

استراتژی بهینه اجرای معاملات بزرگ با رویکرد شبیه‌سازی عامل‌گرا

محمدعلی رستگار^۱، خاطره ساعدی‌فر^۲

چکیده: سرمایه‌گذارانی که خواهان اجرای سفارش‌های بزرگ هستند، همواره با موازنه اثر قیمتی و هزینه فرصت (ریسک اجرای معامله) مواجه‌اند. هدف از این پژوهش، یافتن روش بهینه‌ای برای اجرای چنین سفارش‌هاست. این پژوهش با استفاده از داده‌های تاریخی سهام در بورس اوراق بهادار تهران، ابتدا احتمال انواع سفارش‌گذاری‌ها شامل سفارش بازار، سفارش در شکاف قیمتی و سفارش محدود را برای سمت خرید و سمت فروش به‌طور جداگانه محاسبه کرده، سپس استراتژی بهینه معاملاتی را بر اساس معیار قیمت میانگین موزون حجمی (VWAP) بررسی می‌کند. در بازار معاملاتی شبیه‌سازی‌شده، اثر قیمتی برای سفارش‌های بزرگ نیز در نظر گرفته شده است. روش شبیه‌سازی، روش عامل‌گرا است و برای آموزش عامل، از روش یادگیری کمو که یکی از روش‌های یادگیری تقویتی است، استفاده کردیم. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد برای هر سفارش بزرگ خرید، استراتژی با استفاده از انواع سفارش می‌تواند بهتر از استراتژی‌هایی با استفاده از تنها یک نوع سفارش باشد. استراتژی بهینه توانسته است به‌طور متوسط قیمت میانگین موزون حجمی (هزینه‌های اجرای معاملات) را $0/137$ درصد نسبت به بازار کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: اثر قیمتی، استراتژی اجرای معاملات، شبیه‌سازی عامل‌گرا، معاملات الگوریتمی، هزینه اجرای معاملات.

۱. استادیار گروه مهندسی مالی، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد مهندسی مالی، دانشکده علوم مالی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸

نویسنده مسئول مقاله: محمدعلی رستگار

E-mail: ma_rastegar@modares.ac.ir

مقدمه

اجرای معامله با سازوکارهای خرید یا فروش حجم مشخصی از یک سهم (یا دارایی مالی دیگر) در ارتباط است. سرمایه‌گذارانی که قصد دارند حجم بزرگی از سهام را معامله کنند، باید بین اثر قیمتی و هزینه فرصت موازنه برقرار کنند. ثبت سفارش‌های بزرگ می‌تواند به شدت بر نوسان‌ها و تغییرهای ناگهانی قیمت اثرگذار باشد. از این رو، استراتژی‌های اجرای معاملات^۱ برای برقراری تعادل بین این هزینه‌ها و در نتیجه به حداقل رساندن هزینه کل معاملات، طراحی شده‌اند. در واقع موضوع عملی که برای سرمایه‌گذاران، نهادهای ناظر بازار، قانون‌گذاران و بازارگردانان مطرح می‌شود، این است که چگونه می‌توانند مقدار زیادی از یک سهم را به صورت بهینه خرید و فروش کنند، به طوری که اثر قیمتی سفارش را به حداقل برسانند. یک استراتژی بدیهی برای به حداقل رساندن اثر قیمتی، شکستن سفارش به چند سفارش کوچک‌تر و اجرای سفارش‌گذاری، چندین مرحله دارد. در حالیکه انتظار می‌رود این کار اثر قیمتی سفارش را کاهش دهد، ریسک هزینه فرصت را به وجود می‌آورد و قیمت بازار در طول خریدهای متعدد افزایش می‌یابد. این مسئله‌ای است که به آن دوراهی معامله‌گر^۲ (کیسل و گلنتز، ۲۰۰۳) گفته می‌شود. به علاوه، جریان ثابت از سفارش‌های کوچک در طول زمان ممکن است سایر اعضای بازار را از وجود یک سفارش بزرگ آگاه کرده و آنها را به پیشی‌گرفتن از سرمایه‌گذار تشویق کند. از این رو، طراحی استراتژی اجرای معاملات، بر جلوگیری از نشت اطلاعات نیز کنترل شدید دارد. در انتخاب استراتژی اجرای معامله، سرمایه‌گذار نه تنها باید ترجیحات خود را تعدیل کند، بلکه باید برای انطباق و تغییر استراتژی در راستای تغییر وضعیت بازار با هدف انتخاب بهترین تاکتیک معامله در وضعیت حاضر بازار، آماده باشد.

استراتژی اجرای معامله، دستورالعمل‌های از پیش تعیین شده‌ای است که شامل بهترین حالت شکستن یک سفارش بزرگ و سازوکار واقعی برای مدیریت سفارش‌ها می‌شود. پیچیدگی طراحی یک استراتژی بهینه، به دلیل لزوم تصمیم‌گیری‌های متعددی همچون «بهترین روش برای تقسیم کردن سفارش بزرگ»^۳، «انتخاب سبک اجرای هر یک از عناصر سفارش (تهاجمی یا انفعالی)»^۴، «اندازه‌گیری کارایی انجام معامله»^۵ و «انتخاب نوع سفارش»^۶ است که در گذشته کارشناسان قادر به انجام آن بودند، اما امروزه با افزایش تعداد تصمیم‌گیری‌ها، به رویکرد

-
1. Execution Strategy
 2. Trader's Dilemma
 3. Best strategy to split up the large order
 4. Adoption in executing each element of the order (aggressive or passive)
 5. Measuring execution performance
 6. Selection type of order

خودکاری نیاز است که ضمن پویا بودن، بتواند پاسخگوی وضعیت بازار در زمان واقعی باشد. از آنجا که متغیرهای زیادی می‌توانند بر این استراتژی اثرگذار باشند، استراتژی‌های معاملاتی مختلفی به وجود می‌آید که مقایسه اثربخشی و کارایی آنها به سرمایه‌گذاران در انتخاب استراتژی بهتر کمک می‌کند (کویی و برابرزون، ۲۰۱۲).

با گسترش بازارهای مالی و به‌ویژه بازارهای مالی الکترونیکی، تعداد معامله و حجم سفارش‌ها نیز افزایش یافته‌اند. معاملات الگوریتمی در حال پیشرفت است و بی‌شک برخی از الگوریتم‌های موجود در ده سال اخیر، ساده به نظر می‌رسند (جانسون، ۲۰۱۰). تحقیقات مرتبط با معاملات الگوریتمی طی سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته، اما مطالعه در زمینه استراتژی‌هایی که شیوه اجرای معامله را بررسی کند، کمتر به چشم می‌خورد. این مقاله جزء معدود پژوهش‌هایی است که نوع سفارش‌های ثبت‌شده برای اجرای معامله با کمترین هزینه را در بازار بورس و اوراق بهادار تهران بررسی می‌کند و در نهایت با استفاده از ترکیب سفارش‌ها، به استراتژی با عملکرد بهتر دست می‌یابد.

با توجه به تمایز ویژگی‌های اقتصادی - مالی در بازار ایران، ممکن است نتایج این پژوهش در مقایسه با پژوهش‌هایی که در سایر کشورها انجام گرفته، متفاوت باشد؛ چراکه در حال حاضر بازار مالی ایران با سایر کشورهای پیشرفته، تفاوت‌های اساسی دارد. بنابراین، تنها در صورتی می‌توانیم به بهترین عملکرد دست یابیم که الگوریتم خوبی برای هر منطقه یا بازار تنظیم کنیم.

لازم است در اینجا به قوانین موجود در بازار ایران درخصوص انجام معاملات بزرگ و افتراق و محدودیت‌های حجمی این نوع معاملات اشاره کنیم. معاملات در بازار با توجه به حجم آنها به معاملات عادی، بلوک و عمده دسته‌بندی می‌شوند. در معاملات بلوک، تعداد سهام بزرگ‌تر از پنجاه برابر محدودیت هر سفارش در بازار عادی (یا بیشتر از ۲۰ میلیارد ریال) است و در معاملات عمده، بسته به تعداد سهام پایه شرکت، تعداد سهام قابل معامله حداقل ۱ درصد سهام پایه است. قیمت سهام این نوع معاملات، عموماً از معاملات عادی بیشتر است و سازوکار انجام معامله و تسویه نیز تفاوت‌هایی با معاملات عادی دارد و در بازار مجزا انجام می‌شود. اما آنچه در این پژوهش به آن می‌پردازیم انتخاب استراتژی انجام معاملات با حداکثر حجم مجاز در بازار عادی است که سایر فعالان بازار در آن حضور دارند. از این رو، حداکثر حجم معاملات بزرگ برای معاملات ما کمتر از حجم معاملات بلوک است.

در این مقاله به شبیه‌سازی بازار معاملات سهام می‌پردازیم و از شبیه‌سازی بازار مصنوعی عامل‌گرا برای ارزیابی استراتژی‌های معاملاتی استفاده می‌کنیم که در آن اثر قیمتی برای سفارش‌ها بزرگ در نظر گرفته شده است. از آنجا که ارزیابی تأثیر استراتژی اجرای معامله در طراحی دنیای واقعی بسیار دشوار است و نمی‌توان آن را به راحتی با داده‌های تاریخی آزمایش کرد،

در این تحقیق نوعی محیط بازار سهام مصنوعی ایجاد شده است که اجازه آزمون استراتژی‌های جدید را بیش از چند بار می‌دهد و این امکان، مشکل استفاده از اطلاعات سفارش تاریخی برای تخمین آینده هر استراتژی اجرای معامله خاص را رفع می‌کند. پس از شبیه‌سازی بازار، استراتژی‌های مختلف در بازار آزمایش می‌شوند و استراتژی بهینه اجرای معاملات که با روش یادگیری تقویتی آموزش دیده است، برای کاهش هزینه‌ها در بازار بورس و اوراق بهادار تهران ارائه می‌شود.

در ادامه به بیان پیشینه و روش‌شناسی پژوهش می‌پردازیم و پس از آن یافته‌های پژوهش برای استراتژی‌های طراحی شده ارائه می‌شود. انتهای مطالب نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

پیشینه پژوهش

در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی، تمایل به کنترل هزینه معاملات شدت گرفت و پس از آن مطالعات فراوانی روی مسئله بهینه‌سازی هزینه اجرای معاملات با در نظر گرفتن محدودیت‌های دیگری همچون اثر قیمتی، ریسک بازار، ریسک نقدشوندگی و... انجام شد. با توجه به پویا بودن محیط بازار سرمایه و نیز، رواج روش‌های ریاضی پویا، موج جدیدی از تحقیقات علمی در این زمینه به وجود آمد. ادبیات استراتژی اجرای معاملات را می‌توان از دو دیدگاه استراتژی معاملات بهینه و استراتژی ثبت سفارش بررسی کرد که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

استراتژی معاملات بهینه

استراتژی معاملات بهینه روی این موضوع تمرکز دارد که چگونه می‌توان یک سفارش بزرگ را به سفارش‌های کوچک به گونه‌ای شکست که هزینه اثرات قیمتی کم شود. برتسیماس و لو (۱۹۹۸) برای نخستین بار استراتژی پویا و بهینه معاملات را با در نظر گرفتن اثر قیمتی طراحی کردند که هزینه اجرایی مورد انتظار یک بلوک بزرگ سهام را در افق زمانی ثابت و متناهی کمینه می‌کرد. برخی این مدل را برای سبدهای بزرگ سهام (مودنی، کولمن و لی، ۲۰۱۰) و برخی برای بازار فارکس (اشمیت، ۲۰۱۰) استفاده کردند. علاوه بر این، آلمگرن و کریس (۲۰۰۱) نشان دادند که استراتژی بهینه پس از افزایش نوسان‌ها، تهاجمی‌تر شده و پس از کاهش آنها انفعالی می‌شود. همچنین نتیجه پژوهش آلفونسو، فروث و شید (۲۰۱۰) نشان داد برای یک استراتژی بهینه خرید، تمام خریده‌ها به جز مورد اول و آخر، اثر قیمتی سفارش یکسان است. علاوه بر این، اندازه خریده‌های میانی طوری انتخاب شد که اثر قیمتی هر خرید، قبل از سفارش‌گذاری بعدی کاملاً حذف شود. برای حذف دستکاری قیمت نیز، پردیو، شایخت و شرو

(۲۰۱۱) ضمن در نظر گرفتن اثر حجمی، مدل خود را به استراتژی‌های «فقط - خرید» یا «فقط - فروش» محدود کردند. فرسیت (۲۰۱۱) مسئله اجرای معاملات بهینه را با رویکرد موازنه میانگین واریانس^۱ فرموله کرد و از روش هامیلتون جاکوبی بلمن بهره برد. قوت این روش وابسته نبودن آن به نوع تابع اثر قیمتی است. نتایج عددی نشان می‌دهد در مواردی، استراتژی‌های معاملاتی بسیاری وجود دارند که مرزهای کارای کمابیش یکسانی تولید می‌کنند. اولین مدل عرضه و تقاضای پویا در یک بازار با دفتر سفارش‌های محدود توسط ایژیوا و وانگ (۲۰۱۳) ارائه شد. ضعف مدل این فرض بود که اوراق بهادار به‌طور یکنواخت در سطوح مختلف دفتر سفارش توزیع شده‌اند. از سوی دیگر، لین، چن و پنا (۲۰۱۵) به حل مسئله اجرای معاملات با کنترل هزینه معاملات^۲ پرداختند و برای انجام معامله زمان مشخصی در نظر گرفتند. آنان قیمت دارایی را با گام تصادفی گسسته و در نظر گرفتن اثر قیمتی مدل کردند. نتایج نشان داد استراتژی معامله بهینه که ریسک پویای هزینه معاملاتی را کمینه می‌کند، قطعی بوده و با زمان سازگار است. مبنای مدل آنها بر اساس مدل آلمگرن و کریس (۲۰۰۱) بود. این مدل ریسک نوسان‌ها و هزینه معاملات ناشی از اثرات قیمتی بازار را کمینه می‌کند. کارتیا و جایمونگال (۲۰۱۶) دو استراتژی اجرای معاملات بهینه را به شکل صریح و روشن با هدف قیمت میانگین موزون حجمی ارائه کردند. آنان این کار را تحت مفروضات بسیار کلی در مورد فرایند تصادفی و حجم معامله در بازار انجام دادند و برخلاف مطالعات قبلی، اثر قیمتی دائمی ناشی از جریان سفارش عامل و سایر معامله‌گران را در نظر گرفتند. پارامترهای مدل را با پنج سهم معامله‌شده در بازار بورس نزدک، کالیبره کردند و برای نشان دادن اینکه استراتژی با هدف قیمت میانگین موزون حجمی به‌طور متوسط بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۰ درصد بهتر از هدف عمل می‌کند، از شبیه‌سازی استفاده کردند. پژوهش‌هایی که در بازار بورس تهران انجام شده است، تأیید می‌کنند که حجم معامله رابطه مثبتی با اثر قیمتی دارد (احمدپور و نصیری، ۱۳۹۵). از این رو، با شکستن سفارش بزرگ به سفارش‌های کوچک و در نتیجه انجام معامله در حجم کمتر، می‌توان اثر قیمتی را کاهش داد.

استراتژی‌های ثبت سفارش

این استراتژی‌ها بررسی می‌کنند که چگونه نوع سفارش و میزان تهاجمی بودن سفارش^۳ را انتخاب کنیم. مطالعه ادماتی (۱۹۸۵) نشان داد سرمایه‌گذاران آگاه باید طبق استراتژی‌هایی معامله کنند که مانع پی‌بردن سایر اعضا از سفارش‌هایشان می‌شود. سفارش‌های بازار و سفارش‌های محدود را

1. Mean-Variance Tradeoff
2. Transaction Cost
3. Order Aggressiveness

می‌توان از لحاظ مقدار و قیمت به حالات تهاجمی و انفعالی گوناگونی دسته‌بندی کرد (بیایس، هیلین و اسپات، ۱۹۹۵). برای مثال سطح تهاجمی بودن سفارش محدود خرید، با افزایش قیمت محدود و اندازه سفارش افزایش می‌یابد. تعیین میزان تهاجمی بودن یک سفارش موضوع مهمی است که باید هر معامله‌گر زمانی که می‌خواهد سفارش‌گذاری کند، انجام دهد. این تصمیم به‌طور مستقیم بر کیفیت اجرای معامله و به‌طور غیرمستقیم بر بازده نهایی سرمایه‌گذاری تأثیر می‌گذارد. سفارش‌های بازار^۱ و سفارش‌های محدود^۲ هر دو مزایا و معایبی دارند. سفارش‌های بازار اجرای سفارش‌ها را تضمین می‌کند، اما در این خصوص هزینه بیشتری متحمل می‌شود. سفارش‌های محدود نسبت به سفارش‌های بازار زمینه بهبود قیمت را فراهم می‌کند، اما این نوع سفارش‌گذاری دو ریسک را نیز به‌دنبال دارد (هندا و شوارتز، ۱۹۹۶): ریسک اول، ریسک کژگزینی^۳ است (گلوستن و میلگرام، ۱۹۸۵) و از عدم تقارن اطلاعاتی نشئت می‌گیرد. ریسک دیگر، ریسک انجام‌نشدن معامله^۴ است و زمانی مطرح می‌شود که قیمت بازار از قیمت محدود دور می‌شود و به اجراشدن سفارش محدود می‌انجامد. نتیجه ریسک دوم این است که معامله‌گران سفارش محدود، باید هزینه فرصت را متقبل شوند؛ چراکه باید قیمت‌های نامطلوب‌تری را قبول کنند. چاکراواری، لاقلین، مور و نایاک (۲۰۰۱) تأثیر معاملات پنهان را روی قیمت بازار بررسی کردند و متوجه شدند که سفارش‌های با اندازه متوسط ممکن است همیشه به‌طور نامتناسبی به اثر قیمتی بزرگ منجر شوند. با تقسیم یک سفارش بزرگ یا متوسط به سفارش کوچک‌تر و اجرای آنها، سرمایه‌گذار قادر به کنترل میزان تهاجمی بودن سفارش خود و اثر قیمتی آن است.

در پژوهش‌های بعدی روش‌های ترکیبی برای بهینه‌سازی هزینه اجرای معاملات استفاده شدند که همزمان از استراتژی‌های معاملات بهینه و استراتژی‌های ثابت سفارش برای رسیدن به روش بهینه استفاده می‌کردند. برای مثال کویی و همکارانش (۲۰۱۱) با رویکرد جدید از ترکیب روش تکاملی با بازار سهام مصنوعی عامل‌گرا استفاده کردند.

استراتژی اجرای معاملات با هدف پیشینه‌کردن مطلوبیت مورد انتظار نمایی توسط هویتما (۲۰۱۴) ارائه شد. این استراتژی به‌صورت پویا هر دو نوع سفارش‌های بازار و محدود را اجرا می‌کند. وی نشان داد سفارش‌های محدود تأثیر شایان توجهی در استراتژی بهینه می‌گذارند و بین سرعت ثبت سفارش‌های بازار و احتمال انجام سفارش‌های محدود، رابطه معکوس وجود دارد. برای سفارش‌های محدود، زمانی که هر یک از شرایط زیر برقرار باشد، قیمت بهینه از قیمت

1. Market Orders
 2. Limit Orders
 3. Adverse Selection Risk
 4. Nonexecution Risk

بازار فاصله می‌گیرد: الف) اجرای معامله فوری نیست، ب) پرتفوی نسبتاً کوچک است، ج) عامل خیلی ریسک‌گریز نیست.

مسئله اجرای معاملات بهینه در معاملات الگوریتمی توسط گیو و زروس (۲۰۱۵) بررسی شد. در این مسئله برای معامله سرمایه‌گذار با تعداد سهام زیاد، مدت زمان مشخصی تعیین شده است؛ یعنی فعالیت سرمایه‌گذار روی قیمت سهم اثر می‌گذارد. آنها مدل قیمتی را با اثر لگاریتمی - خطی معاملات سرمایه‌گذار ترکیب کردند؛ سپس مسئله اجرای معاملات بهینه را به‌عنوان مسئله کنترل تصادفی منحصربه‌فرد فرمول‌نویسی مجدد نموده و با استفاده از تاکتیک‌های جبری و احتمالی، شرایط ساده‌ای را برای بازار به‌وجود آوردند که اجازه هیچ‌گونه آربیتراژ یا دستکاری قیمت را نداده و ویژگی‌های جزئی و دقیق از تابع ارزش و استراتژی بهینه را توسعه می‌دهد.

یادگیری تقویتی، نوعی تاکتیک یادگیری ماشین به‌منظور بهبود راه‌حل‌های تحلیلی موجود برای اجرای معامله بهینه با عناصری از ساختار بازار شناخته شده است. در همین رابطه، هندریک و ویلکوکس (۲۰۱۴) با توجه به حجم معامله و افق زمانی ثابت، مدلی را طراحی کردند. هدف محققان این بود که مسیر حجم^۱ داده‌شده‌ای ایجاد کنند که نسبت به شرایط مطلوب/نامطلوب در طول اجرای زمان واقعی پویا باشد و در نتیجه، هزینه‌های کلی اجرای معامله را بهبود دهد. ایشان مدل استاندارد آلمگرن - کریس با اثر قیمتی خطی را مدل پایه در نظر گرفتند. این مدل در میان نهادهای سمت فروش، مبنایی است که برای الگوریتم‌های معیار قیمت ورودی اجرای معاملات عمومیت دارد. با آموزش یک عامل یادگیری برای اصلاح مسیر حجم بر اساس شکاف و حجم پویای متداول بازار، مدل آنها بر اساس یک نمونه از سهام و اندازه معامله در بازار سهام آفریقای جنوبی، به‌طور متوسط قادر به بهبود کسورات اجرایی پس از معامله تا ۱۰/۳ درصد نسبت به مدل پایه بود.

کارتیا و جایمونگال (۲۰۱۵) یک استراتژی بهینه اجرای معاملات برای سرمایه‌گذاری طراحی کردند که با استفاده از سفارش‌های محدود و بازار، سفارش‌های بزرگ را اجرا می‌کرد. در این استراتژی، سرمایه‌گذار سیاست بهینه را با توجه به محدودیت‌های مختلف در حجم هر دو نوع سفارش و عمق سفارش‌های محدود ارسال شده، حل می‌کند. متوسط صرفه‌جویی هر سهم حدود یک تا دو و نیم برابر شکاف از قیمت آلمگرن - کریس بهتر عمل کرد. بهبود مدل آلمگرن - کریس به دلیل استراتژی‌هایی است که ترکیبی از بهینه سفارش‌های محدود را دربردارد و از شکاف و سفارش‌های بازار نفع می‌برد؛ این کار موجب حفظ برنامه موجودی سرمایه‌گذار در هدف می‌شود.

یکی دیگر از بررسی‌های ترکیبی اخیر، فرموله کردن سفارش‌گذاری به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی محدب است. کنت و کوکانوف (۲۰۱۷) به‌منظور ثبت سفارش در یک بازار، راه‌حل روشنی برای تقسیم بهینه بین سفارش‌های محدود و سفارش‌های بازار ارائه کردند و برای ثبت سفارش در چند بازار، یک الگوریتم تصادفی پیشنهاد دادند که خطامشی مسیریابی بهینه را محاسبه کرده و حساسیت راه‌حل را به پارامترهای مختلف بررسی می‌کند.

به تازگی مدل‌های برنامه‌ریزی پویای چند مرحله‌ای برای سفارش‌گذاری بهینه شامل سفارش‌های محدود و پنهان ارائه شده است (چن، لی و گوا، ۲۰۱۷). نتیجه به‌دست آمده در الگوی اجرای بهینه نشان می‌دهد معامله‌گر باید سفارش‌های پنهان را در مراحل اولیه ارائه دهد، سپس ترکیبی از سفارش‌های محدود و پنهان را در نظر گرفته و تنها در زمان‌های پایانی، از سفارش‌های محدود استفاده کند. آگلباردی و گنچای (۲۰۱۷) نیز مدل واقع‌گرایانه‌ای را برای اجرای بهینه سفارش‌های محدود پیشنهاد کردند که شامل انتخاب مظنه و حجم سفارش‌های محدود بود و به تأییراتی که استراتژی بر ویژگی‌های دفتر سفارش، نوسان‌های بازار و ریسک معامله‌گران می‌گذارد، توجه کردند. مدل آنها تنها روی سفارش‌های محدود تمرکز دارد و در عین حال، دستورالعمل‌هایی را برای سفارش‌گذاری بهینه پایین‌تر از بهترین قیمت یا سفارش‌گذاری مجدد با حالات تهاجمی‌تر ارائه می‌کند.

بررسی‌ها نشان داده است که در بازار بورس، سهامداران بنا به دلایلی از جمله در اختیار نداشتن اطلاعات صحیح و به‌موقع و ناتوانی در تحلیل درست اطلاعات در تصمیم‌گیری‌های خود، به جای توجه به اطلاعات داخلی و ارزش ذاتی سهم، به حجم معاملات به‌منزله عامل مهم و تأثیرگذار توجه می‌کنند (گل‌ارضی و ضیاچی، ۱۳۹۳). با توجه به این که حجم معاملات انجام شده با حجم سفارش‌های ثبت شده مرتبط است، فردی که قصد شکستن سفارش بزرگ را دارد ریسک هزینه فرصت بیشتری را تحمل می‌کند و از این رو، به استراتژی مناسبی برای شکستن سفارش‌ها نیاز دارد. این پژوهش روی یک سهم انجام شده و مدل پایه آن برگرفته از مدل برتسیماس و لو (۱۹۹۸) است که به کمک الگوریتم یادگیری سعی می‌کند با انتخاب بهترین نوع و اندازه سفارش (استراتژی ثبت سفارش) در هر مرحله به استراتژی بهینه اجرای معامله دست پیدا کند.

روش‌شناسی پژوهش

به‌طور کلی به‌دلیل کارکردهای بازار مالی، داده‌های مالی فراوان، دقیق و در دسترس‌اند. اطلاعات لازم برای این پژوهش، همان داده‌های تابلوی معاملاتی بورس است. هر سفارش واردشده به

بازار، در پایگاه داده سازمان بورس و اوراق بهادار ثبت می‌شود. با بررسی و مقایسه داده‌های استفاده شده در تحقیقات مشابه و با توجه به ماهیت پژوهش، بهتر است از سهام با نقدشوندگی بالا و میزان معامله زیاد استفاده شود. داده‌های موجود برای چند نمونه از سهام پر معامله در بازار بورس تهران، در بازه یک‌ساله (۱۳۹۳) بررسی می‌شود. در این مقاله از داده‌های سهام بانک صادرات ایران استفاده شده است. داده‌های مربوط به ۷۰ روز معاملاتی متوالی که در آن بازه زمانی، وضعیت نماد ثابت بوده است را در نظر می‌گیریم. داده‌های زمان پیش از گشایش (داده‌های قبل از ساعت ۰۹:۰۰:۰۰ صبح) و داده‌های بعد از ۱۲:۳۰:۰۰ را به حساب نمی‌آوریم. خلاصه اطلاعات آماری داده‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. خلاصه اطلاعات آماری داده‌های سهام بانک صادرات

میانگین قیمت	انحراف معیار قیمت	میانگین حجم معاملات روزانه	انحراف معیار حجم معاملات روزانه	متوسط تعداد معاملات روزانه	میانگین شکاف قیمتی
۸۷۹/۰۷	۹۵/۷۷	۱۹۳۳۴/۱۱	۸۳۴۸۰۳	۲۱۸۵	۲/۹۷

حال، تابلوی معاملاتی را برای سهم در نظر گرفته شده، شبیه‌سازی می‌کنیم. خریداران و فروشندگان عامل‌های مدل را تشکیل می‌دهند. داده‌های واقعی موجود برای تنظیم پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی و در نتیجه رفتار عوامل، استفاده می‌شوند. اثر قیمتی در نظر گرفته شده و واکنش عوامل نسبت به آن نیز تعیین شده و از این طریق یک روز از معاملات به‌طور آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شود. بازار شبیه‌سازی شده یک بازار سفارش محدود است. سازوکار معاملات از اولویت قیمتی / زمانی^۱ پیروی می‌کند. معامله‌گران می‌توانند سفارش خود را در هر زمانی طی ساعات معامله ثبت کرده یا سفارش‌های قبلی خود را که انجام نشده است، لغو کنند. در این مدل دو دسته عامل وجود دارد. تمام سفارش‌های محدود و سفارش‌های بازار خرید (فروش) توسط عامل خرید (فروش) ثبت می‌شود. تصور می‌کنیم که هر زمان فرضی در بازار مصنوعی به یک ثانیه در بازار واقعی مربوط است. در بازار مصنوعی، هر عامل خرید یا فروش با احتمال ۰/۵ انتخاب می‌شود. عامل انتخاب شده در هر زمان می‌تواند یکی از گزینه‌های زیر را انتخاب کند تا به هدف سرمایه‌گذاری خود دست یابد:

- با احتمال λ_0 هیچ اقدامی انجام ندهد.
- با احتمال λ_m سفارش بازار را ثبت کند.

۱. یعنی سفارش با قیمت جذاب‌تر (قیمت جذاب‌تر برای فروش مظنه پایین‌تر و برای خرید مظنه بالاتر است) در اولویت قرار دارد و اگر قیمت‌ها برابر بود، بر اساس زمان ثبت سفارش هر سفارشی که زودتر بود، در اولویت است.

- با احتمال λl یک سفارش محدود را ثبت کند.
 - با احتمال λc یک سفارش محدود تسویه نشده که قبلاً ثبت شده را لغو کند.
- مجموع این احتمالات برابر با یک است.
- بدون اینکه از عمومیت موضوع کاسته شود، فرض می‌کنیم که عامل، همیشه قدیمی‌ترین سفارش محدودی که در گذشته ثبت کرده را لغو می‌کند.
- اگر عامل بخواهد سفارش محدود ثبت کند، می‌تواند یکی از چهار نوع سفارش زیر را انتخاب کند:
- سفارش محدود crossing: قیمت سفارش برابر با بهترین قیمت در طرف دیگر تابلوی معاملات باشد.
 - سفارش محدود inside spread: سفارش در قیمتی که در شکاف قیمتی است، گذاشته شود.
 - سفارش محدود spread: سفارش در بهترین قیمت همان طرف گذاشته شود.
 - سفارش محدود offspread: سفارش با قیمتی که از بهترین قیمت ثبت شده در تابلوی معاملات جذابیت کمتری دارد، گذاشته شود.
- جمع احتمال این رخدادها نیز باید برابر با ۱ باشد، یعنی داریم:

$$\lambda inspr + \lambda spr + \lambda offspr + \lambda crs = 1 \quad (\text{رابطه ۱})$$

اگر اندازه سفارش محدود crossing خرید (فروش) بیشتر از عمق بهترین عرضه (تقاضا) باشد، حجمی از سفارش خرید (فروش) که انجام نمی‌شود، در تابلوی معاملاتی در بهترین مظنه عرضه (تقاضا) قرار می‌گیرد.

اندازه هر یک از سفارش‌ها بر اساس یک تابع توزیع با پارامترهای مشخص تولید می‌شود. اندازه یک سفارش بازار از طریق توزیع لگاریتمی نرمال با پارامترهای μmo و σmo تولید می‌شود. سفارش‌های محدود inside spread به‌طور یکنواخت بین بهترین مظنه خرید و بهترین مظنه فروش قرار می‌گیرند؛ اندازه سفارش آنها براساس توزیع لگاریتمی نرمال با پارامترهای $\mu inspr$ و $\sigma inspr$ تولید می‌شود.

اندازه یک سفارش محدود spread که در بهترین قیمت پیشنهادی است، از طریق توزیع لگاریتمی نرمال با پارامترهای μspr و σspr تولید می‌شود (کویی و همکاران، ۲۰۱۲).

برای سفارش محدود off spread اندازه سفارش‌های متفاوت برای مدل مجاز است که بر اساس توزیع توانی تولید می‌شود. قیمت سفارش محدود off spread نیز به اندازه یک مقدار

تصادفی کمتر (برای سفارش خرید) یا بیشتر (برای سفارش فروش) از بهترین سفارش موجود در تابلوی معاملات است.

اکنون به بیان چگونگی محاسبه پارامترهایی که در دو قسمت قبل به آنها اشاره شد، پرداخته می‌شود. برای واقعی‌تر بودن مدل، ۱۴ پارامتر که در جدول ۲ نشان داده شده است با استفاده از داده‌های واقعی بورس و اوراق بهادار تهران برآورد شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای شبیه‌سازی بازار سفارش محدود مصنوعی

مقادیر		تنظیمات بازار
۹۶۳		قیمت midquote اولیه
۵ ریال		شکاف عرضه و تقاضای اولیه
۱ ریال		اندازه تیک
احتمال		نوع عامل
۰/۵		خرید یا فروش
احتمال		نوع رخداد
۰/۷۸۶۳۳۹		اقدامی انجام ندهد (λ_0)
۰/۰۰۵۱۶		ثبت یک سفارش بازار (λ_m)
احتمالات	نوع سفارش محدود	ثبت یک سفارش محدود (λ_1)
۰/۰۲۶۲۸۷	سفارش محدود crossing	
۰/۰۱۲۳۶	سفارش محدود inside spread	
۰/۳۰۰۲۱	سفارش محدود spread	
۰/۶۶۱۱۴۳	سفارش محدود off spread	
۰/۰۹۵۱		لغو یک سفارش محدود (λ_c)
پارامترهای توزیع لوگ نرمال		نوع اندازه سفارش
$\mu=9/415$	$\sigma=1/824$	اندازه سفارش بازار
$\mu=9/425$	$\sigma=1/877$	اندازه سفارش محدود crossing
$\mu=9/466$	$\sigma=1/856$	اندازه سفارش محدود inside spread
$\mu=9/497$	$\sigma=1/946$	اندازه سفارش محدود spread
$\mu=9/772$	$\sigma=2/011$	اندازه سفارش محدود off spread
پارامترهای توزیع توانی		نوع قیمت محدود
B off- p = 1/7248	Xmin off- p=5	قیمت محدود نسبی offspread

از مهم‌ترین محدودیت‌ها باید به نبودن داده‌های مربوط به نوع سفارش‌ها ثبت‌شده در بازار بورس و اوراق بهادار تهران اشاره کرد. احتمال گذاشتن انواع سفارش از روی داده‌های عددی ثبت‌شده محاسبه شده است. برآورد احتمال ثبت سفارش‌ها offspread نیز با استفاده از داده‌های تابلوی معاملاتی تا سه سطح انجام شده است.

قیمت midquote اولیه برابر است با جزء صحیح میانگین قیمت در طول دوره نمونه. λ_0 با استفاده از داده‌های واقعی به دست آمده و برابر با یک منهای میانگین نسبت زمانی ثبت یا لغو سفارش (تعداد ثانیه‌هایی که در آن سفارش ثبت یا کنسل شده تقسیم بر کل زمان معاملات به ثانیه) است.

λ_m و λ_c (احتمال ثبت سفارش بازار، ثبت سفارش محدود و لغو سفارش) بر اساس نظر خبرگان به دست آمده است. احتمال ثبت سفارش بازار به این علت کم دیده می‌شود که به سفارش‌های که به انجام معامله منجر شده است اطلاق می‌شود و سایر سفارش‌ها با بهترین قیمت سمت مقابل که به انجام معامله منجر نشده اند، سفارش محدود crossing در نظر گرفته شده‌اند.

λ_{crs} بر اساس داده‌های واقعی محاسبه شده است. برای محاسبه این پارامتر تعداد سفارش‌ها خریدی که برابر بهترین قیمت فروش موجود در تابلوی معاملات باشد و تعداد سفارش‌ها فروشی که برابر بهترین قیمت خرید موجود در تابلوی معاملات باشد، با هم جمع شده و تقسیم بر تعداد کل سفارش‌ها می‌شود.

λ_{inspr} بر اساس داده‌های واقعی محاسبه شده است. تعداد سفارش‌ها فروشی که جذاب‌تر از بهترین قیمت فروش موجود در تابلوی معاملات باشد، با تعداد سفارش‌ها خریدی که جذاب‌تر از قیمت بهترین خرید ثبت شده باشد جمع شده و تقسیم بر تعداد کل سفارش‌ها می‌شود.

λ_{spr} بر اساس داده‌های واقعی محاسبه شده است. تعداد سفارش‌ها خریدی که برابر بهترین قیمت خرید موجود در تابلوی معاملات باشد و تعداد سفارش‌ها فروشی که برابر بهترین قیمت فروش موجود در تابلوی معاملات باشد، با هم جمع شده و تقسیم بر تعداد کل سفارش‌ها می‌شود.

λ_{offspr} بر اساس داده‌های واقعی محاسبه شده است؛ و تعداد سفارش‌ها خرید و فروشی که قیمت آن‌ها جذابیت کمتری نسبت به قیمت بهترین سفارش در تابلوی معاملات باشد، با هم جمع شده و تقسیم بر تعداد کل سفارش‌ها می‌شود.

همان‌طور که گفته شد برای هر لحظه عامل‌ها ممکن است حالت متفاوتی را انتخاب کنند که شامل ثبت انواع سفارش‌ها، لغو سفارش و این حالت است که اقدامی انجام ندهند.

در مورد رفتار عامل‌ها در شرایط عادی در بخش قبل صحبت کردیم؛ اما هنگامی که سفارش بزرگ در بازار دیده می‌شود، شرایط بازار عوض می‌شود و رفتار عامل‌ها در بازار تغییر می‌کند که این در واقع واکنش عامل‌ها به دیدن یک سفارش بزرگ است.

سؤال مهمی که در اینجا مطرح می‌شود، نحوه و میزان واکنش عامل‌ها در مقابل میزان بزرگ بودن سفارش است. این شرایط را در نظر می‌گیریم که سفارش بزرگی در سمت خرید ظاهر می‌شود. ممکن است مقداری از آن با سفارش‌های فروش موجود در یک قیمت بوده و بخش کمی از آن انجام شود یا این که کل سفارش در تابلوی معاملاتی باقی بماند. در هر صورت حجم زیادی در سمت خرید باقی می‌ماند. واکنش بازار در این حالت بالا بردن قیمت فروش است. در بازار شبیه‌سازی شده امکان اصلاح سفارش‌ها وجود ندارد. در واقع اصلاح سفارش در دو مرحله صورت می‌گیرد؛ یعنی سفارش کنسل شده و سفارش جدید گذاشته می‌شود.

در هنگام دیده شدن سفارش بزرگ، اگر در طرف دیگر تابلو سفارشی با آن قیمت منطبق بود، سفارش ناخواسته انجام می‌شود؛ اما در صورتی که اختلاف قیمتی سفارش بعدی در صف با سفارش بزرگ کم باشد آن سفارش حذف می‌شود و شکاف قیمتی به وجود می‌آید.

برای شبیه‌سازی بازار در نظر می‌گیریم که وقتی سفارش حجیم در سمت خرید ظاهر شود رفتار عامل‌ها در سفارش گذاری نیز به این صورت تغییر کند.

- افزایش سفارش‌های تهاجمی سمت خرید
 - کاهش سفارش‌های تهاجمی سمت فروش
- در نتیجه پارامترهای مدل به صورت جدول ۳ تغییر می‌کنند.

جدول ۳. پارامترهای شبیه‌سازی بازار سفارش محدود مصنوعی پس از سفارش بزرگ در سمت خرید

نوع سفارش محدود	احتمالات برای سمت فروش	احتمالات برای سمت خرید
سفارش محدود crossing	۰/۰۱۸۴۰۱	۰/۱۰۵۱۴۸
سفارش محدود inside spread	۰/۰۰۹۸۸۸	۰/۰۹۸۸۷۹
سفارش محدود spread	۰/۲۷۰۱۸۹	۰/۲۱۰۱۴۷
سفارش محدود off spread	۰/۷۰۱۵۲۲	۰/۵۸۵۸۲۶
نوع قیمت محدود	پارامترهای توزیع توانی	
قیمت محدود نسبی offspread فروش سفارش کوچک	$X_{min} \text{ off- } p = \delta$	$B \text{ off- } p = 1/2248$
قیمت محدود نسبی offspread فروش سفارش بزرگ	$X_{min} \text{ off- } p = 11$	$B \text{ off- } p = 1/2248$

طراحی استراتژی‌های انجام معاملات بهینه

پس از شبیه‌سازی بازار و در نظر گرفتن اثر قیمتی ثبت سفارش بزرگ، نوبت به طراحی استراتژی اجرای معاملات بهینه می‌رسد. در اینجا عامل مد نظر عاملی است که استراتژی گذاشتن سفارش بزرگ برای آن طراحی می‌شود. عامل می‌تواند در هشت مرحله، بخشی از سفارش بزرگ خود را ثبت کند. فرایند سفارش‌گذاری عامل، طبق زمان‌بندی کلی در هر نیم ساعت صورت می‌گیرد؛ اما هر عامل برای ثبت سفارش، زمان‌بندی مخصوص خود را دارد که در انتهای این بخش توضیحات مربوط به آن آمده است.

با توجه به این که بازار ساعت ۱۲:۳۰:۰۰ بسته می‌شود، عامل یاد می‌گیرد که در این زمان تنها از سفارش بازار استفاده کند. در قسمت یادگیری عامل، به روش آموزش الگوریتم پرداخته می‌شود. در این پژوهش برخی موارد تکنیکی لحاظ نشده است؛ برای مثال، در مواردی که سمت مقابل سفارشی وجود ندارد، عامل تصمیمی نمی‌گیرد و منتظر ارسال سفارش در سمت مقابل می‌ماند. همچنین ممکن است عامل در موقعیت‌هایی قرار گیرد که برای تصمیم‌گیری در آن شرایط آموزش ندیده باشد. در این مورد نیز باید صبر کند تا به اولین موقعیتی برسد که درباره آن آموزش دیده است. در ادامه به طراحی استراتژی‌های معاملاتی^۱ مختلف می‌پردازیم.

• طراحی استراتژی معاملاتی اول

در استراتژی معاملاتی اول در نظر می‌گیریم که عامل به‌صورت تصادفی در مورد حجم و نوع سفارش تصمیم‌گیری می‌کند.

• طراحی استراتژی معاملاتی دوم

در این استراتژی معاملاتی، حجم سفارش را در هر مرحله ثابت در نظر می‌گیریم. با توجه به این که سفارش‌گذاری در هشت مرحله انجام می‌شود، باید در هر مرحله ۱۲/۵ درصد از حجم کل سفارش انجام شود. در شرایطی که نوع سفارش ثبت‌شده، سفارش محدود است، این احتمال وجود دارد که کل سفارش ثبت‌شده یا بخشی از آن انجام نشود. در چنین حالتی حجم باقی‌مانده از مقدار حجم ۱۲/۵ درصدی در پایان دوره و به‌صورت سفارش بازار انجام می‌شود.

• طراحی استراتژی معاملاتی سوم

در این استراتژی معاملاتی نوع سفارش مشخص است و عامل فقط از سفارش بازار استفاده می‌کند. عامل انتخاب می‌کند که سفارش بازار را قرار دهد یا اگر قیمت بازار در آن مرحله از

۱. منظور همان استراتژی اجرای معاملات است که برای اختصار استراتژی معاملاتی نامیده می‌شود.

سفارش گذاری مطلوب نیست، از گذاشتن سفارش چشم‌پوشی کند؛ اما حجمی که در هر مرحله می‌گذارد مشخص نیست.

• طراحی استراتژی معاملاتی چهارم

در این استراتژی معاملاتی نوع سفارش مشخص است. عامل برای هفت مرحله اول تنها از سفارش محدود استفاده می‌کند و در خصوص این که سفارشی نگذارد یا نوع سفارش محدود باشد، تصمیم‌گیری می‌کند، همچنین حجمی که در هر مرحله می‌گذارد، مشخص نیست و برای اندازه سفارش تصمیم می‌گیرد. در هر مرحله، حجم سفارشی که انجام نشده، به مرحله بعدی منتقل می‌شود.

• طراحی استراتژی معاملاتی پنجم

در استراتژی معاملاتی آخر، عامل در رابطه با نوع سفارش اعم از سفارش بازار یا انواع سفارش محدود و حجم هر سفارش تصمیم‌گیری می‌کند. برخلاف برخی از کارهای گذشته، برای این مدل حجم سفارش در هر مرحله ثابت نیست و تغییر می‌کند.

یادگیری عامل

برای آموزش عامل، از روش یادگیری کیو^۱ که یکی از روش‌های یادگیری تقویتی است، استفاده می‌کنیم. در این روش مجموعه‌ای از حالت‌ها^۲ و اقدام‌ها^۳ مدل می‌شوند. در این مقاله پارامترهای زیر محیط آموزش را تشکیل می‌دهند:

۱. عمق عرضه

۲. عمق تقاضا

۳. تغییرات قیمتی

۴. شکاف قیمتی

۵. تعداد سهام باقی مانده

۶. تعداد مراحل باقی مانده برای سفارش گذاری

برای هر یک از چهار مورد اول، سه حالت کمتر از میانگین، برابر با میانگین و بیشتر از میانگین را در نظر می‌گیریم که بر انتخاب عامل برای سفارش گذاری تأثیر می‌گذارد (۸۱ حالت). تعداد سهام معامله نشده به صورت درصدی از حجم کل معامله با گام‌های پنج‌تایی است (۲۰ حالت). تعداد مراحل باقی مانده برای سفارش گذاری هم می‌تواند ۸ مقدار داشته باشد (۸ حالت).

۱. یادگیری کیو (Q-learnig) یک مدل یادگیری تقویتی است که به اقدام عامل‌ها و دریافت پاداش‌های عددی از محیط در جواب به اقداماتش مبتنی است. ارزش اختصاص یافته به هر اقدام ممکن، تقریبی از مطلوبیت یک عمل را نشان می‌دهد. در فرایند یادگیری، انتخاب اجرای یک عمل و دریافت پاداش، برای به‌روزرسانی ارزش استفاده می‌شود. با گذشت زمان عامل ارزش واقعی عمل را یاد می‌گیرد (هزینه‌ها) که از آن برای انتخاب مناسب‌ترین شیوه استفاده می‌کند.

2. States

3. Actions

همچنین لازم است که در هر مرحله وضعیت میزان حجم و نوع سفارش مرحله بعدی مشخص شود که باز هم برای میزان سهم در نهایت ۲۰ حالت و برای انتخاب نوع سفارش ۵ حالت داریم. بسته به شرایط، در نظر می‌گیریم ۳۰ درصد از حالت‌ها را کنترل نکنیم. پس در مجموع ۹۱۰۰۰۰ حالت ($910000 = 13000 \times 100 \times 0.7$) برای بررسی وجود دارد.

در هر اجرا ۸ حالت کنترل می‌شود، یعنی اگر ۱۲۰۰۰۰ بار مدل را اجرا کنیم، می‌توانیم کل حالت‌ها را پوشش دهیم و بهترین استراتژی را از میان آنها انتخاب کنیم. اقدامات عامل، شامل انتخاب شرایط ثبت سفارش (اقدامی انجام ندهد، یک سفارش بازار را ثبت کند، یکی از انواع سفارش محدود را ثبت کند و یک سفارش محدود را لغو کند) و حجم سفارش‌هاست.

برای ارزش‌دهی به اقدامات ارزش از رابطه ۲ استفاده شده است؛ به این ترتیب که هر چه مقدار این نسبت کمتر باشد، آن اقدام امتیاز بیشتری دریافت می‌کند.

$$\text{رابطه ۲} \quad \frac{VWAP_{\text{استراتژی}}}{VWAP_{\text{کل بازار}}}$$

در این رابطه، کل بازار $VWAP$ میانگین کل قیمت‌های معامله‌شده سهام در طول روز به جز معاملات مربوط به استراتژی است.

ارزیابی مدل

پس از طراحی استراتژی‌ها، عملکرد آنها را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. برای ارزیابی عملکرد اجرای معامله از معیار استاندارد میانگین قیمت موزون حجمی استفاده می‌شود که نسبت ارزش معامله‌شده به حجم معامله‌شده در بازه زمانی مشخص است (برکوویتز، لوگ و نوسر، ۱۹۸۸) و از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۳} \quad VWAP = \frac{\sum (\text{قیمت} \times \text{حجم})}{\sum \text{حجم}}$$

برای ارزیابی عملکرد یک استراتژی معامله، قیمت میانگین موزون حجمی آن با قیمت میانگین موزون حجمی بازار مقایسه می‌شود. اگر قیمت میانگین موزون حجمی معامله مطلوب‌تر از قیمت میانگین موزون حجمی بازار در دوره زمانی معامله بود، معامله خوب و در غیر این صورت معامله ضعیف قلمداد می‌شود. این مقایسه را به کمک رابطه ۴ انجام می‌دهیم.

$$\text{رابطه ۴} \quad VWAP_{\text{نسبت}} = \frac{10^4 \times (VWAP_{\text{استراتژی}} - VWAP_{\text{بازار}})}{VWAP_{\text{بازار}}}$$

بازار VWAP به این صورت محاسبه می‌شود که طی هشت مرحله، بهترین قیمت‌های سمت مقابل (فروش) در نظر گرفته شده و میانگین موزون حجمی آنها محاسبه می‌شود.

یافته‌های پژوهش

نتایج مقایسه‌ای عملکرد استراتژی‌های معاملاتی نسبت به بازار در جدول ۴ نشان داده شده است. استراتژی‌های معاملاتی دوم و پنجم بیش از ۹۰ درصد مواقع عملکرد بهتری نسبت به عملکرد بازار داشته‌اند.

جدول ۴. مقایسه عملکرد استراتژی‌های معاملاتی با نتایج بازار

استراتژی معاملاتی پنجم	استراتژی معاملاتی چهارم	استراتژی معاملاتی سوم	استراتژی معاملاتی دوم	استراتژی معاملاتی اول	
۹۳	۵۰	۲۸	۹۳	۲۵	میزان عملکرد بهتر از عملکرد بازار (درصد)
۷	۵۰	۷۲	۷	۷۵	میزان عملکرد ضعیف‌تر از عملکرد بازار (درصد)

در استراتژی معاملاتی دوم، ۳۴ درصد مواقع از سفارش‌های بازار و محدود Crossing، ۱۶ درصد از سفارش‌های inside spread، ۲۶ درصد از سفارش‌های spread و ۲۴ درصد از سفارش‌های off spread استفاده شده است. در این استراتژی معاملاتی حجم باقی‌مانده برای اجرا در مرحله هشتم نشان می‌دهد به‌طور متوسط در هر روز، معاملات دو مرحله انجام نمی‌شود که در انتهای روز این حجم تجمعی جبران می‌شود. در دوره‌های شبیه‌سازی شده، کمترین حجم باقی‌مانده به میزان ۱۲/۵ درصد (سهام همان مرحله) و بیشترین حجم باقی‌مانده ۶۲/۵ درصد است که به‌معنای عدم اجرای معاملات چهار مرحله دیگر در طول معاملات آن روز است.

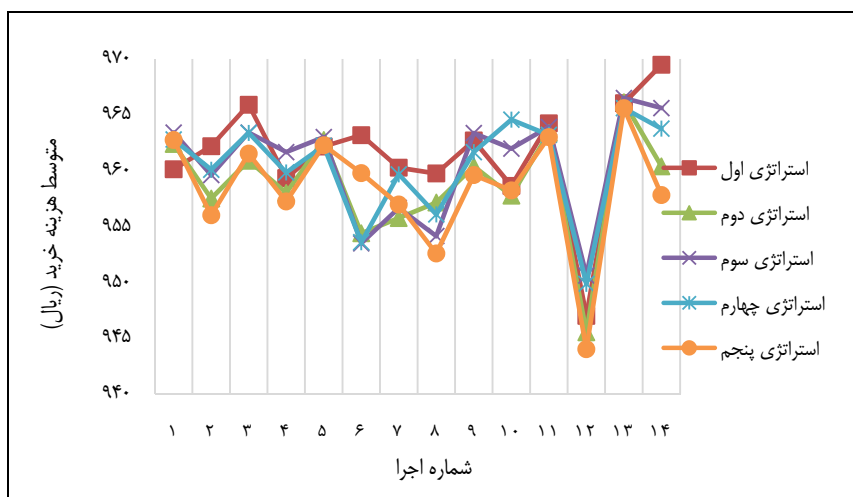
بر اساس نتایج، در استراتژی معاملاتی سوم به‌طور میانگین در یک مرحله در هر روز سفارش‌گذاری انجام نمی‌شود. در این دوره‌ها حداکثر در یک روز دو بار از گذاشتن سفارش صرف نظر شده است و در ۲۱ درصد موارد نیز، سفارش‌گذاری در تمام مراحل انجام شده است.

در استراتژی معاملاتی چهارم، فقط برای انجام سفارش‌های باقی‌مانده در مرحله آخر از سفارش بازار استفاده می‌شود و به‌طور میانگین، ۲۴ درصد از حجم معاملات برای مرحله آخر باقی‌مانده است. این مقدار برای استراتژی‌هایی با عملکرد بهتر نیز در همین حد و برابر با ۲۷ درصد است. در عملکردهای بهتر، میزان استفاده از سفارش‌های محدود Off Spread بیشتر از انواع دیگر است و بعد از آن، میزان استفاده از سفارش‌های محدود Spread بیشتر از میزان

استفاده از سفارش‌های Inside Spread است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۲۲ درصد موارد سفارش‌های تهاجمی، ۳۳ درصد میانه و در ۳۹ درصد سفارش‌های انفعالی استفاده شده است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده موفقیت بیشتر سفارش‌های انفعالی باشد.

در استراتژی معاملاتی پنجم، ۲۶ درصد مواقع از سفارش بازار استفاده شده که ۱۲/۵ درصد آن مربوط به مرحله آخر سفارش‌گذاری است. مشاهده می‌شود که عامل آموزش دیده است که برای موفق بودن در اجرای معامله، کل سهام تعیین‌شده در مرحله آخر باید از سفارش بازار استفاده کند. در ۱۴ درصد مواقع استراتژی سفارش محدود Inside Spread، در ۱۶ درصد از سفارش محدود Spread، در ۳۰ درصد موارد از سفارش محدود Off Spread و در ۱۶ درصد باقی‌مانده نیز سفارشی ثبت نشده است. این نسبت‌ها پس از حذف استراتژی با عملکرد ضعیف‌تر از عملکرد بازار به ۲۴ درصد برای سفارش بازار، ۱۴ درصد برای سفارش Inside Spread، ۱۴ درصد برای سفارش Spread، ۳۱ درصد برای سفارش Off Spread و ۱۷ درصد برای عدم ثبت سفارش تغییر کرده است که نشان می‌دهد استراتژی‌های با عملکرد بهتر به استفاده بیشتر از سفارش‌های انفعالی‌تر گرایش دارند.

شکل ۱ قیمت میانگین موزون حجمی را در ۱۴ دوره شبیه‌سازی شده و برای هر پنج استراتژی نشان می‌دهد. در ۵۷ درصد موارد، استراتژی ترکیبی پنجم از سایر استراتژی‌ها هزینه کمتری داشته و در ۲۱ درصد موارد استراتژی دوم کم‌هزینه‌تر بوده است. متوسط قیمت میانگین موزون حجمی در ۱۴ روز نیز در جدول ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. قیمت میانگین موزون حجمی برای هر استراتژی معاملاتی

جدول ۵. متوسط قیمت میانگین موزون حجمی و مقایسه عملکرد استراتژی‌های مختلف با بازار

استراتژی معاملاتی اول	استراتژی معاملاتی دوم	استراتژی معاملاتی سوم	استراتژی معاملاتی چهارم	استراتژی معاملاتی پنجم	
۹۶۱/۳۶۸۸	۹۵۸/۷۳۵	۹۶۰/۵۲	۹۶۰/۴۴۴۳	۹۵۸/۳۸	متوسط قیمت میانگین موزون حجمی
۱۸/۷۴	-۱۰/۰۳	۸/۵۷	۷/۷۸	-۱۳/۷۴	نسبت قیمت میانگین موزون حجمی هر استراتژی به بازار (×۱۰ ^۴)

در نهایت باید گفت استراتژی بهینه پیشنهاد شده در این پژوهش، توانسته است عملکرد بهتری نسبت به عملکرد بازار از خود نشان داده و هزینه‌های معاملاتی را به‌طور میانگین به میزان ۰/۱۳۷ درصد نسبت به استراتژی بازار کاهش دهد و این میزان کاهش با توجه به یکسان بودن حجم معاملات و نوسانات قیمتی محدود در هرروز صورت گرفته است. مقایسه عملکرد استراتژی‌های مختلف در این پژوهش در جدول ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود استراتژی ترکیبی در هر دو صورت چه با ثابت در نظر گرفتن حجم در هر مرحله و چه به صورتی که برای حجم معامله در هر مرحله تصمیم‌گیری شود، عملکرد را بهبود داده است. البته میزان این بهبود در استراتژی‌ای که برای حجم نیز تصمیم‌گیری می‌کند، بیشتر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استراتژی‌های ترکیبی از انواع سفارش‌ها، بهتر از استراتژی‌های ساده (استراتژی‌ای که فقط از سفارش بازار یا فقط از سفارش محدود استفاده می‌کند) عمل می‌کنند. این مطلب نشان می‌دهد که انتخاب نوع سفارش بر عملکرد استراتژی‌های اجرای معامله تأثیر می‌گذارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

طی سال‌های اخیر، استفاده از معاملات الگوریتمی به‌طور گسترده‌ای در کانون توجه قرار گرفته است، با این حال در زمینه اجرای سفارش‌های بزرگ با استفاده از انواع سفارش‌ها، تحقیقات کمی صورت گرفته است.

در این مقاله استراتژی‌های مختلفی از انواع سفارش بررسی شدند و استراتژی‌ای که بهترین معیار ارزیابی قیمت میانگین موزون حجمی و در نتیجه کمترین هزینه معاملات را برای اجرای حجم مشخصی از سهام داشت، ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد در انتخاب استراتژی بهینه برای اجرای سفارش‌های بزرگ، باید انتخاب نوع سفارش نیز در نظر گرفته شود. به‌علاوه، نتایج برای

معامله‌گران نهادی که موظف به خرید حجم‌های بزرگی از سهام هستند، نشان می‌دهد استراتژی اجرای سفارش‌های بزرگ با استفاده از انواع سفارش، می‌تواند بهتر از استراتژی‌هایی با استفاده از تنها یک نوع سفارش باشد. کیم و مدهاوان (۱۹۹۷) بیان کردند که شیوه سرمایه‌گذاری بر هزینه‌های معاملاتی اثرگذار است و کاهش هزینه‌های معاملات در استراتژی بهینه این مطلب را تأیید می‌کند.

بررسی زمان ثبت سفارش‌های بازار در استراتژی بهینه نشان می‌دهد گذاشتن سفارش‌هایی که کمتر تهاجمی‌اند، بیشتر در ساعات اولیه معاملات رخ می‌دهد، در حالی که گذاشتن سفارش‌های تهاجمی‌تر، بیشتر در اواخر روز معاملاتی صورت می‌پذیرد. این نتیجه با مطالعات بیایس و همکاران (۱۹۹۵) که اظهار داشتند استراتژی ثبت سفارش‌ها تحت تأثیر زمان در طی روز قرار دارد و سفارش‌های تهاجمی در ساعات پایانی بیشتر است، همخوانی دارد.

برخلاف استراتژی معاملاتی اول که ثبت سفارش به صورت تصادفی است و به جز استراتژی معاملاتی سوم که به صورت تعریف‌شده تنها از سفارش بازار استفاده می‌کند، در بقیه استراتژی‌های معاملاتی مشاهده می‌شود که عامل یاد گرفته است برای موفق بودن در اجرای معامله کل سهام تعیین شده در مرحله آخر، باید از سفارش بازار استفاده کند. استفاده از سفارش‌های تهاجمی‌تر در انتهای روز معاملاتی با یافته‌های فوکالت، کادن و کاندل (۲۰۰۵) در تضاد است؛ اما نتایج چن، لی و گوا (۲۰۱۷) نیز در مقایسه بین سفارش‌های پنهان و محدود بر سفارش‌گذاری انفعالی در ساعات اولیه (با سفارش پنهان) و سفارش‌های تهاجمی (سفارش‌های محدود) تأکید دارد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد سفارش‌های ترکیبی محدود و بازار، هزینه کمتری از استراتژی‌ای که تنها از سفارش‌های محدود استفاده می‌کند (حالت انفعالی بیشتری دارد) دارد. در حالی که هریس و هاسبروک (۱۹۹۶)، با بررسی عملکرد اجرای سفارش‌های تهاجمی و انفعالی در مطالعات قبلی، به این نتیجه رسیدند که سفارش‌های انفعالی به لحاظ هزینه معاملات از سفارش‌های تهاجمی عملکرد بهتری دارند که با این نتایج در تضاد است.

بر اساس نتایج پژوهش حاضر، تعیین میزان تهاجمی بودن یک سفارش بر بازده سرمایه‌گذاری تأثیرگذار است. از این رو، تهاجمی بودن سفارش پارامتر مهمی است که باید در زمان ثبت سفارش توسط معامله‌گر لحاظ شود؛ زیرا سطح تهاجمی بودن سفارش محدود خرید، با افزایش قیمت محدود و حجم آن افزایش می‌یابد.

نتیجه این پژوهش بهبود عملکرد بین ۰/۰۵ تا ۰/۵۲ درصد با میانگین ۰/۱۳۷ درصد است. استراتژی پیشنهاد شده در نمونه کارهای موفق قبلی مانند کارتیا و جایمونگال (۲۰۱۶) بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۰ درصد عملکرد بهتری از معیار قیمت میانگین موزون حجمی داشته است. در نهایت، با توجه به این که اخیراً در بورس تهران انجام معاملات الگوریتمی به رسمیت شناخته شده و به تعدادی از نهادهای حقوقی مجوز محدود داده شده است، همچنین با در نظر گرفتن اهمیت موضوع اثر قیمتی در طراحی الگوریتمها به عنوان معیاری برای ارزیابی الگوریتمها، پیشنهاد می شود فعالان بازار، به خصوص مشتریان نهادی بزرگ که برای خرید و فروش حجمهای سنگینی از سهام تصمیم گیری می کنند، از این گونه الگوریتمها استفاده کنند و از این طریق، استراتژیهای مناسب را برای انجام معاملات خود بیابند. روشهای استفاده شده در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد استراتژیهای شکستن معاملات بزرگ به کار رفته اند و انجام معاملات بزرگ در بازار عادی به جای انجام معاملات بلوک و عمده، موجب افزایش نقدشوندگی بازار و انجام معامله با قیمت پایین تر برای خریدار سهام با حجم زیاد می شود.

برای تحقیقات آتی پیشنهادهای زیر ارائه می شود:

۱. بررسی استراتژی اجرای بهینه برای فروشندگان و مقایسه نتایج به دست آمده با این تحقیق؛
۲. بررسی تابع اثر قیمتی سفارشها و معاملات بزرگ برای بورس اوراق بهادار تهران به صورت مجزا برای شبیه سازی دقیق تر بازار؛
۳. تعریف عواملی مانند بازارگردان و تفکیک عاملهای حقیقی و حقوقی و عاملهای آگاه و ناآگاه در شبیه سازی بازار؛
۴. وارد کردن نوسانها به عنوان یکی از پارامترهای یادگیری مدل.

فهرست منابع

- احمدپور، ا.، نصیری، م. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر قیمت معاملات بلوک در بازار سهام ایران. *مجله تحقیقات مالی*، ۱۸(۱)، ۳۸-۲۳.
- گل ارضی، غ.، ضیاچی، ع. (۱۳۹۳). بررسی رفتار جمعی سرمایه گذاران در بورس اوراق بهادار تهران با رویکردی مبتنی بر حجم معاملات. *مجله تحقیقات مالی*، ۱۶(۲)، ۳۷۱-۳۵۹.
- Admati, A.R. (1985). A noisy rational expectations equilibrium for multi-asset securities Markets. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 53(3), 629 - 657.

- Agliardi, R. & Gençay, R. (2017). Optimal trading strategies with limit orders. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 20(01), 1-16.
- Ahmadpour, A. & Nasiri, M. (2016). Surveying Price impact of block trades in the Iran stock market. *Journal of Financial Research*, 18(1), 23-38. (in Persian)
- Alfonsi, A., Fruth, A. & Schied, A. (2010). Optimal execution strategies in limit order books with general shape function. *Quantitative Finance*, 10 (2), 143–157.
- Almgren, R. & Chriss, N. (2001). Optimal execution of portfolio transactions. *Journal of Risk*, 3(2), 5-39.
- Berkowitz, S., Logue, D. & Noser, E. (1988). The total cost of transactions on the NYSE. *Journal of Finance*, 43 (1), 97–112.
- Bertsimas, D. & Lo, A. W. (1998). Optimal control of execution costs. *Journal of Financial Markets*, 1 (1), 1-50.
- Biais, B., Hillion, P. & Spatt, C. (1995). An empirical analysis of the limit order book and the order flow in the Paris Bourse. *Journal of Finance*, 50 (3), 1655–1689.
- Cartea, A., Jaimungal, S. (2015). Optimal execution with limit and market orders. *Journal. Quantitative Finance*, 15(8), 1279-1291.
- Cartea, Á. & Jaimungal, S. (2016). A closed-form execution strategy to target volume weighted average price. *SIAM Journal on Financial Mathematics*, 7(1), 760-785.
- Chakravarty, S., Laughlin, R. B., Morr, D.K & Nayak, C. (2001). Hidden order in the cuprates. *Physical Review B*, 63 (9), 094503.
- Chen, Y., Li, D. & Gao, X. (2017). Optimal Order Exposure in a Limit Order Market. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2938377>.
- Cont, R. & Kukanov, A. (2017). Optimal order placement in limit order markets. *Quantitative Finance*, 17(1), 21-39.
- Cui, W., Brabazon, A. & O'Neill, M. (2011). Dynamic trade execution: a grammatical evolution approach. *International Journal of Financial Markets and Derivatives*, 2 (1), 4-31.
- Forsyth, P. A. (2011). A Hamilton–Jacobi–Bellman approach to optimal trade execution. *Applied numerical mathematics*, 61 (2), 241-265.

- Foucault, T., Kaden, O. & Kandel, E. (2005). The limit order book as a market for liquidity. *Review of Financial Studies*, 18 (1), 1171–1217.
- Glosten, L. & Milgrom, P. (1985). Bid, ask and transaction prices in a specialist market with heterogeneously informed traders. *Journal of Financial Economics*, 14 (1), 71–100.
- Golarzi, G. & Ziyachi, A. (2014). A Survey in Investor Herding Behavior with Trading Volume Approach in Tehran Stock Exchange. *Journal of Financial Research*, 16(2), 359-371. (in Persian)
- Guo, X. & Zervos, M. (2015). Optimal execution with multiplicative price impact. *SIAM Journal on Financial Mathematics*, 6(1), 281-306.
- Handa, P. & Schwartz, R. (1996). Limit Order Trading. *Journal of Finance*, 51(5), 1835–1861.
- Harris, L. & Hasbrouck, J. (1996). Market vs. Limit Orders - The Super DOT Evidence On Order Submission Strategy, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 31 (2), 213–231.
- Hendricks, D. & Wilcox, D. (2014). A reinforcement learning extension to the Almgren-Chriss framework for optimal trade execution. In *Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics (CIFER)*, 2104 IEEE Conference on IEEE. 457-464.
- Huitema, R. (2014). *Optimal portfolio execution using market and limit orders*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1977553>.
- Johnson, B. (2010). *Algorithmic Trading & DMA: An introduction to direct access trading strategies* (Vol. 200). London: 4Myeloma Press.
- Keim, D. B. & Madhavan, A. (1997). Transactions costs and investment style: an inter-exchange analysis of institutional equity trades. *Journal of Financial Economics*, 46 (3), 265-292.
- Kissell, R. & Glantz, M. (2003). *Optimal Trading Strategies*. Amacom, USA.
- Lin, Q., Chen, X. & Peña, J. (2015). A trade execution model under a composite dynamic coherent risk measure. *Operations Research Letters*, 43(1), 52-58.
- Moazeni, S., Coleman, T. & Li, Y. (2010). Optimal Portfolio Execution Strategies and Sensitivity to Price Impact Parameters. *SIAM Journal on Optimization*, 20 (3), 1620-1654.

Obizhaeva, A. A. & Wang, J. (2013). Optimal trading strategy and supply/demand dynamics. *Journal of Financial Markets*, 16 (1), 1-32.

Predoiu, S., Shaikhet, G. & Shreve, S. (2011). Optimal execution in a general one-sided limit-order book. *SIAM Journal on Financial Mathematics*, 2(1), 183-212.

Schmidt, A. (2010). Optimal Execution in the Global FX Market. *Journal of Trading*, 5 (3), 68-77.