Journal of
Intelligent Financial
Management Perspectives

ISSN: 3116-0964

Developing a Real Options Pricing Framework Using Hybrid Quantum–Classical Algorithms and Advanced Monte Carlo Simulation for the Evaluation of Smart Infrastructure Projects

Abolsaeed Mohammadi*[1], Alireza Moradi[2]

[1] *M.Sc. in Financial Management, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran (Corresponding Author), E-mail: A.Mohammadi@gmail.com*

[2] *M.Sc. in Financial Management, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran*

ARTICLE INFO

Article history:
Received:21/04/2026
Received in revised form:05/05/2026
Accepted:18/05/2026
Available online:15/06/2026

Keywords:

Real Options
Quantum Computing
Hybrid Quantum–Classical Algorithms
Monte Carlo Simulation
Smart Infrastructure

ABSTRACT

Technological advancements in the field of quantum computing and the emergence of hybrid quantum–classical algorithms have created new opportunities for addressing complex financial and investment-related problems. One of the most significant challenges in the evaluation of smart infrastructure projects is the presence of multidimensional uncertainties associated with investment costs, market demand, interest rates, technological changes, and governmental policies. Traditional valuation methods, such as Discounted Cash Flow (DCF) analysis, are unable to fully capture the value of strategic opportunities embedded in these projects due to their assumption of managerial inflexibility. In contrast, Real Options Theory provides a more appropriate framework for analyzing investment decisions under uncertainty by explicitly incorporating managerial flexibility into the valuation process.

The objective of this study is to develop a novel framework for pricing real options in smart infrastructure projects through the integration of hybrid quantum–classical algorithms and advanced Monte Carlo simulation techniques. Within the proposed framework, the stochastic variables affecting project value are first modeled to represent the underlying sources of uncertainty. Subsequently, potential project value trajectories are generated using multilevel and quasi-random Monte Carlo methods. The theoretical findings indicate that the integration of quantum computing techniques with advanced simulation approaches can significantly improve valuation accuracy while substantially reducing computational costs compared to conventional classical methods. Furthermore, the proposed framework is applicable to a wide range of domains, including smart city projects, smart energy networks, intelligent transportation systems, and digital infrastructure developments. By establishing a connection between engineering economics, computational finance, and quantum computing, this research provides a new pathway for investment decision-making in complex and dynamic environments.

Article Type: Research Paper

©Authors

Journal of Intelligent Financial Management, 2026, Vol. 2, No.1, pp. 56- 75

Publish by:
Tolou-e Binish-e Ayandeh Scientific Institute

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.21135

Cite: Mohammadi,A and Moradi,A. (2026). Developing a Real Options Pricing Framework Using Hybrid Quantum–Classical Algorithms and Advanced Monte Carlo Simulation for the Evaluation of Smart Infrastructure Projects. *Journal of Intelligent Financial Management, 2(1),* 56-75.

نگرش های
مدیریت مالی هوشمند
Journal of Intelligent Financial Management Perspectives
ISSN: 3116-0964

تدوین چارچوب قیمت‌گذاری اختیارات معامله واقعی با استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی کلاسیک هیبریدی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو پیشرفته در ارزیابی پروژه‌های زیرساختی هوشمند

ابوسعید محمدی*و [۱]، علیرضا مرادی [۲]

۱ و *- کارشناسی ارشد مدیریت مالی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل نویسنده مسئول:A.Mohammadi@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد مدیریت مالی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت:۱۴۰۵/۰۲/۰۱

تاریخ بازنگری:۱۴۰۵/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۲/۲۸

تاریخ انتشار:۱۴۰۵/۰۳/۲۵

کلیدواژه‌ها:

اختیارات معامله واقعی

رایانش کوانتومی

الگوریتم‌های هیبریدی کوانتومی

شبیه‌سازی مونت‌کارلو

زیرساخت هوشمند

چکیده

تحولات فناورانه در حوزه رایانش کوانتومی و ظهور الگوریتم‌های هیبریدی کوانتومی-کلاسیک، فرصت‌های جدیدی را برای حل مسائل پیچیده مالی و سرمایه‌گذاری فراهم ساخته است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در ارزیابی پروژه‌های زیرساختی هوشمند، عدم قطعیت‌های چندبعدی مرتبط با هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تقاضا، نرخ‌های بهره، تغییرات فناوری و سیاست‌های حاکمیتی است. روش‌های سنتی ارزش‌گذاری نظیر جریان نقدی تنزیل‌شده (DCF) به دلیل فرض انعطاف‌ناپذیری تصمیمات مدیریتی، قادر به انعکاس کامل ارزش فرصت‌های راهبردی نهفته در این پروژه‌ها نیستند. در مقابل، نظریه اختیارات معامله واقعی با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مدیریتی، چارچوبی مناسب برای تحلیل تصمیمات سرمایه‌گذاری در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌دهد. هدف این پژوهش، توسعه یک چارچوب نوین برای قیمت‌گذاری اختیارات معامله واقعی در پروژه‌های زیرساختی هوشمند از طریق ترکیب الگوریتم‌های کوانتومی کلاسیک هیبریدی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو پیشرفته است. در چارچوب پیشنهادی، ابتدا متغیرهای تصادفی مؤثر بر ارزش پروژه مدل‌سازی می‌شوند. سپس با بهره‌گیری از روش‌های مونت‌کارلوی چندسطحی و شبه‌تصادفی، مسیرهای احتمالی ارزش پروژه تولید می‌گردد. نتایج نظری نشان می‌دهد که ادغام روش‌های کوانتومی با شبیه‌سازی‌های پیشرفته می‌تواند ضمن افزایش دقت ارزش‌گذاری، هزینه محاسباتی را نسبت به روش‌های کلاسیک به میزان قابل توجهی کاهش دهد. همچنین چارچوب ارائه‌شده قابلیت کاربرد در پروژه‌های شهر هوشمند، شبکه‌های انرژی هوشمند، سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند و زیرساخت‌های دیجیتال را دارا است. این پژوهش با ایجاد پیوند میان اقتصاد مهندسی، مالی محاسباتی و رایانش کوانتومی، مسیر جدیدی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری در محیط‌های پیچیده و پویا فراهم می‌آورد.

نشریه مدیریت مالی هوشمند، ۱۴۰۵، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۵۶-۷۵.

ناشر: موسسه علمی طلوع بینش آینده

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.21135

نوع مقاله: پژوهشی

© نویسندگان

استناد: محمدی, ابوسعید و مرادی, علیرضا. (۱۴۰۵). تدوین چارچوب قیمت‌گذاری اختیارات معامله واقعی با استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی کلاسیک هیبریدی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو پیشرفته در ارزیابی پروژه‌های زیرساختی هوشمند. *مدیریت مالی هوشمند*, ۲(۱), ۵۶-۷۵.

ISSN: 3116-0964

۱-مقدمه

سرمایه‌گذاری در پروژه‌های زیرساختی همواره یکی از مهم‌ترین حوزه‌های تصمیم‌گیری اقتصادی در سطح ملی و منطقه‌ای به شمار می‌آید. توسعه زیرساخت‌ها نقش بنیادینی در رشد اقتصادی، افزایش بهره‌وری، بهبود کیفیت زندگی شهروندان و ارتقای توان رقابتی کشورها ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر و با گسترش فناوری‌های نوین، مفهوم زیرساخت هوشمند به عنوان نسل جدیدی از زیرساخت‌های فیزیکی و دیجیتال مطرح شده است. زیرساخت‌های هوشمند شامل شبکه‌های انرژی هوشمند، سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، شهرهای هوشمند، مراکز داده پیشرفته، شبکه‌های ارتباطی نوین و سایر سامانه‌هایی هستند که از فناوری‌های دیجیتال، اینترنت اشیا، تحلیل داده و هوش مصنوعی برای افزایش کارایی و بهینه‌سازی عملکرد خود بهره می‌گیرند. اگرچه این پروژه‌ها ظرفیت قابل توجهی برای ایجاد ارزش اقتصادی و اجتماعی دارند، اما ماهیت پیچیده و بلندمدت آن‌ها موجب می‌شود که تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری در این حوزه با چالش‌های فراوانی همراه باشد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پروژه‌های زیرساختی هوشمند، وجود سطوح بالای عدم قطعیت در تمامی مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری است. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند از منابع مختلفی ناشی شوند. تغییرات سریع فناوری، نوسانات اقتصادی، تغییر الگوهای مصرف، تحولات سیاسی و مقرراتی، تغییرات نرخ بهره، تورم، هزینه‌های تأمین مالی و حتی عوامل محیطی و اجتماعی همگی از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر ارزش اقتصادی پروژه اثرگذار باشند. به همین دلیل، ارزیابی صحیح این پروژه‌ها نیازمند استفاده از روش‌هایی است که بتوانند پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود را به شکل واقع‌بینانه در نظر بگیرند. در غیر این صورت، احتمال اتخاذ تصمیمات نادرست سرمایه‌گذاری افزایش یافته و منابع مالی به شکل ناکارآمد تخصیص خواهند یافت. در ادبیات اقتصاد مهندسی و مدیریت مالی، روش‌های متعددی برای ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری ارائه شده است. از میان این روش‌ها، ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی از پرکاربردترین ابزارهای ارزیابی محسوب می‌شوند. ارزش فعلی خالص بر مبنای تنزیل جریان‌های نقدی مورد انتظار پروژه و مقایسه آن با سرمایه‌گذاری اولیه محاسبه می‌شود و نرخ بازده داخلی نیز نرخی است که ارزش فعلی جریان‌های نقدی آینده را با هزینه اولیه سرمایه‌گذاری برابر می‌سازد. اگرچه این روش‌ها از نظر نظری دارای بنیان‌های مستحکمی هستند و در بسیاری از پروژه‌ها کاربرد موفقی داشته‌اند، اما در مواجهه با پروژه‌های زیرساختی هوشمند با محدودیت‌های جدی روبه‌رو می‌شوند. مهم‌ترین محدودیت این روش‌ها آن است که فرض می‌کنند تصمیم سرمایه‌گذاری در ابتدای پروژه اتخاذ شده و تا پایان دوره بدون تغییر باقی می‌ماند. در حالی که در دنیای واقعی، مدیران پروژه می‌توانند بر اساس شرایط جدید، تصمیمات خود را اصلاح یا بازنگری کنند (احمدوند و همکاران،۱۴۰۵).

در بسیاری از پروژه‌های زیرساختی، مدیران این امکان را دارند که زمان آغاز پروژه را به تعویق بیندازند، ظرفیت پروژه را افزایش دهند، بخشی از فعالیت‌ها را متوقف کنند، فناوری مورد استفاده را تغییر دهند یا حتی در صورت نامناسب بودن شرایط بازار از ادامه پروژه صرف‌نظر نمایند. این انعطاف‌پذیری مدیریتی دارای ارزش اقتصادی است و نادیده گرفتن آن می‌تواند منجر به برآورد نادرست ارزش واقعی پروژه شود. در پاسخ به این محدودیت‌ها، نظریه اختیارات معامله واقعی به عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای نوین در ارزیابی پروژه‌ها مطرح شده است. این نظریه با الهام از مفاهیم بازارهای مالی توسعه یافته و تلاش می‌کند ارزش فرصت‌ها و اختیارات مدیریتی موجود در پروژه را اندازه‌گیری کند. بر اساس این دیدگاه، مدیران پروژه همانند دارندگان اختیار معامله در بازارهای مالی قادرند در زمان‌های مختلف تصمیمات بهینه‌ای اتخاذ کنند و همین انعطاف‌پذیری، ارزش افزوده‌ای برای پروژه ایجاد می‌کند. نظریه اختیارات معامله واقعی در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را در حوزه‌های اقتصاد مهندسی، مدیریت پروژه، مالی شرکتی و برنامه‌ریزی راهبردی به خود جلب کرده است. پژوهشگران متعددی نشان داده‌اند که استفاده از این نظریه می‌تواند به درک دقیق‌تر ارزش پروژه‌ها در شرایط عدم قطعیت کمک کند. به ویژه در پروژه‌هایی که با تغییرات فناوری و ریسک‌های محیطی گسترده مواجه هستند، روش اختیارات معامله واقعی نسبت به روش‌های سنتی عملکرد مناسب‌تری دارد. مطالعات انجام شده در سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ نیز بر اهمیت این رویکرد در ارزیابی پروژه‌های زیرساختی و فناوری‌محور تأکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که انعطاف‌پذیری مدیریتی می‌تواند سهم قابل توجهی از ارزش کل پروژه را تشکیل دهد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و اکبری، ۱۳۹۷؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۹).

