مروری بر کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در مباحث مالی

دریافت: ۹۷/۴/۳۰ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۲

جمال قاسمی، نویسنده مسئول)
دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران
j.ghasemi@umz.ac.ir

سروه فرزاد
دکترای حسابداری دانشگاه مازندران
farzadsooroo@yahoo.com

الگوریتم کلونی زنبور عسل / الگوریتم کرم شب‌تاب / الگوریتم کلونی مورچگان / الگوریتم جغرافیای زیستی

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در حوزه مالی می‌باشد. الگوریتم‌های فراابتکاری مورد مطالعه در این تحقیق شامل الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم کرم شب‌تاب، الگوریتم زنبور عسل، الگوریتم تجمعی ذرات، الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم جغرافیای زیستی می‌باشد. در این مقاله، ضمن بررسی هر یک از این الگوریتم‌ها به صورت مختصر، مطالعات داخلی و خارجی در این زمینه انجام گرفته و کاربرد آن‌ها در زمینه‌ی امور مالی بیان شده است. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد، پژوهش‌های بیشتر و در نهایت استفاده از این الگوریتم‌ها در پیش‌بینی‌های مربوط به مباحث مالی و بازار سرمایه می‌تواند تا حد قابل‌قبولی به افزایش عملکرد عملیات حسابداری و حسابرسی کمک کند. همچنین افزایش تحقیقات و فراهم نمودن زمینه‌های عملیاتی در سال‌های اخیر نشان‌دهنده‌ی علاقمندی محققین و مراکز تحقیقاتی در جهت توسعه‌ی این روش‌های نوین به ویژه در بحث توسعه‌ی نرم‌افزاری است.

مقدمه

کار با هوش مصنوعی در دهه ۱۹۵۰ به وسیله پیشگامان در رشته‌های آمار، عصب‌شناسی، روانشناسی و ... آغاز شد. در این گونه روش‌ها بشر در پی تسخیر عالم هستی است و سعی دارد تا از بهترین و موثرترین روش‌های طبیعی استفاده کند. تاکنون تکنیک‌های متفاوتی جهت پیش‌بینی ارائه شده است که هر یک مزایا و معایب خاص خود را داشته‌اند. این تکنیک‌ها به دو دسته روش‌های سنتی و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی تقسیم می‌شوند [۱]. در دنیای پیرامون انسان که پدیده‌ها اغلب رفتارهایی غیر خطی دارند، شناسایی و پیش‌بینی این پدیده‌ها نیازمند استفاده از روش‌های نوین پیش‌بینی و ارزیابی است. زیرا این تکنیک‌ها ابزارهایی دقیق برای پیش‌بینی در محیط‌های مغتشش و رهگیری رفتارهای غیرخطی هستند. به طور کلی مرور ادبیات انجام شده بیانگر این است که در بورس اوراق بهادار تهران بیشتر از روش‌های سنتی به منظور پیش‌بینی استفاده شده است. با توجه به اینکه برای استفاده از الگوهای سنتی باید از سری‌های زمانی ساکن (ایستا) استفاده کرد و از آنجا که بیشتر سری‌های زمانی اقتصادی غیرایستا است، این الگوهای سنتی مشکل عمده‌ای برای پیش‌بینی دارد، هم‌چنین روش‌های هوش مصنوعی مشکل عمده الگوهای سنتی را از نظر ایستایی در سری‌های زمانی ندارد. اگر چه نمی‌توان هیچ تضمینی قائل شد، اما آزمون این روش‌ها در مسایل مختلف فنی و مهندسی، اقتصاد، مالی و غیره نشان داده است که در صورت اجرای درست و انتخاب مناسب پارامترهای داخلی و متناسب با نوع مسأله، با استفاده از این روش‌ها می‌توان به پاسخ‌های مناسب‌تری از پاسخ‌های همتاهای کلاسیکشان دست یافت. به عبارت دیگر، اصولا این روش‌ها ایجاد شد تا کاستی‌های روش‌های کلاسیک را جبران کند. آن‌ها به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده‌اند تا در صورت امکان، از بهینه‌های محلی، به اصطلاح بیرون بپرند، در آن‌ها گیر نیفتند و به بهینه جامع برسند. اما در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه مقایسه روش‌های هوشمند و روش‌های کلاسیک آماری در مدل‌سازی مسایل پیش‌بینی انجام گرفته است و نتیجه‌ی آن‌ها دقت بالاتر روش‌های هوشمند در مسایل پیش‌بینی را نشان داده است. در طول دهه گذشته، ادبیات شایان توجهی در زمینه الگوریتم‌های الهام گرفته بیولوژیکی پدید آمده است. این الگوریتم‌های قدرتمند برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی استفاده می‌شوند و کاربردهای روشنی برای استفاده در مدل‌سازی مالی و توسعه سیستم‌های تجاری دارند. بازارهای مالی نشان‌دهنده محیطی پیچیده و همیشه در حال تغییر است، محیطی که در آن سرمایه‌گذاران در حال رقابت برای کسب سود هستند. موجودات زیست‌محیطی به مدت طولانی در چنین محیط‌هایی زندگی کردند و برای به‌دست آوردن منابع لازم به منظور کسب حصول اطمینان از بقای خود رقابت کردند. این امری طبیعی است که فعالان بازارهای مالی برای حفظ بقا در جنگل‌های مالی به سمت الگوریتم‌هایی که از فرایندهای زیستی الهام گرفته شده‌اند روی بیاورند. در مباحث مالی مانند ورشکستگی، درماندگی مالی، انتخاب بهینه پرتفوی، شاخص قیمت سهام، ریسک اعتباری بانک‌ها و ... پژوهش‌هایی با استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در داخل و خارج از کشور انجام شده است. در ادامه ابتدا الگوریتم‌های مورد نظر معرفی شده سپس پیشینه مربوط به هر کدام از این الگوریتم‌ها و کاربردهای آن‌ها در زمینه‌های مختلف مالی بررسی می‌شود.

