


کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی در علوم مالی

 20.1001.1.24767220.1402.13.1.5.7

محمد مهدی لطفی هروی^۱

منیره هوشمند^۲

مرضیه اسعدی^۳

چکیده

یادگیری ماشین مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها است که این امکان را برای رایانه فراهم می‌کند که الگوهای آماری و رفتاری در داده‌ها را بدون برنامه‌نویسی صریح بیاموزد. این الگوریتم‌ها کاربردهای گسترده‌ای در همه زمینه‌ها به‌ویژه علوم مالی که نیاز به توان و دقت محاسباتی بالا دارند، شامل الگوسازی بازارهای مالی و مدیریت سبد دارایی‌ها و ریسک‌سنجی، می‌شود. اما به این علت که در اغلب این روش‌ها داده‌های فراوانی می‌خواهیم، انجام دادن این محاسبات بر رایانه‌های کلاسیک به زمان بسیار و منابع محاسباتی نیاز دارد که ممکن است در عمل کارایی‌های فنی و تخصصی نداشته باشند. رایانه‌های کوانتومی به‌علت قدرت پردازش موازی می‌توانند مسائل را بسیار سریع‌تر از الگوریتم‌های همتای قدیمی خود حل کنند که سبب افزایش سرعت کوانتومی در الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌شود. در این مقاله کاربرد محاسبات کوانتومی در حل مسائل علوم مالی بررسی شده و با روش‌های کلاسیک موجود مقایسه شده است. روش‌شناسی پژوهش مطالعه اسنادی و کتابخانه‌ای است که براساس آن در مقاله مسائل مهم محاسباتی در اقتصاد مالی مطرح شده است و سپس الگوریتم‌های بهینه‌سازی کوانتومی برای حل مسائل معرفی شده است. مشخصاً در پژوهش حاضر تلاش کرده‌ایم آن دسته از مسائل محاسباتی در حوزه علوم مالی را شناسایی کنیم که در آن استفاده از روش یادگیری ماشین کوانتومی به بهترین الگوریتم‌های کلاسیک متناظر برتری ایجاد کند. همچنین امکان‌پذیری تحقق فیزیکی این روش‌ها در کوتاه‌مدت نیز بررسی شده است. براساس نتایج این مطالعه این پرسش‌ها مطرح می‌شود که چگونه روش‌های محاسبات کوانتومی می‌تواند به افزایش سرعت و دقت در تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌های اقتصاد مالی منجر شود و جایگزین بهتری برای روش‌های کلاسیک به‌ویژه در مدیریت سبد دارایی و تحلیل ریسک باشد.

واژگان کلیدی: یادگیری ماشین، علوم مالی، محاسبات کوانتومی، یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی

طبقه‌بندی JEL: C40, C60, G00

تاریخ پذیرش: ۲۰ دی ۱۴۰۰

تاریخ بازنگری: ۱۷ دی ۱۴۰۰

تاریخ دریافت: ۱۶ آبان ۱۴۰۰

۱. استادیار اقتصاد گروه اقتصاد و مالی، دانشکده مدیریت، علم و فناوری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول)؛ mahdi.lotfi@aut.ac.ir

۲. دانشیار گروه مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)؛ m.hooshmand@imamreza.ac.ir

۳. استادیار گروه مدیریت و اقتصاد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه گلستان؛ m.asaadi@gu.ac.ir

مقدمه

از توانمندترین ابررایانه کلاسیکی است (Arute et al., 2019). از سوی دیگر و به موازات پیشرفت‌های مرتبط با فناوری‌های ماشین‌های کوانتومی روش‌های مرتبط با محاسبات نیز پیشرفت فزاینده‌ای داشته است. از روش‌های مهم محاسبات یادگیری ماشین است که شاخه‌ای از هوش مصنوعی است و از داده‌ها می‌آموزد (Lpaydin, 2020). هدف از یادگیری ماشین این است که رایانه قادر باشد وظیفه مشخصی را انجام دهد بدون اینکه دستورالعمل‌های صریحی از کاربر بیرونی داشته باشد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین کاربردهای روزافزونی در حوزه‌های گوناگون دارند از جمله تشخیص تصویر و گفتار، حمل و نقل، دانش مالی و اقتصادی. مشکل اصلی استفاده از روش‌های یادگیری ماشین زمان محاسباتی و امکانات پشتیبانی مرتبط با حافظه رایانه است زیرا در اغلب موارد پردازش این حجم و تنوع بالا از داده‌ها و اطلاعات به زمان و حافظه فراوانی نیاز دارد (Zhang and Qiang, 2020).

چون رایانه‌های کوانتومی این توانایی را دارند که مسائل را بسیار سریع‌تر از بهترین الگوریتم‌های کلاسیک موجود حل کنند، تأثیر فراوانی در بسیاری از علوم داشته‌اند و فرصت مناسبی را برای حل معضل پردازش داده‌های بزرگ^۲ در حوزه‌های مختلف فراهم کرده‌اند. اما رایانه‌های کوانتومی صرفاً پردازنده‌های سریع‌تری نیستند که بتوان به‌سادگی برای سرعت‌بخشی در حل مسائل جایگزین رایانه‌های کلاسیک کرد. بنابراین سؤال الگوریتمی مهم بایستی برای هر کاربرد خاص پاسخ داده شود، آیا این کاربرد می‌تواند به سرعت کوانتومی برسد؟ اگر بتوان ثابت کرد که سرعت‌بخشی کوانتومی برای مسئله خاصی وجود دارد، سؤال بعدی این است چه زمانی این افزایش سرعت عملی می‌شود؟ برای تعیین اینکه چه زمانی افزایش سرعت کوانتومی برای حوزه خاصی محقق خواهد شد، درک عمیق از الگوریتم‌های کوانتومی، منابع موردنیاز برای اجرای آن الگوریتم، میزانی که این منابع با بازنگری الگوریتم‌ها می‌توانند کاهش یابند و همین‌طور سیر زمانی پیشرفت سخت‌افزار کوانتومی ضروری است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی از کاربردهای رایانه کوانتومی است که روزه‌روز در حال گسترش است. در دهه اخیر الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی بسیاری پیشنهاد شده‌اند که افزایش سرعت قابل توجهی (نمایی و یا چندجمله‌ای) از نمونه‌های متناظر کلاسیک خود داشته‌اند (Zhang and Qiang, 2020).

یکی از پیشرفت‌های مهم و پرکاربرد محاسبات کوانتومی معطوف به علوم مالی است. روند تکاملی محاسبات دیجیتال کلاسیک از دهه ۱۹۵۰ میلادی آغاز شد و به‌علت توان بالای محاسباتی جایگاه محوری پیدا کرد. سپس از دهه ۱۹۸۰ تاکنون،

نیاز روزافزون بشر به پردازش اطلاعات با سرعت بالاتر به ساخت تراشه‌های سریع‌تر و پیچیده‌تر منجر شده است. برای ایجاد این تراشه‌ها لازم است که تعداد ترانزیستورهای بیشتری روی تراشه تعبیه شود. طبق قانون مور، تعداد ترانزیستورهای روی تراشه (با مساحت ثابت) تقریباً هر دو سال دو برابر خواهد شد. این رشدی نمایی که در سال ۱۹۶۵ پیش‌بینی شده بود، تاکنون ادامه داشته است. با کوچک‌تر شدن ابعاد و رسیدن به ابعاد اتمی مشکلی که رخ می‌دهد این است که در ابعاد اتمی قوانین فیزیکی‌ای که بر رفتار ذرات حاکم‌اند، قوانین مکانیک کوانتومی‌اند نه قوانین مکانیک کلاسیک (Marinescu and Marinescu, 2004). در این صورت پیش‌بینی‌های کلاسیک در اثر رفتار کوانتومی ذرات نامعتبر می‌شود. مانع دیگر در دستیابی به کاهش نمایی اندازه ترانزیستور موانع اقتصادی است. طبق قانون دوم مور، هزینه ساخت تراشه‌ها نیز با زمان رشد نمایی خواهد داشت (Spiller et al., 2005).

بنابراین بسیاری از متخصصان در زمینه‌های گوناگون پیشاپیش به فکر رفع این مشکل افتاده‌اند. از مهم‌ترین راه‌حل‌ها تغییر جهت تمرکز محاسبات از قوانین کلاسیک کنونی به دنیای جدید کوانتومی است که نه‌فقط براساس آن مشکلات گذشته و محدودیت‌های موجود برطرف می‌شود، بلکه افق‌های جدیدی نیز به دنیای محاسبات اضافه می‌شود (Meter and Oskin, 2006). در واقع، هدف از محاسبات کوانتومی یافتن روش‌هایی برای طراحی مجدد قطعات به گونه‌ای است که بتوانند تحت آثار کوانتومی، که در محدوده ابعاد نانومتری و کوچک‌تر بروز می‌کنند، به‌خوبی کار کنند (Home et al., 2009) (Blackstad and Ospelkaus, 2009). به‌دنبال کشف الگوریتم‌های کوانتومی که قادر باشند مسائل محاسباتی سنگین را بسیار سریع‌تر از الگوریتم‌های کلاسیک حل کنند، توجه ویژه دانشگاه‌ها و سرمایه‌گذاری‌های کلان صنایع به این زمینه نوظهور جلب شده است. نمونه‌هایی از این الگوریتم‌ها تجزیه سریع اعداد بزرگ و جست‌وجوی سریع در مجموعه‌ای تصادفی است (Mousavi et al., 2021).

فناوری‌های کوانتومی از روش‌های مشابه کلاسیکی خود ویژگی‌های منحصربه‌فردتری دارند که امکان دسترسی به آن‌ها در دنیای کلاسیک غیرممکن است. به همین علت است که فناوری‌های کوانتومی به‌شدت مورد توجه دانشمندان و دولت‌ها قرار گرفته و سرمایه‌گذاری‌های عظیمی در این حوزه انجام شده است. برای مثال رایانه‌های کوانتومی می‌توانند از قدرتمندترین ابررایانه‌های کلاسیک نیز قدرت پردازشی بسیار بالاتری داشته باشند و برخی مسائل پیچیده ریاضی را در زمان کوتاهی حل کنند که عملاً برای رایانه‌های کلاسیک غیرقابل حل هستند. در حقیقت توان پردازش رایانه‌ای کوانتومی حتی کوچک‌مقیاس بیش

1. Machine Learning

2. Big Data

علوم بازرگانی و مالی است که اغلب مبتنی بر روش‌های داده‌کاوی^۴ و یادگیری ماشین است و تا حد بسیاری دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد. اما این روش‌ها اغلب مستلزم صرف هزینه و زمان محاسبات فراوانند. همچنین تحلیل‌گران محاسباتی علوم مالی با مشکلات مختلفی در اجرای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در رایانه‌های کلاسیک روبه‌رو هستند (Alcazar et al., 2020). مسائل متداول شامل ارزیابی ریسک^۵ و قیمت‌گذاری مشتقات مالی پیچیده^۶ با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو^۷، الگوسازی بازارهای مالی با معادلات دیفرانسیل تصادفی^۸، بهینه‌سازی تخصیص اوراق بهادار^۹ و شناسایی روند بازار^{۱۰} با روش‌های یادگیری ماشین هستند (Dixon et al., 2020). حل این مسائل اغلب نیازمند روش‌های محاسباتی پیچیده و همچنین منابع مالی بسیار است. با توجه به اینکه علوم مالی نوین شامل انبوهی از مسائل محاسباتی چالشی است که به توان رایانه‌های کوانتومی نیاز دارد بنابراین در سال‌های اخیر تلاش مؤثری برای گسترش الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی انجام شده است که نیازهای داده‌های روزافزون در حوزه علوم مالی را می‌تواند برآورده کند (Biamonte et al., 2017).

در پژوهش حاضر تلاش شده است که توضیح داده شود رایانه‌های کوانتومی چگونه بر محاسبات علوم مالی بر مبنای روش‌های یادگیری ماشین تأثیر گذاشته‌اند و می‌گذارند؟ همچنین در کدام گروه از این مسائل توان محاسبات کوانتومی سرعت محاسبات را افزایش می‌دهد؟ در نهایت کدام یک از این افزایش سرعت‌ها قابلیت پیاده‌سازی عملی را در کوتاه‌مدت خواهند داشت؟ برای پاسخ به این سؤالات در این مقاله حوزه‌های گوناگون دانش مالی بررسی شده است که می‌توان در این حوزه‌ها از افزایش سرعت محاسباتی ایجادشده در روش‌های یادگیری ماشین کوانتومی بهره گرفت.

ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است: بعد از مقدمه حاضر و در بخش دوم مقاله مبانی نظری محاسبات کوانتومی و همچنین پیشرفت‌های عملی در این حوزه مرور شده است. سپس در بخش سوم، روش‌های یادگیری ماشین که در علوم مالی کاربرد دارند تبیین شده و الگوریتم‌های کوانتومی متناظر و میزان برتری آن‌ها از الگوریتم‌های کلاسیک بررسی شده است. در بخش سوم همچنین در خصوص امکان‌پذیری عملیاتی این الگوریتم‌ها

تفکر امکان‌پذیری محاسبات عددی با استفاده از قوانین مکانیک کوانتوم برای حل محاسبات پیچیده دنبال شده است که نسبت به روش‌های پردازش کلاسیک اطلاعات، محاسبات کوانتومی بر پایه الگوریتم‌های کارآمد فنی و تخصصی با دقت و سرعت نامایی است (Nielsen and Chuang, 2010). در حال حاضر فقط پردازنده‌های کوانتومی کوچک در دسترس‌اند، اما به‌علت انتظارات بالا برای گسترش این فناوری در آینده نزدیک می‌توان انتظار داشت که تغییر رویکرد جدی در روش‌های محاسبات و به‌ویژه حوزه‌های اقتصاد مالی اتفاق خواهد افتاد. بر این اساس اگر علوم مالی را به‌صورت علوم مرتبط با مدیریت فعالیت‌های اقتصادی و پولی تعریف کنیم، اهمیت دقت و سرعت در پردازش و حل مسائل مالی مانند پیش‌بینی بازار سهام، بهینه‌سازی پرتفولیو و سبد دارایی‌ها و مباحث مرتبط با قیمت‌گذاری و آربیتراژ مشخص می‌شود و اندیشه به‌کارگیری روش‌های محاسبه کوانتومی در اقتصاد مالی تضمین‌کننده دقت و سرعت محاسبات و تصمیم‌گیری‌های مالی خواهد بود (Orús et al., 2019) (Hull et al., 2021). در بررسی مطالعات در حوزه اقتصاد مالی تأیید می‌شود که برخی از مسائل مالی شناخته‌شده را می‌توان در چهارچوب نظریه‌های کوانتومی تصریح کرد (Stamatopou- (los et al., 2020) (Mosteanu and Faccia, 2021). برای مثال، ارتباط بلک - اسکولز - مرتون^۱ را می‌توان بر اساس معادله شرودینگر^۲ که در قوانین کوانتوم شناخته شده است، نوشت و یا الگوسازی ارتباطات آربیتراژ که در چهارچوب قوانین محاسبات کوانتوم به‌راحتی فرمول‌بندی و حل می‌شود. بنابراین در این چهارچوب می‌توان کل بازار مالی را به‌صورت فرایند کوانتومی الگوسازی و پردازش کرد (Kwangwon et al., 2018; Ding (et al., 2019).

علوم مالی نوین حاوی تعداد فراوانی از مسائل محاسباتی چالشی است که توان رایانه‌های کوانتومی می‌تواند در حل آن‌ها مؤثر واقع شود (Sergio et al., 2020). مثلاً، سؤال‌های بسیاری در این حوزه می‌توانند به‌صورت مسئله بهینه‌سازی الگو شوند. این‌ها مسائلی‌اند که در رایانه‌های کلاسیک به‌سختی حل می‌شوند، اما به کمک روش‌های بهینه‌سازی کوانتومی به‌سرعت قابل‌حل‌اند. در سال‌های اخیر، این حوزه به‌علت دسترسی تجاری ماشین‌های بهینه‌سازی کوانتومی (انیلرآهای کوانتومی) کاربرد بسیاری یافته است (Itay and Spedalieri, 2016). روش دیگر در حل مسائل مالی جست‌وجو برای یافتن الگوها و الگوریتم‌های داده‌ها است. این روش از پرکاربردترین روش‌های پیش‌بینی‌های

4. Data Mining
5. Risk Evaluation
6. Pricing Exotic Financial Derivatives
7. Monte Carlo Simulation
8. Stochastic Differential Equations
9. Portfolio Allocation Optimization
10. Market Trend

1. Black-Scholes-Merton Formula
2. Schrodinger Equation
3. Annealer

تولید می‌کنند شامل گوگل، علی بابا، آی‌بی‌ام،^۴ و مایکروسافت‌اند. در حال حاضر، در ساختار گیتی، گوگل رکورد پردازنده کوانتومی با ۷۲ کیوبیت را دارد (Itay and Spedalieri, 2016).

