فصلنامهٔ پژوهش‌های برنامه و توسعه مقالهٔ پژوهشی

سیاست‌گذاری کوانتومی: سناریوپردازی در بستر عدم‌قطعیت‌ها و تلاطم‌های محیطی کسب‌وکار

مرتضی هادی‌زاده*/ آیدین سلام‌زاده/ منوچهر انصاری*** **
بابک محمدحسینی** / ویتور براگا*****

سال ششم، شمارهٔ ۲۲، تابستان ۱۴۰۴ تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

چکیده

سازمان‌ها و کسب و کارها در دنیای کنونی با شتابِ روند تحولات فناوری و تغییرات اقتصادی، بیش‌ازپیش با چالش‌هایی مواجه هستند که منشأ آنها به‌طورعمده عدم قطعیت‌های پیچیده و متغیر محیطی است. این پژوهش با یک رویکرد نوآورانه و برمبنای ارائهٔ روش‌های مؤثر برای مواجهه با عدم قطعیت‌های ساختاریافته و پویا، به بررسی کاربرد اصول مکانیک کوانتومی در مدیریت استراتژیک و پیش‌بینی رفتارهای اقتصادی می‌پردازد و نشان می‌دهد که تحلیل کوانتومی مبتنی بر رهیافت از علم فیزیک چگونه می‌تواند به شناسایی و مدیریت بهتر عدم قطعیت‌ها کمک کند. این تحقیق بااستفاده از دو حالت مختلف مدار کوانتومی، تأثیر تعاملات پیچیده و ناپایداری‌های اقتصادی بر سیستم‌های کسب و کار ارزیابی شده است: حالت اول، به تحلیل تعاملات گسترده می‌پردازد، حالت دوم نیز بر تعاملات محدود و خاص متمرکز است. نتایج نشان می‌دهند که مدارهای کوانتومی قادرند سناریوهای متعددی را در زمینه‌های اقتصادی تحلیل کرده و سناریوهای کاهش ریسک و بهبود تصمیم‌گیری‌های استراتژیک را هدایت کنند. بهره‌گیری از این فناوری نوین، امکان درک عمیق‌تری از پیچیدگی‌های محیطی و تعاملات موجود را به شرکت‌ها اعطاء می‌کند تا فرآیندهای تصمیم‌گیری را بهینه کرده و فرصت‌های جدیدی را کشف کنند. استفاده از تحلیل‌های کوانتومی دقیق، فرصت‌های جدیدی برای کاهش ریسک و بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مکانیک کوانتومی، مدیریت استراتژیک، تحلیل عدم قطعیت، مدل‌سازی کوانتومی، سیاست‌گذاری پویا

---

* دانشجوی دورهٔ دکتری رشتهٔ مدیریت بازرگانی، گرایش مدیریت سیاست‌گذاری بازرگانی، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، ایران.

** دانشیار، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، ایران (عضو هیئت‌علمی مدعو پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران)، (نویسندهٔ مسئول). Email: salamzadeh@ut.ac.ir

*** دانشیار، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، ایران (عضو هیئت‌علمی مدعو پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران).

**** دانشیار، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) (عضو هیئت‌علمی مدعو پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران)

***** دانشیار، سی‌آی‌سی‌ای‌اس‌آی، دانشکدهٔ علوم و فناوری، پلی‌تکنیک پورتو، ۴۶۱۰ فلگویراس، پرتغال (عضو هیئت‌علمی مدعو پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران)

طبقه‌بندی JEL: O33, C63, D81

مقدمه

اکوسیستم‌های کسب و کار در مواجهه با تحولات مستمر فناورانه، نوسانات اقتصادی، تغییرات ژئوپلیتیکی و دگرگونی‌های اجتماعی، به محیط‌هایی با پویایی بالا و درجهٔ پیچیدگی فزاینده تبدیل شده‌اند (Bondeli & Havenvid, 2022). این دگرگونی‌ها منجر به شکل‌گیری محیطی شده است که در آن، مدل‌های کلاسیک برنامه‌ریزی استراتژیک و پیش‌بینی بازار دیگر قابلیت کامل و جامعی را در مواجهه و پاسخ‌گویی مؤثر به تغییرات سریع ندارند (Liu, 2013). در چنین بستری، شناخت به‌هنگام و مدیریت عدم قطعیت‌های محیطی نه‌تنها یک ضرورت؛ بلکه عاملی تعیین‌کننده در شناسایی فرصت‌های نوظهور و بهره‌گیری از آنها محسوب می‌شود (Agrawal, 2014). عدم قطعیت در اکوسیستم‌های کسب و کار می‌تواند در سطوح و ابعاد مختلفی تجلی یابد؛ از تغییرات سریع در الگوهای مصرف و نیازهای بازار گرفته تا ظهور فناوری‌های تحول‌آفرینی که پویایی قواعد رقابتی را دگرگون می‌سازند. در این چارچوب، کسب و کارهایی که به‌جای مقابله با این عدم قطعیت‌ها، آنها را به‌عنوان بخشی ذاتی از سیستم اقتصادی بپذیرند، قادر خواهند بود با افزایش انعطاف‌پذیری شناختی و عملیاتی، به تحلیل روندهای کلان و شناسایی فرصت‌های راهبردی بپردازند. علاوه‌براین، در شرایطی که مدل‌های کلاسیک قادر به پیش‌بینی دقیق نیستند، نیاز به چارچوب‌های تحلیلی جدید برای درک رفتارهای پیچیده و غیرخطی اقتصادی احساس می‌شود (Roggema, 2012; St-Pierre et al., 2023).

در این زمان که محیط دچار نوسانات شدید و آشوب‌های گسترده می‌شود، شناخت صحیح و به‌موقع عدم قطعیت‌ها برای تحقق اهداف کسب و کار پیچیده‌تر می‌شود؛ چراکه همین عوامل در بسترهای متلاطم، دستخوش تغییرات مداوم قرار می‌گیرند (Malinowska et al., 2017). در چنین شرایطی، روش‌های سنتی تحلیل محیط و داده، کارآیی لازم را نخواهند داشت. ازاین‌رو، صاحبان کسب و کار نیازمند رویکردهایی دقیق‌تر و پویاتر برای درک ماهیت عدم قطعیت‌ها هستند (Enrique et al., 2022). در این راستا، باید به‌دنبال ساختاری باشیم که بتواند پاسخ‌گوی این

رویکرد باشد؛ به‌گونه‌ای که شناخت عدم قطعیت‌های محیطی را امکان‌پذیر ساخته و به پیش‌برد دقیق اهداف کسب و کار کمک کند (Johnsen, 2023).

بهره‌گیری از اصول مکانیک کوانتومی به‌عنوان یک چارچوب نظری میان‌رشته‌ای، می‌تواند زمینه‌ای نوین برای درک بهتر عدم قطعیت‌ها، نوسانات بازار و تصمیم‌گیری در شرایط آشوب فراهم کند (Abdullah et al., 2024). در این تحقیق، مفاهیم بنیادین مکانیک کوانتومی نظیر اصل عدم قطعیت، آنتروپی و برهم‌نهی، نه تنها به‌عنوان مفاهیم فیزیکی؛ بلکه به‌عنوان ابزارهای تحلیلی برای تبیین رفتارهای غیرخطی و پویای اقتصادی، مورداستفاده قرار گرفته‌اند (Clark, D. R., & Hunt, 2024; Anjaria, 2024). این مفاهیم به کسب و کارها کمک می‌کنند تا با شناخت بهتر الگوهای تغییرات محیطی، سناریوهای احتمالی آینده را تحلیل کرده و استراتژی‌های تطبیق‌پذیرتری تدوین کنند. براین‌اساس، اصول کوانتومی به‌مثابهٔ ابزاری برای توسعهٔ مدل‌های تصمیم‌گیری در محیط‌های پرریسک و ناپایدار معرفی شده‌اند.

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ که نشان‌دهندهٔ محدودیت ذاتی در اندازه‌گیری هم‌زمان برخی پارامترهای یک سیستم است، در محیط‌های اقتصادی نیز نمود پیدا می‌کند؛ زیرا در بازارهای پرنوسان اطلاعات ناقص، وابستگی‌های غیرخطی و تغییرات ناگهانی، پیش‌بینی‌پذیری را به چالش می‌کشند (Clark & Hunt, 2024). در چنین شرایطی، کسب و کارها نیازمند رویکردهای تصمیم‌گیری احتمالاتی هستند که امکان سناریوپردازی دقیق‌تر و تدوین استراتژی‌های انطباق‌پذیر در مواجهه با عدم قطعیت را فراهم آورد. آنتروپی کوانتومی نیز که میزان بی‌نظمی و پیچیدگی سیستم‌های فیزیکی را اندازه‌گیری می‌کند، در تحلیل محیط‌های اقتصادی اهمیت یافته است؛ زیرا افزایش رقابت، نوآوری‌های فناورانه و تغییرات سریع بازار، منجر به رشد بی‌نظمی و افزایش پویایی در سیستم‌های اقتصادی می‌شود (Kak, 2007; Hou et al., 2024). این پویایی، فرصت‌هایی را برای ایجاد حالت‌های متنوع رشد و تحول در کسب و کارها فراهم می‌کند. در این میان، ماتریس چگالی به‌عنوان ابزاری برای توصیف سیستم‌های چندحالته، الگویی مناسب برای تحلیل شرایط عدم قطعیت و توسعهٔ راه‌کارهای تصمیم‌گیری تطبیقی ارائه می‌دهد (Blum, 2012). استفاده از تحلیل ماتریسی داده‌ها و مدل‌سازی تطبیقی در شبکه‌های اقتصادی، به کسب و

کارها این امکان را می‌دهد تا به‌جای تکیه بر مدل‌های خطی و سنتی، مسیرهای احتمالی مختلفی را برای رشد و توسعه بررسی کرده و در محیط‌های پویای امروزی انعطاف بیشتری نشان دهند.

با وجود رشد نظریات مفهومی درخصوص کاربرد مفاهیم فیزیک کوانتوم در علوم انسانی، مطالعات تجربی یا مدل‌محور در حوزهٔ مدیریت کسب و کار؛ به‌ویژه در زمینهٔ تحلیل عدم قطعیت با بهره‌گیری از ساختارهای کوانتومی، همچنان محدود است. این پژوهش با هدف پرکردن این خلأ، تلاش دارد تا ازطریق طراحی و پیاده‌سازی مدل‌های عملیاتی بر پایهٔ مدارهای کوانتومی، گامی کاربردی در جهت توسعهٔ چارچوب‌های تصمیم‌گیری تطبیق‌پذیر در محیط‌های پیچیده بردارد. ما در این پژوهش بر آنیم با طراحی و پیاده‌سازی مدارهای کوانتومی، درکی عمیق‌تر از نحوهٔ بهره‌گیری از ویژگی‌ها و ساختارهای نظریهٔ کوانتوم در حوزهٔ سیاست‌گذاری پویا به‌دست آوریم. برای دستیابی به فهمی جامع و دقیق از نحوهٔ ارتباط و تعامل میان‌رشته‌ای میان مفهوم «عدم قطعیت» در علوم مدیریت و مفهوم مشابه آن در فیزیک کوانتوم، ابتدا در بخش ادبیات نظری به تحلیل و تبیین این مفاهیم خواهیم پرداخت. هدف از این بخش، شناسایی و برجسته‌سازی نقاط اشتراک و هم‌پوشانی مفهومی میان این دو حوزه است؛ به‌نحوی‌که فرآیند سیاست‌گذاری، زمینه‌ای نظری و علمی برای هم‌گرایی و کاربرد عملی اصول کوانتومی ایجاد شود. در ادامه، در بخش روش‌شناسی پژوهش، بااستفاده از پیاده‌سازی مدارها و معادلات کوانتومی، به بررسی امکان ابزارسازی نظریهٔ کوانتوم برای حل مسائل پیچیده و چندمتغیره در سیاست‌گذاری خواهیم پرداخت؛ مسائلی که به‌دلیل ماهیت پویا و عدم قطعیت ذاتی، نیازمند رویکردهایی نوآورانه و تطبیق‌پذیر هستند.

ادبیات نظری

سیاست‌گذاری و مدیریت استراتژیک در شرایط عدم قطعیت

در دنیای امروز، عدم قطعیت یکی از چالش‌های اساسی در سیاست‌گذاری و مدیریت استراتژیک محسوب می‌شود. تصمیم‌گیرندگان در سازمان‌ها و دولت‌ها با تغییرات سریع محیطی، اقتصادی و تکنولوژیکی‌ای مواجه هستند که پیش‌بینی و برنامه‌ریزی را دشوار می‌سازد (Lipshitz, 1996; Cieslak et al., 2023). این چالش، ضرورت

اتخاذ استراتژی‌های جدید برای مدیریت عدم قطعیت را دوچندان کرده است. عدم قطعیت در مدیریت استراتژیک به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن، تصمیم‌گیرندگان با اطلاعات ناقص، تغییرات سریع و نتایج غیرقابل پیش‌بینی روبه‌رو هستند (Furr & Eisenhardt, 2021). طبق مطالعهٔ لیپشیتز و استراس[1]، عدم قطعیت را می‌توان به سه دستهٔ اصلی تقسیم کرد: عدم درک کافی که ناشی از اطلاعات ناقص و پیچیدگی سیستم‌ها است، اطلاعات ناتمام که به کمبود داده‌ها و اطلاعات موردنیاز برای تصمیم‌گیری اشاره دارد و گزینه‌های نامشخصی که در وجود مسیرهای متعدد با تفاوت‌های جزیی نمود پیدا می‌کند (Lipshitz & Strauss, 1997).

مدیریت عدم قطعیت در علم مدیریت با تغییرات رویکردها و نظریه‌های مختلفی همراه بوده است. در اوایل قرن بیستم، مدیریت علمی و رویکردهای کلاسیک براساس اصول فایول و تیلور بر برنامه‌ریزی دقیق و کنترل سیستماتیک تأکید داشتند. در این دوران، عدم قطعیت به‌عنوان یک اختلال در سیستم‌های مدیریتی درنظر گرفته می‌شد و تلاش برای حذف یا کاهش آن، ازطریق استانداردسازی فرآیندها، افزایش کارآیی و طراحی ساختارهای بوروکراتیک انجام می‌شد. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، نظریهٔ سیستم‌ها و نظریهٔ احتمالات وارد حوزهٔ مدیریت شد و رویکرد مدیریت به‌جای حذف عدم قطعیت، به‌سمت پذیرش آن حرکت کرد. مطالعاتی مانند (Lipshitz, 1996; Uduji, 2014; Parker, 2016) نشان دادند که تصمیم‌گیرندگان به‌طور طبیعی از روش‌های مختلفی برای کنارآمدن با عدم قطعیت استفاده می‌کنند. همچنین، مدل‌های ریاضی و تحلیل تصمیم‌گیری احتمالاتی، نقش مهمی در مدیریت ریسک ایفاء کردند.

