



راهنمای جامع ایده‌های استارت‌آپی در حوزه فناوری کوانتوم

چکیده

فناوری کوانتوم یکی از مهم‌ترین موج‌های تحول فناوری در قرن بیست‌ویکم به شمار می‌رود. این فناوری با بهره‌گیری از اصول فیزیک کوانتومی مانند Entanglement، Superposition و Interference، امکان حل برخی مسائل پیچیده را فراهم می‌کند که رایانه‌های کلاسیک در آن ناکارآمد هستند.

کاربردهای فناوری کوانتوم تنها به رایانه‌های کوانتومی محدود نمی‌شود. این فناوری در حوزه‌هایی مانند بهینه‌سازی، هوش مصنوعی، امنیت سایبری، رمزنگاری، کشف دارو، طراحی مواد پیشرفته، انرژی، لجستیک و خدمات مالی کاربردهای گسترده‌ای دارد. به همین دلیل، دولت‌ها و شرکت‌های بزرگ فناوری سرمایه‌گذاری‌های قابل‌توجهی در این حوزه انجام داده‌اند و استارت‌آپ‌های متعددی در حال تبدیل دستاوردهای علمی کوانتوم به محصولات و خدمات تجاری هستند.

در این مقاله، ۸ ایده استارت‌آپی کاربردی و پرپتانسیل در حوزه فناوری کوانتوم را بررسی می‌کنیم. برای هر ایده، سه استارت‌آپ موفق واقعی معرفی شده‌اند و فعالیت‌ها، دستاوردها و مزیت‌های آن‌ها به‌طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است تا تصویری روشن از فرصت‌های کسب‌وکار در این صنعت نوظهور ارائه شود.

۱	چکیده
۳	Quantum Security as a Service (امنیت کوانتومی به عنوان سرویس)
۳	سه استارتاپ برجسته
۳	Quantum Drug Discovery Platform (پلتفرم کشف دارو با کوانتوم)
۳	سه استارتاپ برجسته
۴	Quantum Sensing Hardware/Software (سنسورهای کوانتومی)
۴	سه استارتاپ برجسته
۴	پلتفرم آموزش و talent کوانتوم
۵	بهینه‌سازی کوانتومی برای لجستیک و مالی
۵	سه استارتاپ برجسته
۶	Hybrid Quantum-Classical Cloud Platform (پلتفرم ابری هیبریدی کوانتوم-کلاسیک)
۶	سه استارتاپ برجسته
۶	ابزارهای یادگیری ماشین کوانتومی (Quantum Machine Learning Tools)
۶	سه استارتاپ برجسته
۷	QRNG (Quantum Random Number Generator)
۷	سه استارتاپ برجسته
۷	انتخاب ایده و مسیر موفقیت استارتاپی

Quantum Security as a Service (امنیت کوانتومی به عنوان سرویس)

این ایده بر حفاظت از داده‌ها در برابر کامپیوترهای کوانتومی آینده تمرکز دارد. الگوریتم‌های فعلی مانند RSA ممکن است شکسته شوند (پدیده Harvest Now, Decrypt Later). این استارت‌آپ‌ها سرویس مهاجرت به Post-Quantum Cryptography (رمزنگاری پسا کوانتومی)، شبیه‌سازی QKD و ارزیابی ریسک ارائه می‌دهند.

بازار هدف: بانک‌ها، دولت‌ها و شرکت‌های حساس به داده.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **PQShield** (انگلستان): یکی از پیشروترین شرکت‌های جهان در زمینه رمزنگاری پسا کوانتومی. این شرکت راه‌حل‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری quantum-resistant ارائه می‌دهد و اولین شرکتی بود که رمزنگاری کوانتوم مقاوم را روی چیپ‌ها، اپلیکیشن‌ها و cloud پیاده‌سازی کرد. PQShield در استانداردسازی بین‌المللی الگوریتم‌های PQC نقش کلیدی داشته و اخیراً Suite UltraPQ را برای رعایت استانداردهای NSA CNSA ۲.۰ عرضه کرده است. این شرکت با سرمایه‌گذاری ۳۷ میلیون دلاری Series B، محصولاتش را برای IoT، خودرو و زیرساخت‌های حیاتی گسترش داده است.

