تحقیقات مالی
دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران

دورهٔ ۱۶، شمارهٔ ۱
بهار و تابستان ۱۳۹۳
ص. ۵۶-۳۷

بهینه‌سازی سبد سهام با رویکرد میانگین ـ واریانس و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی شکار

مرتضی الهی[۱]، محسن یوسفی[۲]، یحیی زارع مهرجردی[۳]

چکیده: این مقاله، یک راه حل فراابتکاری جدید برای حل مسئلهٔ جست‌وجوی افق کارا با رویکرد میانگین- واریانس ارائه می‌دهد. مسئلهٔ بهینه‌سازی سبد سهام، کوآدراتیک است و با افزایش تعداد دارایی‌ها و محدودیت‌ها، به آن‌پی‌سخت تبدیل شده است و نمی‌توان با روش‌های مرسوم ریاضی در زمان معقول آن را حل کرد. ازاین‌رو، از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری به‌منزلهٔ راهکاری مناسب استفاده می‌شود. این مقاله به بهینه‌سازی سبد سهام به کمک الگوریتم فراابتکاری جدیدی با نام جست‌وجوی شکار می‌پردازد. به‌منظور بررسی قدرت و دقت حل الگوریتم، مطالعه‌ای موردی با اطلاعات ۳۰ شرکت بزرگ در بورس ایران در بازه زمانی ۱۳۸۹/۳/۱ الی ۱۳۹۰/۳/۱ طراحی شد. الگوریتم توانست با دقت و زمان خوبی مرز کارای سبد بررسی‌شده را به دست آورد. به‌منظور بررسی توانمندی الگوریتم، دو مثال معتبر Hang Sang 31 و Dax100 نیز با الگوریتم حل شد. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم جست‌وجوی شکار، برای حل مسائل بهینه‌سازی سبد سهام، سرعت و دقت بالایی دارد و می‌تواند برای حل مسئلهٔ جست‌وجوی مرز کارای سبد سهام استفاده شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جست‌وجوی شکار، بهینه‌سازی سبد، رویکرد میانگین واریانس.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۱۷
تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۲۹
نویسندهٔ مسئول مقاله: مرتضی الهی
E-mail: Mortezaelahi.eng@gmail.com

مقدمه

سبد سهام ترکیبی از دارایی‌هاست که سرمایه‌گذار قرار است در آن سرمایه‌گذاری کند و بهینه‌سازی سبد به مفهوم انتخاب ترکیبی بهینه از دارایی‌هاست که می‌تواند در کنار بیشینه‌کردن نرخ بازده مورد انتظار، ریسک نرخ بازده را به‌طور هم‌زمان کمینه کند (وودساید اوریاخی، لوگاس و بیسلی، ۲۰۱۱). بهینه‌سازی سبد سهام از مهم‌ترین مسائل حوزهٔ سرمایه‌گذاری به حساب می‌آید. به کمک مدلی اولیه که به مدل میانگین- واریانس شهرت یافته است، مارکوویتز توانست مفهوم سبد سهام کارا را ارائه کند (چنگ، بیسلی و شریها، ۲۰۰۰). اهمیت تعریف این موضوع از آن جهت بود که همواره برای سرمایه‌گذاری، سبد سهامی کاراست که حداقل واریانس در ازای بازده معین و یا به‌طور معادل حداکثر بازده در ازای ریسکی معین را داشته باشد (مارکوویتز، ۱۹۵۲).

گرچه مدل مارکوویتز برای نخستین‌بار توانست تلفیقی از بیشینه‌سازی نرخ بازده و کمینه‌کردن ریسک را ارائه کند، اما در برخورد با برخی محدودیت‌های مسائل واقعی ناتوان است. مثلاً هنگامی که محدودیتی با نام تعداد دارایی موجود در سبد مطرح شود و یا حداقلی برای میزان سرمایه‌گذاری در یک دارایی، تعیین شده باشد، مدل اولیهٔ مارکوویتز قادر به حل مسئله نخواهد بود (وودساید اوریاخی و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این‌ها جست‌وجوی مرز کارا با روش‌های مرسوم ریاضی تنها با تعداد اندکی دارایی در زمانی مطلوب ممکن است. به عبارت دیگر، در جست‌وجوی مرز کارا هنگامی که تعداد دارایی‌های مطرح‌شده در سبد از حد معینی بالاتر رود، راه‌حل‌های مرسوم ریاضی کارایی خود را از دست می‌دهند و به مسئلهٔ ان‌پی‌سخت تبدیل می‌شود (دنگ، لی و لو، ۲۰۱۲).

پژوهش حاضر به انتخاب سبد سهام کارا و ارائهٔ افق کارا به کمک الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی شکار می‌پردازد. الگوریتم جست‌وجوی شکار را افتاده و همکاران (افتاده، محجوب و شریعت‌پناهی، ۲۰۱۰) مطرح کردند که با الهام از جست‌وجوی دسته‌جمعی حیوانات شکارچی طراحی شده است. برای مثال، برمبنای حرکت گرگ‌ها به سوی شکار و جست‌وجوی بیشه برای یافتن آن، فضای جواب از مسیرهای متفاوت حل بررسی می‌شود. همان‌گونه که شکارچیان با گذشت زمان، حلقهٔ محاصره را به دور شکار خود تنگ‌تر می‌کنند، مسیرهای حل مختلف نیز به مرور به پاسخ نزدیک‌تر می‌شود و به کمک بازخورد گرفتن از حرکت سایر اعضای گروه، پاسخ بهینه را می‌یابند (افتاده و همکاران، ۲۰۱۰). تاکنون پژوهشی در زمینهٔ استفاده از الگوریتم جست‌وجوی شکار به‌منظور یافتن سبد سهام بهینه انجام نشده است و این مقاله نخستین مطالعه در این زمینه است. علاوه‌بر آن، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه‌شده با وجود

سرعت بالای ارائهٔ افق کارای سبد سهام، از دقت بالایی برخوردار است. ضمن آنکه در این پژوهش، فاصلهٔ مرز کارای حاصل از روش جست‌وجوی شکار با مرز کارای استاندارد محاسبه می‌شود.

در بخش دوم مقاله متون پیشینهٔ پژوهش مرور می‌شود. پیشینهٔ پژوهش در دو بخش پیشینهٔ نظری و پیشینهٔ تجربی ارائه می‌شود. در بخش سوم روش پژوهش تشریح می‌شود. قسمت اصلی این بخش گام‌های الگوریتم جست‌وجوی شکار برای حل مسئله را تبیین می‌کند. یافته‌های پژوهش در بخش چهارم تشریح و در بخش پنجم نیز نتایج پژوهش ارائه می‌شود.

مبانی نظری

تاکنون مدل میانگین- واریانس مارکوویتز هستهٔ اصلی پژوهش‌های بسیاری از پژوهشگران در این حوزه بوده است. اگرچه مدل اصلی مارکوویتز مدل ریاضی ساده‌ای است، اما مزیت اصلی آن قابلیت افزودن محدودیت‌های جدید برای بررسی شرایط واقعی بازار است (وودساید اوریاخی و همکاران، ۲۰۱۱).

