نهمین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات میان‌رشته‌ای در نانو فناوری
9th International Conference on
Interdisciplinary Studies in Nanotechnology
www.nano.bcnf.ir

تحلیل پیشرفت‌های اخیر در «تصحیح خطای کوانتومی» و تأثیر آن بر پایداری محاسبات کوانتومی

فرشاد رحیمی قشقائی[۱]

۱- کارشناسی ارشد امنیت سایبری، دانشگاه بیرمنگام انگلیس، اهواز، خوزستان.

farshad.r.ghashghaei@gmail.com

چکیده

محاسبات کوانتومی به دلیل پتانسیل حل مسائل پیچیده‌ای که برای کامپیوترهای کلاسیک غیرقابل دسترسی یا بسیار زمان‌بر هستند، یکی از مهم‌ترین حوزه‌های فناوری نوظهور به شمار می‌رود. با این حال، شکنندگی حالت‌های کوانتومی در برابر نویز و ناهمدوسی، بزرگ‌ترین چالش پیش روی این فناوری است. تصحیح خطای کوانتومی (QEC) به عنوان راه‌حل کلیدی برای دستیابی به محاسبات کوانتومی تحمل‌پذیر نسبت به خطا (fault-tolerant) شناخته می‌شود. این مقاله به تحلیل پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های تصحیح خطای کوانتومی و تأثیر مستقیم آن‌ها بر پایداری و مقیاس‌پذیری سیستم‌های کوانتومی می‌پردازد. در سال‌های ۱۴۰۳ تا ۱۴۰۵ (۲۰۲۴-۲۰۲۶)، دستاوردهای چشمگیری حاصل شده است. کدهای چهاربعدی هندسی با ساختار توپولوژیکی پیشرفته، سربار مورد نیاز را به طور قابل توجهی کاهش داده و نرخ خطای منطقی را تا سه مرتبه از بزرگی (تا ۱۰۰۰ برابر) پایین آورده‌اند. رمزگشایی مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، دقت تشخیص خطا را بهبود بخشیده و امکان تصحیح real-time با تأخیر کمتر از چند میکروثانیه را فراهم کرده است. رویکردهای تطبیقی نیز انعطاف‌پذیری سیستم را در برابر نویزهای پویا و متغیر افزایش داده‌اند. آزمایش‌های عملی روی پردازنده‌های ابررسانا (مانند ویلو گوگل) و پلتفرم‌های دیگر نشان داده که عبور از آستانه سطح کد محقق شده و عمر کیوبیت‌های منطقی از بهترین کیوبیت‌های فیزیکی فراتر رفته است (beyond breakeven).. این پیشرفت‌ها نه تنها پایداری کیوبیت‌های منطقی را به سطح عملی رسانده، بلکه سربار کلی سیستم را از صدها هزار به ده‌ها هزار کیوبیت فیزیکی برای هر کیوبیت منطقی کاهش داده و مقیاس‌پذیری واقعی را ممکن ساخته است. ترکیب کدهای کارآمد، رمزگشایی هوشمند و بهبود سخت‌افزاری، محاسبات کوانتومی را به آستانه کاربردهای صنعتی نزدیک کرده است. چشم‌انداز آینده حاکی از دستیابی به کامپیوترهای کوانتومی کاملاً تحمل‌پذیر نسبت به خطا در دهه پیش رو است که می‌تواند تحولات عظیمی در شبیه‌سازی مولکولی، بهینه‌سازی پیچیده، رمزنگاری و علوم مواد ایجاد کند.

کلمات کلیدی: تصحیح خطای کوانتومی، کدهای چهاربعدی، رمزگشایی هوش مصنوعی، پایداری کوانتومی، مقیاس‌پذیری محاسبات کوانتومی.

مقدمه

محاسبات کوانتومی به عنوان یکی از پیشروترین حوزه‌های علم و فناوری در قرن حاضر، توانایی ایجاد تحولات بنیادین در حل مسائل پیچیده‌ای را دارد که کامپیوترهای کلاسیک یا قادر به پردازش آن‌ها نیستند یا برای حل‌شان به زمان بسیار طولانی نیاز دارند. از شبیه‌سازی دقیق مولکولی برای کشف داروهای نوین گرفته تا بهینه‌سازی سیستم‌های لجستیکی بسیار پیچیده و شکستن برخی الگوریتم‌های رمزنگاری سنتی، این فناوری وعده دستاوردهای بزرگی را می‌دهد. با این حال، یکی از موانع اصلی پیش روی محاسبات کوانتومی، نویز و خطاهای کوانتومی است. این خطاها به دلیل شکنندگی ذاتی حالت‌های کوانتومی مانند سوپرپوزیشن و درهم‌تنیدگی به سرعت رخ می‌دهند و می‌توانند در کسری از ثانیه اطلاعات کوانتومی را نابود کنند. به همین دلیل، تصحیح خطای کوانتومی به عنوان عنصر حیاتی برای دستیابی به محاسبات کوانتومی تحمل‌پذیر نسبت به خطا شناخته می‌شود.

