

تاریخچه و انواع رایانه‌های کوانتومی

سعید نائیه^{۱*}، سید نصیب الله دوستی مطلق^۱

چکیده

حوزه محاسبات کوانتومی یکی از حوزه‌های فناوری جدید است که به آنها فناوری‌های کوانتومی می‌گوییم. فناوری‌های کوانتومی مبتنی بر قوانین و اصول فیزیک کوانتومی هستند که این قوانین بر دنیای زیراتمی حاکم می‌باشند که از سال ۱۹۰۰ میلادی به بعد توسط دانشمندان ارائه شدند و نگرش ما نسبت به ساختار ماده تغییر دادند.

این اصول و قوانین از اصلی‌ترین پارامترهای شکل گرفتن فناوری‌های کوانتومی در بسیاری از حوزه‌های مختلف مانند الکترونیک، پزشکی، مخابرات و ... از نیمه دوم قرن بیستم به بعد شده است که محاسبات و رایانه‌های کوانتومی یکی از آنهاست. رایانه‌های کوانتومی قدرت محاسباتی بسیار بالایی دارند و قادرند محاسباتی را انجام دهند که با رایانه‌های کلاسیک هزاران سال طول می‌کشد. همچنین رایانه‌های کوانتومی محدودیت‌های رایانه‌های کلاسیک را ندارند. البته هنوز این رایانه‌ها با برتری مطلق نسبت به رایانه‌های کلاسیک محقق نشده‌اند، اما با این حال رایانه‌های ساخته شده نیز دارای کارایی بالا بوده و به مقیاس تجاری رسیده‌اند. اعلام همکاری یکی از شرکت‌های سازنده رایانه‌های کوانتومی (دی‌ویو سیستمز) برای یافتن درمان برای کووید-۱۹ نمونه‌ای از تحقق عملی و کارایی بالای این رایانه‌هاست. این توان محاسباتی بالا می‌تواند در بسیاری از حوزه‌های دیگر اعم کشاورزی، امور مالی، امنیت سایبری و ... مورد استفاده قرار گیرد.

در این نوشتار سعی بر آن شده است پس از معرفی رایانه‌های کوانتومی و انواع آنها به بیانی ساده و نه‌چندان فنی، به کاربردهای بالقوه آنها در عرصه‌های مختلف اشاره شده و پیشنهاداتی برای پیاده‌سازی آنها در کشور بیان گردد.

واژگان کلیدی: محاسبات کوانتومی، رایانه‌های کوانتومی، تاریخچه، کووید-۱۹، پزشکی، کشاورزی.

عهده‌دار مکاتبات، دکترای فیزیک، تلفن ۰۲۱ ۲۲۹۷۰۳۴۹، پست الکترونیکی: snayeh@gmail.com

^۱ گروه علوم و فناوری‌های دفاعی، پژوهشکده آما، فناوری دفاعی و پدافند غیرعامل، دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، تهران، ایران

مقدمه

وضعیت یک ذره توسط ذره دیگر به صورت آبی حس می‌شود که به آن «درهم‌تنیدگی»^۲ می‌گویند. یک رایانه کوانتومی دارای تعدادی بیت کوانتومی یا کیوبیت^۵ است و اساساً با رایانه کلاسیک که دارای همان تعداد بیت است متفاوت می‌باشد. یک کیوبیت نه تنها می‌تواند در حالت‌های صفر و یک کلاسیک وجود داشته باشد، بلکه می‌تواند در حالت‌های بین صفر و یک نیز قرار داشته باشد. یعنی کیوبیت‌ها می‌توانند در هر لحظه صفر، یک یا هر عددی بین آنها را اختیار کنند. پدیده‌های فیزیکی که می‌توانند کیوبیت را ایجاد کنند نیز پدیده‌هایی کوانتومی می‌باشند. آنچه که توسط گیت‌های منطقی در رایانه‌های کلاسیک انجام می‌گیرد، در رایانه‌های کوانتومی توسط تبدیلات یکانی^۶ صورت می‌پذیرد. تبدیل‌های یکانی، ماتریس‌هایی هستند که اثر آنها روی یک حالت کوانتومی، آن را تغییر داده و حالت جدیدی را به دست می‌دهند. شرح مفصل مبتنی بر ریاضیات و فیزیک محاسبات و رایانه‌های کوانتومی در مراجع معتبر آمده است [۲،۳،۴].

تاریخچه‌ای از رایانه‌های کوانتومی

آغاز رسمی محاسبات کوانتومی با کار پل بنیوف^۷ در سال ۱۹۸۰ میلادی بود که در کار خود نشان داد، تبدیلات یکانی معادل با همان گیت‌های منطقی مورد استفاده در محاسبات است و بنابراین می‌توان محاسبات را با استفاده از این تبدیل‌ها انجام داد [۵].