نکتهٔ قابل توجه در تمامی مدل‌های گسترش‌یافته براساس مدل مارکوویتز، تابع هدف آن‌هاست. هدف اصلی این مدل‌ها، کمینه‌کردن میزان ریسک سرمایه‌گذاری برای سطح خاصی از بازده یا بیشینه‌کردن بازده برای سطح مشخصی از ریسک است (وودساید اوریاخی، ۲۰۱۱). این مدل‌ها را می‌توان به دو دستهٔ کلی تقسیم کرد: ۱. مدل‌سازی تک‌هدفه، ۲. مدل‌سازی چندهدفه[1]. در ادامه مدل‌های رایج حل مسئلهٔ بهینه‌سازی سبد سهام ارائه می‌شود.

مدل‌سازی تک‌هدفه

در این روش، دو تابع هدفِ بیشینه‌کردن سود و کمینه‌کردن ریسک، در قالب یک تابع قرارمی‌گیرند و یا به نحوی مدل‌سازی می‌شوند که هر دو تابع بهینه شوند. در ادامه به دو مدل رایج در پژوهش‌های حوزهٔ بهینه‌سازی سبد سهام که در قالب مدل‌سازی‌های تک‌هدفه دسته‌بندی می‌شوند، اشاره می‌گردد.

مدل ۱.

مدل ۱. تابع هدف مدل ۱ (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰) میزان ریسک حاصل از ترکیب سبد سهام را حداقل می‌کند. به عبارت دیگر، در بازده مشخصی (محدودیت اول) تنها یک نقطه را می‌توان یافت که کمترین ریسک را به دنبال دارد. محدودیت دوم سبب می‌شود که ترکیب سبد همیشه

1. Multi-objective

برابر کل سرمایه باشد و محدودیت آخر موجب می‌شود که دارایی‌های درون سبد مقداری بین صفر تا ۱ را اختیار کنند.

رابطهٔ ۱) $$Min\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}w_i w_j \sigma_{ij}$$

St:

رابطهٔ ۲) $$\sum_{i=1}^{N}w_i \mu_i = R$$

رابطهٔ ۳) $$\sum_{i=1}^{N}w_i = 1 \qquad i=1,2,3\ldots,N$$

مدل۲.

مدل ۲ (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰)با تغییر سطح λ از مقدار صفر تا یک، به حل و بهینه‌سازی مسئله می‌پردازد. هنگامی که ۰ = λ، بیشترین مقدار سود که تنها متعلق به یک دارایی (شرکت) است جواب بهنیه انتخاب می‌شود. با افزایش مقدار λ تا ۱، شرکت‌های دیگر نیز در ترکیب خرید سبد، سهم پیدا می‌کنند و هنگامی که ۱=λ، تعداد قابل ملاحظه‌ای از شرکت‌ها در ترکیب خرید حضور می‌یابند.

رابطهٔ ۴) $$Min:\lambda\left[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}w_i w_j \sigma_{ij}\right]-(1-\lambda)\left[\sum_{i=1}^{N}w_i \mu_j\right]$$

St:

رابطهٔ ۵) $$\sum_{i=1}^{N}w_i = 1$$

رابطهٔ ۶) $$0 \le w_i \le 1 \qquad i=1,2,3\ldots,N$$

مدل‌سازی چندهدفه. این روش با توجه به روش‌های مختلف مدل‌سازی چندهدفه، به مدل‌سازی مسئلهٔ بهینه‌سازی سبد سهام می‌پردازد و از روش‌های دقیق و فراابتکاری برای حل آن استفاده می‌شود.

مدل۳ .

مدل ۳ (آناگنوستوپولوس و میمنیس، ۲۰۱۰) به‌صورت هم‌زمان به حداقل‌کردن ریسک و حداکثرکردن سود می‌پردازد. بنابراین، در روش‌های حل این مدل، که عمدتاً فراابتکاری‌اند، مجموعه جواب به‌صورت هم‌زمان در جهت هر دو تابع هدف حرکت می‌کند و تابع بهینه می‌شود.

$$Opt: \mathrm{F}(x) = \left[f_1(x), f_2(x) \right] = \left[Min \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} w_i w_j \sigma_{ij}, \mathrm{Max} \sum_{i=1}^{N} w_i \mu_i \right] \quad \text{رابطهٔ ۷)}$$

St:

$$\sum_{i=1}^{N} w_i = 1 \quad \text{رابطهٔ ۸)}$$

$$0 \le w_i \le 1 \quad i=1,2,3...,N \quad \text{رابطهٔ ۹)}$$

پیشینهٔ پژوهش

تا قبل از ارائهٔ مدل میانگین- واریانس مارکوویتز، ریسک عاملی کیفی پنداشته می‌شد و در محاسبات منظور نمی‌شد. گرچه مدل مارکوویتز را می‌توان سرآغاز تحولی در نظریهٔ نوین سرمایه‌گذاری دانست، اما ضعف‌هایی دارد که در مدل‌های بعدی به تکامل رسید (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰). در سال ۱۹۶۳، ویلیام شارپ با تعریف پارامتر جدیدی به نام ضریب حساسیت به‌عنوان ریسک، مدلی را با عنوان «مدل تک‌شاخصی» ارائه کرد (شارپ، ۱۹۸۷). شارپ با تشریح ضریب حساسیت (β) به‌عنوان ریسک، محدودیت کاربرد CAPM و CMT دربارهٔ تک‌تک اوراق و محدودیت کاربرد در موارد تجربی را مرتفع کرد (اسلامی بیدگلی و هیبتی، ۱۳۷۵). گرچه مزیت هر دو مدل یادشده سادگی و کاهش داده‌های مورد نیاز بود، اما هر دو مفروضاتی داشتند که برخی از آن‌ها کاملاً غیرواقعی بود (اسلامی بیدگلی و تلنگی، ۱۳۷۸). از جملهٔ این مفروضات می‌توان به فرض یک‌دوره‌ای بودن افق زمانی سرمایه‌گذاران در مدل شارپ اشاره کرد (وودساید اوریاخی و همکاران، ۲۰۱۱).

پس از مدل شارپ، راس در دههٔ ۱۹۷۰ مدل قیمت‌گذاری دارایی‌های سرمایه‌ای[1] را ارائه کرد. وی مشکل درنظرگرفتن منابع غیربازاری ریسک در مدل شارپ را برطرف کرد (اسلامی بیدگلی و هیبتی، ۱۳۷۵).

می‌توان گفت که سه مدل بالا، مهم‌ترین گام را در مدل‌سازی مسئلهٔ بهینه‌سازی سبد سهام برداشتند. پس از آن‌ها، بخشی از پژوهش‌ها به تطبیق مدل‌های ارائه‌شده با مسائل واقعی پرداختند. برای مثال، مارینگر نشان داد که نرخ بازده را می‌توان به کمک تعداد مشخصی دارایی با دقتی نزدیک به در نظر گرفتن همهٔ دارایی‌ها و با تطابق بیشتری با شرایط واقعی به دست آورد (سلیمانی، گلمکانی و سعیدی، ۲۰۰۹). از آنجا که سرمایه‌گذاران نیز نشان داده بودند که سبد سهامی را ترجیح می‌دهند که تعداد دارایی محدودی را در بر داشته باشد، یکی از محدودیت‌های

1. Arbitrager Pricing Theory

سرمایه‌گذاری واقعی با عنوان «محدودیت تعداد دارایی موجود در سبد» به مدل‌ها اضافه شد (وودساید اوریاخی، ۲۰۱۱).