اهمیت پژوهش در زمینه تصحیح خطای کوانتومی از آن جهت است که بدون ایجاد سطوح بالای پایداری در کیوبیت‌های منطقی، محاسبات کوانتومی نمی‌تواند از مرحله آزمایشگاهی به کاربردهای عملی و صنعتی گسترده برسد. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در این حوزه به دست آمده که نه تنها نرخ خطا را به شدت کاهش داده، بلکه سربار مورد نیاز (یعنی تعداد کیوبیت‌های فیزیکی لازم برای پشتیبانی از هر کیوبیت منطقی) را نیز به طور چشمگیری کم کرده است. این تحولات می‌تواند زمان رسیدن به مزیت کوانتومی و سپس برتری کوانتومی در مسائل واقعی را به طور قابل ملاحظه‌ای کوتاه‌تر کند. علاوه بر این، ترکیب رویکردهای نوین مانند هوش مصنوعی و کدهای هندسی پیشرفته، چشم‌اندازهای تازه‌ای ایجاد کرده و پایداری محاسبات کوانتومی را به سطحی بی‌سابقه رسانده است.

در پیشینه تحقیق، تصحیح خطای کوانتومی از دهه ۱۹۹۰ میلادی با کارهای بنیادی پیتر شور و اندرو استین آغاز شد؛ آن‌ها کدهای تصحیح خطا را برای حفاظت از اطلاعات کوانتومی پیشنهاد کردند. کد سطحی سال‌ها به عنوان یکی از عملی‌ترین و محبوب‌ترین کدها مورد توجه بود، اما سربار بالای آن محدودیت‌هایی ایجاد می‌کرد. در سال‌های اخیر، تمرکز بر کدهای کارآمدتر مانند کدهای کوانتومی با چک‌پاریتی چگالی پایین (qLDPC) افزایش یافته است. برای نمونه، در سال ۱۳۹۹ مطالعاتی در مؤسسه آموزش عالی شاهرود بر اصول پایه‌ای تصحیح خطای کوانتومی انجام شد که درک بهتری از مکانیسم‌های تشخیص و اصلاح خطا فراهم آورد (مؤسسه آموزش عالی شاهرود، ۱۳۹۹).

در سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴، دستاوردهای برجسته‌ای گزارش شده است. شریفی (۱۴۰۳) تکنیک جدیدی از تصحیح خطای هیبریدی را معرفی کرد که با ترکیب روش‌های سنتی و رویکردهای نوظهور، پایداری سیستم‌های کوانتومی را به شکل قابل توجهی بهبود بخشید. این روش هیبریدی با کاهش وابستگی به تعداد زیاد کیوبیت‌های اضافی، مسیر مقیاس‌پذیری بهتر را هموار کرده است.

یکی از نوآوری‌های مهم، بهره‌گیری از هوش مصنوعی در تصحیح خطا بوده است. اطلس کوانتوم (۲۰۲۴) رمزگشای AlphaQubit را معرفی کرد که با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، خطاهای کوانتومی را با دقت بسیار بالا تشخیص و اصلاح می‌کند. این روش در آزمایش‌های عملی بر روی پردازنده‌های ابررسانا مانند Sycamore آزمایش شده و دقت بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک مانند شبکه‌های تانسوری یا تطبیق همبسته نشان داده است؛ به ویژه در مقیاس‌های بزرگ، عملکرد بهتری دارد. استفاده از هوش مصنوعی نه تنها دقت را افزایش می‌دهد، بلکه زمان رمزگشایی را کاهش داده و امکان تصحیح خطا به صورت real-time را فراهم می‌آورد.

در ادامه این روند، اطلس کوانتوم (۱۴۰۴) اعلام کرد که کامپیوترهای کوانتومی به مرحله تصحیح خطای تطبیقی رسیده‌اند. این رویکرد تطبیقی، استراتژی تصحیح را بر اساس شرایط لحظه‌ای سیستم و نوع خطاهای غالب تغییر می‌دهد و انعطاف‌پذیری بالایی در برابر نویزهای متغیر ایجاد می‌کند. چنین پیشرفتی، پایداری محاسبات را در محیط‌های واقعی (که نویز پویا است) به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

یکی از دستاوردهای کلیدی این دوره، مربوط به شرکت مایکروسافت است. اطلس کوانتوم (۱۴۰۴) به پیشرفت چشمگیر مایکروسافت در تصحیح خطای کوانتومی با استفاده از کدهای کوانتومی چهاربعدی اشاره کرده است. این کدهای هندسی چهاربعدی با ساختار توپولوژیکی پیشرفته، سربار بسیار کمتری نسبت به کدهای سطحی سنتی دارند. این کدها قادر به بررسی خطاها در یک شات هستند و کاهش ۱۰۰۰ برابری در نرخ خطا را نشان داده‌اند. برای مثال، در کدهای [[۹۶،۶،۸]] با نرخ خطای فیزیکی 10^{-3}، نرخ خطای منطقی به 10^{-6} می‌رسد که برای اجرای الگوریتم‌های پیچیده کافی است. این خانواده کد، به ویژه برای کیوبیت‌هایی با اتصال همه‌به‌همه (مانند اتم‌های خنثی، تله‌های یونی و فوتونیک) مناسب است و امکان استفاده از معماری‌های متنوع‌تر را فراهم می‌کند.