۱. معرفی الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های تقریبی به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری تقسیم می‌شوند. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی، همگرایی زودرس به این نقاط است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برونرفت از

نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم‌ها در دهه‌های اخیر توسعه یافته است. این واژه را اولین بار «گلوور» [۲] در ۱۹۸۶ به کاربرد که از ترکیب دو واژه یونانی «متا» و «هیوریستیک» ساخته شده است. پیشوند «متا» به معنای فراتر یا در سطحی بالاتر است و «هیوریستیک» به معنای یافتن است. قبل از پذیرش عمومی واژه فراابتکاری، عبارت «روش ابتکاری نوین» [۳] برای این‌گونه روش‌ها به‌کار می‌رفت. در ادامه الگوریتم‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت مورد بحث این پژوهش شامل الگوریتم تجمعی ذرات، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم زنبور عسل، الگوریتم کرم شب‌تاب، الگوریتم جغرافیای زیستی و الگوریتم جستجوی هارمونی معرفی می‌شوند.

۱-۱. الگوریتم تجمعی ذرات

این الگوریتم، اولین بار توسط کندی و ابرهات [۴] در سال ۱۹۹۱ معرفی گردید. اساس حرکت تجمعی ذرات، شبیه‌سازی یک رفتار دسته‌جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرنده‌ها و ماهیان استفاده می‌شود و یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های بهینه‌سازی فرااکتشافی است. حرکت تجمعی ذرات از عامل جمعیت که شامل راه‌حل‌های بالقوه مسأله‌ی تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. در حرکت تجمعی ذرات، هر عضو از جمعیت، دارای یک سرعت انطباقی (تغییر مکان) است که مطابق با آن در فضای جستجو حرکت می‌کند. علاوه بر آن، هر کدام از آن‌ها دارای حافظه نیز می‌باشند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به خاطر می‌سپارند. بنابراین حرکت هر عضو در دو جهت صورت می‌گیرد: به سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده‌اند و به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آن‌ها ملاقات کرده است. یکی از جنبه‌های کلیدی و جذاب روش PSO سادگی آن است، به طوری که فقط شامل دو معادله سرعت و مکان است که مختصات هر ذره نمایان‌گر یک جواب ممکن مرتبط با دو بردار است. بردارهای موقعیت (xi) و سرعت (vi). دو بردار وابسته و مرتبط با هر ذره در فضای جستجو N بعدی هستند که به ترتیب به‌صورت xi=[xi1;xi2;.....;xiN] و vi =[vi1;vi2;.....viN] بیان می‌گردند. یک اجتماع از پرندگان از تعدادی ذره (پاسخ‌های ممکن) تشکیل شده است که در یک فضای پاسخ ممکن، برای جستجوی جواب‌های بهینه پیش می‌روند (پرواز می‌کنند). موقعیت هر ذره با توجه به بهترین جستجوی خود ذره، بهترین تجربه کلی پرواز گروهی و بردار سرعت پیشین خود ذره، مطابق با رابطه (۱) به هنگام می‌شود:

