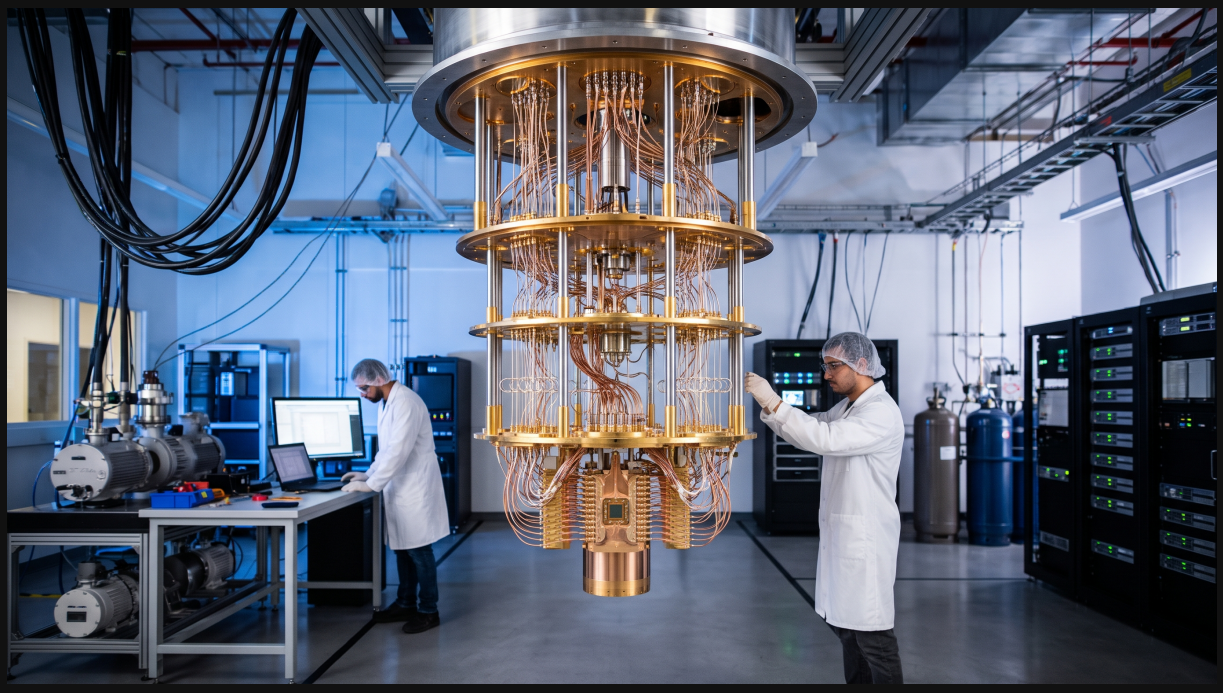
رازوارگی در دل سیلیکون و سرما

نویسنده: دکتر عبدالرضا عشقی‌پور

تاریخ انتشار: 2 Azar 2585 باستانی برابر با November 23, 2026 میلادی



کامپیوترهای کوانتومی چگونه کار می‌کنند و آینده‌ی جهان را چگونه تغییر می‌دهند؟

تصور کنید در ورودی یک هزارتوی (ماز) بسیار پیچیده و عظیم ایستاده‌اید که میلیون‌ها مسیر فرعی و بن‌بست دارد و تنها یک راه به خروجی می‌رسد. اگر از یک کامپیوتر معمولی «**حتی قوی‌ترین ابرکامپیوترهای امروزی جهان**» بخواهید راه خروج را پیدا کند، این ماشین با سرعتی سرسام‌آور شروع به آزمودن یک‌به‌یک مسیرها می‌کند. به سمت راست می‌رود، به بن‌بست می‌خورد، برمی‌گردد، مسیر بعدی را امتحان می‌کند و این کار را میلیون‌ها بار در ثانیه تکرار می‌کند تا سرانجام راه خروج را بیابد.

حالا تصور کنید به جای یک دونده‌ی سریع، بتوانید هم‌زمان هزارتوی مورد نظر را از بالا با ریختن یک سطل آب پر کنید؛ آب در یک لحظه در تمامی مسیرها جریان می‌یابد و راه خروج را می‌یابد. کامپیوتر کوانتومی (Quantum Computer) شباهت زیادی به این مثال دارد، هرچند واقعیت فیزیکی آن حتی از این تصویر هم شگفت‌انگیزتر و ظریف‌تر است.