در سال ۱۹۸۲ میلادی ریچارد فاینمن^۸ ایده رایانه کوانتومی را مطرح کرد [۶]؛ رایانه‌ای که از آثار مکانیک کوانتومی بهره برد. در سال ۱۹۸۵ میلادی، دیوید دویچ^۹ یک قدم بسیار مهم در زمینه محاسبات کوانتومی برداشت [۷]. وی در مقاله خود نشان داد که چگونه می‌توان ویژگی‌های مکانیک کوانتومی را برای رسیدن به محاسبات سریع‌تر مورد استفاده قرار داد و نشان داد که محاسبات کوانتومی بسیار کارآمدتر از محاسبات کلاسیک است. با کار دویچ بود که برتری محاسبات کوانتومی نسبت به محاسبات

برای درک بهتر عملکرد رایانه کوانتومی، باید نگاهی به عملکرد گذشته آن - محاسبات و رایانه‌های کلاسیک - بیندازیم. در یک رایانه کلاسیک، بیت‌های کلاسیک واحدهای اصلی پردازش اطلاعات هستند. اطلاعات ورودی به صورت کدهای صفر و یک درآمده و در این بیت‌ها ذخیره می‌گردند. بیت کلاسیک فقط می‌تواند دارای دو مقدار صفر و یک باشد. برای ایجاد صفر و یک، از پدیده‌های فیزیکی مانند ولتاژ در یک مدار الکترونیکی استفاده می‌شود، به این صورت که مثلاً ولتاژ صفر را به عنوان صفر و ولتاژ ۵ ولت را به عنوان یک در نظر می‌گیریم. مبنای ریاضی در بیت‌ها جبر بول^۱ نام دارد که توسط مدارهایی موسوم به گیت‌های منطقی^۲ روی بیت‌ها اعمال می‌شود. ترکیب این گیت‌های منطقی می‌تواند یک محاسبه یا پردازش را در رایانه انجام دهد [۱]. امروزه پیاده‌سازی حافظه‌های رایانه‌ای و مدارهای پردازشی در قالب مدارهای مجتمع، به آسانی انجام می‌شود. همچنین هیچ محدودیتی در تکثیر اطلاعات در رایانه‌های کلاسیک وجود ندارد.

یک رایانه کوانتومی دستگاهی است که از ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکانیک کوانتومی برای ذخیره و پردازش اطلاعات استفاده می‌کند. از جمله اصول و قوانین مکانیک کوانتومی، اصل عدم قطعیت است که اندازه‌گیری دقیق و همزمان کمیت‌هایی مانند مکان یک ذره و سرعت آن را غیرممکن می‌داند. همین باعث می‌شود که پیش‌بینی ما از تحولات دنیای زیراتمی نه بر مبنای قطعیت بلکه بر مبنای احتمال باشد. محاسبه احتمال با استفاده از شکل ریاضی موجی صورت می‌گیرد که ذره را همراهی می‌کند. بنابر توصیف موجی از ذرات، یک ذره تا زمانی که مورد اندازه‌گیری و مشاهده قرار نگرفته است، در هر حالتی (و نه یک حالت خاص) می‌تواند باشد که به آن «برهم‌نهی کوانتومی»^۳ گفته می‌شود. همچنین دو ذره می‌توانند دارای ارتباطی عجیب و شگفت‌انگیز شوند به طوری که تغییر در

¹ Boolean algebra

² Logical gates

³ Quantum superposition

⁴ Entanglement

⁵ Qubit

⁶ Unitary logical gates

⁷ Paul Benioff

⁸ Richard Feynman

⁹ David Deutsch

کوانتومی می‌تواند تمام دفترچه تلفن را فوراً جستجو کند و همه شماره‌ها را همزمان ارزیابی کرده و نتیجه را خیلی سریع‌تر از یک رایانه کلاسیک بازگرداند. افزایش سرعت محاسبات دستاورد بزرگی است که رایانه‌های کوانتومی به همراه می‌آورند. با استفاده از امکاناتی که مکانیک کوانتومی در اختیار قرار می‌دهد، در رایانه کوانتومی به جای پردازش به صورت سری، پردازش موازی انجام شده و چنین کاری باعث افزایش سرعت پردازش مسائل در رایانه‌های کوانتومی به اندازه چندین میلیون برابر رایانه‌های کلاسیک می‌شود. برای توضیح بهتر عملکرد رایانه‌های کوانتومی، یک دفترچه تلفن را در نظر بگیرید و سپس تصور کنید که در جستجوی یک شماره خاص در آن هستید. یک رایانه کلاسیک، هر سطر از دفترچه تلفن را جستجو می‌کند، تا زمانی که شماره را پیدا کند. از لحاظ نظری، یک رایانه کوانتومی می‌تواند تمام دفترچه تلفن را فوراً جستجو کند و همه شماره‌ها را همزمان ارزیابی کرده و نتیجه را خیلی سریع‌تر از یک رایانه کلاسیک بازگرداند. افزایش سرعت محاسبات دستاورد بزرگی است که رایانه‌های کوانتومی به همراه می‌آورند.

چالش‌های پیش روی رایانه‌های کوانتومی

در حوزه تحقق فیزیکی رایانه‌های کوانتومی باید گفت که محدودیت‌هایی در این حوزه وجود دارد، این محدودیت‌ها را قوانین مکانیک کوانتومی ایجاد می‌کنند. ضمن اینکه سیستم‌های کوانتومی نسبت به آثار محیطی بسیار حساس هستند که باعث می‌شود محاسبات تحت‌الشعاع این آثار قرار گیرند و دچار خطا شوند. بنابراین باید سیستم‌های فیزیکی طوری مهیا شوند که بتوان با وجود این محدودیت‌ها، سیستمی کارآمد را مهیا کرد. در ۲۵ سال اخیر، تلاش محققان در راه ساخت سیستم‌های فیزیکی مناسب است.

به‌طور کلی یک سیستم فیزیکی برای آنکه بتواند برای محاسبات کوانتومی مناسب باشد، باید قابلیت ایجاد شرایط زیر را داشته باشد:

- (۱) ایجاد کیوبیت
- (۲) آماده سازی اولیه

کلاسیک اثبات شد. چند سال بعد، دویچ به همراه جوزا^۱ این روش را توسعه دادند که به الگوریتم دویچ-جوزا معروف است [۸].