در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، مطالعات اقتصاد رفتاری نشان دادند که تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت نه‌تنها به تحلیل ریاضی؛ بلکه به عوامل شناختی و روان‌شناختی وابسته است (Manne & Zywicki, 2013). محققانی مانند تورسکی و کانمن[2] به بررسی سوگیری‌های شناختی در تصمیم‌گیری پرداختند و نشان دادند که مدیران در شرایط عدم قطعیت، اغلب براساس الگوهای رفتاری خاصی تصمیم

۱. Lipshitz & Strauss

۲. Tversky & Kahneman

می‌گیرند؛ مانند استفاده از شهود یا استدلال‌های ذهنی ساده‌سازی‌شده. با ورود به قرن ۲۱، نظریه‌های مدیریت تطبیقی و چابک برای مقابله با پیچیدگی و تغییرات سریع محیطی توسعه یافتند. مطالعهٔ (Schoemaker & Krupp, 2015) نشان می‌دهد که مدیران امروزی برای موفقیت در شرایط عدم قطعیت باید دارای توانایی‌هایی نظیر پیش‌بینی تغییرات، یادگیری مستمر و اتخاذ تصمیمات، انعطاف‌پذیر باشند.

یکی از مفاهیم کلیدی در این حوزه، نظریهٔ قابلیت‌های پویاست که پیشنهاد می‌کند مدیران باید به‌جای تلاش برای حذف کامل عدم قطعیت، بر توسعهٔ قابلیت‌های سازگاری و انعطاف‌پذیری سازمان تمرکز کنند (Teece et al., 1997; Workman et al., 2021). این رویکرد بر مفهوم پایداری پویا در چارچوب سیستم‌های تطبیقی پیچیده تأکید دارد که در آن، سازمان‌ها با حفظ انعطاف‌پذیری، می‌توانند عملکرد خود را در شرایط متغیر محیطی حفظ کنند (Uhl-Bien & Marion, 2008). همچنین، مدیریت سناریو به‌عنوان یکی از ابزارهای حیاتی برای مواجهه با عدم قطعیت معرفی می‌شود که به مدیران امکان می‌دهد مجموعه‌ای از سناریوهای آینده را توسعه داده و استراتژی‌های خود را براساس احتمالات مختلف تنظیم کنند (Wack, 1985, Harandi, A., & Hadizadeh, 2024).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر مدل‌های سیستم‌های تطبیقی پیچیده بر فرآیند تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند (Pei et al., 2024). نظریهٔ سیستم‌های تطبیقی پیچیده[1] و چارچوب‌های مرتبط با آن، مانند مدل اینترپرایس آرچیتکچر[2] بر پایهٔ تفکر سیستم‌های تطبیقی پیچیده[3]، ابزارهای مفیدی برای تحلیل تعاملات غیرخطی و مدیریت محیط‌های ناپایدار ارائه می‌دهند. به‌ویژه، استفاده از چارچوب‌هایی مانند سی‌ناف[4] به سازمان‌ها کمک می‌کند تا محیط‌های پیچیده، آشفته و نامنظم را تحلیل و درک کنند و درنتیجه، مسیرهای بالقوهٔ رشد را شناسایی کرده و ریسک‌های ناشی از تغییرات ناگهانی بازار را کاهش

۱. Complex Adaptive Systems (CAS) Theory

۲. Enterprise Architecture

۳. Complex Adaptive Systems Thinking – Enterprise Architecture (CAST-EA)

۴. Cynefin

دهند (Rabaey, 2016; Salamzadeh et al., 2024). علاوه‌براین، تحقیقات جدید نشان داده‌اند که سرمایه‌گذاری در توسعهٔ قابلیت‌های پویا و فرآیندهای انعطاف‌پذیر، به سازمان‌ها امکان می‌دهد در مواجهه با عدم قطعیت، تصمیم‌گیری‌های سازگارتر و اثربخش‌تری انجام دهند (Soltani & Izquierdo, 2019). در سطح عملی، بسیاری از شرکت‌های پیشرو در صنایع مختلف از روش‌های پیشرفتهٔ تحلیل عدم قطعیت بهره می‌برند. به‌عنوان مثال در صنعت مالی، مدل‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تحلیل حساسیت به‌منظور پیش‌بینی نوسانات بازار و ارزیابی ریسک‌های مالی به‌کار گرفته می‌شوند (Glasserman, 2004; Hadizadeh et al., 2024). در صنعت تولید، روش‌های مدیریت زنجیرهٔ تأمین تطبیقی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مواجهه با عدم قطعیت در تقاضا یا عرضهٔ مواد اولیه مورداستفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها به شرکت‌ها کمک می‌کنند تا با شرایط متغیر بازار به‌طور مؤثرتری سازگار شوند. همچنین، در حوزهٔ سیاست‌گذاری عمومی، استفاده از تحلیل سناریو و برنامه‌ریزی تطبیقی منجر به تدوین راهبردهایی شده است که در مواجهه با عدم قطعیت، از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردارند (van der Heijden, 2005; Mohammadhosseini et al., 2021).

مدیریت عدم قطعیت از رویکردهای سنتی کاهش ریسک در اوایل قرن بیستم، به مدل‌های تطبیقی و انعطاف‌پذیر قرن بیست‌ویکم تکامل یافته است. امروزه، تصمیم‌گیرندگان نه‌تنها به تحلیل‌های کمّی؛ بلکه به درک شناختی و رفتاری در تصمیم‌گیری نیاز دارند. پذیرش عدم قطعیت به‌عنوان یک ویژگی ذاتی محیط کسب و کار و توسعهٔ توانایی‌های انطباقی، نقش کلیدی‌ای در موفقیت مدیران ایفاء می‌کند (Teece et al., 2016). باتوجه به رشد فناوری‌های نوین، بسیاری از سازمان‌ها برای بهبود پیش‌بینی‌های خود از تحلیل داده‌های کلان استفاده می‌کنند (Mikalef et al., 2018; Salamzadeh et al., 2024). ترکیب تحلیل‌های داده‌محور با مدل‌های شناختی تصمیم‌گیری، می‌تواند منجر به ایجاد استراتژی‌هایی شود که نه‌تنها دربرابر تغییرات مقاومت نشان می‌دهند؛ بلکه از آنها به‌عنوان فرصتی برای نوآوری و مزیت رقابتی بهره می‌برند (Brynjolfsson & McAfee, 2014). درنتیجه، آیندهٔ مدیریت عدم قطعیت نه‌تنها به استفاده از تکنیک‌های تحلیلی پیچیده‌تر وابسته خواهد بود؛

بلکه برای مدیریت بهتر در محیط‌های ناپایدار مستلزم توسعهٔ مهارت‌های شناختی، انعطاف‌پذیری سازمانی و رویکردهای بین‌رشته‌ای است (Uhl-Bien & Arena, 2018).

جدول ۱. روند تکاملی مدیریت عدم قطعیت و کاربردهای آن در سیاست‌گذاری و مدیریت استراتژیک

دورهٔ زمانی	ویژگی‌های کلیدی	مدل‌ها و ابزارهای مرتبط	کاربردهای عملی
سال‌های اخیر	نظریهٔ آشوب، مدل‌های تطبیقی پیچیده، تحلیل داده‌های کلان، سناریوسازی	مدل‌های پیچیدگی، تحلیل شبکه‌ای، مدیریت ریسک پیشرفته، کلان‌داده	تحلیل پیشرفتهٔ داده‌ها، پیش‌بینی بازارهای مالی، تصمیم‌گیری بلادرنگ
اوایل قرن ۲۱	مدیریت تطبیقی، تفکر چابک، پیش‌بینی تغییرات، یادگیری مستمر	مدل‌های تصمیم‌گیری تطبیقی، سناریوپردازی، مدیریت چابک	مدیریت بحران، انعطاف‌پذیری سازمانی، استراتژی‌های چابک
اوایل قرن ۲۰	مدیریت علمی، استانداردسازی فرآیندها، کاهش عدم قطعیت ازطریق کنترل سیستماتیک	مدیریت علمی فایول و تیلور، ساختارهای بوروکراتیک	افزایش بهره‌وری صنعتی، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید
دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰	اقتصاد رفتاری، توجه به عوامل شناختی، سوگیری‌های شناختی در تصمیم‌گیری	نظریهٔ تصمیم‌گیری رفتاری، مدل‌های شناختی، استدلال شهودی	بهینه‌سازی سیاست‌های اقتصادی، بهبود تصمیم‌گیری در شرایط پرریسک
دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰	نظریهٔ سیستم‌ها، تحلیل احتمالاتی، پذیرش نسبی عدم قطعیت	تحلیل سیستماتیک، مدل‌های احتمالاتی، نظریهٔ تصمیم‌گیری ریاضی	مدیریت ریسک مالی، تحلیل عدم قطعیت در پروژه‌های کلان

اصول مکانیک کوانتومی و تفسیر آن در چارچوب تحلیل عدم قطعیت

مکانیک کوانتومی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین نظریه‌های فیزیکی قرن بیستم، انقلابی در درک ماهیت واقعیت فیزیکی و بنیادهای دانش بشری ایجاد کرده است.

این نظریه، برخلاف مکانیک کلاسیک که بر پیش‌بینی‌پذیری قطعی و قوانین تعین‌گرایانه استوار است، نشان می‌دهد که عدم قطعیت به‌عنوان یک ویژگی ذاتی سیستم‌های کوانتومی، نقشی محوری در تعیین وضعیت و تکامل آنها ایفاء می‌کند. توسعهٔ این چارچوب نظری توسط دانشمندانی همچون ورنر هایزنبرگ، اروین شرودینگر و پل دیراک، تأثیر شگرفی بر حوزه‌هایی نظیر نظریهٔ اطلاعات کوانتومی، محاسبات کوانتومی، کیهان‌شناسی کوانتومی و تحلیل سیستم‌های آشوبناک داشته است (Busemeyer & Wang, 2017).

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ و محدودیت‌های بنیادی اندازه‌گیری

اصل عدم قطعیت که توسط هایزنبرگ در سال ۱۹۲۷ ارائه شد، بنیانی‌ترین محدودیت در اندازه‌گیری هم‌زمان متغیرهای مزدوجی مانند موقعیت و تکانه را بیان می‌کند. این اصل، برخلاف برداشت‌های کلاسیک که عدم دقت اندازه‌گیری را به نقصان ابزار نسبت می‌دادند، تأکید دارد که چنین عدم قطعیتی در سطح بنیادی واقعیت فیزیکی نهفته است؛ بنابراین، هر اندازه‌گیری‌ای نه‌تنها موجب کشف یک متغیر؛ بلکه موجب آشفتگی در متغیر دیگر می‌شود که این امر در فرآیندهای اپتیک کوانتومی، نظریهٔ آشوب کوانتومی و فناوری‌های حسگرهای فوق دقیق کوانتومی نقش اساسی دارد (Houston & Tedford, 2017).

عدم قطعیت در درهم‌تنیدگی کوانتومی: پیامدهای فیزیکی و اطلاعاتی

درهم‌تنیدگی کوانتومی که اینشتین از آن به‌عنوان «کنش شبح‌وار از راه دور» یاد می‌کرد، یکی از شاخص‌ترین ویژگی‌های نظریهٔ کوانتومی است که ارتباط نزدیکی با مفهوم عدم قطعیت دارد. در این پدیده، وضعیت کوانتومی دو یا چند ذره به‌گونه‌ای به یکدیگر مرتبط است که اندازه‌گیری یکی از آنها بلافاصله وضعیت دیگری را تعیین می‌کند؛ حتی اگر فاصلهٔ آنها به‌میزان کیهانی افزایش یابد. این مفهوم که پایهٔ نظریهٔ اطلاعات و محاسبات کوانتومی است، نشان می‌دهد که اطلاعات را می‌توان به‌طور غیرمحلی توزیع کرد؛ درحالی‌که همچنان مشمول محدودیت‌های عدم قطعیت است (Lee & Wexler, 1999).

عدم قطعیت در نظریهٔ اطلاعات کوانتومی: مرزهای پردازش و انتقال اطلاعات

نظریهٔ اطلاعات کوانتومی یکی از زمینه‌هایی است که به‌شدت از اصل عدم قطعیت تأثیر پذیرفته است. در این حوزه، اندازه‌گیری یک بیت کوانتومی (کیوبیت) موجب تغییر حالت آن می‌شود که این خاصیت، اساس امنیت ارتباطات کوانتومی را تشکیل می‌دهد. در پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی‌ای مانند BB84، تلاش برای استراق‌سمع منجر به تغییر در حالت کوانتومی می‌شود و این موضوع قابلیت شناسایی هرگونه نفوذ را تضمین می‌کند. ازسوی دیگر در محاسبات کوانتومی، اصل عدم قطعیت محدودیت‌هایی در دقت پردازش اطلاعات ایجاد می‌کند؛ اما هم‌زمان امکانات جدیدی را برای پردازش اطلاعات در مقیاس‌های عظیم فراهم می‌آورد (Busemeyer & Wang, 2017).

عدم قطعیت در نظریهٔ آشوب کوانتومی و سیستم‌های دینامیکی پیچیده

نظریهٔ آشوب کلاسیک نشان می‌دهد که سیستم‌های دینامیکی؛ به‌ویژه آنهایی که معادلات غیرخطی دارند، نسبت به شرایط اولیه به‌شدت حساس هستند. این حساسیت در مکانیک کوانتومی به‌دلیل عدم قطعیت ذاتی نظریهٔ کوانتومی پیچیدگی بیشتری پیدا می‌کند. پژوهش‌های اخیر در حوزهٔ آشوب کوانتومی نشان داده‌اند که رفتار سیستم‌های غیرخطی کوانتومی تحت‌تأثیر عدم قطعیت، با فرآیندهای کلاسیکی متفاوت است و این تفاوت‌ها در مدل‌های تحلیل دینامیکی پدیده‌هایی نظیر رفتارهای اقلیمی، فرآیندهای زیستی و دینامیک جمعیت‌ها مشاهده می‌شود (Ko et al., 2015).

