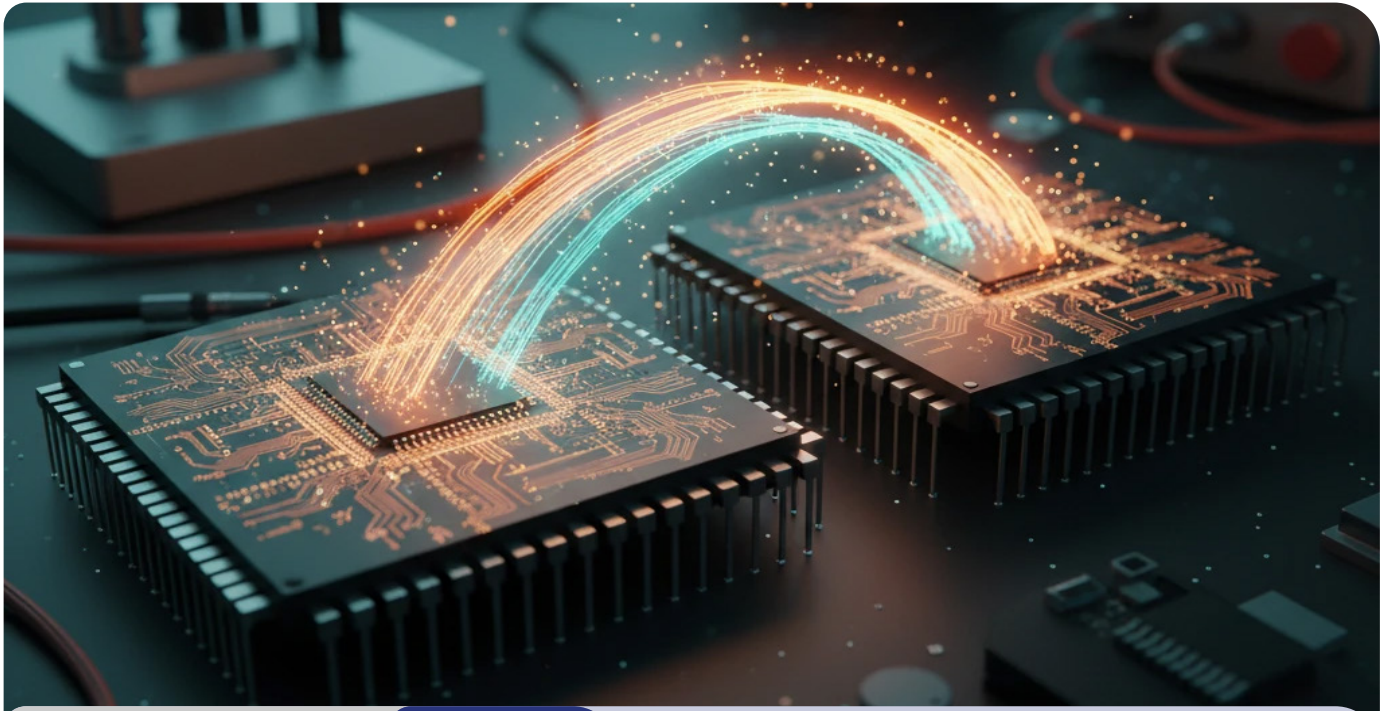




سیده فاطمه فرحناک فر

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی
فناور اطلاعات دانشگاه تهران
fatemeh.farahnak@ut.ac.ir



انقلاب کیویت‌ها: ابر قدرت بعدی دنیای فناوری

۹ دقیقه



محمد جواد پاپی زاده
دانشجوی کارشناسی ارشد
مهندسی و علم کامپیوتر گرایش
هوش مصنوعی دانشگاه تهران
mj.papizadeh@ut.ac.ir

فیزیک کلاسیک (دنیایی که با چشم می‌بینیم)، همه چیز با قطعیت پیش‌بینی‌پذیر است. اگر شما توپی را پرتاب کنید و سرعت و زاویه‌اش را بدانید، دقیقاً می‌دانید کجا فرود می‌آید. این دنیای مکانیک نیوتنی است که بر اساس قوانین قطعی حرکت می‌کند.