- **ISARA** (کانادا): متخصص در مدیریت ریسک رمزنگاری و انتقال به امنیت کوانتومی ISARA. ابزارهایی مانند ISARA Advance برای فهرست‌برداری خودکار دارایی‌های رمزنگاری و ISARA Radiate برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های استاندارد NIST ارائه می‌دهد. این شرکت با بیش از یک دهه تجربه، به سازمان‌های دولتی و enterprise کمک می‌کند تا crypto-agility خود را افزایش دهند و در برابر تهدیدات کوانتومی مقاوم شوند. همکاری اخیر این شرکت با Carahsoft دسترسی به بخش عمومی آمریکا را تسهیل کرده است.

- **CryptoNext Security** (فرانسه): پیشرو اروپایی در کتابخانه‌های PQC.

این شرکت اولین کتابخانه پسا کوانتومی در اتحادیه اروپا است که گواهی‌نامه NIST برای همه الگوریتم‌های استاندارد را دریافت کرده است. CryptoNext راه‌حل‌های crypto-agile برای مهاجرت آسان ارائه می‌دهد و پروژه‌هایی مانند پیام‌رسان ultra-secure برای ارتش فرانسه و بلاکچین پسا کوانتومی اجرا کرده است. تمرکز آن بر امنیت زیرساخت‌های حیاتی و embedded systems است.

Quantum Drug Discovery Platform (پلتفرم کشف دارو با کوانتوم)

کامپیوترهای کوانتومی مولکول‌ها را با دقت بالا شبیه‌سازی می‌کنند و زمان/هزینه کشف دارو را کاهش می‌دهند.

کاربردها: سرطان، آلزایمر و درمان‌های شخصی‌سازی‌شده.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **Menten AI**: پیشگام طراحی پروتئین با استفاده از محاسبات کوانتومی و یادگیری ماشین. این شرکت اولین پروتئین طراحی‌شده روی کامپیوتر کوانتومی را ساخت و با همکاری D-Wave و Xanadu، الگوریتم‌های ترکیبی کوانتومی-کلاسیک را برای طراحی زنجیره‌های کوتاه از اسیدهای آمینه (پپتیدهای درمانی) توسعه داده است. Menten AI زمان و هزینه طراحی دارو را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد و به فضای شیمیایی جدیدی دسترسی ایجاد کرده که با روش‌های کلاسیک غیرممکن بود.

- **PolarisQB Polaris Quantum Biotech**: ارائه‌دهنده پلتفرم QuADD برای کشف دارو با کمک کوانتوم. این شرکت از quantum annealing (همکاری با D-Wave) برای جستجو در فضای شیمیایی عظیم (تا ۳۰^{۱۰} مولکول) استفاده می‌کند و کتابخانه‌های بهینه‌شده از مولکول‌های candidate تولید می‌نماید. quantum annealing به معنی بازپخت کوانتومی است یعنی یافتن بهترین پاسخ از میان حالت‌های ممکن

برای حل مسائل بهینه سازی. PolarisQB زمان شناسایی داروهای پیش‌بالینی را از سال‌ها به ماه‌ها کاهش داده و روی معیارهایی مانند نفوذ سد خونی-مغزی، سمیت و اتصال تمرکز دارد.

- **Qubit Pharmaceuticals:** توسعه‌دهنده پلتفرم ATLAS برای شبیه‌سازی دقیق مولکول‌ها با دقت کوانتومی. این شرکت با ترکیب الگوریتم‌های کوانتومی و هوش مصنوعی، فرآیند کشف دارو را تسریع می‌کند و پروژه‌های مشترکی با شرکت‌های داروسازی بزرگ دارد.

Quantum Sensing Hardware/Software (سنسورهای کوانتومی)

سنسورهای کوانتومی دقت بسیار بالاتری نسبت به سنسورهای کلاسیک ارائه می‌دهند. **کاربردها:** تصویربرداری پزشکی، نقشه‌برداری معدنی، ناوبری بدون GPS.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **Qnami** (سوئیس): رهبر جهانی در quantum sensing با استفاده از مراکز NV در الماس. این شرکت ابزارهای تصویربرداری nanoscale مغناطیسی ارائه می‌دهد که برای nanotechnology، life science و earth science کاربرد دارد. Qnami از nano-fabrication الماس کوانتومی و نرم‌افزار analytics پیشرفته استفاده می‌کند و محصولاتش دقت بی‌سابقه‌ای در اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی ضعیف فراهم می‌کنند.
- **Atomionics** (سنگاپور): متخصص در گراویمترهای کوانتومی و ناوبری. این شرکت با ترکیب quantum sensing و AI، مدل‌های سه‌بعدی دقیق از زیرسطح زمین می‌سازد و به اکتشاف معدنی، انرژی و ناوبری بدون GPS کمک می‌کند. سرمایه‌گذاری BHP Ventures نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن در صنعت منابع است.
- **Nomad Atomics** (استرالیا): توسعه‌دهنده گراویمترهای کوانتومی قابل حمل برای عملیات میدانی. این شرکت اولین absolute quantum gravimeter (گرانش سنج کوانتومی مطلق) جهان را برای شرایط واقعی ساخته که دقت و پایداری بالایی دارد و در معدن، نظارت بر ذخیره CO₂ و تشخیص نشتی لوله‌ها کاربرد پیدا کرده است.

پلتفرم آموزش و talent کوانتوم (Quantum Education & Talent Platform)

کمبود متخصص کوانتوم یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی است.

محصول: دوره‌های عملی، شبیه‌سازها و بازار کار تخصصی.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **Q-CTRL (Black Opal):** ارائه‌دهنده پیشرو پلتفرم آموزشی تعاملی Black Opal. این پلتفرم کاربران را از سطح مبتدی به برنامه‌نویسی واقعی کامپیوترهای کوانتومی می‌رساند و شامل شبیه‌ساز پیشرفته، صدها فعالیت عملی و کاربردهای واقعی در لجستیک، فایننس، دارو و امنیت سایبری است. Black Opal برای workforce development سازمانی طراحی شده، از LMS پشتیبانی می‌کند و در دانشگاه‌هایی مانند University of Hull نتایج یادگیری را تا ۸۵٪ بهبود بخشیده است. این پلتفرم به عنوان یکی از کامل‌ترین ابزارهای آموزشی صنعت شناخته می‌شود.
- **QURECA:** شرکت پیشرو در آموزش و توسعه نیروی کار کوانتومی. این استارت‌آپ دوره‌های آنلاین، آموزش‌های سفارشی برای کسب‌وکارها و برنامه‌های همکاری با دانشگاه‌ها و شرکت‌ها ارائه می‌دهد. QURECA بر تبدیل افراد از صفر به متخصصان آماده بازار کار تمرکز دارد و محتوای خود را با مشارکت کارشناسان صنعت و

دانشگاه‌ها تولید می‌کند. این شرکت به سازمان‌ها کمک می‌کند تا سریع‌تر quantum-ready شوند و در سطح جهانی فعال است.

- **Strangeworks:** پلتفرم جامعه‌محور و مستقل از سخت‌افزار که دسترسی آسان به ابزارهای کوانتومی و آموزشی فراهم می‌کند. این شرکت از سال ۲۰۱۸ فعالیت خود را شروع کرده و علاوه بر آموزش، راه‌حل‌های بهینه‌سازی ترکیبی (کلاسیک + quantum-inspired) عرضه می‌کند. شرکت Strangeworks به سازمان‌ها و دولت‌ها کمک می‌کند تا بدون پیچیدگی فنی، از فناوری کوانتوم استفاده کنند و پلتفرم آن برای کاربران غیرمتخصص نیز مناسب است.