رابطه (۱):

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= wv_i^k + c_1 r_1 \left(pbest_i^k - x_i^k \right) + c_2 r_2 \left(gbest^k - x_i^k \right) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned}$$

که در آن C_1 و C_2 دو ثابت مثبت هستند. r_1 و r_2 دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک هستند. w وزن لختی است. $pbest_i^k$ بهترین موقعیت ذره i است که با توجه به تجربه این ذره به دست می‌آید (رابطه۲).

رابطه۲:

$$pbest_i^k = \left[x_{t_1}^{pbest}, x_{t_2}^{pbest}, ..., x_{t_N}^{pbest} \right]$$

$gbest^k$ بهترین موقعیت ذره با توجه به تجربه کلی گروهی است (رابطه۳).

رابطه (۳):

$$gbest_i^k = \left[x_1^{gbest}, x_2^{gbest}, ..., x_N^{gbest} \right]$$

و سرانجام K شاخص تکرار است. روند الگوریتم PSO در حالت کلی به این صورت است که، برای هر ذره بردارهای موقعیت و سرعت به صورت تصادفی مشابه با ابعاد مساله مقداردهی اولیه می‌شوند. برازندگی برای هر ذره pbest اندازه‌گیری شده و ذره دارای بهترین مقدار برازندگی gbest، ذخیره می‌گردد. بردارهای سرعت و موقعیت مطابق با روابط

بالا برای هر ذره به هنگام می‌شوند. علی‌رغم مفهوم ساده و پیاده‌سازی آسان روش معرفی شده، برتری آن در مقایسه با سایر روش‌ها در بسیاری از زمینه‌های مختلف کاربردی، به اثبات‌رسیده است. اگر رابطه تغییر سرعت که در الگوریتم سراسری آمده است به صورت زیر نوشته شود (رابطه۴):

رابطه (۴):

$$v_i^{k+1} - v_i^k = c_1 r_1 \left(pbest_i^k - x_i^k \right) + c_2 r_2 \left(gbest^k - x_i^k \right)$$

مشخص است که سمت چپ رابطه در واقع بیانگر شتاب ذره i ام در زمان t است (رابطه۵).

رابطه (۵):

$$\alpha_i^k = v_i^{k+1} - v_i^k$$

در نتیجه به c_1 و c_2 که اعداد ثابت مثبتی هستند، ضرایب شتاب گفته می‌شود و در بعضی از مطالعات به ترتیب به عنوان ضرایب شناسایی و اجتماعی معروف هستند و کشش نسبیpbest و gbest را تعیین می‌کنند. ضریب c_1، ضریبی است که تعیین می‌کند ذره چه مقدار از بهترین وضعیت حافظه اش تاثیر می‌گیرد و c_2 تعیین می‌کند که ذره چه مقدار از بهترین وضعیت بقیه جمع تاثیر می‌گیرد. افزایش مقدار پارامتر c_1 باعث تقویت جستجوی فضای پاسخ می‌گردد، به طوری که هر ذره به سمت بهترین موقعیت خودش، pbest حرکت می‌کند. همچنین، افزایش در مقدار پارامتر c_2 باعث تقویت میزان بهره‌برداری از حداقل سراسری فرضی می‌شود. کارهای اخیر که در زمینه PSO انجام شده است، مقادیر $C_1=C_2=2$ را به عنوان یک مقدار مناسب برای این الگوریتم پیشنهاد می‌کنند. ضرایب r_1 و r_2 برای تولید اعداد تصادفی مابین صفر و یک هستند که معمولاً هر دو عدد، تابع تصادفی کاملاً متفاوت از هم هستند و در بیشتر پیاده‌سازی‌ها، دو عدد تصادفی مذکور به صورت مستقل از هم و تصادفی با توزیع یکنواخت هستند که برای تغییر دادن میزان کشش pbest و gbest استفاده می‌شوند. استفاده از اعداد تصادفی در الگوریتم بهینه‌سازی به منظور شبیه‌سازی بخش اندکی از رفتار غیرقابل پیشگویی اجتماع ذرات است.