اما اگر همین توپ را تا اندازه‌ای کوچک کنیم، تمام معادلات روزمره فرو می‌ریزند. در آن مقیاس ریز، ذرات دیگر فقط «ذره» نیستند؛ آن‌ها رفتاری موج‌گونه دارند و آینده‌شان نه با قطعیت، بلکه با «احتمالات» توصیف می‌شود. مکانیک کوانتومی علمی است که برای توضیح همین رفتار گیج‌کننده اما واقعی پدید آمده است و اکنون مهندسان در تلاش برای پیش‌بینی رفتار این ذرات برای ساخت تکنولوژی‌های آینده هستند.

کامپیوترهای کلاسیک، چه لپ‌تاپ‌های معمولی و چه ابررایانه‌های فعلی، در حل برخی از مسائل خاص (مانند فاکتورگیری اعداد بزرگ یا شبیه‌سازی سیستم‌های مولکولی پیچیده) به دلیل محدودیت در تعداد محاسبات همزمان، دچار مشکل می‌شوند. این محدودیت‌ها ناشی از ساختار پایه‌ای محاسباتی آن‌هاست که بر پایه منطق دودویی استوار است. انقلاب کوانتومی وعده می‌دهد که با استفاده از فیزیک طبیعت در سطح زیراتمی، این محدودیت‌ها را شکسته و سرعت محاسبات را به شکل نمایی افزایش دهد.



امروزه ساخت کامپیوترهایی که بتوانند تنها در چند دقیقه مسائلی را حل کنند که برای ابررایانه‌های فعلی هزاران سال طول می‌کشد، دیگر یک رویا نیست. ما در آستانه گذار از دنیای سنتی «صفر و یک» به دنیای شگفت‌انگیز «کوانتوم» هستیم. در حالی که کامپیوترهای امروزی دنیا را خطی و قطعی می‌بینند، فناوری کوانتومی با تکیه بر قوانین شگفت‌انگیز طبیعت در مقیاس اتمی، پتانسیل آن را دارد که همه چیز را از امنیت اینترنت و طراحی داروها گرفته تا هوش مصنوعی دگرگون سازد. این مقاله به بررسی این جهان پیچیده و جذاب می‌پردازد و بدون ورود به معادلات پیچیده ریاضی، نشان می‌دهد که چگونه مفاهیم انتزاعی فیزیک در حال تبدیل شدن به قدرتمندترین ابزار مهندسی قرن حاضر هستند.

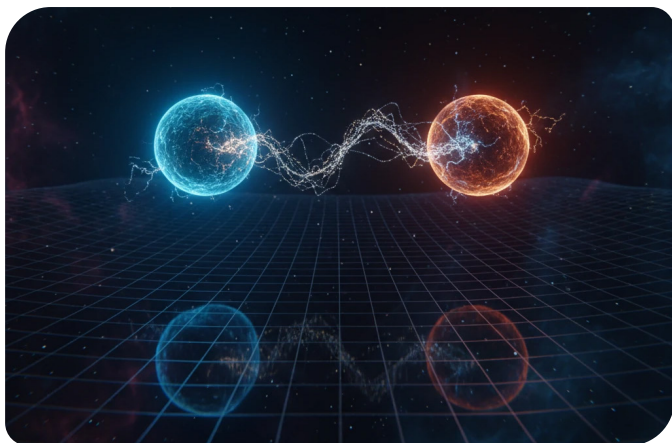
مقدمه: عبور از مرزهای فیزیک کلاسیک

وقتی واژه «کوانتوم» به گوش می‌رسد، معمولاً ذهن ما به سمت مفاهیم پیچیده و فیلم‌های علمی-تخیلی می‌رود. اما دنیای کوانتوم واقعیتی بنیادی است؛ زیربنای جهانی که در آن زندگی می‌کنیم. در

ارتباطات نامرئی: جادوی درهم‌تنیدگی

یکی دیگر از ستون‌های این فناوری، پدیده‌ای به نام «درهم‌تنیدگی» (Entanglement) است؛ پدیده‌ای که اینشتین آن را «کنش شبح‌وار از راه دور» نامیده است.