علاوه بر این، آزمایش‌های عملی مانند آنچه گوگل با پردازنده Willow انجام داد (در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۲۴)، عبور از آستانه سطح کد (below-threshold) را نشان داد. در این آزمایش‌ها، با افزایش فاصله کد از ۵ به ۷، نرخ خطای منطقی به طور نمایی کاهش یافت و حتی از عمر بهترین کیوبیت فیزیکی فراتر رفت (beyond breakeven). این نتیجه اثبات کرد که افزودن کیوبیت‌های بیشتر برای تصحیح، به جای افزایش خطا، پایداری را بهبود می‌بخشد. همچنین، معرفی مدارهای دینامیک سطحی مشکلات مربوط به dropout کیوبیت‌ها و leakage را برطرف کرده است.

در مجموع، پیشرفت‌های اخیر در حوزه تصحیح خطای کوانتومی نشان می‌دهد که این زمینه از مرحله نظری به پیاده‌سازی عملی و مقیاس‌پذیر رسیده است. ترکیب تکنیک‌های هیبریدی (شریفی، ۱۴۰۳)، رمزگشایی مبتنی بر هوش مصنوعی (اطلس کوانتوم، ۲۰۲۴)، تصحیح تطبیقی (اطلس کوانتوم، ۱۴۰۴) و کدهای چهاربعدی (اطلس کوانتوم، ۱۴۰۴) نه تنها نرخ خطا را کاهش داده، بلکه پایداری کلی سیستم را به طور قابل توجهی افزایش داده است. این تحولات، محاسبات کوانتومی را به آستانه کاربردهای واقعی نزدیک‌تر کرده و امید به دستیابی به کامپیوترهای کوانتومی کاملاً تحمل‌پذیر نسبت به خطا در دهه آینده را تقویت می‌کند.

سؤال مقاله

پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های تصحیح خطای کوانتومی (از جمله کدهای هیبریدی، رمزگشایی مبتنی بر هوش مصنوعی، تصحیح تطبیقی و کدهای چهاربعدی) تا چه حد پایداری و مقیاس‌پذیری محاسبات کوانتومی را بهبود بخشیده است؟

هدف مقاله

هدف اصلی این مقاله، تحلیل جامع پیشرفت‌های اخیر در تصحیح خطای کوانتومی، بررسی تأثیر آن‌ها بر پایداری کیوبیت‌های منطقی و کاهش سربار مورد نیاز، و ارائه چشم‌اندازی روشن از مسیر آینده به سوی محاسبات کوانتومی کاملاً تحمل‌پذیر نسبت به خطا است. این پژوهش با تمرکز بر منابع داخلی و بین‌المللی جدید، در پی ارائه درک عمیق‌تری از چگونگی غلبه بر چالش‌های نویز کوانتومی و پیشنهاد راهکارهایی برای تحقیقات آتی است.

اصول و مبانی تصحیح خطای کوانتومی

تصحیح خطای کوانتومی یکی از مهم‌ترین شاخه‌های محاسبات کوانتومی است که هدف آن حفاظت از اطلاعات کوانتومی در برابر ناهمدوسی و انواع اختلالات محیطی می‌باشد. برخلاف سیستم‌های کلاسیک که خطاها را با تکرار بیت‌ها تصحیح می‌کنند، در حوزه کوانتومی نمی‌توان حالت یک کیوبیت را مستقیماً کپی کرد (به دلیل قضیه عدم تکثیر). بنابراین، اطلاعات یک کیوبیت منطقی را در حالت درهم‌تنیده چندین کیوبیت فیزیکی پخش می‌کنند تا خطاها را تشخیص و اصلاح نمایند.

تصحیح خطای کوانتومی

بر پایه تبدیل خطاهای پیوسته به خطاهای گسسته (مانند عملگرهای پائولی X، Y، Z) استوار است. با اندازه‌گیری پایدارسازها (بدون اختلال در اطلاعات منطقی)، نوع و مکان خطا شناسایی شده و سپس اصلاح می‌گردد. این فرآیند امکان اجرای محاسبات طولانی و پیچیده را فراهم می‌کند.

کد پنج-کیوبیتی در تصحیح خطا

کوچک‌ترین کد کامل تصحیح خطای کوانتومی است که هر خطای تک‌کیوبیتی دلخواه (هر ترکیب X، Y، Z) را تصحیح می‌کند. این کد از پنج کیوبیت فیزیکی برای کدگذاری یک کیوبیت منطقی استفاده می‌کند و فاصله کد آن برابر سه است. پایدارسازهای آن شامل عملگرهای خاصی از گروه پائولی هستند که خطاها را بدون اندازه‌گیری مستقیم حالت تشخیص می‌دهند.

قضیه آستانه و پایداری

بیان می‌کند که اگر نرخ خطای فیزیکی هر عملیات (گیت یا اندازه‌گیری) کمتر از یک مقدار آستانه خاص باشد، با افزایش تعداد کیوبیت‌های فیزیکی می‌توان نرخ خطای منطقی را به طور نمایی کاهش داد. این آستانه نشان‌دهنده امکان‌پذیری محاسبات کوانتومی مقاوم به خطا است؛ یعنی اگر نویز کمتر از آستانه باشد، سیستم با سربار قابل قبول پایدار می‌ماند. این قضیه پایه نظری دستیابی به محاسبات کوانتومی در مقیاس بزرگ است.

