

کاربرد مدارهای کوانتومی در مطالعات ژئوفیزیکی

محمدحسن سلیمانی^۱، محمدعلی ریاحی^۲، مهران رحیمی^۳

کارشناسی ارشد^۱، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mh.soleimani@ut.ac.ir

استاد^۲، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mariahi@ut.ac.ir

کارشناسی ارشد^۳، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، Mehran.rahimi@ut.ac.ir

چکیده:

در عصر اطلاعات و پیشرفت‌های روزافزون علمی امروز، مدارهای کوانتومی به مثابه یک پیشرفت بنیادین در حوزه محاسبات کوانتومی، امکانات و افق‌های جدیدی را در زمینه‌های متعدد علمی و صنعتی فراهم آورده‌اند. در این مطالعه به معروفی کاربرد پتانسیل‌های مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک، از جمله تحلیل دقیق‌تر داده‌های لرزه‌ای و مدل‌سازی با سرعت و دقت بالا پرداخته‌ایم. با استفاده از توانایی‌های بینظیر کیوبیت‌ها در برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی، این مدارها قادر به انجام محاسبات پیچیده‌ای هستند که با محدودیت‌های سیستم‌های کلاسیک قابل مقایسه نیستند. همچنین، این فناوری می‌تواند امنیت داده‌های ژئوفیزیکی را ارتقاء بخشد. با این حال، برای دستیابی به استفاده گسترده از این فناوری، چالش‌های عملی و فنی پیش روی ما قرار دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر و سرمایه‌گذاری‌های مالی است. این مقاله گامی در جهت تحقق این هدف است. در این تحقیق ما یک مدار کوانتومی ارائه کردیم که پتانسیل بالایی در طبقه‌بندی رخساره‌های چاه دارد، که می‌تواند در آینده به پیشرفت‌های چشمگیری در عرصه ژئوفیزیک منجر شود.

واژه‌های کلیدی: مدارهای کوانتومی، ژئوفیزیک، تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌ای، محاسبات کوانتومی، کیوبیت‌ها، برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی، طبقه‌بندی رخساره‌های چاه.

Application of the Quantum Circuits in Geophysical Studies

^۱Mohammad Hassan Soleimani , ^۲Mohammad Ali Riahi , ^۳Mehran Rahimi

Abstract:

In today's era of information and scientific advancements, quantum circuits have emerged as a fundamental development in quantum computing, providing new possibilities and opportunities in various scientific and industrial fields. In this study, we have explored the potential of quantum circuits in geophysics, particularly in the analysis of seismic data and modeling with high speed and accuracy. By leveraging the unique abilities of qubits in superposition and entanglement, these circuits can perform complex calculations that surpass the limitations of classical systems. Additionally, this technology can enhance the security of geophysical data. However, to achieve widespread adoption of this technology, there are practical and technical challenges that require further research and financial investments. This article is a step towards realizing this goal. In our research, we introduced a quantum circuit with high potential in the classification of well facies, which could lead to significant improvements in the field of geophysics in the future.

Keywords: Quantum Circuits, Geophysics, Seismic Data Analysis, Quantum Computing, Qubits, Superposition, Entanglement, Classification of well facies.

مدارهای کوانتمی به عنوان پیشرفتی بنیادین در حوزه علوم و مهندسی کوانتمی، افق‌های نوینی را در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های علمی و صنعتی ارائه می‌دهند. کاربردهای بالقوه آن‌ها در ژئوفیزیک، رشته‌ای که به بررسی ساختارها و خواص زمین اختصاص دارد، بسیار امیدوار کننده است. روش‌های سنتی در ژئوفیزیک، اغلب با محدودیت‌هایی در قابلیت‌های پردازش داده مواجه هستند، به ویژه هنگامی که حجم و پیچیدگی داده‌های ژئوفیزیکی به طور نمایی در حال افزایش است. اما مدارهای کوانتمی با استفاده از اصول مکانیک کوانتمی، می‌توانند محاسبات پیچیده را با سرعت و دقیق بی‌سابقه‌ای انجام دهند [1, 2]. بیت‌های کوانتمی یا کیوبیت‌ها می‌توانند به دلیل پدیده توازن به طور همزمان در چندین حالت وجود داشته باشند و این ویژگی به مدارهای کوانتمی اجازه می‌دهد تا حجم عظیمی از داده‌ها را به طور مؤثرتری نسبت به سیستم‌های کلاسیک پردازش کنند. در زمینه ژئوفیزیک، استفاده از مدارهای کوانتمی می‌تواند به تجزیه و تحلیل سریع‌تر و دقیق‌تر داده‌های لرزه‌ای و مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای اکتشاف زیرسطحی کمک کند [5, 7]. همچنین شبیه‌سازی کوانتمی می‌تواند فرآیندهای زمین‌شناسی را با جزئیات و سرعتی که توسط رایانه‌های کلاسیک قابل دسترسی نیست، مدل‌سازی کند. علاوه بر این، مدارهای کوانتمی دارای ویژگی‌های امنیتی ذاتی هستند که می‌توانند داده‌های حساس ژئوفیزیکی را در برابر تهدیدات سایبری نوظهور محافظت کنند [3, 4]. با این حال، استفاده از مدارهای کوانتمی در ژئوفیزیک همچنان در مراحل اولیه قرار دارد و برای بهره‌برداری کامل از این فناوری، چالش‌های فنی و عملی وجود دارد. برای استفاده عملی و گسترده از مدارهای کوانتمی در ژئوفیزیک، نیاز به توسعه فناوری‌های جدیدی برای ساخت مدارهای کوانتمی بزرگ‌تر و قابلیت کنترل بیشتر است. در کل، استفاده از مدارهای کوانتمی در ژئوفیزیک باعث می‌شود تا قدرت پردازش و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی افزایش یابد و به دست‌یابی به تصاویر دقیق‌تر و سازوکارهای پیشرفته‌تر برای اکتشاف و مطالعه زیرسطحی کمک کند. با این حال، برای بهره‌برداری کامل از این فناوری، نیاز به تحقیقات بیشتر و تخصیص بوجه‌های مالی به این مطالعات است.

۲ روش تحقیق

ساختار مدارهای کوانتمی

مکانیک کوانتمی زیربنای اصول محاسبات کوانتمی است. برخلاف بیت‌های کلاسیک، کیوبیت‌ها - واحدهای اساسی اطلاعات کوانتمی - می‌توانند به طور همزمان در ترکیبی از حالت‌ها وجود داشته باشند، خاصیتی که به عنوان برهم نهی شناخته می‌شود. علاوه بر این، کیوبیت‌ها را می‌توان درهم‌تند، یک پدیده کوانتمی منحصر به فرد که به کیوبیت‌های همبسته اجازه می‌دهد بدون توجه به فاصله، فوراً بر یکدیگر تأثیر بگذارند. چارچوب ریاضی محاسبات کوانتمی شامل اعداد مختلط، جبر خطی و نظریه احتمالات است. بردارهای حالت که در فضای هیلبرت نمایش داده می‌شوند، وضعیت کوانتمی یک سیستم را توصیف می‌کنند [6, 2]. عملگرها یکی از نظر ریاضی به صورت ماتریس نشان داده می‌شوند، بر روی این بردارها برای تغییر حالت عمل می‌کنند. مفهوم تانسور برای توصیف سیستم‌های چند کیوبیت استفاده می‌شود. دروازه‌های کوانتمی بلوک‌های سازنده مدارهای کوانتمی هستند که مشابه دروازه‌های منطقی در محاسبات کلاسیک هستند. با این حال، برخلاف دروازه‌های کلاسیک، دروازه‌های کوانتمی عملیات برگشت‌پذیری را انجام می‌دهند که با ماتریس‌های واحد نمایش داده می‌شوند. دروازه‌های کوانتمی راچ شامل دروازه‌های پاولی، دروازه هادامارد، دروازه‌های فاز (T) و دروازه‌های چرخشی (مانند RY) هستند که هر کدام مربوط به تبدیل‌های خاصی در فضای حالت هستند.