دسته دوم آیلرهای کوانتومی هستند که صرفاً برای یافتن کمینه جهانی مسئله هدف طراحی شده‌اند. تاکنون چندین آیلر کوانتومی تجاری شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها پردازنده DWAVE با بیش از ۲۰۰۰ کیوبیت ابررسانا است (Hu et al., 2019). این ماشین در آزمایشگاه‌ها و شرکت‌هایی در سراسر دنیا از قبیل گوگل و تگزاس آی‌اند‌ام^۵ آزمایش شده است. نمونه‌های کوچک‌تر در استارت‌آپ‌ها نیز ساخته شده‌اند. در شرایط ایدئال این رایانه‌ها توانی برابر با رایانه‌های با الگوی مداری دارند.^۶ برتری رایانش کوانتومی بر رایانش کلاسیک با نمونه‌های کوچک مقیاس رایانه‌های کوانتومی کنونی نیز اثبات شده است. مثلاً در سال ۲۰۱۹، گوگل با رایانه کوانتومی ۵۳ کیوبیتی خود توانست مسئله نمونه‌برداری تصادفی را در ۲۰۰ ثانیه حل کند. حل این مسئله با ابررایانه‌های کلاسیک تقریباً به ۱۰۰۰۰ سال زمان نیاز دارد (Arute et al, 2019).

شایان ذکر است که در حال حاضر این امکان برای همه افراد وجود دارد که به رایانه کوانتومی در ابر عمومی^۷ دسترسی پیدا کنند و آزمایش‌های برنامه‌نویسی را انجام دهند. رایانه کوانتومی آی‌بی‌ام موجود در ابر (آی‌بی‌ام کیو)^۸ در حال حاضر جامعه‌ای با بیش از ۶۰۰۰۰ کاربر را شامل می‌شود که تاکنون بیش از ۱۷ میلیون آزمایش محاسباتی با استفاده از آن انجام داده‌اند. این در حالی است که اولین سامانه آی‌بی‌ام کیو که در دسترس عموم بود فقط قدرت متوسط ۵ کیوبیت را داشت. پس از آن، این توان به ۱۷ و سپس ۲۰ کیوبیت ارتقا داده شده است. اخیراً آی‌بی‌ام اعلام کرده است که قدرت پردازش نمونه اولیه پردازشگر را به ۵۰ کیوبیت گسترش داده است (Martin et al., 2021).

۲. یادگیری ماشین کوانتومی و کاربردهای آن در اقتصاد مالی

در این بخش ابتدا الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی تبیین شده است که از الگوریتم‌های متناظر کلاسیک خود برتری دارند و سپس کاربرد هرکدام در حوزه مالی شرح داده شده است. در حالت کلی، کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: ۱. پیش‌بینی آینده بر مبنای

بحث شده است. بخش چهارم به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص یافته است.

۱. مبانی نظری محاسبات کوانتومی

در این بخش ابتدا مبانی نظری محاسبات کوانتومی مرور می‌شود و سپس سخت‌افزارهای کوانتومی موجود را بررسی خواهیم کرد.

۱ - ۱. نگاهی به اصول نظری محاسبات کوانتومی

محاسبات کوانتومی به معنی به‌کارگیری قوانین مکانیک کوانتومی برای انجام محاسبات است که با روش‌های دنیای کلاسیک بسیار متفاوت است. قدرت رایانه‌های کوانتومی در این است که براساس منطقی کار می‌کنند که دیگر مبتنی بر منطق دو ارزش صفر و یک به معنای متداول روشن - خاموش یا غلط - درست نیستند. واحد اطلاعات در رایانه‌های کوانتومی کوانتوم بیت و مختصراً کیوبیت^۱ نامیده می‌شود. کیوبیت‌ها دو ویژگی مهم و متفاوت از دنیای کلاسیک شامل برهم‌نهی^۲ و درهم‌تنیدگی^۳ دارند. برخلاف بیت‌های کلاسیک که در هر لحظه از زمان در وضعیت صفر یا یک هستند، کیوبیت‌ها براساس قوانین فیزیک کوانتوم می‌توانند هم‌زمان صفر و یک را نیز اختیار کنند که این ویژگی برهم‌نهی کوانتومی نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر ثبات کیوبیتی می‌تواند در هر لحظه از زمان حالت را اختیار کند که به قدرت محاسبات موازی در رایانه‌های کوانتومی منجر می‌شود (Marinescu and Marinescu, 2004).

ویژگی دوم بیان می‌کند که در حالت وجود دو یا بیش از دو کیوبیت این کیوبیت‌ها می‌توانند مستقل از فاصله فیزیکی به یکدیگر وابسته باشند. این وابستگی درهم‌تنیدگی کوانتومی نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، دو کیوبیت در صورتی درهم‌تنیده تلقی می‌شوند که بیان حالت یکی از آن‌ها بدون داشتن حالت دیگری امکان‌پذیر نباشد و تغییر حالت یکی از آن‌ها به تغییر حالت آنی سایر کیوبیت‌ها منجر شود. ویژگی‌های برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی کوانتومی محاسبات کوانتومی را به‌طور چشمگیری از محاسبات کلاسیک متمایز می‌کند (Marinescu and Marinescu, 2004).

۱ - ۲. سخت‌افزار کوانتومی موجود

سخت‌افزار رایانه‌های کوانتومی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد. دسته اول رایانه‌های کوانتومی اند که مشابه رایانه‌های کلاسیک فعلی مبتنی بر الگوی گیتی و مداری رفتار می‌کنند (Marinescu and Houshmand et al., 2018). شرکت‌های اصلی که پردازنده‌های همه‌منظوره با این سبک کوانتومی

4. IBM

5. Texas A&M

۶. برای مطالعه جزئیات بیشتر در مورد سخت‌افزارهای کوانتومی به مقاله چنگ و همکاران (2017) مراجعه کنید.

7. Public Cloud

8. IBM Q

1. Qubit

2. Superposition

3. Entanglement

به دسترسی به داده نیاز دارند که با ذخیره داده در ساختارهای خاص در حافظه با دسترسی تصادفی کوانتومی^{۱۴} محقق می‌شود. تعدادی از الگوریتم‌های کوانتومی یادگیری ماشین بر مبنای تفکر کدگذاری دامنه عمل می‌کنند. به این معنا که دامنه‌های حالت کوانتومی با ورودی‌ها و خروجی‌های محاسبات نگاشته می‌شوند. از آنجاکه حالت کوانتومی با کیوبیت با مقدار مختلط توصیف می‌شود این کدگذاری می‌تواند به فشردگی نمایشی اطلاعات منجر شود (Carrasquilla, 2020). در بسیاری موارد و اندازه‌های نمونه‌ای، الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی می‌توانند میلیون‌ها بار سریع‌تر از هم‌تای کلاسیک خود اجرا شوند. کاربردهای افزایش سرعت الگوریتم‌های یادگیری ماشین کوانتومی در علوم مالی در ادامه تحلیل و مزیت هر روش در پایان این بخش در جدول ۱ مقایسه و ارزیابی شده است.

۲ - ۱. یادگیری نظارت‌شده

یادگیری نظارت‌شده به سامانه‌ای اشاره دارد که در آن ورودی مجموعه‌ای از نمونه‌های برچسب‌گذاری شده است و وظیفه سامانه این است که، با توجه به ورودی‌ها و برچسب‌های متناظر داده‌شده، به ازای ورودی‌های جدید برچسب‌های مناسب را پیش‌بینی کند. وقتی که برچسب‌ها مقادیر حقیقی باشند مسئله به مسئله رگرسیون و وقتی که برچسب‌ها مقادیر گسسته باشند به مسئله طبقه‌بندی موسوم است (Kerenidis and Prakash, 2020).

۲ - ۱ - ۱. رگرسیون

در مسائل رگرسیون به برنامه رایانه آموزش داده می‌شود تا مقدار عددی را برای ورودی m بعدی مفروض پیش‌بینی کند. در واقع هدف این است که تابع مناسب $\mathbf{h} \rightarrow \mathbf{R}$ را بیاموزد. در این بخش الگوریتم‌های کوانتومی برای رگرسیون خطی به روش کمترین مربعات^{۱۵} و برای رگرسیون \mathbf{k} نزدیک‌ترین همسایگی^{۱۶} بحث می‌شود که نمونه‌های متناظر پرکاربردترین الگوریتم‌های کلاسیک برای رگرسیون هستند.

رگرسیون خطی به روش کمترین مربعات یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای رگرسیون است. در دنیای کلاسیک کمترین مربعات خطا برای مجموعه داده‌ها با اندازه متوسط با استفاده از حل‌کننده‌های سامانه خطی و برای مجموعه داده‌های بزرگ با روش کاهش گرادیان^{۱۷} تکرار شونده حل می‌شود. روش‌های کوانتومی متناظر با الگوریتم‌های مذکور برای کمترین مقدار خطا گسترش یافته‌اند (Kerenidis and Prakash, 2020).

روند داده‌های گذشته؛^۲ دسته‌بندی اطلاعات؛^۳ یافتن الگوها بر مبنای نظم و بی‌نظمی‌های موجود در داده‌ها. در علوم مالی، این روش‌ها در بسیاری مسائل این حوزه که با قطعی نبودن در آینده سروکار دارند مانند ریسک و قیمت کالاها^۱ کاربرد دارند. به همین علت روش‌های یادگیری ماشین به‌طور فراگیر در این حوزه در حال گسترش است. برای مثال شرکت آیدی‌سی^۲ سرمایه‌گذاری در حوزه یادگیری ماشین به ارزش ۵۰/۱ میلیارد دلار را در سال ۲۰۲۰ اعلام کرده است که انتظار می‌رود در هر چهار سال این رقم حداقل چهار برابر شود (Lessmann et al., 2015).

الگوریتم‌های یادگیری ماشین را می‌توان به دسته‌های یادگیری نظارت‌شده،^۳ یادگیری نظارت‌نشده،^۴ یادگیری عمیق^۵ و یادگیری تقویتی^۶ تقسیم کرد. کاربردهای اصلی یادگیری ماشین شامل طبقه‌بندی^۷ و رگرسیون^۸ (در یادگیری نظارت‌شده)، خوشه‌بندی^۹ و استخراج ویژگی^{۱۰} (در یادگیری نظارت‌نشده) است. شایان ذکر است که زیرروال‌های^{۱۱} جبر خطی استفاده‌های وسیعی در الگوریتم‌های یادگیری ماشین دارد و گسترش الگوریتم‌های کوانتومی جبر خطی تأثیر فراوانی در گسترش حوزه یادگیری ماشین کوانتومی داشته است زیرا افزایش نمایشی سرعت حل مسائل جبر خطی روی رایانه‌های کوانتومی برای انواع خاصی از ماتریس‌ها را فراهم کرده است (Harrow et al., 2009; Gilyén et al., 2018).

در اغلب کاربردهای یادگیری ماشین کوانتومی از چند واحد پایه بهره گرفته می‌شود. برای مثال مدارهای کوانتومی برای ضرب ماتریسی، معکوس‌گیری و تصویرسازی^{۱۲} در زیرفضاهای ماتریسی در روش‌های کاهش ابعاد استفاده می‌شوند (Haener et al., 2018). علاوه بر این، توانایی تخمین فاصله کوانتومی بین دو بردار، برای مثال از طریق آزمون جابه‌جایی^{۱۳} در روش‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده و بدون نظارت استفاده می‌شوند (Fanizza et al., 2020). آزمون جابه‌جایی آزمون‌ی است که شباهت بین دو حالت کوانتومی را می‌سنجد. اغلب این زیرروال‌های کوانتومی

1. Asset Prices and Risk
2. International Data Corporation
3. Supervised Learning
4. Unsupervised Learning
5. Deep Learning
6. Reinforcement Learning
7. Classification
8. Regression
9. Clustering
10. Feature Extraction
11. Subroutines
12. Projection
13. Swap

14. Quantum Random Access Memory

15. Least Squares

16. K-Nearest Neighbor

17. Descent Gradient

بردار است.^۵ با توجه به نوظهور بودن کاربرد کوانتوم در علوم مالی پیشنهادهای اولیه‌ای برای اعمال الگوریتم‌های طبقه‌بندی کوانتومی برای مسائل تشخیص الگو وجود دارد. درحقیقت اندیشه تشخیص الگو در چهارچوب رایانه کوانتومی به‌صورت آزمایشگاهی اجرایی شده است. از کاربردهای مهم ماشین‌های بردار پشتیبان در حوزه علوم مالی تحلیل ریسک اعتبار^۶ است.

۲ - ۲. یادگیری بدون نظارت

یادگیری بدون نظارت دسته‌ای از روش‌های یادگیری ماشین برای کشف الگوهای موجود در میان داده‌ها است. داده‌های ارائه‌شده به الگوریتم بدون نظارت برچسب ندارند، بدین معنا که متغیر ورودی (X) بدون هیچ متغیر خروجی متناظری نسبت داده شده است. در یادگیری بدون نظارت، الگوریتم‌ها ساختارهای موجود در میان داده‌ها را کشف می‌کنند. روش‌های یادگیری بدون نظارت به روش‌های خوشه‌بندی،^۷ استخراج ویژگی، الگوهای ترکیبی یادگیری^۸ و الگوهای مولد^۹ تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های کوانتومی پیشنهادشده برای این الگوها در ادامه تبیین شده است.

۲ - ۲ - ۱. خوشه‌بندی

الگوریتم کلاسیک k میانگین یکی از الگوریتم‌های خوشه‌بندی پرکاربرد برای مقادیر حقیقی است. در هر مسئله خوشه‌بندی پایگاه داده‌ای از n بردار داده می‌شود و قرار است به هر بردار یکی از برچسب تخصیص داده شود (فرض بر این است که مفروض است). به گونه‌ای که بردارهای مشابه به یک خوشه تخصیص داده شوند. اغلب فاصله اقلیدسی معیار شباهت است، هر چند بسته به موضوع مورد بحث سایر معیارها نیز ممکن است در نظر گرفته شوند.

برای حل این مسئله روی رایانه کوانتومی، الگوریتمی به اسم q میانگین پیشنهاد شده است که نسخه متناظر الگوریتم k میانگین است. الگوریتم q میانگین همگرایی و دقتی شبیه الگوریتم k میانگین دارد و زمان اجرای آن برحسب اندازه داده ورودی چندجمله‌ای - لگاریتمی است (Kerenidis et al., 2018). الگوریتم q میانگین در آینده نزدیک قابل پیاده‌سازی است که با الگوریتم تخمین فاصله و ضرب ماتریسی اجرا می‌شود. یکی از کاربردهای q میانگین در حوزه علوم مالی تحلیل ریسک سبد سهام^{۱۰} است.

(2020). این الگوریتم‌های کوانتومی راه‌حل‌های میان‌مدت‌اند زیرا از مدارهای با عمق بالا استفاده می‌کنند. در حوزه علوم مالی رگرسیون خطی برای قیمت‌گذاری کالا و برای محاسبه روند چنددرایی^۱ استفاده می‌شود.

نزدیک‌ترین k همسایگی روش غیرپارامتری رگرسیون است که برچسب داده X را به‌صورت میانگین برچسب k نزدیک‌ترین همسایه در فاصله اقلیدسی تخمین می‌زند. راه‌حل کلاسیک حل مسئله به‌علت ابعاد بالای داده و نیاز به محاسبه چندین فاصله اقلیدسی ممکن است پیچیده و پرهزینه باشد. الگوریتم‌های کوانتومی نزدیک‌ترین همسایه می‌توانند در آینده نزدیک استفاده شوند زیرا زیرروال‌های کوانتومی کارایی برای تخمین فاصله وجود دارند که می‌توانند به افزایش سرعت از مرتبه درجه دو به نسبت الگوریتم‌های کلاسیک برسند (Kerenidis, 2020). از کاربردهای نزدیک‌ترین k همسایه در دنیای مالی می‌توان به سرمایه‌گذاری حق بیمه ریسک دارایی متقابل^۲ اشاره کرد.

۲ - ۱ - ۲. طبقه‌بندی

طبقه‌بندی به معنی پیش‌بینی برچسب‌ها با مقدار گسسته است. در مسائل طبقه‌بندی برنامه رایانه می‌آموزد که تابع مناسب $\{1, 2, \dots, t\}$ را بیابد. برنامه آموزش‌دیده به کمک h برای ورودی مفروض تعیین می‌کند به کدام طبقه از t طبقه اختصاص دارد. در این خصوص ضروری است که الگوریتم‌های طبقه‌بندی کوانتومی بر مبنای دو الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه و ماشین بردار پشتیبان^۳ تحلیل و بحث شود.

طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه مجموعه‌ای از مراکز را ورودی در نظر می‌گیرد و به هر نقطه داده برچسب نزدیک‌ترین مرکز را اختصاص می‌دهد. به‌علت وجود پروسه‌های کارآمد تخمین فاصله و الگوریتم‌های خوشه‌بندی کوانتومی برای یافتن مراکز امکان پیاده‌سازی عملی این روش در آینده‌ای نزدیک وجود دارد.

الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان از پرکاربردترین الگوریتم‌های بینایی ماشین نظارت‌شده و زیرمجموعه‌ای از الگوریتم‌های طبقه‌بندی هستند. به کمک این ماشین‌ها می‌توان ابرصفحه‌ای را یافت که پایگاه داده برچسب‌گذاری‌شده را به دو دسته مجزا تقسیم کند. پیشنهادهای فراوانی برای پیاده‌سازی ماشین‌های بردار پشتیبان روی رایانه کوانتومی وجود دارد (Rebentrost et al., 2014; Chatterjee and Yu, 2017). این الگوریتم‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند زیرا در آن‌ها اعمال موردنیاز برای ساخت ابرصفحه^۴ و تخصیص یک طبقه به بردار جدید از مرتبه چندجمله‌ای برحسب $\log n$ است که n بعد فضای

۵. گام‌های عملیاتی پیاده‌سازی آزمایشگاهی ماشین بردار پشتیبان کوانتومی در مقاله لی و همکاران (2015) ارائه شده است.

6. Credit Risk

7. Clustering

8. Mixture Learning Models

9. Generative Models

10. Portfolio Risk Analysis

1. Multi Asset Computation

2. Cross-Asset Risk Premia Investing

3. Support Vector Machine

4. Hyperplane

برحسب ابعاد مسئله به افزایش سرعت از نمونه‌های کلاسیک خود منجر می‌شوند (Lloyd et al., 2014). الگوریتم‌های جدید تصویرسازی کوانتومی از روش‌های تخمین مقدار منفرد^۷ (Kerenidis and Prakash, 2017) و یا تبدیل مقدار منفرد (Gilyén et al., 2018) استفاده می‌کنند.

۲ - ۳. یادگیری عمیق

روش‌های متعددی برای یادگیری عمیق کوانتومی براساس مدارات کوانتومی پارامتری ارائه شده است که عملکردی مشابه با شبکه‌های عصبی متناظر کلاسیک دارد؛ درحالی‌که می‌توان به افزایش سرعت کوانتومی برای آموزش رسید. شبکه‌های عصبی پیش‌نگر کوانتومی در این حوزه پیشنهاد شده‌اند که می‌توانند در ارزیابی مستقیم و آموزش مبتنی بر داده‌های پس‌نگر بسیار کارا عمل کنند (Allcock et al., 2020). اخیراً شبکه‌ای عصبی کانولوشنال^۸ کوانتومی با افزایش سرعت در آموزش و انتشار به عقب ارائه شده است (Kerenidis et al., 2020). ساختارهای کوانتومی برای یادگیری عمیق حوزه پژوهشی جدید و روبه‌پیشرفت است که پیشرفت‌های اخیر آن شامل اجرای شبکه‌های عصبی کانولوشنال کوانتومی است (Cong et al., 2019; Chakrabarti et al., 2019).

کاربردهای روش یادگیری عمیق و به‌دنبال آن روش‌های یادگیری عمیق کوانتومی در علوم مالی حوزه‌ای در حال گسترش است (Culkin and Das, 2017). اخیراً راه‌حلی‌هایی که مبتنی بر یادگیری عمیق کوانتومی پیشنهاد شده‌اند از نسخه‌های کلاسیک متناظر خود در حوزه‌های گوناگون دانش مالی از قبیل قیمت‌داری، خطر رهن^۹ و دفتر سفارشات محدود^{۱۰} برتری چشمگیری دارند. هرچند در تحلیل سری‌های زمانی عموماً روش‌های کلاسیک به روش‌های کوانتومی برتری دارند (Chen et al., 2019).

۲ - ۴. یادگیری تقویتی

در این حوزه از یادگیری ماشین، داده‌ها و برچسب‌ها موجود نیستند و داده‌ها باید با ماشین تولید شوند و فرایند تولید داده را با بهینه‌سازی تابع جایزه مفروض بهینه کنند (Kolm and Ritter, 2020). این روش تا حدی شبیه بازی کودکان است؛ به این معنا که کودک با محیط ارتباط برقرار می‌کند و در ابتدا رفتارهای تصادفی انجام می‌دهد و، سپس، با بازخوردهای بیرونی (تشویق یا سرزنش والدین) کودک یاد می‌گیرد که عملکرد خود را بهتر کند. از طریق یادگیری تقویتی ماشین‌ها می‌توانند بازی‌های رایانه‌ای را مدیریت کنند که در ابتدا به

خوشه‌بندی طیفی^۱ الگوریتم یادگیری ماشین برای خوشه‌بندی داده‌ها ساختارهای غیرمحدب و یا لانه‌ای است (Von Luxburg, 2007). این روش بر مبنای نظریه گراف‌ها از ویژگی‌های طیفی ماتریس لاپلاس برای تصویرکردن داده در فضای با ابعاد پایین بهره می‌گیرد تا خوشه‌بندی‌ای کارا تر محقق شود. با وجود موفقیت این روش، در عمل زمان اجرای این الگوریتم به سرعت رشد می‌کند زیرا زمان اجرای این الگوریتم در رایانه کلاسیک برحسب تعداد داده‌های ورودی $O(n^3)$ است. الگوریتم کوانتومی بدین منظور ارائه شده است که پیچیدگی آن برحسب اندازه ورودی خطی است. براساس شبیه‌سازی‌ها دقت یکسان الگوریتم کوانتومی بسیار سریع‌تر از الگوریتم کلاسیک اجرا می‌شود (Jordanis and Landman, 2021).

الگوریتم کلاسیک k میانگین به الگوریتم بیشینه‌سازی انتظار^۲ برای یادگیری الگوهای ترکیبی گوسی تعمیم پیدا می‌کند و همچنین الگوریتم q میانگین می‌تواند به الگوریتم بیشینه‌سازی انتظار کوانتومی گسترش یابد (Kerenidis et al., 2020).

با فرض دسترسی کوانتومی به پایگاه داده، الگوریتم بیشینه‌سازی انتظار کوانتومی همگرایی داشته است و دقتی مشابه با نسخه متناظر کلاسیک دارد. درحالی‌که زمان اجرا برحسب تعداد داده‌های موجود در مجموعه آموزش چندجمله‌ای لگاریتمی و برحسب سایر متغیرها (از قبیل بعد فضای ویژگی و تعداد مؤلفه‌های ترکیبی) چندجمله‌ای است. کاربردهای احتمالی مهم الگوریتم بیشینه‌سازی انتظار کوانتومی در علوم مالی شامل شناسایی بخش‌ها و ناحیه‌های بازار، تلاطمات و نوسانات^۳ و نوسانات قیمت‌ها و نرخ ارز است.

۲ - ۲ - ۲. استخراج ویژگی

استخراج ویژگی فرایندی است که در آن با انجام عملیاتی روی داده‌ها ویژگی‌های بارز و تعیین‌کننده آن‌ها مشخص می‌شود. هدف استخراج ویژگی این است که داده‌های خام به شکل قابل استفاده‌تری برای پردازش‌های آماری بعدی درآیند و داده‌ها در فضایی با ابعاد بزرگ به فضایی با ابعاد کمتر تبدیل شوند. تصویرکردن روی فضای بردار ویژه^۴ ماتریس داده یکی از روش‌های پر استفاده استخراج ویژگی و کاهش ابعاد در روش یادگیری ماشین کلاسیک است. الگوریتم‌هایی مانند تحلیل مؤلفه اصلی^۵ یا تحلیل جداکننده کلاسیک^۶ از چنین تصویرگره‌هایی استفاده می‌کنند. الگوریتم‌های تحلیل مؤلفه اصلی کوانتومی

1. Spectral Clustering
2. Expectation-Maximization
3. Volatility
4. Eigen-Value
5. Principal Component Analysis
6. Linear Discriminant Analysis

7. Singular Value Estimation

8. Convolutional Neural Network

9. Mortgage Risk

10. Limit Order Book

چندجمله‌ای^۵ و به افزایش سرعت از مرتبه افزایش سرعت نمایی^۶ گفته می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های حل کوانتومی کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مالی دارند و به‌ویژه در روش‌های پرکاربرد الگوسازی تحلیل مالی شامل روش‌های رگرسیون و خوشه‌بندی قادر به تحلیل طیف گسترده‌ای از مسائل از جمله بهینه‌یابی، قیمت‌گذاری دارایی‌ها، تحلیل سبد سهام، معاملات الگوریتمی، پیش‌بینی‌های نرخ تورم و محاسبات حوزه ریسک‌سنجی هستند.

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، مبانی نظری محاسبات و تکامل رایانه‌های کوانتومی از منظر تأثیر در محاسبات علوم مالی بر مبنای روش‌های یادگیری ماشین بررسی شد. تمرکز اصلی در مرور مبانی نظری و محاسباتی ماشین‌های کوانتومی پاسخ به دو سؤال اصلی بود: ۱. چگونه توان محاسبات کوانتومی سرعت محاسبات را در حوزه علوم مالی افزایش می‌دهد؟ ۲. کدامیک از این افزایش سرعت‌ها قابلیت پیاده‌سازی عملی را در کوتاه‌مدت خواهند داشت؟ طبق بررسی پژوهش‌های درحال‌گسترش و تکامل، افزایش قدرت محاسباتی و دسترس‌پذیر بودن داده‌های بزرگ به همراه توسعه الگوریتم‌ها باعث پیشرفت‌های بزرگ در روش‌های یادگیری ماشین شده است. همچنین نزدیکی به محدودیت‌های فیزیکی تولید تراشه‌های سیلیکونی به همراه رشد روزافزون حجم مجموعه داده‌ها پژوهشگران حوزه‌های مختلف علوم و از جمله علوم مالی را ترغیب کرده است که از قدرت محاسبات کوانتومی برای افزایش سرعت الگوریتم‌های کلاسیک یادگیری ماشین استفاده کنند. در این مقاله با بررسی روش‌های مؤثر در یادگیری ماشین کوانتومی به کاربرد روش‌های حل کوانتومی در حل مسائل مالی اشاره شد.

در بررسی کاربردهای محاسبات کوانتومی در اقتصاد مالی و اهمیت آن نشان داده شد که گسترش فراوان کاربردهای محاسبات کوانتومی در علوم مالی دو علت اصلی دارد: (۱) تحولات درحال‌توسعه و فراتر از انتظارات در سخت‌افزار کوانتومی و (۲) پیشرفت مبانی نظری و مفهومی نظریات کوانتومی که افزایش نمایی سرعت محاسبات در الگوریتم‌های کوانتومی را به‌طور گسترده و کاربردی در تمام علوم و از جمله علوم مالی امکان‌پذیر کرده است که نیاز به دقت و سرعت بالاتر در پردازش اطلاعات دارد. بدین منظور چهار الگوریتم پرکاربرد شامل (۱) طبقه‌بندی داده‌ها با هدف تشخیص سریع و دقیق الگوها در میان داده‌ها، (۲) روش‌های رگرسیون با تمرکز بر تشخیص فرم تابعی داده‌ها، (۳) روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی با هدف تقلیل داده‌ها به چند

نظر می‌رسید بر مبنای ماشین‌ها مدیریت نمی‌شوند.

کنترل پویای بازارهای مالی نوعی زمین بازی طبیعی برای الگوریتم‌های یادگیری تقویتی است. پژوهش‌های بسیاری برای مسائل مدیریت ریسک پویا در موارد مبتنی بر الگو به کمک ابزار برنامه‌نویسی پویا در زمان گسسته یا پیوسته انجام شده است. در چنین ساختاری اگر شبیه‌سازی واقعی از بازار مالی وجود داشته باشد، الگوریتم‌های یادگیری تقویتی راهی برای روش‌های تقریب عددی بدون الگو برای راهبردهای پوششی^۱ باز می‌کنند. چنین شبیه‌سازی‌ای ممکن است معمولاً شامل نواقص بازار مانند افزایش هزینه‌های معامله، تأثیر اندازه بازار و مشکلات مرتبط با تأمین نقدینگی شود. چند حوزه مهم کاربرد یادگیری تقویتی در علوم مالی شامل قیمت‌گذاری و پوشش ریسک مشتقات مالی،^۲ تخصیص بهینه دارایی،^۳ الگوسازی تأثیر بازار^۴ و معاملات الگوریتمی است (Charpentier et al., 2021). در همین راستا آموزش تقویتی کوانتومی حوزه‌ای نسبتاً جدید است که به افزایش سرعت نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک منجر شده است (Albarrán-Arriagada et al., (Ramezanpour, 2017 2018).

۲- ۵. جمع‌بندی

جدول ۱ مسائل علوم مالی را جمع‌بندی می‌کند که براساس آن روش‌های یادگیری ماشین کوانتومی می‌توانند به افزایش سرعت و کارایی کوانتومی در حل آن‌ها منجر شوند. همچنین الگوریتم کوانتومی مناسب حل آن کاربرد خاص، میزان افزایش سرعت و نیز زمان تحقق فیزیکی آن اعلام شده است. در این جدول، اندازه ورودی مسئله و منظور از افزایش سرعت این است که اگر زمان صرف‌شده برای حل کلاسیک آن مسئله مالی ضریبی از باشد، زمان حل کوانتومی آن ضریبی از است. همچنین منظور از افزایش سرعت این است که اگر زمان صرف‌شده برای حل کلاسیک آن مسئله مالی ضریبی از باشد، زمان حل کوانتومی آن ضریبی از است (Cormen et al., 2009). برای نمونه، اگر زمان صرف‌شده برای مسئله‌ای روی رایانه کلاسیک واحد زمانی باشد، حل آن با الگوریتم کوانتومی دارای افزایش سرعت، واحد زمانی خواهد بود که یک میلیون بار سریع‌تر است. همچنین حل آن مسئله با الگوریتم کوانتومی دارای افزایش سرعت فقط ۱۲ واحد زمانی است. به افزایش سرعت از مرتبه افزایش سرعت

1. Hedging Strategies
2. Pricing and Hedging of Financial Derivatives
3. Optimal Asset Allocation
4. Market Impact Modeling

5. Quadratic

6. Exponential

جدول ۱: کاربرد روش‌های یادگیری کوانتومی در حل مسائل علوم مالی

مسئله کاربردی در حوزه علوم مالی	دسته	روش حل کوانتومی	میزان افزایش سرعت در دقت مشابه با فرض اندازه ورودی برابر N	زمان تحقق پیاده‌سازی عملی
<ul style="list-style-type: none"> • قیمت‌گذاری کالا • محاسبه روند چنددرایی 	رگرسیون	رگرسیون خطی کوانتومی (Kerenidis and Prakash, 2020)		آینده میان‌مدت
<ul style="list-style-type: none"> • سرمایه‌گذاری حق بیمه ریسک • دارایی متقابل 	رگرسیون	نزدیک‌ترین همسایگی کوانتومی (Kerenidis, 2020)	$O(\sqrt{N})$	آینده کوتاه‌مدت
<ul style="list-style-type: none"> • تحلیل ریسک اعتبار 	طبقه‌بندی	ماشین بردار پشتیبان کوانتومی (Chatterjee and Yu, 2017)	$O(\sqrt{N})$	پیاده‌سازی شده است
<ul style="list-style-type: none"> • تحلیل ریسک سبد سهام 	خوشه‌بندی	الگوریتم میانگین (Kerenidis et al., 2018)	$o(\log N)$	آینده کوتاه‌مدت
<ul style="list-style-type: none"> • شناسایی نواحی بازار • بالا/پایین رفتن نوسانات • افزایش/کاهش نرخ‌ها • افزایش/کاهش تورم 	خوشه‌بندی	الگوریتم پیشینه‌سازی انتظار کوانتومی (Anupam Prakash, 2020)	$o(\log N)$	آینده کوتاه‌مدت
<ul style="list-style-type: none"> • کاهش ابعاد داده‌های متنوع مالی 	استخراج ویژگی	الگوریتم‌های تحلیل مؤلفه اصلی کوانتومی (Lloyd et al., 2014) الگوریتم تصویرسازی کوانتومی (Kerenidis and Prakash, 2017) (Gilye n et al., 2018)	$O(\sqrt{N})$	آینده کوتاه‌مدت
<ul style="list-style-type: none"> • قیمت‌گذاری • دفتر سفارشات محدود • خطر رهن • پیش‌بینی بازار سهام • معاملات سهام • ریسک و اعتبار پیش‌فرض مالی 	یادگیری عمیق	شبکه عصبی کانولوشنال کوانتومی (Cong et al., 2019) (Chakrabarti et al., 2019) شبکه‌های عصبی پیش‌نگر کوانتومی (Allcock et al., 2020)	$O(\sqrt{N})$	آینده کوتاه‌مدت
<ul style="list-style-type: none"> • قیمت‌گذاری و پوشش ریسک مشتقات مالی • تخصیص بهینه مالی • الگوسازی تأثیر بازار • معاملات الگوریتمی 	یادگیری تقویتی	یادگیری تقویتی کوانتومی (Ramezanpour, 2017) (Albarrán-Arriagada et al., 2018)	$O(\sqrt{N})$	آینده کوتاه‌مدت

تحلیل شد و اینکه چگونه با افزایش دقت و سرعت نسبت به روش‌های کلاسیک الگوریتم‌های محاسباتی را بهبود می‌بخشند. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که یادگیری ماشین کوانتومی با دو معیار سرعت و دقت کاربرد گسترده‌ای در روش‌های پرکاربرد الگوسازی تحلیل مالی شامل روش‌های رگرسیون و خوشه‌بندی دارد که به تحلیل طیف گسترده‌ای از مسائل قادرند، از جمله بهینه‌یابی‌ها، قیمت‌گذاری دارایی‌ها، تحلیل سبد سهام، معاملات الگوریتمی، پیش‌بینی‌های نرخ تورم و محاسبات حوزه ریسک‌سنجی. بنابراین ضروری است که سیاست‌گذاران و متخصصان حوزه علوم مالی با توجه به مزایای به‌کارگیری

مؤلفه اصلی و تعیین روندهای هم‌حرکتی میان داده‌های بزرگ و (۴) شبکه‌های عصبی با تمرکز بر شناسایی و تعیین الگوهای رفتاری براساس شهود ذاتی داده‌ها تحلیل و بحث شد. همچنین بر این نکته تأکید شد که هنوز تا تحقق عملیاتی برخوردار از محاسبات کوانتومی در علوم مالی فاصله بسیاری وجود دارد و مستلزم پیشرفت‌های فراوانی است تا به پردازنده‌ای کوانتومی برای اجرای الگوریتم‌های محاسبات کوانتومی دست پیدا کرد. در نهایت نیز کاربردهای مهم محاسبات کوانتومی در اقتصاد مالی بررسی شد. همچنین تأثیر فناوری‌های کوانتومی در بهینه‌یابی‌های اقتصادی و مالی و مباحث مربوط به قیمت‌گذاری و ریسک‌سنجی

- Wu, X. (2019). "Quantum Wasserstein Generative Adversarial Networks". *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 6781–6792.
- Charpentier, A., Romuald, E., and Remlinger, C. (2021). "Reinforcement Learning In Economics And Finance". *Computational Economics*, pp. 1-38.
- Chatterjee, R., and Yu, T. (2017). "Generalized Coherent States, Reproducing Kernels, And Quantum Support Vector Machines". *Quantum Information and Computation*, 17, pp 1292–1306
- Chen, L., Pelger, M., and Zhu, J. (2019). *Deep learning in asset pricing*. SSRN, Report No. 3350138.
- Chong, F. T., Franklin, D., and Martonosi, M. (2017). "Programming Languages And Compiler Design For Realistic Quantum Hardware". *Nature*, 549, pp. 180-187.
- Cong, I., Choi, S., and Lukin, M. (2019). "Quantum Convolutional Neural Networks". *Nature Physics*, 15(12), pp. 1273–1278.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms*. MIT press.
- Culkin, R., and Das, S. R. (2017). "Machine Learning In Finance: The Case Of Deep Learning For Option Pricing". *Journal of Investment Management*, 15(4), pp. 92-100.
- Ding, Y., Gonzalez-Conde, J., Lamata, L., et al. (2019). "Towards Prediction of Financial Crashes with a D-Wave Quantum Computer". Working paper, URL: <https://arxiv.org/pdf/1904.05808.pdf>.
- Dixon, M. F., Halperin, I., and Bilokon, P. (2020). *Machine Learning in Finance*. Springer International Publishing.
- Fanizza, M., Rosati, M., Skotiniotis, M., Calsamiglia, J., and Giovannetti, V. (2020). "Beyond the swap test: optimal estimation of quantum state overlap". *Physical review letters*, pp. 124(6).
- Gilyén, A., Su, Y., Low, G., and Wiebe, N. (2018). "Quantum Singular Value Transformation And Beyond: Exponential Improvements For Quantum Matrix Arithmetics". *In Proceedings of the 51st Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing*.
- ماشین‌های کوانتومی برنامه‌ریزی‌های لازم برای تأمین مالی طرح‌های گذار به نسل رایانه‌های کوانتومی را پیگیری کنند. براساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود که با توجه به کاربرد فراوانی که محاسبات کوانتومی در فناوری بلاکچین، رمزارزها و مباحث مرتبط با امنیت و مدیریت دارند بهینه‌سازی معاملات مالی با به‌کارگیری شبیه‌سازی‌های کوانتومی، عملیاتی‌کردن روش‌های یادگیری ماشین‌های کوانتومی در علوم مالی به‌صورت یک ضرورت مورد توجه قرار گیرد. همچنین با توجه به مهم‌ترین ویژگی و نقطه‌مشتک مسائل در اقتصاد مالی که ماهیت قطعیت‌نداشتن در پیش‌بینی رفتار آینده متغیرها، ارزش‌گذاری دارایی‌ها و بازده آن‌ها است، یکی از روش‌های کاهش ریسک تجزیه و تحلیل رفتار دارایی به‌صورت پیوسته و مبتنی بر اطلاعات لحظه‌ای بازار است که استفاده از ماشین‌های یادگیری کوانتومی با کارایی فنی و تخصصی می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی معاملات و کاهش ریسک داشته باشد.

منابع

- Albarrán-Arriagada, F., Retamal, J. C., Solano, E., and Lamata, L. (2018). "Measurement-Based Adaptation Protocol With Quantum Reinforcement Learning". *Physical Review A*, 98(4), pp. 042315.
- Alcazar, J., Leyton-Ortega, V., and Perdomo-Ortiz, A. (2020). "Classical Versus Quantum Models In Machine Learning: Insights From A Finance Application". *Machine Learning: Science and Technology*, 1(3).
- Allcock, J., Hsieh, C. Y., Kerenidis, I., and Zhang, S. (2020). "Quantum Algorithms For Feedforward Neural Networks". *ACM Transactions on Quantum Computing*, 1(1), pp. 1–24.
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. (2019). "Quantum Supremacy Using A Programmable Superconducting Processor". *Nature*, pp. 505-510.
- Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N. et al. (2017). "Quantum Machine Learning". *Nature*, 549, pp. 195-202.
- Blackstad, R. B., and Ospelkaus, C. (2009). "High Fidelity Transport Of Trapped-Ion Qubits Through An X-Junction Trap Array". *Quantum Information and Computation*, 9, pp. 920-949.
- Carrasquilla, J. (2020). "Machine Learning For Quantum Matter". *Advances in Physics X*, 5(1).
- Chakrabarti, S., Yiming, H., Li, T., Feizi, S., and

- Haener, T, Soeken, M., Roetteler, M. and Svore, K. M. (2018). "Quantum Circuits For Floating-Point Arithmetic". *International Conference on Reversible Computation*. Springer, Cham.
- Harrow, A. W., Hassidim, A., and Lloyd, S. (2009). "Quantum Algorithm For Linear Systems Of Equations". *Physical review letters*, 103(15), pp. 150502.
- Home, J. P., Hanneke, D., and Jost, J. (2009). "Complete Methods Set For Scalable Ion Trap Quantum Information Processing". *Science*, 325.
- Houshmand, M., Houshmand, M., and Fitzsimons, J. (2018). "Minimal Qubit Resources For The Realization Of Measurement-Based Quantum Computation". *Physical Review A*, 98(1).
- Hu, F., Wang, B., Wang, N., and Wang C. (2019). "Quantum Machine Learning With D-Wave Quantum Computer". *Quantum Engineering*, 1(2), pp. 12.
- Hull, I., Sattath, O., Diamanti, E., and Wendin, G. (2021). "Quantum Technology for Economists". Papers 2012. 04473, arXiv. org.
- Iordanis, K., and Landman, J. (2021). "Quantum Spectral Clustering". *Physical Review A*, 103(4).
- Itay, E., and Spedalieri, F. M. (2016). "Quantum Annealing For Constrained Optimization". *Physical Review Applied*, 5(3).
- Kerenidis, I. (2020). *A method for loading classical data into quantum states for applications in machine learning and optimization*. U. S. Patent Application No. 16/986,553 and 16/987,235.
- Kerenidis, I., Landman, J., and Prakash, A. (2020). "Quantum Algorithms For Deep Convolutional Neural Networks". *Proceedings of International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Kerenidis, I., Landman, J., Luongo, N., and Prakash, A. (2018). "q-means: A Quantum Algorithm For Unsupervised Machine Learning". *arXiv preprint arXiv, 1812. 03584*.
- Kerenidis, I., and Prakash, A. (2017). "Quantum Recommendation Systems". *Proceedings of the 8th Innovations in Theoretical Computer Science Conference*.
- Kerenidis, I., and Prakash, A. (2020). "Quantum Gradient Descent For Linear Systems And Least Squares". *Physical Review A*, 101(2).
- Kerenidis, I., Luongo, A., and Prakash, A. (2020). "Quantum Expectation-Maximization For Gaussian Mixture Models". *Proceedings of International Conference on Machine Learning (ICML)*.
- Kolm, P. N., and Ritter, G. (2020). "Modern Perspectives On Reinforcement Learning In Finance". *The Journal of Machine Learning in Finance*, 1(1).
- Kwangwon, A., Choi, M., Dai, B., Sohn, S., and Yang, B. (2018). "Modeling Stock Return Distributions With A Quantum Harmonic Oscillator". *EPL (Europhysics Letters)*, 120(3).
- Lessmann, S., Baesens, B., Seow, H. V., Thomas, L. C. (2015). "Benchmarking State-Of-The-Art Classification Algorithms For Credit Scoring: An Update Of Research". *European Journal of Operational Research*, 247(1).
- Lloyd, S., Mohseni, M., and Rebentrost, P. (2014). "Quantum Principal Component Analysis". *Nature Physics*, 10(9), p. 631.
- Lpaydin, E. (2020). *Introduction to machine learning*. MIT press.
- Marinescu, D. C., and Marinescu, G. M. (2004). *Approaching quantum computing*. Prentice Hall.
- Martin, A, Candelas, B., Rodríguez-Rozas, A., et al. (2021). "Toward Pricing Financial Derivatives With An Ibm Quantum Computer". *Physical Review Research*, 3(1).
- Meter, R. V., and Oskin, M. (2006). "Architectural Implications Of Quantum Computing Technologies". *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, 2, pp. 31-63.
- Mosteanu, N. R., and Faccia, A. (2021). "Fintech Frontiers in Quantum Computing, Fractals, and Blockchain Distributed Ledger: Paradigm Shifts and Open Innovation". *JOItmC, MDPI*, 7(1), pp. 1-19.
- Mousavi, M., Houshmand, M., and Bolokian, M. (2021). "The Cost Reduction Of Distributed Quantum Factorization Circuits". *International*

- Journal of Theoretical Physics*, 60(4), pp. 1292-1298.
- Nielsen, M. A., and Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Orús, R., Mugel, S., and Lizaso, E. (2019). “Quantum Computing For Finance: Overview And Prospects”. *Reviews in Physics*, 4.
- Ramezanpour, A. (2017). “Optimization By A Quantum Reinforcement Algorithm”. *Physical Review A*, 96(5).
- Rebentrost, P., Mohseni, M., and Lloyd, S. (2014). “Quantum Support Vector Machine For Big Data Classification”. *Physical Review Letters*, 113(1).
- Sergio, F., Fabozzi, F. J., and Mazza, D. (2020). “Quantum Option Pricing And Quantum Finance”. *The Journal of Derivatives*, 28(1), pp. 79-98.
- Spiller, T. P., Munro, W., Barrett, S., and Kok, P. (2005). “An Introduction To Quantum Information Processing: Applications And Realizations”. *Contemporary Physics*, 46, pp. 407-436.
- Stamatopoulos, N., Egger, D. J., Sun, Y., Zoufal, C., Iten, R., Shen, N., and Woerner, S. (2020). “Option Pricing Using Quantum Computers”. *Quantum*, 4, p. 291. doi: <https://doi.org/10.22331/q-2020-07-06-291>
- Von Luxburg, U. (2007). “A Tutorial On Spectral Clustering”. *Statistics and computing*, 17(4), pp. 395-416.
- Li, X., Liu, X., Xu, N., and Du, J. (2015). “Experimental Realization Of A Quantum Support Vector Machine”. *Physical Review Letters*, 114.
- Zhang, Y., and Ni, Q. (2020). “Recent Advances In Quantum Machine Learning”. *Quantum Engineering*, 2(1), p. 34.



Application of Quantum Machine Learning Algorithms in Financial Sciences

Mohammad Mahdi Lotfi Heravi¹

Monireh Houshmand²

Marzieh Asaadi³

Abstract

Machine learning is a set of algorithms that make it possible for a computer to learn the statistical and behavioral patterns in data without explicit programming. These algorithms have wide applications in all fields, especially financial sciences, which require high computational power and accuracy, including financial market modeling, portfolio management, risk assessment, etc. But because most of these methods require large amounts of data, performing these calculations on classical computers requires a large amount of computational time and resources that may not be technically and allocatively efficient in practice. In contrast, quantum computers, due to their parallel processing power, can solve problems much faster than their classical counterpart algorithms, which will increase the quantum speed of machine learning algorithms. This article examines the application of quantum computing in solving financial science problems and compares it with existing classical methods. The applied research methodology is a documentary and library study in which the paper raises important computational issues in financial economics and then introduces quantum optimization algorithms to solve problems. Specifically, the present study has tried to identify those computational problems in the field of financial sciences that the use of quantum machine learning method is superior to the best classical corresponding algorithms. The feasibility of physical realization of these methods in the short term has also been investigated. The results of this study show how quantum computing methods can increase the speed and accuracy of financial economics analysis and forecasting and is a better alternative to classical methods, especially in portfolio management and risk analysis.

Keywords: Machine Learning, Financial Sciences, Quantum Computing, Deep Learning, Reinforcement Learning

JEL Classification: C40, C60, G00

1. Assistant Professor of Economics, Department of Management, Science and Technology, Amirkabir University of Technology (corresponding author); mahdi.lotfi@aut.ac.ir

2. Associated Professor, Department of Electrical Engineering, Imam Reza International University; m.houshmand@imamreza.ac.ir

3. Assistant Professor of Economics, Department of Management and Economics, Faculty of Humanities and Social Sciences, Golestan University; m.asaadi@gu.ac.ir

نقش نامه و فرم تعارض منافع

الف) نقش نامه

پدیدآورندگان	محمد مهدی لطفی هروی	منیره هوشمند	مرضیه اسعدی
نقش	نویسنده مسئول	نویسنده	نویسنده
نگارش متن	نگارش متن اصلی و بازنگری بر اساس نظرات داوران	نگارش متن اصلی و بازنگری بر اساس نظرات داوران	نگارش متن اصلی و بازنگری بر اساس نظرات داوران
ویرایش متن و ...	ویرایش	ویرایش	ویرایش
طراحی / مفهوم پردازی	طراحی و مفهوم پردازی	طراحی و مفهوم پردازی	طراحی و مفهوم پردازی
گردآوری داده	—	—	—
تحلیل / تفسیر داده	—	—	—
سایر نقش ها	—	—	—

ب) اعلام تعارض منافع

یا غیررسمی، اشتغال، مالکیت سهام، و دریافت حق اختراع، و البته محدود به این موارد نیست. منظور از رابطه و انتفاع غیرمالی عبارت است از روابط شخصی، خانوادگی یا حرفه‌ای، اندیشه‌ای یا باورمندان، و غیره.

چنانچه هر یک از نویسندگان تعارض منافع داشته باشد (و یا نداشته باشد) در فرم زیر تصریح و اعلام خواهد کرد:

مثال: نویسنده الف هیچ‌گونه تعارض منافع ندارد. نویسنده ب از شرکت فلان که موضوع تحقیق بوده است گرت دریافت کرده است. نویسندگان ج و د در سازمان فلان که موضوع تحقیق بوده است سخنرانی افتخاری داشته‌اند و در شرکت فلان که موضوع تحقیق بوده است سهامدارند.

در جریان انتشار مقالات علمی تعارض منافع به این معنی است که نویسنده یا نویسندگان، داوران و یا حتی سردبیران مجلات دارای ارتباطات شخصی و یا اقتصادی می‌باشند که ممکن است به طور ناعادلانه‌ای بر تصمیم‌گیری آن‌ها در چاپ یک مقاله تأثیرگذار باشد. تعارض منافع به خودی خود مشکلی ندارد بلکه عدم اظهار آن است که مسئله‌ساز می‌شود.

بدین وسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که رابطه مالی یا غیرمالی با سازمان، نهاد یا اشخاصی که موضوع یا مفاد این تحقیق هستند ندارند، اعم از رابطه و انتساب رسمی یا غیررسمی. منظور از رابطه و انتفاع مالی از جمله عبارت است از دریافت پژوهانه، گرت آموزشی، ایراد سخنرانی، عضویت سازمانی، افتخاری

اظهار (عدم) تعارض منافع: با سلام و احترام؛ به استحضار می‌رساند نویسندگان مقاله هیچ‌گونه تعارض منافع ندارد.

نویسنده مسئول: محمد مهدی لطفی هروی

تاریخ: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