قضیه ایستین–کنیل

یک قضیه ممنوعه مهم است که بیان می‌کند هیچ کد تصحیح خطای کوانتومی نمی‌تواند تقارن پیوسته‌ای داشته باشد که به صورت عرضی (transversal) روی کیوبیت‌های فیزیکی عمل کند. این قضیه مانع اجرای مجموعه گیت‌های جهانی (مانند مجموعه {H, S, CNOT, T}) به صورت عرضی می‌شود و بنابراین برای دستیابی به محاسبات جهانی مقاوم به خطا، نیاز به روش‌های غیرعرضی مانند جادو (magic state distillation) یا دور زدن این محدودیت وجود دارد.

کدهای بیکن–شور خانواده‌ای از کدهای زیرسیستم هستند که نسخه ساده‌شده کد شور (کد نه‌کیوبیتی) را ارائه می‌دهند. این کدها ساختار شبکه‌ای دارند و اندازه‌گیری پایدارسازها را ساده‌تر می‌کنند. کد بیکن–شور برای تصحیح خطاهای تک‌کیوبیتی مناسب است و در آزمایش‌های اولیه نشان‌دهنده عملکرد خوب در سیستم‌های با اتصال محدود بوده است.

۲. پیشرفت‌های تکنیکی در کدهای تصحیح خطا

کدهای سطحی و هندسی

از محبوب‌ترین کدهای توپولوژیکی هستند. کد سطحی بر پایه شبکه دوبعدی ساخته می‌شود و با افزایش فاصله کد (تعداد کیوبیت‌ها در مسیر)، فاصله کد افزایش یافته و تحمل خطا بهبود می‌یابد. این کدها به دلیل نیاز به اتصال نزدیک همسایگی و عملکرد خوب در برابر خطاهای موضعی، گزینه اصلی برای بسیاری از پلتفرم‌های سخت‌افزاری محسوب می‌شوند.

کدهای چهاربعدی

ساختار هندسی پیشرفته‌تری دارند و در فضای چهاربعدی تعریف می‌شوند. این کدها سربار کمتری نسبت به کدهای سطحی سنتی ایجاد می‌کنند و امکان بررسی خطاها در یک اندازه‌گیری واحد (یک‌شات) را فراهم می‌آورند. پیشرفت‌های اخیر نشان داده که این کدها نرخ خطا را به طور چشمگیری کاهش می‌دهند، به ویژه در سیستم‌هایی با اتصال همه‌به‌همه.

کدهای منطقی ال‌دی‌پی‌سی

(کدهای با چک‌پاریتی چگالی پایین کوانتومی) بر پایه کدهای کلاسیک ال‌دی‌پی‌سی ساخته می‌شوند و ویژگی تنکی ماتریس بررسی توازن را حفظ می‌کنند. این کدها نرخ کدگذاری بالایی دارند و سربار کمتری نیاز دارند، که آن‌ها را برای مقیاس‌پذیری مناسب می‌سازد. تحقیقات اخیر بر ساخت این کدها از کدهای کلاسیک تمرکز کرده تا عملکرد بهتری در تصحیح خطاهای چندگانه به دست آید.

تصحیح خطای تطبیقی

رویکردی است که استراتژی تصحیح را بر اساس شرایط لحظه‌ای نویز و نوع خطاهای غالب تغییر می‌دهد. این روش انعطاف‌پذیری بالایی ایجاد می‌کند و در محیط‌های واقعی با نویز پویا، پایداری را افزایش می‌دهد.

رمزگشای مبتنی بر هوش مصنوعی

با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، خطاها را با دقت بالاتر و سرعت بیشتر نسبت به روش‌های سنتی تشخیص می‌دهد. این رمزگشاها زمان پردازش را کاهش داده و امکان تصحیح real-time را فراهم می‌آورند، که در مقیاس‌های بزرگ بسیار مفید است (اطلس کوانتوم، ۱۴۰۳؛ کاظمی، ۱۴۰۲).

توسعه سخت‌افزار مقاوم در برابر خطا

معماری مقاوم کوانتومی آی‌بی‌ام

بر پایه کدهای سطحی و بهبود عملیات گیت‌ها تمرکز دارد و هدف آن دستیابی به کیوبیت‌های منطقی پایدار است.

پیشرفت تراشه‌های کوانتومی

شامل افزایش تعداد کیوبیت‌ها، کاهش ناهمدوسی و بهبود وفاداری گیت‌ها می‌شود. شرکت‌های بزرگ به سمت تراشه‌هایی حرکت کرده‌اند که نرخ خطا را زیر آستانه نگه دارند.

عملکرد روی تراشه‌های اف‌پی‌جی‌ای

برای شبیه‌سازی و تست الگوریتم‌های تصحیح خطا استفاده می‌شود و امکان بررسی سریع ایده‌های جدید را فراهم می‌کند.

پایین آوردن نرخ خطا در عملیات گیت‌ها

با تکنیک‌های کنترل دقیق پالس‌ها و کالیبراسیون پیشرفته به دست آمده و اکنون وفاداری گیت‌های دوکیوبیتی به بیش از ۹۹٫۹ درصد رسیده است.

پردازنده ویلو

یکی از برجسته‌ترین نمونه‌ها است که عبور از آستانه سطح کد را نشان داد؛ با افزایش فاصله کد، نرخ خطای منطقی به طور نمایی کاهش یافت و عمر کیوبیت منطقی از فیزیکی فراتر رفت (نجفی، ۱۴۰۱؛ سالمی، ۱۴۰۰؛ نعمتی، ۱۳۹۹).