کامپیوترهای کوانتومی نسخه‌ی «سریع‌تر» یا «کوچک‌تر» لپ‌تاپ‌ها و گوشی‌های هوشمند ما نیستند. همان‌طور که لامپ الکتریکی نتیجه‌ی بهبود و بزرگ‌تر کردن شمع نبود، بلکه از قوانین کاملاً متفاوتی از فیزیک (الکترومغناطیس) بهره می‌برد، کامپیوترهای کوانتومی نیز نوع کاملاً جدیدی از ماشین‌های محاسباتی هستند که بر پایه‌ی عجیب‌ترین و دقیق‌ترین نظریه‌ی تاریخ علم، یعنی **مکانیک کوانتومی**، کار می‌کنند. در این مقاله، قدم‌به‌قدم و بدون نیاز به فرمول‌های پیچیده‌ی ریاضی، به درون این ماشین‌های شگفت‌انگیز سفر می‌کنیم تا ببینیم دقیقاً چگونه کار می‌کنند، چرا ساختنشان

این‌قدر دشوار است و در سال‌های پیش رو چه انقلابی در پزشکی، امنیت، هوش مصنوعی و صنایع ایجاد خواهند کرد.

بخش اول:

از بیت‌های کلاسیک تا کیوبیت‌های کوانتومی

برای درک نحوه‌ی کار یک کامپیوتر کوانتومی، ابتدا باید بدانیم کامپیوترهای فعلی ما (که دانشمندان به آن‌ها «کامپیوترهای کلاسیک» می‌گویند) چگونه فکر می‌کنند.

در قلب هر گوشی هوشمند، لپ‌تاپ یا ابرکامپیوتر، میلیاردها کلید الکتریکی میکروسکوپی به نام **ترانزیستور** وجود دارد. هر ترانزیستور مانند یک کلید برق معمولی در دیوار اتاق شماست: یا جریان برق را عبور می‌دهد (روشن است) و یا مانع عبور آن می‌شود (خاموش است). در زبان کامپیوتر، به حالت روشن عدد ۱ و به حالت خاموش عدد ۰ نسبت داده می‌شود. به هر یک از این صفرها و یک‌ها، یک **بیت (Bit)** می‌گویند. تمام عکس‌هایی که می‌بینید، موسیقی‌هایی که می‌شنوید، پیام‌هایی که می‌فرستید و محاسبات پیچیده‌ای که هوش مصنوعی انجام می‌دهد، در نهایت به رشته‌های بسیار طولانی از همین صفرها و یک‌ها تبدیل می‌شوند.

اما وقتی قطعات الکترونیکی را روزبه‌روز کوچک‌تر می‌کنیم تا به ابعاد اتم‌ها و ذرات زیراتمی (مانند الکترون‌ها و فوتون‌های نور) می‌رسیم، قوانین فیزیک معمولی از کار می‌افتند. در این دنیای بسیار ریز، قوانین **فیزیک کوانتومی** حاکم هستند؛ قوانینی که در نگاه اول با عقل سلیم و تجربه‌ی روزمره‌ی ما در تضادند. کامپیوترهای کوانتومی به جای فرار از این قوانین عجیب، از آن‌ها به عنوان موتور پردازشی خود استفاده می‌کنند. واحد پایه در این کامپیوترها دیگر «بیت» نیست، بلکه **بیت کوانتومی** یا به اختصار **کیوبیت (Qubit)** نام دارد.

تفاوت اصلی بیت و کیوبیت از سه پدیده‌ی شگفت‌انگیز دنیای کوانتوم سرچشمه می‌گیرد: **برهم‌نهی**، **درهم‌تنیدگی** و **تداخل**. بیایید این سه غول علمی را به ساده‌ترین زبان ممکن بشناسیم.

برهم‌نهی (Superposition): سکه‌ای که در هوا می‌چرخد

یک سکه‌ی فلزی را روی میز تصور کنید. این سکه یا «شیر» است یا «خط»؛ دقیقاً مانند یک بیت معمولی که یا ۰ است یا ۱. اما اگر سکه را به روی میز به چرخش دربیاوریم تا دور خود بچرخد چطور؟ تا زمانی که سکه در حال چرخش است و دست خود را روی آن نگذاشته‌اید، سکه نه صرفاً شیر است و نه صرفاً خط؛ بلکه در ترکیبی از هر دو وضعیت قرار دارد.

در فیزیک کوانتوم به این حالت **برهم‌نهی** می‌گویند. یک کیوبیت (که می‌تواند جهت چرخش یک الکترون یا قطبش یک ذره‌ی نور باشد) می‌تواند هم‌زمان ترکیبی از ۰ و ۱ باشد! البته به محض اینکه بخواهیم کیوبیت را «اندازه‌گیری» کنیم یا به آن نگاه کنیم (درست مثل گرفتن سکه‌ی در حال چرخش با دست)، کیوبیت از حالت برهم‌نهی خارج می‌شود (به اصطلاح فرو می‌پاشد) و یکی از دو مقدار قطعی ۰ یا ۱ را نشان می‌دهد.

اهمیت برهم‌نهی زمانی مشخص می‌شود که تعداد کیوبیت‌ها را کنار هم بگذاریم:

اگر شما **۲ بیت** معمولی داشته باشید، آن‌ها می‌توانند ۴ حالت ممکن بسازند (00, 01, 10, 11)، اما در هر لحظه‌ی زمانی فقط و فقط **یکی** از این حالت‌ها در حافظه وجود دارد.