تا مدتی این ایده فقط به لحاظ نظری جالب بود، تا این که پیتر شور^۲ در سال ۱۹۹۴ میلادی الگوریتمی کوانتومی، برای تجزیه عددها به عوامل اول اختراع کرد [۹]. روش شور قادر است در مدت زمانی کوتاه‌تر از الگوریتم‌های کلاسیک، یک عدد را به عوامل اول تجزیه کند.

یک سال بعد نخستین پیشنهادها برای تحقق فیزیکی الگوریتم دویچ ارائه شد [۱۰]. ساخت رایانه‌هایی با ۵ و ۷ کیوبیت در سال ۲۰۰۰ میلادی محقق شد و در سال ۲۰۰۱ میلادی، پژوهشگران شرکت آی‌بی‌ام برای اولین بار توانستند عدد ۱۵ را به عوامل اول آن یعنی ۳ و ۵ تجزیه کنند. در سال ۲۰۰۳ میلادی، الگوریتم دویچ-جوزا روی رایانه کوانتومی یون به‌دام افتاده اجرا شد [۱۱]. اما جهش قابل‌ملاحظه در این سال، رونمایی شرکت کانادایی دی‌ویو^۳ از نخستین رایانه آنیلینگ با ۲۸ کیوبیت است. این شرکت در سال‌های بعد، رایانه‌هایی با ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیوبیت را طراحی کرد. در سال ۲۰۰۹ میلادی محققان دانشگاه ییل^۴ موفق شدند نخستین تراشه ابررسانای کوانتومی را بسازند [۱۲]. ساخت و توسعه پردازشگرهای کوانتومی توسط شرکت‌های بزرگی مانند آی‌بی‌ام،^۵ مایکروسافت،^۶ اینتل،^۷ گوگل^۸ و... در سال‌های اخیر ادامه دارد.

مزیت‌های رایانه کوانتومی

با استفاده از امکاناتی که مکانیک کوانتومی در اختیار قرار می‌دهد، در رایانه کوانتومی به جای پردازش به صورت سری، پردازش موازی انجام شده و چنین کاری باعث افزایش سرعت پردازش مسائل در رایانه‌های کوانتومی به اندازه چندین میلیون برابر رایانه‌های کلاسیک می‌شود. برای توضیح بهتر عملکرد رایانه‌های کوانتومی، یک دفترچه تلفن را در نظر بگیرید و سپس تصور کنید که در جستجوی یک شماره خاص در آن هستید. یک رایانه کلاسیک، هر سطر از دفترچه تلفن را جستجو می‌کند، تا زمانی که شماره را پیدا کند. از لحاظ نظری، یک رایانه

¹ Jozsa

² Peter Shor

³ D-Wave

⁴ Yale

⁵ IBM

⁶ Microsoft

⁷ Intel

⁸ Google

(۳) کنترل

(۴) اندازه‌گیری نهایی (رسیدن به جواب محاسبه)

به این چهار شرط به همراه چند شرط دیگر معیارهای دی وینسنزو^۱ گفته می‌شود که شرایط لازم برای سیستم فیزیکی مورد استفاده در محاسبات کوانتومی است [۳].

تا به امروز فناوری‌های مختلفی برای پیاده‌سازی محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است که از انواع آنها می‌توان به ان‌ام‌آر^۲، یون‌های به‌دام افتاده و مدارهای ابررسانا نام برد. مورد سوم بیشتر در رایانه‌های کوانتومی مورد استفاده قرار گرفته است اما فناوری‌های دیگر بسیاری برای پیاده‌سازی فیزیکی کیوبیت‌ها یا همان کیوبیت‌های فیزیکی در حال پیشرفت هستند. اما حتی اگر بتوانیم یک کیوبیت با کیفیت بسیار عالی برای رایانه کوانتومی بسازیم، باز هم چالش‌های بسیار زیادی پیش‌رو است. رایانه‌های کوانتومی نسبت به رایانه‌های کلاسیک، مجموعه متفاوتی از عملیات را به‌خدمت می‌گیرند که نیازمند الگوریتم‌ها، سخت‌افزارها و فناوری‌های کنترل جدید است.

اهمیت رایانه‌ها

محاسبات کوانتومی برای ارتقای کل صنایع از ارتباطات از راه دور و امنیت سایبری گرفته تا تولید پیشرفته، دارایی، دارویی و فراتر از آن کاربرد دارد. در ادامه به چند نمونه از زمینه‌های بالقوه به‌کارگیری رایانه‌های کوانتومی اشاره می‌شود.