عدم قطعیت در مکانیک کوانتومی نه‌تنها یک مفهوم ریاضیاتی؛ بلکه یک ویژگی بنیادین طبیعت است که در حوزه‌های مختلف علمی پیامدهای عمیقی دارد. از نظریه‌های اطلاعاتی و رمزنگاری گرفته تا پدیده‌های کیهانی و آشوب کوانتومی، این مفهوم چارچوبی نظری برای فهم بهتر سیستم‌های پیچیده و غیرخطی ارائه می‌دهد (Huang & Huang, 2018). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که اصول عدم قطعیت می‌توانند ابزارهای قدرتمندی برای توسعهٔ رایانش کوانتومی، بهینه‌سازی امنیت سایبری و تحلیل پدیده‌های آشوبناک فراهم کنند (Fang, Ming, & Wang, 2021). به‌عنوان مثال، نظریهٔ آشوب کوانتومی به‌کمک اصل عدم قطعیت، در سیستم‌های

پیچیده به درک بهتر رفتارهای غیرقابل پیش‌بینی کمک می‌کند (Zelditch, 2019). با پیشرفت فناوری‌های کوانتومی، انتظار می‌رود که فهم ما از این اصول گسترش یابد و مرزهای دانش را در زمینه‌های فیزیک، محاسبات و ارتباطات به سطح جدیدی برساند (Husain, Kothawala, & Seahra, 2012).

جدول۲. عدم قطعیت در پدیده‌های کوانتومی

موضوع	تعریف	کاربردها	عدم قطعیت در مواجهه با موضوع
اصل عدم قطعیت هایزنبرگ	بیان می‌کند که اندازه‌گیری هم‌زمان دو متغیر مزدوج، مانند موقعیت و تکانه، با دقت کامل امکان‌پذیر نیست.	استفاده در طراحی حسگرهای کوانتومی، مدل‌سازی سیستم‌های اقتصادی و تصمیم‌گیری.	عدم امکان اندازه‌گیری هم‌زمان و دقیق موقعیت و تکانه، محدودیت ذاتی در پیش‌بینی آیندهٔ سیستم.
عدم قطعیت در درهم‌تنیدگی کوانتومی	ذرات در یک سیستم درهم‌تنیده بدون توجه به فاصله، در یک حالت مشترک قرار دارند که وضعیت آنها تنها پس‌از اندازه‌گیری مشخص می‌شود.	کاربرد در رمزنگاری کوانتومی، ارتباطات فوق امن و رایانش کوانتومی.	حالت نامعلوم هر ذره تا لحظهٔ اندازه‌گیری، تأثیرپذیری از مشاهده و تغییر وضعیت لحظه‌ای.
عدم قطعیت در نظریهٔ اطلاعات کوانتومی	عدم قطعیت در اندازه‌گیری یک کیوبیت، منجر به تغییر حالت آن شده و بر رمزنگاری کوانتومی و پردازش اطلاعات تأثیر دارد.	افزایش امنیت سایبری، توسعهٔ رایانش کوانتومی و بهینه‌سازی ارتباطات.	تأثیر مشاهده‌گر بر کیوبیت، تغییر حالت اطلاعاتی در هنگام اندازه‌گیری، محدودیت‌های پردازش اطلاعات.
عدم قطعیت در نظریهٔ آشوب کوانتومی	عدم قطعیت در سیستم‌های غیرخطی‌ای که دارای حساسیت بالا به شرایط اولیه هستند و رفتار آیندهٔ آنها	تحلیل مدل‌های اقلیمی، فرآیندهای زیستی و دینامیک اجتماعی.	پیش‌بینی‌ناپذیری در سیستم‌های دینامیکی پیچیده، حساسیت بالا به شرایط اولیه و تغییرات تصادفی.

	پیش‌بینی‌ناپذیر است.		

اگرچه ادبیات نوظهور پیرامون کاربرد مفاهیم کوانتومی در علوم مدیریت و تصمیم‌گیری راهبردی طی دهۀ گذشته رشد قابل‌توجهی داشته است؛ اما همچنان با خلأهای قابل‌ملاحظه‌ای در زمینۀ تبیین نظری یکپارچه و پیاده‌سازی‌های عملی مواجه هستیم. مطالعاتی نظیر (Refaa, 2023) نشان می‌دهند که بیشتر تحقیقات فعلی در سطح مفهومی باقی مانده و تمرکز آنها بیشتر بر امکان‌سنجی نظری فناوری‌های کوانتومی در محیط‌های سازمانی است تا پیاده‌سازی‌های عملیاتی. بررسی صورت‌گرفته توسط (Taiwo et al., 2025) به‌طور انتقادی نشان داده است که اگرچه هم‌گرایی رایانش کوانتومی با هوش مصنوعی نوید حل مسائل پیچیدۀ کسب و کار را می‌دهد؛ اما مسیرهای پیاده‌سازی واقعی هنوز به‌وضوح تبیین نشده‌اند. همچنین (Li, 2018) تأکید کرده است که مطالعات موجود بیشتر به معرفی مدل‌های تئوریک بازی‌های کوانتومی و تعاملات چندعاملی محدود شده‌اند و کمتر به موضوعات قابل تعمیم در سیستم‌های واقعی تصمیم‌گیری پرداخته‌اند. ازسوی دیگر، پژوهش‌هایی نظیر (Korzh, 2024) ضمن تحلیل نقش فناوری‌های کوانتومی در فرآیندهای نوآوری، از نیاز به استانداردسازی جهانی و ارتقای همکاری میان دولت و صنعت برای بهره‌برداری از این فناوری‌ها سخن گفته‌اند. این گسست میان نظریه و عمل در مطالعات پیشین، ضرورت ارائۀ مدل‌هایی را دوچندان می‌کند که هم از بنیان نظری برخوردار باشند و هم امکان پیاده‌سازی آنها در زمینه‌های واقعی وجود داشته باشد.

مطالعۀ حاضر با تمرکز بر مدل‌سازی سناریوهای تصمیم‌گیری در بستر کوانتومی و اعتبارسنجی آنها ازطریق خبرگان، تلاشی در جهت پرکردن این خلأ پژوهشی به‌شمار می‌رود. درواقع، یکی از نوآوری‌های کلیدی این تحقیق، تلفیق اصول نظری فیزیک کوانتومی با منطق تصمیم‌سازی مدیریتی در محیط‌های دارای عدم قطعیت بالا است؛ رویکردی که در مطالعات پیشین کمتر به‌صورت نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفته است.

نوآوری پژوهش

ماهیت غیرخطی و وابستگی متقابل این متغیرها، روش‌های کلاسیک مدل‌سازی و تحلیل را با محدودیت‌های جدی‌ای مواجه می‌سازد. مدل‌های سنتی نه‌تنها به حجم پردازشی بالایی نیاز دارند؛ بلکه در مواجهه با سیستم‌های دارای تعاملات پیچیده و غیرخطی، دقت و کارآیی خود را ازدست می‌دهند. محاسبات کوانتومی با بهره‌گیری از اصولی مانند برهم‌نهی[1] و درهم‌تنیدگی[2]، قابلیت پردازش موازی را افزایش داده و از چنین سیستم‌هایی امکان مدل‌سازی بهینه‌تری را فراهم می‌کند. این فناوری به‌ویژه در تحلیل عدم قطعیت، بهینه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری و کشف روابط پیچیده میان متغیرها، بسیار مؤثر است. همچنین در بسیاری از موارد، مدل‌های سنتی برای انجام تحلیل‌های بهینه‌سازی و حل مسائل پیچیده به زمان بسیار زیادی نیاز دارند. به‌عنوان مثال، مسائل مربوط به بهینه‌سازی زنجیرهٔ تأمین یا تجزیه و تحلیل رفتار بازارهای مالی، به‌طور هم‌زمان نیازمند پردازش میلیون‌ها داده هستند که در سیستم‌های کلاسیک می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های محاسباتی شود. محاسبات کوانتومی این امکان را فراهم می‌کند که به‌جای بررسی تک‌تک گزینه‌ها، تمامی سناریوهای ممکن به‌طور هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گیرند که این امر موجب افزایش سرعت و دقت تحلیل‌ها می‌شود.

در بسیاری موارد، مدل‌های سنتی کسب و کار قادر به پیش‌بینی دقیق این تغییرات نیستند؛ زیرا وابستگی‌های متقابل میان عوامل مختلف موجب می‌شود که یک تغییر جزیی در یک متغیر، اثرات گسترده و غیرقابل‌پیش‌بینی‌ای در سایر بخش‌های سیستم ایجاد کند. این موضوع به‌ویژه در صنایعی مانند بازارهای مالی، زنجیره‌های تأمین جهانی و تحلیل‌های اقتصادی کلان بسیار حائز اهمیت است؛ بنابراین، استفاده از فناوری‌های نوظهوری که بتوانند این پیچیدگی‌ها را مدل‌سازی کرده و بهینه‌سازی کنند، ضروری به‌نظر می‌رسد.

---

۱. Superposition

۲. Entanglement

روش پژوهش

در این پژوهش، ما در فضای کسب و کار با محیطی کاملاً پویا و پیچیده مواجه هستیم که در آن، عوامل متعددی مانند نرخ تورم، دسترسی به فناوری‌های نوظهور، محدودیت‌های زنجیرهٔ تأمین، نوسانات نرخ ارز، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و تغییرات در الگوهای تقاضا که به‌طور مداوم درحال تغییر هستند. این متغیرها نه‌تنها به‌صورت مجزا اهمیت دارند؛ بلکه تعاملات آنها با یکدیگر می‌تواند اثرات پیچیده و غیرخطی‌ای بر عملکرد کلی کسب و کار داشته باشد. این تعاملات پیچیده، نیاز به ابزارهای پیشرفتهٔ محاسباتی را برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار سیستم افزایش می‌دهد. ما درصدد بودیم با بهره‌گیری از الگوریتم‌های کوانتومی و مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری مبتنی بر پارامترهای درحال تغییر محیطی، ساختار پیچیدهٔ کسب و کارها در ایران را شبیه‌سازی کنیم. در این راستا، تحلیل آنتروپی محیطی بااستفاده از آنالیز کوانتومی مورد بررسی قرار گرفت. این فرآیند با مشارکت جامعهٔ خبرگان انجام شد. پس‌از اجرای الگوریتم‌های کوانتومی و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی، داده‌های به‌دست‌آمده به جامعهٔ خبرگان عرضه شد. این مرحله به‌منظور بررسی دقت و صحت نتایج و اعتبارسنجی تحلیل‌های انجام‌شده صورت گرفت. از خبرگان پژوهش درخواست شد تا باتوجه به سطح اشراف تخصصی خود بر موضوع و با درنظرگرفتن تحلیل‌های ایجادشده، در فرآیند سناریوپردازی و نظام حل مسائل کسب و کار مبتنی بر الگوریتم‌های کوانتومی مشارکت کنند. هدف این مرحله، ارزیابی حالات مختلف سناریویی و تحلیل پیامدهای بالقوهٔ مدل‌های پیشنهادی در چارچوب تصمیم‌گیری و مدیریت عدم قطعیت بود.

باتوجه به ماهیت میان‌رشته‌ای پژوهش حاضر، طراحی دقیق ساختار تیم خبرگان به‌عنوان یکی از ارکان اصلی موفقیت پروژه مدنظر قرار گرفت. هدف این بود که اطمینان حاصل شود تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران نه‌تنها به درک عمیقی از فرآیندها و مفاهیم علمی پژوهش دست یابند؛ بلکه بتوانند نتایج به‌دست‌آمده را در قالب سیاست‌های اجرایی و کاربردی ترجمه و به‌کار بندند. ازاین‌رو، ترکیب اعضای پنل خبرگان به‌گونه‌ای انجام شد که هریک از آنها، علاوه بر تخصص حرفه‌ای، دارای پیشینه‌ای قوی در مدیریت، برنامه‌ریزی و تصمیم‌سازی در محیط‌های پیچیده و فناوری‌محور باشند. در این چارچوب، تیم خبرگان به دو بخش اصلی تقسیم شد:

گروه اول، شامل فیزیک‌دانان متخصص در حوزهٔ محاسبات کوانتومی، نظریهٔ اطلاعات کوانتومی و طراحی مدارهای کوانتومی بود. این افراد از استادان دانشگاهی و متخصصان حوزهٔ فناوری‌های کوانتومی محسوب می‌شوند. این افراد دارای تجربهٔ انجام پروژه‌های پژوهشی-کاربردی درزمینهٔ الگوریتم‌های کوانتومی، شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده و پیاده‌سازی سامانه‌های رمزنگاری کوانتومی هستند. گروه دوم را خبرگان حوزهٔ سیاست‌گذاری علم و فناوری، استادان دانشگاهی، مدیران عالی‌رتبهٔ دولتی و مشاوران ارشد نهادهای سیاست‌گذار تشکیل دادند. این گروه متشکل از افرادی با سابقهٔ مدیریت اجرایی در سطح ملی بوده که در تدوین سیاست‌های کلان علم و فناوری، طراحی چارچوب‌های حکمرانی فناوری‌های نوظهور، مدیریت پروژه‌های ملی فناوری و هدایت نهادهای میان‌دستگاهی، سابقهٔ درخشانی دارند. از مجموع ۱۵ عضو پنل خبرگان، ۴ نفر از فیزیک‌دانان برجستهٔ حوزهٔ محاسبات کوانتومی و ۱۱ نفر از سیاست‌گذاران بودند. تمامی این افراد دارای بیش‌از ۱۰ سال سابقهٔ مدیریتی در سطوح عالی تصمیم‌گیری و درک عمیق از چالش‌های سیاست‌گذاری در محیط‌های پیچیده و پرعدم‌قطعیت بودند. انتخاب ۱۵ نفر از خبرگان ازطریق نمونه‌گیری هدفمند (Purposive Sampling) و مبتنی بر رویکرد اشباع نظری (Theoretical Saturation) صورت گرفت. چون موضوع تحقیق در حوزه‌ای میان‌رشته‌ای میان مدیریت، سیاست‌گذاری و محاسبات کوانتومی قرار دارد، به‌صورت طبیعی جامعهٔ هدف بسیار تخصص‌محور و محدود بود. تمرکز اصلی در این نوع مطالعات به‌جای کمّیت نمونه بر کیفیت اطلاعات تخصصی و عمق تحلیل قرار دارد. ازاین‌رو، دو معیار اساسی در گزینش شرکت‌کنندگان مدنظر قرار گرفت: ۱) تسلط تخصصی در یکی از دو حوزهٔ محوری پژوهش (محاسبات کوانتومی یا سیاست‌گذاری فناوری) و ۲) تجربهٔ مدیریتی و تصمیم‌گیری در محیط‌های پرعدم‌قطعیت و فناورانه. این معیارها منجر به تشکیل پنلی از افراد با صلاحیت بالا و تجارب مکمل شد. همچنین طی فرآیند گردآوری داده‌ها، مشخص شد که پس‌از مصاحبه و مشارکت ۱۵ نفر، محتوای نظری جدیدی به داده‌ها افزوده نمی‌شود و تحلیل‌ها به سطحی از تکرار رسید که براساس اصول پژوهش کیفی، به‌عنوان نقطهٔ اشباع نظری تلقی می‌شود. این یافته مؤیّد آن است که حجم نمونهٔ انتخاب‌شده ازنظر کفایت داده‌ای، پوشش مفهومی و اعتبار تحلیل، پاسخ‌گوی نیاز پژوهش بوده و قابلیت اتکای نتایج حفظ‌شده را دارد.

استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی در حل مسئله

در این پژوهش، برای تحلیل تعاملات پیچیدهٔ میان متغیرهای کسب و کار از مدارهای کوانتومی استفاده شده است. به‌طور خاص، گیت‌های هادامارد[۱] برای ایجاد توزیع یکنواخت حالت‌ها و بررسی احتمالات مختلف و گیت‌های سی‌نات[۲] برای مدل‌سازی روابط بین متغیرها مورداستفاده قرار گرفته‌اند. این مدل کوانتومی به ما امکان می‌دهد تا آنتروپی فون نویمن[۳] را محاسبه کنیم که به‌عنوان معیاری برای سنجش میزان عدم قطعیت و پیچیدگی سیستم درنظر گرفته می‌شود. این معیار ما را قادر می‌سازد تا درک عمیق‌تری از ساختار پیچیدهٔ سیستم داشته باشیم و استراتژی‌های بهینه برای افزایش بهره‌وری را تدوین کنیم.

علاوه‌براین، در این پژوهش الگوریتم‌های کوانتومی‌ای مانند الگوریتم گروور[۴] و الگوریتم شور[۵] موردتوجه قرار گرفته‌اند. الگوریتم گروور به‌طور خاص برای بهینه‌سازی مسائل جست‌وجو و استخراج داده‌های کلیدی از میان حجم عظیمی از اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که الگوریتم شور می‌تواند برای تحلیل الگوهای ریاضی پیچیده که در مسائل رمزنگاری و تحلیل مالی کاربرد دارند، مؤثر باشد. این الگوریتم‌ها در کنار هم رویکردی جامع را برای مدل‌سازی داده‌های پیچیده و ارائهٔ راه‌کارهای بهینه برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک فراهم می‌کنند.

مبانی محاسبات کوانتومی با رویکرد مدیریتی

محاسبات کوانتومی یکی از رویکردهای نوظهور و میان‌رشته‌ای است که توانایی بالایی در تحلیل ساختارهای غیرخطی، وابستگی‌های پنهان و موقعیت‌های چندحالته دارد. در این بخش تلاش می‌شود تا مفاهیم پایهٔ محاسبات کوانتومی به‌زبان ساده برای مخاطبان مدیریتی تبیین و پیوند آنها با تصمیم‌سازی در سازمان‌ها روشن شود.

۱. Hadamard Gates
۲. CNOT
۳. Von Neumann Entropy
۴. Grover's Algorithm
۵. Shor's Algorithm

۱. مفهوم کیوبیت و برهم‌نهی[۱]

واحد اطلاعاتی در سیستم‌های محاسباتی سنتی، یک «بیت» است که فقط می‌تواند یکی از دو حالت ۰ یا ۱ داشته باشد. درمقابل، کیوبیت (qubit) در محاسبات کوانتومی می‌تواند به‌صورت هم‌زمان ترکیبی از هردو حالت باشد؛ این ویژگی به‌نام برهم‌نهی شناخته می‌شود. این به‌زبان مدیریتی بدان‌معناست که مدل تحلیلی شما می‌تواند هم‌زمان چندین حالت یا سناریو را درنظر گرفته و آنها را به‌طور موازی تحلیل کند. در محیطی که تصمیم‌گیری باید هم‌زمان با چند عدم قطعیت انجام شود (مانند سیاست‌های دولت، رفتار مشتری و نوسانات بازار)، برهم‌نهی به ما امکان می‌دهد تا همهٔ گزینه‌های ممکن را به‌صورت هم‌زمان بسنجیم، نه به‌ترتیب.

۲. درهم‌تنیدگی[۲]: درک تعاملات وابسته

درهم‌تنیدگی خاصیتی کوانتومی است که طی آن، وضعیت یک کیوبیت به وضعیت کیوبیت دیگر وابسته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که تغییر در یکی بلافاصله بر دیگری تأثیر می‌گذارد. این مفهوم برای مدل‌سازی تعاملات پیچیدهٔ بین متغیرهای اقتصادی و سازمانی بسیار کاربرد دارد. به‌عنوان مثال، تغییر در نرخ ارز ممکن است بر هزینه‌های تأمین مواد اولیه، سودآوری شرکت و رفتار مصرف‌کننده تأثیری هم‌زمان و غیرخطی بگذارد. در مدل‌سازی کوانتومی، این تعاملات ازطریق گیت‌هایی مانند CNOT بازنمایی می‌شوند که وابستگی بین متغیرها را شبیه‌سازی می‌کنند.

۳. گیت‌های کوانتومی به‌زبان سادهٔ مدیریتی

گیت‌های کوانتومی همانند ابزارهایی در یک مدل تصمیم‌گیری هستند که روی اطلاعات (کیوبیت‌ها) اعمال می‌شوند تا وضعیت آنها را تغییر دهند. در ادامه برخی گیت‌های کلیدی توضیح داده می‌شوند:

- گیت Hadamard (H): کیوبیت را در حالت برهم‌نهی قرار می‌دهد. این گیت در کاربرد مدیریتی برای ایجاد سناریوهای چندحالته در ابتدای تحلیل مفید است؛ یعنی بررسی هم‌زمان احتمال‌های مختلف برای یک تصمیم یا واقعه.
- گیت CNOT (Controlled NOT): دو کیوبیت را به‌صورت شرطی به‌هم متصل می‌کند. اگر کیوبیت اول «فعال» باشد، کیوبیت دوم تغییر می‌کند. این

---

۱. Superposition

۲. Entanglement

گیت برای تحلیل وابستگی‌های شرطی بین متغیرها کاربرد دارد (مثلاً: اگر قیمت دلار بالا برود، هزینهٔ تولید هم افزایش می‌یابد).

- گیت‌های چرخشی (Rx، Ry، Rz): این گیت‌ها تغییرات پیوسته و دقیق‌تری در وضعیت کیوبیت‌ها ایجاد می‌کنند. در مدیریت می‌توان آنها را معادل تنظیم تدریجی سیاست‌ها، اصلاحات بازار یا تغییرات تدریجی در استراتژی در نظر گرفت.
- گیت‌های فازی (Z، T، T†): این گیت‌ها «فاز» حالت‌های کوانتومی را تغییر می‌دهند که در سیستم‌های مدیریتی می‌توان آن‌ها را مشابه اثر سیاست‌های کلان اقتصادی یا نوسانات کیفی در محیط کلان تصور کرد.

۱. آنتروپی کوانتومی: سنجش بی‌نظمی و عدم قطعیت

آنتروپی فون نویمن، مشابه مفهوم آنتروپی در نظریهٔ اطلاعات، شاخصی برای اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی، ابهام یا پیچیدگی در یک سیستم کوانتومی است. در مدل‌سازی کسب و کار، این شاخص به شما نشان می‌دهد سیستم شما چقدر ناپایدار، چندحالته یا مستعد نوسان است. آنتروپی بالا یعنی تصمیم‌گیری سخت‌تر، وابستگی‌ها پیچیده‌تر و نیاز به استراتژی‌های انطباق‌پذیر بیشتر.

۲. ماتریس چگالی: تحلیل کل‌نگر سیستم

ماتریس چگالی[۱] ابزاری برای نمایش وضعیت کل سیستم به‌صورت ریاضی و احتمال‌محور است. این ماتریس برای مدیران، نمایی از تمام حالت‌های ممکن سیستم و شدت ارتباط آنهاست. این ابزار برای مدل‌سازی ساختارهای چندمتغیره‌ای مانند زنجیرهٔ تأمین، بازار مالی یا سیستم تصمیم‌گیری سازمانی استفاده می‌شود.

چرایی کاربست محاسبات کوانتومی در ساختار سیاست‌گذاری

محاسبات کوانتومی با بهره‌گیری از اصولی چون برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی و آنتروپی، این امکان را می‌دهد که:

- چندین سناریو به‌طور هم‌زمان تحلیل شوند (نه پشت‌سرهم)؛
- تعاملات پنهان و غیرخطی بین متغیرها شناسایی شود؛
- پیچیدگی سیستم به‌صورت عددی و قابل فهم مدل شود؛

۱. Density Matrix

- تصمیم‌گیری‌های استراتژیک با دقت بیشتر و هزینهٔ تحلیلی کمتر انجام شود.

این مزایا به‌ویژه برای محیط‌های پرریسک، ناپایدار و داده‌محور (مانند شرایط اقتصادی متغیر، بازارهای جهانی یا حوزهٔ سیاست‌گذاری فناوری) ارزش بالایی دارد.

یافته‌ها

حالت‌های آزمایش‌شده

ما برای تبیین موضوع دو ساختار کدنویسی مبتنی بر مدل‌سازی کوانتومی را انجام دادیم تا از این طریق بتوانیم اولاً به امکان‌سازی ساختاری مقایسه‌ای کوانتومی از محیط‌های واقعی کسب و کار دست یابیم و سپس در هر ساختار، نتایج را مقایسه کرده و رویکرد خبره‌محور مبتنی بر تحلیل شبکه‌ای پیچیده از تعاملات تأثیرگذار عوامل را پیاده‌سازی کنیم.

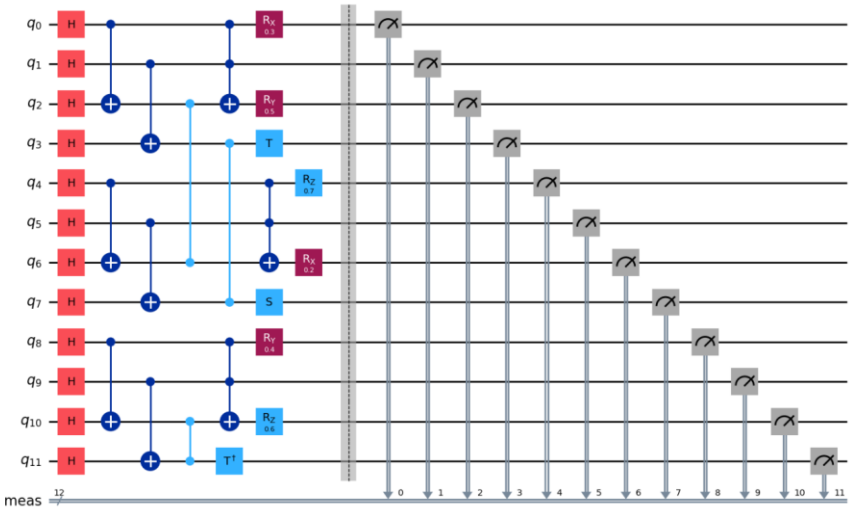
در حالت اول، ما بااستفاده از مداری با ۱۲ کیوبیت، تلاش کرده‌ایم تا یک شبیه‌سازی کامل از تعاملات پیچیدهٔ بین متغیرهای مختلف کسب و کار ارائه دهیم. این شبیه‌سازی شامل متغیرهایی چون نرخ تورم، دسترسی به فناوری‌های جدید، محدودیت‌های زنجیرهٔ تأمین، نرخ ارز، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و تغییرات در تقاضا است. استفاده از گیت‌های هادامارد برای ایجاد حالت‌های توپر و گیت‌های CNOTبرای مدل‌سازی تعاملات بین این متغیرها، به ما امکان می‌دهد تا اثر متقابل و درهم‌تنیدگی متغیرها را درک کنیم. هدف از این شبیه‌سازی، فراهم‌آوردن یک نمای کلی از نحوهٔ تأثیرگذاری هر متغیر بر دیگری و نتیجهٔ نهایی این تأثیرات بر کل سیستم است. آنتروپی فون نویمن به‌عنوان یک اندازه‌گیری از ناخالصی و عدم قطعیت، به‌ما کمک می‌کند تا میزان پیچیدگی و ناپایداری سیستم را ارزیابی کنیم.

```python
from qiskit import QuantumCircuit, Aer, execute
from qiskit.quantum_info import DensityMatrix, entropy, Statevector
from qiskit.visualization import plot_histogram, plot_state_city,
plot_bloch_multivector
import matplotlib.pyplot as plt
num_qubits = 12
qc = QuantumCircuit(num_qubits)
for i in range(num_qubits):
    qc.h(i)
qc.cx(0, 2)
qc.cx(4, 6)
qc.cx(8, 10)
qc.save_statevector()
backend = Aer.get_backend('statevector_simulator')
job = execute(qc, backend)
result = job.result()
state = result.get_statevector()
rho = DensityMatrix(state)
quantum_entropy = entropy(rho, base=2)
print("Quantum Entropy:", quantum_entropy)

plot_histogram(result.get_counts(qc))
plt.title('Histogram of Measurement Outcomes')
plt.show()

plot_state_city(rho, title="Density Matrix")
plt.show()
state_vec = Statevector.from_instruction(qc)
plot_bloch_multivector(state_vec)
plt.show()
```

مدار خروجی‌شده از حالت اول



نمودار ۱. مدار کوانتومی ۱۲ کیوبیتی با تعاملات چندگانه، درهم‌تنیدگی و تغییرات فازی

این مدار کوانتومی شامل ۱۲ کیوبیت است که بااستفاده از گیت‌های هادامارد (H) در حالت ابرپوزیشن قرار گرفته‌اند و سپس با گیت‌های CNOT میان کیوبیت‌ها درهم‌تنیدگی ایجاد شده است. علاوه‌براین، گیت‌های فازی (T، T† ،S و Z) گیت‌های چرخشی(Rx، Ry، Rz) برای اعمال تغییرات فازی و کنترل تحول سیستم در زمان اعمال شده‌اند. در انتهای مدار، اندازه‌گیری تمامی کیوبیت‌ها انجام می‌شود که نشان‌دهندهٔ خروجی نهایی پس‌از اعمال تمامی تغییرات و تعاملات است.

این مدار نمایانگر یک سیستم کوانتومی پیچیده است که برای تحلیل تعاملات غیرخطی، عدم قطعیت و تأثیرات وابستگی‌های متقابل در یک محیط چندمتغیره مناسب است. این ساختار را می‌توان برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در زمینه‌هایی مانند اقتصاد، زنجیرهٔ تأمین، تصمیم‌گیری سازمانی و تحول دیجیتال به‌کار برد. در بخش بعدی، سناریوهای مستخرج از این مدار، بر اساس اثرات گیت‌های مختلف بر کیوبیت‌ها، ارائه می‌شوند.

سناریوی ۱: نوسانات شدید اقتصادی و تأثیر آن بر زنجیرهٔ تأمین

براساس تحلیل دقیق مدار کوانتومی‌ای که شامل گیت‌های هادامارد، CNOT و گیت‌های دوران (Rx, Ry, Rz) است، این سناریو بررسی می‌کند که چگونه نوسانات شدید اقتصادی، مانند افزایش نرخ تورم و نوسانات نرخ ارز می‌توانند تأثیر قابل

توجهی بر زنجیرهٔ تأمین و دسترسی به فناوری‌های جدید داشته باشند. تورم بالا معمولاً هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد و می‌تواند بر توانایی شرکت‌ها برای خرید مواد اولیه یا سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید، تأثیر منفی بگذارد. نوسانات نرخ ارز می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر هزینه و دسترسی به مواد اولیه و فناوری‌های وارداتی تأثیر بگذارند و زنجیره‌های تأمین جهانی را مختل کنند.

محاسبهٔ آنتروپی در مدار نشان‌دهندهٔ درجهٔ بالای درهم‌تنیدگی و پیچیدگی در تعاملات است که می‌تواند نشان‌دهندهٔ بی‌ثباتی و عدم قطعیت باشد. تحلیل خروجی‌های مدار کوانتومی می‌تواند به ما نشان دهد که کدام بخش‌های زنجیرهٔ تأمین، بیشترین آسیب‌پذیری را دربرابر این نوسانات دارند. شرکت‌ها برای کاهش ریسک ناشی از نوسانات ارزی باید در برنامه‌های خود تأمین‌کنندگان مختلفی را در مناطق مختلف جغرافیایی داشته باشند و در فناوری‌هایی سرمایه‌گذاری کنند که به بهینه‌سازی فرآیندها و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کنند تا دربرابر تورم مقاوم‌تر باشند. این تحلیل نه‌تنها به کاهش ریسک‌ها کمک می‌کند؛ بلکه فرصت‌های جدیدی را نیز برای نوآوری و رشد معرفی می‌کند و به شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا برنامه‌ریزی استراتژیک خود را با درک بهتری از پیچیدگی‌ها و تعاملات تقویت کنند.

سناریوی ۲: فرصت‌ها در پیچیدگی‌های تکنولوژیکی

براساس تحلیل مدار کوانتومی‌ای که شامل گیت‌های هادامارد وCNOT و گیت‌های دورانی است، این سناریو بررسی می‌کند که چگونه پیشرفت‌های فناورانه، به‌خصوص در حوزه‌های نوینی مانند هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و اینترنت اشیاء، فرصت‌های جدیدی برای کسب و کارها فراهم می‌آورند. این فناوری‌ها قادر به بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت در تصمیم‌گیری‌ها هستند که همگی کمک شایانی به سودآوری و رقابت‌پذیری شرکت‌ها می‌کنند. محاسبهٔ آنتروپی و بررسی خروجی‌های مدار نشان‌دهندهٔ تأثیرات مثبت این فناوری‌ها بر کاهش هزینه‌ها و افزایش کارآیی است.

فناوری‌های نوین می‌توانند فرآیندهای تولیدی را اتوماتیک کرده و بااستفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کارآیی عملیاتی را افزایش دهند. شرکت‌ها برای به‌حداکثررساندن استفاده از این فناوری‌ها، باید در زیرساخت‌های دیجیتالی سرمایه‌گذاری کنند و نیروی انسانی خود را برای کار با این تکنولوژی‌های

جدید آموزش دهند. این تحلیل نه‌تنها بـه کـاهش ریسـک‌ها کمـک می‌کنـد؛ بلکـه فرصت‌های جدیدی را نیز برای نوآوری و رشد معرفی می‌کند و بـه شـرکت‌ها اجـازه می‌دهد تا برنامه‌ریزی استراتژیک خود را با درک بهتـری از پیچیـدگی‌ها و تعـاملات تقویت کنند. این سناریو بر فرصت‌های نوینی که فناوری‌های پیشـرفته در دسـترس کسب و کارها قرار می‌دهند؛ به‌ویژه در زمینـه‌هایی کـه بـه بهینه‌سـازی عملیـاتی و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک مربوط می‌شوند، تأکید می‌کنـد. اسـتفاده از مـدل‌های کوانتومی برای تحلیل این تأثیرات به کسب و کارها امکـان می‌دهـد تـا بااسـتفاده از داده‌ها و تکنولوژی در بازارهای جهانی به‌شیوه‌ای نوآورانه به رقابت بپردازند.

سناریوی ۳: تقابل سیاست‌های اقتصادی و تحولات بازار

براساس تحلیل‌های مدار کوانتومی‌ای که تعاملات پیچیده میان کیوبیت‌هـا را نشـان می‌دهد، این سناریو تأثیر تغییرات سیاست‌های اقتصادی دولت‌ها، ماننـد تعرفـه‌ها و مقررات جدید را بر بازارهای کسب و کار بررسـی می‌کنـد. ایـن تغییـرات می‌تواننـد تأثیرات عمده‌ای بـر شـرایط بـازار داشـته باشـند؛ ازجملـه بـر هزینـه‌های واردات و صادرات، دسترسی به بازارهای جدید و قدرت رقابتی شرکت‌ها.

مـدار کوانتـومی بـه‌خصـوص تعـاملات بـین کیوبیت‌هـایی را کـه نشـان‌دهندهٔ فاکتورهـای اقتصـادی و سیاسـی هسـتند مدل‌سـازی می‌کنـد. آنتروپـی بـالا و درهم‌تنیـدگی، نشـان‌دهنـدهٔ پیچیـدگی‌های ناشـی از ایـن تغییـرات اسـت کـه بـر تصمیم‌گیری‌های کسب و کار تأثیر می‌گذارد.

تغییرات سیاستی می‌توانند به‌سرعت محیط‌هـای کسـب و کـار را تغییـر دهنـد؛ بنابراین شرکت‌ها باید ساز و کارهایی برای پایش مداوم تغییرات سیاستی و واکـنش سریع به آنها طراحی کنند. برای مثـال، افـزایش تعرفـه‌ها بـر واردات ممکـن اسـت شرکت‌ها را به تغییر تأمین‌کنندگان یا جست‌وجو برای بازارهای جایگزین سوق دهد.

بررسـی نتـایج مـدار کوانتـومی نشـان می‌دهـد کـه شـرکت‌هایی کـه توانـایی انعطاف‌پذیری بیشتری در استراتژی‌های خود دارند، می‌توانند بهتر بـا ایـن تغییـرات سیاستی کنار بیایند. سرمایه‌گذاری در فناوری‌هـایی کـه اجـازه می‌دهنـد شـرکت‌ها به‌سرعت داده‌ها را تحلیل کنند و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده انجام دهند، برای مقابله با ناپایداری‌های ناشی از تغییرات سیاستی حیاتی است.

این سناریو بر اهمیت برنامه‌ریزی استراتژیک و انعطاف‌پذیری در مواجهه با تغییرات سیاستی‌ای که می‌تواند به‌شدت بر محیط‌های کسب و کار تأثیر بگذارد، تأکید می‌کند. بهره‌برداری از تکنولوژی‌های پیشرفته و داشتن استراتژی‌های واکنشی مؤثر، این امکان را به شرکت‌ها می‌دهد که در شرایط پیچیده و مدام درحال تغییر بازارها، یک گام جلوتر باشند.

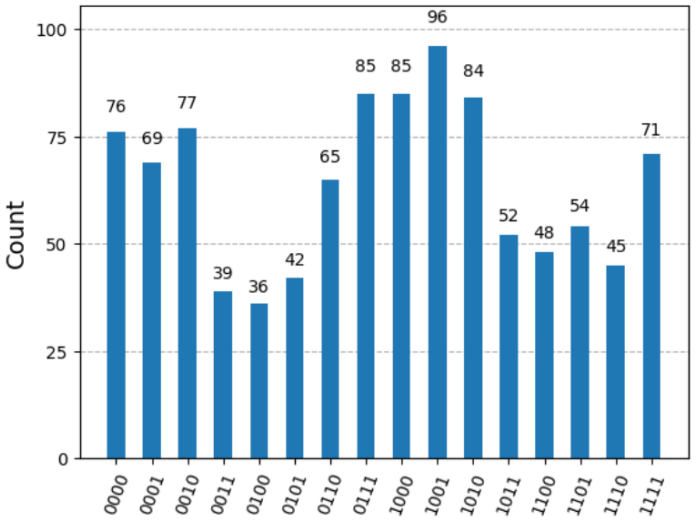
در حالت دوم، بااستفاده از یک مدار کوچک‌تر با چهار کیوبیت، تمرکز بیشتری بر تعاملات خاص و محدودتر داشته‌ایم. این حالت برای تجزیه و تحلیل مسائلی که نیاز به پاسخ‌های سریع و دقیق دارند، بسیار مناسب است. تعاملات کلیدی بین چهار متغیر بااستفاده از گیت‌های CNOT شبیه‌سازی شده‌اند که به‌ما اجازه می‌دهد تا تأثیر مستقیم و محدود این متغیرها را بر یکدیگر بررسی کنیم. این حالت کمتر پیچیده است و به ما امکان می‌دهد تا با صرف زمان و منابع کمتر، به نتایج قابل قبولی دست یابیم. آنتروپی محاسبه‌شده در این حالت نیز به‌ما کمک می‌کند تا میزان عدم قطعیت و پایداری در این تعاملات محدود را تعیین کنیم.

در این حالت، عدم تعیین دقیق متغیرها می‌تواند ناشی از تمایل به ارائهٔ یک مدل آموزشی یا تحقیقاتی عمومی‌تر باشد که هدف آن، فهمیدن و نمایش قابلیت‌های محاسبات کوانتومی و اکتشاف اساسی‌ترین اصول این فناوری است. این رویکرد اجازه می‌دهد تا شبیه‌سازی‌ها بدون تمرکز بر روی متغیرهای خاص کسب و کار انجام شوند و بیشتر بر روی دینامیک‌های بنیادی کیوبیت‌ها و تعاملات آنها تمرکز دارد. در این حالت، مدار کوانتومی به‌عنوان یک ابزار آموزشی برای نشان‌دادن چگونگی تعامل کیوبیت‌ها و تأثیر گیت‌های کوانتومی مختلف استفاده می‌شود که این امر به فهم بهتر و عمیق‌تر مکانیک کوانتومی کمک می‌کند.

هردو حالت، مزایای خاص خود را دارند و براساس نیازها و شرایط خاص کسب و کار قابل انتخاب هستند. حالت اول برای فهم عمیق‌تر و جامع‌تر تعاملات پیچیده در سازمان‌های بزرگ و متنوع مناسب است؛ درحالی‌که حالت دوم برای بررسی سریع و کارآمد مسائل محدود و خاص در شرایطی که زمان و منابع محدود هستند، ایده‌آل است.

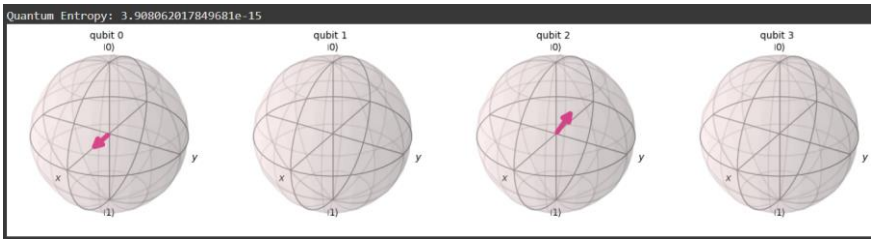
```python
from qiskit import QuantumCircuit, Aer, execute
from qiskit.quantum_info import DensityMatrix, entropy
from qiskit.visualization import plot_histogram,
plot_state_city, plot_bloch_multivector
import matplotlib.pyplot as plt
qc = QuantumCircuit(4)
for i in range(4):
    qc.h(i)
qc.cx(0, 1)
qc.cx(2, 3)
qc.cx(1, 2)
qc.cx(0, 3)
qc.measure_all()
backend = Aer.get_backend('qasm_simulator')
job = execute(qc, backend, shots=1024)
result = job.result()
counts = result.get_counts(qc)
plot_histogram(counts)
plt.title('Histogram of Measurement Outcomes')
plt.show()
state_result = execute(qc, Aer.get_backend('statevector_simulator')).result()
state = state_result.get_statevector()
rho = DensityMatrix(state)
quantum_entropy = entropy(rho, base=2)  # آنتروپی با پایه 2
print("Quantum Entropy:", quantum_entropy)

plot_state_city(rho, title="Density Matrix")
plt.show()
plot_bloch_multivector(state)
plt.show()
```



نمودار ۲. توزیع احتمالات حالت‌های کیوبیت در مدار کوانتومی با چهار کیوبیت

در این مطالعه، هیستوگرام نتایج اجرای مدار کوانتومی چهار کیوبیتی بااستفاده از گیت‌های هادامارد و CNOT نشان‌دهندهٔ توزیع احتمالات حالت‌های کیوبیت‌ها است. تفاوت در فراوانی حالت‌های اندازه‌گیری‌شده از 0000 تا 1111 بیانگر پیچیدگی‌ها و درهم‌تنیدگی‌های بین کیوبیت‌ها است. این تحلیل نشان‌دهندهٔ پتانسیل مدار برای شبیه‌سازی دینامیک‌های کسب و کار و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با آن است. این داده‌ها می‌توانند به توسعهٔ مدل‌های پیش‌بینی که تأثیرات سیاست‌ها و تحولات اقتصادی را بررسی می‌کنند، کمک کنند.

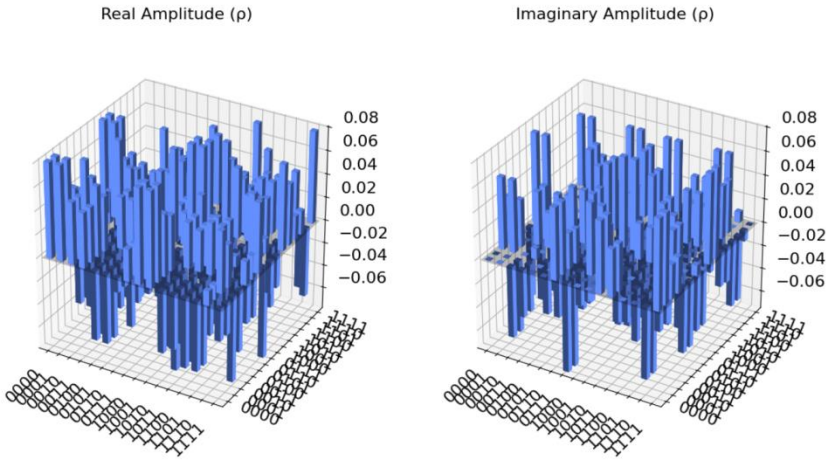


نمودار ۳. تحلیل وضعیت کیوبیت‌ها براساس نمودار بلوخ

نمودارهای بلوخ نمایش‌داده‌شده برای چهار کیوبیت موجود در مدار کوانتومی، وضعیت کوانتومی هر کیوبیت را در محورهای X ، Y، و Z ارائه می‌کنند. این نمایش‌ها برای تحلیل دینامیک‌های مدار و تأثیر گیت‌های اعمال‌شده مانند هادامارد و CNOT مورد استفاده قرار می‌گیرند. بردارهای مشخص‌شده بر روی نمودارها، اطلاعات مهمی دربارهٔ توزیع احتمالی وضعیت‌های |۰⟩ و |۱⟩ برای هر کیوبیت فراهم می‌آورند که این اطلاعات برای فهم بهتر تأثیرات درهم‌تنیدگی و تنظیمات کیوبیت‌ها در مدار، حیاتی است.

آنتروپی کوانتومی اندازه‌گیری‌شده برای این حالت مدار بسیار پایین است (۱۵e-۳,۹۰۸۰۶۲۰۱۷۸۴۹۶۸۱) که نشان‌دهندهٔ عدم وجود درهم‌تنیدگی قابل توجهی بین کیوبیت‌ها و نظم بالا در وضعیت فعلی مدار است. این شاخص بیانگر استقلال نسبی کیوبیت‌ها در این تنظیم خاص است و پیامدهای مهمی برای کاربردهای کوانتومی دارد؛ به‌خصوص در زمینه‌هایی که پردازش‌های موازی و مستقل موردنیاز است. تحلیل آنتروپی کمک می‌کند تا پارامترهای مدار را برای بهینه‌سازی عملکرد و کارآیی در کاربردهای مختلف کوانتومی شناسایی کنیم و به

توسعهٔ مدل‌های پیش‌بینی که تأثیر تغییرات سیاست‌ها و تحولات اقتصادی را بررسی می‌کنند، کمک کنیم.



نمودار ۴. نمایش سه‌بُعدی دامنه‌های حقیقی و موهومی ماتریس چگالی در مدار کوانتومی

$$\begin{bmatrix}
0.0809700129 & 0.0809700129 & 0.0527303499 - 0.0599380998i & 0.0467444021 - 0.0395366523i \\
0.0809700129 & 0.0809700129 & 0.0527303499 - 0.0599380998i & 0.0467444021 - 0.0395366523i \\
0.0527303499 + 0.0599380998i & 0.0527303499 + 0.0599380998i & 0.0787089613 & 0.0597085306 + 0.0088549959i \\
0.0467444021 + 0.0395366523i & 0.0467444021 + 0.0395366523i & 0.0597085306 - 0.0088549959i & 0.0462910387 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
-\frac{2^{\frac{68}{365}} \cdot 3^{\frac{17}{365}} \cdot 5^{\frac{83}{365}} \cdot 7^{\frac{40}{73}}}{84} & -\frac{2^{\frac{68}{365}} \cdot 3^{\frac{17}{365}} \cdot 5^{\frac{83}{365}} \cdot 7^{\frac{40}{73}}}{84} & -0.0388841695 + 0.044199275i & -0.0344700398 + 0.0291549344i \\
0.0122862164 + 0.059976953i & 0.0122862164 + 0.059976953i & 0.0523991652 + 0.0299640962i & 0.0363788972 + 0.0286257944i \\
-0.0273203548 - 0.0750110913i & -0.0273203548 - 0.0750110913i & -0.073318923 - 0.0286257944i & -0.0523991652 - 0.0299640962i
\end{bmatrix}$$

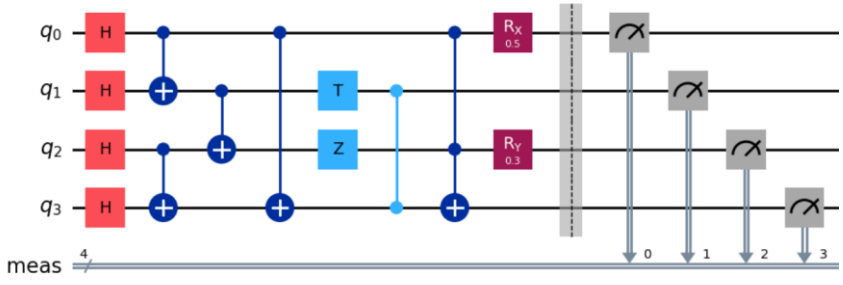
$$\begin{bmatrix}
\cdots & -\frac{2^{\frac{68}{365}} \cdot 3^{\frac{17}{365}} \cdot 5^{\frac{83}{365}} \cdot 7^{\frac{40}{73}}}{84} & 0.0122862164 - 0.059976953i & -0.0273203548 + 0.0750110913i \\
\cdots & -\frac{2^{\frac{68}{365}} \cdot 3^{\frac{17}{365}} \cdot 5^{\frac{83}{365}} \cdot 7^{\frac{40}{73}}}{84} & 0.0122862164 - 0.059976953i & -0.0273203548 + 0.0750110913i \\
\cdots & -0.0388841695 - 0.044199275i & 0.0523991652 - 0.0299640962i & -0.073318923 + 0.0286257944i \\
\cdots & -0.0344700398 - 0.0291549344i & 0.0363788972 - 0.0286257944i & -0.0523991652 + 0.0299640962i \\
\ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\cdots & 0.0440299871 & -0.0090600446 + 0.0442279259i & 0.020146449 - 0.0553143303i \\
\cdots & -0.0090600446 - 0.0442279259i & 0.0462910387 & -0.0597085306 - 0.0088549959i \\
\cdots & 0.020146449 + 0.0553143303i & -0.0597085306 + 0.0088549959i & 0.0787089613
\end{bmatrix}$$

نمودار ۵. ماتریس چگالی (ρ) مدار کوانتومی: نمایش مؤلفه‌های حقیقی و موهومی

نمودارهای ارائه‌شده بیانگر توزیع دامنه‌های حقیقی و موهومی ماتریس چگالی (ρ) مدار کوانتومی چهار کیوبیتی هستند که اطلاعات مهمی دربارهٔ توزیع احتمال، درهم‌تنیدگی و تأثیر گیت‌های اعمال‌شده فراهم می‌کنند. مشاهدهٔ مقادیر متغیر در محور Z نشان می‌دهد که حالت‌های پایهٔ مدار به‌صورت نامتقارن در توزیع ابرپوزیشن

قرار گرفته‌اند که ناشی از گیت‌های هادامارد و CNOT است. تنوع دامنه‌های حقیقی و موهومی نشان‌دهندهٔ وجود ترکیبات مختلط در حالت‌های کیوبیت‌ها است که بر تعاملات درونی و وابستگی‌های غیرخطی میان آنها تأثیر می‌گذارد. همچنین، مقدار قابل توجهی از عناصر نزدیک به صفر در ماتریس چگالی دیده می‌شود که نشان‌دهندهٔ کاهش همبستگی قوی بین برخی از حالات پایه است. این توزیع غیرمتقارن بیانگر پدیده‌های کوانتومی‌ای مانند تداخل و فازهای نسبی میان حالات مختلف مدار است.

مقدار آنتروپی فون نویمن محاسبه شده است که به‌طور قابل توجهی نزدیک به صفر است. این مقدار نشان می‌دهد که مدار در یک حالت تقریباً خالص قرار دارد و اطلاعات کوانتومی در اثر برهم‌کنش با محیط یا درهم‌تنیدگی زیاد، ازدست نرفته است. چنین وضعیتی معمولاً نشان‌دهندهٔ پایداربودن اطلاعات در مدار و حداقل تأثیر نوفه‌های خارجی بر سیستم است. از منظر کاربردهای کوانتومی، چنین حالتی می‌تواند در محاسبات کوانتومی‌ای که نیازمند حفظ وضعیت‌های خالص و کمترین میزان درهم‌تنیدگی ناخواسته هستند، بسیار سودمند باشد. همچنین، تحلیل این داده‌ها می‌تواند در طراحی الگوریتم‌های کوانتومی برای مسائل پیچیده‌ای مانند بهینه‌سازی و مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی مورداستفاده قرار بگیرد.



نمودار ۶. مدار کوانتومی چهار کیوبیتی با درهم‌تنیدگی و تغییرات فازی

در مدل اولیهٔ مدار کوانتومی (حالت دوم)، متغیرهای خاص کسب و کار به‌طور مستقیم تعریف نشده‌اند؛ زیرا هدف اصلی این مدل، نمایش تعاملات بنیادی کیوبیت‌ها، اصول مکانیک کوانتومی و بررسی تأثیر گیت‌های مختلف بر توزیع حالت‌های کوانتومی بوده است. این‌نوع مدل‌سازی معمولاً برای درک بهتر رفتار

سیستم‌های کوانتومی و آزمایش قابلیت‌های محاسبات کوانتومی بدون درنظرگرفتن یک سناریوی خاص استفاده می‌شود. در چنین رویکردی، مدار برای مطالعهٔ مفاهیمی مانند ابرپوزیشن، درهم‌تنیدگی و چرخش‌های فازی به‌عنوان یک ابزار آزمایشی مورداستفاده قرار می‌گیرد و تفسیر آن تنها در چارچوب فیزیکی و ریاضی انجام می‌شود؛ نه در یک بستر مشخص کسب و کار.

بااین‌حال، هنگام استخراج سناریوهای آینده براساس این مدل، متغیرهای اقتصادی و مدیریتی ازطریق تحلیل ویژگی‌های مدار و تأثیر گیت‌های اعمال‌شده به آن انتساب داده شدند. به‌عنوان مثال، اعمال گیت‌های هادامارد **(H)** که کیوبیت‌ها را در ابرپوزیشن قرار می‌دهند، می‌تواند نمایانگر ایجاد سناریوهای احتمالی‌ای در تحلیل بازار باشد. همچنین، گیت‌های **CNOT** که تعاملات میان کیوبیت‌ها را ایجاد می‌کنند، به وابستگی‌های متقابل در زنجیرهٔ تأمین یا اثرات سیستماتیک در محیط‌های ناپایدار اقتصادی شباهت دارند. به‌همین‌ترتیب، گیت‌های فازی‌ای مانندT و Z که در حالت کوانتومی تغییرات تدریجی ایجاد می‌کنند، می‌توانند به اثرات سیاست‌های کلان اقتصادی تعبیر شوند. این رویکرد، یک روش استاندارد در مطالعات میان‌رشته‌ای است که در آن، از مدل‌های انتزاعی کوانتومی برای تحلیل سیستم‌های پیچیده در زمینه‌های دیگری مانند کسب و کار و اقتصاد استفاده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که امکان شبیه‌سازی رفتارهای غیرخطی و عدم قطعیت‌های محیطی فراهم شود.

سناریوی ۱: افزایش تعاملات پیچیده و عدم قطعیت در زنجیرهٔ تأمین

این سناریو براساس ساختار مدار کوانتومی ایجاد شده که در آن، گیت‌های هادامارد (H) تمام کیوبیت‌ها را در وضعیت ابرپوزیشن قرار می‌دهند؛ درحالی‌که گیت‌های CNOT تعاملات بین آنها را برقرار می‌کنند. این ترکیب نشان‌دهندهٔ سیستمی است که دارای عدم قطعیت‌های ذاتی بوده و بین متغیرهای آن، وابستگی‌های غیرخطی شکل گرفته است. علاوه‌براین، اعمال گیت‌های دوران Rx(0.5) و Ry(0.3) بر برخی کیوبیت‌ها، نوعی تنظیمات کنترل‌شده بر روی متغیرها را ایجاد کرده که می‌تواند نشان‌دهندهٔ شرایطی باشد که در آن، برخی عوامل خارجی مانند سیاست‌های مالی یا نرخ ارز تأثیرات متفاوتی بر عناصر سیستم دارند. این ویژگی‌ها به‌طور مستقیم بیانگر شرایط زنجیره‌های تأمین پیچیده‌ای هستند که در آن تغییرات غیرمنتظره،

وابستگی‌های میان عرضه‌کنندگان و شرایط نوسانی اقتصادی بر کل سیستم تأثیر می‌گذارند.

در محیط‌های کسب و کار، افزایش وابستگی‌های متقابل بین بازیگران زنجیرهٔ تأمین و تغییرات غیرمنتظره در عرضه و تقاضا منجر به افزایش عدم قطعیت می‌شود. مشابه با مدار کوانتومی‌ای که در آن، تغییر در یک کیوبیت می‌تواند روی کل سیستم اثرگذار باشد. تغییر در یکی از مؤلفه‌های زنجیرهٔ تأمین مانند نرخ ارز، تحریم‌ها یا دسترسی به مواد اولیه می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای داشته باشد. شرکت‌ها برای کاهش این نوسانات باید استراتژی‌های انعطاف‌پذیری مانند تنوع‌بخشی به تأمین‌کنندگان، توسعهٔ تأمین‌کنندگان محلی و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی را درنظر بگیرند. استفاده از محاسبات کوانتومی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای مختلف می‌تواند ابزار قدرتمندی برای کاهش اثرات عدم قطعیت‌های زنجیرهٔ تأمین باشد.

سناریوی ۲: تأثیر فناوری‌های تحول‌آفرین بر تصمیم‌گیری‌های سازمانی

این سناریو براساس وجود گیت‌های فازی (T و Z) در مدار کوانتومی تعریف شده است که نقش تغییر فاز و تغییرات تدریجی در سیستم را ایفاء می‌کنند. این گیت‌ها نشان‌دهندهٔ تحولاتی هستند که می‌توانند به‌مرور بر سیستم تأثیر گذاشته و ماهیت آن را دستخوش تغییر کنند. همچنین، تعاملات ایجادشده توسط CNOT بین کیوبیت‌ها نشان‌دهندهٔ ارتباطات میان مؤلفه‌های مختلف سیستم هستند که اثرات متقابل فناوری‌های نوین را مدل‌سازی می‌کنند. در این حالت، مدار کوانتومی نشان می‌دهد که تغییرات فناوری در یک سیستم پیچیده نه‌تنها به‌صورت مستقل اثرگذار هستند؛ بلکه وابستگی‌های درونی نیز می‌توانند تأثیرات ترکیبی و پیش‌بینی‌نشده‌ای ایجاد کنند.

در فضای کسب و کار، ظهور فناوری‌های جدیدی مانند هوش مصنوعی، رایانش ابری و بلاکچین می‌تواند منجر به تغییرات بنیادی‌ای در تصمیم‌گیری‌های سازمانی شود. همان‌طور که در مدار کوانتومی گیت‌های فازی اثرات تجمعی دارند، در یک سازمان نیز پذیرش تدریجی فناوری‌های نوین منجر به ایجاد مزیت‌های رقابتی یا حتی تغییر در مدل‌های تجاری می‌شود. این امر مستلزم سرمایه‌گذاری در

زیرساخت‌های دیجیتالی، توانمندسازی نیروی انسانی ازطریق آموزش‌های تخصصی و توسعهٔ راه‌کارهای نوآورانه است. سازمان‌هایی که نتوانند خود را با این تغییرات هماهنگ کنند، دربرابر رقبا دچار ضعف شده و مزیت رقابتی خود را ازدست خواهند داد. محاسبات کوانتومی می‌تواند به مدیران کمک کند تا مسیرهای مختلف تحول دیجیتال را شبیه‌سازی کرده و سناریوهای محتمل آینده را با دقت بیشتری ارزیابی کنند.

سناریوی ۳: افزایش ناپایداری اقتصادی و نیاز به استراتژی‌های تطبیقی

این سناریو براساس بخش نهایی مدار که شامل اندازه‌گیری تمامی کیوبیت‌ها است، استخراج شده است. اندازه‌گیری در سیستم‌های کوانتومی به‌عنوان فرآیند نهایی تصمیم‌گیری شناخته می‌شود و در این مرحله تمامی اثرات گیت‌های اعمال‌شده بر کیوبیت‌ها به نتیجهٔ نهایی تبدیل می‌شوند. همچنین، وجود گیت‌های دوران و فازی (T و Z) پیش‌از اندازه‌گیری نشان می‌دهد که تصمیمات نهایی تحت‌تأثیر تغییرات غیرقطعی قرار دارند. این ویژگی مدار به‌خوبی نشان‌دهندهٔ نوسانات بازار، تغییرات نرخ بهره و سیاست‌های اقتصادی ناپایدار است که درنهایت تصمیمات کسب و کار را دچار عدم قطعیت و تغییرات ناگهانی می‌کند.

در محیط اقتصادی، عوامل متعددی مانند تحریم‌های تجاری، نوسانات ارزی، تغییرات سیاست‌های بانکی و مالی و بحران‌های ژئوپلیتیکی می‌توانند شرایط ناپایداری را ایجاد کنند که تصمیم‌گیری‌های سازمانی را دشوارتر سازند. مشابه با اندازه‌گیری در مدار کوانتومی که در آن، نتیجهٔ نهایی وابسته به تمام عوامل پیشین است، تصمیمات اتخاذشده در فضای کسب و کار نیز متأثر از تمامی پارامترهای تاریخی و آنی اقتصادی خواهد بود. سازمان‌ها در چنین شرایطی باید برای مقابله با ناپایداری، رویکردهای چابک و تطبیقی را اتخاذ کنند؛ ازجمله توسعهٔ مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده، استفاده از ابزارهای تحلیلی پیشرفته و پیاده‌سازی استراتژی‌های مقاوم‌سازی کسب و کار. در چنین شرایطی، محاسبات کوانتومی می‌تواند به سازمان‌ها کمک کند تا با پردازش حجم عظیمی از داده‌های اقتصادی، الگوهای ناپایداری را شناسایی کرده و راه‌کارهای بهینه‌ای را برای مقابله با آنها ارائه دهند.

جدول ۳. مقایسهٔ حالت‌های مدل‌سازی‌شده

ویژگی	حالت ۱ با ۱۲ کیوبیت	حالت ۲ با ۴ کیوبیت
تعداد کیوبیت‌ها	۱۲ کیوبیت	۴ کیوبیت
اولیه‌سازی کیوبیت‌ها	گیت‌های هادامارد برای ایجاد حالت‌های توپر	گیت‌های هادامارد برای ایجاد حالت‌های توپر
تعاملات بین کیوبیت‌ها	گیت‌های CNOT برای نمایندگی تعاملات مختلف کسب و کار	گیت‌های CNOT برای نمایندگی تعاملات اصلی
کاربرد مدل	مناسب برای تجزیه و تحلیل پیچیدگی‌های بزرگ و درهم‌تنیدهٔ کسب و کار	مناسب برای تجزیه و تحلیل سریع و محدود تعاملات کلیدی
مزایای استفاده	امکان تجزیه و تحلیل دقیق‌تر تعاملات پیچیده و متعدد	سرعت و دقت بالا در تجزیه و تحلیل تعاملات محدود و خاص
آنالیز و نمایش داده‌ها	استفاده از نمودارهای ماتریس چگالی، هیستوگرام و نمودار بلوخ برای تحلیل کامل	استفاده از نمودارهای ماتریس چگالی، هیستوگرام و نمودار بلوخ برای تحلیل موضوعی
محاسبهٔ آنتروپی	محاسبهٔ آنتروپی فون نویمن برای ارزیابی درهم‌تنیدگی و پیچیدگی سیستم	محاسبهٔ آنتروپی فون نویمن برای ارزیابی پایداری و عدم قطعیت محدود

بحث از یافته‌ها

پژوهش حاضر با هدف توسعهٔ تحلیلی برای مواجهه با شرایط ناپایدار و پرریسک محیط‌های کسب و کار، از ظرفیت‌های منحصربه‌فرد مدل‌سازی کوانتومی در مدل‌سازی تعاملات پیچیده بهره گرفته است. در طراحی مدل‌ها، مدارهای کوانتومی ۱۲ و ۴ کیوبیتی به‌گونه‌ای پیاده‌سازی شده‌اند که متغیرهای واقعی و کلیدی فضای اقتصادی ایران - ازجمله نرخ ارز، تورم، زنجیرهٔ تأمین، سیاست‌های فناورانه و ساختارهای تقاضا - در ساختاری سیستمی و وابسته مورد بازنمایی قرار گیرند. ساختارهای مبتنی بر مفاهیم برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی کوانتومی، این امکان را

فراهم ساخته‌اند که سناریوهای خروجی از مدل، تنها بازتابی نظری از حالات ممکن نباشند؛ بلکه الگوهایی کاربردی و قابل انطباق با موقعیت‌های تصمیم‌گیری در سازمان‌های واقعی به‌شمار آیند. در این مدل‌ها، خاصیت برهم‌نهی به سیستم اجازه می‌دهد وضعیت‌های متعددی را به‌طور هم‌زمان درنظر بگیرد؛ امکانی که در محیط‌های واقعی برای تحلیل هم‌زمان پیامدهای تصمیمات مختلف یا متغیرهای هم‌وابسته، بسیار حیاتی است. همچنین، درهم‌تنیدگی کیوبیت‌ها ساختاری را ایجاد می‌کند که در آن، تغییر در یکی از متغیرهای کلیدی - مثلاً نوسان نرخ ارز یا سیاست تأمین - بلافاصله بر مؤلفه‌های دیگری مانند قیمت تمام‌شده، تأخیر در تأمین یا سیاست‌های مالی تأثیر می‌گذارد. این وابستگی میان متغیرها در مدل کوانتومی، دقیقاً معادل شرایط تصمیم‌سازی در محیط واقعی سازمانی است که در آن تغییر در یک مؤلفه، آثار زنجیره‌ای و غیرخطی‌ای بر سایر بخش‌ها دارد.

نکتهٔ کلیدی در کاربست عملی این مدل‌ها، پرهیز از کلی‌گویی در رویکردهای تخصصی به تحلیل عدم قطعیت است. در پژوهش حاضر، با طراحی دقیق متغیرهای مورد شبیه‌سازی و تعریف روابط ریاضی بین آنها در قالب گیت‌های کوانتومی، مدل به‌گونه‌ای تنظیم شده که قابلیت تبیین رفتاری سناریوها در شرایط مشخص عملیاتی را دارد. این، یعنی تحلیل‌ها به‌جای آنکه به پیش‌بینی‌های کلی و غیرقابل آزمون محدود باشند، امکان بررسی دقیق اثر متقابل تصمیم‌ها و متغیرهای کلیدی در موقعیت‌های خاص را فراهم می‌کنند. چنین دقتی، ابزار تصمیم‌سازی را از سطح مفهومی به سطح سیاست‌گذاری اجرایی ارتقاء می‌دهد.

سناریوهای استخراج‌شده با بهره‌گیری از محاسبهٔ آنتروپی فون نویمن و تحلیل ماتریس چگالی، به مدیران و تصمیم‌گیران این امکان را می‌دهند که قبل‌از اجرای تصمیمات واقعی، میزان بی‌نظمی، پیچیدگی و عدم قطعیت سیستم را ارزیابی کنند. به‌بیان دیگر، این سناریوها نه‌تنها توصیفگر وضعیت‌های ممکن؛ بلکه سکویی برای آزمون و خطای تصمیمات استراتژیک در فضای کنترل‌شده به‌شمار می‌آیند. فرآیند اعتبارسنجی سناریوها و تحلیل‌های استخراج‌شده از مدل‌ها، با مشارکت هدفمند ۱۵ نفر از خبرگان حوزه‌های مدیریت، سیاست‌گذاری و محاسبات کوانتومی صورت گرفته است. این مشارکت دو هدف کلیدی را دنبال کرده است: نخست، سنجش روایی و انسجام نظری مدل‌های ارائه‌شده و دوم، بررسی قابلیت تفسیر و انتقال‌پذیری نتایج به محیط واقعی سازمانی. مشارکت این خبرگان در تحلیل

سناریوهای آینده‌پژوهانه، پیوند میان مدل‌سازی کوانتومی و تصمیم‌سازی مدیریتی را تقویت کرده است.

بر این اساس، می‌توان گفت که یافته‌های این پژوهش، گرچه مبتنی بر شبیه‌سازی هستند؛ اما ازنظر سطح انطباق با مسائل واقعی، قدرت تحلیل سیستم‌های پیچیده و قابلیت استفاده در فضای اجرایی، از ظرفیت بالایی برخوردارند. این مدل‌ها در عمل، همچون «آزمایشگاه شناختی» عمل می‌کنند که امکان تحلیل پیامدهای چندگانهٔ تصمیمات، طراحی سیاست‌های انعطاف‌پذیر و کنترل ریسک در بسترهای ناپایدار و پویا را فراهم می‌آورد. این پژوهش درصدد آن است که نشان دهد می‌توان از ساختارهای علوم دقیق؛ به‌ویژه چارچوب‌های محاسبات کوانتومی، به‌عنوان ابزاری برای تطبیق و تحلیل نظام‌مند مسائل واقعی حوزهٔ تصمیم‌گیری بهره گرفت. این چارچوب می‌تواند مبنایی نظری و کاربردی برای پژوهش‌های آتی فراهم آورد که در آن، تحلیل‌های میان‌رشته‌ای با دقت و عمق بالا توسعه یافته و قابلیت پیاده‌سازی در حوزه‌های متنوع مدیریتی، اقتصادی و سیاست‌گذاری را دارا است.

نتایج

در این پژوهش، استفاده از محاسبات کوانتومی منجر به افزایش دقت و کارآیی در تحلیل روابط میان متغیرهای کسب و کار شد. این رویکرد نه‌تنها باعث بهبود توان پیش‌بینی و کاهش زمان محاسبات شد؛ بلکه شناخت بهتری از وابستگی‌های متقابل و فرصت‌های بالقوه در محیط کسب و کار را نیز فراهم آورد. همچنین، با کاهش میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی، امکان تدوین استراتژی‌های انعطاف‌پذیرتر و کارآمدتری برای مواجهه با چالش‌های متغیر محیطی فراهم شد. محاسبات کوانتومی درمقایسه با روش‌های کلاسیک، این امکان را به‌ما داد که الگوهای پنهان درمیان داده‌های بزرگ را شناسایی کرده و رویکردهای سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری را با دقت بیشتری تدوین کنیم. این موضوع به‌ویژه در حوزه‌های تحلیل داده‌های کلان[1]، مدیریت مالی و بهینه‌سازی فرآیندهای زنجیرهٔ تأمین، نقش اساسی ایفاء کرد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که محاسبات کوانتومی می‌تواند در تحول

۱. Big Data Analytics

دیجیتال و نوآوری‌های کسب و کار به‌عنوان یک ابزار حیاتی مورداستفاده قرار گیرد. باتوجه به افزایش پیچیدگی محیط‌های اقتصادی و کسب و کارهای مبتنی بر داده، استفاده از این فناوری می‌تواند به سازمان‌ها کمک کند تا نه‌تنها چالش‌های موجود را بهتر درک کنند؛ بلکه بتوانند فرصت‌های جدیدی را برای بهینه‌سازی فرآیندهای خود کشف کنند. این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از محاسبات کوانتومی در تحلیل سیستم‌های پیچیدهٔ کسب و کار می‌تواند تحولی اساسی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و مدیریت استراتژیک ایجاد کند. این فناوری، به‌ویژه در حوزه‌هایی که سرعت پردازش و دقت تحلیل نقشی حیاتی ایفاء می‌کند، ابزار ارزشمندی برای بهینه‌سازی و بهبود عملکرد سازمان‌ها محسوب می‌شود. همچنین، با توسعهٔ فناوری‌های کوانتومی و افزایش دسترسی به کامپیوترهای کوانتومی در آینده، انتظار می‌رود که کاربردهای آن در زمینه‌های مدل‌سازی اقتصادی، تحلیل روندهای بازار، پیش‌بینی ریسک‌های مالی و مدیریت زنجیرهٔ تأمین بیش‌ازپیش گسترش یابد. درنتیجه، سازمان‌ها و کسب و کارهایی که در عصر دیجیتال به‌دنبال مزیت رقابتی هستند، باید درک عمیقی از این فناوری و قابلیت‌های آن داشته باشند تا بتوانند در مواجهه با چالش‌های نوظهور راه‌کارهای بهینه‌تری را توسعه دهند.

باوجود ظرفیت‌های مفهومی و تحلیلی قابل توجه مدل‌های کوانتومی در تبیین شرایط پرریسک و تصمیم‌سازی در محیط‌های پیچیده، باید اذعان داشت که درحال‌حاضر کاربرد عملی کامل این مدل‌ها با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. مهم‌ترین محدودیت، وابستگی به سخت‌افزارهای کوانتومی پیشرفته و زیرساخت‌هایی است که هنوز در بسیاری از کشورها در مرحلهٔ توسعه یا تحقیقاتی قرار دارند. پیاده‌سازی عملی برخی از مدارهای طراحی‌شده در این پژوهش، نیازمند پردازنده‌های کوانتومی با پایداری بالا و نرخ خطای پایین است که درحال‌حاضر تنها در آزمایشگاه‌های تخصصی یا در بسترهای ابری محدود قابل دسترسی هستند.

بااین‌حال، هدف اصلی این پژوهش، نه اجرای مستقیم بر روی سخت‌افزارهای موجود؛ بلکه ارائهٔ الگویی مفهومی و مدلی قابل توسعه برای تحلیل شرایط عدم قطعیت در سطح راهبردی است. این الگو می‌تواند مبنایی برای ساخت ابزارهای تصمیم‌یار آینده باشد که با پیشرفت فناوری کوانتومی، امکان پیاده‌سازی وسیع‌تر آنها فراهم می‌شود. همچنین، حتی در شرایط فعلی نیز استفاده از شبیه‌سازهای کوانتومی مبتنی بر نرم‌افزارهای نیمه‌کلاسیک، می‌تواند امکان ارزیابی مقدماتی

سناریوها و تصمیمات راهبردی را تا حد قابل قبولی فراهم کند. براین‌اساس، پژوهش حاضر با پذیرش این محدودیت‌ها، تلاش کرده تا بستری نظری و کاربردی برای پژوهش‌های آتی فراهم آورد که هم با واقعیت‌های فنی فعلی هم‌خوانی دارد و هم چشم‌انداز توسعه‌پذیر در آیندهٔ نزدیک را به‌صورت ساختاری در خود جای داده است.

منابع

Abdullah, A., Sandjaja, F. R., Majeed, A. A., Wickremasinghe, G., Rafferty, K., & Sharma, V. (2024). Uncertainty in Supply Chain Digital Twins: A Quantum-Classical Hybrid Approach. arXiv preprint arXiv:2411.10254. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.10254

Agrawal, P. (2014). Effect of uncertain and turbulent environment on organizational design. Economic & Business Journal, 5(1), 11-24.

Anjaria, K. (2024). Relativity in Business: How Physics Shapes Management Science. Cambridge Scholars Publishing.

Ben-Haim, Y. (2015). Dealing with uncertainty in strategic decision-making. *The US Army War College Quarterly: Parameters*, *45*(3), 8. https://doi.org/10.55540/0031-1723.2743

Blum, K. (2012). Density matrix theory and applications (Vol. 64). Springer Science & Business Media. **DOI:** 10.1007/978-3-642-20561-3

Bondeli, J. V., & Havenvid, M. I. (2022). Bouncing back in turbulent business environments: Exploring resilience in business networks. Industrial Marketing Management, 107, 383-395. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.10.022

Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. WW Norton & company.

Busemeyer, J., & Wang, Z. (2017). *Is there a problem with quantum models of psychological measurements?* PLoS ONE, 12. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187733

Chintakananda, A., McIntyre, D. P., & Chen, E. W. (2015). Uncertainty in strategic management research: Three unresolved tensions. Strategic Management Review, 9(1), 55-75.

Cieslak, A., Hansen, S., McMahon, M., & Xiao, S. (2023). Policymakers' uncertainty (No. w31849). National Bureau of Economic Research. **DOI** 10.3386/w31849

Clark, D. R., & Hunt, R. A. (2024). The Challenge and Opportunity of a Quantum Mechanics Metaphor in Organization and Management Research: A Response to Shelef, Wuebker, and Barney's "Heisenberg Effects in Experiments on Business Ideas". Academy of Management Review, (ja), amr-2024. https://doi.org/10.5465/amr.2024.0134

Dźwigoł, H., & Dzwigol-Barosz, M. (2023). Strategic management in conditions of uncertainty. *Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series*. https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.168.8

Enrique, D. V., Lerman, L. V., de Sousa, P. R., Benitez, G. B., Santos, F. M. B. C., & Frank, A. G. (2022). Being digital and flexible to navigate the storm: How digital transformation enhances supply chain flexibility in turbulent environments. International Journal of Production Economics, 250, 108668. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108668

Fang, X. H., Ming, F., & Wang, D. (2021). Characterization of the measurement uncertainty dynamics in an open system. arXiv preprint arXiv:2110.11831. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.11831

Fitzsimmons, M. F. (2006). The Problem of Uncertainty in Strategic Planning. *Survival, 48(6), 131-146.* https://doi.org/10.1080/00396330601062808

Furr, N. R., & Eisenhardt, K. M. (2021). Strategy and uncertainty: Resource-based view, strategy-creation view, and the hybrid between them. Journal of Management, 47(7), 1915-1935. ttps://doi.org/10.1177/01492063211011760

Gauthier, J., & Mangaliso, M. (2010). Uncertainty and the natural environment: Implications for strategic management. *Environmental Economics eJournal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.1705463

Glasserman, P. (2004). *Monte Carlo methods in financial engineering* (Vol. 53, pp. xiv+-596). New York: springer. DOI: 10.1007/978-0-387-21617-1

Hadizadeh, M., Ghaffari Feyzabadi, J., Fardi, Z., Mortazavi, S. M., Braga, V., & Salamzadeh, A. (2024). Digital Platforms as a Fertile Ground for the Economic Sustainability of Startups: Assaying Scenarios, Actions, Plans, and Players. *Sustainability*, *16*(16), 7139. https://doi.org/10.3390/su16167139

Harandi, A., & Hadizadeh, M. (2024). Efficient Government Budgeting Based on Artificial Intelligence in the Future of Iran: Scenarios, Policies, and Actions. *Program and Development Research*, *5*(1), 115-147. **DOI:**10.22034/pbr.2024.205536

Hou, D., Yan, J., & Dong, M. (2024). Business environment optimization and corporate strategy "Entropy Change"-based on the perspective of corporate strategic focus. Eurasian Business Review, 14(4), 1093-1121. https://doi.org/10.1007/s40821-024-00281-8

Houston, B., & Tedford, R. (2017). *Is pulmonary artery wedge pressure a Fib in A-Fib?* European Journal of Heart Failure, 19. https://doi.org/10.1002/ejhf.992

Huang, C., & Huang, Y. C. (2018). Universal Uncertainty Principle in Different Quantum Theories. *arXiv preprint arXiv:1807.11019*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.11019

Johnsen, Å. (2023). Strategic planning in turbulent times: Still useful?. Public Policy and Administration, 38(4), 445-465. https://doi.org/10.1177/09520767221080668

Kak, S. (2007). Quantum information and entropy. International Journal of Theoretical Physics, 46, 860-876. https://doi.org/10.1007/s10773-006-9245-6

Ko, Y., Lee, H., & Kim, S. (2015). *Gender differences of physics major college students' conceptual understanding and its degree of certainty in the subject of quantum mechanics.* NPSM, 65, 812-824. https://doi.org/10.3938/NPSM.65.812

Korzh, M. (2024). *The impact of quantum technologies on innovation processes in high-tech companies*. Journal of Innovation and Technology Management, 12(2), 103–117.

Lee, B., & Wexler, B. (1999). *Physics and the quandaries of contemporary psychiatry: Review and research.* Psychiatry, 62(3), 222-234. https://doi.org/10.1080/00332747.1999.11024868

Li, H. (2018). *Quantum strategies in quantum games: An agent-based simulation approach*. Decision Support Systems, 112, 89–98.

Liu, Y. (2013). Sustainable competitive advantage in turbulent business environments. *International Journal of Production Research*, *51*(10), 2821-2841. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.720392

Malinowska, K., Cyplik, P., & Piontek, J. (2017). Identification of determinants implying uncertainty of business decisions of enterprises in turbulent environment. In *24th International Conference on Production Research* (pp. 81-6).

Manne, G. A., & Zywicki, T. J. (2013). Uncertainty, evolution and behavioral economic theory. *JL Econ. & Pol'y*, *10*, 555.

Mikalef, P., Pappas, I. O., Krogstie, J., & Giannakos, M. (2018). Big data analytics capabilities: a systematic literature review and research agenda. *Information systems and e-business management*, *16*, 547-578. https://doi.org/10.1007/s10257-017-0362-y

Mohammadhosseini, B., Hadizadeh, M., & Ghafelebashi, S. F. (2021). The drivers of sustainable cyber service offer in the government with an emphasis on maintaining security using artificial intelligence. *Journal of Iran Futures Studies*, *5*(2), 35-65. DOI: 10.30479/jfs.2021.14002.1221

Parker, L. D. (2016). The global Fayol: Contemporary management and accounting traces. *Entreprises et histoire*, *83*(2), 51-63. https://doi.org/10.3917/eh.083.0051

Pei, Z., Rojas-Arevalo, A. M., de Haan, F. J., Lipovetzky, N., & Moallemi, E. A. (2024). Reinforcement learning for decision-making under deep uncertainty. *Journal of Environmental Management*, *359*, 120968. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120968

Rabaey, M. (2016). Complex adaptive systems thinking approach to enterprise architecture. In *Web Design and Development: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 339-389). IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-4666-8619-9.ch017

Refaa, R. (2023). *Thoughts and strategic maneuverings of business in quantum domains*. Journal of Quantum Management Studies, 15(1), 45–64.

Roggema, R. (2012). Turbulence and uncertainty. *Swarming Landscapes: The Art of Designing for Climate Adaptation*, 25-42. **DOI:** 10.1007/978-94-007-4378-6_2

Sadaghiani, H., & Pollock, S. (2015). *Quantum Mechanics Concept Assessment: Development and Validation Study*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 11, 010110. https://doi.org/10.1103/PHYSREVSTPER.11.010110

Salamzadeh, A., Dana, L. P., Ebrahimi, P., Hadizadeh, M., & Mortazavi, S. (2024). Technological barriers to creating regional resilience in digital platform-based firms:

Compound of performance sensitivity analysis and BIRCH algorithm. *Thunderbird International Business Review*, *66*(2), 135-149. **https://doi.org/10.1002/tie.22371**

Salamzadeh, A., Dana, L. P., Rastgoo, N., Hadizadeh, M., & Mortazavi, S. M. (2024). The Role of Coopetition in Fostering Innovation and Growth in New Technology-based Firms: A Game Theory Approach. *BAR-Brazilian Administration Review*, *21*(1), e230097. https://doi.org/10.1590/1807-7692bar2024230097

Soltani, A., & Izquierdo, A. (2019). Adaptive learning under expected and unexpected uncertainty. *Nature Reviews Neuroscience*, *20*(10), 635-644. https://doi.org/10.1038/s41583-019-0180-y

St-Pierre, J., Julien, P. A., & Fadil, N. (2023). How do entrepreneurial firms behave in the face of environmental turbulence and uncertainty? Evidence from the manufacturing sector. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, *30*(5), 880-901. https://doi.org/10.1108/JSBED-11-2022-0459

Taiwo, A., Ogunbajo, M., & Danladi, K. (2025). *Quantum computing–enhanced AI systems for advanced decision making*. International Journal of Computational Intelligence, 28(1), 76–93. https://doi.org/10.30574/ijsra.2025.14.1.0314

Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. Strategic management journal, 18(7), 509-533. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z

Teece, D., Peteraf, M., & Leih, S. (2016). Dynamic capabilities and organizational agility: Risk, uncertainty, and strategy in the innovation economy. *California management review*, *58*(4), 13-35. https://doi.org/10.1525/cmr.2016.58.4.13

Uduji, J. I. (2014). A synthesis of Taylor's and Fayol's management approaches for managing marketing executives in Nigerian Banks. *European Journal of Business and Management*, *6*(13).

Uhl-Bien, M., & Arena, M. (2018). Leadership for organizational adaptability: A theoretical synthesis and integrative framework. *The leadership quarterly*, *29*(1), 89-104. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2017.12.009

Uhl-Bien, M., Marion, R., & McKelvey, B. (2007). Complexity leadership theory: Shifting leadership from the industrial age to the knowledge era. The leadership quarterly, 18(4), 298-318. https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2007.04.002

Van der Heijden, K. (2005). Scenarios: the art of strategic conversation. John Wiley & Sons.

Verbovskyi, I. (2024). Strategic management in the face of risk and uncertainty. *Economics. Management. Innovations*. https://doi.org/10.35433/issn2410-3748-2024-1(34)-8

Wack, P. (1985). Scenarios: Uncharted waters ahead. *Harvard Business Review*, 63(5), 73-89.

Wang, Z., Solloway, T., Shiffrin, R., & Busemeyer, J. (2014). *Context effects produced by question orders reveal quantum nature of human judgments.* Proceedings of the National Academy of Sciences, 111, 9431-9436.

https://doi.org/10.1073/pnas.1407756111

Workman, M., Darch, G., Dooley, K., Lomax, G., Maltby, J., & Pollitt, H. (2021). Climate policy decision making in contexts of deep uncertainty-from optimisation to robustness. *Environmental Science & Policy*, *120*, 127-137. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.03.002

Xu, F. (2008). Strategic management in the case of uncertainty. *Journal of Shanghai Jiaotong University*.

Zelditch, S. (2019). Mathematics of quantum chaos in 2019. *Notices of the American Mathematical Society*, *66*(9), 1412-1421.

Husain, V., Kothawala, D., & Seahra, S. S. (2013). Generalized uncertainty principles and quantum field theory. Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 87(2), 025014. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.025014

Zhuravlova, I. (2024). Uncertainty in the context of forming financial strategy. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Economy and Management*. https://doi.org/10.32782/2523-4803/74-3-8