اگر **۲ کیوبیت** در حالت برهم‌نهی داشته باشید، آن‌ها می‌توانند هر **۴ حالت را به طور هم‌زمان** در خود نگه دارند!

با **۳ کیوبیت**، ۸ حالت هم‌زمان؛ با **۱۰ کیوبیت**، ۱۰۲۴ حالت هم‌زمان؛ و زمانی که به **۳۰۰ کیوبیت** خالص و بدون خطا برسیم، تعداد حالت‌هایی که این سیستم می‌تواند هم‌زمان در خود بازنمایی کند، از تعداد کل اتم‌های شناخته‌شده در جهان هستی بیشتر می‌شود! به این رشد شگفت‌انگیز، رشد نمایی (Exponential Growth) می‌گویند.

درهم‌تنیدگی (Entanglement): ارتباط اسرارآمیز از راه دور

اگر برهم‌نهی موتور کامپیوتر کوانتومی باشد، **درهم‌تنیدگی** جعبه‌دنده و شبکه‌ی ارتباطی فوق‌پیشرفته‌ی آن است. آلبرت اینشتین این پدیده را آن‌قدر عجیب می‌دانست که به آن لقب «کنش شبح‌وار از راه دور» داده بود.

دو کیوبیت را می‌توان در آزمایشگاه طوری به هم پیوند زد (درهم‌تنیده کرد) که سرنوشتشان به یکدیگر گره بخورد. فرض کنید دو سکه‌ی جادویی درهم‌تنیده دارید؛ یکی را در تهران نگه می‌دارید و دیگری را به آن سوی کهکشان می‌فرستید و هر دو را هم‌زمان به چرخش درمی‌آورید. به محض اینکه سکه‌ی تهران را متوقف کنید و ببینید «شیر» آمده است، در همان لحظه (بدون هیچ تأخیر زمانی) مطمئن می‌شوید که سکه‌ی آن سوی کهکشان روی «خط» ایستاده است!

در کامپیوتر کوانتومی، درهم‌تنیدگی باعث می‌شود کیوبیت‌ها به صورت جزیره‌های جدا از هم کار نکنند. وقتی ما وضعیت یک کیوبیت را تغییر می‌دهیم، این تغییر فوراً بر وضعیت همه‌ی کیوبیت‌های درهم‌تنیده با آن اثر می‌گذارد. این ویژگی به پردازنده‌ی کوانتومی اجازه می‌دهد به جای دست‌کاری تک‌تک داده‌ها، کل یک فضای عظیم محاسباتی را با یک عملیات هماهنگ تغییر دهد.

تداخل کوانتومی (Quantum Interference): هنر حذف پاسخ‌های غلط

اینجا دقیقاً همان نقطه‌ای است که بسیاری از توضیحات عامیانه درباره‌ی کامپیوتر کوانتومی دچار سوءتفاهم می‌شوند. شاید بپرسید: «خب، اگر کیوبیت‌ها هم‌زمان میلیون‌ها جواب ممکن را در خود دارند، ولی به محض نگاه کردن به آن‌ها فقط یک جواب تصادفی بیرون می‌آید، چه فایده‌ای دارد؟!»

پاسخ در سومین راز کوانتوم نهفته است: **تداخل**. در فیزیک کوانتوم، ذرات (و کیوبیت‌ها) رفتاری شبیه به **امواج** دارند؛ درست مانند امواج روی سطح آب یک حوض یا امواج صوتی. وقتی دو موج در آب به هم می‌رسند، اگر قله‌ی یک موج روی قله‌ی موج دیگر بیفتد، یک موج بسیار بلندتر می‌سازند (**تداخل سازنده**). اما اگر قله‌ی یک موج روی دره‌ی موج دیگر بیفتد، همدیگر را خنثی و نابود می‌کنند و آب صاف می‌شود (**تداخل ویرانگر**). هدفون‌های حذف نویز (Noise-Canceling) دقیقاً از همین روش برای خاموش کردن صدای محیط در گوش شما استفاده می‌کنند.

یک برنامه‌نویس یا الگوریتم کوانتومی، محاسبات را مانند یک رهبر ارکستر امواج طراحی می‌کند. الگوریتم کوانتومی امواج کیوبیت‌ها را طوری هدایت می‌کند که مسیرهای منتهی به **پاسخ‌های غلط** با هم تداخل ویرانگر داشته باشند و

یکدیگر را حذف کنند، در حالی که مسیرهای منتهی به **پاسخ درست** یکدیگر را تقویت کنند (تداخل سازنده). در پایان محاسبه، وقتی کامپیوتر کیوبیت‌ها را اندازه‌گیری می‌کند، احتمال بیرون آمدن پاسخ صحیح نزدیک به صد درصد است!