۱-۲. الگوریتم کلونی مورچگان

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان نخست توسط دوریگو [۵] در سال ۱۹۹۲ در پایان نامه دکتری وی ارائه شد. الگوریتم اولیه قصد داشت یک مسیر بهینه را در یک گراف بر اساس رفتار کلونی مورچگان در جستجوی مسیری بین لانه و منبع غذا پیدا کند. ایده اولیه برای حل دسته‌های بسیاری از مسائل عددی توسعه پیدا کرد. برای استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان در حل مسائل، نخست باید یک گراف تشکیل داد که در آن احتمال حرکت در مسیر بعدی بر اساس تابع کیفی زیر تعیین می‌شود و پس از آن مقدار فرومون و یا وزن هر یال به صورت زیر به روز می‌شود (روابط۶و۷).

رابطه (۶):

$$P_{ij}(t) = \frac{\tau_{ij}(t)^{\alpha} \left(\frac{1}{d_{ij}} \right)^{\beta}}{\Sigma k \varepsilon allallowedvertices \tau_{ik}(t)^{\alpha} \left(\frac{1}{d_{ij}} \right)^{\beta}}$$

رابطه (۷):

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \sum_{k \varepsilon ant, thatchoseedge(i,j)} \frac{Q}{L_k}$$

Pij(t) احتمال عبور مورچه در امتداد یال i و j، $\tau_{ij}(t)$ مقدار فرومون مربوط به یال i و j است، dij فاصله بین نود i و نود j و α و β پارامترهایی برای کنترل تاثیر p، dij ضریب تبخیر فرومون، Lk هزینه مسیر k ام مورچه و Q نیز یک ثابت است.

۱-۳. الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب برای نخستین بار توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ ارائه شد. یانگ کرم شب تاب را بر اساس فرضیه‌های زیر فرموله کرده است [۶]. الف) کرم‌های شب‌تاب فاقد جنسیت می‌باشند، بنابراین یک کرم شب تاب می‌تواند توسط تمامی کرم‌های شب‌تاب دیگر جذب شود.

ب) جذابیت متناسب با نور کرم است و برای هر دو کرم شب‌تاب، کرم با نور کمتر جذب کرم با نور بیشتر می‌شود، با افزایش مسافت‌کاهش نور کرم شب‌تاب نیز در نظر گرفته می‌شود. ج) اگر هیچ کرم شب‌تاب نورانی‌تری نباشد، کرم شب‌تاب به صورت تصادفی حرکت خواهد کرد. دال) روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد. در سال ۲۰۰۹ مقایسه این الگوریتم با الگوریتم‌های پرواز پرندگان و الگوریتم ژنتیک مشخص کرد که این الگوریتم برای پیدا کردن نقطه بهینه عمومی در برخی کاربردهای مورد آزمون قرار گرفته، از کارایی بهتری برخوردار است. پدیدآورنده الگوریتم کرم شب‌تاب سال ۲۰۱۰ نتایج آزمون‌های انجام شده دیگری بر روی این الگوریتم را منتشر و علاوه بر اعتبار بخشیدن به این الگوریتم سرعت رسیدن به جواب آن را نیز مورد بررسی قرار داد. کرم‌های شب‌تاب که از خانواده‌ی lampyridae ها هستند دارای توانایی انتشار نور بی‌حرارت از خود هستند، که این نور از واکنش‌های شیمیایی درون بدن آن‌ها حاصل می‌شود. سیستم نور در این‌گونه حشرات برای ارسال سیگنال‌های هشدار در میان حشرات و یا جذب طعمه می‌باشد که به مرور زمان این خاصیت برای جذب جفت تکامل پیدا کرده است. الگوی چشمک زدن نور در این گونه حشرات به نوع حشره بستگی دارد به طوری که حشرات نر و یا ماده برای جذب جفت، با ریتم خاصی از خود نور ساتع می‌نمایند، این‌گونه حشرات به صورت گروهی نیز می‌توانند الگوی انتشار نور خود را با یکدیگر هماهنگ نمایند. در الگوریتم کرم شب تاب F هدف اصلی ارتباطات نوری جذب سایر کرم‌های شب‌تاب می‌باشد. مهمترین مسائل مربوط به خصوصیات تشعشع نور از کرم‌های شب‌تاب است که بایستی بهینه شود. عمده‌ترین کاربرد الگوریتم کرم شب‌تاب در بهینه‌سازی مسائلی می‌باشد، که هدف نهایی بیشینه کردن تابع هدف است. در این الگوریتم تابع هدف به سادگی می‌تواند با مقدار روشنایی کرم‌های شب‌تاب متناسب شود. فرایند بهینه‌سازی این الگوریتم از تغییرات شدت نور و جذابیت استفاده می‌نماید.