با وجود مزایای فراوان نظریه اختیارات معامله واقعی، پیاده‌سازی عملی آن با چالش‌های محاسباتی متعددی همراه است. ارزش‌گذاری این اختیارات نیازمند مدل‌سازی دقیق رفتار متغیرهای تصادفی، بررسی وابستگی میان عوامل مختلف و تحلیل تعداد بسیار زیادی از سناریوهای احتمالی است. در پروژه‌های زیرساختی هوشمند، تعداد متغیرهای مؤثر بر ارزش پروژه بسیار زیاد بوده و روابط میان این متغیرها اغلب غیرخطی و پیچیده هستند. در نتیجه، استفاده از روش‌های سنتی محاسباتی برای تحلیل چنین مسائلی با افزایش شدید هزینه زمانی و محاسباتی مواجه می‌شود. هرچه تعداد متغیرهای تصادفی بیشتر شود، حجم محاسبات مورد نیاز نیز به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد و این مسئله یکی از مهم‌ترین موانع کاربرد گسترده نظریه اختیارات معامله واقعی در پروژه‌های بزرگ به شمار می‌رود.

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پیشرفته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. شبیه‌سازی مونت‌کارلو یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل عدم قطعیت در مسائل مالی و اقتصادی محسوب می‌شود. این روش از تولید تعداد زیادی نمونه تصادفی برای برآورد رفتار سیستم استفاده می‌کند و امکان تحلیل سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد. در شبیه‌سازی مونت‌کارلو، متغیرهای کلیدی پروژه بر اساس توزیع‌های احتمالی مشخص مدل‌سازی شده و سپس هزاران یا میلیون‌ها مسیر مختلف برای آینده پروژه ایجاد می‌شود. با تحلیل نتایج حاصل از این مسیرها، می‌توان برآوردی دقیق‌تر از ارزش پروژه و میزان ریسک آن به دست آورد. پژوهش‌های انجام شده در فاصله سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ نشان داده‌اند که استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ارزیابی پروژه‌های پیچیده موجب افزایش دقت تصمیم‌گیری و بهبود مدیریت ریسک می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ حسینی و قاسمی، ۱۳۹۸؛ موسوی و همکاران، ۱۴۰۰).

با این حال، حتی روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی نیز در پروژه‌های بسیار بزرگ با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. افزایش تعداد سناریوها و متغیرهای تصادفی سبب می‌شود زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات به شکل چشمگیری افزایش یابد. به همین دلیل، پژوهشگران در سال‌های اخیر به دنبال فناوری‌های نوینی بوده‌اند که بتوانند توان محاسباتی مورد نیاز برای حل چنین مسائل پیچیده‌ای را فراهم کنند. در این میان، رایانش کوانتومی به عنوان یکی از نویدبخش‌ترین فناوری‌های قرن بیست و یکم مطرح شده است. رایانش کوانتومی بر مبنای اصول فیزیک کوانتومی عمل می‌کند و از ویژگی‌هایی نظیر برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی برای پردازش اطلاعات بهره می‌گیرد. این ویژگی‌ها امکان انجام همزمان حجم بسیار زیادی از محاسبات را فراهم می‌کنند و در نتیجه، ظرفیت حل مسائل پیچیده را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که رایانش کوانتومی می‌تواند در حوزه‌های مختلفی از جمله بهینه‌سازی، یادگیری ماشین، تحلیل داده و مالی محاسباتی کاربرد داشته باشد. در حوزه مالی، یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری، توانایی آن در تسریع فرآیندهای شبیه‌سازی و ارزش‌گذاری دارایی‌ها است. الگوریتم‌های کوانتومی قادرند برخی محاسبات را با سرعتی بسیار بیشتر از روش‌های کلاسیک انجام دهند و به همین دلیل توجه پژوهشگران مالی را به خود جلب کرده‌اند. مطالعات منتشر شده در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که بهره‌گیری از رویکردهای کوانتومی می‌تواند هزینه محاسباتی تحلیل ریسک، ارزش‌گذاری دارایی‌ها و بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری را به طور چشمگیری کاهش دهد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نوری و همکاران، ۱۴۰۰). با وجود ظرفیت‌های بالای رایانش کوانتومی، محدودیت‌های فنی موجود در سخت‌افزارهای فعلی سبب شده است که استفاده از رویکردهای کاملاً کوانتومی هنوز با چالش‌هایی همراه باشد. به همین دلیل، مفهوم الگوریتم‌های هیبریدی یا ترکیبی مطرح شده است. در این رویکرد، بخشی از محاسبات توسط سامانه‌های کلاسیک و بخش دیگر توسط پردازنده‌های کوانتومی انجام می‌شود. چنین ساختاری امکان بهره‌برداری از مزایای هر دو فناوری را فراهم می‌سازد و در عین حال محدودیت‌های هر یک را کاهش می‌دهد. الگوریتم‌های هیبریدی در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین حوزه‌های پژوهشی در مالی محاسباتی تبدیل شده‌اند و نتایج اولیه نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها می‌توانند عملکرد مناسبی در حل مسائل پیچیده ارزش‌گذاری و بهینه‌سازی داشته باشند. بر این اساس، ضرورت توسعه چارچوب‌های نوین برای ارزیابی پروژه‌های زیرساختی هوشمند بیش از پیش احساس می‌شود. چارچوب‌هایی که بتوانند عدم قطعیت‌های چندبعدی، انعطاف‌پذیری مدیریتی، پیچیدگی روابط میان متغیرها و نیازهای محاسباتی گسترده را به صورت همزمان پوشش دهند. ترکیب نظریه اختیارات معامله واقعی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو پیشرفته و الگوریتم‌های هیبریدی مبتنی بر رایانش کوانتومی می‌تواند راهکاری مؤثر برای دستیابی به این هدف باشد. این رویکرد ضمن افزایش دقت ارزش‌گذاری، امکان تحلیل تعداد بیشتری از سناریوها را فراهم کرده و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. همچنین می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا در شرایط عدم قطعیت بالا، راهبردهای سرمایه‌گذاری مناسب‌تری اتخاذ کنند و از منابع مالی به شکل کارآمدتری بهره ببرند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و اکبری، ۱۳۹۷؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۹).

در مجموع، تحول دیجیتال و گسترش زیرساخت‌های هوشمند موجب شده است که روش‌های سنتی ارزیابی پروژه دیگر پاسخگوی نیازهای محیط پیچیده و پویای کنونی نباشند. بهره‌گیری از رویکردهای نوین مبتنی بر اختیارات معامله واقعی، شبیه‌سازی پیشرفته و فناوری‌های محاسباتی نوظهور می‌تواند افق‌های جدیدی را در حوزه تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری بگشاید. از این رو، توسعه چارچوب‌های تحلیلی جامع که بتوانند قابلیت‌های این ابزارها را در کنار یکدیگر به کار گیرند، یکی از ضروری‌ترین موضوعات پژوهشی در حوزه مالی، اقتصاد مهندسی و مدیریت پروژه محسوب می‌شود و می‌تواند زمینه‌ساز ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری در پروژه‌های زیرساختی هوشمند در سال‌های آینده باشد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ نظریه اختیارات معامله واقعی

نظریه اختیارات معامله واقعی یکی از مهم‌ترین رویکردهای نوین در حوزه اقتصاد مهندسی، مدیریت مالی و ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری است که با هدف رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی ارزش‌گذاری توسعه یافته است. این نظریه از مفاهیم و اصول حاکم بر قیمت‌گذاری اختیار معامله در بازارهای مالی الهام گرفته و آن‌ها را برای تحلیل تصمیمات سرمایه‌گذاری در دارایی‌های واقعی به کار می‌گیرد. در این چارچوب، پروژه سرمایه‌گذاری به عنوان دارایی پایه در نظر گرفته می‌شود و تصمیمات مدیریتی که در طول عمر پروژه اتخاذ می‌شوند، معادل اختیاراتی تلقی می‌شوند که مدیران می‌توانند در زمان مناسب از آن‌ها استفاده کنند. به بیان دیگر، نظریه اختیارات معامله واقعی این امکان را فراهم می‌سازد که ارزش اقتصادی انعطاف‌پذیری مدیریتی در فرآیند تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری اندازه‌گیری و در محاسبات ارزش پروژه لحاظ شود. پیدایش این نظریه به این واقعیت بازمی‌گردد که بسیاری از تصمیمات سرمایه‌گذاری در محیط‌هایی اتخاذ می‌شوند که با عدم قطعیت‌های گسترده همراه هستند. در چنین شرایطی، مدیران پروژه مجبور نیستند صرفاً به تصمیمات اولیه خود پایبند بمانند، بلکه می‌توانند متناسب با تغییر شرایط اقتصادی، فناوری، بازار و محیط رقابتی، تصمیمات جدیدی اتخاذ کنند. این انعطاف‌پذیری دارای ارزش اقتصادی است و نادیده گرفتن آن می‌تواند موجب کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی ارزش واقعی پروژه شود. از این رو، نظریه اختیارات معامله واقعی تلاش می‌کند ارزش فرصت‌های ناشی از انعطاف مدیریتی را به صورت کمی اندازه‌گیری کرده و در فرآیند ارزیابی پروژه وارد نماید (احمدوند و همکاران،۱۴۰۵).

در روش‌های سنتی ارزیابی پروژه، فرض بر این است که مدیران پس از آغاز پروژه امکان تغییر مسیر تصمیمات خود را ندارند و تمامی جریان‌های نقدی آینده از پیش تعیین شده‌اند. این در حالی است که در عمل، مدیران به طور مستمر اطلاعات جدیدی درباره وضعیت بازار، تغییرات فناوری، هزینه‌ها و میزان تقاضا دریافت می‌کنند و بر اساس این اطلاعات تصمیمات خود را اصلاح می‌نمایند. نظریه اختیارات معامله واقعی این واقعیت را در نظر گرفته و پروژه را به عنوان مجموعه‌ای از فرصت‌های تصمیم‌گیری پویا تحلیل می‌کند. در نتیجه، ارزش پروژه نه تنها به جریان‌های نقدی مورد انتظار بلکه به توانایی مدیران در واکنش به شرایط متغیر محیطی نیز وابسته خواهد بود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و اکبری، ۱۳۹۷؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۹).

یکی از مهم‌ترین کاربردهای این نظریه در پروژه‌هایی است که با سطح بالایی از عدم قطعیت مواجه هستند. پروژه‌های زیرساختی هوشمند، پروژه‌های فناوری‌محور، سرمایه‌گذاری‌های انرژی، صنایع پیشرفته و طرح‌های تحقیق و توسعه از جمله حوزه‌هایی هستند که بیشترین بهره را از رویکرد اختیارات معامله واقعی می‌برند. در این پروژه‌ها، تغییرات سریع فناوری، نوسانات تقاضا، تحولات اقتصادی و تغییرات مقرراتی می‌توانند مسیر پروژه را به طور کامل دگرگون کنند. بنابراین وجود ابزاری که بتواند ارزش انعطاف‌پذیری مدیریتی را منعکس سازد، اهمیت فراوانی دارد.

در ادبیات موضوع، انواع مختلفی از اختیارات معامله واقعی معرفی شده‌اند که هر یک بیانگر نوع خاصی از انعطاف مدیریتی هستند. یکی از رایج‌ترین انواع این اختیارات، اختیار تعویق سرمایه‌گذاری است. در بسیاری از موارد، مدیران می‌توانند اجرای پروژه را تا زمان روشن‌تر شدن شرایط بازار یا کاهش سطح عدم قطعیت به تعویق بیندازند. این اختیار به ویژه در پروژه‌هایی که نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه سنگین هستند، اهمیت زیادی دارد. با استفاده از این اختیار، سرمایه‌گذار می‌تواند از ورود زودهنگام به پروژه‌های پرریسک اجتناب کرده و در زمان مناسب تصمیم‌گیری نماید. پژوهش‌های انجام شده نشان داده‌اند که ارزش اختیار تعویق در محیط‌های دارای نوسان بالا به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

نوع دیگری از اختیارات معامله واقعی، اختیار توسعه پروژه است. این اختیار زمانی مطرح می‌شود که مدیران بتوانند در صورت موفقیت اولیه پروژه، ظرفیت تولید، دامنه فعالیت یا مقیاس عملیات را افزایش دهند. در بسیاری از پروژه‌های زیرساختی هوشمند، امکان توسعه تدریجی پروژه وجود

دارد و سرمایه‌گذاران می‌توانند پس از مشاهده نتایج اولیه، درباره گسترش فعالیت‌ها تصمیم‌گیری کنند. این انعطاف‌پذیری سبب می‌شود پروژه بتواند از فرصت‌های سودآور آینده بهره‌برداری بیشتری داشته باشد و در نتیجه ارزش اقتصادی آن افزایش یابد (رضایی و اکبری، ۱۳۹۷).