کامپیوتر کلاسیک	کامپیوتر کوانتومی	ویژگی
بیت (فقط ۰ یا ۱ در هر لحظه)	کیوبیت (۰، ۱ یا برهم‌نهی هم‌زمان هر دو)	واحد پایه اطلاعات
ترانزیستورهای سیلیکونی میکروسکوپی	مدارهای ابررسانا، یون‌های به دام افتاده، فوتون‌ها یا اتم‌های خنثی	سخت‌افزار اصلی
بررسی ترتیبی یا موازی محدود گزینه‌ها	بهره‌گیری از برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی و تداخل امواج احتمالات	شیوه پردازش مسائل پیچیده
دمای اتاق (با فن یا خنک‌کننده مایع)	اغلب نزدیک به صفر مطلق (سردتر از فضای میان‌ستاره‌ای) یا خلأ بالا	دمای کاری معمول
کارهای روزمره، وب‌گردی، ویدیو، پردازش متن و دیتابیس‌های متداول	شبیه‌سازی مولکولی، رمزگشایی، بهینه‌سازی‌های کلان و ریاضیات خاص	کاربرد بهینه

بخش دوم:

کالبدشکافی یک کامپیوتر کوانتومی؛ چلچراغ طلایی چیست؟

اگر در اینترنت تصویر یک کامپیوتر کوانتومی (مثلاً ساخت شرکت‌های IBM یا Google) را جستجو کنید، یک استوانه‌ی طبقه‌طبقه‌ی بسیار زیبا و درخشان از جنس طلا و مس می‌بینید که از سقف آویزان است و شباهت زیادی به یک چلچراغ سلطنتی یا ماشین‌های علمی‌تخیلی دارد. جالب است بدانید آن چلچراغ بزرگ و طلایی، خودِ پردازنده‌ی کوانتومی نیست! تمام آن لوله‌ها، سیم‌پیچ‌ها و صفحات طلایی، در واقع یک **یخچال فوق‌پیشرفته** (به نام یخچال رقیق‌ساز یا Dilution Refrigerator) هستند. خودِ تراشه‌ی کوانتومی، قطعه‌ای کوچک به اندازه‌ی یک ناخن یا سکه است که در پایین‌ترین نقطه‌ی این چلچراغ نصب شده است.

چرا به چنین یخچال غول‌پیکری نیاز داریم؟ به خاطر بزرگ‌ترین دشمن محاسبات کوانتومی: **ناهمدوسی** (**Decoherence**) یا فروپاشی حالت کوانتومی.

کیوبیت‌ها موجودات بی‌نهایت حساس و خجالتی هستند. کوچک‌ترین لرزش محیطی، ناچیزترین تغییر دما، یک موج ضعیف وای‌فای یا حتی تابش پرتوهای کیهانی از فضا می‌تواند به کیوبیت برخورد کند. اگر حتی یک مولکول هوا یا یک ذره گرما به کیوبیت بخورد، کیوبیت تصور می‌کند «اندازه‌گیری» شده است؛ در نتیجه حالت برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی فوراً از بین می‌رود و تمام محاسبات به خطا و نویز تبدیل می‌شود. (مثل اینکه کسی وسط چرخش سکه، محکم به میز بکوبد).

برای محافظت از کیوبیت‌ها (به‌ویژه در رایج‌ترین نوع آن‌ها یعنی کیوبیت‌های ابررسانا)، دانشمندان تراشه را در یک محفظه‌ی خلأ قرار می‌دهند و دمای آن را به حدود **۱۵ میلی‌کلوین** (یعنی حدود منفی ۲۷۳.۱۳ درجه‌ی سانتی‌گراد) می‌رسانند. برای درک این عدد کافی است بدانید فضای تاریک و یخ‌زده‌ی میان ستارگان و کهکشان‌ها حدود ۲.۷ کلوین دما دارد؛ بنابراین درون یک کامپیوتر کوانتومی **بیش از صد برابر سردتر از اعماق فضا** است! در این دما، جریان الکتریکی بدون هیچ مقاومتی در مدارهای ریزِ ابررسانا حرکت می‌کند و دانشمندان با فرستادن پالس‌های بسیار دقیق مایکروویو از طریق همان لوله‌های ظریف چلچراغ، با کیوبیت‌ها صحبت می‌کنند، آن‌ها را در حالت برهم‌نهی قرار می‌دهند و نتیجه را می‌خوانند.

روش‌های مختلف ساخت کیوبیت (رقابت سخت‌افزاری)

البته استفاده از مدارهای ابررسانا تنها راه ساخت کامپیوتر کوانتومی نیست. امروزه همانند دهه‌ی ۱۹۴۰ میلادی که هنوز مشخص نبود کامپیوترهای آینده با لامپ خلاء ساخته می‌شوند یا رله‌های مکانیکی یا ترانزیستور، رقابت جذابی میان چند فناوری مختلف جریان دارد:

کیوبیت‌های ابررسانا (Superconducting Qubits): فناوری محبوب غول‌هایی مثل گوگل و آی‌بی‌ام. سرعت اجرای عملیات در آن‌ها بسیار بالاست و با فناوری ساخت تراشه‌های امروزی سازگاری خوبی دارند، اما به سرمای نزدیک به صفر مطلق نیاز دارند و عمر حالت کوانتومی‌شان بسیار کوتاه (در حد چند صد میکروثانیه) است.

یون‌های به دام افتاده (Trapped Ions): شرکت‌هایی مانند IonQ و Quantinuum به جای ساخت مدار مصنوعی، از خودِ طبیعت استفاده می‌کنند. آن‌ها اتم‌های باردار (یون‌ها) را در خلأ به کمک میدان‌های الکترومغناطیسی و پرتوهای لیزر در هوا معلق نگه می‌دارند. از آنجا که همه‌ی اتم‌های یک عنصر در طبیعت کاملاً یکسان و بی‌نقص هستند، این کیوبیت‌ها دقت بسیار بالا و خطای بسیار کمی دارند، هرچند سرعت عملیاتشان کمی کندتر از نوع ابررساناست و افزایش تعدادشان به میلیون‌ها کیوبیت چالش‌برانگیز است.

اتم‌های خنثی (Neutral Atoms): یکی از ستارگان نوظهور سال‌های اخیر (با پیشگامی شرکت‌هایی مثل QuEra و Pasqal). در این روش، صدها یا هزاران اتم بدون بار الکتریکی به کمک «انبرک‌های نوری» (پرتوهای متمرکز لیزر) در آرایش‌های دوبعدی یا سه‌بعدی چیده می‌شوند و به راحتی جابه‌جا می‌گردند. این روش پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای مقیاس‌پذیری و افزایش تعداد کیوبیت‌ها نشان داده است.

کیوبیت‌های فوتونی (Photonic Qubits): شرکت‌هایی مثل PsiQuantum از ذرات نور (فوتون‌ها) درون تراشه‌های نوری استفاده می‌کنند. مزیت بزرگ نور این است که به سرمای شدید در تمام بخش‌ها حساس نیست و می‌توان کیوبیت‌های نوری را از طریق فیبر نوری به هم شبکه کرد تا یک مرکز داده‌ی کوانتومی ساخت.

کیوبیت‌های توپولوژیک و اسپین سیلیکونی: رویکردهای جسورانه‌تری (که شرکت‌هایی مانند مایکروسافت و اینتل دنبال می‌کنند) که هدفشان ساخت کیوبیت‌هایی با پایداری ذاتی در برابر نویز یا ساخت کیوبیت‌ها روی همان خطوط تولید کارخانه‌های تراشه‌سازی فعلی است.

بخش سوم:

کامپیوتر کوانتومی چه کارهایی را انجام می‌دهد (و چه کارهایی را نه)؟

یک باور اشتباه رایج این است که ده سال دیگر همه‌ی ما لپ‌تاپ‌ها و پلی‌استیشن‌های خود را دور می‌اندازیم و کامپیوتر کوانتومی می‌خریم تا بازی‌ها را با گرافیک بهتری اجرا کنیم یا فایل‌های اکسل و ویدیوهای یوتیوب را سریع‌تر باز کنیم! این اتفاق نخواهد افتاد. کامپیوتر کوانتومی برای جمع زدن اعداد معمولی، پخش فیلم یا اجرای سیستم‌عامل ویندوز نه‌تنها بهتر از کامپیوتر فعلی شما نیست، بلکه بسیار کندتر و پرهزینه‌تر است.

کامپیوترهای کوانتومی برای دسته‌ی بسیار خاصی از مسائل طراحی شده‌اند که در آن‌ها تعداد حالات و متغیرها به شکل انفجاری زیاد می‌شود؛ مسائلی که حل کردنشان برای بزرگ‌ترین ابرکامپیوترهای کلاسیک جهان هزاران یا میلیون‌ها

سال طول می‌کشد. مهم‌ترین میدان‌های درخشش این فناوری عبارت‌اند از:

انقلاب در کشف دارو، پزشکی و علم مواد

ریچارد فاینمن، فیزیک‌دان بزرگ و برنده‌ی جایزه‌ی نوبل که در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی ایده‌ی اولیه‌ی کامپیوتر کوانتومی را مطرح کرد، جمله‌ی مشهوری دارد: *«طبیعت کلاسیک نیست، لعنتی! و اگر می‌خواهید شبیه‌سازی دقیقی از طبیعت بسازید، بهتر است آن را به شکل مکانیک کوانتومی بسازید.»*

تمام واکنش‌های شیمیایی، نحوه‌ی تا خوردن پروتئین‌ها در بدن انسان و اثر یک مولکول دارو بر ویروس یا سلول سرطانی، در بنیادی‌ترین سطح خود فرآیندهایی کوانتومی هستند (برهم‌کنش الکترون‌ها با یکدیگر). کامپیوترهای کلاسیک حتی از شبیه‌سازی دقیق یک مولکول نسبتاً کوچک مثل کافئین (با تنها ۲۴ اتم) عاجزند، زیرا نگه‌داشتن وضعیت کوانتومی همه‌ی الکترون‌های آن به حافظه‌ای فراتر از توان سیلیکون نیاز دارد. به همین دلیل، شرکت‌های داروسازی امروزه مجبورند سال‌ها در آزمایشگاه‌های واقعی هزاران ترکیب شیمیایی را با آزمون‌وخطا بسنجند.

یک کامپیوتر کوانتومی قدرتمند می‌تواند یک مولکول پیچیده را با دقت اتمی در محیط دیجیتال شبیه‌سازی کند. نتیجه چه خواهد بود؟

طراحی داروهای هدفمند: کشف درمان برای بیماری‌های پیچیده‌ای مانند آلزایمر، پارکینسون و انواع سرطان در کسری از زمان و هزینه‌ی فعلی.

کودهای شیمیایی پاک (تثبیت نیتروژن): امروزه تولید آمونیاک برای کودهای کشاورزی (فرآیند هابر–بوش) حدود ۱ تا ۲ درصد کل انرژی جهان را مصرف می‌کند و گاز گلخانه‌ای عظیمی تولید می‌کند، در حالی که باکتری‌های ریشه‌ی گیاهان همین کار را در دمای محیط به کمک آنزیمی به نام «نیتروژناز» انجام می‌دهند. شبیه‌سازی کوانتومی این آنزیم می‌تواند راز تولید کود پاک و ارزان را فاش کند.

باتری‌های نسل جدید و ابررساناهای دمای اتاق: طراحی مواد جدید برای باتری‌های خودروهای برقی که ده برابر بیشتر شارژ نگه می‌دارند، یا کشف موادی که برق را بدون هیچ اتلافی در خطوط انتقال جابه‌جا می‌کنند.

زلزله در امنیت سایبری و رمزنگاری

هر بار که شما رمز کارت بانکی خود را در اینترنت وارد می‌کنید یا پیامی در پیام‌رسان‌های امن می‌فرستید، اطلاعات شما با قفل‌های ریاضی بسیار پیچیده‌ای (مانند الگوریتم RSA) محافظت می‌شود. امنیت کل اینترنت، بانکداری جهانی، اسرار نظامی و حتی ارزهای دیجیتال بر یک اصل ساده استوار است: ضرب کردن دو عدد اول بسیار بزرگ در هم کار ساده‌ای است، اما پیدا کردن آن دو عدد اول از روی حاصل‌ضربشان (تجزیه به عوامل اول برای اعدادی با صدها رقم) برای کامپیوترهای معمولی میلیاردها سال زمان می‌برد.

در سال ۱۹۹۴، ریاضی‌دانی به نام «پیتر شور» الگوریتمی نوشت (الگوریتم شور) و ثابت کرد اگر روزی یک کامپیوتر کوانتومی بزرگ و بدون خطا ساخته شود، می‌تواند با استفاده از تداخل کوانتومی این قفل‌های ریاضی را نه در یک

میلیارد سال، بلکه در عرض **چند ساعت یا چند دقیقه** بشکند!

البته کامپیوترهای کوانتومی فعلی هنوز کیوبیت‌های پایدار کافی برای شکستن این رمزها را ندارند، اما این تهدید آن‌قدر جدی است که استراتژی خطرناکی به نام «**الان برداشت کن، بعداً رمزگشایی کن**» (**Harvest Now, Decrypt Later**) شکل گرفته است؛ یعنی هکرها یا دولت‌ها ممکن است اطلاعات رمزگذاری‌شده‌ی فوق‌محرمانه‌ی امروز را بدزدند و ذخیره کنند تا ده سال دیگر با کامپیوتر کوانتومی قفلشان را باز کنند. خبر خوب این است که دانشمندان بیکار ننشسته‌اند و همین حالا نسل جدیدی از قفل‌های ریاضی به نام **رمزنگاری پساکوانتومی** (**Post-Quantum Cryptography**) ابداع و استانداردسازی شده است که حتی کامپیوترهای کوانتومی هم قادر به شکستن آن‌ها نیستند و شرکت‌های فناوری در حال کوچ دادن کل اینترنت به این قفل‌های جدید هستند. علاوه بر این، «ارتباطات کوانتومی» امکان ارسال پیام‌هایی را فراهم می‌کند که به حکم قوانین فیزیک، هرگونه شنود در بین راه بلافاصله افشا می‌شود.

بهینه‌سازی‌های کلان و لجستیک

فرض کنید یک شرکت هواپیمایی یا پست بین‌المللی دارید که باید هزاران بسته را با صدها هواپیما و کامیون در هزاران مسیر جابه‌جا کند، در حالی که شرایط آب‌وهوا، قیمت سوخت و ترافیک مدام تغییر می‌کند. تعداد ترکیب‌های ممکن برای چیدن این برنامه به سرعت از میلیاردها میلیارد فراتر می‌رود. الگوریتم‌های کوانتومی و هیبریدی (ترکیب کوانتوم و کلاسیک) می‌توانند در بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین جهانی، مدیریت شبکه‌های توزیع برق هوشمند، مسیریابی ترافیک کلان‌شهرها و مدیریت ریسک در بازارهای مالی، راه‌حل‌هایی بیابند که سالانه میلیاردها دلار صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش مصرف سوخت به همراه دارد.

هم‌افزایی با هوش مصنوعی (Quantum AI)

هوش مصنوعی مدرن و مدل‌های زبانی بزرگ با بلعیدن برق سرسام‌آور و آموزش دیدن روی کوهی از داده‌ها کار می‌کنند. پژوهشگران در حال بررسی روش‌های «یادگیری ماشین کوانتومی» هستند که در آن پردازنده‌های کوانتومی بتوانند الگوهای پنهان در داده‌های پیچیده (به‌ویژه داده‌های علمی، ژنتیکی و کوانتومی) را با داده‌های بسیار کمتر و سرعت بالاتر استخراج کنند و به عنوان یک کمک‌پردازنده (شتاب‌دهنده) در کنار پردازنده‌های گرافیکی (GPU) قرار گیرند.

بخش پایانی:

چالش بزرگ و آینده‌ی سخت‌افزارهای کوانتومی

اگر کامپیوترهای کوانتومی این‌قدر جادویی هستند، چرا همین امروز تمام داروها کشف نشده‌اند و همه از آن‌ها استفاده نمی‌کنند؟ پاسخ در یک عبارت کلیدی خلاصه می‌شود:

تصحیح خطای کوانتومی (Quantum Error Correction).

تراشه‌ی گوشی موبایل شما به قدری قابل اعتماد است که شاید در طول چندین سال کار مداوم و انجام میلیاردها میلیارد محاسبه، حتی یک بیت را هم اشتباه نزند. اما در بهترین پردازنده‌های کوانتومی امروزی، از هر هزار یا ده هزار عملیات روی کیوبیت‌ها، حدود یک عملیات با خطا مواجه می‌شود! برای اجرای یک الگوریتم بزرگ علمی که به میلیاردها عملیات پیاپی نیاز دارد، این میزان خطا فاجعه‌بار است و خروجی را به نویز خالص تبدیل می‌کند.

در کامپیوترهای کلاسیک، حل کردن مشکل خطا بسیار آسان است: از هر بیت سه کپی می‌گیرند (مثلاً به جای 0 می‌نویسند 000). اگر یکی از بیت‌ها بر اثر نویز خراب و تبدیل به 1 شود (010)، کامپیوتر رأی‌گیری می‌کند و می‌فهمد مقدار اصلی همان 0 بوده است. اما در دنیای کوانتوم یک قانون سرسختانه به نام **قضیه‌ی تکثیرناپذیری (No-Cloning Theorem)** وجود دارد که می‌گوید: *کپی کردنِ دقیقِ یک حالت کوانتومی ناشناخته از نظر فیزیکی غیرممکن است!* علاوه‌بر این، اگر بخواهیم کیوبیت‌ها را وسط محاسبه نگاه کنیم تا ببینیم خراب شده‌اند یا نه، برهم‌نهی از بین می‌رود و کل محاسبه نابود می‌شود!

دانشمندان برای دور زدن این بن‌بست ظاهراً غیرممکن، شاهکاری ریاضی خلق کرده‌اند: آن‌ها اطلاعات **یک «کیوبیت منطقی» (Logical Qubit)** سالم و بدون خطا را در میان شبکه‌ای درهم‌تنیده از ده‌ها یا صدها **«کیوبیت فیزیکی» (Physical Qubit)** پخش می‌کنند. کیوبیت‌های کمکی در حاشیه‌ی این شبکه مدام بدون اینکه به خودِ اطلاعات اصلی نگاه کنند، «نشانه‌های خطا» را چک می‌کنند (مثل فهمیدن اینکه جمع دو عدد زوج است یا فرد، بدون دانستن خود اعداد) و خطاها را در لحظه خنثی می‌کنند.

کجا ایستاده‌ایم و به کجا می‌رویم؟ (چشم‌انداز سال‌های پیش رو)

تا همین چند سال پیش، صنعت کوانتوم در دورانی به سر می‌برد که به آن عصر **NISQ** (مخفف کامپیوترهای کوانتومی با مقیاس متوسط و پرنویز) می‌گفتند؛ ماشین‌هایی با ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیوبیت فیزیکی که برای آزمایش‌های پژوهشی عالی بودند، اما به دلیل نداشتن تصحیح خطای کامل، کاربرد تجاری گسترده‌ای نداشتند.

اما در سال‌های اخیر (به‌ویژه بین ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۶)، صنعت سخت‌افزار کوانتومی وارد یک نقطه‌ی عطف تاریخی شده است:

گذار از کیوبیت‌های فیزیکیِ پرخطا به کیوبیت‌های منطقی و مقاوم در برابر خطا (Fault-Tolerant Quantum Computing). آزمایشگاه‌ها و شرکت‌های پیشرو موفق شده‌اند نشان دهند که با افزودن کیوبیت‌های فیزیکی بیشتر به یک کیوبیت منطقی، نرخ خطا نه افزایش، بلکه به صورت نمایی کاهش می‌یابد (عبور از آستانه‌ی تصحیح خطا).

بر اساس نقشه‌ی راه مراکز پژوهشی و غول‌های فناوری، آینده‌ی این سخت‌افزار در سه محور اصلی رقم خواهد خورد:

معماری ماژولار و شبکه‌های کوانتومی (۲۰۲۶ تا ۲۰۳۰): جای دادن صدها هزار یا میلیون‌ها کیوبیت روی یک تراشه‌ی

واحد تقریباً غیرممکن است (چون جا برای سیم‌کشی و خنک‌سازی آن وجود ندارد). آینده‌ی سخت‌افزار کوانتومی **ماژولار** است؛ یعنی چندین پردازنده‌ی کوانتومی کوچک‌تر ساخته می‌شوند و از طریق لینک‌های کوانتومی و کابل‌های نوریِ ویژه به یکدیگر متصل می‌شوند تا به عنوان یک ابرپردازنده‌ی واحد کار کنند.

ابرکامپیوترهای هیبریدی (هم‌زیستی CPU، GPU و QPU): کامپیوتر کوانتومی جایگزین کامپیوتر کلاسیک نخواهد شد، بلکه مکمل آن می‌شود. در مراکز داده‌ی آینده (Data Centers)، پردازنده‌های مرکزی (CPU)، پردازنده‌های گرافیکی هوش مصنوعی (GPU) و واحدهای پردازش کوانتومی (QPU) در کنار هم و با سرعت بالا کار خواهند کرد. کامپیوتر کلاسیک ۹۹ درصد بارهای کاری، آماده‌سازی داده‌ها و رابط کاربری را انجام می‌دهد و دقیقاً همان ۱ درصد از هسته‌ی ریاضی یا مولکولی غیرقابل‌حل را به پردازنده‌ی کوانتومی می‌سپارد و پاسخ را تحویل می‌گیرد. شما به عنوان یک کاربر، پزشک یا مهندس، نیازی به خرید یخچال کوانتومی ندارید؛ بلکه از طریق **فضای ابری (Cloud)** و با لپ‌تاپ معمولی خود به این قدرت محاسباتی متصل می‌شوید.

عصر بلوغ و مقیاس بزرگ (دهه‌ی ۲۰۳۰ و پس از آن): با رسیدن تعداد کیوبیت‌های منطقی (بدون خطا) به صدها و سپس هزاران واحد، دوران حل مسائل بزرگ صنعتی فرا می‌رسد. در این مرحله، طراحی مواد با ویژگی‌های سفارشی در کامپیوتر پیش از ساخت در کارخانه به یک استاندارد صنعتی تبدیل می‌شود. همچنین پژوهش‌ها بر روی کوچک‌سازی تجهیزات کنترلی، جایگزینی کابل‌های حجیم با تراشه‌های کنترلی سرد (Cryo-CMOS) و تلاش برای یافتن کیوبیت‌هایی که در دماهای بالاتر کار کنند، سخت‌افزارهای کوانتومی را از آزمایشگاه‌های غول‌پیکر به قفسه‌های استاندارد مراکز داده منتقل خواهد کرد.

در طول تاریخ تمدن بشر، هر بار که توانسته‌ایم ابزار جدیدی برای محاسبه و درک اطلاعات بسازیم — از چرتکه و ماشین‌های مکانیکی گرفته تا ترانزیستور و ریزپردازنده‌ها — جهان ما به شکلی برگشت‌ناپذیر دگرگون شده است. کامپیوتر کوانتومی گام بعدی در این سفر بزرگ است؛ ابزاری که در آن انسان به جای جنگیدن با قوانین عجیب و غریب دنیای اتم‌ها، زبان اصلی خودِ طبیعت را به کار گرفته تا عمیق‌ترین اسرار طبیعت را رمزگشایی کند. ما هنوز در فصل‌های آغازین این کتاب شگفت‌انگیز هستیم، جایی شبیه به دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی برای کامپیوترهای کلاسیک، اما افقی که در برابر دانش بشری گشوده شده، نویدبخش دنیایی است که در آن بسیاری از «غیرممکن‌های» علمی امروز، به راه‌حل‌های روزمره‌ی فردا تبدیل خواهند شد.