جذابیت یک کرم شب تاب بر اساس درخشندگی یا شدت نوری تعیین می‌شود که از تابع هدف به دست آمده است. در ساده‌ترین حالت برای مسائل بهینه‌سازی که در آن مقدار بیشینه تابع هدف به دست می‌آید، بیشینه روشنایی، I یک کرم شب‌تاب در مکان منحصر به فرد X می‌تواند مقدار روشنایی با تابع هدف متناسب شود (رابطه۸).

رابطه (۸): $\boxed{\left(I(x)\alpha f(x)\right)}$

با این حال جذابیت، "β" کاملا نسبی است و باید در چشمان ناظر دیده شود و یا توسط کرم‌های شب‌تاب دیگر قضاوت شود. بنابراین، جذابیت با مسافت r_{ij} بین کرم شب‌تاب i و کرم شب‌تاب j تغییر می‌کند. شدت نور با افزایش فاصله از منبعش کاهش می‌یابد و نور در محیط نیز جذب می‌شود، بنابراین باید اجازه داده شود جذابیت با درجه جذب تغییر کند. در ساده‌ترین حالت شدت نور I(r) با مسافت r به طور پیوسته و نمایی تغییر می‌کند. بیان ریاضی تغییرات شدت نور در رابطه (۹) آمده است.

رابطه (۹): $\boxed{I = I_0 e^{-\gamma r}}$

Io شدت نور اولیه و Υ ضریب جذب نور می‌باشد. میزان جذب کرم شب‌تاب با شدت نوری که از کرم‌های شب‌تاب ساطع می‌شود، متناسب است. اکنون می‌توان میزان جذابیت یک کرم شب‌تاب β را طبق رابطه (۱۰) تعریف کرد.

رابطه (۱۰): $\boxed{\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2}}$

β۰ مقدار جذابیت در مسافت صفر است. فاصله بین هر دو کرم شب‌تاب i و j در Xi و Xj را می‌توان از مختصات کارتزین طبق رابطه (۱۱) به دست آورد.

رابطه (۱۱): $\boxed{r_{ij} = \left\| X_i - X_j \right\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \left(X_{i,k} - X_{J,K} \right)^2}}$

Xi;k جزء k ام از کرم شب‌تاب I است. در این الگوریتم کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت

می‌کنند. در هر مرحله میزان جابه‌جایی کرم جذب‌شده i به سوی کرم شب‌تاب جذاب‌تر (روشن تر) j توسط رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

رابطه (۱۲): $$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}} \left(x_i - x_j \right) + \alpha \varepsilon_i$$

قسمت دوم رابطه با جذب در ارتباط است، در حالی که قسمت سوم تصادفی است که با بردار تصادفی ε_i تغییر می‌کند که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند (رابطه۱۳).

رابطه (۱۳): $$\alpha \in [0,1], \beta_0 = 1, \gamma = 1$$

در بیشتر کاربردها می‌توان مقادیر را در نظر گرفت. پارامتر Υ تغییر جذابیت را مشخص می‌کند و مقدار آن مشخص‌کننده تعیین سرعت همگرایی و چگونگی رفتار الگوریتم کرم شب‌تاب است. در تئوری $\gamma \in [0,\infty)$ اما در عمل Υ=۰ یا Υ=۱ توسط سیستمی که باید بهینه شود تعیین می‌شود. در نهایت زمانی که Υ=۰، جذابیت ثابت است β=β_0. در واقع مانند این است گفته شود که شدت نور در یک فضای ایده‌آل کاهش نمی‌یابد. بنابراین یک کرم شب‌تاب روشن می‌تواند در هر جایی از ناحیه دامنه دیده شود. بنابراین یک نقطه بهینه (معمولا بهینه عمومی) می‌تواند به راحتی قابل دسترس شود که مطابق با یک حالت خاص الگوریتم پرواز پرندگان است. Υچگونگی رفتار الگوریتم را کنترل می‌کند. همچنین این امکان وجود دارد که با تنظیم Υ بتوان چندین نقطه بهینه مختلف را (در صورت وجود چندین نقطه بهینه) در طی تکرارهای مشابه پیدا کرد. در حقیقت با افزایش مقدار Υ پارامتر جذابیت کمرنگ‌تر شده، لذا کرم‌ها به سمت بهینه‌های محلی جذب نمی‌شوند. در صورت وجود چندین نقطه بهینه در فضایی که کرم‌ها رها می‌شوند در صورتی که تعداد کرم‌ها به شکل قابل توجهی از نقاط بهینه بیشتر باشد هیچ نقطه بهینه‌ای از چشم کرم‌ها دور نخواهد ماند.

۱-۴. الگوریتم کلونی زنبور عسل

کلونی زنبور مصنوعی یا همان ABC [۷] الگوریتمی فرامکاشفه‌ای مبتنی بر زندگی اجتماعی زنبور عسل است که در سال ۲۰۰۵ توسط کارابوگا جهت بهینه‌سازی مسائل عددی معرفی گردید. در این پژوهش به این روش نماد ABC اطلاق می‌گردد. الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی شامل سه مولفه اساسی است: زنبورهای کارگر، غیرکارگر و منابع غذایی. در این مدل دو روش هدایت‌گر رفتار وجود دارد که شامل به خدمت گرفتن زنبور جدید کاوشگر برای منابع غذایی غنی، با دریافت بازخورد مثبت و ترک منابع غذایی ضعیف توسط زنبورها با دریافت بازخور منفی، می‌باشد. در الگوریتم زنبور مصنوعی، کلونی شامل سه گروه از زنبورها می‌باشد که عبارتند از: زنبوران کارگر مرتبط به منابع غذایی مشخص، زنبوران ناظر که بر انتخاب منابع غذایی نظارت می‌کنند و زنبوران پیش‌آهنگ که به صورت تصادفی به دنبال منابع غذایی می‌گردند. زنبوران ناظر و پیش‌آهنگ هر دو زنبورهای غیرکارگر نامیده می‌شوند. ابتدا مکان تمامی منابع غذایی توسط زنبوران پیش‌آهنگ کشف می‌گردد، سپس شهد منابع غذایی توسط زنبوران کارگر و ناظر استخراج می‌گردد. این بهره‌برداری پیوسته منجر به تهی‌شدن آن منبع می‌گردد. بعد از آن زنبوران کارگر به زنبوران پیشاهنگی تبدیل می‌گردند تا دوباره به جست وجوی منابع غذایی بیشتری بپردازند. در کلونی زنبور مصنوعی، موقعیت منبع غذایی یک جواب ممکن برای مسأله بهینه‌سازی می‌باشد و میزان شهد منبع غذایی متناظر با برازش جواب مربوطه است. تعداد زنبورهای کارگر یا زنبورهای ناظر مساوی با تعداد راه‌حل‌های جمعیت می‌باشد، از این رو هر زنبور فقط و فقط با یک منبع غذایی در ارتباط است. در گام اول الگوریتم یک جمعیت تصادفی توزیع شده اولیه از SN جواب (مکان‌های منبع غذا) ایجاد می‌کند، SN تعداد زنبورهای کارگر یا ناظر می‌باشد. هر جواب xi یک بردار D است. در اینجاD تعداد پارامترهای بهینه‌سازی می‌باشد. در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، هر دور حلقه اصلی شامل