بردار حالت: یک کیوبیت توسط یک بردار حالت در فضای هیلبرت دو بعدی نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال، حالت یک کیوبیت می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

دوازه‌های کوانتمی: دروازه‌های کوانتمی توسط ماتریس‌های یگانی نمایش داده می‌شوند. به عنوان مثال، دروازه پائولی X-که حالت یک کیوبیت را معکوس می‌کند، به صورت زیر است :

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

دروازه‌های چرخش: دروازه‌های چرخش توسط ماتریس‌هایی نمایش داده می‌شوند که بردار حالت را روی کره بلاخ^۱ به اندازه زاویه معینی می‌چرخانند. برای مثال، چرخش به دور محور Y به اندازه زاویه θ به صورت زیر است :

$$(3) RY(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix}$$

کاربردهای مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک

تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی: مدارهای کوانتومی می‌توانند در تحلیل داده‌های حجیم و پیچیده ژئوفیزیکی نقش کلیدی داشته باشند. با استفاده از توان محاسباتی بتر، مدارهای کوانتومی می‌توانند الگوریتم‌های پیچیده تحلیل داده را با سرعت و دقت بیشتری اجرا کنند، که این امر منجر به درک بهتری از داده‌های لرزه‌ای و پتانسیل اکتشافی می‌شود.

شبیه‌سازی کوانتومی: ابزاری قدرتمند در حوزه اکتشافات ژئوفیزیکی است که به محققان این امکان را می‌دهد تا فرآیندهای زمین‌شناختی پیچیده را با دقت و سرعت بی‌سابقه‌ای مدل‌سازی کنند. این تکنیک می‌تواند برای مطالعه و شناسایی ساختارهای زیرزمینی مانند مخازن نفت و گاز، منابع معدنی و آبهای زیرزمینی به کار رود. با استفاده از مدل‌سازی کوانتومی، دانشمندان می‌توانند سناریوهای مختلف اکتشافی را شبیه‌سازی کرده و بهترین رویکردها را برای حفاری و استخراج منابع طبیعی ارزیابی کنند. شبیه‌سازی‌های کوانتومی می‌توانند مقیاس‌های زمانی و فضایی بسیار دقیق‌تری نسبت به مدل‌های کلاسیکی ارائه دهند. این دقت بیشتر به دانشمندان کمک می‌کند تا تصویری واضح‌تر و عمیق‌تر از ساختارهای زیرزمینی و خصوصیات آن‌ها داشته باشند، که این امر نتایج اکتشاف را دقیق‌تر و مطمئن‌تر می‌کند. علاوه بر این، شبیه‌سازی کوانتومی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و زمان اکتشاف کمک کند، زیرا امکان مدل‌سازی دقیق‌تر و سریع‌تر فرآیندها را فراهم می‌آورد.

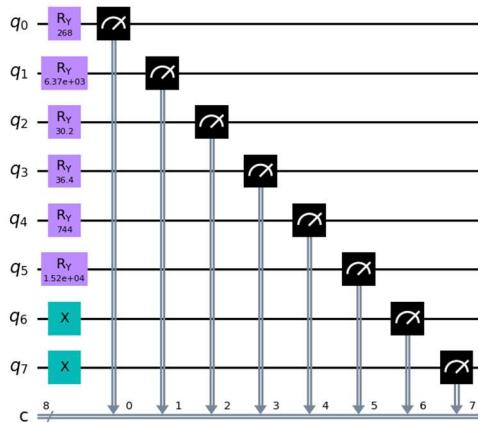
امنیت داده‌های ژئوفیزیکی: با توجه به حساسیت داده‌های ژئوفیزیکی، امنیت آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. مدارهای کوانتومی با قابلیت‌های رمزگاری پیشرفته خود می‌توانند امنیت داده‌های ژئوفیزیکی را تضمین کنند. استفاده از رمزگاری کوانتومی می‌تواند از داده‌ها در برابر دستکاری‌ها و دسترسی‌های غیرمجاز محافظت کند. در پژوهش جاری، ما به کاربرد مدارهای کوانتومی برای طبقه‌بندی رخساره‌های سنگی چاه‌های پرداخته‌ایم.

شکل ۱ نمایانگر مدار کوانتومی است که برای رمزگاری ویژگی‌ها و برچسب‌های مرتبط با داده‌های چاه به کار می‌رود. این مدار، که از قابلیت‌های محاسبات کوانتومی بهره می‌برد، می‌تواند به عنوان بخش مهمی از فرآیند تحلیل داده‌های چندبعدی در نظر گرفته شود. در این بخش از مقاله، به تشریح جزئیات بخشی از کار انجام شده می‌پردازیم و نحوه کدگذاری ویژگی‌های مورد مطالعه و نیز برچسب‌های رخساره‌ای در قالب حالت‌های کوانتومی را بازگو می‌کنیم. این رویکرد، زمینه‌ساز تحلیل‌های دقیق‌تر و بهره‌گیری از قابلیت‌های پردازشی برتر محاسبات کوانتومی برای مسائل پیچیده زمین‌شناسی است.

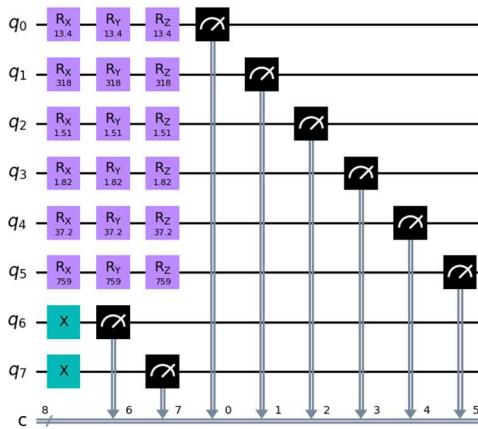
در این مدار کوانتومی با استفاده از داده‌های ویژگی‌سنجدی. مدار شامل ۶ کیوبیت برای کدگذاری ویژگی‌ها و ۲ کیوبیت اضافی برای برچسب‌گذاری رخساره‌ها می‌باشد. دروازه‌های RY اعمال شده بر روی هر کیوبیت ویژگی‌ها را با زوایای دوران متناسب با مقادیر واقعی آن‌ها کدگذاری می‌کنند. دروازه‌های X در کیوبیت‌های q6 و q7، برچسب‌های دودویی مورد نظر برای رخساره‌ها را نمایش می‌دهند. تمام کیوبیت‌ها در نهایت اندازه‌گیری شده و نتایج در بیت‌های کلاسیکی ثبت می‌گردند. در مرحله بعدی ما سه دروازه RX, RY, RZ را اضافه کردیم و مشاهد شد که عملکرد مدار در طبقه‌بندی بهبود یافت که مدار طراحی شده در شکل ۲ مشاهده می‌کنیم البته ما در ابتدای راه هستیم. در تحقیق حاضر، رویکرد اولیه ما در استفاده از مدارهای کوانتومی برای طبقه‌بندی رخساره‌های چاه نشان داده است که می‌تواند نسبت به روش‌های دیگر دقت بالایی را به ارمغان آورد. همچنین، ما در حال کار کرد روی این روش برای بالا بردن دقت طوری که قابل مقایسه با روش‌های دیگر مرسوم در طبقه‌بندی نباشد. لازم به ذکر است که این مطالعه با استفاده از زبان برنامه

^۱ در مکانیک کوانتومی کره بلاخ نمایشی هندسی از حالت یک سیستم کوانتومی دو حالته کیوبیت است. که با نام فیزیکدان فلیکس بلاخ نام‌گذاری شده است.

نویسی پایتون و بر روی کامپیوتر کلاسیکی به انجام رسیده است، که این امر امکان ارزیابی اولیه استفاده از مدار های کوانتمی فراهم می کند.

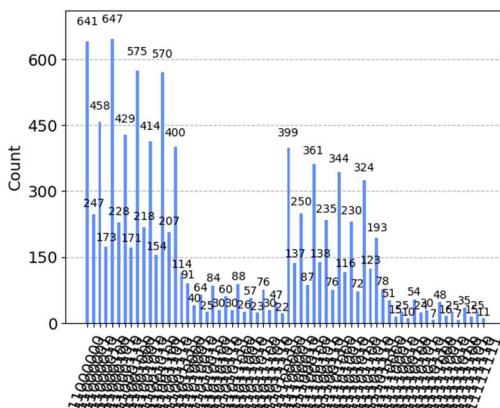


شکل ۱. مدار کوانتمی با تک دروازه RY برای طبقه‌بندی رخسارهای چاه



شکل ۲. مدار کوانتمی با ۳ دروازه برای طبقه‌بندی رخسارهای چاه

در نهایت در شکل ۳ بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مکرر و تکرارهای مدار (شات‌ها)، مشاهده می‌شود که توزیع نتایج، شاهد یک الگوی خاص است. حالت‌های کوانتمی که بیشترین تعداد شمارش را دارند، نشان‌دهنده احتمالات بالاتری از رخدادن هستند و می‌توانند دلالت بر دقت بالای مدار در شناسایی و طبقه‌بندی رخسارهای صحیح داشته باشند. این نشان می‌دهد که مدار ما به خوبی توانته است و بیزگی‌های کلیدی داده‌ها را شناسایی کرده و به نحو اثربخشی آن‌ها را کدگذاری کند. این مدار کوانتمی برای رمزنگاری و بیزگی‌ها و برچسب‌های مرتبط با داده‌های چاه طراحی شده است، در نتیجه حالت‌هایی که با فرکانس بالاتری رخداده‌اند، حالت‌هایی هستند که بیزگی‌های کلیدی و برچسب‌های صحیح را به خوبی نمایش می‌دهند.



شکل ۳. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مکرر و تکرارهای مدار کوانتمومی.

۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ما شاهد قابلیت‌های مفیدی از مدارهای کوانتمومی در ارتقاء فرآیندهای ژئوفیزیکی بودیم. استفاده از محاسبات کوانتمومی، نه تنها در افزایش دقت و سرعت تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی‌های زمین‌شناسخی مؤثر خواهد بود، بلکه در زمینه امنیت داده‌های ژئوفیزیکی نیز نقش بسزایی ایفا خواهد کرد. با این وجود، توسعه و بهکارگیری این فناوری در مقیاس وسیع همچنان نیازمند تحقیقات گستردۀتر و حمایت‌های مالی است تا موانع فنی و عملی موجود برطرف شوند و بهکارگیری آن در عرصه صنعت ژئوفیزیک تسريع یابد. در نهایت، این مطالعه نشان داد که مدارهای کوانتمومی پتانسیل تحول‌آفرینی در صنعت ژئوفیزیک دارند و می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند برای کشف و بهره‌برداری بهتر از منابع زیرزمینی به کار روند. ما معتقدیم که تداوم تحقیقات در این زمینه می‌تواند مرزهای دانش ما را درک و بهره‌برداری از پتانسیل‌های کوانتمومی گسترش دهد و ما را به سوی دوران نوینی از پیشرفت‌های ژئوفیزیکی هدایت کند.

منابع

1. Dukalski, M., Rovetta, D., van der Linde, S., Möller, M., Neumann, N., & Phillipson, F. (2023). Quantum computer-assisted global optimization in geophysics illustrated with stack-power maximization for refraction residual statics estimation. *Geophysics*, 88(2), V75-V91.
2. Dukalski, M. (2021, September). Toward an application of quantum computing in geophysics. In *Fifth EAGE Workshop on High Performance Computing for Upstream* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
3. Henderson, J. M., Podzorova, M., Cerezo, M., Golden, J. K., Gleyzer, L., Viswanathan, H. S., & O'Malley, D. (2023). Quantum algorithms for geologic fracture networks. *Scientific Reports*, 13(1), 2906.
4. Moradi, S., Trad, D., & Innanen, K. A. (2018, October). Quantum computing in geophysics: Algorithms, computational costs, and future applications. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (pp. SEG-2018). SEG.
5. Rahimi, M., Riahi, M. A., (2022). Reservoir facies classification based on random forest and geostatistics methods in an offshore oilfield. *Journal of Applied Geophysics* 201(4):104640. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104640
6. Sahimi, M., & Tahmasebi, P. (2022). The Potential of Quantum Computing for Geoscience. *Transport in Porous Media*, 145(2), 367-387.
7. Soleimani , M., & Bagheri , M . (2023). Utilization of Quantum Science Capacity in Geophysical Studies. The 20th Iran Geophysics Conference