(۱) پزشکی

رایانه‌های کوانتومی می‌توانند به‌سرعت بخشیدن به روند مقایسه اثر متقابل داروهای مختلف بر روی طیف وسیعی از بیماری‌ها برای تعیین بهترین داروها کمک کنند. علاوه بر این، محاسبات کوانتومی می‌تواند به استفاده از پیشرفت‌های ژنومی برای ایجاد برنامه‌های درمانی مناسب برای هر بیمار منتج شود. توالی ژنوم، داده‌های زیادی ایجاد می‌کند به‌گونه‌ای که نمایشی از کل رشته دی‌ان‌ای یک فرد به قدرت محاسباتی گسترده و ظرفیت ذخیره‌سازی نیاز دارد. شرکت‌ها به‌سرعت در حال کاهش هزینه و منابع مورد نیاز برای توالی ژنوم انسانی هستند. با این حال،

یک رایانه کوانتومی به‌لحاظ نظری باعث می‌شود که توالی ژنوم‌ها در مقیاس جهانی کارآمدتر و آسان‌تر صورت گیرند. شبیه‌سازی و محاسبات کوانتومی پتانسیل بازتولید برهم‌کنش‌های بیوشیمیایی داروها در ارگانسیم‌ها را دارند که به دانشمندان این امکان را می‌دهند داروهای هدفمند را طراحی کنند. در حال حاضر، حتی شبیه‌سازی دینامیک یک سیستم مولکولی ساده با رایانه‌های کلاسیک غیرممکن است. استفاده از این فناوری باعث جهش عظیم در طراحی دارو می‌شود (۱) [۱۴، ۱۳].

همه‌گیری اخیر ویروس کرونا در جهان که تبعات منفی بسیاری را در همه حوزه‌ها برای کشورهای مختلف داشته است، نیاز به این فناوری را بیش از پیش نشان داده است. این رایانه‌ها علاوه بر ارزیابی ترکیبات مختلف برای یافتن درمان مؤثر، در مدل‌سازی و شبیه‌سازی انتشار ویروس، ارزیابی میزان جهش ویروس و همین‌طور برنامه‌ریزی برای به‌کارگیری بهینه پرسنل و منابع بیمارستانی برای مواجهه با تعداد بالای مبتلایان نیز قابلیت به‌کارگیری دارند. در راستای این مهم، شرکت دی‌ویو در جهت مقابله با این بیماری اعلام آمادگی نموده است. این شرکت کانادایی روز در اواخر مارس سال ۲۰۲۰ میلادی اعلام کرد که رایانه‌های کوانتومی خود را برای تحقیق در مورد ویروس کرونا به رایگان در اختیار محققان قرار می‌دهد (۴، ۵).

(۲) کشاورزی

رایانه‌های کوانتومی در کشاورزی نیز می‌توانند مثرتر باشند. به عنوان مثال، تقریباً تمام کودهای شیمیایی مورد استفاده از آمونیاک ساخته شده‌اند. توانایی تولید آمونیاک (یا جایگزین آن) با کارایی بیشتر به معنای تولید کودهای ارزان‌تر و با صرف انرژی کمتر است.

اساساً، از دهه‌های ۱۹۰۰ میلادی ما نمی‌توانیم بدون استفاده از تکنیک صنعتی که به فرایند هابر-بوش^۳ معروف است، فرایند را به صورت مصنوعی شبیه‌سازی کنیم. این فرایند شامل گرما و فشار بسیار زیاد برای تبدیل نیتروژن، هیدروژن و آهن به آمونیاک است. استفاده از ابررایانه‌های امروزی برای آزمایش دیجیتال ترکیب‌های مناسب کاتالیزوری برای ساخت آمونیاک،

¹ DiVincenzo criteria

² NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

³ Haber-Bosch

آنچه که به عنوان توزیع کلید کوانتومی^۲ (QKD) شناخته می‌شود. این مهم به‌منظور تأمین امنیت ارتباطات حساس صورت می‌گیرد. مهمترین نکته این است که اگر ارتباطات رمزگذاری شده کوانتومی توسط هر کسی رهگیری شود، طرح رمزگذاری فوراً علائم اختلال را آشکار کرده و نشان می‌دهد که ارتباط امن نیست. این موضوع بر این اصل متکی است که عمل اندازه‌گیری یک سیستم کوانتومی باعث اختلال در سیستم می‌شود (۱)[۱۴].

۵) شبیه‌سازی کوانتومی (شبیه‌سازهای کوانتومی)

شبیه‌سازی کوانتومی مسائل خاص در فیزیک کوانتومی را که فراتر از ظرفیت سیستم‌های کلاسیک است مورد کاوش قرار می‌دهد. شبیه‌سازی پدیده‌های کوانتومی پیچیده می‌تواند یکی از مهمترین کاربردهای محاسبات کوانتومی باشد. حوزه‌ای که بسیار امیدوارکننده است شامل مدل‌سازی تأثیر تحریک شیمیایی بر تعداد زیادی ذرات زیراتمی است - که به عنوان شیمی کوانتومی شناخته می‌شود.

به‌ویژه، از شبیه‌سازهای کوانتومی می‌توان برای شبیه‌سازی تاشدگی پروتئین‌ها^۳ استفاده کرد که یکی از سخت‌ترین مسائل بیوشیمی است. پروتئین‌های تاننده می‌توانند باعث بیماری‌هایی مانند آلزایمر و پارکینسون شوند و محققانی که معالجات جدید را مورد آزمایش قرار می‌دهند، می‌توانند از طریق مدل‌سازی رایانه‌ای دریابند که کدام داروها باعث واکنش‌های هر پروتئین می‌شوند (۱)[۱۴].

انواع رایانه‌های کوانتومی (بر اساس پیاده‌سازی)

از لحاظ پیاده‌سازی رایانه‌ها (به‌کارگیری کیوبیت‌ها، اعمال گیت‌ها و ...) چهار روش اصلی محاسبات کوانتومی وجود دارد که عبارتند از: محاسبات کوانتومی برپایه گیت، محاسبات کوانتومی بی‌دررو، محاسبات برپایه اندازه‌گیری و محاسبات توپولوژیک. از میان این چهار مدل، دو مدل اول توسعه یافته و حتی به تولید تجاری نیز رسیده‌اند و روش‌های سوم و چهارم در مراحل آزمایشگاهی هستند [۱۵، ۱۶، ۱۷]. در اینجا به توضیحاتی در خصوص دو روش اول می‌پردازیم:

قرن‌ها طول می‌کشد تا حل شود. یک رایانه کوانتومی قادر به تجزیه و تحلیل سریع فرآیندهای کاتالیزوری شیمیایی است که به یافتن ترکیب بهینه کاتالیزور برای ایجاد آمونیاک منجر می‌شود. علاوه بر این، می‌دانیم که یک باکتری ریز در ریشه گیاهان با صرف مقدار بسیار کم انرژی و با استفاده از یک مولکول خاص به نام نیتروژناز^۱، همین فرآیند را انجام می‌دهد. شبیه‌سازی این مولکول فراتر از توانایی‌های بزرگ‌ترین رایانه‌های امروزی است، اما یک رایانه کوانتومی قادر به انجام این کار خواهد بود. توجه داشته باشید که تولید کودهای با کارایی انرژی بالا تنها یکی از حوزه‌هایی است که ما می‌توانیم مسائل بزرگ را با توانایی شبیه‌سازی دقیق رفتارهای مولکولی حل کنیم. مسائل مشابهی در مورد تغییر اقلیم، مراقبت‌های بهداشتی، علوم مواد، انرژی و موارد دیگر نیز وجود دارد (۱)[۱۴].

۳) امور مالی

تحلیلگران مالی به‌طور معمول به الگوریتم‌هایی که از احتمالات و فرضیات در مورد نحوه عملکرد بازارها و سبدهای سهام تشکیل شده‌اند، اعتماد می‌کنند. محاسبات کوانتومی می‌تواند به از بین بردن نقاط کور داده و جلوگیری از ایجاد مفروضات مالی بی‌اساس کمک کند. به‌طورخاص، حوزه‌های محاسبات کوانتومی که بیشترین وعده را برای خدمات مالی می‌دهند، در حال حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده مانند بهینه‌سازی خطرپذیری پورتهوی‌ها و کشف تقلب است. ظرفیت رایانه‌های کوانتومی و شبیه‌سازی کوانتومی برای حل این مسائل و پردازش تعداد زیادی از امکان‌ها به سرعت و به‌طور مؤثر، به ما امکان ساخت، شبیه‌سازی و بهبود مدل‌های مالی را با استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی خواهد داد (۱)[۱۴].

۴) امنیت سایبری

رایانه‌های کوانتومی همچنین می‌توانند برای امنیت داده‌ها از هک کوانتومی استفاده شوند - به روشی که به رمزگذاری کوانتومی معروف است. رمزگذاری کوانتومی ایده ارسال ذرات درهم‌تنیده نور (فوتون‌های درهم‌تنیده) در مسافت‌های طولانی است در

¹ Nitrogenase

² Quantum Key Distribution (QKD)

³ Protein folding

۱) شیوه مداری (بر پایه گیت):^۱

این شیوه اساس رایانه‌های کوانتومی آنیلینگ^۶ است. در علم مسائلی وجود دارند که مجموعه‌ای از متغیرها هستند و باید به بهترین ترکیب متغیرها رسید. اغلب به این مسائل، مسائل بهینه‌سازی نامیده گفته می‌شود. برای درک بهتر، مثالی بسیار ساده از مسائل بهینه‌سازی را در نظر بگیرید: فرض کنید که یک قطعه کاغذ مربعی شکل دارید و می‌خواهید با آن یک مکعب بسازید. برش‌ها باید در چه نقاطی صورت گیرد تا حجم این مکعب بیشترین مقدار باشد؟

مسائل بهینه‌سازی در صناعی از جمله طراحی نرم‌افزار، لجستیک، امور مالی، جستجوی وب و موارد دیگر وجود دارد. در حالی که سخت‌ترین مسائل بهینه‌سازی در این صنایع، رایانه‌های کلاسیک را به هم می‌ریزد، رایانه‌های کوانتومی برای حل آنها مناسب هستند. به عبارت دیگر، محققان در تلاشند تا بهترین (کارآمدترین) پیکربندی ممکن را در بین بسیاری از ترکیبات ممکن متغیرها پیدا کنند. با این حال، آنیلینگ کوانتومی در میان روش‌های محاسبات، قدرتمندترین نیستند. در حقیقت، کارشناسان توافق دارند که ابررایانه‌های امروز می‌توانند برخی از مسائل بهینه‌سازی را به موازات دستگاه‌های آنیلینگ کوانتومی امروز حل کنند.

شرکت کانادایی دی‌ویو^۷ پیشگام در تولید پردازشگرهای آنیلینگ (آنیلرها) بوده است. این شرکت در سال ۲۰۱۱ میلادی اولین پردازشگر خود دارای ۱۲۸ کیوبیت را تحت عنوان دی‌ویو وان^۸ ارائه کرد و دو سال بعد پردازشگر ۵۱۲ کیوبیتی خود تحت عنوان دی‌ویو تو^۹ را معرفی نمود. این پیشرفت تا سال‌های بعد ادامه یافت و پردازشگرهای دی‌ویو توایکس^{۱۰} با ۱۱۵۲ کیوبیت و دی‌ویو ۲۰۰۰ کیو^{۱۱} با ۲۰۵۴ کیوبیت به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ میلادی عرضه شدند. پیش‌بینی می‌شود این شرکت تا سال ۲۰۲۰ میلادی پردازشگری با ۵۰۰۰ کیوبیت را عرضه کند (۶،۷).