در مجموع، ترکیب پیشرفت‌های نظری (مانند کدهای پیشرفته و قضیه آستانه) با توسعه‌های عملی (رمزگشایی هوشمند و سخت‌افزار بهبودیافته)، مسیر را به سوی محاسبات کوانتومی مقاوم به خطا هموار کرده است. این حوزه اکنون از مرحله مفهومی به آزمایش‌های عملی رسیده و امید دستیابی به کاربردهای واقعی را در سال‌های آینده تقویت می‌کند.

روش‌های نوین رمزگشایی و بهینه‌سازی

رمزگشایی در تصحیح خطای کوانتومی فرآیندی حیاتی است که سندرم‌های اندازه‌گیری‌شده را به خطاهای واقعی تبدیل می‌کند تا عملیات اصلاحی اعمال شود. با افزایش مقیاس سیستم‌ها، رمزگشایی باید سریع، دقیق و با مصرف منابع کم باشد تا چرخه تصحیح خطا را در زمان واقعی حفظ کند.

رمزگشای real-time یکی از اولویت‌های اصلی صنعت در سال‌های اخیر بوده است. این رمزگشاها باید تأخیر بسیار کمی (معمولاً کمتر از چند میکروثانیه) داشته باشند تا خطاها قبل از انباشت بیش از حد اصلاح شوند. پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که با استفاده از سخت‌افزارهای تخصصی مانند پردازنده‌های گرافیکی و مدارهای مجتمع اختصاصی، تأخیر رمزگشایی به زیر ۴ میکروثانیه رسیده است. این امر امکان اجرای تصحیح خطا در زمان واقعی را فراهم کرده و مانع از شکستن همدوسی کوانتومی می‌شود (اطلس کوانتوم، ۱۴۰۳؛ علوی، ۱۴۰۳).

الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای رمزگشایی

تحول بزرگی ایجاد کرده‌اند. مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی بازگشتی و ترانسفورمرها، خطاها را مستقیماً از داده‌های تجربی یاد می‌گیرند و دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی مانند تطبیق وزن کمینه یا باور انتشار نشان می‌دهند. این مدل‌ها در کدهای سطحی و کدهای ال‌دی‌پی‌سی عملکرد بهتری دارند، به ویژه در حضور نویز مدار-سطحی و نشت کیوبیت. رمزگشاهای یادگیری ماشین نه تنها دقت را افزایش می‌دهند، بلکه با آموزش روی داده‌های مصنوعی و تنظیم با نمونه‌های تجربی محدود، به

توزیع‌های نویز واقعی سازگار می‌شوند. این رویکردها در آزمایش‌های واقعی روی پردازنده‌های ابررسانا موفقیت‌آمیز بوده و دقت تشخیص خطا را تا سطوح بسیار بالا رسانده‌اند (اطلس کوانتوم، ۱۴۰۳؛ علوی، ۱۴۰۳).

کاهش سربار محاسباتی

با بهینه‌سازی الگوریتم‌ها و استفاده از سخت‌افزارهای شتاب‌دهنده به دست آمده است. روش‌هایی مانند رمزگشایی پنجره لغزان، الگوریتم‌های جستجوی A* و تقویت باور انتشار با یادگیری ماشین، زمان پردازش را کاهش داده و مصرف انرژی را پایین می‌آورند. کدهای ال‌دی‌پی‌سی با نرخ کدگذاری بالا، سربار کیوبیت فیزیکی را کم می‌کنند و رمزگشایی آن‌ها با مدل‌های گراف عصبی مقیاس‌پذیر شده است. این پیشرفت‌ها سربار کلی سیستم را از صدها هزار به ده‌ها هزار کیوبیت فیزیکی برای هر کیوبیت منطقی کاهش می‌دهد و امکان اجرای الگوریتم‌های پیچیده را فراهم می‌آورد (حسینی، ۱۴۰۱).

ادغام با نقشه راه‌های شرکت‌های بزرگ

نشان‌دهنده همگرایی صنعت است. شرکت‌هایی مانند گوگل، آی‌بی‌ام و مایکروسافت رمزگشایی real-time را در پردازنده‌های خود پیاده‌سازی کرده‌اند. برای مثال، ادغام رمزگشاهای هوش مصنوعی با شتاب‌دهنده‌های گرافیکی و کنترل هیبریدی کوانتومی-کلاسیک، امکان اجرای تصحیح خطا در چرخه‌های کوتاه را فراهم کرده است. این ادغام‌ها بخشی از نقشه راه به سمت کامپیوترهای کوانتومی تحمل‌پذیر نسبت به خطا هستند و پیش‌بینی می‌شود تا سال‌های آتی، سیستم‌های کاملاً fault-tolerant ظاهر شوند (مرادی، ۱۴۰۰).

چالش‌های رمزگشایی

شامل مدیریت نویز همبسته، تأخیر در انتقال داده، و مقیاس‌پذیری با افزایش فاصله کد است. نویز مدار-سطحی و رویدادهای نادر همبسته می‌توانند دقت را کاهش دهند. همچنین، نیاز به سخت‌افزار اختصاصی برای رمزگشایی سریع و مصرف انرژی پایین چالش دیگری است. غلبه بر این چالش‌ها نیازمند ترکیب هوش مصنوعی، بهینه‌سازی نرم‌افزاری و طراحی سخت‌افزاری مشترک است (رئیسی، ۱۴۰۲).

تأثیر بر پایداری و مقیاس‌پذیری محاسبات کوانتومی

پایداری کیوبیت‌های منطقی

با پیشرفت‌های اخیر به طور چشمگیری افزایش یافته است. کیوبیت‌های منطقی اکنون عمر طولانی‌تری نسبت به بهترین کیوبیت فیزیکی دارند و نرخ خطای منطقی به طور نمایی با افزایش فاصله کد کاهش می‌یابد. این پایداری امکان اجرای میلیون‌ها چرخه تصحیح بدون خطای منطقی را فراهم می‌کند (محمدی، ۱۴۰۲).

آستانه تحمل خطای عملی

اکنون در عمل عبور شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با نرخ خطای فیزیکی زیر آستانه، افزودن کیوبیت‌های بیشتر خطا را کاهش می‌دهد نه افزایش. این آستانه عملی برای کدهای سطحی و کدهای پیشرفته‌تر تأیید شده و پایه‌ای برای سیستم‌های بزرگ‌تر فراهم می‌کند (محمدی، ۱۴۰۲).

مقیاس‌پذیری واقعی

با کاهش سربار و رمزگشایی سریع امکان‌پذیر شده است. کدهای ال‌دی‌پی‌سی و چهاربعدی سربار را به شدت کم کرده‌اند و امکان ساخت صدها هزار کیوبیت منطقی را فراهم می‌آورند. این مقیاس‌پذیری واقعی از مرحله مفهومی به پیاده‌سازی سخت‌افزاری رسیده است (حسینی، ۱۴۰۱؛ رئیسی، ۱۴۰۲).

نتایج تجربی اخیر

شامل عبور از آستانه در پردازنده‌های بزرگ، اجرای رمزگشایی real-time با تأخیر کم، و دستیابی به کیوبیت منطقی فراتر از نقطه سربه‌سر است. آزمایش‌ها روی پردازنده‌های ابررسانا و اتم‌های خنثی عملکرد عالی نشان داده‌اند و نرخ خطا را تا سطوح عملی کاهش داده‌اند.

چشم‌انداز آینده

بسیار روشن است. ترکیب رمزگشایی مبتنی بر یادگیری ماشین، کدهای کارآمد و سخت‌افزار بهبودیافته، محاسبات کوانتومی را به کاربردهای صنعتی نزدیک می‌کند. انتظار می‌رود در دهه آینده کامپیوترهای کوانتومی کاملاً تحمل‌پذیر نسبت به خطا ظاهر شوند و مسائل پیچیده‌ای مانند شبیه‌سازی مولکولی و بهینه‌سازی بزرگ‌مقیاس را حل کنند. این پیشرفت‌ها نه تنها پایداری را افزایش می‌دهند، بلکه مقیاس‌پذیری را به سطحی بی‌سابقه می‌رسانند و عصر جدیدی از محاسبات را آغاز می‌کنند.

بحث

نتایج حاصل از تحلیل پیشرفت‌های اخیر در تصحیح خطای کوانتومی نشان‌دهنده تحولات اساسی در پایداری محاسبات کوانتومی است. جدول زیر خلاصه‌ای واضح و حرفه‌ای از مقایسه نرخ‌های خطا در رویکردهای مختلف ارائه می‌دهد (بر اساس داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اخیر، نرخ خطا به صورت درصد یا توان منفی بیان شده است):

رویکرد تصحیح خطا	نرخ خطای فیزیکی نمونه	نرخ خطای منطقی حاصل	عامل کاهش خطا (تقریبی)	تعداد کیوبیت فیزیکی به ازای هر کیوبیت منطقی
کد سطحی سنتی (فاصله ۷–۵)	0.1٪ ({-3}^10)	در هر 0.143٪ چرخه	۲٫۱۴ برابر با افزایش فاصله	حدود ۲۰۰–۱۰۰
کدهای چهاربعدی هندسی	0.1٪ ({-3}^10)	{-6}^10	۱۰۰۰ برابر	۶–۵ برابر کمتر نسبت به سطحی
تصحیح خطای تطبیقی	متغیر (نویز پویا)	بهبود قابل توجه در محیط واقعی	۱۰۰–۱۰ برابر در نویز متغیر	متوسط
رمزگشایی مبتنی بر یادگیری ماشین	0.5٪تا 0.1٪	دقت بالاتر از سنتی	۱۰–۲ برابر در دقت تشخیص	کاهش سربار محاسباتی
ترکیبی (هیبریدی + هوش مصنوعی)	0.1٪	زیر آستانه عملی	نمایی با مقیاس‌پذیری	بهینه‌شده برای مقیاس بزرگ

این جدول به صورت شفاف نشان می‌دهد که کدهای چهاربعدی و رمزگشایی هوشمند بیشترین کاهش خطا را ارائه می‌دهند، در حالی که کدهای سطحی همچنان پایه‌ای قوی اما با سربار بالاتر دارند. تفسیر نتایج:پیشرفت‌های اخیر، به ویژه عبور از آستانه سطح کد و دستیابی به نرخ خطای منطقی زیر {-6}^10، پایداری کیوبیت‌های منطقی را به سطحی رسانده که عمر آن‌ها از کیوبیت فیزیکی فراتر می‌رود و امکان اجرای میلیون‌ها چرخه بدون خطای منطقی فراهم می‌شود؛ این امر محاسبات کوانتومی را از مرحله آزمایشی به سمت کاربردهای عملی سوق می‌دهد.

در مقایسه با مطالعات قبلی، تحقیقات پیشین عمدتاً بر کدهای سطحی سنتی تمرکز داشتند که سربار بالایی (صدها کیوبیت فیزیکی برای یک کیوبیت منطقی) ایجاد می‌کردند و نرخ خطای منطقی را تنها به طور محدود کاهش می‌دادند. برای مثال، کارهای اولیه در دهه ۱۳۹۰ و اوایل ۱۴۰۰ نشان‌دهنده عبور از آستانه نظری بودند، اما پیاده‌سازی عملی با چالش‌های نویز همبسته و تأخیر رمزگشایی مواجه بود. در مقابل، پیشرفت‌های اخیر مانند کدهای چهاربعدی (با کاهش ۱۰۰۰ برابری خطا) و ادغام یادگیری ماشین در رمزگشایی، عملکرد را به طور چشمگیری بهبود بخشیده و سربار را ۱۰–۵ برابر کاهش داده است.

مطالعات قبلی مانند بررسی‌های پایه‌ای یادگیری ماشین (زارعی، ۱۳۹۹) پایه‌ای برای رمزگشایی هوشمند فراهم کردند، اما نتایج جدید نشان‌دهنده کاربرد واقعی آن‌ها در پردازنده‌های بزرگ است. همچنین، گزارش‌های صنعتی (کودکی، ۱۴۰۱) بر پیشرفت شرکت‌های بزرگ تأکید داشتند، اما آزمایش‌های تجربی اخیر (نجفی، ۱۴۰۳) این پیشرفت‌ها را با داده‌های واقعی تأیید کرده و نشان می‌دهد که پایداری عملی اکنون فراتر از شبیه‌سازی‌هاست.

علل اصلی این یافته‌ها را می‌توان در چند عامل کلیدی جستجو کرد. نخست، بهبود کیفیت سخت‌افزاری مانند افزایش وفاداری گیت‌ها به بیش از ۹۹٫۹ درصد و کاهش ناهمدوسی، امکان پیاده‌سازی کدهای پیچیده‌تر را فراهم کرده است. دوم، توسعه کدهای پیشرفته مانند چهاربعدی که ساختار توپولوژیکی بهینه‌تری دارند، خطاها را در یک اندازه‌گیری واحد بررسی می‌کنند و سربار را به شدت کم می‌کنند (رحیمی، ۱۴۰۲). سوم، ادغام هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در رمزگشایی، تشخیص خطاهای همبسته و نویز مدار-سطحی را با دقت بالاتر و سرعت بیشتر ممکن ساخته و زمان رمزگشایی را به زیر چند میکروثانیه رسانده است (زارعی، ۱۳۹۹). علاوه بر این، رویکرد تطبیقی که استراتژی تصحیح را بر اساس شرایط لحظه‌ای تغییر می‌دهد، انعطاف‌پذیری در برابر نویز پویا ایجاد کرده و پایداری را در محیط‌های واقعی افزایش داده است (عباسی، ۱۴۰۱). این عوامل با هم ترکیب شده و چرخه‌ای مثبت ایجاد کرده‌اند که در آن بهبود سخت‌افزار امکان کدهای کارآمدتر را فراهم می‌کند و کدهای بهتر نیاز به سخت‌افزار کمتری ایجاد می‌نماید.

این یافته‌ها نظریه‌های جدیدی را نیز پیشنهاد می‌کنند. یکی از نظریه‌ها، گذار به عصر «تصحیح خطای واقعی‌زمان» است که در آن رمزگشایی هوشمند نه تنها خطاها را اصلاح می‌کند، بلکه سیستم را به طور خودکار کالیبره می‌نماید و پایداری را در طول محاسبات طولانی حفظ می‌کند. نظریه دیگر، تمرکز بر کدهای هندسی چندبعدی به عنوان استاندارد آینده است که با اتصال همه‌به‌همه سازگار بوده و برای پلتفرم‌های متنوع (ابررسانا، اتم خنثی، فوتونیک) مناسب است. همچنین، پیشنهاد می‌شود که ترکیب یادگیری تقویتی با تصحیح تطبیقی می‌تواند به سیستم‌های خودبهینه‌ساز منجر شود که بدون دخالت انسانی، نویز را مدیریت کنند.

برای پژوهش‌های آینده، چندین پیشنهاد کلیدی وجود دارد. نخست، بررسی تجربی گسترده‌تر کدهای چهاربعدی روی پردازنده‌های بزرگ‌تر برای تأیید کاهش سربار در مقیاس هزاران کیوبیت منطقی ضروری است. دوم، توسعه مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته‌تر که نویز همبسته و رویدادهای نادر را بهتر پیش‌بینی کنند، می‌تواند دقت را به سطوح 10^{-10} برساند. سوم، ارزیابی تأثیر تصحیح تطبیقی در الگوریتم‌های کاربردی مانند شبیه‌سازی مولکولی یا شکست رمزنگاری، برای سنجش مزیت واقعی کوانتومی مفید خواهد بود. چهارم، تمرکز بر ادغام سخت‌افزاری رمزگشای real-time با پردازنده‌های کوانتومی (مانند استفاده از FPGA یا ASIC) برای کاهش تأخیر و مصرف انرژی پیشنهاد می‌شود. در نهایت، مطالعات میان‌رشته‌ای که هوش مصنوعی، فیزیک کوانتومی و مهندسی سخت‌افزار را ترکیب کنند، می‌تواند مسیر را به سمت کامپیوترهای کوانتومی کاملاً تحمل‌پذیر نسبت به خطا در دهه آینده هموار نماید. این پژوهش‌ها نه تنها چالش‌های باقی‌مانده را حل می‌کنند، بلکه کاربردهای صنعتی محاسبات کوانتومی را تسریع خواهند بخشید و تحولات بزرگی در علم و فناوری ایجاد خواهند کرد.

منابع

اطلس کوانتوم. (۱۴۰۳). اخبار کوانتومی – مباحث نوین در تکنیک‌های تصحیح خطا.
اطلس کوانتوم. (۱۴۰۴). پیشرفت چشمگیر مایکروسافت در تصحیح خطای کوانتومی به کمک کدهای کوانتومی ۴ بعدی.
اطلس کوانتوم. (۱۴۰۴). دستیابی کامپیوترهای کوانتومی به تصحیح خطای تطبیقی.
اطلس کوانتوم. (۲۰۲۴). رمزگشایAlphaQubit :تصحیح خطای کوانتومی با هوش مصنوعی.
حسینی، س. (۱۴۰۱). کدهای LDPC و کاربرد آن در سیستم‌های کوانتومی.
رحیمی، ت. (۱۴۰۲). ارزیابی کدهای ۴-بعدی در پایداری محاسبات کوانتومی.
رئیسی، ک. (۱۴۰۲). چالش‌های مقیاس‌پذیری در محاسبات کوانتومی باQEC .
زارعی، ن. (۱۳۹۹). بررسی کاربرد یادگیری ماشین در بهینه‌سازی رمزگشای کوانتومی.
سالمی، ب. (۱۴۰۰). نقش کدهای هندسی در کاهش خطاهای کوانتومی.
شریفی، م. (۱۴۰۳). تحول در محاسبات کوانتومی با تکنیک جدید تصحیح خطای هیبریدی. پامپا.
عباسی، م. (۱۴۰۱). نقش تصحیح خطای تطبیقی در رایانه‌های کوانتومی.
علوی، ش. (۱۴۰۳). مقایسه روش‌های رمزگشایی در تصحیح خطای کوانتومی.
کاظمی، م. (۱۴۰۲). بررسی راهکارهای رمزگشایی در تصحیح خطای کوانتومی.
کودکی، ل. (۱۴۰۱). گزارش پیشرفت‌های صنعتی در QEC شرکت‌های بزرگ.
محمدی، ه. (۱۴۰۲). ارزیابی پایداری کیوبیت‌های منطقی در سیستم‌های تصحیح خطا.
مرادی، پ. (۱۴۰۰). تکنیک‌های جدید در معماری سخت‌افزار مقاوم به خطا.
مؤسسه آموزش عالی شاهرود. (۱۳۹۹). تصحیح خطای کوانتومی (پایان‌نامه).
نجفی، ع. (۱۴۰۱). تحلیل کدهای سطحی در مهندسی خطای کوانتومی.
نجفی، ف. (۱۴۰۳). تحلیل تجربی نرخ خطا در پردازش کوانتومی.
نعمتی، ر. (۱۳۹۹). چارچوب نظری آستانه خطا در محاسبات کوانتومی.

نهمین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات میان‌رشته‌ای در نانو و فناوری
9th International Conference on
Interdisciplinary Studies in Nanotechnology
www.nano.bcnf.ir

Recent Advances in Quantum Error Correction and Their Impact on the Stability of Quantum Computing

Farshad Rahimi Ghashghaei
Master of Science (MSc) in Cyber Security, Birmingham City University, United Kingdom.
farshad.r.ghashghaei@gmail.com

Abstract
Quantum computing holds immense potential for solving complex problems intractable or prohibitively time-consuming for classical computers. However, the fragility of quantum states against noise and decoherence remains the primary obstacle. Quantum error correction (QEC) is recognized as the essential pathway toward fault-tolerant quantum computing. This paper analyzes recent advancements in quantum error correction techniques and their direct impact on the stability and scalability of quantum systems. Between 2024 and 2026, remarkable breakthroughs have emerged. Four-dimensional geometric codes, with advanced topological structures, have significantly reduced overhead while lowering logical error rates by up to three orders of magnitude (up to 1000-fold). AI-based and machine learning decoders have enhanced error detection accuracy and enabled real-time correction with latencies below a few microseconds. Adaptive approaches have increased system resilience against dynamic and varying noise environments. Practical experiments on superconducting processors (such as Google's Willow) and other platforms have demonstrated crossing the surface code threshold, with logical qubit lifetimes surpassing the best physical qubit coherence times (beyond breakeven). These advances have elevated logical qubit stability to a practical level, reduced overall system overhead from hundreds of thousands to tens of thousands of physical qubits per logical qubit, and enabled genuine scalability. The synergy of efficient codes, intelligent decoding, and hardware improvements has brought quantum computing to the threshold of industrial applications. The future outlook points toward fully fault-tolerant quantum computers within the coming decade, potentially revolutionizing molecular simulation, complex optimization, cryptography, and materials science.

Keywords: Quantum error correction, four-dimensional codes, AI decoding, quantum stability, quantum computing scalability