اختیار کاهش مقیاس فعالیت نیز یکی دیگر از اشکال مهم اختیارات واقعی محسوب می‌شود. در شرایطی که بازار با رکود مواجه شود یا عملکرد پروژه پایین‌تر از سطح مورد انتظار قرار گیرد، مدیران می‌توانند بخشی از ظرفیت تولید یا دامنه فعالیت‌های پروژه را کاهش دهند. این اقدام موجب محدود شدن زیان‌های احتمالی و افزایش کارایی تخصیص منابع می‌شود. اهمیت این اختیار در محیط‌های پرریسک و دارای نوسانات شدید اقتصادی بسیار بیشتر است، زیرا به مدیران امکان می‌دهد در برابر شرایط نامطلوب واکنش مناسبی نشان دهند.

اختیار توقف موقت نیز یکی از ابزارهای مهم مدیریت پروژه در شرایط عدم قطعیت است. برخی پروژه‌ها این امکان را دارند که در دوره‌های نامساعد اقتصادی یا هنگام کاهش شدید تقاضا به طور موقت متوقف شوند و پس از بهبود شرایط مجدداً فعالیت خود را آغاز کنند. وجود این اختیار می‌تواند از تحمیل هزینه‌های اضافی به سرمایه‌گذار جلوگیری کرده و ارزش پروژه را افزایش دهد. در صنایع انرژی، حمل‌ونقل و زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، اختیار توقف موقت نقش مهمی در مدیریت ریسک ایفا می‌کند (حسینی و قاسمی، ۱۳۹۸).

از دیگر انواع اختیارات معامله واقعی می‌توان به اختیار ترک پروژه اشاره کرد. این اختیار به مدیران اجازه می‌دهد در صورت نامطلوب بودن شرایط اقتصادی یا کاهش شدید سودآوری، پروژه را متوقف کرده و دارایی‌های آن را به فروش برسانند. ارزش این اختیار در شرایطی که احتمال شکست پروژه بالا باشد، بسیار قابل توجه است. در واقع اختیار ترک پروژه نوعی ابزار حفاظتی در برابر زیان‌های سنگین محسوب می‌شود و می‌تواند ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش دهد. اختیار تغییر فناوری نیز از جمله اختیارات مهم در پروژه‌های مبتنی بر فناوری‌های نوین است. با توجه به سرعت بالای پیشرفت فناوری، ممکن است در طول عمر پروژه فناوری‌های جدیدتری در دسترس قرار گیرند که کارایی بالاتر یا هزینه کمتری داشته باشند. در چنین شرایطی، مدیران می‌توانند فناوری مورد استفاده را تغییر داده و از مزایای فناوری‌های جدید بهره‌مند شوند. این اختیار در پروژه‌های زیرساختی هوشمند، شبکه‌های انرژی، سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند و مراکز داده اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا نوآوری‌های فناوری به طور مستمر بر عملکرد این پروژه‌ها تأثیر می‌گذارند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۹).

نکته مهم آن است که در بسیاری از پروژه‌های واقعی، این اختیارات به صورت مستقل وجود ندارند، بلکه چندین اختیار به طور همزمان در ساختار پروژه حضور دارند. به عنوان مثال، یک پروژه شهر هوشمند ممکن است به طور همزمان دارای اختیار تعویق، توسعه، کاهش مقیاس، تغییر فناوری و ترک پروژه باشد. وجود این اختیارات ترکیبی موجب افزایش پیچیدگی فرآیند ارزش‌گذاری می‌شود؛ زیرا ارزش هر اختیار به نحوی بر ارزش سایر اختیارات تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، تحلیل پروژه‌های زیرساختی هوشمند نیازمند استفاده از مدل‌های پیشرفته و روش‌های محاسباتی قدرتمند است که بتوانند تعامل میان این اختیارات را به درستی شبیه‌سازی کنند.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران تلاش کرده‌اند با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پیشرفته، مدل‌های درخت تصمیم، فرآیندهای تصادفی و تکنیک‌های محاسباتی نوین، دقت ارزش‌گذاری اختیارات معامله واقعی را افزایش دهند. نتایج مطالعات انجام شده در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد اختیارات معامله واقعی در مقایسه با روش‌های سنتی، برآورد واقع‌بینانه‌تری از ارزش پروژه ارائه می‌دهد و موجب بهبود کیفیت تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ موسوی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین مشخص شده است که هرچه سطح عدم قطعیت و میزان انعطاف‌پذیری مدیریتی بیشتر باشد، تفاوت میان نتایج حاصل از روش‌های سنتی و نظریه اختیارات معامله واقعی نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی، نظریه اختیارات معامله واقعی را می‌توان یکی از مهم‌ترین تحولات در حوزه ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری دانست. این نظریه با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی انعطاف‌پذیری مدیریتی، امکان تحلیل واقع‌بینانه‌تر پروژه‌ها را فراهم می‌کند و به مدیران کمک می‌نماید تصمیمات بهینه‌تری در شرایط عدم قطعیت اتخاذ کنند. اهمیت این رویکرد به ویژه در پروژه‌های زیرساختی هوشمند که با تغییرات فناوری، ریسک‌های اقتصادی و تحولات محیطی گسترده مواجه هستند، بیش از پیش آشکار می‌شود. از این رو، نظریه اختیارات معامله واقعی امروزه به عنوان یکی از ارکان اصلی تحلیل سرمایه‌گذاری در پروژه‌های پیچیده و بلندمدت شناخته می‌شود و کاربرد آن در مطالعات علمی و عملی به طور مستمر در حال گسترش است.

۲-۲ محدودیت مدل‌های سنتی قیمت‌گذاری

مدل‌های سنتی قیمت‌گذاری اختیارات و ارزش‌گذاری پروژه‌های سرمایه‌گذاری طی چند دهه گذشته نقش مهمی در توسعه ادبیات مالی و تصمیم‌گیری اقتصادی ایفا کرده‌اند. این مدل‌ها به دلیل سادگی مفهومی، قابلیت تحلیل ریاضی و امکان پیاده‌سازی در شرایط مختلف، به طور

گسترده در بازارهای مالی و ارزیابی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، گسترش پروژه‌های پیچیده، فناوری‌محور و زیرساختی موجب شده است که محدودیت‌های این مدل‌ها بیش از گذشته آشکار شود. به ویژه در پروژه‌های زیرساختی هوشمند که با عدم قطعیت‌های چندبعدی، تغییرات سریع فناوری و ساختارهای تصمیم‌گیری پویا مواجه هستند، مدل‌های سنتی دیگر قادر نیستند تمامی ابعاد مسئله را به صورت دقیق منعکس کنند.

یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های قیمت‌گذاری اختیار معامله، مدل بلک–شولز است که از دهه‌های گذشته به عنوان یکی از پایه‌های نظری ارزش‌گذاری ابزارهای مشتقه شناخته می‌شود. این مدل بر مجموعه‌ای از فرضیات استوار است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به وجود یک منبع اصلی عدم قطعیت، ثابت بودن نوسان‌پذیری، امکان معامله پیوسته دارایی پایه، نبود هزینه‌های معاملاتی و رفتار تصادفی مشخص قیمت دارایی اشاره کرد. اگرچه این فرضیات در بسیاری از شرایط بازارهای مالی می‌توانند تقریب مناسبی از واقعیت ارائه دهند، اما در محیط پروژه‌های واقعی و به ویژه پروژه‌های زیرساختی هوشمند، به ندرت برقرار هستند. در چنین پروژه‌هایی معمولاً با مجموعه‌ای از عوامل متغیر و به هم پیوسته مواجه هستیم که به طور همزمان بر ارزش پروژه تأثیر می‌گذارند (احمدوند و همکاران،۱۴۰۵).

علاوه بر مدل بلک–شولز، مدل درخت دودویی نیز یکی دیگر از روش‌های رایج برای ارزش‌گذاری اختیارات محسوب می‌شود. این مدل تلاش می‌کند با تقسیم زمان به دوره‌های مشخص و در نظر گرفتن حرکت‌های صعودی و نزولی برای ارزش دارایی، فرآیند تصمیم‌گیری را شبیه‌سازی کند. هرچند این روش نسبت به مدل بلک–شولز انعطاف‌پذیری بیشتری دارد، اما با افزایش تعداد متغیرهای تصادفی و پیچیده شدن ساختار پروژه، حجم محاسبات مورد نیاز به سرعت افزایش می‌یابد. به همین دلیل، کاربرد آن در پروژه‌های بزرگ و چندبعدی با محدودیت‌های عملی جدی روبه‌رو می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در پروژه‌های زیرساختی هوشمند، وجود چندین منبع عدم قطعیت به صورت همزمان است. برخلاف بسیاری از مدل‌های کلاسیک که تنها یک عامل ریسک را در نظر می‌گیرند، در این پروژه‌ها متغیرهای متعددی بر ارزش سرمایه‌گذاری اثرگذار هستند. هزینه‌های ساخت، نرخ بهره، نرخ تورم، میزان تقاضای بازار، تغییرات فناوری، سیاست‌های دولت، شرایط رقابتی و عوامل محیطی تنها بخشی از منابع عدم قطعیت موجود در چنین پروژه‌هایی هستند. هر یک از این عوامل می‌تواند مسیر پروژه را تحت تأثیر قرار دهد و ترکیب آن‌ها موجب شکل‌گیری فضای تصمیم‌گیری بسیار پیچیده‌ای می‌شود. در نتیجه، مدل‌هایی که تنها بر یک یا چند متغیر محدود تمرکز دارند، قادر به ارائه تصویری جامع از ارزش واقعی پروژه نخواهند بود (عباسی و نادری،۱۳۹۷).

موضوع مهم دیگری که ارزش‌گذاری پروژه‌های زیرساختی را پیچیده می‌سازد، وجود همبستگی میان متغیرهای مختلف است. در بسیاری از موارد، عوامل تأثیرگذار بر پروژه مستقل از یکدیگر نیستند. به عنوان مثال، افزایش نرخ تورم ممکن است موجب افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری شود و همزمان بر نرخ بهره و میزان تقاضا نیز تأثیر بگذارد. همچنین تحولات فناوری می‌توانند بر هزینه تولید، ساختار رقابت و رفتار مصرف‌کنندگان اثرگذار باشند. این وابستگی‌ها سبب می‌شوند تغییر در یک متغیر، پیامدهای زنجیره‌ای متعددی در سایر متغیرها ایجاد کند. مدل‌های سنتی معمولاً قادر به انعکاس دقیق این روابط متقابل نیستند و در نتیجه بخشی از واقعیت اقتصادی پروژه را نادیده می‌گیرند (قاسمی و یوسفی،۱۴۰۰).

از سوی دیگر، بسیاری از روابط حاکم بر پروژه‌های زیرساختی هوشمند ماهیتی غیرخطی دارند. در مدل‌های کلاسیک معمولاً فرض می‌شود که تغییرات متغیرها دارای اثرات خطی و قابل پیش‌بینی هستند، در حالی که در محیط واقعی چنین فرضی اغلب معتبر نیست. برای مثال، افزایش اندک تقاضا ممکن است در مراحل اولیه تأثیر محدودی بر سودآوری پروژه داشته باشد، اما پس از عبور از یک سطح مشخص، موجب جهش قابل توجه درآمدها شود. همچنین کاهش هزینه فناوری در برخی موارد می‌تواند منجر به افزایش سریع نرخ پذیرش فناوری و رشد ناگهانی ارزش پروژه گردد. این نوع رفتارهای غیرخطی موجب می‌شود استفاده از مدل‌های ساده و خطی نتواند تصویری دقیق از آینده پروژه ارائه دهد.

یکی دیگر از محدودیت‌های اساسی مدل‌های سنتی، ناتوانی آن‌ها در مواجهه با ساختارهای زمانی پیچیده است. پروژه‌های زیرساختی هوشمند معمولاً دارای دوره‌های زمانی طولانی هستند و در طول عمر خود مراحل مختلفی را طی می‌کنند. تصمیمات مدیریتی در هر مرحله می‌تواند بر مراحل بعدی تأثیرگذار باشد و جریان‌های نقدی پروژه نیز در طول زمان دچار تغییرات اساسی شوند. علاوه بر این، برخی رویدادها ممکن است تنها در مقاطع زمانی خاصی رخ دهند و آثار بلندمدتی بر پروژه برجای بگذارند. مدل‌های کلاسیک که عمدتاً بر چارچوب‌های زمانی ساده و ایستا مبتنی هستند، توانایی محدودی در تحلیل چنین ساختارهای پیچیده‌ای دارند. در نتیجه، ارزش‌گذاری حاصل از آن‌ها ممکن است با واقعیت فاصله قابل توجهی داشته باشد. شوک‌های فناوری نیز یکی از عوامل مهمی هستند که محدودیت مدل‌های سنتی را آشکار می‌سازند. در عصر تحول دیجیتال، فناوری با سرعت بسیار بالایی در حال پیشرفت است و این پیشرفت می‌تواند ارزش پروژه‌ها را به شکل چشمگیری تغییر دهد. ظهور

یک فناوری جدید ممکن است هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد، ظرفیت تولید را افزایش دهد یا حتی کل مدل کسب‌وکار یک پروژه را دگرگون سازد. از سوی دیگر، منسوخ شدن فناوری‌های موجود نیز می‌تواند موجب کاهش ارزش سرمایه‌گذاری شود. از آنجا که وقوع این شوک‌ها اغلب غیرقابل پیش‌بینی است، مدل‌های سنتی که بر فرض ثبات نسبی شرایط استوار هستند، نمی‌توانند آثار آن‌ها را به درستی در محاسبات خود منعکس کنند.

افزون بر موارد فوق، پروژه‌های زیرساختی هوشمند معمولاً دارای انعطاف‌پذیری مدیریتی قابل توجهی هستند. مدیران می‌توانند در واکنش به شرایط محیطی، زمان اجرای پروژه را تغییر دهند، ظرفیت آن را توسعه دهند، بخشی از فعالیت‌ها را متوقف کنند یا فناوری مورد استفاده را اصلاح نمایند. این قابلیت‌ها ارزش اقتصادی مهمی ایجاد می‌کنند، اما مدل‌های سنتی غالباً این ارزش را نادیده می‌گیرند. در نتیجه، ارزش نهایی پروژه کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود و تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری با خطا همراه خواهد بود. مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که هرچه پیچیدگی پروژه افزایش یابد، فاصله میان نتایج حاصل از مدل‌های سنتی و ارزش واقعی پروژه بیشتر می‌شود. پژوهش‌های متعددی تأکید کرده‌اند که روش‌های کلاسیک در محیط‌های دارای عدم قطعیت چندگانه و وابستگی‌های پیچیده عملکرد ضعیف‌تری دارند و استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر برای تحلیل این پروژه‌ها ضروری است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی و اکبری، ۱۳۹۷؛ حسینی و قاسمی، ۱۳۹۸؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ موسوی و همکاران، ۱۴۰۰).

در پاسخ به این محدودیت‌ها، پژوهشگران به سمت استفاده از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی حرکت کرده‌اند. شبیه‌سازی مونت‌کارلو به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل عدم قطعیت، امکان مدل‌سازی همزمان تعداد زیادی از متغیرهای تصادفی و بررسی سناریوهای مختلف را فراهم می‌کند. این روش می‌تواند وابستگی میان متغیرها، رفتارهای غیرخطی و ساختارهای زمانی پیچیده را در قالب هزاران یا میلیون‌ها مسیر احتمالی شبیه‌سازی نماید. به همین دلیل، شبیه‌سازی مونت‌کارلو در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای اصلی ارزش‌گذاری اختیارات معامله واقعی و ارزیابی پروژه‌های زیرساختی تبدیل شده است. در مجموع می‌توان گفت که مدل‌های سنتی قیمت‌گذاری اگرچه نقش مهمی در توسعه دانش مالی داشته‌اند، اما برای تحلیل پروژه‌های زیرساختی هوشمند با محدودیت‌های جدی مواجه هستند. وجود چندین منبع عدم قطعیت، همبستگی میان متغیرها، رفتارهای غیرخطی، ساختارهای زمانی پیچیده و شوک‌های فناوری موجب می‌شود که این مدل‌ها نتوانند تصویر کاملی از ارزش واقعی پروژه ارائه دهند. از این رو، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر نظیر شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل‌های نوین محاسباتی به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در ارزیابی پروژه‌های پیچیده تبدیل شده است و زمینه را برای توسعه رویکردهای جدید در حوزه ارزش‌گذاری و مدیریت سرمایه‌گذاری فراهم ساخته است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۱. نظریه اختیارات معاملات واقعی

۲-۳ شبیه‌سازی مونت‌کارلو

شبیه‌سازی مونت‌کارلو یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده در علوم مالی، اقتصاد، مهندسی و مدیریت پروژه به شمار می‌آید. این روش که نخستین بار در میانه قرن بیستم توسعه یافت، امروزه به عنوان یکی از ابزارهای اصلی تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت شناخته می‌شود. اهمیت شبیه‌سازی مونت‌کارلو در آن است که امکان بررسی رفتار سیستم‌های پیچیده را در شرایطی فراهم می‌کند که استفاده از روش‌های تحلیلی و ریاضی سنتی با دشواری یا حتی عدم امکان مواجه باشد. در پروژه‌های زیرساختی هوشمند که با تعداد زیادی متغیر تصادفی، روابط غیرخطی و ریسک‌های چندبعدی همراه هستند، شبیه‌سازی مونت‌کارلو به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای تحلیل و ارزش‌گذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (کاظمی و فرجی،۱۳۹۹).

اساس شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر استفاده از اعداد تصادفی برای تولید تعداد زیادی سناریوی ممکن استوار است. در این روش، به جای آنکه تنها یک مقدار قطعی برای متغیرهای کلیدی پروژه در نظر گرفته شود، برای هر متغیر یک توزیع احتمالاتی تعریف می‌شود. سپس با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی از این توزیع‌ها، هزاران یا حتی میلیون‌ها سناریوی مختلف ایجاد شده و رفتار پروژه در هر سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، با تجمیع نتایج حاصل از تمامی سناریوها، تصویری جامع از وضعیت احتمالی آینده پروژه به دست می‌آید. این ویژگی سبب شده است که شبیه‌سازی مونت‌کارلو به یکی از مهم‌ترین روش‌های تحلیل ریسک و عدم قطعیت در محیط‌های پیچیده تبدیل شود (رحیمی و کریمی،۱۴۰۲)

در حوزه ارزیابی پروژه‌های سرمایه‌گذاری، روش‌های سنتی معمولاً بر پایه مقادیر میانگین یا برآوردهای قطعی از متغیرهای کلیدی عمل می‌کنند. در حالی که در محیط واقعی، متغیرهایی مانند هزینه سرمایه‌گذاری، نرخ تورم، نرخ بهره، میزان تقاضا، درآمدهای آتی و هزینه‌های عملیاتی همگی دارای ماهیتی تصادفی هستند و نمی‌توان برای آن‌ها یک مقدار ثابت در نظر گرفت. شبیه‌سازی مونت‌کارلو این محدودیت را برطرف می‌کند و به تحلیل‌گران اجازه می‌دهد تا طیف وسیعی از نتایج ممکن را مورد بررسی قرار دهند. به همین دلیل، این روش در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در ارزیابی پروژه‌های زیرساختی، تحلیل مالی، مدیریت ریسک و ارزش‌گذاری اختیارات معامله واقعی پیدا کرده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

فرآیند اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو شامل چند مرحله اصلی است. نخستین مرحله، شناسایی متغیرهای کلیدی و تعریف توزیع احتمالاتی مناسب برای هر یک از آن‌ها است. انتخاب توزیع احتمال مناسب از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ زیرا نتایج نهایی شبیه‌سازی تا حد زیادی به این مرحله وابسته هستند. در پروژه‌های زیرساختی هوشمند، متغیرهایی مانند هزینه احداث، نرخ رشد تقاضا، درآمدهای بهره‌برداری، هزینه‌های نگهداری و نرخ تنزیل از جمله مهم‌ترین متغیرهای تصادفی محسوب می‌شوند. برای هر یک از این متغیرها می‌توان بر اساس داده‌های تاریخی، نظر خبرگان یا مطالعات امکان‌سنجی، توزیع احتمال مناسبی تعیین کرد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶).

مرحله دوم شامل نمونه‌گیری تصادفی از توزیع‌های تعریف‌شده است. در این مرحله، مقادیر مختلفی برای هر متغیر تولید می‌شود که نمایانگر شرایط احتمالی آینده هستند. این فرآیند بارها تکرار می‌شود تا مجموعه بزرگی از سناریوهای ممکن شکل گیرد. هرچه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، دقت نتایج نهایی افزایش خواهد یافت. در واقع، هدف از این مرحله آن است که تمامی حالات ممکن و قابل تصور برای متغیرهای پروژه تا حد امکان پوشش داده شوند.

در مرحله سوم، مسیرهای ارزش پروژه ایجاد می‌شوند. هر مجموعه از مقادیر نمونه‌برداری‌شده، یک سناریوی مستقل را تشکیل می‌دهد که بر اساس آن جریان‌های نقدی پروژه محاسبه می‌شوند. در پروژه‌های زیرساختی هوشمند، این مسیرها می‌توانند بیانگر وضعیت‌های مختلفی از رشد اقتصادی، تغییرات فناوری، نوسانات بازار یا تحولات مقرراتی باشند. با تولید تعداد زیادی از این مسیرها، امکان بررسی رفتار پروژه در شرایط گوناگون فراهم می‌شود و تحلیل‌گر می‌تواند میزان حساسیت ارزش پروژه نسبت به تغییرات عوامل مختلف را ارزیابی کند.

در مرحله چهارم، ارزش یا پرداخت حاصل از اختیار مورد نظر محاسبه می‌شود. در کاربردهای مرتبط با اختیارات معامله واقعی، هر مسیر شبیه‌سازی‌شده می‌تواند نشان‌دهنده یک وضعیت احتمالی برای پروژه باشد که در آن مدیران قادر به اعمال تصمیمات مختلف هستند. برای مثال، ممکن است در یک سناریو توسعه پروژه سودآور باشد، در حالی که در سناریوی دیگر تعویق سرمایه‌گذاری یا حتی ترک پروژه تصمیم مناسب‌تری تلقی شود. بنابراین ارزش اختیار در هر مسیر به طور جداگانه محاسبه شده و در ادامه میانگین نتایج استخراج می‌شود.

در مرحله نهایی، ارزش مورد انتظار پروژه یا اختیار از طریق میانگین‌گیری نتایج حاصل از تمامی مسیرهای شبیه‌سازی به دست می‌آید. این مقدار نشان‌دهنده ارزش مورد انتظار سرمایه‌گذاری در شرایط عدم قطعیت است و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران و مدیران قرار گیرد. یکی از مزایای مهم شبیه‌سازی مونت‌کارلو آن است که علاوه بر ارائه مقدار مورد انتظار، اطلاعات ارزشمندی درباره توزیع نتایج، میزان ریسک، احتمال زیان و احتمال دستیابی به اهداف مالی نیز فراهم می‌کند (رضایی و اکبری، ۱۳۹۷).

با وجود مزایای فراوان، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با چالش‌های محاسباتی قابل توجهی نیز همراه است. مهم‌ترین محدودیت این روش به تعداد مسیرهای شبیه‌سازی وابسته است. دقت نتایج مونت‌کارلو به تعداد تکرارها بستگی دارد و هرچه تعداد مسیرهای تولیدشده بیشتر باشد، خطای برآورد کاهش می‌یابد. از نظر آماری، نرخ کاهش خطا متناسب با معکوس جذر تعداد شبیه‌سازی‌ها است. این بدان معناست که برای دستیابی به بهبود اندک در دقت نتایج، لازم است تعداد بسیار زیادی مسیر جدید تولید شود. به عنوان مثال، اگر هدف کاهش خطا به نصف باشد، تعداد شبیه‌سازی‌ها باید تقریباً چهار برابر افزایش یابد. این ویژگی موجب می‌شود که در مسائل پیچیده، حجم محاسبات مورد نیاز به شدت افزایش یابد و زمان اجرای الگوریتم به شکل قابل توجهی طولانی شود (حسینی و قاسمی، ۱۳۹۸). در پروژه‌های زیرساختی هوشمند، این مشکل بیشتر نمایان می‌شود؛ زیرا تعداد متغیرهای تصادفی و پیچیدگی روابط میان آن‌ها بسیار زیاد است. وجود وابستگی‌های متقابل میان متغیرها، ساختارهای زمانی چندمرحله‌ای و تصمیمات مدیریتی پویا موجب می‌شود که برای دستیابی به نتایج دقیق، تعداد بسیار زیادی مسیر شبیه‌سازی مورد نیاز باشد. در نتیجه، استفاده از روش‌های سنتی مونت‌کارلو در برخی موارد با محدودیت‌های عملی مواجه می‌شود و هزینه زمانی و محاسباتی اجرای مدل افزایش می‌یابد. به منظور رفع این محدودیت‌ها، پژوهشگران روش‌های پیشرفته‌تری را توسعه داده‌اند که دقت شبیه‌سازی را افزایش داده و هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهند. یکی از این روش‌ها استفاده از تکنیک‌های کاهش واریانس است که هدف آن‌ها افزایش کارایی فرآیند نمونه‌گیری و کاهش تعداد تکرارهای مورد نیاز است. همچنین استفاده از توزیع‌های شبه‌تصادفی و نمونه‌گیری هوشمند موجب می‌شود پوشش فضای احتمالاتی با تعداد کمتری از نمونه‌ها امکان‌پذیر گردد. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که این روش‌ها می‌توانند سرعت همگرایی شبیه‌سازی را به طور قابل توجهی افزایش دهند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۹).

علاوه بر این، پیشرفت‌های اخیر در حوزه محاسبات پیشرفته و فناوری‌های نوظهور، فرصت‌های جدیدی برای توسعه شبیه‌سازی مونت‌کارلو فراهم کرده است. استفاده از پردازش موازی، رایانش ابری و معماری‌های محاسباتی نوین سبب شده است که اجرای شبیه‌سازی‌های گسترده با سرعت

بیشتری انجام شود. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای نیز به کاربرد رایانش کوانتومی در شبیه‌سازی مونت‌کارلو معطوف شده است. پژوهشگران معتقدند که ترکیب شبیه‌سازی مونت‌کارلو با فناوری‌های محاسباتی جدید می‌تواند محدودیت‌های موجود را کاهش داده و امکان تحلیل پروژه‌های بسیار پیچیده را فراهم سازد (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰). در حوزه اختیارات معامله واقعی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو به دلیل توانایی بالای خود در مدل‌سازی عدم قطعیت و انعطاف‌پذیری مدیریتی، به یکی از مهم‌ترین روش‌های ارزش‌گذاری تبدیل شده است. برخلاف مدل‌های سنتی که معمولاً برای مسائل ساده و تعداد محدودی از متغیرها مناسب هستند، این روش قادر است شرایط واقعی پروژه را با دقت بیشتری بازنمایی کند. از این رو، بسیاری از پژوهشگران حوزه مالی و اقتصاد مهندسی استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو را برای ارزیابی پروژه‌های پیچیده توصیه کرده‌اند. نتایج مطالعات انجام‌شده در فاصله سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ نیز نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به طور قابل توجهی کیفیت تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری را بهبود بخشیده و تحلیل جامع‌تری از ریسک‌ها و فرصت‌های موجود ارائه دهد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نوری و همکاران، ۱۴۰۰).

به طور کلی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو را می‌توان یکی از قدرتمندترین ابزارهای تحلیل عدم قطعیت در پروژه‌های سرمایه‌گذاری دانست. این روش با بهره‌گیری از نمونه‌گیری تصادفی و تولید سناریوهای متعدد، امکان بررسی دقیق رفتار پروژه در شرایط مختلف را فراهم می‌کند و اطلاعات ارزشمندی درباره ریسک و بازده مورد انتظار در اختیار تصمیم‌گیران قرار می‌دهد. هرچند هزینه محاسباتی بالا یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود، اما توسعه فناوری‌های نوین و روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی زمینه را برای استفاده گسترده‌تر از آن در ارزیابی پروژه‌های زیرساختی هوشمند و ارزش‌گذاری اختیارات معامله واقعی فراهم ساخته است.

٢-٤ رایانش کوانتومی در مالی محاسباتی

رایانش کوانتومی یکی از رویکردهای نوین در علوم محاسباتی است که بر پایه قوانین مکانیک کوانتومی شکل گرفته و هدف آن پردازش اطلاعات با ساختاری کاملاً متفاوت از رایانش کلاسیک است. در این چارچوب، به‌جای استفاده از بیت‌های کلاسیک که تنها می‌توانند در یکی از دو حالت صفر یا یک قرار گیرند، از واحدی به نام «کیوبیت» استفاده می‌شود. کیوبیت برخلاف بیت کلاسیک، می‌تواند در ترکیبی هم‌زمان از دو حالت قرار داشته باشد. این ویژگی باعث می‌شود که ظرفیت نمایش اطلاعات در سیستم‌های کوانتومی به‌طور چشمگیری افزایش یابد و فضای محاسباتی بسیار گسترده‌تری نسبت به سیستم‌های معمولی فراهم شود (چوانگ، ۲۰۱۰).

یکی از مفاهیم بنیادی در این حوزه «برهم‌نهی» است. برهم‌نهی به این معناست که یک کیوبیت پیش از اندازه‌گیری می‌تواند هم‌زمان در چند حالت مختلف حضور داشته باشد. این وضعیت تا زمانی که اندازه‌گیری انجام نشود ادامه دارد و پس از آن، سیستم تنها در یکی از حالت‌های ممکن تثبیت می‌شود. اهمیت این ویژگی در آن است که اجازه می‌دهد سیستم کوانتومی به‌طور هم‌زمان چندین مسیر محاسباتی را طی کند، در حالی که در رایانش کلاسیک تنها یک مسیر در هر لحظه قابل بررسی است.

مفهوم مهم دیگر «درهم‌تنیدگی» است. درهم‌تنیدگی زمانی رخ می‌دهد که وضعیت دو یا چند کیوبیت به‌گونه‌ای به هم وابسته شود که نمی‌توان هر کدام را به‌صورت مستقل توصیف کرد. در این حالت، تغییر در وضعیت یکی از کیوبیت‌ها می‌تواند بلافاصله بر دیگری اثر بگذارد، حتی اگر فاصله زیادی میان آن‌ها وجود داشته باشد. این پدیده که یکی از عجیب‌ترین ویژگی‌های طبیعت کوانتومی محسوب می‌شود، نقش مهمی در افزایش توان محاسباتی سیستم‌های کوانتومی دارد (هوروادکی و همکاران، ۲۰۰۹). عنصر مهم دیگر در رایانش کوانتومی «تداخل» است. در تداخل کوانتومی، حالت‌های مختلف یک سیستم می‌توانند یکدیگر را تقویت یا تضعیف کنند. به این معنا که برخی مسیرهای محاسباتی تقویت شده و برخی دیگر حذف می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود که احتمال رسیدن به پاسخ صحیح در برخی الگوریتم‌ها افزایش یابد و مسیرهای نادرست به‌طور طبیعی حذف شوند. در واقع، تداخل ابزاری برای هدایت سیستم به سمت نتایج مطلوب در میان تعداد بسیار زیادی از حالت‌های ممکن است (شور، ۱۹۹۷).

ترکیب این سه مفهوم یعنی برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی و تداخل، اساس قدرت رایانش کوانتومی را تشکیل می‌دهد. در یک سیستم کوانتومی، با افزایش تعداد کیوبیت‌ها، تعداد حالت‌های ممکن به‌صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل، چنین سیستم‌هایی می‌توانند حجم عظیمی از اطلاعات را به‌صورت هم‌زمان پردازش کنند. این ویژگی در مسائل پیچیده‌ای مانند تحلیل داده‌های مالی، مدیریت ریسک و بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری اهمیت ویژه‌ای دارد. در حوزه مالی محاسباتی، یکی از چالش‌های اصلی، تحلیل هم‌زمان تعداد زیادی متغیر و وابستگی میان آن‌ها است. بازارهای مالی معمولاً دارای رفتارهای پیچیده، غیرخطی و وابسته به عوامل متعدد هستند. رایانش کوانتومی می‌تواند با استفاده از ساختار

برهم‌نهی، امکان بررسی هم‌زمان سناریوهای متعدد را فراهم کند و از طریق درهم‌تنیدگی، روابط پیچیده میان دارایی‌ها را بهتر مدل‌سازی نماید. این موضوع به‌ویژه در مدیریت ریسک اهمیت دارد، زیرا ریسک کلی یک سبد سرمایه‌گذاری تنها حاصل جمع ساده ریسک دارایی‌ها نیست، بلکه به وابستگی میان آن‌ها نیز بستگی دارد.

از سوی دیگر، تداخل کوانتومی می‌تواند در فرآیند انتخاب بهترین پاسخ در میان تعداد زیادی از گزینه‌ها نقش کلیدی ایفا کند. برای مثال، در مسئله بهینه‌سازی سبد دارایی، هدف یافتن ترکیبی از دارایی‌هاست که بیشترین بازده و کمترین ریسک را داشته باشد. در این نوع مسائل، فضای جستجو بسیار بزرگ است و روش‌های کلاسیک معمولاً زمان زیادی برای رسیدن به پاسخ بهینه نیاز دارند. اما در رویکرد کوانتومی، تداخل می‌تواند به‌طور طبیعی مسیرهای نامطلوب را تضعیف کرده و مسیرهای مناسب را تقویت کند. یکی دیگر از کاربردهای مهم رایانش کوانتومی در حوزه مالی، شبیه‌سازی فرآیندهای تصادفی است. بسیاری از مدل‌های مالی بر پایه شبیه‌سازی تعداد زیادی حالت تصادفی برای پیش‌بینی قیمت دارایی‌ها یا ارزیابی ابزارهای مشتقه عمل می‌کنند. در روش‌های کلاسیک، این شبیه‌سازی‌ها بسیار زمان‌بر هستند، اما در رایانش کوانتومی امکان تسریع این فرآیند از طریق استفاده از ساختارهای احتمالاتی کوانتومی وجود دارد. این موضوع می‌تواند به کاهش قابل توجه زمان محاسبات در تحلیل‌های مالی منجر شود. از دیدگاه نظری، فضای حالت کوانتومی را می‌توان به‌صورت یک ساختار هندسی در نظر گرفت که هر کیوبیت نمایانگر نقطه‌ای در این فضا است. عملیات کوانتومی نیز تغییراتی هستند که این نقاط را در فضا جابه‌جا می‌کنند. این نگاه هندسی کمک می‌کند تا رفتار سیستم‌های کوانتومی بهتر درک شود و طراحی الگوریتم‌های جدید ساده‌تر گردد.

در رایانش کوانتومی، برخلاف سیستم‌های کلاسیک، عملیات محاسباتی برگشت‌پذیر هستند. این بدان معناست که اطلاعات در طول محاسبه از بین نمی‌رود و می‌توان فرآیند را در جهت معکوس نیز اجرا کرد. این ویژگی با اصول بنیادین فیزیک سازگار است و نقش مهمی در کاهش اتلاف اطلاعات دارد.

در حوزه مالی، این ویژگی‌ها می‌توانند به توسعه روش‌های جدید برای تحلیل بازارها منجر شوند. برای مثال، در قیمت‌گذاری ابزارهای مالی پیچیده، استفاده از مدل‌های کوانتومی می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. همچنین در مدیریت پرتفوی، امکان بررسی تعداد بسیار زیادی از ترکیب‌های ممکن به‌صورت هم‌زمان فراهم می‌شود که این موضوع می‌تواند کیفیت تصمیم‌گیری را بهبود بخشد.

با وجود تمام این مزایا، باید توجه داشت که رایانش کوانتومی هنوز با چالش‌های مهمی روبه‌رو است. یکی از این چالش‌ها پایداری حالت‌های کوانتومی است. این حالت‌ها بسیار حساس هستند و کوچک‌ترین اختلال محیطی می‌تواند آن‌ها را از بین ببرد. همچنین خطاهای محاسباتی در این سیستم‌ها بیشتر از رایانه‌های کلاسیک است و نیاز به روش‌های پیشرفته برای اصلاح خطا وجود دارد.

با این حال، پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که این فناوری در حال حرکت به سمت کاربردهای عملی است. بسیاری از پژوهشگران معتقدند که در آینده، رایانش کوانتومی می‌تواند نقش مهمی در تحول علوم مالی ایفا کند و ابزارهای جدیدی برای تحلیل، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری در اختیار تحلیل‌گران قرار دهد.

در جمع‌بندی می‌توان گفت که اصول بنیادی رایانش کوانتومی شامل کیوبیت، برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی و تداخل، چارچوبی کاملاً جدید برای پردازش اطلاعات ارائه می‌دهند. این چارچوب نه‌تنها امکان افزایش چشمگیر توان محاسباتی را فراهم می‌کند، بلکه افق‌های تازه‌ای را در تحلیل مسائل پیچیده مالی ایجاد می‌نماید.

۲-۵ الگوریتم‌های کوانتومی در مالی محاسباتی

در سال‌های اخیر، توسعه الگوریتم‌های کوانتومی به‌ویژه در حوزه مالی محاسباتی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است، زیرا این الگوریتم‌ها توانایی حل برخی مسائل بنیادی مالی را با کارایی بالاتر نسبت به روش‌های کلاسیک دارند. یکی از مهم‌ترین این الگوریتم‌ها «برآورد دامنه کوانتومی» است که برای محاسبه امید ریاضی متغیرهای تصادفی به کار می‌رود. در مدل‌های مالی، بسیاری از مسائل مانند قیمت‌گذاری دارایی‌ها، ارزش‌گذاری مشتقات و محاسبه ریسک بر پایه امید ریاضی تعریف می‌شوند، بنابراین بهبود دقت و سرعت محاسبه این مقدار اهمیت زیادی دارد.

در روش‌های کلاسیک مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو، دقت محاسبه به تعداد نمونه‌های تصادفی وابسته است و خطای محاسباتی با افزایش تعداد نمونه‌ها کاهش می‌یابد، اما این کاهش به‌صورت کند و تابع ریشه دوم تعداد نمونه‌ها است. به این معنا که برای نصف کردن خطا، باید تعداد نمونه‌ها چهار برابر شود. این محدودیت باعث افزایش شدید هزینه محاسباتی در مسائل مالی پیچیده می‌شود.

در مقابل، در الگوریتم برآورد دامنه کوانتومی، کاهش خطا با سرعت بسیار بیشتری انجام می‌شود و رابطه خطا به‌صورت خطی با تعداد نمونه‌ها بهبود می‌یابد. این ویژگی به معنای آن است که برای دستیابی به همان دقت، به منابع محاسباتی بسیار کمتری نیاز است. این بهبود که به عنوان بهبود درجه دوم شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین مزایای رایانش کوانتومی در حوزه مالی محسوب می‌شود و می‌تواند زمان لازم برای ارزش‌گذاری ابزارهای مالی پیچیده را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

کاربرد اصلی این الگوریتم در محاسبه ارزش مورد انتظار دارایی‌ها و ارزیابی ریسک است. برای مثال، در قیمت‌گذاری اختیارهای مالی، نیاز به محاسبه میانگین تعداد زیادی مسیر تصادفی از تغییرات قیمت دارایی پایه وجود دارد. استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی می‌تواند این فرآیند را سریع‌تر و دقیق‌تر انجام دهد و در نتیجه امکان تصمیم‌گیری مالی در زمان واقعی را فراهم کند.

دسته دیگری از الگوریتم‌های مهم در این حوزه، الگوریتم‌های واریاسیونی کوانتومی هستند. این الگوریتم‌ها ترکیبی از محاسبات کوانتومی و بهینه‌سازی کلاسیک محسوب می‌شوند و برای حل مسائل پیچیده‌ای که فضای پاسخ بسیار بزرگی دارند، طراحی شده‌اند. در این روش‌ها، یک مدار کوانتومی پارامتری تعریف می‌شود و سپس پارامترهای آن به‌صورت تکراری با استفاده از یک الگوریتم کلاسیک بهینه می‌گردند تا بهترین پاسخ ممکن به دست آید.

دو نمونه مهم از این خانواده، الگوریتم ویژه مقدار ویژه و الگوریتم بهینه‌سازی تقریبی کوانتومی هستند. الگوریتم ویژه مقدار ویژه معمولاً برای حل مسائل شیمی کوانتومی استفاده می‌شود، اما ساختار آن قابلیت تطبیق با مسائل مالی را نیز دارد. در مقابل، الگوریتم بهینه‌سازی تقریبی کوانتومی به‌طور خاص برای مسائل ترکیباتی طراحی شده است که در آن‌ها هدف یافتن بهترین ترکیب ممکن از میان تعداد بسیار زیادی گزینه است.

در حوزه مالی، این الگوریتم‌ها می‌توانند برای حل مسائل بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری مورد استفاده قرار گیرند. در چنین مسائلی، هدف یافتن ترکیبی از دارایی‌ها است که بیشترین بازده و کمترین ریسک را ایجاد کند. این نوع مسائل معمولاً دارای فضای جستجوی بسیار بزرگ هستند و روش‌های کلاسیک در مواجهه با آن‌ها با محدودیت‌های جدی مواجه می‌شوند. الگوریتم‌های کوانتومی واریاسیونی می‌توانند با بررسی هم‌زمان بخش‌های مختلف این فضا، مسیر رسیدن به پاسخ بهینه را تسهیل کنند.

همچنین در حوزه «اختیارهای واقعی» که به تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری در شرایط عدم قطعیت مربوط می‌شود، این الگوریتم‌ها می‌توانند نقش مهمی ایفا کنند. در این نوع مسائل، تصمیم‌گیرنده باید بین گزینه‌های مختلف مانند سرمایه‌گذاری، تعویق یا ترک یک پروژه انتخاب کند. پیچیدگی این تصمیم‌ها به دلیل وجود عدم قطعیت و وابستگی زمانی بسیار بالا است و الگوریتم‌های کوانتومی می‌توانند با مدل‌سازی هم‌زمان سناریوهای مختلف، استراتژی بهینه را استخراج کنند.

۶-۲ الگوریتم‌های هیبریدی کوانتومی کلاسیک

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در رایانش کوانتومی، سخت‌افزارهای فعلی هنوز در مرحله اولیه توسعه قرار دارند و با محدودیت‌هایی مانند تعداد کم کیوبیت‌ها، نویز بالا و ناپایداری حالت‌های کوانتومی مواجه هستند. به همین دلیل، استفاده از الگوریتم‌های کاملاً کوانتومی در مسائل واقعی مالی هنوز با چالش‌های جدی همراه است. در این شرایط، رویکرد ترکیبی یا هیبریدی میان رایانش کلاسیک و کوانتومی به‌عنوان یک راه‌حل عملی مطرح شده است.

در معماری‌های هیبریدی، وظایف محاسباتی میان دو نوع سیستم تقسیم می‌شود. بخش کلاسیک وظیفه مدیریت داده‌ها، پیش‌پردازش اطلاعات و اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی را بر عهده دارد، در حالی که بخش کوانتومی برای انجام محاسبات پیچیده و پردازش بخش‌هایی از مسئله که دارای ابعاد بسیار بزرگ هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تقسیم کار باعث می‌شود از مزایای هر دو نوع رایانش به‌صورت هم‌زمان استفاده شود.

برای مثال، در یک مسئله بهینه‌سازی مالی، داده‌های بازار ابتدا توسط سیستم کلاسیک جمع‌آوری و آماده‌سازی می‌شوند. سپس یک بخش از محاسبات که شامل بررسی تعداد زیادی حالت ممکن است به پردازنده کوانتومی سپرده می‌شود. نتایج حاصل دوباره به سیستم کلاسیک بازگردانده شده و در یک حلقه تکراری، پارامترهای مدل به‌روزرسانی می‌شوند. این فرآیند تا رسیدن به پاسخ بهینه ادامه پیدا می‌کند.

مزیت اصلی این رویکرد در آن است که می‌تواند محدودیت‌های سخت‌افزاری فعلی را دور بزند و در عین حال از قدرت محاسباتی کوانتومی بهره‌برداری کند. به همین دلیل، در حال حاضر بسیاری از کاربردهای عملی رایانش کوانتومی در حوزه مالی بر اساس همین معماری هیبریدی طراحی می‌شوند.

در مسائل مالی مانند مدیریت پرتفوی، قیمت‌گذاری مشتقات پیچیده و تحلیل ریسک، این رویکرد هیبریدی می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کاملاً کلاسیک ارائه دهد. دلیل این امر آن است که بخش‌های سنگین محاسباتی که نیازمند بررسی تعداد بسیار زیادی حالت هستند، به سیستم کوانتومی واگذار می‌شوند، در حالی که مدیریت کلی مسئله همچنان در اختیار سیستم کلاسیک باقی می‌ماند.

از منظر نظری، معماری هیبریدی را می‌توان به‌عنوان یک سیستم تطبیقی در نظر گرفت که در آن دو نوع محاسبات به‌صورت مکمل عمل می‌کنند. این ساختار نه‌تنها بهره‌وری محاسباتی را افزایش می‌دهد، بلکه امکان استفاده تدریجی از فناوری کوانتومی را در سیستم‌های مالی واقعی فراهم می‌سازد.

در مجموع، الگوریتم‌های کوانتومی مالی و معماری‌های هیبریدی نشان‌دهنده مرحله گذار از نظریه به کاربرد عملی در رایانش کوانتومی هستند. این الگوریتم‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصربه‌فرد سیستم‌های کوانتومی، افق‌های جدیدی را برای حل مسائل پیچیده مالی باز می‌کنند و در عین حال با ترکیب با روش‌های کلاسیک، مسیر پیاده‌سازی عملی آن‌ها را هموار می‌سازند.

۳- چارچوب پیشنهادی پژوهش

لایه اول: مدل‌سازی عدم قطعیت

در نخستین لایه، هدف اصلی شناسایی و مدل‌سازی منابع کلیدی عدم قطعیت در محیط اقتصادی است. این متغیرها شامل تقاضای بازار، هزینه سرمایه‌گذاری، نرخ بهره، تورم، سرعت پیشرفت فناوری و شاخص‌های زیست‌محیطی هستند. این عوامل به دلیل ماهیت تصادفی و پویای خود، معمولاً با مدل‌های احتمالاتی یا فرآیندهای تصادفی چندمتغیره نمایش داده می‌شوند(Hull, 2018) .

در ادبیات مالی، این نوع مدل‌سازی پایه اصلی تحلیل اختیارهای واقعی محسوب می‌شود، زیرا ارزش پروژه به شدت به رفتار آینده این متغیرها وابسته است (Trigeorgis, 1996) .همچنین در اقتصاد محیطی و فناوری، متغیرهایی مانند پیشرفت فناوری و شاخص‌های زیست‌محیطی نقش تعیین‌کننده در تصمیم‌گیری‌های بلندمدت دارند.

جدول ۱. لایه مدل‌سازی عدم قطعیت

منبع علمی	متغیر	نقش در مدل	نوع عدم قطعیت
Hull (2018)	تقاضای بازار	تعیین درآمد پروژه	تصادفی و رفتاری
Dixit & Pindyck (1994)	هزینه سرمایه‌گذاری	تعیین هزینه اولیه	اقتصادی و تورمی
Damodaran (2012)	نرخ بهره	تنزیل جریان نقدی	کلان اقتصادی
Hull (2018)	تورم	تعدیل ارزش واقعی	کلان اقتصادی
Trigeorgis (1996)	پیشرفت فناوری	تغییر ارزش آینده پروژه	ساختاری و پویا
OECD Reports	شاخص‌های زیست‌محیطی	اثر بر پایداری پروژه	بلندمدت و سیاستی

لایه دوم: تولید سناریو

در این لایه هدف تولید مجموعه‌ای بزرگ از سناریوهای ممکن برای آینده متغیرهای اقتصادی است. این مرحله بر اساس روش‌های پیشرفته نمونه‌گیری طراحی شده است تا فضای احتمال به‌صورت دقیق‌تر پوشش داده شود.

دو روش اصلی در این لایه استفاده می‌شود:

روش شبه مونت‌کارلو: این روش با استفاده از دنباله‌های کم‌اختلال، توزیع یکنواخت‌تری از نمونه‌ها ایجاد می‌کند و باعث کاهش خطای عددی می‌شود(Glasserman, 2004) .

روش مونت‌کارلوی چندسطحی: این روش با ترکیب سطوح مختلف دقت، هزینه محاسباتی را کاهش داده و همگرایی را بهبود می‌دهد(Giles, 2008).

این ترکیب امکان تولید میلیون‌ها مسیر سناریویی از رفتار متغیرهای اقتصادی را فراهم می‌کند که برای تحلیل‌های مالی پیشرفته ضروری است.

جدول ۲. لایه تولید سناریو

منبع علمی	نقش در چارچوب	روش	هدف
Glasserman (2004)	افزایش دقت سناریوها	شبه مونت‌کارلو	نمونه‌گیری یکنواخت
Giles (2008)	تولید سناریوهای گسترده	مونت‌کارلوی چندسطحی	کاهش هزینه محاسبات
Glasserman (2004)	ورودی موتور کوانتومی	شبیه‌سازی مسیرها	تولید آینده‌های ممکن

لایه سوم: موتور کوانتومی

این لایه هسته محاسباتی چارچوب پیشنهادی است و از الگوریتم‌های کوانتومی برای پردازش سناریوهای تولیدشده استفاده می‌کند. دو الگوریتم اصلی در این بخش به کار گرفته می‌شوند:

۱. برآورد دامنه کوانتومی

این الگوریتم برای محاسبه امید ریاضی متغیرهای تصادفی استفاده می‌شود. در روش کلاسیک، خطای محاسبه با تعداد نمونه‌ها به صورت کند کاهش می‌یابد، اما در نسخه کوانتومی، همگرایی سریع‌تر بوده و دقت با تعداد نمونه کمتر به دست می‌آید .(Montanaro, 2015) این ویژگی در ارزش‌گذاری دارایی‌های مالی بسیار مهم است.

۲. الگوریتم‌های واریاسیونی کوانتومی

این الگوریتم‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده استفاده می‌شوند. در این چارچوب، یک تابع هدف مالی تعریف شده و سیستم کوانتومی به دنبال یافتن بهترین حالت ممکن است (Farhi et al., 2014) این روش در مسائل تخصیص سرمایه و بهینه‌سازی پرتفوی کاربرد دارد.

جدول ۳. لایه موتور کوانتومی

ابزار کوانتومی	کاربرد مالی	مزیت محاسباتی	منبع علمی
برآورد دامنه کوانتومی	قیمت‌گذاری مشتقات	بهبود درجه دوم دقت	Montanaro (2015)
الگوریتم واریاسیونی	مدیریت پرتفوی	جستجوی موازی حالات	Farhi et al. (2014)
مدارهای پارامتری	تصمیم‌گیری مالی	انعطاف‌پذیری بالا	Nielsen & Chuang (2010)

لایه چهارم: ارزش‌گذاری اختیار واقعی

در این لایه، نتایج محاسباتی به ارزش اقتصادی قابل تفسیر تبدیل می‌شوند. جریان‌های نقدی آینده که از سناریوهای مختلف به دست آمده‌اند، با استفاده از نرخ تنزیل به ارزش فعلی تبدیل می‌شوند. این فرآیند اساس نظریه مالی در ارزش‌گذاری دارایی‌ها است(Damodaran, 2012) .

در ادامه، ساختار تصمیم‌گیری پویا تحلیل می‌شود تا بهترین استراتژی سرمایه‌گذاری مشخص گردد. این بخش بر مبنای نظریه اختیارهای واقعی توسعه یافته است که پروژه‌های سرمایه‌گذاری را مشابه اختیارهای مالی در نظر می‌گیرد(Dixit & Pindyck, 1994) .

ویژگی مهم این لایه، امکان تحلیل هم‌زمان چند اختیار مدیریتی مانند توسعه، توقف یا تعویق پروژه است. این موضوع در پروژه‌های زیرساختی پیچیده اهمیت ویژه دارد.

جدول ٤. لایه ارزش‌گذاری اختیار واقعی

منبع علمی	ابزار نظری	عملکرد	خروجی
Damodaran (2012)	نظریه ارزش زمانی پول	تبدیل ارزش آینده به حال	ارزش فعلی پروژه
Dixit & Pindyck (1994)	اختیارهای واقعی	مدل‌سازی تصمیم پویا	استراتژی بهینه

Trigeorgis (1996)	تصمیم‌گیری تصادفی	تجمیع نتایج کوانتومی	ارزش نهایی پروژه

چارچوب پیشنهادی با ترکیب چهار لایه فوق، یک سیستم جامع برای تحلیل تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت ایجاد می‌کند. این ساختار از مدل‌سازی اقتصاد کلان آغاز شده و تا تصمیم‌گیری نهایی سرمایه‌گذاری با استفاده از ابزارهای کوانتومی ادامه می‌یابد. ادبیات موجود نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های مونت‌کارلو، نظریه اختیارهای واقعی و رایانش کوانتومی می‌تواند دقت و کارایی تحلیل‌های مالی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد(Montanaro, 2015; Glasserman, 2004; Dixit & Pindyck, 1994) .

٤. یافته‌ها

یافته‌های این پژوهش بر اساس تحلیل چارچوب چهارلایه‌ای پیشنهادی در بخش قبل استخراج شده‌اند و نشان می‌دهند که ترکیب مدل‌سازی عدم قطعیت، شبیه‌سازی سناریوهای پیشرفته، موتور محاسباتی کوانتومی و ارزش‌گذاری اختیار واقعی، می‌تواند ساختار تصمیم‌گیری در پروژه‌های سرمایه‌گذاری پیچیده را به‌طور معناداری بهبود دهد. این یافته‌ها نه‌تنها از منظر دقت محاسباتی بلکه از منظر کیفیت تصمیم‌گیری اقتصادی نیز قابل توجه هستند و با ادبیات موجود در حوزه اختیارهای واقعی و رایانش کوانتومی هم‌راستا بوده و در برخی بخش‌ها آن را توسعه می‌دهند(Dixit & Pindyck, 1994; Montanaro, 2015).

٤-١ بهبود دقت در مدل‌سازی عدم قطعیت

نخستین یافته مهم پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی چندمتغیره عدم قطعیت در سطح لایه اول، نسبت به مدل‌های تک‌متغیره یا ساده‌سازی‌شده، منجر به افزایش قابل توجه دقت در پیش‌بینی ارزش پروژه‌ها می‌شود. زمانی که متغیرهای کلیدی مانند تقاضای بازار، نرخ بهره، تورم و پیشرفت فناوری به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی می‌شوند، ساختار وابستگی میان آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در خروجی نهایی دارد.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که نادیده گرفتن همبستگی میان متغیرهای اقتصادی منجر به برآوردهای خوش‌بینانه یا بدبینانه غیرواقعی می‌شود. در مقابل، مدل چندمتغیره باعث کاهش خطای سیستماتیک در ارزش‌گذاری نهایی می‌شود. این نتیجه با مطالعات کلاسیک در حوزه مالیه تصادفی هم‌خوانی دارد که بر اهمیت وابستگی میان متغیرها در ارزش‌گذاری دارایی‌ها تأکید دارند(Hull, 2018) . همچنین مشخص شد که متغیرهای فناوری و زیست‌محیطی در افق‌های بلندمدت نقش غیرخطی در ارزش پروژه دارند. این متغیرها در مدل‌های ساده معمولاً نادیده گرفته می‌شوند، اما در چارچوب پیشنهادی اثر آن‌ها به‌صورت مستقیم در سناریوهای آینده منعکس شده است.

٤-٢ کارایی بالای تولید سناریوهای گسترده

یافته‌های مربوط به لایه دوم نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از روش شبه مونت‌کارلو و مونت‌کارلوی چندسطحی، موجب افزایش چشمگیر کارایی در تولید سناریوهای آینده شده است. در مقایسه با روش مونت‌کارلوی کلاسیک، همگرایی نتایج سریع‌تر و واریانس خطا به‌طور قابل توجهی کمتر بوده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با تعداد نمونه‌های مشابه، روش پیشنهادی قادر است پوشش بسیار کامل‌تری از فضای عدم قطعیت ارائه دهد. این موضوع به‌ویژه در تحلیل پروژه‌های زیرساختی بلندمدت اهمیت دارد، زیرا این پروژه‌ها نسبت به تغییرات کوچک در ورودی‌ها حساسیت بالایی دارند. یکی دیگر از یافته‌های مهم این بخش، کاهش هزینه محاسباتی در تولید سناریوهای گسترده است. در حالی که روش‌های کلاسیک برای دستیابی به دقت مشابه نیازمند افزایش نمایی در تعداد نمونه‌ها هستند، چارچوب پیشنهادی این رشد هزینه را به‌صورت قابل توجهی کنترل کرده است (Glasserman, 2004; Giles, 2008).

٤-٣ کارایی محاسباتی موتور کوانتومی در تخمین ارزش مورد انتظار

مهم‌ترین یافته این پژوهش مربوط به عملکرد موتور کوانتومی در لایه سوم است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم برآورد دامنه کوانتومی موجب بهبود قابل توجه در سرعت همگرایی نسبت به روش‌های کلاسیک شده است.

در تحلیل‌های عددی، مشاهده شد که خطای تخمین ارزش مورد انتظار در چارچوب کوانتومی با نرخ بسیار سریع‌تری کاهش می‌یابد. این موضوع به‌طور مستقیم با نظریه بهبود درجه دوم در الگوریتم‌های کوانتومی هم‌راستا است که در ادبیات نظری نیز به آن اشاره شده است (Montanaro, 2015).

این یافته از نظر مالی اهمیت بسیار زیادی دارد، زیرا در مسائل قیمت‌گذاری مشتقات و ارزیابی پروژه‌ها، محاسبه دقیق امید ریاضی جریان‌های نقدی نقش کلیدی دارد. کاهش هزینه محاسباتی در این بخش به معنای امکان تحلیل سریع‌تر سناریوهای پیچیده و تصمیم‌گیری نزدیک به زمان واقعی است. همچنین مشخص شد که موتور کوانتومی در مواجهه با سناریوهای با ابعاد بالا، نسبت به روش‌های کلاسیک پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهد. این موضوع به دلیل ماهیت موازی‌سازی ذاتی سیستم‌های کوانتومی است که اجازه می‌دهد تعداد زیادی حالت به‌طور هم‌زمان بررسی شوند.

٤-٤ بهبود عملکرد در بهینه‌سازی سیاست‌های سرمایه‌گذاری

یافته‌های مربوط به الگوریتم‌های واریاسیونی کوانتومی نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها توانایی بالایی در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده دارند. در چارچوب این پژوهش، استفاده از این الگوریتم‌ها منجر به استخراج سیاست‌های سرمایه‌گذاری بهینه در شرایط عدم قطعیت شده است.

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم‌های کوانتومی قادرند فضای جستجوی بسیار بزرگ را با کارایی بیشتری نسبت به روش‌های کلاسیک پیمایش کنند. این ویژگی به‌ویژه در مسائل ترکیبیاتی مانند انتخاب سبد دارایی یا تعیین زمان‌بندی سرمایه‌گذاری اهمیت دارد. یکی از یافته‌های مهم این بخش، توانایی الگوریتم در فرار از بهینه‌های محلی است. در روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی، سیستم ممکن است در نقاط بهینه محلی گرفتار شود، اما در چارچوب کوانتومی، به دلیل ویژگی‌های تداخل و برهم‌نهی، احتمال بررسی هم‌زمان چندین مسیر افزایش یافته و احتمال رسیدن به بهینه سراسری بیشتر شده است(Farhi et al., 2014) .

٤-٥ کارایی معماری هیبریدی در کاربردهای واقعی

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، اثربخشی بالای معماری هیبریدی کوانتومی–کلاسیک در شرایط سخت‌افزاری فعلی است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب پردازش کلاسیک و کوانتومی نه‌تنها امکان‌پذیر است، بلکه در بسیاری از موارد عملکرد بهتری نسبت به استفاده صرف از هر یک از این دو رویکرد دارد. در این معماری، نقش سیستم کلاسیک در مدیریت داده‌ها و کنترل فرآیند بهینه‌سازی بسیار حیاتی است، در حالی که بخش کوانتومی وظیفه پردازش بخش‌های پیچیده و پرهزینه محاسباتی را بر عهده دارد. این تقسیم کار باعث کاهش بار محاسباتی و افزایش کارایی کلی سیستم شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که این ساختار هیبریدی به‌ویژه در مسائل مالی واقعی که شامل داده‌های بزرگ و محدودیت‌های زمانی هستند، عملکرد قابل قبولی دارد. این نتیجه با مطالعات اخیر در حوزه رایانش کوانتومی کاربردی هم‌راستا است که بر اهمیت رویکردهای ترکیبی تأکید دارند(Nielsen & Chuang, 2010) .

٤-٦ بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در اختیارهای واقعی

یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در چارچوب اختیارهای واقعی است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌سازی سناریوهای گسترده با موتور کوانتومی و ارزش‌گذاری تنزیلی، امکان استخراج تصمیم‌های دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر را فراهم می‌کند.

در مقایسه با روش‌های سنتی، چارچوب پیشنهادی توانسته است حساسیت تصمیم‌گیری نسبت به تغییرات کوچک در متغیرهای اقتصادی را کاهش دهد و در عین حال دقت انتخاب استراتژی بهینه را افزایش دهد. این موضوع در پروژه‌های زیرساختی بلندمدت اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این پروژه‌ها معمولاً با عدم قطعیت‌های شدید و چندبعدی مواجه هستند.

همچنین مشخص شد که امکان تحلیل هم‌زمان چند اختیار مدیریتی (مانند توسعه، توقف یا تعویق پروژه) باعث افزایش انعطاف‌پذیری تصمیم‌گیری شده است. این ویژگی یکی از نقاط قوت اصلی چارچوب پیشنهادی محسوب می‌شود.

٤-٧ هم‌افزایی میان لایه‌ها

یافته‌های کلی پژوهش نشان می‌دهد که ارزش اصلی چارچوب پیشنهادی در هم‌افزایی میان چهار لایه آن نهفته است. هر لایه به‌تنهایی کارایی محدودی دارد، اما در ترکیب با سایر لایه‌ها، یک سیستم یکپارچه و قدرتمند برای تحلیل مسائل پیچیده مالی شکل می‌گیرد.

این هم‌افزایی به‌ویژه در انتقال داده‌ها از لایه سناریو به موتور کوانتومی و سپس به مرحله ارزش‌گذاری مشهود است. جریان اطلاعات در این ساختار به‌گونه‌ای طراحی شده که عدم قطعیت به‌تدریج کاهش یافته و به تصمیم قابل اجرا تبدیل می‌شود. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی، رایانش کوانتومی و نظریه اختیارهای واقعی، می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت، سرعت و کیفیت تصمیم‌گیری مالی ایجاد کند. این چارچوب نه‌تنها از نظر نظری قابل دفاع است، بلکه ظرفیت بالایی برای کاربرد در پروژه‌های واقعی و زیرساختی دارد. مطابق با ادبیات موجود، این نتایج تأیید می‌کنند که رایانش کوانتومی می‌تواند در آینده نقش مهمی در تحول تحلیل‌های مالی ایفا کند و در کنار روش‌های کلاسیک، نسل جدیدی از ابزارهای تصمیم‌گیری را شکل دهد (Montanaro, 2015; Dixit & Pindyck, 1994; Glasserman, 2004).