پژوهش‌های دیگر نیز محدودیت‌های واقعی بیشتری را به مدل‌های اولیه افزودند. از جملهٔ آن‌ها محدودیت حداقل و یا حداکثر میزان سرمایه در یک دارایی بود که بیل و فارست (۱۹۷۶) به آن پرداختند. قاسمی و نجفی (۱۳۹۱) انواع محدودیت‌های به‌کار گرفته‌شده را معرفی کردند. در بسیاری از نظریه‌های قوی امروزی، در میان محدودیت‌های به‌کاررفته در پژوهش‌ها، از دو محدودیت ذکرشده، به‌عنوان مهم‌ترین محدودیت‌ها سخن به میان می‌آید (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰).

مورال اسکودرو، لوییز توریبینو و سوآرز (۲۰۰۶) نشان دادند که وجود محدودیت میزان سرمایه‌گذاری در یک دارایی، معادلهٔ کوآدراتیک را به ان‌پی‌سخت تبدیل می‌کند و از توان حل آن به‌شدت می‌کاهد. چنگ نیز بر این موضوع تأکید کرد که مسئله در حضور محدودیت فوق، پاسخی ناپیوسته خواهد داشت (چنگ و دیگران، ۲۰۰۰).

پژوهش‌هایی نیز به حل مسئله با روش‌های جدید و کاراتر اختصاص یافته است که به‌طورکلی می‌توان آن‌ها را به دو دستهٔ الگوریتم‌های دقیق، و الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری دسته‌بندی کرد (وودساید اوریاخی، ۲۰۱۱). چنگ و همکارانش (۲۰۰۰) برای نخستین‌بار در پژوهشی جامع در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که می‌توان الگوریتم‌های فراابتکاری را برای حل مسئلهٔ ناپیوسته استفاده کرد. در این پژوهش از سه الگوریتم فرابتکاری ژنتیک، جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی تبریدی برای به دست آوردن سبد سهام کارا در شرایط واقعی استفاده کردند.

کراما و اسکینز (۲۰۰۳) برای مدل‌سازی سبد سهام کارا تحت محدودیت‌های واقعی، از شبیه‌سازی تبریدی استفاده کردند. دریگز و نیکل (۲۰۰۳) نیز به‌طور هم‌زمان کاری مشابه با آن ارائه کردند که تفاوت آن با پژوهش کراما در نوع محدودیت‌های مفروض در مسئله بود.

چنگ و همکارانش راه حلی به کمک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله ارائه کردند. در این پژوهش تابع هدف مسئله با یک تابع وزنی میان نرخ بازده و ریسک جایگزین شد (چنگ، یانگ و چنگ، ۲۰۰۹). برای مدل‌سازی نسبت سرمایه‌گذاری، سلیمانی و همکارانش رویکردی را براساس الگوریتم ژنتیک طراحی کردند که به مدل چنگ شباهت داشت (سلیمانی، گلمکانی و سعیدی، ۲۰۰۹).

مارینگر و کلر (۲۰۰۳) با ارائهٔ رویکردی که از ترکیب الگوریتم متاهیوریستیک شبیه‌سازی تبریدی و نظریهٔ تکاملی به دست آمده بود، مسئلهٔ سبد سهام کارا را با جایگزین‌کردن دارایی‌های بهتر در سبد سهام حل کردند.

گوانگ در سال ۲۰۱۲ توانست برای بهینه‌سازی سبد سهام از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات[1] استفاده کند (ژو، ونگ، ونگ و چن، ۲۰۱۱).

از جمله نخستین پژوهش‌هایی که به بهینه‌سازی سبد سهام بازار بورس ایران به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته‌اند، می‌توان به مقالهٔ عبدالعلی‌زاده و همکارانش اشاره کرد، که از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئلهٔ سبد سهام کارا در بازار بورس ایران استفاده کردند (عبدالعلی‌زاده شهیر و عشقی، ۱۳۸۲). در این مطالعه برای الگوریتم ژنتیک، چهار حالت مختلف تعریف شده و مسئله برای حالات مختلف حل شده است.

در سال ۱۳۸۹ راعی و همکارش از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای بهینه‌سازی سبد سهام در بازار بورس ایران استفاده کردند (راعی و علی‌بیگی، ۱۳۸۹). در این مطالعه از رویکرد میانگین- نیم‌واریانس استفاده شده و با یافتن ۵۰ نقطه توسط الگوریتم، مرز کارای سبد به دست آمده است.

در پژوهش دیگری که در سال ۱۳۸۹ راعی و همکارانش انجام دادند مرز کارای سبد سهام با الگوریتم بهینه‌سازی حرکت تجمعی ذرات به دست آمد (راعی، محمدی و علی‌بیگی، ۱۳۸۹). الگوریتم روی داده‌های بورس ایران اجرا می‌شود و در حالت‌های مختلف به جست‌وجوی مرز کارا می‌پردازد. نتایج پژوهش نیز نشان می‌دهد که الگوریتم برای جست‌وجوی مرز کارا در زمان مناسب، از دقت خوبی برخوردار است.

پژوهش‌های بسیاری برای به کار بردن الگوریتم‌های فراابتکاری انجام شده است. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که الگوریتم‌های فراابتکاری توانسته‌اند با دقت مناسب نسبت به راه حل دقیق ریاضی مسئله، به حل آن بپردازند (چنگ و دیگران، ۲۰۰۰).

علاوه بر الگوریتم‌های ارائه‌شده برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی مسئله، روش‌های متعددی برای مدل‌سازی مسئله با برنامه‌ریزی آرمانی نیز ارائه شده که اسلامی بیدگلی و تلنگی به تشریح مهم‌ترین آن‌ها پرداخته‌اند (اسلامی بیدگلی و تلنگی، ۱۳۷۸). برای توضیح مختصر این روش نیز باید اشاره کرد که روش برنامه‌ریزی آرمانی علاوه بر برآورده‌کردن محدودیت‌های خطی مسئله به بررسی آرمان‌های سرمایه‌گذار و اولویت‌دهی به آن‌ها می‌پردازد. گرچه در پژوهش‌های مختلف، توانمندی برنامه‌ریزی آرمانی در مسائل این حوزه به اثبات رسیده است

---

1. PSO

(میترا، گواتام و کیریاکیس، ۲۰۰۱)، اما این روش نیز با مشکلاتی همراه است. برای مثال، پیش‌زمینهٔ مهم برای برنامه‌ریزی آرمانی، اطلاعات تفصیلی دربارهٔ اولویت‌های سرمایه‌گذار است که جست‌وجوی جواب را با دشواری‌هایی همراه می‌کند. بنابراین، اخیراً پژوهش‌هایی برای رفع مشکلات مطرح‌شده ارائه شده است (آذر، راموز و عاطفت‌دوست، ۱۳۹۱).

روش پژوهش

همان‌گونه که پیش از این نیز بدان اشاره شد، این پژوهش با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی شکار به یافتن مرز کارا می‌پردازد. در این بخش الگوریتم جست‌وجوی شکار تشریح می‌شود.

الگوریتم جست‌وجوی شکار را افتاده و همکارانش ابداع کردند (افتاده و همکاران، ۲۰۱۰). ایدهٔ اولیهٔ آن الهام‌گرفته از حرکت دسته‌جمعی حیوانات شکارچی به سوی شکار است.

علت به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی شکار برای حل مسئلهٔ سبد سهام بهینه را باید در شباهت فراوان فضای مسئله و ساختار پاسخ‌های مورد نیاز دانست. در مسئلهٔ پژوهش‌شده، مرز کارا از نقاطی تشکیل می‌شود که هریک از آن‌ها میزان سرمایه‌گذاری در شرکت‌ها را مشخص می‌کند به‌طوری‌که در ازای مقدار معینی از ریسک، سود سرمایه‌گذاری را بیشینه کنند. به عبارت دیگر، نقاط بهینه یا پاسخ‌ها، به‌مثابهٔ شکارهای پنهان‌شده در بیشه است و شکارچیان نیز به‌مثابهٔ پاسخ‌های اولیه تا رسیدن به نقطهٔ بهینه یا همان شکارند.

شرح کلی الگوریتم جست‌وجوی شکار

در این بخش الگوریتم جست‌وجوی شکار براساس رویهٔ ارائه‌شدهٔ افتاده و همکاران (۲۰۱۰) تشریح می‌شود. حرکت حیواناتی مثل شیرها و گرگ‌ها به این صورت است که ابتدا مکان شکار را در بیشه تخمین می‌زنند، سپس از اطراف به‌آرامی به شکار نزدیک می‌شوند به‌طوری‌که حلقه محاصره اطراف شکار خود ببندند.

در طول حرکت شکارچیان به سوی شکار، هر کدام از شکارچیان که حس کند شکار به او نزدیک‌تر باشد بقیهٔ شکارچیان را به مکان تقریبی هدایت می‌کند. این کار بارها تکرار می‌شود تا حلقهٔ محاصره تنگ‌تر شود. درنهایت، شکار که راهی برای گریز ندارد به دام می‌افتد.

حال اگر فضای جواب‌های شدنی مسئله را بیشه و جواب بهینه را شکار در نظر بگیریم، جواب‌های تصادفی که در اطراف فضای شدنی تعریف می‌شوند نیز نقش شکارچیان را خواهند داشت که به‌ترتیب ذکر شده حرکت می‌کنند.

در مقایسهٔ شرایط الگوریتم طراحی‌شده با شرایط شکار واقعی، دو تفاوت عمده وجود دارد. نخست اینکه در شکار واقعی شکارچیان می‌توانند مکان شکار را ببینند اما در مسائل، مشخص نیست که نقطهٔ بهینه دقیقاً کجا قرار دارد. دومین تفاوت این است که در شکار واقعی، طعمه با آگاه‌شدن از شرایط خطر، تغییر وضعیت می‌دهد و برای گریز از مهلکه تلاش می‌کند، درحالی‌که در مسائل، نقطهٔ بهینه ثابت است و مکانش تغییری نمی‌کند.

در توضیح این دو نکته، افتاده و همکارانش دو راه حل ارائه داده‌اند. برای رویارویی با مشکل اول یعنی آگاهی از مکان نقطهٔ بهینه، تابع برازندگی تعریف شده است که در هر مرحله نشان‌دهندهٔ مکان نسبی هدف است. در مورد انطباق‌نداشتن دوم نیز باید گفت که تغییرنکردن مکان پاسخ در مسائل، در مقایسه با فرار طعمه در شکار واقعی، مسلماً کار جست‌وجو را ساده‌تر می‌کند و الگوریتم سریع‌تر می‌تواند پاسخ بهینه را بیابد. درنتیجه مورد دوم را می‌توان از مزایای نسبی شرایط مسائل، در مقایسه با شرایط واقعی شکار به حساب آورد.

گام‌های الگوریتم جست‌وجوی شکار

گام اول

در آغاز حل، چند پارامتر مهم و اساسی مسئله تعیین و مقداردهی می‌شوند. از جملهٔ این پارامترها MML است که به مفهوم حداکثر حرکت به سوی رهبر شکارچیان[1] در هر گام است. در هر مرحله، با ضرب MML در یک عدد تصادفی، میزان دقیق حرکت به سوی رهبر شکارچیان تعیین می‌شود. EN یا تعداد دوره‌ها[2] نیز متغیری است که تعداد تکرار گام‌ها را تا رسیدن به نقطهٔ بهینه تعیین می‌کند. از جمله پارامترهای مهم HG است، که گروه شکارچیان[3] یا پاسخ‌های اولیه را نشان می‌دهد (افتاده و همکاران، ۲۰۱۰).

گام دوم

در این مرحله مکان اولیهٔ گروه شکارچیان تعیین می‌گردد که در سایر الگوریتم‌ها به‌منزلهٔ جمعیت اولیه نیز از آنها یاد می‌شود. از آنجا که پاسخ این مسئله، تعیین نقطه‌ای است که بهترین ترکیب از سهام شرکت‌ها را نشان می‌دهد، به تعداد شرکت‌های موجود در مسئله، جواب تصادفی اولیه تولید می‌شود. درنتیجه، شکارچیان خواهند توانست در تمام گوشه‌های فضای جواب تقسیم شوند. بدین ترتیب، شکارچیان به‌صورت هوشمندانه‌تری نسبت به الگوریتم اصلی تقسیم شده‌اند.

---

1. Maximum Movement to the Leader
2. Epoch Number
3. Hunting Group

گام سوم

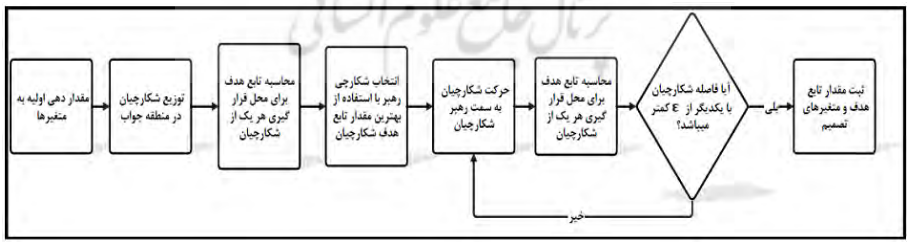
در مرحلهٔ سوم، وضعیت هر یک از جواب‌های اولیه توسط یک تابع برازندگی بررسی می‌شود و بهترین پاسخ، رهبر شکارچیان در آن گام تعیین می‌شود. پس از تعیین رهبر شکارچیان، همهٔ شکارچیان با توجه به پارامتر MML و عددی تصادفی که در گام یک بدان اشاره شد، به سمت رهبر شکارچیان آن گام حرکت می‌کنند (افتاده و دیگران، ۲۰۱۰).

$$x_i^{/} = x_i + \left(rand \times mml \times \left(x_i^L - x_i \right) \right)$$ رابطهٔ ۱۰)

رابطهٔ ۱۰ نشان می‌دهد که پارامتر i ام هر شکارچی، چگونه نسبت به پارامتر i ام رهبر شکارچیان و با توجه به عدد تصادفی به‌دست‌آمده تغییر می‌کند. پارامتر i ام رهبر شکارچیان در هر گام با X_i^L و مکان جدید هر شکارچی با $X_i^{/}$ متمایز شده‌اند. مجدداً این گام تکرار می‌شود و با محاسبهٔ تابع برازندگی برای همهٔ پاسخ‌های مرحلهٔ قبل، یک رهبر برای گام بعدی تعیین می‌شود. این روند آنقدر تکرار می‌شود تا همهٔ شکارچیان در فاصلهٔ مشخصی مثل ε نسبت به رهبر شکارچیان قرار بگیرند. در مسئلهٔ حاضر تابع هدف مدل، نقش تابع برازندگی را ایفا می‌کند (افتاده و دیگران، ۲۰۱۰).

گام چهارم

در گام نهایی، به‌منظور تصحیح مکان شکارچیان، بهینگی پاسخ به‌دست‌آمده مجدداً بررسی می‌شود. بدین منظور شکارچیان در فاصله‌ای مشخص از طعمهٔ پخش‌شده و گام سوم تکرار می‌شود. این کار به‌منظور اطمینان‌یافتن از صحت شکار انجام می‌شود. چنانچه مجدداً همان نقطه حاصل شد، پاسخ به‌ازای یکی از λها به‌دست‌آمده است. شکل ۱ شمایی از مراحل الگوریتم شکار را بازگو می‌کند (افتاده و دیگران، ۲۰۱۰).



شکل ۱. فرایند الگوریتم جست‌وجوی شکار

در این پژوهش، از مدل ۲ استفاده شده است که در بخش پیشینهٔ نظری تشریح شد. بنابراین، به‌ازای هر λ، تمامی گام‌های فوق تکرار می‌شود و به تعداد λها، نقطهٔ بهینهٔ روی افق کارا خواهیم داشت.

یافته‌های پژوهش

مطالعهٔ موردی

این قسمت به کاربرد روش ارائه‌شده برمبنای الگوریتم جست‌وجوی شکار، برای به دست آوردن مرز کارای ۳۰ شرکت بزرگ بورس ایران، در بازه زمانی ۱۳۸۹/۳/۱ الی ۱۳۹۰/۳/۱ می‌پردازد. میانگین بازده و انحراف معیار بازده هر شرکت، از قیمت روزانه در دورهٔ یک‌سالهٔ آن، به دست آمده است. این اطلاعات را در جدول ۱ می‌توان دید.

جدول ۱. داده‌های ۳۰ شرکت بورس ایران در بازه زمانی ۱۳۸۹/۳/۱ تا ۱۳۹۰/۳/۱

ردیف	نام شرکت	میانگین بازده	انحراف معیار بازده	ردیف	نام شرکت	میانگین بازده	انحراف معیار بازده
۱	اخابر	۰/۰۰۲۷۳	۰/۰۱۷۸۸	۱۶	ومعادن	۰/۰۰۳۲۱	۰/۰۲۰۸۵
۲	فملی	۰/۰۰۲۹۲	۰/۰۲۰۰۷	۱۷	وکار	۰	۰/۰۲۴۸۸
۳	فولاد	۰/۰۰۱۳۸	۰/۰۳۳۲۶	۱۸	خبهمن	۰/۰۰۴۶۹	۰/۰۳۷۶۳
۴	کچاد	۰	۰/۰۵۱۱	۱۹	وبانک	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۰۵
۵	وپارس	۰/۰۰۲۴	۰/۰۲۰۶	۲۰	شفن	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۰۶۶
۶	وغدیر	۰/۰۰۳۱۸	۰/۰۴۲۱۶	۲۱	شبهرن	۰	۰/۰۴۰۹۲
۷	وبملت	۰/۰۰۱۶۲	۰/۰۱۸۶۴	۲۲	حفاری	۰	۰/۰۲۳۲۸
۸	رمپنا	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۲۴۷۲	۲۳	بترانس	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۱۹۳
۹	کگل	۰	۰/۰۵۱۱۲	۲۴	شاراک	۰/۰۰۲۵۷	۰/۰۲۷۹۷
۱۰	خسایپا	۰/۰۰۲۶۵	۰/۰۳۰۱۲	۲۵	ونیکی	۰/۰۰۳۹۱	۰/۰۲۳۳۸
۱۱	خودرو	۰/۰۰۴۹	۰/۰۲۵۱۴	۲۶	وتوسم	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۷۳۲
۱۲	شپنا	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۸۶۵	۲۷	وصندوق	۰/۰۰۳۹۹	۰/۰۳۱۲۴
۱۳	ونوین	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۱۶۷۲	۲۸	وساپا	۰/۰۰۴۳۸	۰/۰۵۲۰۶
۱۴	فخوز	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۱۶۷۲	۲۹	ورنا	۰/۰۰۱۲۹	۰/۰۲۱۳۵
۱۵	شخارک	۰/۰۰۲۴۱	۰/۰۱۷۲۱	۳۰	سفارس	۰	۰/۰۱۸۶

شبه‌کد الگوریتم شکار

به‌منظور مرور راه حل، شبه‌کد[1] الگوریتم ارائه می‌شود. به‌منظور فهم بهتر مدل حاضر، شبه‌کد با زبان ساده و دور از پیچیدگی‌های موجود در برنامه‌نویسی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

Begin
While $\lambda \leq 1$
تعیین محل اولیهٔ شکارچیان
For $i=1$ to EN
For $k = 1$ to HG
Compute $f(X^K)$
End For
تعیین رهبر این گام
For each hunter
$X_j^k = X_j^k + (MML \times Rand \times (X_j^L - X_j^k))$
End For
End For
$\lambda=\lambda+\Delta\lambda$
End While
End

در این شبه‌کد، برای EN مقدار ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد با این عدد می‌توان به دقت مناسبی دست پیدا کرد. پیش از این نیز در توضیح الگوریتم شکار اشاره شد که این متغیر نشان‌دهندهٔ تعداد گام‌هایی است که در ازای هر λ طی می‌شود. HG که معرف تعداد شکارچیان یا تعداد جواب‌های اولیه است، به اندازهٔ تعداد شرکت‌ها، یعنی مقدار ۳۰ در نظر گرفته شده است.

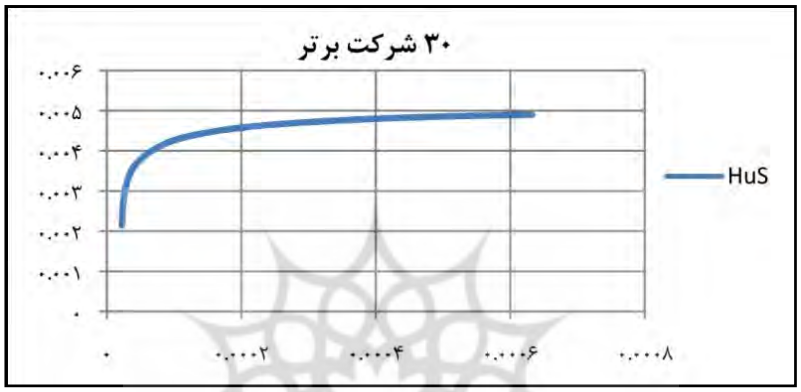
MML نیز نشان‌دهندهٔ میزان حداکثر گامی است که هر شکارچی در هر گام می‌تواند طی کند و در حل مسئلهٔ مذکور از رابطهٔ ۱۱ برآورد شده است. ضمن آنکه در حل ارائه‌شده تعداد lambda =۱۰۰ بوده است.

$$MML = 0.5 / HG \qquad \text{رابطهٔ ۱۱)}$$

1. Pseudocode

در مدل‌سازی مسئله همانند بورس هنگ‌سنگ، از مدل ۲ برای بهینه‌سازی و یافتن مرز کارا استفاده شده است. در شکل ۲ مرز کارای مورد نظر را می‌توان ملاحظه کرد.

گفتنی است برای یافتن این مرز از روش رایانه‌ای با پردازندهٔ ۲/۲ گیگاهرتز و 2G RAM استفاده شد و زمان حل ۱۶/۹ ثانیه به طول انجامید. مرز کارای به‌دست‌آمده برای مسئله را در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۲. مرز کارای به‌دست آمده از الگوریتم شکار

برای آنکه بتوان تحلیل واضح‌تری از مرز کارای به‌دست‌آمده حاصل کرد، در جدول ۲ نقاطی به‌طور نمونه و به‌ازای λ های مختلف، به تصویر کشیده شده است. هر نقطه روی منحنی کارا، نشان‌دهندهٔ ترکیبی بهینه از سهام شرکت‌های مختلف است که به‌ازای هر λ به دست آمده است.

جدول ۲. چند پاسخ به‌دست‌آمده از الگوریتم جست‌وجوی شکار

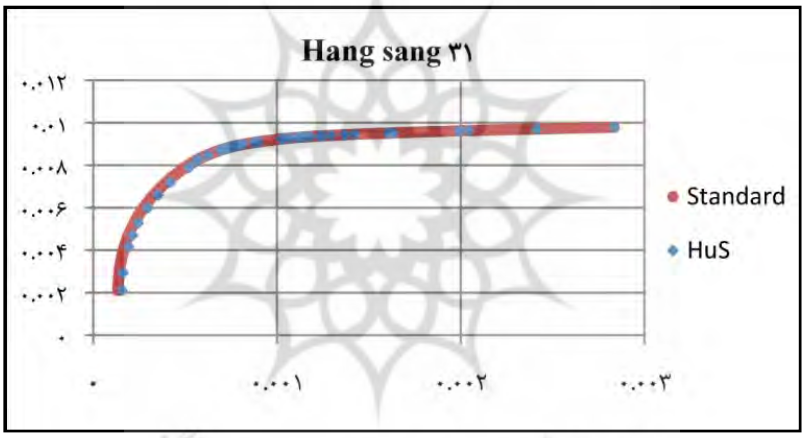
ردیف	بازده	ریسک	شمارهٔ دارایی و مقدار سرمایهٔ تخصیص داده‌شده از سرمایهٔ کل									
۱	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۰۵	۱۱	۱۸	–	–	–	–	–	–	–	–
			۰/۸۴۸۲	۰/۱۴۴	–	–	–	–	–	–	–	–
۲	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۰۲	۱۱	۱۸	۱۹	۲۰	۲۵	۲۷	۲۸	–	–	–
			۰/۳۶۱۴	۰/۰۹۹۲	۰/۲۳۱۱	۰/۱۵۷	۰/۰۷۸	۰/۰۴۷۸	۰/۰۲۴۱	–	–	–
۳	۰/۰۰۴۲	۹E-۰۵	۲	۱۱	۱۶	۱۸	۱۹	۲۰	۲۳	۲۵	۲۷	۲۸
			۰/۰۰۷۶	۰/۱۷۳	۰/۰۷۸	۰/۰۴۹	۰/۲۰۰	۰/۱۴۴۲	۰/۱۱۶۶	۰/۱۳۱	۰/۰۵۸	۰/۰۴

در ردیف ۱ جدول ۲ هنگامی که بازدهی برابر ۰/۰۰۴۸ مورد انتظار باشد می‌بایست ۸۴درصد از کل سرمایه به شرکت شمارهٔ ۱۱ یعنی «خودرو» و ۱۴درصد آن بـه شـرکت شـمارهٔ ۱۸ یعنـی «خبهمن» تخصیص داده شده است.

آزمون کارایی

مهم‌ترین نکته در به‌کارگیری هر الگوریتم، بررسی میزان کارایی آن است. در این مقالـه نیـز بـه حل دو مثال از معتبرترین مراجع استخراج‌شده اشاره می‌شود (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰). کـارایی این روش به‌وسیلهٔ نمودار و جدول فاصله از استاندارد بررسی شده است.

اطلاعات به‌کار گرفته‌شده در این آزمون شامل[1]: ۱. شاخص ۳۱ Hang Sang هَنـگ‌سَـنگ، که ۳۱ شرکت دارد؛ ۲. شاخص DAX۱۰۰ آلمان که دربرگیرندهٔ ۸۵ شرکت است.

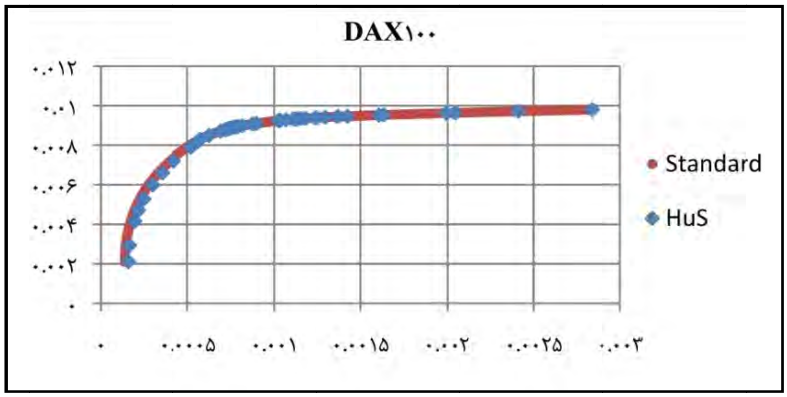


شکل ۳. نمودار مقایسهٔ توان‌مندی الگوریتم جست‌وجوی شکار برای شاخص ۳۱ Hang Sang هنگ‌سنگ

اطلاعات فوق شامل ۲۰۰۰ نقطه روی خط کارای دو شاخص فوق و میانگین بازده و انحراف از استاندارد هر یک از شاخص‌هاست. این اطلاعات از قیمت هفتگی بازارهای قیـدشـده در بـازه زمانی مارس ۱۹۹۲ الی سپتامبر ۱۹۹۷ استخراج شده است.

---

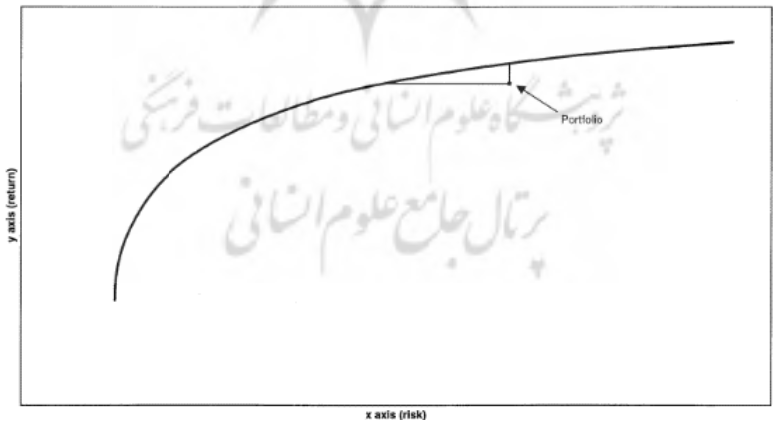
۱. اطلاعات آزمون کارایی از آدرس زیر برداشت شده‌اند:
http://people.brunel.ac.uk/mastjjb/jeb/orlibportinfo.html



شکل ٤. نمودار مقایسهٔ توانمندی الگوریتم جست‌وجوی شکار برای شاخص DAX۱۰۰ آلمان

برای محاسبهٔ میزان انحراف، از مدل ارائه‌شده در پژوهش چنگ و همکارانش الگو گرفته شده است (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰). برای به دست آوردن انحرافات از استاندارد، اگر X انحراف معیار پرتفوی و Y بازده آن باشد، انحراف از استاندارد که همان خط افق کارامد به‌دست‌آمده از روش‌های دقیق است، از مینیمم فاصلهٔ خطی افقی و عمودی پرتفوی تا مرز کارا به دست می‌آید (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰).

این مفهوم در شکل۵ تصویر شده است.



شکل ۵. نحوهٔ محاسبهٔ انحراف استاندارد

با توجه به روش تشریح داده‌شده، فاصلهٔ مرز کارای حاصل از روش جست‌وجوی شکار با مرز کارای استاندارد به‌صورت دقیق محاسبه شد. جدول ۳، مقدار این فاصله را برای دو آزمون کارایی انجام‌شده، ارائه می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که الگوریتم از دقت بالایی برای ارائه مرز کارا برخوردار است.

جدول ۳. اطلاعات اجرای الگوریتم در بررسی آزمون کارایی

نام شاخص بورس	سرعت (ثانیه)	تعداد نقاط روی مرز کارا	میانگین انحراف از استاندارد	میانه انحراف از استاندارد	بیشینهٔ انحراف از استاندارد
Hang sang 31	۵/۴۶	۵۰	۰/۰۰۰۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۰۱۷۹
DAX 100	۳۸/۷۸	۵۰	۰/۰۰۰۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۰۱۷۹

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر مرز کارای سبد سهام را با رویکرد میانگین- واریانس و با استفاده از الگوریتم جدیدی با نام جست‌وجوی شکار به دست آورد. به‌منظور به دست آوردن مرز کارا با روش مذکور از داده‌های ۳۰ شرکت بزرگ در بورس ایران در بازه زمانی ۱۳۸۹/۳/۱ الی ۱۳۹۰/۳/۱ استفاده شد. از آنجا که λ=۱۰۰، مرز کارا به‌وسیلهٔ ۱۰۰ نقطه به دست آمد. هر یک از این ۱۰۰ نقطه، نحوهٔ سرمایه‌گذاری در ۳۰ شرکت یادشده در بورس ایران را به نحوی نشان می‌دهد که میزان بازده سبد سرمایه‌گذاری را در ازای مقدار معین از ریسک حداکثر کند. به عبارت دیگر، به دست آوردن مرز کارا با دقت بالا، این فرصت را به سرمایه‌گذار می‌دهد تا در هر وضعیتی از ریسک‌پذیری، میزان بازده مورد انتظار خود را حداکثر کند. نتایج مرز کارای به‌دست‌آمده در قالب نموداری در شکل ۲ و با بررسی چند نقطه بر روی مرز کارا در جدول ۲ ارائه شد.

به‌منظور بررسی میزان توانمندی الگوریتم، از دو نمونهٔ موردی ذکرشده در متون موضوع استفاده شد. نمونهٔ اول شاخص ۳۱ Hang Sang هنگ‌سنگ، که ۳۱ شرکت دارد و نمونهٔ دوم شاخص DAX۱۰۰ آلمان که دربرگیرندهٔ ۸۵ شرکت است. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم با نتایج استاندارد در نمودارهای شکل ۳ و ۴، نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته در مدت زمانی بسیارکوتاه و دقتی بسیار بالا، مرز کارای این دو شاخص را به دست آورد. با مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳، در مقابل نتایجی که چنگ و همکارانش از به کار بردن الگوریتم‌های ژنتیک، جست‌وجوی ممنوعه و شبیه‌سازی آنیلینگ به دست آوردند (چنگ و همکاران، ۲۰۰۰)، به

جرئت می‌توان قدرت الگوریتم جست‌وجوی شکار را در حل مسئله تأیید کرد. مقایسهٔ نتایج جدول ۳ با نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد که علاوه بر آنکه سرعت حل از ۴۷۰ ثانیه تا کمتر از ۶ ثانیه در شاخص Hang Sang ۳۱، و از ۹۵۰۰ ثانیه تا کمتر از ۴۰ ثانیه در شاخص DAX۱۰۰ بهبود یافته است، میانگین انحراف از استاندارد نیز در هر دو شاخص ۱۰۰ هزار برابر کاهش یافته است.

در مقایسهٔ پژوهش حاضر با پژوهش‌هایی که در پیشینهٔ تجربی به مهم‌ترین آن‌ها اشاره شد، مقالهٔ حاضر، نخستین پژوهشی است که برای به دست آوردن سبد سهام کارا از الگوریتم شکار استفاده می‌کند. علاوه بر آن، به‌منظور آزمون کارایی الگوریتم، دو مثال معتبر Hang Sang ۳۱ و Dax۱۰۰ نیز با الگوریتم حل شد. استفاده از آزمون کارایی فوق، به‌صورتی دقیق میزان توان‌مندی الگوریتم استفاده‌شده را برای حل مسائل معیار نمایان می‌سازد. با وجود نیاز پژوهش به اثبات توانمندی الگوریتم در حل مسائل معیار، کمتر پژوهشی در بورس ایران را می‌توان یافت که به روش فوق به اثبات توان‌مندی الگوریتم خود پرداخته باشد. افزون بر مزیت یادشده، فاصلهٔ مرز کارای حاصل از روش جست‌وجوی شکار با مرز کارای استاندارد محاسبه شد، که در اغلب پژوهش‌ها به بررسی بصری اکتفا شده است. علاوه بر این‌ها، گرچه ویژگی سیستم‌های رایانه‌ای استفاده‌شده در مقالات مختلف، متفاوت است، اما بررسی نتایج مطالعهٔ موردی نشان می‌دهد که الگوریتم جست‌وجوی شکار، برای حل مسائل بهینه‌سازی سبد سهام، از سرعت بالایی برخوردار است.

نوآوری دیگر پژوهش حاضر را باید در جدیدبودن الگوریتم فراابتکاری استفاده‌شده بررسی کرد. از آنجا که الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی شکار به‌تازگی ابداع شده، مقالهٔ حاضر را می‌توان در زمرهٔ نخستین پژوهش‌هایی به حساب آورد که از آن بهره گرفته است.

با توجه به توان‌مندی الگوریتم در حل مسئلهٔ سبد سهام کارا، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، محدودیت‌های شرایط واقعی به مدل افزوده شود. محدودیت حداقل میزان سرمایه‌گذاری در یک سهم و محدودیت حداکثر تعداد شرکت‌ها در سبد بهینه از جملهٔ این محدودیت‌هایند. علاوه بر محدودیت‌های یادشده، می‌توان پیشنهاد کرد که در پژوهش‌های بعدی تمامی محدودیت‌های مطرح در مسئله (قاسمی و نجفی، ۱۳۹۱)، همچون محدودیت‌های حداکثر فروش استقراضی و محدودیت حفظ تنوع بخشی پرتفوی نیز به مسئله افزوده شود و توان‌مندی الگوریتم جدید در حل تمامی محدودیت‌ها با الگوریتم‌های پیشین مقایسه شود.

منابع

آذر، ع.؛ راموز، ن. و عاطفت دوست، ع. (١٣٩١). کاربرد روش تخمین مجموعهٔ غیرمرجح در انتخاب پرتفوی بهینه (مطالعهٔ موردی: بورس اوراق بهادار تهران). *فصلنامهٔ تحقیقات مالی*، ١۴ (٢): ١۴-١.

اسلامی بیدگلی، غ. و هیبتی، ف. (١٣٧۵). مدیریت پورتفوی با استفاده از مدل شاخصی. *فصلنامه تحقیقات مالی*، ٣ (٩ و ١٠): ٢۵-۶.

اسلامی بیدگلی، غ. و تلنگی، ا. (١٣٧٨). مدل‌های برنامه‌ریزی آرمانی در انتخاب پورتفوی بهینه. *فصلنامهٔ تحقیقات مالی*، ۴ (١٣و١۴): ٧١-۵٠.

راعی، ر. و علی‌بیگی، ه (١٣٨٩). بهینه‌سازی پورتفوی سهام با استفاده از روش حرکت تجمعی ذرات. *فصلنامهٔ تحقیقات مالی*، ١٢ (٢٩): ۴٠-٢١.

راعی، ر.؛ محمدی، ش. و علی‌بیگی، ه (١٣٨٩). بهینه‌سازی سبد سهام با رویکرد میانگین- نیم‌واریانس و با استفاده از روش جست‌وجوی هارمونی. *فصلنامهٔ پژوهش‌های مدیریت در ایران*، ١۵ (٣): ١٢٨-١٠۵.

عبدالعلی‌زاده شهیر، س. و عشقی، ک. (١٣٨٢). کاربرد الگوریتم ژنتیک در انتخاب یک مجموعه دارایی از سهام بورس اوراق بهادار. *فصلنامهٔ پژوهش‌های اقتصادی*، ۵ (١٧): ١٩٢- ١٧۵.

قاسمی، ح. و نجفی، ا. (١٣٩١). بهینه‌سازی پرتفوی سهام در شرایط مجازبودن فروش استقراضی و برخی محدودیت‌های کاربردی بازار سرمایه. *فصلنامهٔ تحقیقات مالی*، ١۴ (٢): ١٣٢- ١١٧.

Anagnostopoulos, K. P. & Mamanis, G. (2010). Using Multiobjective Algorithms to Solve the Discrete Mean-Variance Portfolio Selection. *International Journal of Economics and Finance*, 2(3):152-162.

Beale, E. M. L. & Forest, J. J. H. (1976). Global optimization using special ordered sets. *Mathematical Programming*, 10 (1): 52-69.

Chang, T. J., Meade, N., Beasley, J. E. & Sharaiha, Y. M. (2000). Heuristics for cardinality constrained portfolio optimization. *Computers & Operations Research*, 27 (13): 1271-1302.

Chang, T. J., Yang, S. C. & Chang, K. J. (2009). Portfolio optimization problems in different risk measures using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36 (7): 10529–10537.

Crama, Y. & Schyns, M. (2003). Simulated annealing for complex portfolio selection problems. *European Journal of Operational Research*, 150 (3): 546-571.

Deng, G. F., Lin, W. T. & Lo, C. C. (2012). Markowitz-based portfolio selection with cardinality constraints using improved particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 39 (4): 4558–4566.

Derigs, U. & Nickel, N. H. (2003). Meta-heuristic based decision support for portfolio optimization with a case study on tracking error minimization inpassive portfolio management. *OR Spectrum*, 25 (3): 345-378.

Moral-Escudero, R., Ruiz-Torrubiano, R. & Suarez, A. (2006). Selection of optimal investment Portfolios with cardinality constraints. *In Proceedings of the 2006 IEEE Congresson Evolutionary Computation*, 2382-2388. DOI: 10.1109/CEC.2006.1688603

Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection.*The Journal of Finance*, 7 (1):77-91.

Maringer, D. & Kellerer, H. (2003). Optimization of cardinality constrained portfolios with a Hybrid local search algorithm. *OR Spectrum*, 25 (4): 481-495.

Maringer, D. (2005). *Portfolio Management with Heuristic Optimization*, Netherlands, Springer.

Mitra, G., Kyriakis, T. and Lucas, C. (2001). *A Review of portfolio planning models and systems*. Center for the Analysis Risk and optimization Modeling Applications. Heinemann: Oxford.

Soleimani, H., Golmakani, H. R. & Salimi, M. H. (2009). Markowitz-based portfolio selection with minimum transaction lots, cardinality constraints and regarding sector capitalization using genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36 (3): 5058-5063.

Oftadeh, R., Mahjoob, M. J. & Shariatpanahi, M. (2010). A novel meta-heuristic optimization algorithm inspired by group hunting of animals: Hunting search. *Computers and Mathematics with Applications*, 60 (7): 2087-2098.

Sharp, W. F. (1987). *Investment. Englewood Cliffs*, Prantice Hall.

Woodside-Oriakhi, M., Lucas, C. & Beasley, J. E. (2011). Heuristic algorithms for the cardinality constrained efficient frontier. *European Journal of Operational Research*, 213 (3): 538-550.

Woodside-Oriakhi, M. (2011). *Portfolio Optimisation with Transaction Cost (thesis)*, London, School of Information Systems, Computing and Mathematics Brunel University.

Zhu, H., Wang, Y., Wang, K. & Chen, Y. (2011). Particle Swarm Optimization (PSO) for the constrained portfolio optimization problem. *Expert Systems with Applications*, 38 (8): 10161–10169.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی