Golrang AI Program

هوش مصنوعی کوانتومی (Quantum AI)

رهیافتی بر وضعیت کنونی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای

"هوش مصنوعی کوانتومی(QAI) "

و پیامدهای آن بر کسب‌وکارها

نویسندگان

سرخیو گاگو هوئرتا – مدیرکل هوش مصنوعی و رایانش کوانتومی شرکت مودیز

کارمن رسیو – مدیر رایانش کوانتومی شرکت مودیز

ژانویه ۲۰۲۵

چکیده

در این مقاله، به بررسی مرز نوظهور هوش مصنوعی کوانتومی (QAI) می‌پردازیم؛ حوزه‌ای که دو زمینه‌ی به‌سرعت در حال پیشرفت، یعنی رایانش کوانتومی و هوش مصنوعی را ترکیب می‌کند.

هدف ما ارائه‌ی تصویری متوازن از وضعیت کنونی و ظرفیت‌های آینده‌ی QAI است، با تأکید هم‌زمان بر فرصت‌های جذاب و چالش‌های مهم پیش رو در این حوزه‌ی در حال تحول.

نکات کلیدی عبارتند از:

۱. وضعیت پیشرفته در رایانش کوانتومی: پیشرفت چشمگیر در اصلاح خطای کوانتومی، رایانش کوانتومی را از چالشی فیزیکی به مسئله‌ای مهندسی تبدیل کرده است.

۲. هم‌افزایی کوانتوم و هوش مصنوعی: هوش مصنوعی محدودیت‌هایی مانند هزینه‌های آموزش و اجرا، توهم، کمبود داده و... دارد؛ رایانش کوانتومی می‌تواند به‌صورت بالقوه هوش مصنوعی امروزی را "فوق‌شارژ" کند.

این هم‌افزایی از نقاط قوت مکمل ناشی می‌شود—در حالی که هوش مصنوعی در یافتن الگوها و پیش‌بینی از داده‌های عظیم برتری دارد، رایانش کوانتومی می‌تواند این فرایندها را به‌طرز چشمگیری تسریع کند، دقت را افزایش دهد و داده‌های پیچیده‌تری را پردازش کند.

۳. کوانتوم برای هوش مصنوعی: رایانش کوانتومی می‌تواند شتاب بالقوه‌ای در محاسباتی که بدون آن ناممکن‌اند ایجاد کند.

با این حال، چالش‌های مهمی همچون بارگذاری داده‌ها و محدودیت‌های سخت‌افزاری همچنان باقی است.

حالا، آیا رایانش کوانتومی می‌تواند به هوش مصنوعی مولد (GenAI) کمک کند؟ پاسخ کوتاه: خیر. در این مقاله توضیح می‌دهیم چرا.

۴. هوش مصنوعی برای کوانتوم: هوش مصنوعی هم‌اکنون نقش حیاتی در پیشرفت رایانش کوانتومی دارد، به‌ویژه در طراحی سخت‌افزار، اصلاح خطا و بهینه‌سازی سیستم.

۵. ملاحظات عملی: شرکت‌ها باید بین ادعاهای فرضی و کاربردهای اثبات‌شده تمایز قائل شوند و همزمان بر کاربردهای مشخص و توسعه تخصص درون‌سازمانی با توجه به دانش تخصصی صنعت و داده تمرکز کنند.

۶. چشم‌انداز: با این‌که ظرفیت کامل QAI هنوز محقق نشده است، آمادگی برای این همگرایی فناورانه جهت حفظ مزیت رقابتی حیاتی است.

مقدمه

سال ۲۰۲۴ سالی فوق‌العاده برای رایانش کوانتومی بوده است. چندین شرکت پیشرفت‌های چشمگیری در حل چالش اصلی مقیاس‌پذیری محاسبات کوانتومی یعنی «اصلاح خطا» داشته‌اند. رایانش کوانتومی اکنون دیگر یک مسئله‌ی فیزیکی نیست، بلکه مسئله‌ای مهندسی است. ما می‌دانیم چگونه کیوبیت‌ها را بسازیم، اما آن‌ها بسیار شکننده‌اند و پیش از پایان محاسبه، خطاهای متعددی ایجاد می‌کنند [۱]. این موضوع کابوس اغلب پژوهشگران بوده است. در سال ۲۰۲۴، مانع مهمی از میان برداشته‌شد – توانایی ساخت کیوبیت‌هایی تقریباً بدون خطا با استفاده از روش‌های مهندسی – که در اعلامیه‌ی دسامبر گوگل درباره‌ی برتری کوانتومی (برای بار دوم) با تراشه‌ی Willow مورد اشاره قرار گرفت.

رسانه‌ها در مورد آزمایش گوگل ادعاهای متعددی مطرح کرده‌اند: این‌که می‌تواند در چند ثانیه محاسباتی انجام دهد که در غیر این صورت میلیون‌ها سال طول می‌کشید؛ از «جهان‌های هم‌زمان» برای محاسبه استفاده می‌کند؛ یا می‌تواند «بیت‌کوین را بشکند» و مانند آن. با وجود آن‌که برخی از این ادعاها بر پایه‌ی علم واقعی هستند، بیشترشان بیش از واقعیت، جنبه‌ی تبلیغاتی دارند. این تحولات پیشرفت چشمگیری برای صنعت رقم زده‌اند و کار پژوهشگران گوگل ستودنی است. مهم‌ترین بخش این اعلامیه این بود که نشان دادیم می‌توانیم تعداد کیوبیت‌ها روی تراشه‌های خود را افزایش دهیم و در عین حال خطاها را سریع‌تر از وقوعشان اصلاح کنیم. این موضوع در عمل ثابت می‌کند که یکی از بزرگ‌ترین موانع در ساخت رایانه‌های کوانتومی – یعنی اصلاح خطا – در مقیاس بزرگ قابل اجراست.

آیا این بدان معناست که رمزنگاری RSA ما اکنون شکسته شده یا کیف پول بیت‌کوین شما در خطر است؟ خیر – یا دست‌کم هنوز نه. هنوز کار زیادی لازم است تا دستگاه‌های موردنیاز برای چنین کاری در مقیاس بزرگ ساخته شوند. با این حال، این بدان معناست که باید همین حالا روی طرح رمزنگاری پساکوانتومی (PQC) خود کار را آغاز کنید.[۲] در چند سال آینده، موارد کاربردی را خواهیم دید که رایانش کوانتومی مزایای تجاری واقعی برای صنایعی مانند لجستیک، داروسازی، مواد، کشاورزی، انرژی، مخابرات و امور مالی به همراه دارد. موارد کاربرد آن در بخش مالی به‌خوبی شناخته شده‌اند و پیامدهای آن برای نحوه‌ی جدید اندیشیدن به ریسک بسیار چشمگیر است.[۳] اما رایانش کوانتومی تنها ملاحظه‌ی مهم نیست. در دو سال گذشته شاهد آن بوده‌ایم که دیگر فناوری‌های عمیق نیز وارد جریان اصلی شده‌اند. هوش مصنوعی پیش‌تر محدود به تیم‌های داده و یادگیری ماشین (ML) بود که موارد استفاده‌ی منحصربه‌فرد و تخصصی می‌ساختند. با این‌حال، پس از ظهورChatGPT ، هوش مصنوعی تا آن اندازه همه‌گیر شد که اکنون هرکسی

می‌تواند خود را «مهندس پرامپت» بنامد. امروزه هیچ شرکتی نیست که استراتژی هوش مصنوعی مولد (GenAI) نداشته باشد – چه به‌صورت چت‌بات‌ها، چه صرفه‌جویی هزینه، و چه به‌صورت محصولات جدید در بازار.

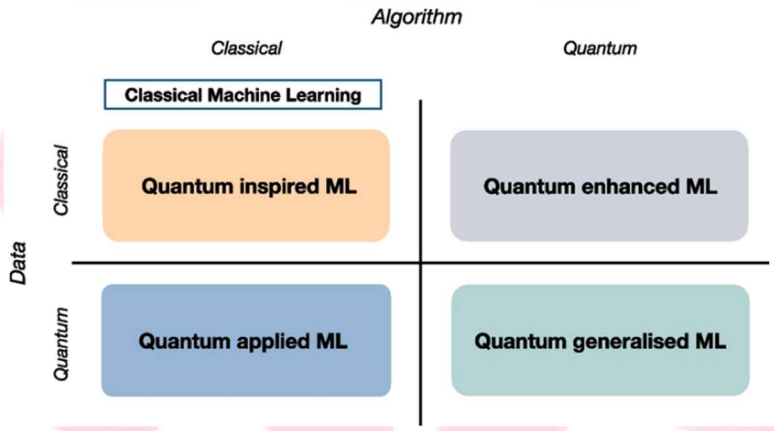
این‌جاست که رایانش کوانتومی وارد عمل می‌شود. این فناوری وعده‌ی افزایش سرعت نمایی در محاسباتی را می‌دهد که در غیر این صورت غیرممکن به‌نظر می‌رسیدند. در ماه دسامبر، شرکت گوگل تراشه‌ی کوانتومی جدید خود به نام "Willow"را معرفی کرد؛ تراشه‌ای که وعده می‌دهد محاسبه‌ای را که در شرایط معمول ۱۰ سپتیلیون سال طول می‌کشید، تنها در پنج دقیقه انجام دهد. البته، باید توجه داشت که گوگل از یک مسئله‌ی بنچمارک با عنوان نمونه‌برداری از مدار تصادفی (Random Circuit Sampling) استفاده کرد که کاربرد صنعتی مستقیمی ندارد؛ و آخرین باری که شرکتی ادعایی مشابه مطرح کرده بود، دیگر گروه‌های پژوهشی با بهره‌گیری از روش‌های کلاسیک توانستند همان بنچمارک را شکست دهند. با این حال، چنین تیترهایی به جهان نشان می‌دهند که فناوری نوآورانه‌ای در حال شکل‌گیری است که می‌تواند به ما در ساخت مواد جدید، بهبود شبکه‌های انرژی، ارتقای روند تحقیق دارویی، تحلیل دقیق‌تر ریسک اعتباری، و بهینه‌سازی سبدهای سرمایه‌گذاری کمک کند. و از همه مهم‌تر، این فناوری می‌تواند به‌طور بالقوه هوش مصنوعی موجود را «ابرشارژ» کند و توان محاسباتی آن را به سطحی کاملاً جدید برساند. برخی حتی ادعا می‌کنند که رایانش کوانتومی تنها مسیر دستیابی به «هوش عمومی مصنوعی (AGI) است. در این مقاله، ما خلاصه‌ای از مفهوم یادگیری ماشین کوانتومی (Quantum Machine Learning) – یا همان هوش مصنوعی کوانتومی (Quantum AI) – و کاربردهای مشخص آن ارائه خواهیم داد.

هم‌افزایی‌های بالقوه: یک شراکت قدرتمند

هم‌افزایی میان رایانش کوانتومی و هوش مصنوعی از نقاط قوت مکمل آن‌ها سرچشمه می‌گیرد. در حالی که هوش مصنوعی در یادگیری الگوها و پیش‌بینی از داده‌های عظیم برتری دارد، رایانش کوانتومی توان بالقوه‌ای برای تسریع چشمگیر این فرایندها، بهبود دقت، و پردازش مجموعه‌داده‌های پیچیده‌تر ارائه می‌کند. برای نمونه، با بهره‌گیری از پدیده‌ی درهم‌تنیدگی، الگوریتم‌های کوانتومی می‌توانند روابط داده‌ها را کارآمدتر از همتایان کلاسیک خود کشف کنند. یکی از نمونه‌ها، بهبود مدل‌های کنونی یادگیری ماشین از طریق پشتیبانی از روش‌هایی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی کوانتومی (qPCA) می‌تواند در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک PCA، شتابی نمایی ارائه دهد.

بااین‌حال، این مزیت تنها در صورت برآورده‌شدن شرایط خاصی حاصل می‌شود. جامعه‌ی علمی در این زمینه اختلاف‌نظر دارد که آیا الگوریتم‌های کوانتومی واقعاً می‌توانند برتری‌ای فراهم کنند یا خیر؛ برخی معتقدند اگر چنین مزیتی وجود

داشته باشد، صرفاً به ماهیت داده و نحوه‌ی بارگذاری آن در رایانه‌ی کوانتومی بستگی دارد [۶.[۲]] **فرض داده‌ی کلاسیک/داده‌ی کوانتومی**: در بیشتر انواع الگوریتم‌ها، شتاب نمایی بالقوه به‌شدت وابسته به این فرض است که داده‌ها بتوانند به‌طور کارآمد در رایانه‌ی کوانتومی بارگذاری شوند. امروزه هنوز معادل کوانتومی‌ای از حافظه‌ی RAM موسوم به (QRAM)در دسترس نیست که بتواند داده‌های کلاسیک را به‌طور مؤثر در حالت‌های کوانتومی رمزگذاری کند؛ افزون بر آن، امکان‌پذیری فنی تحقق QRAM با کارایی مورد نیاز، همچنان محل بحث است.



علاوه بر این، رایانه‌های کوانتومی کنونی با محدودیت‌هایی مانند تعداد کیوبیت‌ها، عمق مدار، اتصال‌ها و نویز روبه‌رو هستند. این محدودیت‌ها مانع تحقق کامل ظرفیت qPCA در مقیاس بزرگ می‌شوند. این وضعیت درباره‌ی بیشتر کاربردهایی که در آن‌ها رایانش کوانتومی واقعاً موجب بهبود یادگیری ماشین می‌شود، صدق می‌کند.

به‌اختصار:

• رمزگذاری یا بارگذاری داده‌ها در رایانه‌ی کوانتومی هنوز مسئله‌ای حل‌نشده و دشوار است، و می‌تواند هرگونه برتری الگوریتم کوانتومی را از بین ببرد.

• در زمان مقایسه‌ی کارایی (benchmarking)، الگوریتم‌های کوانتومی معمولاً با نسخه‌های ساده‌شده‌ی الگوریتم‌های کلاسیک یا مدل‌های کوچک انتخاب‌شده مقایسه می‌شوند، نه با حل‌کننده‌های پیشرفته‌ی مبتنی بر GPU یا ابررایانه؛ بنابراین، بسیاری از این ادعاها قابل رد شدن هستند.

ما هنوز رایانه‌های کوانتومی بزرگ و خود اصلاح‌گر در اختیار نداریم که بتوانند حتی مسائل سطحی مشابه با مسائل حل‌شونده توسط هوش مصنوعی کلاسیک امروز را اجرا کنند. ما می‌دانیم شبکه‌های عصبی کلاسیک عملکرد خوبی دارند، زیرا شواهد تجربی قدرت آن‌ها را ثابت کرده و اشتیاق زیادی برانگیخته است. بااین‌حال هنوز فاقد مبنای نظری محکمی هستیم که

توضیح دهد چرا چنین خوب عمل می‌کنند. در مورد شبکه‌های عصبی کوانتومی، سخت‌افزار مناسب برای آزمایش‌های تجربی هنوز وجود ندارد.

بااین‌حال، برخی پژوهشگران در تلاش‌اند تا مقایسه‌ای علمی از میزان توانمندی و قابلیت آموزش مدل‌های یادگیری ماشین کوانتومی با شبکه‌های عصبی کلاسیک ارائه دهند [۸][۹][۱۰].

گشودن ارزش نمایی در یادگیری ماشین

کاربردهای بالقوه‌ی هوش مصنوعی کوانتومی بسیار گسترده‌اند و همراه با پیشرفت پژوهش‌ها همچنان روبه‌گسترش‌اند. چند حوزه‌ی کلیدی به‌ویژه از نظر ایجاد ارزش تجاری چشمگیر در بهبود فرآیندهای کنونی برجسته‌اند.

۱. **شتاب‌ای محاسباتی نمایی یا درجه‌دوم برای کوانتوم در هوش مصنوعی**:

الگوریتم‌های کوانتومی که به‌طور خاص برای استفاده از قابلیت‌های منحصربه‌فرد رایانه‌های کوانتومی طراحی شده‌اند، می‌توانند شتاب چشمگیری برای برخی کارهای محاسباتی اصلی در هوش مصنوعی فراهم کنند. این شتاب‌ها – از درجه‌دومی تا نمایی – می‌توانند فرایند آموزش و اجرای مدل‌های پیچیده‌ی هوش مصنوعی را به‌شدت تسریع کنند. این موضوع به معنای دستیابی سریع‌تر به بینش‌ها و امکان حل مسائلی است که از نظر محاسباتی هم‌اکنون غیرقابل‌حل‌اند. برای نمونه، در سال ۲۰۰۹، آرم هارو، آویناتان هسیدیم و ست لوید الگوریتمی طراحی کردند که قادر بود حل معادلات خطی را به‌صورت نمایی شتاب دهد؛ این الگوریتم به نام HHL شناخته می‌شود. [۱۱]

این فناوری می‌تواند کارهای یادگیری ماشینی که شدیداً به جبر خطی وابسته‌اند را دگرگون کند و بهبودهای چشمگیری در حوزه‌هایی مانند شناسایی تصویر و پردازش زبان طبیعی پدید آورد. این کاربردها به‌طور گسترده‌ای در امور مالی استفاده می‌شوند – از اجرای مدل‌های بلک-شولز برای قیمت‌گذاری اوراق قرضه یا محاسبه‌ی سرمایه‌ی مقرراتی تا بهینه‌سازی پرتفوی با روش‌های مارکویتز. به‌طور مشابه، الگوریتم‌های کوانتومی برای رگرسیون و خوشه‌بندی، امیدبخش بهبود کارآمدی و دقت این وظایف اصلی یادگیری ماشین هستند.

بااین‌حال، اگرچه پژوهش فعال فراوانی درباره‌ی این روش‌ها جریان دارد، محدودیت‌های شناخته‌شده‌ای وجود دارد که از کاربرد عملی آن‌ها در امروز جلوگیری می‌کند. به‌عنوان مثال، رمزگذاری داده‌های کلاسیک در دستگاه کوانتومی (آماده‌سازی حالت) می‌تواند از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه باشد و برتری نمایی الگوریتم HHL را از بین ببرد.

۲. رایانش کوانتومی آنالوگ:

رایانه‌های کوانتومی آنالوگ به‌عنوان رویکردی امیدبخش برای حل انواع خاصی از مسائل در هوش مصنوعی، به‌ویژه بهینه‌سازی، در حال ظهور هستند. هرچند این رایانه‌ها هنوز «جهان‌شمول» نیستند (به این معنا که نمی‌توانند هر مسئله‌ای را حل کنند بلکه تنها گروه خاصی، عمدتاً در ریاضیات ترکیبیاتی را)، اما پتانسیل آن را دارند که با سرعت و بهره‌وری بالا، راه‌حل‌های بهینه برای مسائل پیچیده را بیابند و روش‌های کلاسیک را بهبود دهند. این قابلیت می‌تواند در حوزه‌هایی مانند بهینه‌سازی پرتفوی در مالی و بهینه‌سازی مسیر در لجستیک – که یافتن بهترین پاسخ میان گزینه‌های فراوان حیاتی است – بسیار سودمند باشد. هرچند یافتن چنین مزایایی همچنان در دست بررسی است، اما رایانه‌های کوانتومی آنالوگ می‌توانند در مواردی که مجموعه‌داده‌ها نامتوازن، پراکنده یا محدودند، از مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین پشتیبانی کنند.

۳. الگوریتم‌های ترکیبی کلاسیک–کوانتومی:

با توجه به اینکه رایانه‌های کوانتومی هنوز در مراحل آغازین توسعه‌اند، الگوریتم‌های ترکیبی کلاسیک–کوانتومی به‌عنوان راهکاری عملی برای بهره‌گیری از توان رایانش کوانتومی در کاربردهای هوش مصنوعی در حال ظهور هستند. این الگوریتم‌ها نقاط قوت رایانش کلاسیک و کوانتومی را ترکیب می‌کنند: از رایانه‌های کلاسیک برای وظایفی که در آن بهترند استفاده می‌شود و از رایانه‌های کوانتومی برای محاسبات خاصی که مزیت چشمگیری دارند بهره گرفته می‌شود. این رویکرد همکارانه، حتی با محدودیت‌های سخت‌افزاری کنونی، مسیر دست‌یافتن به کاربردهای عملی هوش مصنوعی کوانتومی را فراهم می‌کند.

۴. کاربردهایی که هنوز ناشناخته‌اند:

ظرفیت عظیم هوش مصنوعی کوانتومی هنوز تا حد زیادی ناشناخته مانده است. با پیشرفت پژوهش‌ها و افزایش قدرت و دسترسی رایانه‌های کوانتومی، به‌احتمال زیاد کاربردهای کاملاً جدیدی پدید خواهند آمد که فرصت‌هایی پیش‌بینی‌ناپذیر در صنایع مختلف ایجاد می‌کنند. این موضوع بر اهمیت آگاهی از تازه‌ترین تحولات در هوش مصنوعی کوانتومی و آمادگی برای بهره‌گیری از فرصت‌های نوظهور تأکید دارد. حال پرسش این است: آیا رایانش کوانتومی می‌تواند به هوش مصنوعی مولد (GenAI) کمک کند؟ پاسخ هنوز «خیر» است، و احتمالاً تحقق آن به‌مراتب طولانی‌تر از سایر موارد مذکور خواهد بود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها بارگذاری داده‌ها است. چون هنوز جایگزینی برای حافظه‌ی کوانتومی وجود ندارد، باید در هر بار اجرا همه‌ی داده‌ها و پارامترها را از نو بارگذاری کنیم. این یعنی چه؟ تصور کنید مثلاً مدلی مانند GPT-۳ با ۱۷۵ میلیارد پارامتر – که امروزه هم از رده خارج شده – در حالی‌که مدل‌های تازه‌تر و قدرتمندتر پارامترهای بسیار بیشتری دارند. روش‌های کنونی برای تنظیم این پارامترها مانند رمزگذاری دامنه(amplitude encoding) ،

که داده را در تابع موج کیوبیت‌ها «نگاشت» می‌کند، می‌توانند با n کیوبیت، 2^n ویژگی را ذخیره کنند. این بدان معناست که تنها ۳۸ کیوبیت می‌توانند تمام پارامترهای GPT-۳ را ذخیره کنند. (توجه داشته باشید که این یک ساده‌سازی بیش از حد است؛ کیوبیت‌های کمکی، کدهای اصلاح خطا، لایه‌های توجه و بسیاری عوامل دیگر تأثیرگذارند، اما برای سادگی بحث، این فرض پذیرفتنی است.)

امروزه چنین دستگاه‌های ۳۸ کیوبیتی وجود دارند و می‌توان زمان محاسباتی بر روی آن‌ها خرید. حتی می‌توان آن‌ها را در ابررایانه‌ها شبیه‌سازی کرد. اما آیا این کار می‌کند؟ نه دقیقاً.

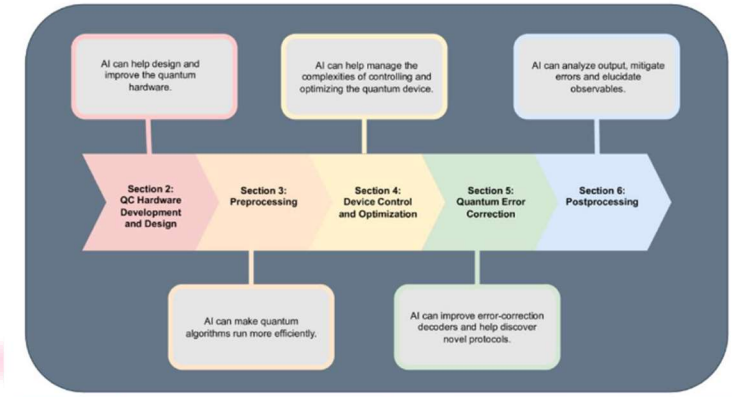
چالش این است که هر بار که برنامه را اجرا می‌کنیم – مثلاً هربار که از GPT سؤالی می‌پرسیم – باید کل مدل را در مدار بارگذاری کنیم و برای این کار نیاز به «عمق مدار» داریم؛ یعنی تعداد گام‌های زمانی لازم برای اجرای تمام دروازه‌های منطقی در مدار کوانتومی. برایGPT-۳ ، این عدد حدود ۲۷۵ میلیارد است. رکورد فعلی تا نوامبر ۲۰۲۴ حدود ۱۵۰ ۰۰۰ عملیات لایه‌ی مداری در ثانیه (CLOPS) است. این یعنی تنها یک پیش‌بینی (inference) بیش از ۵۰۰ ساعت زمان می‌برد – و این خیلی با وعده‌ی شتاب نمایی دستگاه‌های کوانتومی فاصله دارد.

همانند الگوریتم qPCA، چالش بارگذاری داده‌ها همچنان حل‌نشده باقی مانده و برای ایجاد مزیت تجاری نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

افزون بر این، بیشتر ادعاهای کوانتومی را می‌توان با شبیه‌سازی کلاسیک بازتولید کرد، زیرا داده‌های مورد استفاده مربوط به مدل‌های آزمایشی ساده‌اند. هنگام استفاده از داده‌های واقعی، آن برتری ناپدید می‌شود. به دلیل این عوامل، عامل‌ها و مدل‌های زبانی بزرگ(LLMs) در آینده‌ی قابل پیش‌بینی همچنان بر رویGPU های کلاسیک اجرا خواهند شد.

هوش مصنوعی برای کوانتوم: تقویت جعبه‌ابزار کوانتومی

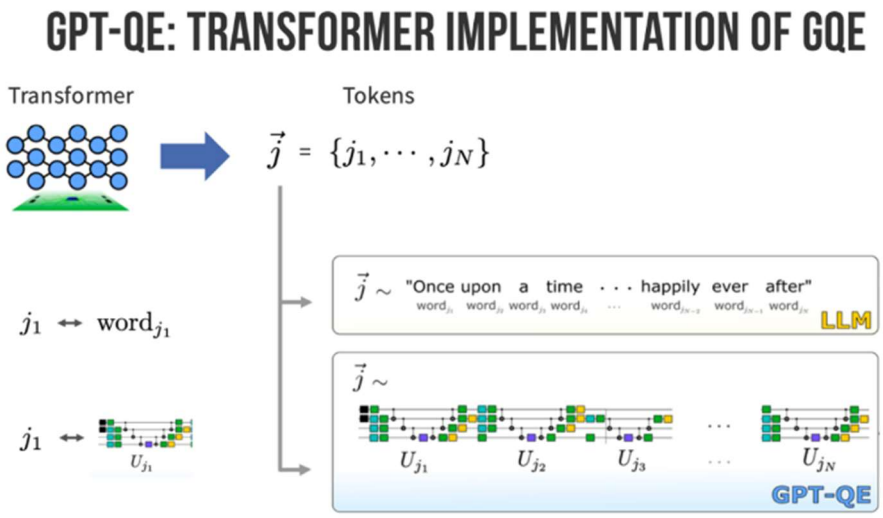
گرچه تمرکز اغلب بر این است که رایانش کوانتومی چگونه هوش مصنوعی را بهبود می‌دهد، اما در حال حاضر مسیر معکوس آن بسیار پرکاربردتر است و نمونه‌های واقعی آن در صنعت دیده می‌شود. هوش مصنوعی هم‌اکنون نقش حیاتی در پیشرفت خودِ رایانش کوانتومی ایفا می‌کند و در طراحی، کنترل و بهینه‌سازی سامانه‌های کوانتومی یاری‌رسان است. حوزه‌های کلیدی که هوش مصنوعی در آن‌ها اثرگذار است عبارت‌اند از:



۱. **طراحی مدار کوانتومی**:

الگوریتم‌های کوانتومی به مجموعه‌ای از عملیات به نام «مدارهای کوانتومی» تبدیل می‌شوند که دستورالعمل‌های اجراشده بر روی رایانه‌ی کوانتومی را نمایش می‌دهند. طراحی کارآمد این مدارها برای دستیابی به عملکرد بهینه حیاتی است. از هوش مصنوعی برای خودکارسازی و بهینه‌سازی طراحی مدارهای کوانتومی استفاده می‌شود؛ این کار پژوهشگران را از فعالیت‌های سطح پایین رها می‌کند تا بتوانند بر توسعه‌ی الگوریتم‌های سطح‌بالا تمرکز کنند. این خودکارسازی می‌تواند به تولید الگوریتم‌های کوانتومی کارآمدتر و مقاوم‌تر بینجامد و پیشرفت رایانش کوانتومی را تسریع کند.

مدل‌های جدیدی مانند حل‌کننده‌ی ویژه‌مقدار مولد (GQE) می‌توانند با بهره‌گیری از همان فناوری ترنسفورمر برای ایجاد مدارهای کوانتومی استفاده شوند. توجه داشته باشید هدف از این کار اجرای مدار نیست، بلکه بهره‌گیری از زبان طبیعی و روش‌های بهینه‌سازی برای ایجاد مدار است که سرانجام روی دستگاه کوانتومی اجرا خواهد شد.



۲. **تبدیل و گردآوری**(Transpilation and Compilation):

رایانه‌های کوانتومی در قالب معماری‌های گوناگون طراحی می‌شوند که هر یک محدودیت‌ها و توانایی‌های خاص خود را دارند. برای اجرای یک الگوریتم کوانتومی بر بستر سخت‌افزار خاص، مدار باید *ترجمه‌ی مداری* (transpile) و *گردآوری* (compile)شود – فرایندی مشابه ترجمه‌ی برنامه‌های عادی به کد ماشین. هوش مصنوعی برای خودکارسازی این فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرد تا استقرار الگوریتم‌های کوانتومی بر سخت‌افزارهای گوناگون آسان‌تر شده و اجرای کارآمدتر حفظ شود.

۳. **سامانه‌های کنترل**:

کنترل و دست‌کاری کیوبیت‌ها، اجزای شکننده‌ی بنیادین رایانه‌های کوانتومی، کاری بسیار دشوار است. از هوش مصنوعی برای توسعه‌ی سامانه‌های کنترل پیشرفته استفاده می‌شود تا بتوان کیوبیت‌ها را با دقت بالا دست‌کاری کرد و صحت و

پایداری محاسبات کوانتومی را بهبود داد. این بهبود در کنترل برای بهره‌گیری کامل از توان بالقوه‌ی رایانه‌های کوانتومی و اجرای الگوریتم‌های پیچیده‌تر ضروری است.

٤. **مهار و کاهش خطا** (Error Suppression & Mitigation):

مانند رایانه‌های کلاسیک، رایانه‌های کوانتومی نسبت به نویز و خطا بسیار حساس‌اند که یکی از بزرگ‌ترین موانع توسعه‌ی آن‌ها به‌شمار می‌رود. هوش مصنوعی در توسعه‌ی روش‌هایی برای مهار و کاهش این خطاها نقش حیاتی ایفا می‌کند و دقت محاسبات کوانتومی را افزایش می‌دهد. این شامل استفاده از هوش مصنوعی برای شناسایی و پیش‌بینی الگوهای نویز است تا الگوریتم‌های کوانتومی مقاوم‌تر در برابر خطا ایجاد شوند. اگر بتوانیم الگوها و خطاهای بالقوه را پیش‌بینی کنیم، می‌توان الگوریتم‌ها و مدل‌هایی طراحی کرد که آن‌ها را پیش از وقوع مهار کنند.

٥. **شناسایی و تصحیح خطا** (Error Detection and Correction):

وقتی در سامانه‌های کوانتومی خطا رخ می‌دهد، شناسایی و تصحیح آن برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد حیاتی است. در غیر این صورت، خروجیِ الگوریتم صرفاً نویزی تصادفی خواهد بود.

کیوبیت‌ها یک تفاوت کلیدی با سامانه‌های کلاسیک دارند: شما نمی‌توانید آن‌ها را آزادانه اندازه‌گیری یا بخوانید تا بررسی کنید آیا تغییری در وضعیت آن‌ها رخ داده است یا نه. افزون بر این، سامانه‌های کلاسیک تنها یک نوع خطا دارند – تبدیل «۱» به «۰» یا برعکس. اما کیوبیت‌ها می‌توانند تغییر فاز نیز پیدا کنند. از این رو، توسعه و پیاده‌سازیِ فناوری‌های تصحیح خطا در سیستم‌های کوانتومی بسیار پرهزینه و پیچیده است.

سال ۲۰۲۴ سالی سرنوشت‌ساز و آکنده از پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌ی تصحیح خطاهای کوانتومی بوده است؛ بااین‌حال، هوش‌مصنوعی نیز برای توسعه‌ی کدهای پیشرفته‌ی شناسایی و تصحیح خطا به‌کار گرفته می‌شود تا محاسبات کوانتومی را در برابر آثار زیان‌بار نویزها محافظت کند و دقت الگوریتم‌های کوانتومی را حفظ نماید.

٦. **بهینه‌سازی منابع** (Resource Optimization):

رایانه‌های کوانتومی دستگاه‌هایی هستند که مصرف منابع در آن‌ها بسیار بالاست، و بنابراین بهینه‌سازیِ استفاده از این منابع برای انجام محاسبات کارآمد امری حیاتی به‌شمار می‌رود. پژوهشگران از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی تخصیص و

مدیریت منابع کوانتومی – از جمله کیوبیت‌ها و عملیات دروازه‌ای (Gate Operations) – استفاده می‌کنند تا اطمینان یابند محاسبات با بیشترین کارایی و کمترین مصرف منابع انجام می‌شود. برای مثال، یک پژوهشگر می‌تواند مدار کوانتومی‌ای طراحی کند که یک الگوریتم خاص را پیاده‌سازی می‌کند، و سپس یک سامانه‌ی یادگیری ماشینی آن مدار را در تراشه‌ی کوانتومی «رمزگذاری» (Encode) کرده، و با صرفه‌جویی در منابع و بهینه‌سازی ساختار مدار، محاسبه را کارآمدتر نماید.

زیست در آینده‌ی کوانتومی

همگراییِ رایانش کوانتومی و هوش مصنوعی نقطه‌ی عطفی در پیشرفت فناوری است که پیامدهای عمیق و گسترده‌ای برای کسب‌وکارها در صنایع مختلف دارد. با این حال، «هوش مصنوعی کوانتومی» معمولاً به حوزه‌هایی مربوط می‌شود که یا هنوز به‌صورت علمی اثبات نشده‌اند یا بسیار بلندمدت به نظر می‌رسند. برای مثال، ادعاهایی مانند «کوانتوم ما را به هوش عمومی مصنوعی (AGI) خواهد رساند» هنوز پایه‌ی علمی ندارند و بیشتر ماهیت حدسی و گمانه‌زن دارند. اما هوش مصنوعی، برخلاف این گمانه‌ها، نقش حیاتی در توسعه‌ی رایانه‌های کوانتومی دارد – به‌ویژه در زمینه‌های سخت‌افزاری و اصلاح خطا.

برای رهبران کسب‌وکار، درک ظرفیت‌های هوش مصنوعی کوانتومی صرفاً به‌معنای جلوتر بودن از منحنی نوآوری نیست؛ بلکه به‌معنای آمادگی برای یک دگرگونی بنیادی در شیوه‌ی عملکرد و رقابت سازمان‌ها و نیز شناخت دقیق جهت‌های درست برای سرمایه‌گذاری است. پایش مداوم فناوری‌هایی که با سرعتی فزاینده تغییر می‌کنند و داشتن شناخت روشن از نقشه‌ی چشم‌اندازِ سخت‌افزار رایانش کوانتومی امری حیاتی است. ضروری است از ابزارها و روش‌های موجود استفاده کنید تا کاربردهای بالقوه‌ی هوش مصنوعی کوانتومی را در صنعت خود بررسی نمایید و بسنجید که چگونه می‌تواند به حل چالش‌های کنونی کمک کند یا فرصت‌های تازه‌ای را بگشاید. از همه مهم‌تر، در توسعه‌ی تخصص داخلی یا برقراری همکاری با شرکت‌های متخصص در زمینه‌ی رایانش کوانتومی و هوش مصنوعی سرمایه‌گذاری کنید تا به مهارت‌ها و دانشی دست یابید که برای انطباق فناوری با داده‌ها و دانش خاص حوزه‌ی صنعتی خود ضروری است. در مواجهه با هر ادعایی درباره‌ی «مزیت کوانتومی»، باید از داده‌های صنعت خود بهره بگیرید و ارزش تجاری آن را به‌صورت واقعی و قابل مشاهده ارزیابی کنید؛ با استفاده از معیارها و کاربردهای معتبر، موارد استفاده‌ی درست را برگزینید. درگیر کردن دانشمندان داده و متخصصان هوش مصنوعی در این فرایند، به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و واقع‌بینانه کمک شایانی می‌کند.

همان‌طور که در مورد هوش مصنوعی دیدیم، لحظه‌ی «**ChatGPT**ِ کوانتوم» نیز در آستانه‌ی وقوع است؛ و درک اینکه دقیقاً محاسبات کوانتوم در کجای معادلات تجاری تعریف می‌شود، تفاوت میان حفظ یا از دست‌دادن مزیت رقابتی را رقم خواهد زد.