



۸۱۰۱۰۱۵۵۸



پردازش اطلاعات کوانتومی  
نام و نام خانوادگی: مهدی وجهی

مطالعه مقاله ۱

## ۱ هدف اصلی

هدف اصلی این مقاله دستیابی به برتری کوانتومی است؛ یعنی رسیدن به نقطه‌ای که یک کامپیوتر کوانتومی بتواند مسئله‌ای مشخص را به صورت نمایی سریع‌تر از سریع‌ترین ابرکامپیوتر کلاسیک حل کند.

## ۲ مسئله حل شده

مسئله‌ی محک، نمونه‌برداری از خروجی یک مدار کوانتومی شبه تصادفی بود. به دلیل تداخل کوانتومی، توزیع احتمال خروجی این مدارها یک الگوی لکه‌ای بسیار پیچیده ایجاد می‌کند. شبیه‌سازی این فرآیند نمونه‌برداری و محاسبه احتمالات خروجی، برای کامپیوترهای کلاسیک به صورت نمایی دشوار است. در این آزمایش، پردازنده کوانتومی *Sycamore* با ۵۳ کیوبیت (فضای حالت  $2^{53}$ )، این نمونه‌برداری را مستقیماً اجرا کرد. این کار نیازمند طراحی پردازنده‌ای با وفاداری بالا و طراحی مسئله‌ای بود که ذاتاً برای شبیه‌سازی کلاسیک غیرممکن باشد.

## ۳ ضرورت حل این مسئله

ضرورت اصلی این کار، تحقق چشم‌انداز فاینمن و پاسخ به دو پرسش بنیادی بود: آیا می‌توان سیستمی کوانتومی با خطای کافی پایین برای شتاب کوانتومی ساخت؟ و آیا مسئله‌ای سخت برای کلاسیک و آسان برای کوانتومی وجود دارد؟

این آزمایش نشان داد که شتاب کوانتومی ممکن است و توسط قانون فیزیکی پنهانی محدود نمی‌شود و بدین ترتیب عصر *NISQ* (کوانتومی در مقیاس متوسط نویزی) را آغاز کرد. اگرچه کاربردهای اصلی (مانند الگوریتم *Shor*) نیازمند کیوبیت‌های منطقی مقاوم در برابر خطا هستند، پیشرفت‌های فنی این مقاله، پایه لازم برای تصحیح خطا در آینده را فراهم کرد.

## ۴ رویکرد حل مسئله

### ۱.۴ سخت افزار: پردازنده *Sycamore*

قلب آزمایش، پردازنده *Sycamore* بود: یک آرایه دو بعدی از ۵۳ کیوبیت ترانسمون. هر کیوبیت به چهار همسایه متصل بود (طراحی سازگار با کدهای سطحی تصحیح خطا). پیشرفت فنی کلیدی، کوپلرهای قابل تنظیم بود که امکان خاموش کردن کامل یا روشن کردن سریع برهم کنش بین کیوبیت‌ها را برای گیت‌های دو کیوبیتی فراهم می‌کرد. کیوبیت‌ها با درایو میکروویو (گیت‌ها) و کنترل شار مغناطیسی (تنظیم فرکانس) کنترل می‌شدند و در دمای زیر ۲۰ میلی‌کلوین برای حذف نویز حرارتی کار می‌کردند.

### ۲.۴ معیار سنجش و راستی‌آزمایی

محققان از معیار سنجی آنروپی متقاطع  $F_{XEB}$  استفاده کردند. این معیار، وفاداری سیستم را با مقایسه احتمالات ایده‌آل (از شبیه‌سازی) با بیت‌رشته‌های مشاهده‌شده در آزمایش اندازه‌گیری می‌کند.  $F_{XEB} = 1$  تطابق کامل و  $F_{XEB} = 0$  نویز تصادفی است.

از آنجایی که محاسبه  $F_{XEB}$  برای مدار کامل ۵۳ کیوبیتی، خود یک وظیفه کلاسیک غیرممکن بود، وفاداری از طریق سه نوع مدار ساده‌تر تخمین زده شد:

۱. **مدارهای راستی‌آزمایی:** مدارهای کاملی با الگوی گیت ساده‌شونده که شبیه‌سازی کلاسیک آن‌ها آسان‌تر بود.

۲. **مدارهای وصله‌ای (*Patch*):** با حذف برخی گیت‌ها، مدار به دو بخش مجزا تقسیم می‌شد که شبیه‌سازی آن‌ها آسان بود.

۳. **مدارهای حذف شده (*Elided*):** با حذف کسری از گیت‌ها، شبیه‌سازی امکان‌پذیر می‌شد اما مقداری درهم‌تنیدگی حفظ می‌شد.

با نشان دادن تطابق نتایج این سه روش روی مدارهای ساده‌شونده، اعتبار روش حذف شده برای تخمین وفاداری مدارهای برتری تأیید شد.

## ۵ یافته‌ها و نتایج

### ۱.۵ دستیابی به برتری کوانتومی

یافته مرکزی، مقایسه مستقیم زمان اجرا بود:

□ پردازنده *Sycamore*: نمونه‌برداری از یک مدار در حدود ۲۰۰ ثانیه.

□ برآورد برای ابرکامپیوتر *Summit*: تقریباً ۱۰,۰۰۰ سال.

این شکاف زمانی، نمایش تجربی برتری کوانتومی بود.

## ۲.۵ عملکرد سخت‌افزار و وفاداری نهایی

این نتیجه بر اساس نرخ خطای بسیار پایین گیت‌ها، حتی در حالت همزمان (نشان‌دهنده هم‌شنوی *crosstalk* پایین) بود:

□ خطای گیت تک-کیوبیتی: میانگین 0.16%

□ خطای گیت دو-کیوبیتی: میانگین 0.62%

□ خطای بازخوانی (اندازه‌گیری): میانگین 3.8%

برای بزرگترین مدار (۵۳ کیوبیت، ۲۰ چرخه)، وفاداری نهایی  $F_{XEB}$  برابر با 0.00224 (حدود 0.2%) تخمین زده شد. این عدد، اگرچه کوچک است، اما به طور آماری بسیار بالاتر از صفر (0.1%) بود و ثابت کرد که خروجی دستگاه صرفاً نویز تصادفی نیست.

## ۳.۵ تأیید مدل خطای دیجیتال

یک یافته علمی کلیدی، تأیید مدل خطای دیجیتال بود. نتایج تجربی به خوبی با یک مدل نظری ساده پیش‌بینی شد. این مدل (که صرفاً حاصل ضرب احتمال عملکرد بدون خطای تمام گیت‌های تکی بود) نشان داد که خطاها در این سیستم پیچیده عمدتاً محلی و غیرهمبسته هستند. این یک فرض اساسی و حیاتی برای موفقیت کدهای تصحیح خطا در آینده است.

## ۶ نقاط ضعف و قوت

### ۱.۶ نقاط قوت

۱. دستاورد مهندسی سیستم: ساخت پردازنده *Sycamore* با ۵۳ کیوبیت و دستیابی به گیت‌های سریع و با وفاداری بالا (خطای 0.62% برای گیت دو کیوبیتی) که به صورت همزمان و با هم‌شنوی پایین کار می‌کنند.

۲. **نوآوری در راستی آزمایی:** توسعه معیار  $F_{XEB}$  و روش‌های هوشمندانه وصله‌ای و حذف شده برای تخمین زدن وفاداری در رژیمی که شبیه‌سازی کلاسیک آن غیرممکن است.

۳. **تأیید مدل خطا:** اثبات تجربی اینکه خطاهای سیستم محلی و غیرهمبسته هستند. این یک یافته علمی کلیدی و یک فرض حیاتی برای موفقیت تصحیح خطای کوانتومی در آینده است.

## ۲.۶ نقاط ضعف

۱. **محدودیت وظیفه محاسباتی:** برتری کوانتومی فقط برای یک مسئله بسیار خاص (نمونه‌برداری مدار تصادفی) نشان داده شده است که کاربرد عملی گسترده و فوری ندارد.

۲. **محدودیت نویز (عصر NISQ):** وفاداری نهایی سیستم (حدود 0.2%) نشان می‌دهد که پردازنده هنوز بسیار نویزی است. مقاله تأکید می‌کند که برای کاربردهای واقعی (مانند الگوریتم *Shor*)، هنوز به جهش‌های فنی برای کیوبیت‌های منطقی مقاوم در برابر خطا نیاز است.

۳. **هدف متحرک شبیه‌سازی:** برآورد ۱۰,۰۰۰ سال برای ابر کامپیوتر کلاسیک، مبتنی بر الگوریتم‌های شناخته‌شده در آن زمان بود و مقاله اذعان دارد که این یک هدف متحرک است که با پیشرفت الگوریتم‌های کلاسیک کاهش می‌یابد.

## ۷ ارزیابی شخصی

تولید یک پردازنده کوانتومی بسیار ارزشمند است اما وظیفه‌ای که برای ارزیابی در نظر گرفته شده به نظرم خیلی مناسب نیست، یعنی عملاً وظیفه شبیه‌سازی مدار است. طبیعی است که طراحی خود مدار سریع‌ترین راه است و در کمترین زمان نسبت به کامپیوتر کلاسیک پاسخ می‌دهد. مثل این است که ما به جای شبیه‌سازی بال هواپیما، خود بال را بسازیم و تست کنیم و بگیم این کار پردازش کمتری دارد. اما طبیعتاً یکی از مقالات مهم و بنیادین پردازنده‌های کوانتومی است.

مورد دیگر این که ادعا ۱۰ هزار سال زمان پردازش برای این شبیه‌سازی توسط *IBM* رد شد و توضیح داد که می‌توان با الگوریتم‌های بهتر این کار را در ۵.۲ روز انجام داد.