فصل‌نامه مطالعاتی در مدیریت بانکی و بانکداری اسلامی

مؤسسه عالی آموزش بانکداری ایران
بهار ۱۴۰۲، دوره ۹، شماره ۲۲، صفحه ۱۲۵-۱۵۲

طراحی مدل بهینه‌سازی پرتفوی اعتباری چند دوره‌ای با اهداف چندگانه در صنعت بانکداری تحت رویکرد تئوری اعتبار فازی

علی اصغر طهرانی‌پور [*۱]
ابراهیم عباسی [۲]
برات کریمی [۳]
فیروز یازرلو [۴]

چکیده

هدف از اجرای این پژوهش طراحی الگوی بهینه‌سازی سبد اعتباری در صنعت بانکداری با استفاده از الگوریتم فراابتکاری است. ریسک یکی از مفاهیم پایه‌ایِ بازارهای مالی است که پیچیدگی‌های خاصی دارد. با توجه به اینکه تصویر دقیقی از تحقق ریسک وجود ندارد، بازارهای مالی به رویکردهای کنترل و مدیریت ریسک نیازمندند. پژوهش حاضر از لحاظ جمع‌آوری اطلاعات، توصیفی و از لحاظ هدف، از نوع توسعه‌ای ـ کاربردی است. جامعه آماری آن کلیه پرونده‌های تسهیلاتی ۱۰ سال اخیر و همچنین، صورت وضعیت‌های مالی شعب یکی از بانک‌های تجاری کشور است که به‌روش سرشماری انتخاب شدند. معیار ریسک استفاده‌شده در مدل‌ها ارزش در معرض خطر میانگین فازی است. مدل‌های پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی قوت پارتو (SPEA-II)، ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) اجرا شد. نرم‌افزار حامی در اجرای پژوهش نرم‌افزار متلب بود. بر اساس نتایج پژوهش، الگوریتم NSGA-II در معیارهای کیفیت پاسخ‌ها، معیار گوناگونی و معیار فاصله، نسبت به دو الگوریتم دیگر، چه در اندازه کوچک و چه در اندازه بزرگ عملکرد بهتری دارد. همچنین الگوریتم SPEA-II در معیار فاصله از نقطه ایدئال، در هر دو مقیاس کوچک و بزرگ و الگوریتم MOPSO در معیار زمان، از دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی پرتفوی اعتباری، تئوری اعتبار فازی، صنعت بانکداری، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری.
طبقه‌بندی JEL: G۲۱ و C۱۴.

---

۱. دکتری، گروه مهندسی مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علی‌آباد کتول، علی‌آباد کتول، ایران (نویسندهٔ مسئول)؛ ali.tehranippor54@gmail.com
۲. دکتری، گروه مدیریت مالی، دانشکده علوم اجتماعی و اقتصادی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران؛ abbasiebrahim2000@alzahra.ac.ir
۳. دکتری، گروه کسب‌وکار، سازمان مدیریت صنعتی، تهران، ایران؛ karimibaratshahrbank@gmail.com
۴. دکتری، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علی‌آباد کتول، علی‌آباد کتول، ایران؛ firoozyazarloo@gmail.com

مقدمه

بانک‌های تجاری و مؤسسه‌های مالی و اعتباری، وجوه مازاد مردم را به‌عنوان سپرده جذب کرده و در قبال آن با توجه به نوع سپردهٔ جذب شده، پاداش یا سود علی‌الحساب پرداخت می‌کنند. همچنین، بر اساس فرایند اعطای تسهیلات، بخشی از این سپرده‌ها را در اختیار افراد حقیقی یا حقوقی قرار می‌دهند. بر این اساس، بانک باید در زمان تدوین و ابلاغ سیاست‌های اعتباری تسهیلات، در قالب بستهٔ سیاست اعتباری، برنامهٔ اصلی اعطای تسهیلات و همچنین، تخصیص تسهیلات اعتباری و در نهایت، شیوهٔ مدیریت پرتفوی تسهیلات را در نظر داشته باشد. از طرفی، سیاست‌های بانک در زمینهٔ مدیریت پرتفوی تسهیلات، بر ریسک اعتباری تأثیر چشمگیری می‌گذارد؛ بر همین اساس بانک‌های تجاری و مؤسسه‌های مالی و اعتباری می‌توانند با مدیریت پرتفوی تسهیلات در زمان تدوین سیاست‌های اعتباری سالانه، پرداخت تسهیلات را بین بخش‌ها و صنایع مختلف و همچنین بین مشتریان خرد، متوسط و کلان تقسیم کنند و از ریسک اعتباری بکاهند. در حال حاضر، مهم‌ترین عامل ورشکستگی بانک‌ها، ریسک اعتباری است. اگر مشتری به‌موقع تعهدهای خود را بازپرداخت نکند، این تسهیلات به‌صورت مطالبات معوق بانکی درمی‌آید و در توزیع اعتبارات بانکی و در نتیجه اقتصاد کشور اختلال ایجاد می‌شود (پندار و ویسی، ۱۳۹۹). مؤسسه‌های مالی و اعتباری می‌بایست با در نظرگرفتن ریسک اعتباری مشتریان، به تقاضاهای آن‌ها مبتنی بر اخذ تسهیلات جامه عمل بپوشانند؛ زیرا تا به حال مسائل و مشکلات مدیریت پرتفوی تسهیلات، مهم‌ترین دلیل ورشکستگی یا زیان‌دهی بانک‌ها و مؤسسه‌های مالی و اعتباری بوده است (دلوی، باقی و عبدالباقی و کاظمی، ۱۳۹۴). هری مارکویتز[1] (۱۹۵۲) بنیان‌گذار ساختاری مشهور در تئوری مدرن پرتفوی است. مهم‌ترین نقش این تئوری، ایجاد چارچوب ریسک و بازدهی پرتفوی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران است. مارکویتز با تعریف کمی ریسک سرمایه‌گذاری، برای سرمایه‌گذاران در امر انتخاب دارایی‌ها و مدیریت پرتفوی، رویکردی ریاضی ارائه کرد. مارکوویتز به‌صورت کمی نشان داد که تنوع‌سازی پرتفوی دارایی‌ها، ریسک پرتفوی را کاهش می‌دهد. مدل مارکوویتز، در واقع تعیین مجموعهٔ پرتفوی کارا و انتخاب از مجموعه کاراست. در حقیقت عوامل اساسی و اجزای یک نظام مدیریت پرتفوی، همان ریسک و بازده است؛ به همین دلیل، این مفهوم عیناً برای مدیریت تسهیلات و تعهدات نیز، از منظر عوامل یاد شده کاربرد دارد و از آنجا که مدیریت پرتفوی تسهیلات، فرایند مستمر ارزیابی و بهره‌جویی از انواع فرصت‌های وام‌دهی در جهت کسب حداکثر بازدهی در چارچوب اهداف کلان

1. Harry Markowitz

مدیریت دارایی همراه با پذیرش حداقل ریسک است، مهم‌ترین اجزای یک مدل مدیریت پرتفوی تسهیلات نیز، همان بازدهی و ریسک انواع فرصت‌های وام‌دهی در بخش‌های مختلف اقتصادی خواهد بود (حسینی، پورزمانی و جهانشاد، ۱۳۹۹). بدین منظور، در سه دههٔ گذشته، از مدل‌های گوناگون ارزیابی ریسک اعتباری استفاده شده و روش‌های تخمینی مختلفی برای حل این مسئله به‌کارگرفته شده است؛ اما هریک از تحقیقات انجام‌شده، به‌نوعی ضعف‌ها و قوت‌هایی دارند.

در این پژوهش، در مرحلهٔ نخست، به شناسایی و اندازه‌گیری معیارهای ریسک و همچنین، نرخ بازده تسهیلات اعطایی پرداختیم. در مرحلهٔ بعد، به‌دنبال طراحی مدل‌های بهینه‌سازی سبد اعتباری با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی قوت پارتو، ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه با معیارهای ریسک اعتباری خواهیم بود. شایان ذکر است که پارامترهای موجود در این پژوهش، مانند نرخ بازده تسهیلات و ریسک‌های شناسایی‌شدهٔ اعتباری، بر اساس نظریهٔ اعتبار فازی مثلثی است و همچنین، محدودیت‌های حداقل درجهٔ تنوع‌پذیری پرتفوی تسهیلات، حداقل و حداکثر میزان به‌کارگیری دارایی‌ها در نوع تسهیلات پرداختی، در نظر گرفتن هزینه‌های ایجاد و نگهداری دارایی‌ها در قالب هزینه‌های عام و خاص و همچنین، تخصیص بخشی از منابع به دارایی‌های بدون ریسک، در طراحی مدل در نظر گرفته شده است. در نهایت، مدل طراحی‌شده با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی قوت پارتو، ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه با استفاده از نرم‌افزار متلب بررسی و نتایج آن ارزیابی شده و در نهایت، بهترین الگوریتم معرفی می‌شود.

مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش

در خصوص تفاوت‌ها و ویژگی‌های ریسک و عدم اطمینان، بحث‌های زیادی وجود دارد. این دو مفهوم با یکدیگر ارتباط دارند، اما بر هم منطبق نیستند. بسیاری از نهادهای پولی و مالی، در پی شناسایی منابع ریسک و سپس، کنترل و مدیریت آن هستند. اگر این نهادها بتوانند ریسک پرتفوی دارایی‌ها را به‌خوبی اندازه‌گیری کنند، خواهند توانست دارایی‌هایی را که موجب افزایش ریسک‌شده، شناسایی کرده و برای حداقل‌کردن ریسک پرتفوی به تخصیص مجدد دارایی‌ها اقدام کنند. برای آشنایی بیشتر با موضوع مدنظر در این قسمت به توضیح کلیدواژگان و متغیرهای پژوهش می‌پردازیم.

معیارهای سنجش پراکندگی

راکفلر، اوریاسو و زابرانکین[1] (۲۰۰۶) چهار خاصیت ذیل را به‌عنوان یک معیار پراکندگی برای سنجه‌های متفاوتی که برای سنجش و اندازه‌گیری ریسک دارایی‌های سرمایه‌گذاران به‌کار گرفته می‌شود، معرفی کردند.

بی‌تفاوتی به انتقال $D(X) = D(X + C)\ for\ all\ X\ and\ constants\ C$

همگنی مثبت $D(0) = 0\ and\ D(\lambda X) = \lambda D(X)\ for\ all\ X\ and\ all\ \lambda > 0$

مثبت بودن (نامنفی بودن) $D(X) \geq 0\ for\ all\ X, with\ D(X) > 0\ for\ nonconstant\ X.$

زیرجمع‌پذیری $D(X + Y) \leq D(X) + D(Y)\ for\ all\ X\ and$

خاصیت بی‌تفاوتی به انتقال در معیارهای سنجش پراکندگی بیان می‌دارد که با اضافه شدن یک مقدار ثابت مثبت به پرتفوی، ریسک آن متغیر تغییری نمی‌کند و همگنی مثبت نیز نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش دارایی با یک ضریب مثبت، موجب افزایش یا کاهش ریسک پرتفوی به اندازهٔ همان ضریب مثبت خواهد شد. مثبت بودن (نامنفی بودن) نیز بیان می‌دارد که پراکندگی یک متغیر فقط در حالتی صفر می‌شود که آن متغیر ثابت باشد. در غیر این صورت، تمام متغیرها دارای پراکندگی مثبت هستند و در نهایت، خاصیت زیرجمع‌پذیری بیان می‌دارد که ریسک دو دارایی که با هم پرتفوی را تشکیل می‌دهند، از مجموع ریسک هر یک از متغیرها کمتر است.

در ادامه، راشف، استیانو و فابوزی[2] (۲۰۰۸) سه خاصیت ذیل را به‌عنوان یک معیار پراکندگی برای سنجه‌های متفاوتی که برای سنجش و اندازه‌گیری ریسک دارایی‌های سرمایه‌گذاران به‌کار گرفته می‌شود، معرفی کردند.

انتقال مثبت $D(X + C) \leq D(X)\ for\ all\ X\ and\ constants\ C \geq 0$

همگنی مثبت $D(0) = 0\ and\ D(\lambda X) = \lambda D(X)\ for\ all\ X\ and\ all\ \lambda > 0$

1. Rockafellar, Uryasev & Zabarankin
2. Rachev, Stoyanov & Fabozzi

مثبت بودن (نامنفی بودن) $D(X) \geq 0 \; for\; all\; X, with\; D(X) > 0 \; for\; nonconstant\; X$

که در آن، خاصیت انتقال مثبت بیان می‌دارد که اضافه شدن یک مقدار مثبت هیچ‌گاه پراکندگی متغیر تصادفی را افزایش نخواهد داد.

معیارهای ریسک منسجم

آرتزنر، البائن، ابِر و هیث[1] (۱۹۹۹) یک سری از اصول قراردادی را برای یک سنجه ریسک ارائه دادند. برای مثال (اگر ρ(X) به‌عنوان تابع ریسک در نظر بگیریم):

ویژگی نخست: خاصیت یکنواختی $\rho(Y) \leq \rho(X);$ $for\; all\; real\; X\; and\; Y \in G\; with\; Y \geq X$

ویژگی دوم: همانندی مثبت $\rho(\lambda X) = \lambda\rho(X);$ $for\; all\; \lambda \geq 0. and\; all\; X \in G$

ویژگی سوم: زیرجمع‌پذیری $\rho(X + Y) \leq \rho(X) + \rho(Y);$ $for\; all\; real\; X\; and\; Y \in G,$

ویژگی چهارم: بی‌تفاوتی $C\; \rho(X + C) = \rho(X) - C;$ $for\; all\; real\; numbers$

ویژگی یکنواختی بیان می‌دارد که اگر در تمامی حالات ممکن، بازدهی پرتفوی Y از بازدهی پرتفوی X بیشتر باشد، در این حالت ریسک پرتفوی Y هیچ‌گاه بیشتر از ریسک پرتفوی X نخواهد بود و همانندی مثبت نیز نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش در بازدهی پرتفوی، ریسک آن را به همان میزان افزایش یا کاهش می‌دهد. زیرجمع‌پذیری هم در حقیقت همان خاصیت تنوع‌سازی پرتفوی بوده و بیان می‌دارد که ریسک دو دارایی که با هم تشکیل پرتفوی را می‌دهند، از مجموع ریسک هر یک از متغیرها کمتر است و در نهایت، بی‌تفاوتی به انتقال بیان‌کننده این موضوع است که اضافه‌شدن یک مقدار ثابت، همانند یک اوراق بهادار با درآمد ثابت به پرتفوی دارایی‌ها، ریسک را تغییر می‌دهد. حال اگر این مقدار ثابت مثبت باشد، اضافه شدن آن به کاهش ریسک منجر خواهد شد.

---

1. Artzner, Elbaen, Eber & Heath

تئوری اعتبار فازی

پروفسور لطفی زاده در مقاله مجموعه‌های فازی، تئوری فازی را معرفی کرد. یکی از بخش‌های مهم نظریه فازی، تئوری امکان است که برای مواجه شدن با اکثر پدیده‌هایی که در آن‌ها عدم قطعیت وجود دارد، استفاده می‌شود (لطفی زاده[1]، ۱۹۹۹). در ادامه، لیو و لیو[2] (۲۰۰۲) تئوری اعتبار را به‌عنوان گزینهٔ رقیب برای امکان مجموعهٔ فازی، ارائه کردند. امتیاز این معیار داشتن خاصیت خود دوگانگی است. نظریهٔ اعتبار پس از ارائه، براساس مفاهیم پایه‌ای مطرح‌شده به‌سرعت گسترش یافت. اگر Θ را برای مثال مجموعه غیرتهی (به نمایندگی از فضای نمونه) در نظر بگیریم و $P(\Theta)$ مجموعهٔ توانی Θ باشد، آن‌گاه هر عنصری که در $P(\Theta)$ قرار دارد، یک رویداد نامیده می‌شود. برای ارائهٔ یک تعریف بدیهی اعتبار، لازم است به هر رویداد A، یک عدد $Cr\{A\}$ که نشان می‌دهد اعتبار A رخ خواهد داد، اختصاص یابد. افزون بر این، برای اینکه اطمینان حاصل شود که یک عدد $Cr\{A\}$ دارای برخی از خواص ریاضی است که ما به‌طور شهودی از نظریهٔ اعتبار انتظار داریم، می‌بایست چهار اصل بدیهی زیر را داشته باشد.

اصل نخست (نرمال بودن): $\mathrm{Cr}\{\Theta\} = 1$

اصل دوم (یکنواختی): وقتی که $A \subset B$ آنگاه $Cr\{A\} \leq Cr\{B\}$

اصل سوم (خود دوگانگی): برای هر رویداد $A \in P(\Theta)$ آنگاه $Cr\{A\} + Cr\{A^c\} = 1$

اصل چهارم (حداکثرسازی): برای هر رویداد $\{A_i\}$در نظر گرفتن $\mathrm{Cr}\{A_i\} \leq 0.5$

آن‌گاه: $Cr\{U_i A_i\} = \sum sup_i Cr\{A_i\}$

اصل نرمال بودن در تئوری اعتبار فازی بیان می‌دارد که اعتبار رخ دادن کل مجموعهٔ غیرتهی که به نمایندگی از فضای نمونه انتخاب شده است، همواره برابر با ۱ است و اصل یکنواختی در تئوری اعتبار فازی نیز بیان می‌دارد، زمانی که B زیرمجموعه A باشد، در این صورت اعتبار رخ دادن مجموعهٔ B از اعتبار رخ دادن A کمتر است. همچنین، اصل خود دوگانگی در تئوری اعتبار فازی بیان می‌دارد که برای هر مجموعهٔ A عضو $P(\Theta)$، جمع اعتبار رخ دادن مجموعهٔ نام‌برده با اعتبار رخ دادن مجموعهٔ مکمل آن، همواره برابر با ۱ است و در نهایت، اصل حداکثرسازی در تئوری اعتبار فازی بیان می‌دارد که اگر اعتبار رخ دادن رویداد برابر با ۱ باشد، هیچ قطعیتی در نتیجهٔ همان رویداد وجود ندارد. زیرا ممکن است این باور که این رویداد رخ نمی‌دهد، درک‌پذیر باشد و زمانی که

1. Lotfizadeh
2. Liu & Liu

هیچ‌گونه اطلاعاتی در خصوص اندازهٔ اعتبار یک رخداد وجود ندارد، باید آن را ۰/۵ در نظر بگیریم، در این صورت، اعتبار رخ دادن رخداد و مکمل آن یکسان در نظر گرفته می‌شود. اکنون فرض کنید ξ یک متغیر فازی با تابع μ باشد. حال برای هر مجموعهٔ B از مجموعهٔ اعداد حقیقی می‌توان رابطهٔ زیر را نوشت:

$$Cr(\xi \epsilon B) = \frac{1}{2}\left(sup\ \mu(x) + 1 - sup\ \mu(x)\right)$$ رابطهٔ ۱)

$x \in B\ x \in B^c$

حال در حالت خاص‌تر می‌توان اثبات کرد (برای هر $r \in R$)

$$Cr(\xi \leq r) = \frac{1}{2}\left(sup\ \mu(x) + 1 - sup\ \mu(x)\right)$$ رابطهٔ ۲)

$x \leq r\ x > r$

همچنین گائو، یو، لی و کار[1] (۲۰۱۶) مفهوم استقلال متغیرهای فازی را ارائه دادند. بر این اساس، به متغیرهای ξ_m و ... و ξ_2 و ξ_1 متغیر مستقل گفته می‌شود، اگر و تنها اگر برای هر مجموعه $B_1. B_2. \ldots . B_m \epsilon R$ رابطهٔ زیر وجود داشته باشد:

$$Cr\left\{\bigcap_{i=1}^{m}\{\xi_i \in B_i\}\right\} = \min cr\{\xi_i \in B_i\}$$ رابطهٔ ۳)

$1 \leq i \leq m$

مفهوم ریسک اعتباری

ریسک اعتباری را می‌توان بدین صورت تعریف کرد: احتمال تعویق، مشکوک شدن وصول یا عدم وصول تسهیلات ارائه‌شده به مشتریان به‌نحوی که قرض‌کنندهٔ وجه، قادر به پرداخت اصل و فرع وام خود طبق شرایط مندرج در قرارداد نیست و این موضوع موجب ایجاد مشکلاتی در گردش وجوه نقد بانک شود (فاست[2]، ۱۳۹۵). همان‌طور که از تعریف برمی‌آید، این ریسک به حالت‌های زیر خود را نشان می‌دهد:

---

1. Guo,Yu, Li, & Kar
2. Fausett

۱. احتمال کاهش توان بازپرداخت اصل و فرع تسهیلات دریافتی توسط مشتری.
۲. احتمال عدم بازپرداخت اصل و فرع تسهیلات دریافتی توسط مشتری.

با توجه به اینکه سرمایهٔ بانک‌ها در مقایسه با کل ارزش دارایی‌های آن‌ها کم است، حتی اگر درصد کمی از وام‌ها قابل وصول نباشند، بانک با خطر ورشکستگی روبه‌رو خواهد شد. انواع ریسک اعتباری عبارت‌اند از:

- ریسک اعتباری خاص، شامل احتمال عدم ایفای تعهد در نتیجهٔ شرایط خاص متعهد به بانک.
- ریسک اعتباری سیستماتیک، شامل عدم ایفای تعهد در نتیجهٔ شرایط اقتصادی مانند رکود و بحران اقتصادی.

سیستم بانکی به‌طور مداوم با ریسک مواجه است و حذف آن امکان ندارد، فقط می‌توان آن را مدیریت کرد، مدیریت ریسک، وظیفه‌ای شامل فرایندها، روش‌ها و ابزاری برای ادارهٔ ریسک در فعالیت‌های سازمانی است، در نتیجه، بانک‌ها باید سیستمی هماهنگ و منسجم ایجاد کنند تا هم در عصر حاضر که رقابت نظام‌های اقتصادی شدت گرفته از کارایی و سرعت لازم برخوردار باشند و هم احتمال برنگشتن اصل و فرع تسهیلات اعطاشده کاهش یابد تا ریسک اعتباری کاهش یابد. بنابراین، برای جلوگیری از ضرر و بهبود وضعیت بانک‌ها باید تصمیم‌هایی اتخاذ شود که هر یک از این تصمیم‌ها، در راستای مدیریت ریسک می‌تواند بر کارایی یک بانک نیز دارای تأثیر مثبت یا منفی باشد (عرب مازار و روئین تن، ۱۳۸۵). ریسک‌هایی که بر نهاد مالی تأثیر می‌گذارند را می‌توان در سه سطح زیرتقسیم بندی کرد:

- سطح نخست، ریسک‌هایی که نهاد مالی هیچ‌گونه کنترل و تأثیری بر آن‌ها ندارد و فقط از آن‌ها تأثیر می‌پذیرد.
- سطح دوم، ریسک‌هایی است که نهاد مالی بر آن‌ها تأثیر دارد، اما این تأثیر اندک است و بیشتر تأثیر می‌پذیرد.
- سطح سوم، ریسک‌هایی هستند که بر نهاد مالی تأثیر می‌گذارند، اما نهاد مالی با اعمال روش‌ها و ابزارهایی می‌تواند آن‌ها را در کنترل خود درآورد و مدیریت کند (عسکرزاده، ۱۳۸۵).

در میان ریسک‌هایی که بانک‌ها و مؤسسه‌های مالی را تهدید می‌کند، ریسک اعتباری به‌دلیل محوریت، حجم عملیات و به‌ویژه حساسیت آن، مهم‌ترین ریسک محسوب می‌شود، بنابراین تنها

ریسک‌های سطح سوم هستند که نهاد مالی توسط روش‌ها و ابزارهای مدیریت ریسک می‌تواند بر آن‌ها فائق آید و کنترل شود.

مفهوم بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی، یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسهٔ آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسئله وابسته است. برای مثال، زمان سفر یا هزینه از جمله اهداف رایج بهینه‌سازی شبکه‌های حمل‌ونقل هستند. به هر حال، انتخاب تابع هدف مناسب، یکی از گام‌های مهم بهینه‌سازی است. گاهی در بهینه‌سازی چند هدف به‌طور هم زمان مدنظر قرار می‌گیرند، این‌گونه مسائل بهینه‌سازی را که دربرگیرنده چند تابع هدف هستند، مسائل چندهدفی می‌نامند. ساده‌ترین راه در برخورد با این‌گونه مسائل، تشکیل یک تابع هدف جدید به‌صورت ترکیب خطی توابع هدف اصلی است که در این ترکیب، میزان اثرگذاری هر تابع با وزن اختصاص‌یافته به آن مشخص می‌شود. هر مسئلهٔ بهینه‌سازی دارای تعدادی متغیر مستقل است که آن‌ها را متغیرهای طراحی می‌نامند و با بردار n بعدی x نشان داده می‌شوند. هدف از بهینه‌سازی، تعیین متغیرهای طراحی است، به‌گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود. مسائل مختلف بهینه‌سازی به دو دستهٔ زیر تقسیم می‌شوند:

الف. مسائل بهینه‌سازی بی‌محدودیت: در این مسائل هدف، بیشینه یا کمینه کردن تابع هدف بدون هرگونه محدودیتی روی متغیرهای طراحی است.

ب. مسائل بهینه‌سازی با محدودیت: بهینه‌سازی در اغلب مسائل کاربردی، با توجه به محدودیت‌هایی که انجام می‌شود، محدودیت‌هایی در زمینهٔ رفتار و عملکرد یک سیستم است. معادلات معرف محدودیت‌ها، ممکن است به‌صورت مساوی یا نامساوی باشند که در هر مورد، روش بهینه‌سازی متفاوت خواهد بود. به‌هرحال محدودیت‌ها، ناحیه قابل قبول در طراحی را معین می‌کنند.

برای بهینه‌سازی پورتفوی برمبنای الگوی مدیریت ریسک مارکویتز، از الگوی برنامه‌ریزی غیرخطی زیر استفاده می‌کنیم:

رابطهٔ ۴)

$$St:$$

$$Min\ Z = \delta_P^2$$

$$\bar{r}_p = \sum_{j=1}^{M} x_j \bar{r}_j$$

$$\sum_{j=1}^{M} x_j = 1$$

$$x_j \geq 0$$

در خصوص پژوهش‌های مشابه انجام‌شده، پژوهشی که به‌طور مستقیم به موضوع مدنظر اشاره کند، انجام نشده است و اکثر پژوهش‌های انجام‌شده، در خصوص شرکت‌های سرمایه‌گذاری و بورس است. در واقع، انجام این روش در بانک در خصوص بهینه‌سازی ریسک‌های اعتباری، از نوآوری‌های پژوهش حاضر محسوب می‌شود. با وجود این، به ارائهٔ چند نمونه از پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون موضوع مدنظر بسنده می‌کنیم.

متاوا[1] (۲۰۱۷) در تصمیم‌گیری در فضای عملیات بانکی نظیر اعطای تسهیلات، از تکنیک‌های هوشمند نظیر نوعی از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. در این پژوهش، با کمک GAMCC[2]، چارچوبی برای بهینه‌سازی اهداف مالی بانکی شامل افزایش سود و کاهش احتمال خطا ایجاد شد که با جست‌وجوی پویای تصمیم‌ها به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این است که در روش پیشنهادی، زمان نظارت بر تسهیلات از ۱۲ درصد تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

کیانی قلعه‌نو، نیرومند، دیده‌خانی و محمودی راد (۱۴۰۱) مقاله‌ای با عنوان مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای بهینه‌سازی پرتفوی مالی در بانک کشاورزی استان سیستان و بلوچستان ارائه دادند. این پژوهش در نظر داشت تا یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه طراحی کند که اهداف آن، ماکزیمم‌سازی بازدهی و مینیمم‌سازی ریسک بود. رویکرد مسئله به‌گونه‌ای بود که با اخذ هزینه‌های اداری و پرسنلی و نرخ‌های سود سپرده و تسهیلات و نرخ مبادلات بازار داخلی، بتواند پرتفوهای متنوع پیشنهاد دهد. به‌دلیل ماهیت مسئله که دارای تابع هدف درجه دو است، مدل با استفاده از الگوریتم تکاملی NSGAII حل شد. خروجی حل مسئله که مرزهای پارتو بود، پرتفوهای کارایی را تشکیل می‌داد که هر یک می‌توانست متناسب با میزان بازدهی و ریسک متنوع به‌عنوان پرتفوی کارا انتخاب شود

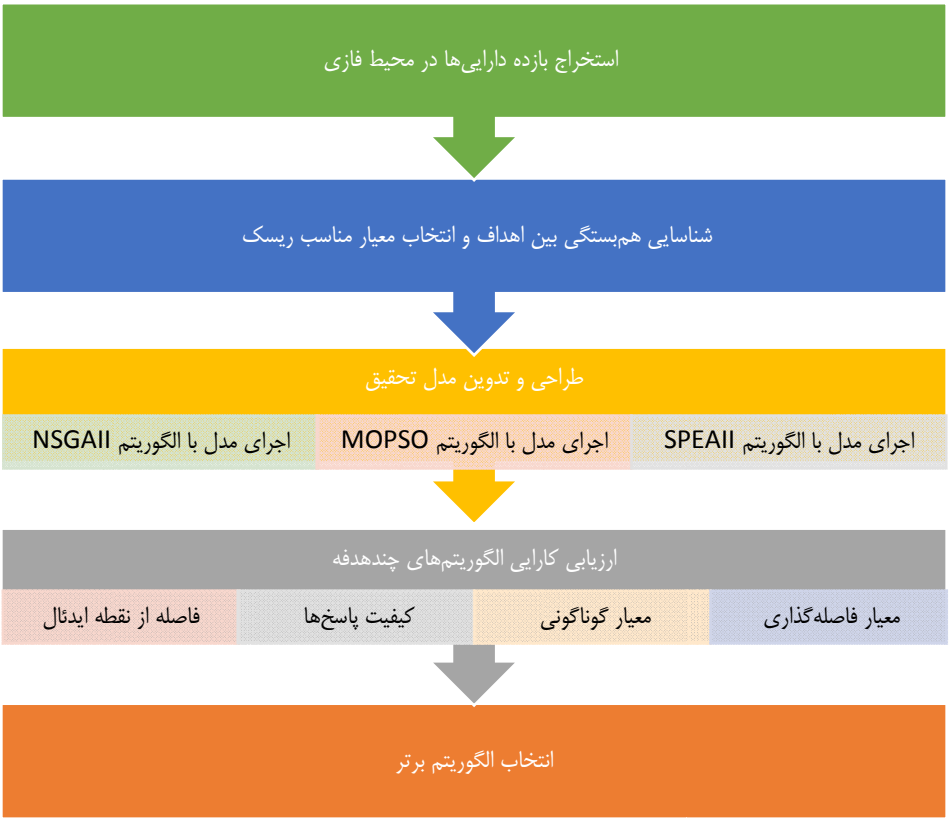
1. Metawa
2. Genetic algorithm MultipopulationCompetitive Coevolution

(شارپ، گوردون و جفری وی، ۱۳۸۸). ناجی اصفهانی و رستگار (۱۳۹۷) مقاله‌ای با عنوان برآورد ریسک اعتباری مشتریان با استفاده از تحلیل چندبعدی ترجیحات در بانک تجاری منتشر کردند. نتایج حاکی از کارایی روش استفاده‌شده برای پیش‌بینی رفتار اعتباری مشتریان بانک بود. با توجه به مزیت‌های روش استفاده‌شده که شامل، وابسته نبودن به سابقهٔ عملکرد مالی شرکت‌ها و دقت پیش‌بینی این روش در مقایسه با روش‌های متداول بود، پیشنهاد شد از این روش به‌عنوان ورودی پژوهش‌های مدیریت پرتفوی اعتباری بانک‌ها استفاده شود (کیانی قلعه‌نو و همکاران، ۱۳۹۹). دلوی و همکاران (۱۳۹۴) پژوهشی با عنوان کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در بهینه‌سازی پرتفوی تسهیلات بانک ملی استان اصفهان انجام دادند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که پرتفوی بهینهٔ تسهیلات که توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه به دست آمده، متفاوت از پرتفوی فعلی بانک بوده و پوشش‌دهندهٔ محدودیت‌ها و سیاست‌های مختلف حاکم بر اعطای تسهیلات است. همچنین، نرخ بهرهٔ مؤثر و درجهٔ کارایی تسهیلات مبتنی بر مدل بالاتر از نرخ بهرهٔ مؤثر و درجهٔ کارایی سبد فعلی تسهیلات است (منهاج، ۱۳۹۷).

روش‌شناسی پژوهش و ارائه مدل

پژوهش حاضر از لحاظ جمع‌آوری اطلاعات در زمرهٔ پژوهش‌های توصیفی و از لحاظ ماهیت و هدف از نوع توسعه‌ای ـ کاربردی است. ابزار گردآوری اطلاعات در این پژوهش، پرونده‌های اعتباری موجود در یک بانک تجاری و گزارش‌های گرفته‌شده از داشبورد اعتباری موجود در بانک است. معیار ریسک استفاده‌شده در مدل، ارزش در معرض خطر میانگین است. جامعهٔ آماری این پژوهش، شامل کلیهٔ پرونده‌های تسهیلاتی ۱۰ سال اخیر و همچنین صورت وضعیت‌های مالی شعب بانک یادشده است که به روش سرشماری انتخاب شدند. در این پژوهش، ابتدا اهداف و شاخص‌های مسئلهٔ بهینه‌سازی پرتفوی براساس پیشینهٔ پژوهش و ماهیت کاربردی مسئلهٔ حاضر، بررسی شده و در نهایت، شاخص اصلی انتخاب می‌شود. سپس، در مرحلهٔ دوم هر یک اهداف و محدودیت‌ها را در حالت عدم قطعیت و ابهام و براساس اصول تئوری اعتبار فازی برای حالتی که نرخ بازده مورد انتظار دارایی‌ها به‌صورت عدد فازی مثلثی است، به دست می‌آوریم و در مرحلهٔ سوم مدل چندهدفهٔ فازی مبتنی بر معیارها بازده دارایی‌ها و ریسک ارزش در معرض خطر میانگین طراحی می‌شود و سپس، مدل پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های NSGAII، MOPSO و SPEAII اجرا خواهد شد و در

نهایت، اولویت‌بندی الگوریتم‌ها ارائه خواهد شد. نرم‌افزار استفاده‌شده در اجرای پژوهش، نسخهٔ ۲۰۱۶ نرم‌افزار متلب است و بر اساس ساختار شکل ۱ تدوین شده است.



شکل ۱. ساختار کلی پژوهش

ارزش مورد انتظار[1] یک متغیر فازی

در ادبیات موضوعی، نظریه‌های متفاوتی برای تعریف ارزش مورد انتظار برای متغیرهای فازی وجود دارد، برای مثال دوبوا و پراد[2] (۱۹۸۷)، هیلپرن[3] (۱۹۹۲) و یاگر[1] (۱۹۸۱) در این زمینه نظریه‌هایی

1. Expected value
2. Dubois & Prade
3. Heilpern

ارائه داده‌اند، اما کلی‌ترین تعریف ارزش مورد انتظار متغیر فازی را لیو و لیو (۲۰۰۸) ارائه داده‌اند که دارای مزیت‌هایی از دیدگاه کاربردی بودن آن برای متغیرهای فازی پیوسته و گسسته است. هنگامی که $\xi = (a.b.c)$ را یک متغیر فازی مثلثی در نظر می‌گیریم، به‌طوری که $a < b < c$باشد، آن‌گاه $E[\xi]$ توسط رابطهٔ ذیل به دست می‌آید:

$$E\left[\tilde{\xi}\right] = \frac{a + 2b + c}{4}$$ رابطهٔ ۵)

ارزش در معرض خطر میانگین[۲] فازی

اگر $A = (a.b.c)$ یک عدد فازی مثلثی باشد، برای هر سطح اطمینان $0 < \alpha \leq 1$ ، ارزش در معرض خطر میانگین فازی با استفاده از تئوری اعتبار می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود.

$$AVaR_{\alpha}(\xi) = \begin{cases} (a\text{-}b)\alpha\text{-}a \text{ if } \alpha \leq 0.5, \\ c\text{-}2b\text{-}\frac{1}{4\alpha}(a\text{-}2b\text{+}c)\text{+}(b\text{-}c)\alpha, \text{ if } \alpha > 0.5. \end{cases}$$ رابطهٔ ۶)

ساختار مدل پیشنهادی

مدل فازی بهینه‌سازی چندهدفه براساس تئوری اعتبار برای مسئلهٔ انتخاب سبد تسهیلات به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$max\, W_T = W_1 \prod_{t=1}^{T}\left(1 + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{a_{it} + 2 * b_{it} + c_{it}}{4}\right)x_{it} + r_f(0.132\sum_{i=1}^{n} x_{it}) - \sum_{i=1}^{n} COST_{it}(|x_{it}|)\right)$$ رابطهٔ ۷)

$$\text{Min } VaR(\alpha) = \sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(c_{it}\text{-}2b_{it}\text{-}\frac{1}{4\alpha}(a_{it}\text{-}2b_{it}\text{+}c_{it})\text{+}(b_{it}\text{-}c_{it})\alpha\right)x_{it}\right]a \geq 0.5$$ رابطهٔ ۸)

1. Yager
2. Average Value at Risk

$Subject\ to:$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{it} + \mathrm{x_{r_f t}} = 1\ i = 1 \ldots n\ \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T} \qquad \text{رابطهٔ ۹)}$$

$$* \mathrm{R_t} \geq \min\ _r_{\mathrm{t}}\ \ \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T} \qquad \text{رابطهٔ ۱۰)}$$

$$-\sum_{i=1}^{n} x_{it} Ln x_{it} \geq \mathrm{e}\quad \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T}\ \mathrm{i}=1,2\ldots,\mathrm{n}\ 0\ \leq e \leq Ln\ n \qquad \text{رابطهٔ ۱۱)}$$

$$x_{it} \geq 0\ i = 1 \ldots n\ ;\ \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T} \qquad \text{رابطهٔ ۱۲)}$$

$$L_{it} \leq x_{it} \leq \mathcal{U}_{it}\ i = 1 \ldots n\ ; \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T} \qquad \text{رابطهٔ ۱۳)}$$

$$h_t \leq \sum_{\mathrm{i}=}^{\mathrm{n}} \mathcal{Y}_{it} \leq K_{\mathrm{t}}\ i = 1 \ldots n\ \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T} \qquad \text{رابطهٔ ۱۴)}$$

$$\mathcal{Y}_{it} \epsilon\ [0,1]\ i = 1 \ldots n\ ; \mathrm{t} = 1, \ldots, \mathrm{T} \qquad \text{رابطهٔ ۱۵)}$$

$$R_t = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\mathrm{a_{it}}+2*\mathrm{b_{it}}+\mathrm{c_{it}}}{4}\right) x_{it-} \sum_{i=1}^{n} Cost_{it}(|x_{it} - x_{it-1}|)\ ; \qquad \text{رابطهٔ ۱۶)}$$
$$i = 1 \ldots n\ \mathrm{t} = 1. \ldots . \mathrm{T}$$

الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)[1]

سرینیواس و دب[2] (۱۹۹۵) برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، روش بهینه‌سازی NSGA را معرفی کردند. نکات برجسته‌ای که در خصوص این روش بهینه‌سازی وجود دارند، عبارت‌اند از: جوابی که هیچ جواب دیگری، به‌طور قطع بهتر از آن نباشد، دارای امتیاز بیشتری است. جواب‌ها بر اساس اینکه چند جواب بهتر از آن‌ها وجود داشته باشند، رتبه‌بندی و مرتب می‌شوند. با توجه به حساسیت به‌نسبت زیادی که نحوهٔ عملکرد و کیفیت جواب‌های الگوریتم NSGA به پارامترهای اشتراک برازندگی و سایر پارامترها دارد، دب، آگراول، پراتاپ و میاریوان[3] (۲۰۰۰) نسخهٔ دوم الگوریتم

1. Non dominated sorting genetic algorithm
2. Srinivas & Deb
3. Deb, Agrawal, Pratap and Meyarivan

NSGA با نام NSGA-II را معرفی کردند. از ویژگی‌های عمدهٔ این الگوریتم، تعریف فاصلهٔ تراکمی[1] به‌عنوان ویژگی جایگزین برای شیوه‌هایی مانند اشتراک برازندگی و استفاده از عملگر انتخاب تورنومنت دودویی و ذخیره و آرشیو کردن جواب‌های نامغلوب است که در مراحل قبلی الگوریتم به دست آمده‌اند (نخبه‌گرایی).

شبه کد الگوریتم NSGA-II

گام ۱: تولید جمعیت اولیه در این روش همانند معمول برمبنای مقیاس و قیود مسئله

گام ۲: ارزیابی جمعیت تولیدشده از دید توابع هدف تعریف‌شده

گام ۳: اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب

گام ۴: محاسبه پارامتر کنترلی به فاصلهٔ جمعیت[2] این پارامتر برای هر عضو در هر گروه محاسبه می شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونهٔ مدنظر به اعضای دیگر جمعیت آن دسته و گروه است.

گام ۵: انتخاب جمعیت والدین برای تولید مثل یکی از سازوکارهای انتخاب مبتنی بر تورنمنت دوتایی میان دو عضو منتخب به‌طور تصادفی از میان جمعیت است.

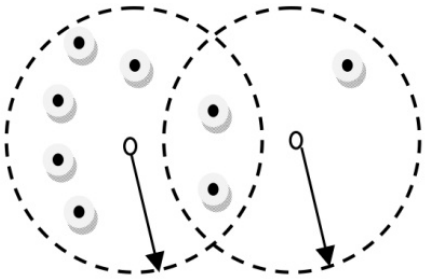
گام ۶ : انجام جهش و تقاطع

الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)

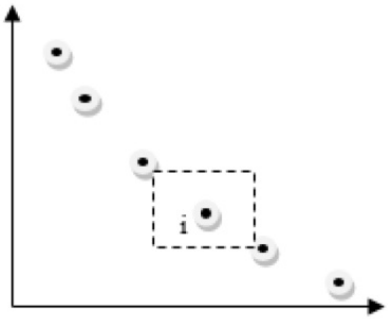
مور و چپمن[3] (۱۹۹۹) نخستین الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات توسعه‌یافته برای مسائل چندهدفه را ارائه کردند. این الگوریتم ارائه‌شده، براساس پارتو بوده که در آن، علاوه بر بردارهای دیگر، به‌ازای هر ذره بردار جواب‌های نامغلوب نیز تعریف می‌شود. کوئلو[4] (۲۰۰۹) با بررسی الگوریتم ارائه‌شده مور، الگوریتمی ارائه داد که در آن، ملاک انتخاب یک جواب از بین جواب‌های نامغلوب، استفاده از روش فاصلهٔ ازدحام و روش نیچه با در نظر گرفتن σ_{share} معرفی شده است. شکل ۲ حاکی از آن است که با استفاده از روش فاصلهٔ ازدحام، ذره‌ای به‌عنوان Gbest انتخاب می‌شود که فاصلهٔ ازدحامی بیشتری داشته باشد و شکل ۳ بیان می‌کند که با استفاده از روش نیچه، ذره‌ای به‌عنوان Gbest انتخاب می‌شود که شمارشگر نیچه nci (میزان تجمع اطراف یک جواب) کمتر باشد. برای هر جواب، مقدار شمارشگر نیچه‌ای انتخاب و تعیین می‌شود.

---

1. Crowding Distance
2. Population Distance
3. Moore and Chapman
4. Coello



شکل ۳. روش نیچه ذره‌ای



شکل ۲. نحوه تخمین فاصله ازدحامی نزدیک‌ترین همسایه

شبه کد الگوریتم MOPSO

گام ۱: ایجاد جمعیت اولیه

گام ۲: مقداردهی اولیه به‌سرعت هر ذره

گام ۳: ارزیابی هر ذره از جمعیت

گام ۴: جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیرهٔ آن‌ها در آرشیو خارجی

گام ۵: جدول‌بندی فضای هدف کشف‌شده

گام ۶: هر ذره از میان اعضای آرشیو، رهبری انتخاب کرده و حرکت می‌کند.

گام ۷: بهترین خاطرهٔ شخصی هر یک از ذرات به‌روز می‌شود.

گام ۸: اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه می‌شود.

گام ۹: اعضای مغلوب آرشیو حذف می‌شود.

گام ۱۰: اگر تعداد اعضای آرشیو بیش از ظرفیت تعیین‌شده باشد، اعضای اضافی نیز حذف می‌شوند (اندازهٔ آرشیو محدود است).

گام ۱۱: اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد، به مرحلهٔ ۵ باز می‌گردیم و در غیر این صورت، کار پایان می‌یابد.

الگوریتم مبتنی بر قوت پارتو ـ نسخهٔ دوم (SPEAII)

در سال ۲۰۰۰ زیتزلر، دب و تیله[1] نسخهٔ دوم الگوریتم تکاملی قوت پارتو را ارائه کردند. در واقع، آن‌ها با برطرف کردن سه اشکال الگوریتم تکاملی قوت پارتو، نسخهٔ جدید این الگوریتم را ایجاد کردند. آن‌ها برای این کار، تغییرات زیر را در الگوریتم تکاملی پارتوی قوی اعمال کردند:

- در این الگوریتم، رویکرد جدیدی برای تعریف برازندگی استفاده شده است که در آن، هم مجموعه جواب‌های مغلوب‌شده و هم مجموعه جواب‌های مغلوب‌کننده تأثیر دارد.
- برای پیاده‌سازی هدف دوم بهینه‌یابی چندهدفهٔ این الگوریتم، از روش برآورد تراکم نزدیک‌ترین همسایه برای جست‌وجوی دقیق‌تر استفاده می‌کند.
- این الگوریتم برای حفظ جواب های مرزی، از یک رویکرد مبتنی بر چگالی برای حذف جواب‌های اضافی (انتخاب محیطی) استفاده می‌کند.
- پژوهش‌های نشان داده است که این الگوریتم از نظر هم‌گرایی، تنوع و گستردگی، عملکرد بهتری دارد، اما از نظر سرعت نسبت به نسخهٔ اول کندتر عمل می‌کند (رضاییان و همکاران، ۱۳۹۶).

شبه کد الگوریتم SPEAII

گام ۱: جمعیت اولیه P_0 و آرشیو خالی $\overline{P_0}$ ایجاد می‌شود.

گام ۲: مقدار برازندگی اعضای P_t و $\bar{P}_t$ محاسبه می‌شوند.

گام ۳: اعضای نامغلوب P_t و $\bar{P}_t$ به $\bar{P}_{t+1}$ منتقل می‌شوند.

گام ۴: اگر شرایط خاتمه محقق شود ($t > T$) مجموعهٔ a برابر جواب‌های نامغلوب موجود در $\bar{P}_{t+1}$ قرار گرفته و متوقف می‌شوند. در صورت اینکه شرط محقق نشود، گام بعدی اجرا می‌شود.

گام ۵: با استفاده از اپراتور انتخاب رقابتی از اعضای جمعیت $\bar{P}_{t+1}$ ، استخر امتزاج ایجاد شده، سپس عملیات ترکیب و جهش را روی آن‌ها اعمال کرده و جمعیت فرزندان به دست می‌آید. جمعیت فرزندان جایگزین جمعیت قدیمی می‌شود. بدین ترتیب، جمعیت $\bar{P}_{t+1}$ با اندازهٔ N ایجاد می‌شود.

گام ۶ : یک واحد به شمارنده اضافه می‌شود و گام ۲ اجرا می‌شود.

---

1. Zitzler, Deb and Thiele

روش‌های ارزیابی کارایی الگوریتم‌های چندهدفه

معیارهای کارایی در الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه با معیارهایی که در الگوریتم‌های تک‌هدفه وجود دارند، متفاوت است، به‌طوری که در الگوریتم‌های تک‌هدفه، جواب بهینه دارای ماکزیمم یا مینیمم مقدار سراسری برای یک تابع هدف معین است، در حالی که در الگوریتم‌های چندهدفه، یک‌راه‌حل با توجه به تمامی اهداف، به‌تنهایی نمی‌تواند بهترین جواب (ماکزیمم و مینیمم سراسری) باشد. درواقع، در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از جواب‌ها (نه یک جواب) وجود دارد که در مقایسه با بقیهٔ جواب‌ها در فضای جست‌وجو هنگامی که تمامی اهداف مدنظر قرار گیرند، برتری دارند. در حقیقت، جواب‌هایی که توسط جواب‌های دیگر، مغلوب نمی‌شوند، جزء جواب‌های لبه بهینه شناخته می‌شوند. در ادامه، به برخی از معیارهای کارایی الگوریتم‌ها که در این پژوهش از آن‌ها برای مقایسهٔ الگوریتم‌ها استفاده شده است، اشاره می‌کنیم.

فاصله از نقطه ایدئال (MID)[1]

میزان نزدیکی بین جواب‌های موجود در لبهٔ پارتو و نقطهٔ ایدئال، در این معیار سنجش می‌شود که مقدار آن توسط رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n}$$ رابطهٔ ۱۷)

$$c_i = \frac{\sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1mtotal}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2}}{n}$$ رابطهٔ ۱۸)

که در آن، n تعداد جواب‌های نامغلوب، f_1^{best} مقدار ایدئال برای تابع هدف اول، f_2^{best} مقدار ایدئال بری تابع هدف دوم، $f_{1,total}^{max} - f_{1mtotal}^{min}$ و $f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}$ به‌ترتیب اختلاف بین حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف اول و دوم به‌دست‌آمده برای همهٔ جواب‌های نامغلوب است. هر چه مقدار این فاصله کمتر باشد، یک الگوریتم از عملکرد بهتری برخوردار خواهد بود (زیتزلر و همکاران، ۲۰۰۰).

1. Mean Ideal Distance (MID)

کیفیت پاسخ‌ها (QM)[1]

برای محاسبهٔ مقدار این معیار، ابتدا تمامی جواب‌های نامغلوب به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ اجرای هر یک از الگوریتم‌های چندهدفه، در یک مجموعه ریخته می‌شود، سپس درصد جواب‌های نامغلوب کشف‌شده به‌وسیلهٔ هر الگوریتم محاسبه می‌شود که هر چه این درصد بیشتر باشد، عملکرد آن الگوریتم بهتر خواهد بود.

معیار گوناگونی (DM)[2]

معیار گوناگونی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید. درواقع این معیار، گوناگونی جواب‌های به‌دست‌آمده توسط یک الگوریتم را ارائه می‌دهد.

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \max\left(\left\|x_i' - y_i'\right\|\right)} \qquad \text{رابطهٔ ۱۹)}$$

که در آن، $x_i' - y_i'$ ، فاصلهٔ اقلیدسی بین جواب‌های نامغلوب x_i' و y_i' است. میزان بالاتر این معیار نشان‌دهندهٔ عملکرد بهتر است (زیتزلر و همکاران، ۲۰۰۰).

معیار فاصله‌گذاری (SM)[3]

این معیار، میزان فاصلهٔ بین جواب‌های نامغلوب را بر پایهٔ رابطهٔ اقلیدسی محاسبه می‌کند (اسکات[4]، ۱۹۹۵).

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1}\left|\bar{d} - d_i\right|}{(n-1)\bar{d}} \qquad \text{رابطهٔ ۲۰)}$$

که در آن، d بیانگر فاصلهٔ بین دو جواب پارتو متوالی در لبهٔ پارتو است که این فاصله، از رابطهٔ اقلیدسی به دست می‌آید و $\bar{d}$میانگین تمامی d_i را نشان می‌دهد.

---

1. Quality Metric (QM)
2. Diversify Matric (DM)
3. Spacing Metric (SM)
4. Schott

انتخاب الگوریتم برتر

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها و انتخاب الگوریتم برتر در هر دو مقیاس کوچک و بزرگ از لحاظ تعداد پرتفوی، ابتدا آزمون برابری میانگین‌ها انجام شد و با توجه به برابری یا عدم برابری واریانس جامعه، آزمون برابری میانگین‌ها انجام گرفت. برای انتخاب الگوریتم برتر ابتدا این آزمون‌ها برای دو الگوریتم MOPSO و NSGAII انجام گرفت و الگوریتم برنده پس از آن با الگوریتم SPEAII مقایسه شد و در نهایت، الگوریتمی که بهترین عملکرد را داشته است انتخاب خواهد شد.

فرضیه‌های استفاده‌شده برای آزمون برابری واریانس و برابری میانگین‌ها با سطح اطمینان ۹۵ درصد به شرح زیر است:

مرحلهٔ نخست: انتخاب الگوریتم برنده

$$\begin{cases} H_0: \sigma^2\text{MOPSO(A)} = \sigma^2 NSGA-II\text{(B)} \\ \text{H}_1: \sigma^2\text{MOPSO(A)} \neq \sigma^2 NSGA-II\text{(B)} \end{cases}$$

مرحلهٔ دوم: آزمون برابری واریانس بین الگوریتم برنده و الگوریتم $SPEA-II$

$$\begin{cases} H_0: \sigma^2\text{winner (A)} = \sigma^2 SPEA-II\text{(B)} \\ \text{H}_1: \sigma^2\text{winner (A)} \neq \sigma^2 SPEA-II\text{(B)} \end{cases}$$

آزمون برابری میانگین‌ها

مرحلهٔ نخست: انتخاب الگوریتم برنده

$$\begin{cases} H_0: \mu\text{MOPSO(A)} = \mu NSGA-II\text{(B)} \\ \text{H}_1: \mu\text{MOPSO(A)} \neq \mu NSGA-II\text{(B)} \end{cases}$$

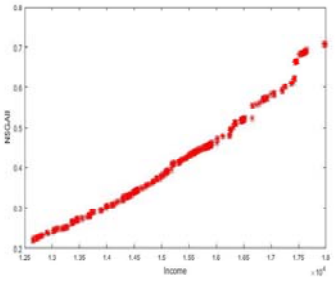
مرحلهٔ دوم: آزمون برابری میانگین بین الگوریتم برنده و الگوریتم $SPEA-II$

$$\begin{cases} H_0: \mu\text{winner (A)} = \mu SPEA-II\text{(B)} \\ \text{H}_1: \mu\text{winner (A)} \neq \mu SPEA-II\text{(B)} \end{cases}$$

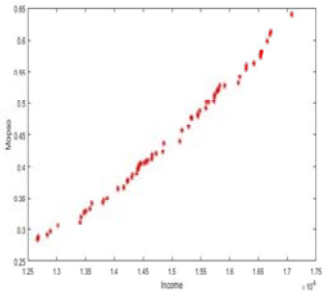
یافته‌های پژوهش

با اجرای مدل‌ها توسط الگوریتم‌های NSGAII،MOPSO و SPEAII جبهه‌های بهینهٔ پارتو را با ۱۰۰۰ بار تکرار در شکل ۴ ریسک قابل پذیرش و بازده به‌دست‌آمده از ایجاد دارایی در ترازنامه بانک در کل پرتفوهای بهینه را نشان می‌دهد.

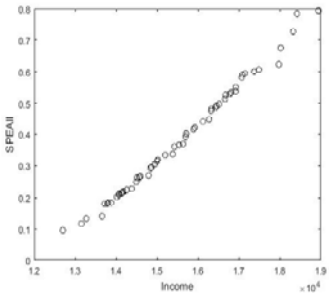
جبهه های بهینه پارتو حاصل از اجرای مدل – Mean AVaR با الگوریتم فرا ابتکاری **NSGAII**



جبهه های بهینه پارتو حاصل از اجرای مدل – Mean AVaR با الگوریتم فرا ابتکاری **Mopso**



بهینه پارتو حاصل از اجرای مدل – Mean AVaR با الگوریتم فرا ابتکاری **SPEAII**



شکل ٤. جبهه‌های پارتو بهینه حاصل از اجرای الگورینم برای مدل‌های پژوهش

انتخاب الگوریتم برتر با در نظر گرفتن معیار MID

آزمون برابری میانگین‌ها برای دو الگوریتم $MOPSO$ و $NSGA-II$ نشان‌دهندهٔ رد فرضیهٔ صفر و عدم برابری میانگین‌ها است. از آنجا که کمتر بودن معیار MID نشان‌دهندهٔ کارایی بهتر است، در

مرحلهٔ نخست الگوریتم $NSGA-II$ به‌عنوان الگوریتم برنده انتخاب شد. در مرحلهٔ دوم آزمون برابری میانگین بین دو الگوریتم $NSGA-II$ و $SPEA-II$ انجام شد. با رد فرضیهٔ صفر، نتایج نشان داد که الگوریتم $SPEA-II$ از عملکرد بهتری در معیار MID برخوردار است. جدول ۱ نتایج آزمون‌های آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۱. انتخاب الگوریتم برتر در معیار MID

MID			
مرحله اول		**مرحله دوم**	
$\mu(MOPSO)=$ ۰/۷۵ $\mu(NSGA-II)=$ ۰/۶۵		$\mu(NSGA-II)=$ ۰/۶۵ $\mu(SPEA-II)=$ ۰/۴۹	
F TEST		**F TEST**	
F stat	۱/۱۱۲	F stat	۴/۱۲۴
F Critical	۱/۴۳	F Critical	۱/۴۳
Result	variances are equal	Result	variances are Unequal
T TEST Assuming equal Variances		**T TEST Assuming Unequal Variances**	
T stat	۶/۱۱	T stat	۸/۵۲
T Critical	۱/۹۵	T Critical	۱/۹۵
Result	μ(MOPSO)>μ(NSGA-II)	Result	μ(NSGA-II)>μ(SPEA-II)
Best algorithm $SPEA-II$			

انتخاب الگوریتم برتر با در نظر گرفتن معیار QM

آزمون برابری میانگین‌ها برای دو الگوریتم $MOPSO$ و $NSGA-II$ نشان‌دهندهٔ رد فرضیهٔ صفر و عدم برابری میانگین‌ها است. از آنجا که بیشتر بودن معیار QM نشان‌دهندهٔ کارایی بهتر است، با توجه به بیشتر بودن میانگین معیار QM در الگوریتم $NSGA-II$، در مرحلهٔ نخست الگوریتم $NSGA-II$ به‌عنوان الگوریتم برنده انتخاب شد. در مرحلهٔ دوم، آزمون برابری میانگین بین دو الگوریتم $NSGA-II$ و $SPEA-II$ انجام شد. با رد فرضیهٔ صفر، نتایج نشان داد که الگوریتم $NSGA-II$ از عملکرد بهتری در معیار QM برخوردار است. جدول ۲ نتایج آزمون‌های آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۲. انتخاب الگوریتم برتر در معیار QM

$\mu(MOPSO) = ۰/۷۳۱$ $\mu(NSGA-II) = ۰/۸۹$		$\mu(NSGA-II) = ۰/۸۹$ $\mu(SPEA-II) = ۰/۸۱$	
F TEST		**F TEST**	
F stat	۸/۹۲	F stat	۰/۲۹
F Critical	۱/۳۶	F Critical	۰/۷۶
Result	variances are Unequal	Result	variances are equal
T TEST Assuming Unequal Variances		**T TEST Assuming equal Variances**	
T stat	−۱۳/۰۶	T stat	۸/۶۱
T Critical	۱/۹۲	T Critical	۱/۹۲
Result	μ(MOPSO)<μ(NSGA-II)	Result	μ(NSGA-II)>μ(SPEA-II)
Best algorithm $NSGA-II$			

انتخاب الگوریتم برتر با در نظر گرفتن معیار DM

آزمون برابری میانگین‌ها برای دو الگوریتم $MOPSO$ و $NSGA-II$ نشان‌دهندهٔ رد فرضیهٔ صفر و عدم برابری میانگین‌هاست. بیشتر بودن معیار DM نشان‌دهندهٔ کارایی بهتر است، بنابراین با توجه به بیشتر بودن میانگین معیار QM در الگوریتم $NSGA-II$، در مرحلهٔ نخست اگوریتم $NSGA-II$ به‌عنوان الگوریتم برنده انتخاب شد. در مرحلهٔ دوم، آزمون برابری میانگین بین دو الگوریتم $NSGA-II$ و $SPEA-II$ انجام شد. با رد فرضیهٔ صفر، نتایج نشان داد که الگوریتم $NSGA-II$ در معیار QM از عملکرد بهتری دارد. جدول ۳ نتایج آزمون‌های آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۳. انتخاب الگوریتم برتر در معیار DM

$\mu(MOPSO) = ۱/۷۱$ $\mu(NSGA-II) = ۱/۹۸$		$\mu(NSGA-II) = ۱/۹۸$ $\mu(SPEA-II) = ۱/۶۳$	
F TEST		**F TEST**	
F stat	۱/۴۳	F stat	۱/۲۸
F Critical	۱/۲۷	F Critical	۱/۲۷
Result	variances are Unequal	Result	variances are equal
T TEST Assuming Unequal Variances		**T TEST Assuming Unequal Variances**	
T stat	−۱۷/۲۶	T stat	۱۸/۱۲
T Critical	۱/۸۹	T Critical	۱/۸۹
Result		Result	
Best algorithm $NSGA-II$			

انتخاب الگوریتم برتر با در نظر گرفتن معیار SM

آزمون برابری میانگین‌ها برای دو الگوریتم $MOPSO$ و $NSGA-II$ نشان‌دهندهٔ رد فرضیهٔ صفر و عدم برابری میانگین‌ها است. از آنجا که کمتر بودن معیار SM نشان‌دهندهٔ کارایی بهتر است، با توجه به کمتر بودن میانگین معیار SM در الگوریتم $NSGA-II$، در مرحلهٔ نخست اگوریتم $NSGA-II$ به‌عنوان الگوریتم برنده انتخاب شد. در مرحلهٔ دوم، آزمون برابری میانگین بین دو الگوریتم $NSGA-II$ و $SPEA-II$ انجام شد. با رد فرضیهٔ صفر، نتایج نشان داد که الگوریتم $NSGA-II$ از عملکرد بهتری در معیار SM برخوردار است. جدول ۴ نتایج آزمون‌های آماری را نشان می‌دهد.

جدول ٤. انتخاب الگوریتم برتر در معیار SM

SM			
$\mu(MOPSO) = ۱/۴۷$ $\mu(NSGA-II) = ۱/۱۷$		$\mu(NSGA-II) = ۱/۱۷$ $\mu(SPEA-II) = ۱/۲۶$	
F TEST		**F TEST**	
F stat	۱/۸۱	F stat	۱/۵۳
F Critical	۱/۳۲	F Critical	۱/۳۲
Result	variances are Unequal	Result	variances are Unequal
T TEST Assuming Unequal Variances		**T TEST Assuming Unequal Variances**	
T stat	۱۸/۶	T stat	−۱۶/۸۱
T Critical	۱/۹۷	T Critical	۱/۹۷
Result	$\mu(MOPSO) > \mu(NSGA-II)$	Result	$\mu(NSGA-II) < \mu(SPEA-II)$
Best algorithm $NSGA-II$			

انتخاب الگوریتم برتر با در نظر گرفتن معیار مدت‌زمان حل (TIME)

آزمون برابری میانگین‌ها برای دو الگوریتم $MOPSO$ و $NSGA-II$ نشان‌دهندهٔ رد فرضیهٔ صفر و عدم برابری میانگین‌ها است. از آنجا که کمتر بودن معیار TIME نشان‌دهندهٔ کارایی بهتر است، با توجه به کمتر بودن میانگین معیار TIME در الگوریتم $MOPSO$، در مرحلهٔ نخست الگوریتم $MOPSO$ به‌عنوان الگوریتم برنده انتخاب شد. در مرحلهٔ دوم آزمون برابری میانگین بین دو الگوریتم $MOPSO$ و $SPEA-II$ انجام شد. با رد فرضیهٔ صفر، نتایج نشان داد که الگوریتم $MOPSO$ از

عملکرد بهتری از لحاظ مدت زمان حل برخوردار است. جدول ۵ نتایج آزمون‌های آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۵. انتخاب الگوریتم برتر در معیار TIME

TIME			
$\mu(MOPSO) = ۱۸۹/۲$ $\mu(NSGA-II) = ۲۳۵/۴$		$\mu(MOPSO) = ۱۸۹/۲$ $\mu(SPEA-II) = ۳۴۳/۶۱$	
F TEST		**F TEST**	
F stat	۱/۸۱	F stat	۲/۸۹
F Critical	۱/۵۳	F Critical	۱/۵۳
Result	variances are Unequal	Result	variances are Unequal
T TEST Assuming Unequal Variances		**T TEST Assuming Unequal Variances**	
T stat	−۱/۴۸	T stat	−۵/۷۱
T Critical	۱/۸۶	T Critical	۱/۸۶
Result	μ(MOPSO)<μ(NSGA-II)	Result	$\mu(MOPSO) < \mu(SPEA-II)$
Best algorithm $MOPSO$			

خلاصهٔ نتایج آزمون‌های آماری برای انتخاب الگوریتم برتر در جدول ۶ نشان داده شده است و نتایج کلی در جدول نشان می‌دهد که الگوریتم $NSGA-II$ در معیارهای QM، DM و SM در مقایسه با دو الگوریتم دیگر چه در اندازهٔ کوچک و در اندازهٔ بزرگ، از عملکرد بهتری برخوردار است. همچنین، الگوریتم $SPEA-II$در معیار MID در هر دو مقیاس کوچک و بزرگ و الگوریتم $MOPSO$در معیار TIME از دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارند.

جدول٦. خلاصهٔ نتایج انتخاب الگوریتم برتر در معیارهای مختلف

معیار ارزیابی	الگوریتم برتر در اندازهٔ کوچک ازلحاظ تعداد پرتفوی	الگوریتم برتر در اندازهٔ بزرگ از لحاظ تعداد پرتفوی
MID	$SPEA-II$	$SPEA-II$
QM	$NSGA-II$	$NSGA-II$
DM	$NSGA-II$	$NSGA-II$
SM	$NSGA-II$	$NSGA-II$
TIME	$MOPSO$	$MOPSO$

منابع و مآخذ

الف. فارسی

پندار، مهدی و ویسی، رضا (۱۳۹۹). سنجش انواع ریسک در نظام بانکداری بدون ربا (روش ترکیبی دیمتل و مدل‌سازی ساختاری تفسیری). ***اقتصاد مالی***، ۱۴(۵۱)، ۲۹- ۵۴.

حسینی، سیدعلی؛ پورزمانی، زهرا و جهانشاد، آزیتا (۱۳۹۹). ارائه مدلی برای انتخاب سبد بهینه سهام با استفاده از الگوریتم هوش جمعی سالپ و شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه. ***مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار***، ۱۱(۴۴)، ۴۷۹- ۵۰۳.

دلوی، محمدرضا؛ باقی، ابراهیم؛ عبدالباقی، عبدالمجید و کاظمی، جواد (۱۳۹۴). کاربرد الگوریتم ژنتیک چند هدفه در بهینه سازی پرتفوی تسهیلات بانک (مطالعه موردی تسهیلات اعطایی بانک ملی استان اصفهان). ***تحقیقات حسابداری و حسابرسی***، ۷(۲۷)، ۱۳۸- ۱۵۲.

شارپ، ویلیام اف؛ گوردون، جی الکساندر و جفری، وی بیلی (۱۳۸۸). ***مدیریت سرمایه‌گذاری***. (سید مجید شریعت پناه سید و ابوالفضل جعفری، مترجمان)، (اثر اصلی، ۱۹۴۷) تهران: اتحاد.

عرب‌مازار، عباس و روئین تن، پونه (۱۳۸۵). عوامل مؤثر بر ریسک اعتباری مشتریان بانکی: مطالعه موردی بانک کشاورزی. ***دوفصل‌نامه علمی پژوهشی جستارهای اقتصادی***، ۳(۶)، ۲۸- ۳۹.

عسکرزاده، غلامرضا (۱۳۸۵). مدل‌سازی ریاضی تعیین ترکیب بهینه پرتفوی تسهیلات اعطایی در مؤسسه‌های مالی و اعتباری. ***فصل‌نامه اندیشه صادق***، ۳(۳)، ۷۹- ۹۴.

فاست، لوران (۱۳۹۵). *مبانی شبکه‌های عصبی: ساختارها، الگوریتم‌ها و کاربردها*. تهران: انتشارات نص.

کیانی قلعه‌نو، روح اله؛ نیرومند، صادق؛ دیده‌خانی حسین و محمودی راد، علی (۱۳۹۹). مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای بهینه‌سازی پرتفوی مالی واحدهای مؤسسه‌های مالی و اعتباری: مورد مطالعه بانک کشاورزی استان سیستان و بلوچستان. ***تصمیم گیری و تحقیق در عملیات***، ۷(۲)، ۲۹۹- ۳۱۵.

محقق‌نیا، محمدجواد؛ دهقان دهنوی، محمدعلی و بائی، محیا (۱۳۹۸). تأثیر عوامل درونی و بیرونی صنعت بانکداری بر ریسک اعتباری بانک‌ها در ایران. ***اقتصاد مالی***، ۱۳(۴۶)، ۱۲۷- ۱۴۴.

منهاج، محمد باقر (۱۳۹۷). ***مبانی شبکه‌های عصبی و هوش محاسباتی***. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

میرزایی، حسین و کریمی اصل، ابراهیم (۱۳۹۷). مدل‌سازی علل درونی معوق شدن تسهیلات قرض‌الحسنه به روش «حد آستانه» (مورد کاربرد : بانک قرض‌الحسنه رسالت). ***اقتصاد مالی،*** ۱۲(۴۲)، ۷۵-۹۸.

ناجی اصفهانی، سیدعلی و رستگار، محمد علی (۱۳۹۷). برآورد ریسک اعتباری مشتریان با استفاده از تحلیل چند بعدی ترجیحات (مطالعه موردی: یک بانک تجاری در ایران). ***فصل‌نامه علمی ـ پژوهشی مدل‌سازی اقتصادی،*** ۱۲(۴۴)، ۱۴۳- ۱۶۱.

ب. انگلیسی

Artzner, P., Elbaen, F., Eber, J. M., & Heath, D. (1999). Coherent measures of risk. ***Mathematical finance,*** 9(3), 203-228.

Coello, C.C.A. (2008). Solving Engineering Optimization Problems with the Simple Constrained Particle Swarm Optimizer. ***Informatica***, 32(3), 319-326.

Coello, C.C.A. (2009). Evolutionary multi-objective optimization: some current research trends and topics that remain to be explored. ***Front Comput Sci China***, 3: 18–30.

Deb, K., Agrawal, S., Amrit, P. & Meyarivan, T. (2000). A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. ***Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI, 2000,*** Volume 1917 ISBN : 978-3-540-41056-0.

Dubois, D. & Prade, H. (1987). The mean value of a fuzzy number. ***Fuzzy Sets and Systems.*** 24(3), 279-300. https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90028-5.

Guo, Sini & Yu, Lean & Li, Xiang & Kar, Samarjit, 2016. Fuzzy multi-period portfolio selection with different investment horizons. *European Journal of Operational Research,* 254(3), 1026-1035.

Heilpern, S. (1992). The expected value of a fuzzy number. ***Fuzzy Sets and Systems,*** 47(1), 81-86. https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90062-9.

Liu, B. & Liu, D. (2002). A Survey of Credibility Theory. ***Fuzzy Optimization and Decision Making,*** 5(4), 387-408.

Liu, C. C., & Liu, Y. T. (2008). Genetic algorithms for portfolio selection problems with minimum transaction lots. ***European Journal of Operational Research,*** 185(1), 393-404.

Lotfizadeh, A. (1999). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. ***Fuzzy sets and systems,*** 100 (1), 9-34.

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

Metawa, N. (2016). Loan Portfolio Optimization using Genetic Algorithm: A case of credit constraints. ***Cairo: S.N. 12th International Computer Engineering Conference (icenco).*** pp. 59-64.

Moore, J., & Chapman, R. (1999). Application of Particle Swarm to Multiobjective Optimization. ***Computer Systems: Science & Engineering***.

Rachev, S. T., Stoyanov, S. V. & Fabozzi, F. J. (2008). ***Advanced stochastic models, risk assessment, and portfolio optimization: The ideal risk, uncertainty, and performance measures*** (Vol. 149). John Wiley & Sons.

Rockafellar, R. T., Uryasev, S. & Zabarankin, M. (2006). Generalized deviations in risk analysis. ***Finance and Stochastics***, 10(1), 51-74.

Schott, J. R. (1995). ***Fault Tolerant Design Using Single and Multicriteria Genetic Algorithm Optimization*** (No. AFIT/CI/CIA-95-039). Air force inst of tech wright-patterson AFB OH.

Srinivas, N. & Deb, K. (1995) Multi-Objective function optimizadon using non-dominated sorting genetic algorithms, ***Evolutionary Computation,*** 2(3):221-248.

Yager, R.R. (1980). On a General Class of Fuzzy Connectives. ***Fuzzy Set and Systems,*** 4, 235-242.http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114(80)90013-5.

Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. ***Evolutionary Computation,*** 8(2), 173-195.