاش کردن هویت یا محتوای پرسش خود،

از یک پایگاه داده اطلاعات دریافت کند؛ امری است که امنیت و حریم خصوصی را در عصر دیجیتال متحول خواهد کرد. حرکت جامعه علمی به سمت چارچوب‌های ارزیابی عملی مانند کوانتوم سی.ال.ای.اف (Ferrari Dacrema et al, 2024) و ترکیب مدل‌های عصبی با الهامات کوانتومی (Upreti et al, 2023)، نشان می‌دهد که این چشم‌اندازها به تدریج در حال نزدیک شدن به واقعیت هستند. همچنین، موتورهای جستجوی کوانتومی قادر خواهند بود مجموعه داده‌های عظیم و بدون ساختار را با سرعتی غیرقابل تصور برای الگوریتم‌های کلاسیک تحلیل کنند. در نهایت، پروتکل‌های بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی این امکان را فراهم می‌آورند که کاربر بدون فاش کردن هویت یا محتوای پرسش خود، از یک پایگاه داده اطلاعات دریافت کند؛ امری که امنیت و حریم خصوصی را در عصر دیجیتال متحول خواهد کرد.

#### خلاءهای پژوهشی و مسیرهای آینده

علی‌رغم پتانسیل‌های ذکر شده، مسیر کاربردی‌سازی این نظریه همچنان با چالش‌ها و پرسش‌های بی‌پاسخ همراه است که خود زمینه‌ساز پژوهش‌های آتی هستند:

- توسعه مدل‌های ترکیبی: یک خلاء تحقیقاتی مهم، طراحی مدل‌های ترکیبی است که از قدرت پردازش موازی کامپیوترهای کوانتومی برای وظایف سنگین (مانند رتبه‌بندی اولیه) و از زیرساخت‌های کلاسیک برای سایر وظایف (مانند پردازش زبان طبیعی) به طور همزمان استفاده کنند.
- طراحی معیارهای ارزیابی کوانتومی: معیارهای ارزیابی سنتی مانند دقت و بازخوانی ممکن است برای سنجش کارایی سیستم‌های بازیابی اطلاعات کوانتومی که خروجی‌های احتمالی تولید می‌کنند، کافی نباشند. تحقیق برای توسعه معیارهای ارزیابی جدید یک نیاز ضروری است.
- شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی: بیشتر پژوهش‌های کنونی ماهیت نظری دارند. انجام تحقیقات بیشتر در زمینه شبیه‌سازی الگوریتم‌های بازیابی اطلاعات کوانتومی بر روی سخت‌افزارهای کوانتومی موجود و بررسی تاثیر نویز بر عملکرد آنها، یک گام حیاتی به سوی کاربردی‌سازی این حوزه است.

در پایان، این پژوهش تاکید می‌کند که نظریه کوانتومی اطلاعات، با ارائه زبانی جدید برای توصیف اطلاعات و عدم قطعیت، منبع الهام‌بخش و قدرتمندی برای آینده حوزه بازیابی اطلاعات خواهد بود.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی دیده نشد.

### سپاسگزاری

از کلیه حامیان مادی و معنوی که در انجام پژوهش حاضر همراهی داشتند، نهایت قدردانی و تشکر را ابراز می‌نمایم.

### ORCID

Pourya Rahat

 <https://orcid.org/0000-0002-8493-3881>

Mohsen Haji

 <https://orcid.org/0000-0003-4226-9377>

Zeinolabedini

### References

- Aditya, Nema., Ananda, G., Maity., Sergii, Strelchuk., David, Elkouss. (2023). Noise is resource-contextual in quantum communication. *arXiv.org*, doi: 10.48550/arXiv.2305.00680
- Alodjants, A. P., Avdyushina, A. E., Tsarev, D. V., Bessmertny, I. A., & Khrennikov, A. Y. (2024). Quantum Approach for Contextual Search, Retrieval, and Ranking of Classical Information. *Entropy*, 26(10), 862. <https://doi.org/10.3390/e26100862>
- Andrei, Khrennikov. (2019). Basics of Quantum Theory for Quantum-Like Modeling Information Retrieval. doi: 10.1007/978-3-030-25913-6\_4
- Andrew, Frigyk. (2022). Quantum Cryptography: Quantum Key Distribution, a Non-technical Approach. *arXiv.org*, doi: 10.48550/arXiv.2211.17089
- Anton, Zeilinger. (1998). Quantum Entanglement: A Fundamental Concept Finding its Applications. *Physica Scripta*, doi: 10.1238/PHYSICA.TOPICAL.076A00203

- Anza, F., & Crutchfield, J. P. (2022). Quantum Information Dimension and Geometric Entropy. *PRX Quantum*, 3(2), 020355. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.020355>
- Aoki, T., Takahashi, G., Kajiya, T., Yoshikawa, J.-I., Braunstein, S. L., van Loock, P., & Furusawa, A. (2009). Quantum error correction beyond qubits. *Nature Physics*, 5(8), 541–546. doi:10.1038/nphys1309
- Ashoori, E., & Rudolph, T. (2018). Commentary on Quantum-Inspired Information Retrieval. *ArXiv*, abs/1809.05685.
- Averin, D. (1999). Quantum computation: Solid-state qubits under control. *Nature*, 398, 748-749. <https://doi.org/10.1038/19622>.
- B, Bernstein. (2023). Quantum Cryptography. doi: 10.1002/9781119905172.ch14
- Baaquie, B. E., & Kwek, L.-C. (2023). Quantum gates and circuits. In *Quantum Computers* (pp. 139–153). doi:10.1007/978-981-19-7517-2\_7
- Bandyopadhyay, S. (2020). Impossibility of creating a superposition of unknown quantum states. *Physical Review A*, 102(5). doi:10.1103/physreva.102.050202
- Bassi, R., Zhang, Q., Gatto, A., Tornatore, M., & Verticale, G. (2023, April 17). Quantum key distribution with trusted relay using an ETSI-compliant software-defined controller. *2023 19th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*. Presented at the 2023 19th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN), Vilanova i la Geltru, Spain. doi:10.1109/drcn57075.2023.10108347
- Baudot, P., & Bennequin, D. (2015). The Homological Nature of Entropy. *Entropy*, 17, 3253-3318. <https://doi.org/10.3390/e17053253>.
- Beate, Ochsner. (2023). Multi-qubit teleportation and multi-bit superdense coding via cascade splitting. doi: 10.21203/rs.3.rs-3064862/v1
- Benhelm, J., Kirchmair, G., Gerritsma, R., Zähringer, F., Monz, T., Schindler, P., ... Blatt, R. (2009). Ca+quantum bits for quantum information processing. *Physica Scripta*, T137, 014008. doi:10.1088/0031-8949/2009/t137/014008
- Benjamin, Piwowarski., Ingo, Frommholz., Mounia, Lalmas., Keith, van, Rijsbergen. (2010). What can quantum theory bring to information retrieval. *ACM* 59-68. doi: 10.1145/1871437.1871450
- Bergou, J. A., & Hillery, M. S. (2013). *Introduction to the theory of quantum information processing* (2013th ed.) [PDF]. doi:10.1007/978-1-4614-7092-2
- Bertrand, Wong. (2020). On Quantum Entanglement. viXra,
- Brańczyk, A., Mendonca, P., Gilchrist, A., Doherty, A., & Bartlett, S. (2006). Quantum Control of a Single Qubit. *Physical Review A*, 75, 012329. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.012329>.
- Buot, F. A., Otadoy, R. E. S., & Bacalla, X. L. (2023). An inverter-chain link implementation of quantum teleportation and superdense coding. *ArXiv*. doi:10.48550/ARXIV.2312.03276

- Caleffi, M., & Cacciapuoti, A. (2019). Quantum Switch for the Quantum Internet: Noiseless Communications Through Noisy Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38, 575-588. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.2969035>.
- Chen, X.-B., Zhao, L.-Y., Xu, G., Pan, X.-B., Chen, S.-Y., Cheng, Z.-W., & Yang, Y.-X. (2022). Low-overhead fault-tolerant error correction scheme based on quantum stabilizer codes. *Chinese Physics B*, 31(4), 040305. doi:10.1088/1674-1056/ac3817
- Cole, B., Williams, J., King, B., Sherwin, M., & Stanley, C. (2001). Coherent manipulation of semiconductor quantum bits with terahertz radiation. *Nature*, 410, 60-63. <https://doi.org/10.1038/35065032>.
- Conway, J. and Kochen, S. (2006) "The Free Will Theorem," *Foundations of Physics* 36 (10): 1441–1473 (arXiv:quant-ph/0604079)
- Conway, J. and Kochen, S. (2009) "The Strong Free Will Theorem," *Notices of the AMS* 56 (2): 226- 232 (arXiv:0807.3286).
- Cozzolino, D., Bacco, D., Lio, B., Ingerslev, K., Ding, Y., Dalgaard, K., Kristensen, P., Galili, M., Rottwitt, K., Ramachandran, S., & Oxenløwe, L. (2018). Orbital Angular Momentum States Enabling Fiber-based High-dimensional Quantum Communication. *Physical Review Applied*. <https://doi.org/10.1103/PHYSREVAPPLIED.11.064058>.
- Daniel, Tunkelang., Mike, Thelwall. (2009). Synthesis Lectures on Information Concepts, Retrieval, and Services.
- Das, D., Malapaka, S. K., Bapat, J., & Das, D. (2022, July 8). A proactive connection setup mechanism for large quantum networks. *2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*. Presented at the 2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, India. doi:10.1109/conecct55679.2022.9865700
- Devitt, S. J., Nemoto, K., & Munro, W. J. (2009). *Quantum Error Correction for Beginners*. doi:10.48550/ARXIV.0905.2794
- Diederik, Aerts., Jan, Broekaert., Sandro, Sozzo., Tomas, Veloz. (2013). Meaning-focused and Quantum-inspired Information Retrieval. *arXiv: Information Retrieval*, doi: 10.1007/978-3-642-54943-4\_7
- Dmitry, Melnikov., A., Mironov., S., Mironov., A., Morozov., An., Morozov. (2018). From Topological to Quantum Entanglement. *arXiv: High Energy Physics - Theory*, doi: 10.1007/JHEP05(2019)116
- Dmytrovysh, B. V., & Volodymyrovich, B. V. (2017). Quantum-Mechanical Aspects of the L. Pauling's Resonance Theory. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3065282>
- Duff, G. F. D. (1964). On the Principle of Superposition in Quantum Mechanics. *Canadian Mathematical Bulletin*, 7(1), 77–83. <https://doi.org/10.4153/CMB-1964-010-5>
- Elham, Ashoori., Terry, Rudolph. (2018). Commentary on Quantum-Inspired Information Retrieval. *arXiv: Information Retrieval*.

- Ellerman, D. (2018). Logical Entropy: Introduction to Classical and Quantum Logical Information Theory. *Entropy*, 20. <https://doi.org/10.3390/e20090679>.
- Ferrari Dacrema, M., Pasin, A., Cremonesi, P., & Ferro, N. (2024). Using and evaluating quantum computing for information retrieval and recommender systems. *Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 3017–3020. <https://doi.org/10.1145/3626772.3661378>
- Flarend, A., & Hilborn, B. (2022). Qubits and Quantum States. In *Quantum Computing: From Alice to Bob* (pp. 25–43). doi:10.1093/oso/9780192857972.003.0004
- for error correction. *Izvestiâ UFU*, doi: 10.18522/2311-3103-2022-3-129-139
- Gerry, C. C., & Bruno, K. M. (2013). Quantum Information, Quantum Cryptography, and Quantum Teleportation. In *The Quantum Divide* (pp. 132–148). doi:10.1093/acprof:oso/9780199666560.003.0006
- Gershon, Kurizki., Goren, Gordon. (2020). What is a Quantum Superposition. doi: 10.1093/OSO/9780198787464.003.0002
- Gia, Dvali. (2021). Bounds on Quantum Information Storage and Retrieval. *arXiv: High Energy Physics - Theory*.
- Giri, P. R., & Korepin, V. E. (2017). A review on quantum search algorithms. *Quantum Information Processing*, 16(12). doi:10.1007/s11128-017-1768-7
- Giulio, Malavolta., Michael, Wahler. (2023). Non-Interactive Quantum Key Distribution. *IACR Cryptology ePrint Archive*, doi: 10.48550/arXiv.2304.02999
- Gudder, S. P. (1970). A Superposition Principle in Physics. *Journal of Mathematical Physics*, 11(3), 1037–1040. <https://doi.org/10.1063/1.1665193>
- Guowen, W. (2005). Locality of quantum entanglement. doi:10.48550/ARXIV.QUANT-PH/0512195
- Hall, M. J. (1994). Gaussian noise and quantum-optical communication. *Physical Review A*, 50(4), 3295–3303. doi:10.1103/physreva.50.3295
- Hirche, C. (2015). *Polar codes in quantum information theory*. doi:10.48550/ARXIV.1501.03737
- Hirche, C., Morgan, C., & Wilde, M. M. (2016). Polar Codes in Network Quantum Information Theory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 62(2), 915–924. doi:10.1109/tit.2016.2514319
- Holbrook, J. A., Kribs, D. W., Laflamme, R., & Poulin, D. (2005). Noiseless subsystems for collective rotation channels in quantum information theory. *Integral Equations and Operator Theory*, 51(2), 215–234. doi:10.1007/s00020-004-1345-1
- Holevo, A. S. (1997). Coding theorems for quantum communication channels. doi:10.48550/ARXIV.QUANT-PH/9708046
- Horodecki, M., & Horodecki, R. (1997). *Are there basic laws of quantum information processing?* doi:10.48550/ARXIV.QUANT-PH/9705003

- Ishika, Giroti., Meenakshi, Malhotra. (2022). Quantum Cryptography: A Pathway to Secure Communication. doi: 10.1109/CSITSS57437.2022.10026388
- Jiang, Y., Zhang, P., Gao, H., & Song, D. (2020, July). A quantum interference inspired neural matching model for ad-hoc retrieval. In *Proceedings of the 43rd international ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval* (pp. 19-28).
- Junyang, Song., Bo, Lu., Lu, Liu., Chuan, Wang. (2023). Noisy Quantum Channel Characterization Using Quantum Neural Networks. *Electronics*, doi: 10.3390/electronics12112430
- Kavuri, R., Voruganti, S., Mohammed, S., Inapanuri, S., & Harish Goud, B. (2023, May 29). Quantum cryptography with an emphasis on the security analysis of QKD protocols. *Evolution and Applications of Quantum Computing*, pp. 265–288. doi:10.1002/9781119905172.ch16
- Khalifa, O. O., Amirah bt Sharif, N., Saeed, R. A., Abdel-Khalek, S., Alharbi, A. N., & Alkathiri, A. A. (2021). Digital System Design for Quantum Error Correction Codes. *Contrast Media & Molecular Imaging*, 2021, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2021/1101911>
- KhaliK, Khan. (2023). Error Correction Using Quantum Computation. *Journal of digital science*, doi: 10.33847/2686-8296.5.1\_2
- Kohnle, Antje., Deffebach, Erica. (2015). Investigating student understanding of quantum entanglement. doi: <https://doi.org/10.48550/arxiv.1512.02346>
- Kok, P., & Lovett, B. W. (2010). Quantum information processing. In *Introduction to Optical Quantum Information Processing* (pp. 48–89). doi:10.1017/cbo9781139193658.003
- Korsbakken, J. I., Wilhelm, F. K., & Whaley, K. B. (2009). Electronic structure of superposition states in flux qubits. *Physica Scripta*, T137, 014022. doi:10.1088/0031-8949/2009/t137/014022
- Kovachy, T., Asenbaum, P., Overstreet, C., Donnelly, C. A., Dickerson, S. M., Sugarbaker, A., ... Kasevich, M. A. (2015). Quantum superposition at the half-metre scale. *Nature*, 528(7583), 530–533. doi:10.1038/nature16155
- Kretschmann, D., Kribs, D. W., & Spekkens, R. W. (2008). Complementarity of private and correctable subsystems in quantum cryptography and error correction. *Physical Review A*, 78(3). doi:10.1103/physreva.78.032330
- Kwon, H., & Bae, J. (2022, October 4). Quantum amplitude amplification operators: exact quantum search. In K. S. Deacon & R. E. Meyers (Eds.), *Quantum Communications and Quantum Imaging XX*. doi:10.1117/12.2626449
- Laura, J., Henderson., Alessio, Belenchia., Esteban, Castro-Ruiz., Esteban, Castro-Ruiz., Costantino, Budroni., Magdalena, Zych., Časlav, Brukner., Robert, B., Mann. (2020). Quantum Temporal Superposition: The Case of Quantum Field Theory.. *Physical Review Letters*, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.125.131602

- Lebedev, A., & Khrennikov, A. (2020). Introductory review to quantum information retrieval. *ArXiv*, abs/2008.13541.
- Lent, C. S. (2019). Information and Entropy in Physical Systems. In *Energy Limits in Computation* (pp. 1–63). *Springer International Publishing*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93458-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93458-7_1)
- Li, J. (2020). Some progress on quantum error correction for discrete and continuous error models. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 8, 46998–47012. doi:10.1109/access.2020.2977344
- Lima, F. C. E., Moreira, A. R. P., Almeida, C. A. S., Edet, C. O., & Ali, N. (2023). Quantum information entropy of a particle trapped by the Aharonov–Bohm-type effect. *Physica Scripta*, 98(6), 065111. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acd309>
- Liu, Z., Xie, Q., Zha, Y., & Dong, Y. (2022). Quantum delegated computing ciphertext retrieval scheme. *Journal of Applied Physics*, 131(4), 044401. doi:10.1063/5.0080097
- M., Archuadze., G., Besiashvili., Manana, Khachidze., P., Kervalishvili. (2012). Quantum concepts in information retrieval. 1-4. doi: 10.1109/ICAICT.2012.6398524
- Maryann, De, Julio. (2022). On Quantum Entropy. *Entropy*, doi: 10.3390/e24101341
- Massimo, Melucci. (2013). Deriving a Quantum Information Retrieval Basis. *The Computer Journal*, 56(11):1279-1291. doi: 10.1093/COMJNL/BXS095
- Massimo, Melucci. (2015). Elements of Information Retrieval. doi: 10.1007/978-3-662-48313-8\_1
- Matt, Girling., Cristina, Cirstoiti., David, Jennings. (2023). A simple formulation of no-cloning and no-hiding that admits efficient and robust verification.
- Melvin, T. (2023). Mechanizing quantum error correction through entangled quantum machine learning techniques. In *Quantum Computers - From Fundamentals to Technology [Working Title]*. doi:10.5772/intechopen.1002876
- Mizukami, K., & Koga, A. (2023). Quantum algorithm for the microcanonical thermal pure quantum state method. *Physical Review. A*, 108(1). doi:10.1103/physreva.108.012404
- Muralidharan, S., & Panigrahi, P. K. (2007). *Perfect Teleportation, Quantum state sharing and Superdense Coding through a Genuinely Entangled Five-qubit State*. doi:10.48550/ARXIV.0708.3785
- Muralidharan, S., & Panigrahi, P. K. (2008). Perfect teleportation, quantum-state sharing, and superdense coding through a genuinely entangled five-qubit state. *Physical Review. A*, 77(3). doi:10.1103/physreva.77.032321
- Nguyen, T., Paik, I., & Thang, T. (2022). Multi-feature Machine Learning with Quantum Superposition. *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Asia57006.2022.9954778>.