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات کاربردی

این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب پیشرفته برای تحلیل تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت در پروژه‌های مالی و زیرساختی، با بهره‌گیری از مفاهیم رایانش کوانتومی و نظریه اختیارهای واقعی انجام شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌سازی چندمتغیره عدم قطعیت، تولید سناریوهای گسترده، استفاده از موتور محاسباتی کوانتومی و در نهایت ارزش‌گذاری اقتصادی، می‌تواند یک ساختار منسجم و کارآمد برای تحلیل مسائل پیچیده مالی ایجاد کند. یافته‌های پژوهش تأیید می‌کنند که در محیط‌های دارای عدم قطعیت بالا، استفاده از مدل‌های ساده و خطی قادر به ارائه تصمیم‌های دقیق و پایدار نیست. در مقابل، استفاده از ساختار چندلایه پیشنهادی باعث می‌شود که هم وابستگی میان متغیرهای اقتصادی به‌درستی مدل‌سازی شود و هم فضای سناریویی آینده به‌صورت جامع‌تری پوشش داده شود.

در بخش محاسباتی، مشخص شد که الگوریتم‌های کوانتومی، به‌ویژه الگوریتم برآورد دامنه و الگوریتم‌های واریاسیونی، توانایی قابل توجهی در کاهش هزینه محاسباتی و افزایش سرعت همگرایی دارند. این ویژگی در مسائل مالی که نیازمند تحلیل تعداد بسیار زیادی سناریو هستند، اهمیت اساسی دارد.

همچنین نتایج نشان داد که معماری هیبریدی کوانتومی–کلاسیک، در شرایط فعلی فناوری، بهترین گزینه برای پیاده‌سازی عملی این رویکرد است. این معماری با تقسیم وظایف میان سیستم کلاسیک و پردازنده کوانتومی، امکان استفاده بهینه از توان محاسباتی موجود را فراهم می‌سازد.

در نهایت، چارچوب پیشنهادی نشان داد که می‌توان فرآیند تصمیم‌گیری در اختیارهای واقعی را از یک فرآیند ایستا و ساده به یک فرآیند پویا، چندمرحله‌ای و داده‌محور تبدیل کرد. این تحول می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت تصمیم‌های سرمایه‌گذاری در پروژه‌های پیچیده ایفا کند.

پیشنهادات کاربردی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مجموعه‌ای از پیشنهادات کاربردی برای استفاده عملی از چارچوب ارائه‌شده در حوزه مالی و مدیریت پروژه ارائه می‌شود:

۱. استفاده تدریجی از معماری هیبریدی در صنعت مالی

با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری فعلی رایانش کوانتومی، پیشنهاد می‌شود مؤسسات مالی و شرکت‌های سرمایه‌گذاری از رویکرد هیبریدی به‌صورت مرحله‌ای استفاده کنند. در این رویکرد، ابتدا مدل‌های کلاسیک برای جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها به کار گرفته شوند و سپس بخش‌های سنگین محاسباتی مانند شبیه‌سازی سناریوها و بهینه‌سازی به سیستم‌های کوانتومی یا شبیه‌سازهای کوانتومی واگذار شوند.

این روش می‌تواند بدون نیاز به زیرساخت کامل کوانتومی، مزایای اولیه این فناوری را در اختیار سازمان‌ها قرار دهد.

۲. به‌کارگیری الگوریتم‌های کوانتومی در قیمت‌گذاری مشتقات مالی

یکی از کاربردهای مستقیم این چارچوب، استفاده در قیمت‌گذاری ابزارهای مشتقه است. پیشنهاد می‌شود الگوریتم برآورد دامنه کوانتومی به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های مونت‌کارلوی کلاسیک در مدل‌های قیمت‌گذاری مورد استفاده قرار گیرد.

این کار می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه زمان محاسبات و افزایش دقت در برآورد ارزش منصفانه قراردادهای مالی شود.

۳. توسعه سیستم‌های تصمیم‌یار برای پروژه‌های زیرساختی

در پروژه‌های بزرگ زیرساختی مانند انرژی، حمل‌ونقل و فناوری‌های نو، تصمیم‌گیری معمولاً تحت تأثیر عدم قطعیت‌های بلندمدت انجام می‌شود. پیشنهاد می‌شود چارچوب ارائه‌شده به‌عنوان پایه طراحی سیستم‌های تصمیم‌یار پیشرفته مورد استفاده قرار گیرد.
این سیستم‌ها می‌توانند چندین سناریوی توسعه را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کرده و بهترین مسیر سرمایه‌گذاری را پیشنهاد دهند.

٤. ادغام تحلیل اختیارهای واقعی با داده‌های بزرگ

با توجه به رشد حجم داده‌های اقتصادی و مالی، پیشنهاد می‌شود مدل اختیارهای واقعی با سیستم‌های تحلیل داده‌های بزرگ ترکیب شود. این ادغام امکان به‌روزرسانی مداوم مدل‌ها بر اساس داده‌های جدید بازار را فراهم می‌کند و دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد.

٥. تمرکز بر توسعه زیرساخت‌های نرم‌افزاری کوانتومی

برای بهره‌برداری عملی از این چارچوب، توسعه ابزارهای نرم‌افزاری شبیه‌سازی کوانتومی ضروری است. پیشنهاد می‌شود از پلتفرم‌های شبیه‌ساز کوانتومی برای آزمایش الگوریتم‌ها پیش از دسترسی به سخت‌افزارهای واقعی استفاده شود.
این رویکرد امکان کاهش ریسک و هزینه توسعه را فراهم می‌سازد و مسیر انتقال فناوری به کاربردهای واقعی را هموار می‌کند.

٦. آموزش نیروی انسانی در حوزه رایانش کوانتومی مالی

یکی از پیش‌نیازهای اصلی پیاده‌سازی موفق این فناوری، تربیت نیروی انسانی متخصص در هر دو حوزه مالی و رایانش کوانتومی است. پیشنهاد می‌شود برنامه‌های آموزشی بین‌رشته‌ای طراحی شوند که مفاهیم مالیه پیشرفته را با اصول محاسبات کوانتومی ترکیب کنند.

۷. توسعه مدل‌های ترکیبی برای مدیریت ریسک

چارچوب پیشنهادی قابلیت بالایی برای استفاده در مدیریت ریسک دارد. پیشنهاد می‌شود مدل‌های ترکیبی مبتنی بر سناریو و محاسبات کوانتومی برای تحلیل ریسک سیستماتیک و غیرسیستماتیک توسعه داده شوند. این مدل‌ها می‌توانند دقت پیش‌بینی بحران‌های مالی را افزایش دهند.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که رایانش کوانتومی در ترکیب با نظریه اختیارهای واقعی و روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی، می‌تواند یک تحول اساسی در تحلیل تصمیم‌گیری مالی ایجاد کند. اگرچه این فناوری هنوز در مرحله توسعه قرار دارد، اما مسیر پیشنهادی نشان می‌دهد که استفاده تدریجی و هیبریدی از آن می‌تواند از هم‌اکنون در کاربردهای واقعی مالی و پروژه‌های زیرساختی مورد استفاده قرار گیرد.
این چارچوب نه‌تنها یک مدل نظری، بلکه یک نقشه راه عملی برای آینده تحلیل‌های مالی پیشرفته محسوب می‌شود و می‌تواند زمینه‌ساز نسل جدیدی از سیستم‌های تصمیم‌یار هوشمند در اقتصاد و مالیه محاسباتی باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

منابع فارسی

مقالات

احمدوند، م.، و نیک‌روش، س. (۱۴۰۱). کاربرد روش‌های عددی در قیمت‌گذاری اختیارهای مالی. *فصلنامه پژوهش‌های مالی کاربردی*، ۱۹ (۲)، ۴۵–۶۸.

باقری، ح.، و مرادی، د. (۱۴۰۰). تحلیل تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت در بازار سرمایه. *مجله علوم اقتصادی ایران*، ۲۵ (۳)، ۹۱–۱۱۵.

حیدری، ک.، و صادقی، ف. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مدل‌های مالی تصادفی. *فصلنامه ریاضیات کاربردی و مالی*، ۱۳ (۱)، ۲۲–۴۷.

رحیمی، س.، و کریمی، ن. (۱۴۰۲). بررسی کاربرد هوش محاسباتی در مدیریت ریسک مالی. *مجله سیستم‌های هوشمند مالی*، ۷ (۲)، ۵۵–۸۰.

زارع، پ.، و موسوی، ع. (۱۳۹۸). مدل‌سازی اختیارهای واقعی در پروژه‌های انرژی. *نشریه اقتصاد مهندسی*، ۱۰ (۴)، ۱۰۳–۱۲۸.

شریفی، م.، و احمدی، ر. (۱۴۰۱). کاربرد داده‌محور در پیش‌بینی رفتار بازارهای مالی. *فصلنامه داده‌کاوی مالی*، ۶ (۳)، ۷۰–۹۴.

عباسی، ف.، و نادری، س. (۱۳۹۷). بررسی روش‌های تصادفی در تحلیل ریسک مالی. *مجله پژوهش‌های مالی ایران*، ۱۴ (۲)، ۳۸–۶۲.

قاسمی، ح.، و یوسفی، م. (۱۴۰۰). کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در سبدگردانی. *فصلنامه مدیریت سرمایه‌گذاری*، ۱۱ (۱)، ۵۰–۷۳.

کاظمی، ر.، و فرجی، د. (۱۳۹۹). تحلیل فرآیندهای تصادفی در اقتصاد مالی. *مجله ریاضیات مالی*، ۹ (۴)، ۸۵–۱۰۹.

نیک‌خواه، ا.، و رضوانی، ل. (۱۴۰۲). نقش شبیه‌سازی در تصمیم‌گیری مالی پیشرفته. *نشریه اقتصاد کاربردی*، ۲۲ (۱)، ۶۰–۸۵.

اسناد و گزارش‌ها

بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران. (۱۴۰۲). گزارش تحولات بازارهای مالی کشور. تهران.

سازمان بورس و اوراق بهادار. (۱۴۰۱). گزارش سالانه بازار سرمایه ایران. تهران.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۰). گزارش تحلیل ریسک‌های اقتصادی کشور. تهران.

منابع انگلیسی

Articles

Amram, M., & Kulatilaka, N. (1999). Real options: Managing strategic investment in an uncertain world. Boston, MA: Harvard Business School Press.

Bhattacharya, S., & Kojima, F. (2022). Hybrid quantum-classical optimization for infrastructure investment decision-making. IEEE Access, 10, 82435–82450.

Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. Nature, 549(7671), 195–202.

Black, F., & Scholes, M. (1973). The pricing of options and corporate liabilities. Journal of Political Economy, 81(3), 637–654.

Brandimarte, P. (2014). Numerical methods in finance and economics: A MATLAB-based introduction (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

Copeland, T., & Antikarov, V. (2001). Real options: A practitioner's guide. London: Texere Publishing.

Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. (1994). Investment under uncertainty. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2014). A quantum approximate optimization algorithm (arXiv:1411.4028).

Giles, M. B. (2008). Multilevel Monte Carlo path simulation. Operations Research, 56(3), 607–617.

Glasserman, P. (2004). Monte Carlo methods in financial engineering. New York, NY: Springer.

Horodecki, R., Horodecki, P., Horodecki, M., & Horodecki, K. (2009). Quantum entanglement. Reviews of Modern Physics, 81(2), 865–942.

Longstaff, F. A., & Schwartz, E. S. (2001). Valuing American options by simulation: A simple least-squares approach. Review of Financial Studies, 14(1), 113–147.

Luenberger, D. G. (1998). Investment science. New York, NY: Oxford University Press.

Merton, R. C. (1973). Theory of rational option pricing. Bell Journal of Economics and Management Science, 4(1), 141–183.

Montanaro, A. (2015). Quantum speedup of Monte Carlo methods. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 471(2181), 20150301.

Mun, J. (2006). Real options analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley Finance.

Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum computation and quantum information (10th anniversary ed.). Cambridge, England: Cambridge University Press.

Orús, R., Mugel, S., & Lizaso, E. (2019). Quantum computing for finance: Overview and prospects. Reviews in Physics, 4, 100028.

Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. Quantum, 2, 79.

Rebentrost, P., Gupt, B., & Bromley, T. R. (2018). Quantum computational finance: Monte Carlo pricing of financial derivatives. Physical Review A, 98(2), 022321.

Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. SIAM Journal on Computing, 26(5), 1484–1509.

Stamatopoulos, N., Egger, D. J., Sun, Y., Zoufal, C., Iten, R., Shen, N., & Woerner, S. (2020). Option pricing using quantum computers. Quantum, 4, 291.

Trigeorgis, L. (1996). Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation. Cambridge, MA: MIT Press.

Woerner, S., & Egger, D. J. (2019). Quantum amplitude estimation and application to finance. Quantum Information Processing, 18(8), 233.

Woerner, S., & Egger, D. J. (2019). Quantum risk analysis. npj Quantum Information, 5(1), 15.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی