حسین داودی یگانه
رئیس مرکز محاسبات کوانتومی آریا کوانتا

فناوری‌های کوانتومی: معرفی، کاربردها و چالش‌ها
بخش اول

در حال حاضر ما در میانه انقلاب دوم کوانتومی قرار داریم. انقلاب اول کوانتومی با معرفی قوانین جدید که در پدیده‌های فیزیکی به درک آن‌ها کمک شایانی کرد. در انقلاب دوم کوانتومی با استفاده از این قوانین به توسعه فناوری‌های جدید پرداخته می‌شود. در اوایل قرن بیستم میلادی، قوانین فیزیک کلاسیک در توجیه مسائل بسیاری ازجمله تابش جسم سیاه ناکام ماند و نظریه مکانیک کوانتوم با تکیه‌بر پایه‌های جدید همچون دوگانگی موج-ذره، برنهی کوانتومی، گسسته بودن انرژی پاسخ این دست از مسائل را داد (فرنچ و همکاران، ۲۰۱۸).

با ظهور مکانیک کوانتومی، اولین انقلاب کوانتومی شکل گرفت که طی آن با استفاده از این قوانین فیزیک نیم‌رساناها کامل شد و در ادامه منجر به تولید ترانسیتورها گشت که پایه بسیاری از وسایل همچون رایانه‌ها و وسایل ارتباطی هستند. در حال حاضر مکانیک کوانتومی کاربردهای گسترده‌ای در علوم و فناوری‌های نوین دارد ، برای مثال یک ابزار کارآمد برای درک ساختار اتمی مولکول‌ها است. یکی از جنبه‌های بسیار کاربردی مکانیک کوانتومی در مجموعه فناوری‌های کوانتومی بروز کرده است. فناوری‌های کوانتومی از مهم‌ترین فناوری‌های حال حاضر به شمار می‌روند که در حال ایجاد انقلاب شگرفی در علوم و فناوری هستند. فناوری‌های کوانتومی بر مبنای استفاده از اصول فیزیک کوانتومی در جهت کنترل سیستم‌های میکروسکوپیک منفرد (مانند تک اتم یا تک فوتون) یا بس ذره‌ای (مانند اتم‌های به دام افتاده در شبکه‌های اپتیکی) بناشده‌اند. در فناوری‌های کوانتومی از اصول و پدیده‌هایی نظیر درهم‌تنیدگی، اصل عدم قطعیت و اصل برهم‌نهی

حالت‌های کوانتومی برای افزایش ظرفیت، سرعت، دقت و امنیت بهره گرفته می‌شود. مهم‌ترین شاخه‌های فناوری کوانتومی عبارت هستند از محاسبات و اطلاعات کوانتومی، شبیه‌سازی کوانتومی، مترولوژی و حسگرهای کوانتومی، زیست‌شناسی کوانتومی و ارتباطات کوانتومی.

محاسبات و اطلاعات کوانتومی

یکی از جنبه‌های بسیار کاربردی مکانیک کوانتومی در نظریه محاسبات و اطلاعات کوانتومی بروز کرده است که بیشتر بنام رایانه‌های کوانتومی شناخته می‌شود. اطلاعات دیجیتالی مانند چیزهای مادی هستند. صفرها و یک‌های کد دودویی می‌توانند به‌راحتی اندازه‌گیری شوند. اما اگر اطلاعاتی را به یک‌ذره کوانتومی نسبت دهیم، شروع به پیدا کردن یک سری خصوصیات غیر مأنوس و عجیب جهان کوانتوم می‌کند. رایانه‌های کوانتومی توانایی و دقت بالایی نسبت به مشابه‌های کلاسیکی خود در حل مسائل پیچیده ریاضیاتی و فیزیکی را دارا می‌باشند. دلیل اصلی کارایی این کامپیوترها مربوط به یک اصول کوانتومی درهم‌تنیدگی و برهم‌نهی است که اجازه محاسبات دقیق و سریع را می‌دهد. دلیل اینکه یک کامپیوتر کلاسیکی نمی‌تواند به‌طور مؤثر یک سیستم کوانتومی را شبیه‌سازی کند این است که برای ذخیره‌سازی حالت کوانتومی یک سیستم بزرگ به تعداد بسیار زیادی از حافظه‌های کلاسیکی احتیاج است زیرا که تعداد حالت و پارامترهای مربوط به آن به‌صورت نمایی رشد می‌کنند. هر سیستم محاسباتی دارای یک‌پایه اطلاعاتی است که نماینده کوچک‌ترین میزان اطلاعات قابل‌نمایش، چه پردازش‌شده و چه خام است. در محاسبات کلاسیک این واحد ساختاری را بیت می‌نامیم.
در محاسبات کوانتومی هم‌چنین پایه‌ای معرفی می‌شود که آن‌ها کیوبیت یا بیت کوانتومی می‌نامید. در حالت کلی به هر سیستم کوانتومی دوترازه را کیوبیت می‌نامیم ـ یک کیوبیت می‌تواند به‌طور هم‌زمان صفر و یک باشد. کامپیوترهای کوانتومی می‌توانند میلیون‌ها

دستور را در کسری از زمان محاسبه کنند و یا با شبیه‌سازی رفتار مواد تا سطوح اتمی انقلابی را در کشف مواد جدید به وجود آورند. کامپیوترهای کوانتومی می‌توانند، رمزنگاری و امنیت را با شکستن کدهای شکست‌ناپذیر بالا ببرند بنابراین امید می‌رود که باعث تقویت هر چه بیشتر اطلاعات هوش مصنوعی شوند. همچنین این رایانه‌ها در مسائل بهینه‌سازی، کشف داروها، مسائل رباتیک و صنایع نظامی کاربردهای فراوان دارند و توجه بسیاری معطوف به آن‌هاست (آسین و همکاران، ۲۰۱۸). پردازشگرهای کوانتومی امروزه توسط تعدادی از سیستم‌های فیزیکی (نظیر ابررسانا، یون‌های به دام افتاده، نقاط کوانتومی) قابل پیاده‌سازی هستند. پردازشگرهای کوانتومی که بر پایه چنین کیوبیت‌هایی تاکنون ساخته‌شده‌اند، قابلیت ارائه کردن بسیاری از الگوریتم‌ها و پروتکل‌های کوانتومی را دارند. توسعه یک کامپیوتر کوانتومی بزرگ با ویژگی‌های کامل، با چالش مقیاس‌پذیری مواجه می‌شود که باید متضمن یکپارچه‌سازی تعداد زیادی از کیوبیت‌ها و تصحیح خطاهای کوانتومی باشد. تلاش‌های رو به فزون پایدار در آزمایشگاه‌های علمی و شرکت‌های بزرگ، به‌وضوح نشانگر این موضوع هستند که محاسبات کوانتومی در مقیاس‌های بزرگ بسیار چالش‌برانگیز، و درعین‌حال دستیابی به آن، هدفی بسیار ارزشمند است (جیل و همکاران ۲۰۲۲).

شبیه‌سازی کوانتومی

طور کلی، شبیه‌سازی کلاسیکی سیستم‌های کوانتومی نیازمند منابع زیادی است که با بزرگ شدن اندازه سیستم افزایش پیدا می‌کند، زیرا بعد فضای هیلبرت (فضای کلاسیکی) با اندازه سیستم رابطه‌ای نمایی دارد. ازاین‌رو رایانه‌های کلاسیکی توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های کوانتومی را ندارند. شبیه‌سازی کوانتومی یک راهکار بهینه برای به دست آوردن رفتار فیزیکی سیستم‌های بزرگ و بس‌ذره‌ای است. در شبیه‌سازی کوانتومی با استفاده از یک سیستم کوانتومی شناخته‌شده و کنترل‌پذیر (شبیه‌ساز کوانتومی) به

مطالعه سیستم‌های که کنترل آن‌ها مشکل است پرداخته می‌شود. به دلیل کارایی بالایی که شبیه‌سازی کوانتومی درزمینه های مختلف همچون فیزیک ماده چگال ، فیزیک انرژی‌های بالا ، فیزیک اتمی و حتی کیهان‌شناسی دارد در مهروموم‌های اخیر بسیار موردتوجه قرارگرفته است.

می‌توان از شبیه‌سازی کوانتومی در ساخت کامپیوترهای کوانتومی بهره برد. با توجه به رشد فناوری در حال حاضر به‌کارگیری مؤثر شبیه‌سازی کوانتومی در دسترس است. کنیم. طبق تعریف شبیه‌سازهای کوانتومی وسایلی هستند که خود یک سیستم کوانتومی محسوب می‌شوند. به بیان ساده‌تر در شبیه‌سازی کوانتومی هدف یافتن حالت سیستم کوانتومی بعد از گذشت زمان t است. این حالت با استفاده از شبیه‌ساز کوانتومی قابل‌محاسبه است. در حالت کلی شبیه‌سازهای کوانتومی به دودسته عمده دیجیتال و آنالوگ دسته می‌شوند. در شبیه‌سازهای دیجیتال با استفاده از گیت‌های کوانتومی کار شبیه‌سازی انجام می‌شود اما در شبیه‌سازهای آنالوگ با تغییر روی خود شبیه‌ساز سیستم موردنظر شبیه‌سازی می‌شود به‌عبارت‌دیگر دینامیک سیستم را کپی می‌کند (بلوتا و همکاران، ۲۰۰۹).

حسگرهای کوانتومی

می‌توان با کنترل حالت‌های کوانتومی تک اتمی از آن‌ها به‌عنوان، حسگرهای کوانتومی استفاده کرد. با استفاده از فناوری کوانتومی حسگرهایی در اندازه یک اتم قابل ساخت هستند. خواص این حسگرها از خواص اپتیک کوانتومی و درهم‌تنیدگی کوانتومی ناشی می‌شود. در اپتیک کوانتومی، تصویربرداری با وضوح فوق‌العاده بالا امکان‌پذیر هست که در حسگرهای کوانتومی کاربرد فراوان دارد. ساعت‌های اتمی کوانتومی یکی از حسگرهای مطرح در فناوری کوانتومی است که در آن‌ها از فرکانس انتقال‌های الکترونی در نواحی

ریزموج، مرئی و فرابنفش در طیف الکترومغناطیسی اتم‌ها به‌عنوان فرکانسی استاندارد جهت زمان‌سنجی استفاده می‌شود.
در دهه‌های گذشته با استفاده از فرآیند خنک‌سازی لیزری، دما را تا حدود میکرو کلوین پائین آوردند تا اثرات ناشی از حرکت اتم‌ها حذف گردد که دقت آن به حدود یک ثانیه در طول عمر جهان رسیده است. ساعت‌های اتمی در نسل بعدی ماهواره‌های اکتشاف، اینترنت پرسرعت، مخابرات فضائی، بازار بورس وGPS مورداستفاده قرار خواهند گرفت. برای کنترل پهپادها، پایدارسازی عکس‌برداری، تعیین دقیق مکان قطب‌های زمین از حسگرهای چرخشی استفاده می‌شود. همچنین تصویربرداری از فعالیت درون و برون سلولی در ساختارهای زیستی، مانیتورینگ غیر مخرب فعالیت مغز و حسگرهای مغناطیسی به کار می‌روند. همچنین میدان گرانشی را با استفاده از حسگرهای گرانشی اندازه‌گیری می‌کنند. با کمک فناوری کوانتومی، می‌توان توانایی، حساسیت و مقاومت در برابر نویز حسگرهای گرانشی را افزایش داد و همچنین اندازه‌ی آن‌ها را بسیار کوچک کرد. از کاربردهای این حسگرها می‌توان به پیدا کردن لوله‌ها و مخازن آب زیرزمینی، مخازن زیرزمینی نفت و گاز و شکاف‌ها در زمین و مین‌ها، هواشناسی،کنترل ورود و خروج‌ها و حفاظت گیت‌ها اشاره کرد (دگن و همکاران، ۲۰۱۷).

زیست‌شناسی کوانتومی

با توجه به اینکه در مکانیک کوانتومی پدیده‌های میکروسکوپی بررسی می‌شود و از طرفی با توجه به ابعاد و مقیاس سیستم‌های زیستی می‌توان از مکانیک کوانتومی در توصیف رفتار سیستم‌های زیستی استفاده کرد چراکه ابعاد این سیستم در اندازه اتمی هستند. از مهم‌ترین مثال‌های این حوزه فرایند فتوسنتز است که نشان داده‌شده است وجود ویژگی‌های کوانتومی نظیر همدوسی و درهم‌تنیدگی کوانتومی منجر به انتقال انرژی با بازدهی بالا در آن می‌شود. همچنین مطالعات رفتار کوانتومی مغز را در حال انجام است.

مسیریابی پرندگان از همبستگی کوانتومی ناشی می‌شود. همچنین اثرات کوانتومی در DNA مشاهده‌شده است (لامبرت و همکاران، ۲۰۱۳).

ارتباطات کوانتومی

با توجه به رشد روزافزون ارتباط بر بستر رایانه‌ها و اینترنت محافظت از اطلاعات بسیار مهم است. عمده‌ترین روش برای محافظت از اطلاعات رمزگذاری آن‌هاست که با روش RSA انجام می‌شود. در این روش عامل‌های اول یک عدد مرکب به‌عنوان رمز انتخاب می‌شود. دلیل انتخاب این امر این است که یافتن عامل‌های اول با الگوریتم کلاسیکی بسیار دشوار است. با معرفی الگوریتم کوانتومی شور شکستن رمزها بسیار ساده شد و ازاین‌رو زنگ خطری برای ارتباطات هست. در حال حاضر پروتکل‌های ارتباطات کوانتومی بسیار موردتوجه است و سعی در ایجاد اینترنت کوانتومی هست (جیسین و همکاران، ۲۰۰۷).

اصول مکانیک کوانتومی

در فناوری‌های کوانتومی از اصول و قواعد مکانیک کوانتومی استفاده می‌شود تا بتوان کارکرد وسایل و صنایع را بهبود بخشید. این فناوری‌ها جز پیش‌روترین مباحث روز هستند و تحقیقات زیادی در این حوزه در حال انجام هست. ابتدا اصول و قواعد فیزیک کوانتوم را بیان می‌شود و سپس شاخه‌های اصلی این فناوری‌ها را بیان خواهد شد. مکانیک کوانتوم قسمتی از فیزیک است که در مورد رفتار ماده و ارتباط آن با انرژی در اندازه‌های در حد اتم و اجزای آن سروکار دارد. درواقع مکانیک کوانتوم با بی‌نهایت ریزها در طبیعت سروکار دارد و قوانین کلاسیک فیزیک در مورد این اجزاء اتمی کاربردی ندارند.

عدم قطعیت

در مکانیک کوانتومی بر اساس اصل عدم قطعیت نمی‌توان در مورد پدیده‌ها با قطعیت کامل اظهارنظر کرد و نتیجه اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌های مختلف به‌وسیله نظریه احتمال تعبیر می‌شود و این اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، خاصیت بنیادین و گریزناپذیر جهان است. به بیان ساده دو کمیت فیزیکی که وابسته به هم هستند را نمی‌توان به‌طور هم‌زمان اندازه گرفت، یک مثال از این کمیت‌ها مکان ذره کوانتومی و تکانه(سرعت) آن است که نمی‌توان آن‌ها را به‌طور هم‌زمان و دقت دلخواه اندازه‌گیری کرد.

برهم‌نهی کوانتومی

حالت سیستم کوانتومی می‌تواند برحسب تمام زیر حالت‌ها بیان شود یعنی یک سیستم در یک‌زمان می‌تواند به‌طور هم‌زمان در دو یا چند حالت باشد.

درهم‌تنیدگی

در هم تنیدگی کوانتومی یک پدیده است، که توسط مکانیک کوانتومی قابل توصیف است. این پدیده در ذراتی مانند الکترون و فوتون ها... اتفاق می‌افتد، و عبارت است از این‌که خواص مکانیکی دو ذره جفت شده باشند یا به عبارتی این ذرات پیشتر با هم در اندرکنش بوده و سپس از هم دیگر جدا شدند. این اندرکنش فیزیکی مربوط به خواصی نظیر مکان، تکانه و اسپین و غیره می باشد، به‌گونه‌ای که با تعیین هرکدام از خواص برای یکی از ذرات همان خاصیت در دیگری تعیین می‌شود. به زبان ساده اگر دو ذره درهم‌تنیده باشند با اندازه‌گیری روی ذره اول می‌توان اطلاعاتی از ذره دوم به دست آورد.

ناهمدوسی

در حالت کلی یک سیستم کوانتومی با محیط اطراف خود اندرکنش دارد ک این امر منجر به از بین رفتن برهم‌نهی کوانتومی حالت کوانتومی می‌شود که از این پدیده به نام ناهمدوسی یاد می‌شود.توجه شود که این مبانی و اصول مکانیک کوانتومی در فیزیک کلاسیک وجود ندارد.

فناوری‌های کوانتومی در ایران

با توجه به رشد روزافزون ارتباط بر بستر رایانه‌ها و اینترنت محافظت از اطلاعات بسیار مهم است. عمده‌ترین روش برای محافظت از اطلاعات رمزگذاری آن‌هاست که با روش RSA انجام می‌شود. در این روش عامل‌های اول یک عدد مرکب به‌عنوان رمز انتخاب می‌شود. دلیل انتخاب این امر این است که یافتن عامل‌های اول با الگوریتم کلاسیکی بسیار دشوار است. با معرفی الگوریتم کوانتومی شور شکستن رمزها بسیار ساده شد و ازاین‌رو زنگ خطری برای ارتباطات هست. در حال حاضر پروتکل های ارتباطات کوانتومی بسیار موردتوجه است و سعی در ایجاد اینترنت کوانتومی هست. در سال‌های اخیر بخش عمده سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در فناوری‌های کوانتومی در قالب پروژه‌های تحقیق محور و از سوی مؤسسات تحقیقاتی یا دولت‌ها انجام‌شده است. اندازه بازار محصولات فناوری‌های کوانتومی تا سال ۲۰۳۰، ۱۸ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود. در منطقه خاورمیانه سه کشور ایران، اتحادیه عرب و رژیم اشغالگر قدس از سال ۲۰۰۰ میلادی بامطالعه بر روی علم فیزیک کوانتوم فعالیت خود را آغاز کرده‌اند. اتحادیه عرب و قرارداد با شرکت‌های داخلی و مایکروسافت برای مشارکت با سرمایه ۱۵۰ میلیون دلاری فعالیت‌های در این زمینه داشتند

با توجه به نقش و اهمیت فناوری‌های کوانتومی در سال‌های اخیر در کشور تلاش‌هایی در این زمینه انجام‌گرفته است. درزمینه مطالعات نظری از سال‌های ۱۳۸۰ کارهای بسیاری در دانشگاه‌های کشور نظیر صنعتی شریف، تبریز، تهران، کردستان انجام‌شده و

هم‌اکنون نیز در حال انجام است. به لحاظ پیاده‌سازی آزمایشگاهی با تأسیس مرکز فناوری‌های کوانتومی در سازمان انرژی اتمی اولین گام برداشته شد. در این مرکز شاخه‌های فناوری کوانتومی در بستر آزمایشگاهی در حال پیاده‌سازی هست. برای مثال آزمایش ایجاد فوتون‌های درهم‌تنیده و فرآیند تله پورت کوانتومی در این مرکز به انجام رسیده است. در کنار این مرکز مراکزی در دانشگاه‌های تهران و صنعتی شریف در حال آماده‌سازی آزمایشگاهی برای مطالعه تجربی این فناوری هستند. کاربرد این فناوری در ارتش، مخابرات، وزارت دفاع، سپاه و سایر نیروهای مسلح و وزارت اطلاعات و بخش‌هایی نظیر این‌ها و هرجایی که نیاز داشته باشند است که می‌خواهند اطلاعات رمزگذاری شده ارسال کنند ازاین‌رو اهمیت این موضوع دوچندان می‌شود.