- Nielsen, M. A. (2000). *Quantum information theory*. doi:10.48550/ARXIV.QUANT-PH/0011036
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Noh, K., Pirandola, S., & Jiang, L. (2020). Enhanced energy-constrained quantum communication over bosonic Gaussian channels. *Nature Communications*, 11(1), 457. doi:10.1038/s41467-020-14329-6
- Ohya, M., & Watanabe, N. (2010). Quantum Entropy and Its Applications to Quantum Communication and Statistical Physics. *Entropy*, 12(5), 1194–1245. <https://doi.org/10.3390/e12051194>
- Oszmaniec, M., Grudka, A., Horodecki, M., & Wójcik, A. (2016). Creating a superposition of unknown quantum states. *Physical Review Letters*, 116(11), 110403. doi:10.1103/PhysRevLett.116.110403
- Pavličko, J., & Ziman, M. (2022). *Robustness of optimal probabilistic storage and retrieval of unitary channels to noise*. doi:10.48550/ARXIV.2211.07079
- Perlner, R., & Liu, Y.-K. (2017). *Thermodynamic analysis of classical and quantum search algorithms*. doi:10.48550/ARXIV.1709.10510
- Pierre-Emmanuel, Emeriau., Mark, Howard., Shane, Mansfield. (2020). Quantum Advantage in Information Retrieval. *arXiv: Quantum Physics*,
- Polzik, Eugene. (2002). Atomic entanglement on a grand scale. *Physics World*, doi: <https://doi.org/10.1088/2058-7058/15/9/30>
- Rahmi, M., Shamanta, D., & Tasnim, A. (2012). Basic Quantum Algorithms and Applications. *International Journal of Computer Applications*, 56(4), 26–31. doi:10.5120/8880-2868
- Ralescu, A., & Mayfield, L. (2005). Generalization of common gates for quantum computation. *NAFIPS 2005 - 2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. Presented at the NAFIPS 2005 - 2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, Detroit, MI, USA. doi:10.1109/nafips.2005.1548607
- Sagar, Uprety., Dimitris, Gkoumas., Dawei, Song. (2020). A Survey of Quantum Theory Inspired Approaches to Information Retrieval. *ACM Computing Surveys*, doi: 10.1145/3402179
- Saha, D., & Panigrahi, P. K. (2012). N-qubit quantum teleportation, information splitting and superdense coding through the composite GHZ–Bell channel. *Quantum Information Processing*, 11(2), 615–628. doi:10.1007/s11128-011-0270-x
- Schumacher, B., & Nielsen, M. A. (1996). Quantum data processing and error correction. *Physical Review A*, 54(4), 2629–2635. doi:10.1103/physreva.54.2629
- Sergei, Gushanskiy., Viktor, Potapov., V.I., Bozhich. (2022). Research and development of a quantum code
- Seung, Han, Song., François, Le, Gall., Masatoshi, Hayashi. (2023). Prior Entanglement Exponentially Improves One-Server Quantum Private Information Retrieval for Quantum Messages.

- Seunghoan, Song., Masahito, Hayashi. (2021). Quantum Private Information Retrieval for Quantum Messages. doi: 10.1109/ISIT45174.2021.9517794
- Shahab, Hamidi-Rad., John, David, Kaewell. (2022). Quantum Channel Decoding. doi: 10.1109/QCE53715.2022.00141
- Shrivastava, P., Soni, K. K., & Rasool, A. (2019, July). Evolution of quantum computing based on Grover's search algorithm. *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. Presented at the 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kanpur, India. doi:10.1109/icccnt45670.2019.8944676
- Sinha, S. (2023). *Effect of Quantum Information scrambling on bound entangled states*. doi:10.48550/ARXIV.2311.16209
- Slepoy, A. (2006). Quantum gate decomposition algorithms. doi:10.2172/889415
- Song, J., Lu, B., Liu, L., & Wang, C. (2023). Noisy Quantum Channel Characterization Using Quantum Neural Networks. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics12112430>.
- Sorush, Niknamian., Somayeh, Zaminpira., Sprephanie, Seneff. (2019). Quantum Entanglement in Theoretical Physics as a New Insight Into Cancer Biology. viXra,
- Sourav, Naskar. (2023). Quantum Algorithm for Researching the Nearest (QARN). doi: 10.48550/arxiv.2304.10976
- Stefan, Büttcher., Charles, L., A., Clarke., Gordon, V., Cormack. (2010). Information Retrieval: Implementing and Evaluating Search Engines.
- Techateerawat, P. (2012, April). Network management system for quantum key distribution. *2012 Ninth International Conference on Information Technology - New Generations*. Presented at the 2012 Ninth International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG), Las Vegas, NV, USA. doi:10.1109/itng.2012.58
- Terhal, B. M. (2015). Quantum error correction for quantum memories. *Reviews of Modern Physics*, 87(2), 307–346. doi:10.1103/revmodphys.87.307
- Tina, A., C., Maiolo., Fabio, Della, Sala., Luigi, Martina., Giulio, Soliani. (2006). Entanglement of electrons in interacting molecules. *arXiv: Quantum Physics*, doi: 10.1007/S11232-007-0098-9
- Todd, A., Brun. (2019). Quantum Error Correction. *arXiv: Quantum Physics*
- Tsallis, C. (2022). Entropy. *Thermodynamic Weirdness*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11924.003.0011>.
- Uttam, S. (2012). Quantum Information Theory. In *Quantum Information Processing and Quantum Error Correction* (pp. 457–492). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385491-9.00012-5>
- Van Rijsbergen, C. J. K. (2011). What is quantum information retrieval? In G. Amati & F. Crestani (Eds.), *Advances in Information Retrieval Theory* (Vol. 6931, pp. 2–2). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23318-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23318-0_2)

- Vasil, Penchev. (2020). Main Concepts in Philosophy of Quantum Information. *Social Science Research Network*, doi: 10.2139/SSRN.3630828
- Venkat, N., Gudivada., Dhana, Rao., Amogh, R., Gudivada. (2018). Information Retrieval: Concepts, Models, and Systems. doi: 10.1016/BS.HOST.2018.07.009
- Wang, X., Wilde, M., & Su, Y. (2019). Quantifying the magic of quantum channels. *New Journal of Physics*, 21. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab451d>.
- Wilde, M. M. (2013). Quantum Information and Entropy. In *Quantum Information Theory* (pp. 252–291). doi:10.1017/cbo9781139525343.012
- Wootton, J. (2024). Circuit model of quantum computation. In *Oxford Research Encyclopedia of Physics*. doi:10.1093/acrefore/9780190871994.013.30
- Xing, M., Wang. (2019). Entropy Gain and Information Loss by Measurements.. *arXiv: Quantum Physics*,
- Xinye, Wang. (2021). Quantum Entanglement Results from Quantum State Transition at Fast-Than-Light Speed with Matter Wave's Phase Velocity. *Biophysics Journal*. doi: <https://doi.org/10.23880/psbj-16000179>
- Xue, Yihe. (2021). Basic Theory of Quantum Entanglement and the Possibility of Passing on Information Faster than the Speed of Light. *IOP Conference Series: earth and environmental science*. doi: 10.1088/1755-1315/658/1/012001
- Yuguang, Fang., Guang-Bao, Xu., Yi-Hua, Zhou., Wei-Min, Shi. (2023). Quantum private information retrieval over a collective noisy channel. *Modern Physics Letters A*, doi: 10.1142/s0217732323500013
- Zhan, Y.-B., Zhang, L.-L., & Zhang, Q.-Y. (2009). Quantum secure direct communication by entangled qutrits and entanglement swapping. *Optics Communications*, 282(23), 4633–4636. doi:10.1016/j.optcom.2009.08.024
- Zhao, Y. (2023). Benchmarking machine learning models for quantum Error Correction. doi:10.48550/ARXIV.2311.11167
- Zhao, Y., & Liu, D. (2023). Lattice gauge theory and topological quantum error correction with quantum deviations in the state preparation and error detection. doi:10.21203/rs.3.rs-2615571/v1
- Zuccon, G., & Azzopardi, L. (2010). Using the quantum probability ranking principle to rank interdependent documents. In C. Gurrin, Y. He, G. Kazai, U. Kruschwitz, S. Little, T. Roelleke, S. Rüger, & K. Van Rijsbergen (Eds.), *Advances in Information Retrieval* (Vol. 5993, pp. 357–369). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12275-0\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12275-0_32)

زودآیند ویراستاری نشده (نشریه بازیابی دانش و نظام‌های معنایی)

استناد به این مقاله: (سال). اصول نظریه کوانتومی اطلاعات و قابلیت‌های آن در بازیابی اطلاعات. فصلنامه علمی بازیابی دانش و نظام‌های معنایی، سال (شماره)، ص آغاز-ص پایان.



Journal of Knowledge Retrieval and Semantic Systems is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.