رایانه‌های ساخته شده توسط دی‌ویو مورد استفاده نیز واقع شده‌اند. به عنوان مثال، اخیراً فولکس واگن (VW) یک آزمایش

مدل مداری یک مدل الگوریتمی برای محاسبات کوانتومی است که خیلی شبیه به الگوریتم‌های کلاسیک می‌باشد. در واقع، عملکرد رایانه بر پایه گیت، بسیار شبیه به رایانه‌های کلاسیک است. الگوریتم‌ها توسط اعمال گیت‌های تک‌کیوبیتی و دوکیوبیتی به دنبال هم بر روی مجموعه‌ای از کیوبیت‌هایی که در حالت پایدار آماده‌سازی شده‌اند، انجام می‌شوند و در پایان نتایج با اندازه‌گیری روی حالت نهایی خوانده می‌شوند [۱۸].

پردازنده‌های کوانتومی مختلفی بر پایه گیت توسط شرکت‌های مختلف ساخته شده‌اند. این شرکت‌ها عبارتند از: گوگل، آی‌بی‌ام، ایتل و ریگتی.^۲ همه پردازنده‌ها با کیوبیت‌های ابرسانا طراحی شده‌اند که بیشترین تعداد کیوبیت به کار رفته در آنها مربوط به پردازنده بریستلکون^۳ شرکت گوگل با ۷۲ کیوبیت است. این شرکت در سال ۲۰۱۹ میلادی با معرفی پردازنده ۵۳ کیوبیتی، ادعا کرد به برتری کوانتومی دست یافته است. منظور از برتری کوانتومی نمایش هرگونه محاسبات کوانتومی که برای رایانه‌های کلاسیک بسیار دشوار است، خواه محاسبات مفید باشند یا نه. خلاصه این ادعا این است که گوگل پردازشگری موسوم به سیکامور^۴ را طراحی کرده است که توانسته محاسبه‌ای را در مدت ۳ دقیقه و ۲۰ ثانیه انجام دهد که توسط ابررایانه‌های کلاسیک ۱۰۰۰۰ سال طول می‌کشد [۱۹]. البته این محاسبه یک محاسبه کاربردی نبوده و صرفاً جهت نشان دادن برتری کوانتومی طراحی شده است.

۲) محاسبات کوانتومی بی‌دررو:^۵

این مدل یک الگوی جدید برای محاسبات کوانتومی را نشان می‌دهد که اخیراً براساس تحول بی‌درروی کوانتومی ارائه شده است. به بیان ساده، باید گفت که در این روش از یک مسأله که جواب آن را می‌دانیم شروع می‌شود. سپس مسأله را به سمت مسأله‌ای که دنبال جواب آن هستیم به آهستگی میل می‌دهیم. جواب مسأله اولیه نیز به جواب مسأله نهایی میل خواهد کرد.

¹ Circuit (gate-based) model

² Rigetti

³ Bristlecone

⁴ Sycamore

⁵ Adiabatic quantum computation

⁶ Annealing

⁷ D-wave

⁸ D-Wave One

⁹ D-Wave Two

¹⁰ D-Wave 2x

¹¹ D-Wave 2000Q

صد هزار کیوبیت استفاده کند که برخی تخمین‌ها آن را در حد یک مگاکیوبیت قرار داده است. امروزه بیشترین کیوبیت‌هایی که توانسته‌ایم به آن دسترسی پیدا کنیم کمتر از ۱۰ هزار کیوبیت است [۱۸].

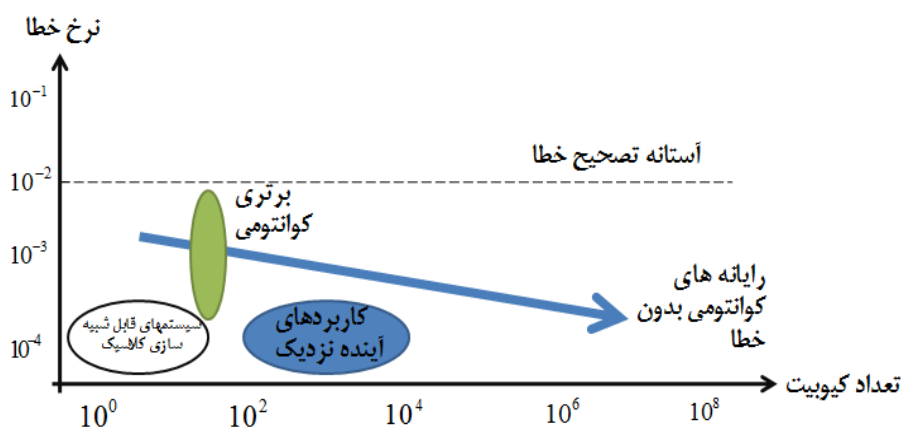
چشم‌انداز

امروزه، قدرتمندترین رایانه‌های کوانتومی ساخته شده توسط شرکت‌های بزرگ، رایانه‌های ترکیبی کلاسیکی-کوانتومی هستند. به این صورت که آنها ترکیبی از سیستم‌های کلاسیک قدرتمند می‌باشند که توسط قابلیت‌های کوانتومی چشمگیر ارتقا یافته‌اند. با این حال، این صنعت به سرعت در حال پیشرفت است. کارشناسان بر این باورند که تا سال ۲۰۳۰ میلادی، ما می‌توانیم رایانه‌های کوانتومی سبقت گرفته از هم‌تایان کلاسیک آنها را ببینیم. اما چنین به نظر می‌رسد حتی با دستیابی به برتری کوانتومی، تا رسیدن به رایانه کوانتومی جهانشمول با خطای پایین فاصله زیادی داریم (شکل ۱). قبل از دستیابی عملی محاسبات کوانتومی به پتانسیل خود، باید از موانع فنی مهمی عبور کرد. این امر به توسعه سخت افزار باثبات‌تر، سیستم‌عامل‌های تجاری برای توسعه نرم‌افزار و توسعه قابلیت‌های محاسبات ابری برای توزیع و دسترسی به منابع محاسباتی کوانتومی نیاز دارد.

کوانتومی را برای بهینه‌سازی جریان ترافیک در شهر پرازدحام پکن در چین انجام داده است. این آزمایش با همکاری گوگل و دی‌ویو اجرا شد. الگوریتم VW، می‌تواند با انتخاب مسیر ایده‌آل برای هر وسیله نقلیه، ترافیک را با موفقیت کاهش دهد [۲۰]. همانگونه که پیش از این گفته شد، با همه‌گیری ویروس کرونا، شرکت دی‌ویو نیز سرویس محاسبات کوانتومی ابری^۱ خود موسوم به لیپ^۲ را که از رایانه دی‌ویو ۲۰۰۰ کیوب بهره می‌برد، به رایگان در اختیار محققان قرار داده است. این سرویس قادر است که مسائل پیچیده‌ای را با ۱۰۰۰۰ متغیر حل کند (۴).

محاسبات کوانتومی جهانشمول^۳

رایانه‌های کوانتومی جهانشمول (در صورت تحقق عملی) قدرتمندترین و به‌طورکلی کاربردی‌ترین، اما درعین‌حال به لحاظ طراحی و ساخت پیچیده‌ترین و مشکل‌ترین نوع رایانه‌های کوانتومی است. ایده اصلی رایانه کوانتومی جهانشمول این است که شما می‌توانید دستگاه را در هر محاسبه پیچیده‌ای هدایت کنید و یک راه حل سریع دریافت کنید. این شامل حل معادلات آنیلینگ (حل مسائل شامل تعداد زیادی متغیر و یافتن مقدار بهینه این متغیرها) و شبیه‌سازی پدیده‌های کوانتومی و موارد دیگر می‌باشد. محققان سالهاست که الگوریتم‌هایی را طراحی می‌کنند که فقط در یک رایانه کوانتومی جهانشمول امکان‌پذیر است. ممکن است یک رایانه کوانتومی واقعاً جهانشمول از افزون بر



شکل ۱: چشم‌انداز آینده رایانه‌های کوانتومی. هدف رسیدن به رایانه‌های جهانشمول با نرخ خطای پایین است. پیشرفت‌های بسیاری انجام شده است. اما حتی با رسیدن به برتری کوانتومی راه بسیاری تا رسیدن به رایانه‌های جهانشمول کاربردی مانده است (۸).

¹ Quantum computing cloud service

² Leap2

³ Universal quantum computer

- (4) <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-provides-free-quantum-cloud-access-global-response-covid-19>
- (5) <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/can-quantum-computing-help-us-respond-to-the-coronavirus>
- (6) <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-breaks-1000-qubit-quantum-computing-barrier>
- (7) <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-%c2%a0announces-%c2%a0d-wave-2000q-quantum-computer-and-first-system-order>
- (8) <https://digitano.ir/?p=12059>
- (9) <https://www.icqts.ir/>

منابع و مؤاخذ

- [1]. Morris Mano, M. and Ciletti, M. D. (2013). Digital Design, Fifth edition, Pearson Education, New Jersey, USA.
- [2]. Nielsen, M. A. and Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [3]. Nakahara, M. and Ohmi, T. (2008). Quantum Computing - From Linear Algebra to Physical Realizations, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA.
- [4]. McMahan, D. (2007). Quantum Computing Explained, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.
- [5]. Benioff, P. (1980). The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. Journal of Statistical Physics, Vol.22, PP. 563-591.
- [6]. Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proceedings of the Royal Society of London Series, Vol.400, No. 1818, PP. 97-117.
- [7]. Deutsch, D. and Jozsa, R. (1992). Rapid Solution of Problems by Quantum Computation. Proceedings of the Royal Society of London Series, Vol. 439, Issue 1907, PP. 553-558.
- [8]. Feynman, R.P. (1982). Simulating physics with computers. International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, PP. 467-488.
- [9]. Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, USA, PP. 124-134.
- [10]. Chuang, I. L. and Yamamoto, Y. (1995). A Simple quantum computer. Physical Review A, Vol. 52, Issue 5, PP. 3489-3495.
- [11]. Gulde, S., Riebe, M., Lancaster, G.P.T., Becher, C., Eschner, J., Haffner, H., Schmidt-Kaler,

نتیجه‌گیری

قابلیت‌های رایانه‌های کوانتومی آنقدر بالاست که عرصه فناوری را وارد رقابت برای دستیابی به رایانه‌های قدرتمند کرده است و سرمایه‌گذاری‌های عظیمی را متوجه خود ساخته است. با اهمیت یافتن توسعه فناوری‌های کوانتومی در جهان، جمهوری اسلامی ایران نیز تلاش در قدم برداشتن در این عرصه نموده است. در این راستا مرکز فناوری‌های کوانتومی ایران در سازمان انرژی اتمی ایجاد شد و پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات در این زمینه به فعالیت پرداخت که در اینجا به آنها اشاره می‌شود (۹). البته هر دوی مراکز نامبرده بیشتر در عرصه ارتباطات فعالیت داشته و دارند. سال‌هاست که دانشجویان بسیاری در زمینه اطلاعات و محاسبات کوانتومی در دانشگاه‌های معتبر کشور مشغول به تحصیل و تحقیق هستند و لذا پتانسیل عظیمی از نیروی کار و تحقیق در این زمینه وجود دارد. با این حال در بخش پیاده‌سازی فیزیکی هنوز اقدام قابل توجهی صورت نگرفته است. بنابراین لازم است با رصد فناوری‌های کوانتومی در حوزه‌های مختلف (ارتباطات، محاسبات، شبیه‌سازی و...)، زمینه را برای سرمایه‌گذاری (دولت، صنعت، بخش خصوصی) برای تأمین زنجیره تجهیزات این حوزه در پژوهشگاه‌ها و دانشگاه‌ها جهت انجام تحقیقات در این زمینه و پیاده‌سازی رایانه‌های کوانتومی فراهم کرد.

* مقاله فوق برای مجله نشاء علم ارسال گردیده و مطالب آن (تمامی یا بخشی از آن) در جایی اعم از نشریات علمی-پژوهشی، علمی-ترویجی یا کنفرانس داخلی یا خارجی منتشر نشده است.

وبگاه‌های بازدید شده در این مقاله

- (1) <https://www.cbinsights.com/research/report/quantum-computing/>
- (2) <https://quantaforbreakfast.com/2016/08/19/quantum-computing-and-its-models/>
- (3) <https://www.airbus.com/qc-challenge.html>

- [15]. Albash, T. and Lidar, D.A. (2018). Adiabatic quantum computation. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 90, Issue 1, PP. 015002.
- [16]. Briegel, H., Browne, D., Dür, W. et al. (2009). Measurement-based quantum computation. *Nature Physics*, Vol. 5, PP. 19–26.
- [17]. Nayak, C., Simon, S.H., Stern, A., Freedman, M. and Das Sarma, S. (2008). *Reviews of Modern Physics*, Vol. 80, Issue 3, PP. 1083-1159.
- [18]. National Academies of Sciences, E.M. and Sciences, D.E.P. and Board, I.C.S. and Board, C.S.T. and Computing, C.T.A.F.I.Q. (2018). *Quantum Computing: Progress and Prospects*. Edited by: Horowitz, M. and Grumbling, E., National Academies Press, USA.
- [19]. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, Vol. 574, PP. 505–510.
- [20]. Neukart, Florian, et al. (2017). Traffic flow optimization using a quantum annealer, *Frontiers in ICT*, Vol. 4, No 29.
- F., Chuang, I.L. and Blatt, R. (2003). Implementation of the Deutsch–Jozsa algorithm on an ion-trap quantum computer. *Nature*, Vol. 421, PP. 48-50.
- [12]. Dicarlo, L., Chow, J.M., Gambetta, J.M., Bishop, L.S., Johnson, B.R., Schuster, D.I., Majer, J., Blais, A., Frunzio, L., Girvin, S.M. and Schoelkopf, R.J. (2009). Demonstration of two-qubit algorithms with a superconducting quantum processor. *Nature*, Vol. 460, PP. 240-244.
- [13]. Solenov, D., Brieler, J. and Scherrer, J. F. (2018). The Potential of Quantum Computing and Machine Learning to Advance Clinical Research and Change the Practice of Medicine. *Missouri Medicine*, Vol.115, No. 5, PP. 463–467.
- [14]. Allende López, Marcos; Da Silva, Marcelo Madeira, (2019), *Quantum Technologies: Digital Transformation, Social Impact, and Cross-sector Disruption*, ITE TechLab, Available at: <http://dx.doi.org/10.18235/0001613>

The History and Types of Quantum Computers

Saeed Nayeh^{*1}, Seyyed Nasibollah Dousti-Motlagh¹

The field of quantum computing is one of the areas of new technologies known as quantum technologies. Quantum technologies are based on the laws and principles of quantum physics that govern subatomic world. These laws and principles presented since 1900 and changed our viewpoint toward matter construction.

These principles and rules, since the second half of the twentieth century, have become the main parameters for formation of quantum technologies in many different fields such as electronics, medicine, and telecommunications and so on. Quantum computing is one of quantum technologies. Quantum computers are of very high computational power, being able to perform computations that take thousands of years with classical computers. Quantum computers do not have the limitations of classic computers. Although these computers, with absolute superiority over classic computers, have not been made yet, the built-in computers are highly efficient and have reached to commercial scale.

The announcement of one of the quantum computers companies (D-Wave Systems) for collaboration to find a cure for COVID-19 is an example of the feasibility and high efficiency of these computers. This high computing power can be used in many other areas, including agriculture, finance, and cyber security and so on.

In this article, after introducing quantum computers and their types in a simple and not so technical statement, we point out their potential applications in various fields. Furthermore, we present some suggestions for its implementation in our country.

Keywords: Quantum computation, Quantum computers, History, COVID-19, Medicine, Agriculture.

* Author for Correspondence, PhD in Physics, Tel: +98 21 22970349, E-mail: Snayeh@gmail.com

¹ Department of Defense Science and Technologies, Institute of Logistics and Defense Technology, Supreme National Defense University, Tehran, Iran