بهینه‌سازی کوانتومی برای لجستیک و مالی (Quantum Optimization for Logistics & Finance)

حل مسائل پیچیده NP-Hard مانند مسیریابی و بهینه‌سازی پورتفولیو.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **Multiverse Computing** (اسپانیا): بزرگ‌ترین ارائه‌دهنده نرم‌افزار کوانتومی اروپا با بیش از ۱۶۰ متخصص. پلتفرم Singularity این شرکت، الگوریتم‌های الهام‌گرفته از محاسبات کوانتومی (quantum-inspired) را برای مسائل بهینه‌سازی و هوش مصنوعی ارائه می‌کند. این شرکت پلتفرم CompactifAI را توسعه داده است؛ فناوری‌ای که می‌تواند مدل‌های زبانی بزرگ (LLMها) را تا بیش از ۹۰ درصد فشرده کند و هزینه‌های آموزش (Training) و استنتاج (Inference) را بیش از ۵۰ درصد کاهش دهد. Multiverse در صنایعی مانند فاینانس، انرژی، لجستیک و دفاع، کاربردهای عملی و تجاری دارد و اخیراً حضور خود را در سانفرانسیسکو با گسترش دفتر این شرکت تقویت کرده است.
- **D-Wave:** پیشرو جهانی در quantum annealing با کاربردهای عملی در دنیای واقعی. quantum annealing به معنی بازپخت کوانتومی است یعنی یافتن بهترین پاسخ از میان حالت‌های ممکن برای حل مسائل بهینه‌سازی. این شرکت با شرکت‌هایی مانند Volkswagen برای بهینه‌سازی لجستیک همکاری کرده و سیستم‌های annealing خود را برای حل مسائل بهینه‌سازی بزرگ مقیاس ارائه می‌دهد. D-Wave یکی از معدود شرکت‌هایی است که محصولاتش در محیط‌های تولیدی و تجاری بصورت عملیاتی استفاده می‌شود.
- **Zapata Computing:** در ارائه راهکارهای بهینه‌سازی ترکیبی برای سازمان‌های بزرگ تخصص دارد. پلتفرم Orquestra این شرکت، گردش کارهای ترکیبی بین سیستم‌های کوانتومی و کلاسیک را مدیریت می‌کند و در حوزه‌هایی مانند لجستیک، خدمات مالی و صنایع مختلف کاربرد دارد. نکته مهم این است که Zapata خودش بیشتر نرم‌افزار و پلتفرم مدیریتی ارائه می‌کند، نه اینکه لزوماً سازنده سخت‌افزار کوانتومی باشد. به همین دلیل نقش آن بیشتر شبیه یک «لایه نرم‌افزاری» بین کسب‌وکارها و فناوری‌های کوانتومی است.

Hybrid Quantum-Classical Cloud Platform (پلتفرم ابری هیبریدی کوانتوم-کلاسیک)

لایه واسط ساده برای دسترسی شرکت‌ها به کوانتوم بدون نیاز به سخت‌افزار گران.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **Zapata Computing**: توسعه‌دهنده پلتفرم Orquestra است؛ پلتفرمی که استفاده از گردش کارهای هیبریدی را برای سازمان‌ها و شرکت‌های بزرگ آسان‌تر می‌کند. این شرکت مجموعه‌ای از ابزارهای سرتاسری (End-to-End) برای ترکیب محاسبات کلاسیک و کوانتومی ارائه می‌دهد و تمرکز آن بر کاربردهای عملی و صنعتی است.
- **Agnostiq**: شرکتی است که در زمینه محاسبات کوانتومی امن و حفظ حریم خصوصی داده‌ها تخصص دارد. پلتفرم این شرکت به سازمان‌ها امکان می‌دهد محاسبات حساس را در محیط‌های ابری هیبریدی اجرا کنند، در حالی که امنیت و محرمانگی داده‌ها حفظ می‌شود.
- **Strangeworks**: یک پلتفرم مستقل از سخت‌افزار است که بهترین ابزارهای محاسباتی مختلف را — اعم از کلاسیک، الهام‌گرفته از کوانتوم و کوانتومی — بدون وابستگی به یک تأمین‌کننده خاص در اختیار کاربران قرار می‌دهد. این شرکت به سازمان‌های بزرگ کمک می‌کند از همین امروز از فناوری‌های پیشرفته ارزش تجاری کسب کنند و در عین حال برای آینده محاسبات کوانتومی آماده باشند.

ابزارهای یادگیری ماشین کوانتومی (Quantum Machine Learning Tools)

ترکیب ML با محاسبات کوانتومی برای مدل‌های قدرتمندتر.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **Xanadu**: سازنده PennyLane است؛ یکی از شناخته‌شده‌ترین فریم‌ورک‌ها برای یادگیری ماشین کوانتومی (Quantum Machine Learning) و Differentiable Programming.
- PennyLane با اکثر سخت‌افزارهای کوانتومی، از جمله رایانه‌های کوانتومی فوتونی، سازگار است و به پژوهشگران و توسعه‌دهندگان امکان می‌دهد شبکه‌های عصبی کوانتومی ایجاد کرده و آموزش دهند. به همین دلیل، بسیاری آن را «TensorFlow دنیای کوانتوم» می‌نامند.
- **Zapata AI**: پلتفرم Orquestra را برای کاربردهای یادگیری ماشین کوانتومی سازمانی (Enterprise QML) ارائه می‌دهد. این شرکت ابزارهای هیبریدی (ترکیبی) را توسعه داده است که با استفاده از تکنیک‌های کوانتومی، عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی را بهبود می‌بخشند و تمرکز آن بر حل مسائل واقعی در صنایع مختلف است.
- **Terra Quantum**: متخصص در ابزارهای hybrid QML (یادگیری ماشین کوانتومی ترکیبی) برای فاینانس، بهینه‌سازی و کشف دارو. این شرکت الگوریتم‌های پیشرفته‌ای ارائه می‌دهد که عملکرد مدل‌های کلاسیک را با کمک کوانتوم افزایش می‌دهد.

QRNG (Quantum Random Number Generator)

(تولیدکننده اعداد تصادفی کوانتومی)

تولید اعداد واقعاً تصادفی برای امنیت، شبیه‌سازی و گیمینگ.

سه استارت‌آپ برجسته:

- **ID Quantique** (سوئیس): پیشرو جهانی بازار QRNG با چیپ‌های تجاری که حتی در گوشی‌های سامسونگ استفاده شده است. این شرکت راه‌حل‌های سخت‌افزاری و ابری امن ارائه می‌دهد و در استانداردسازی امنیت کوانتومی نقش کلیدی دارد.
- **Quintessence Labs** (استرالیا): ارائه‌دهنده دستگاه‌ها و API‌های QRNG (تولیدکننده اعداد رندوم تصادفی کوانتومی)، با تمرکز بر کاربردهای دفاعی و فینانس. این شرکت فناوری‌های پیشرفته‌ای برای تولید اعداد رندوم با کیفیت بالا توسعه داده است.
- **Quantum Dice** (انگلستان): شرکتی است که مولدهای اعداد تصادفی کوانتومی (QRNG) مبتنی بر فناوری DISC-certified را توسعه می‌دهد. این فناوری DISC، قابلیت خود-اعتبارسنجی دارد؛ یعنی می‌تواند به‌طور مداوم کیفیت و تصادفی بودن خروجی خود را بررسی و تأیید کند و تلاش می‌کند اطمینان دهد که خروجی تولیدشده واقعاً تصادفی و مناسب کاربردهای حساس مانند رمزنگاری، امنیت و برخی کاربردهای پیشرفته هوش مصنوعی باشد. این شرکت اخیراً در حوزه محاسبات احتمالاتی و کاربردهای هوش مصنوعی نیز سرمایه‌گذاری کرده و برای توسعه فناوری خود موفق به دریافت گرنت‌های تحقیقاتی اروپایی شده است.

انتخاب ایده و مسیر موفقیت استارت‌آپی

این ۸ ایده طیف متنوعی از فرصت‌ها را پوشش می‌دهند — از نرم‌افزاری کم‌هزینه (امنیت، آموزش) تا سخت‌افزاری پیچیده (سنسور، QRNG). موفقیت در هر کدام از این ۸ ایده، به حل مشکل واقعی بازار، تیم قوی (فیزیکدان+مهندس+بیزینس) و استفاده هوشمند از cloud‌های موجود بستگی دارد. فناوری کوانتوم هنوز در مراحل اولیه تجاری‌سازی است، اما سرعت پیشرفت آن بالاست. کارآفرینانی که تعادل مناسبی بین نوآوری فنی و نیاز بازار ایجاد کنند، موقعیت بسیار خوبی خواهند داشت.