درهم‌تنیدگی زمانی رخ می‌دهد که دو یا چند کیوبیت به‌گونه‌ای به هم مرتبط شوند که حالت کوانتومی هر یک، کاملاً وابسته به دیگری باشد، حتی اگر فاصله زیادی از یکدیگر داشته باشند.



تصور کنید دو ذره دوقلو دارید که به هم متصل شده‌اند. اگر یکی از آن‌ها را به کره ماه ببرید و دیگری را در زمین نگه دارید، به محض اینکه تغییری در اسپین (جهت چرخش) ذره زمینی ایجاد کنید (یا آن را اندازه‌گیری کنید)، حالت ذره‌ای که در ماه است بلافاصله و در همان لحظه واکنش نشان می‌دهد و اسپین آن نیز تعیین می‌شود. این ارتباط سریع‌تر از نور رخ می‌دهد و نیازی به تبادل فیزیکی یا پیام الکترومغناطیسی ندارد.

کاربردها

این ویژگی عجیب، پایه و اساس «اینترنت کوانتومی» و روش‌های جدید رمزنگاری (مانند توزیع کلید کوانتومی یا QKD) است. در این شبکه‌ها، هرگونه تلاش برای استراق سمع توسط یک ناظر خارجی، بلافاصله برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی بین کیوبیت‌های فرستنده و گیرنده را از بین برده و حضور جاسوس را آشکار می‌سازد، زیرا اندازه‌گیری کوانتومی اجتناب‌ناپذیر است.

تله‌پورت کوانتومی: واقعیتی فراتر از تخیل

شاید با شنیدن واژه «تله‌پورت» یاد فیلم‌های علمی‌تخیلی و غیب‌شدن اجسام بیفتید، اما در دنیای کوانتوم، این واژه معنای متفاوتی دارد: انتقال اطلاعات بدون جابه‌جایی فیزیکی.

این دیگر یک رویا نیست؛ چرا که دانشمندان در هلند موفق به انجام آن شدند. آن‌ها در یک آزمایش تاریخی توانستند اطلاعات کوانتومی (حالت اسپین یک الکترون) را بین دو اتم که توسط فیبر نوری به هم متصل شده بودند، منتقل کنند. این انتقال اطلاعات نه با ارسال خود اتم، بلکه با استفاده از درهم‌تنیدگی و اندازه‌گیری‌های هوشمندانه انجام شد و نشان داد که اینترنت کوانتومی امن و غیرقابل هک، از لحاظ فنی کاملاً امکان‌پذیر است.

کیوبیت: قلب تپنده پردازش‌های نوین

تفاوت اصلی کامپیوترهای کوانتومی با لپ‌تاپ یا گوشی شما در واحد سازنده اطلاعات است.

بیت (Bit) کلاسیک

در کامپیوترهای کلاسیک، واحد اطلاعات «بیت» است که مثل یک کلید برق عمل می‌کند؛ یا خاموش (صفر) است یا روشن (یک). این ساختار دودویی یعنی هر بیت در هر لحظه تنها می‌تواند یکی از دو حالت را داشته باشد.

کیوبیت (Qubit) کوانتومی

در دنیای کوانتوم، واحد اطلاعات «کیوبیت» نام دارد. کیوبیت شبیه یک سکه در حال چرخش است. وقتی سکه می‌چرخد، شما نمی‌توانید بگویید شیر است یا خط؛ بلکه ترکیبی از هر دو حالت را همزمان دارد.

این ویژگی که «برهم‌نهی» (Superposition) نامیده می‌شود، به کامپیوترهای کوانتومی اجازه می‌دهد به‌جای بررسی تکتک حالت‌ها به نوبت (کاری که کامپیوتر معمولی می‌کند)، میلیون‌ها حالت را همزمان پردازش کنند.

از لحاظ ریاضی، یک کیوبیت حالت خود را به‌صورت ترکیب خطی از حالت‌های پایه $|0\rangle$ و $|1\rangle$ نشان می‌دهد:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

که در آن α و β اعداد مختلطی هستند که مربعات قدرمطلق آن‌ها $|\alpha|^2$ و $|\beta|^2$ احتمال یافتن کیوبیت در حالت ۰ یا ۱ پس از اندازه‌گیری را تعیین می‌کنند، با این شرط که:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$



وقتی تعداد کیوبیت‌ها افزایش می‌یابد، قدرت محاسباتی به‌صورت نمایی رشد می‌کند. یک کامپیوتر کلاسیک با n بیت می‌تواند یک مقدار را ذخیره کند، اما یک سیستم کوانتومی با n کیوبیت می‌تواند همزمان 2^n مقدار را نمایندگی و پردازش کند. به عنوان مثال، تنها با ۳۰۰ کیوبیت، تعداد حالات قابل‌نمایش از تعداد اتم‌های موجود در جهان قابل‌مشاهده فراتر می‌رود. همین ویژگی است که سرعت محاسباتی را به طرز شگفت‌آوری افزایش می‌دهد.

فتوسنتز کارایی تبدیل نور خورشید به انرژی شیمیایی در گیاهان و برخی باکتری‌ها، به دلیل استفاده از پدیدهٔ برهم‌نهی در انتقال انرژی است. این فرآیند کوانتومی اطمینان می‌دهد که انرژی الکترون، بهینه‌ترین مسیر را از میان چندین مسیر ممکن و در کسری از ثانیه پیدا کند.

درک این موضوع می‌تواند به ما کمک کند تا سلول‌های خورشیدی بهینه‌تر بسازیم، که انرژی را با کارایی نزدیک به ۱۰۰ درصد تبدیل می‌کنند، یا حسگرهای فوق‌دقیق‌تری برای تشخیص مواد شیمیایی در محیط بسازیم.

نتیجه‌گیری

انقلاب کوانتومی دیگر فقط یک نظریه روی کاغذ نیست. شرکت‌های بزرگ فناوری و دانشگاه‌های معتبر جهان در حال رقابت برای ساخت پردازنده‌های قوی‌تر و پایدارتر هستند.

ما در حال حرکت از دوران محاسبات کلاسیک (که بر پایه فیزیک نیوتنی بنا شده) به عصر محاسبات کوانتومی هستیم که می‌تواند محدودیت‌های ذاتی روش‌های فعلی را کنار بزند. هدف نهایی این است که بتوانیم مسائلی مثل شبیه‌سازی دقیق داروها برای درمان بیماری‌های صعب‌العلاج (با مدل‌سازی دقیق مولکولی)، بهینه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل جهانی و حتی رمزگشایی از پیچیده‌ترین داده‌های کیهان را حل کنیم.

هرچند هنوز در ابتدای این راه هستیم و ساخت کیوبیت‌های پایدار (که بتوانند مدت زمان زیادی در حالت برهم‌نهی باقی بمانند) چالش اصلی مهندسان است، اما ترکیب هوش انسانی با منطق کوانتومی نویدبخش عصری است که در آن بسیاری از محدودیت‌های فعلی فناوری برداشته خواهند شد و کیوبیت به عنوان ابرقدرت بعدی دنیای فناوری، تمام جنبه‌های زندگی ما را دگرگون خواهد کرد.

اما ماجرا به همین جا ختم نمی‌شود. در یک دستاورد بی‌سابقهٔ دیگر که اخیراً تأیید شد، دانشمندان موفق شدند برای اولین بار تله‌پورت کوانتومی را میان فوتون‌های روی دو تراشهٔ کامپیوتری مجزا انجام دهند.

این دستاورد، که معمولاً به عنوان تله‌پورت بین مدارهای مجتمع فوتونیک شناخته می‌شود، بسیار حیاتی است. اگر آزمایش هلدن ثابت کرد که «شبکه» کوانتومی بین نقاط دوردست ممکن است، این آزمایش جدید نشان داد که می‌توان این فناوری را درون سخت‌افزارهای سیلیکونی و تراشه‌ها پیاده کرد. این یعنی سخت‌افزار کوانتومی دیگر لزوماً یک دستگاه گول‌پیکر آزمایشگاهی نیست و روزی می‌تواند به قطعات کوچک درون دستگاه‌های هوشمند ما راه پیدا کند و محاسبات کوانتومی را در مقیاس تراشه امکان‌پذیر سازد.

هم‌افزایی هوش مصنوعی و کوانتوم

شاید جذاب‌ترین بخش این انقلاب فناوری، ترکیب آن با هوش مصنوعی (AI) باشد. امروزه هوش مصنوعی برای یادگیری نیاز به پردازش حجم عظیمی از داده‌ها دارد که زمان‌بر و انرژی‌بر است (به‌ویژه در یادگیری عمیق).

محققان امیدوارند با استفاده از پدیده‌ای به نام «تداخل» (Interference) در رایانه‌های کوانتومی، مدل‌های هوش مصنوعی بسیار سریع‌تری بسازند که به آن هوش مصنوعی کوانتومی (QAI) می‌گویند.



همان‌طور که امواج دریا می‌توانند همدیگر را تقویت یا خنثی کنند (تداخل سازنده یا مخرب)، الگوریتم‌های کوانتومی هم می‌توانند با دستکاری احتمالات کیوبیت‌ها، مسیرهای حل درست را تقویت کرده و مسیرهای حل غلط را حذف کنند. این یعنی جستجو در فضای حالت‌های بسیار بزرگ، بسیار سریع‌تر انجام می‌شود. برای مثال، الگوریتم‌هایی مانند گروور (Grover's algorithm) می‌توانند سرعت جستجو در پایگاه‌های داده را از $O(N)$ به $O(\sqrt{N})$ کاهش دهند که یک جهش عظیم است. این یعنی آموزش شبکه‌های عصبی که امروزه ماه‌ها طول می‌کشد، ممکن است در آینده در چند ساعت انجام شود.

طبیعت: اولین مهندس کوانتوم

جالب است بدانید قبل از اینکه بشر به فکر ساخت کامپیوتر کوانتومی بیفتد، طبیعت میلیاردها سال از این قوانین استفاده می‌کرده است. شاخهٔ جدیدی به نام «زیست‌شناسی کوانتومی» (Quantum Biology) نشان داده است که فرآیندهایی حیاتی در موجودات زنده، با بهره‌گیری از اصول کوانتومی، کارایی خود را به‌شدت بالا برده‌اند:



منابع

- [1] F. Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature*, vol. 574, pp. 505–510, 2019.
- [2] M. Pompili et al., "Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits," *Science*, vol. 372, pp. 259–264, 2021.
- [3] D. Llewellyn et al., "Chip-to-chip quantum teleportation and multi-photon entanglement in silicon," *Nature Physics*, vol. 16, pp. 148–153, 2020.
- [4] M. Cerezo et al., "Variational quantum algorithms," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, pp. 625–644, 2021.
- [5] N. Lambert et al., "Quantum biology," *Nature Physics*, vol. 9, pp. 10–18, 2013.
- [6] S. Krinner et al., "Realizing repeated quantum error correction in a distance-three surface code," *Nature*, vol. 605, pp. 669–674, 2022.