سه گام اصلی است. در ابتدا زنبورهای کارگر به سمت منابع غذایی ارسال می‌شوند و میزان شهد منابع ارزیابی می‌گردد. بعد از به اشتراک گذاشتن اطلاعات منابع غذایی، انتخاب نواحی منابع غذایی توسط ناظرها انجام می‌شود و میزان شهد منابع غذایی جدید استخراج گردیده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس زنبورهای پیش‌آهنگ مشخص می‌گردند و به‌صورت تصادفی به سمت منابع غذایی احتمالی ارسال می‌گردند. این گام‌ها به تعداد معینی تکرار می‌شوند که این تعداد بیشترین تعداد دور حلقه (MCN) نامیده می‌شود. زنبور ناظر مصنوعی، یک منبع غذایی را با توجه به مقدار احتمال (Pi) مربوط به آن منبع غذایی انتخاب می‌کند. این احتمال توسط رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۱۴):

$$P_I = \frac{Fitness\left(S_i\right)}{\sum_{n=1}^{SN} Fitness\left(S_n\right)}$$

در این رابطه Fitness(Si) مقدار شایستگی جواب Si می‌باشد که متناظر با میزان شهد منبع غذایی در مکان i ام است و Sn تعداد منابع غذایی است که مساوی با تعداد زنبورهای کارگر یا ناظر می‌باشد. به منظور ایجاد موقعیت غذای کاندید جدید، با توجه به موقعیتی که در حافظه می‌باشد، کلونی زنبور مصنوعی از عبارت زیر استفاده می‌کند:

رابطه (۱۵):

$$v_{ij} = \left(X_{ij} - X_{kj}\right)\phi_{ij} + X_{ij}$$

در رابطه فوق

{sn و ... و ۲ و ۱} ϵ k و {۱و۲،...،D} ϵ j شاخص‌هایی هستند که به صورت تصادفی انتخاب می‌گردند. گرچه k به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد، لیکن مقدار آن با i فرق دارد. Øij یک عدد تصادفی بین منفی یک و مثبت یک می‌باشد و پارامتری هست که تولید منابع غذایی همسایه حول X_{ij} را کنترل می‌کند. از این رابطه متوجه می‌شویم که زمانی که تفاوت بین X_{ij} و X_{jk} کاهش می‌یابد، به معنی کاهش انحراف از موقعیت نقطه اول است. بنابراین زمانی که جست‌وجو به جواب بهینه نزدیک می‌گردد، طول گام‌ها نیز کاهش می‌یابد. اگر مقدار پارامتری از حد مجاز تجاوز کند، با مقدار قابل قبول تنظیم می‌گردد. در این تکنیک، زنبور پیش‌آهنگ منبع غذایی جدید را می‌تواند با استفاده از رابطه (۱۶) پیدا کند:

رابطه (۱۶):

$$X_i^j = X_j^{\min} + rand\left[0,1\right]\left(X_{\max}^j - X_{\min}^j\right)$$

بعد از اینکه مکان منبع کاندید جدید یعنی V_{ij} ایجاد شد و توسط زنبور مصنوعی ارزیابی گردید، کارایی آن نسبت به مکان قبلی ارزیابی شده و اگر غذای جدید شهد بیشتر یا به همان اندازه مکان قبلی داشته باشد، جایگزین قبلی در حافظه می‌گردد در غیر اینصورت قبلی در حافظه می‌ماند. به بیان دیگر یک انتخاب حریصانه در عملیات میان مکان قبلی و مکان جدید انجام می‌پذیرد. به طور کلی کلنی زنبور عسل سه فرایند انتخاب متفاوت زیر را به کار می‌گیرد:

الف: فرآیند انتخاب سراسری که مقدار احتمال در این مرحله محاسبه شده و توسط زنبورهای ناظر برای کشف نواحی محتمل به کار می‌رود.

ب: انتخاب حریصانه برای برگزیدن منبع برتر صورت می‌پذیرد.

ج: یک انتخاب تصادفی توسط زنبورهای پیش‌آهنگ انجام می‌پذیرد.

۱-۵. الگوریتم جغرافیای زیستی

جغرافیای زیستی علم مطالعه‌ی پراکندگی جغرافیای موجودات زنده است. شبیه‌های ریاضی جغرافیای زیستی، چگونگی مهاجرت یک گونه از یک زیستگاه به زیستگاه دیگر و به وجود آمدن یا انقراض یک گونه را توصیف می‌کنند. زیستگاه‌هایی که برای اقامت گونه‌های زیستی مناسب‌تر هستند، شاخص شایستگی زیستگاه (HSI) بالاتری دارند. متغیرهای مشخص‌کننده‌ی کیفیت محل سکونت متغیرهای شاخص شایستگی (SIV) نامیده می‌شوند. در واقع (SIV) متغیرهای مستقل بوده و HSI متغیر وابسته به SIVها است.

زیستگاه‌هایی با HSI بالا تعداد گونه‌های بیشتری را در خود جای می‌دهند و برعکس زیستگاه‌هایی با HSI پایین تعداد گونه‌های کمتری را دربر می‌گیرند. با افزایش HSI در یک زیستگاه، و افزایش تعداد گونه‌ها، تمایل به مهاجرت از آن زیستگاه به منظور جستجوی زیستگاهی با اندوخته غذایی بهتر و جمعیت کمتر، افزایش می‌یابد. از طرفی زیستگاه‌هایی با جمعیت کمتر تمایل به مهاجرت‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند. در واقع بیشینه‌ی مهاجرت به زیستگاه زمانی است که هیچ گونه‌ای در زیستگاه وجود ندارد. با افزایش تعداد گونه‌ها، زیستگاه شلوغ‌تر شده و ممکن است گونه‌های کمتری به آنجا مهاجرت کنند و λ کاهش می‌یابد. نقطه‌ای که در آن زیستگاه دارای بیشینه‌ی تعداد نمونه (S_{max}) است، نقطه‌ای با مهاجرت‌پذیری صفر خواهد بود. با توجه به نمودار مهاجرت‌پذیری، مشخص است که اگر هیچ گونه‌ای در زیستگاه وجود نداشته باشد، μ صفر است و با افزایش تعداد گونه‌ها این نرخ افزایش می‌یابد. بیشینه‌ی μ، E و بیشینه‌ی λ، I می‌باشد. تعادل تعداد گونه‌ها زمانی است که μ و λ برابر باشند، S۰ محل این تعادل را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن $n=S_{max}$ می‌توان μ و λ را در زمانی که در زیستگاه k گونه وجود دارد به صورت زیر بیان کرد (رابطه۱۷):

رابطه (۱۷):
$$\mu_k = E\frac{k}{n}$$

رابطه (۱۸):
$$\lambda_k = I\left(1-\frac{k}{n}\right)$$

که در آن‌ها، μ_k و λ_k به ترتیب نرخ مهاجرت‌دهی و مهاجرت‌پذیری در یک زیستگاه با k گونه است. در شرایط خاص می‌توان $\mu k + \lambda = E = I_k$ را در نظر گرفت. سیمون [۸] با بهره‌گیری از اندیشه‌ی جغرافیای زیستی در طبیعت، الگوریتمی تحت عنوان BBO ارائه نمود. فرض کنید یک مساله و جمعیتی از راه‌حل‌های مختلف وجود دارد. هر راه‌حل را می‌توان به عنوان یک زیستگاه در نظر گرفت، که متغیرهای تصمیم در آن همان SIVها می‌باشند (زیستگاه همان کروموزوم و SIV همانند ژن در GA می‌باشد). همان‌طور که قبلا بیان شد SIVها میزان HSI یک زیستگاه را تعیین می‌کنند و هر زیستگاه که HSI بیشتری را داشته باشد، زیستگاه مناسب‌تری خواهد بود. در واقع، HSI همان تابع هدف در سایر الگوریتم‌ها است. فرض کنید برای هر راه‌حل (زیستگاه) یک نمودار مخصوص با E=I وجود دارد و تعداد گونه‌ها (S) که رابطه‌ی مستقیمی را با HSI دارند، به وسیله‌ی مقدار HSI جلوه می‌کنند. S_1 راه‌حلی با HSI پایین و S_2 معرف راه‌حلی با HSI بالا است. S_1 معرف زیستگاهی است با گونه‌های کم در حالی که تعداد گونه‌ها در زیستگاه S_2 بیشتر است. λ_1 برای S_1 از λ_2 برای S_2 بزرگتر خواهد بود. همچنین، μ_1 برای S_1 کوچک‌تر از μ_2 برای S_2 می‌باشد. با احتمال مشخصی مانند P_{mod}، هر راه‌حل می‌تواند بر اساس راه‌حل دیگری بهبود یابد. اگر راه‌حل S_i برای بهبود انتخاب شود، نرخ مهاجرت‌پذیری λ در تصمیم‌گیری احتمالی برای اصلاح SIVها استفاده می‌شود. بعد از انتخاب SIVها برای اصلاح، نرخ مهاجرت‌پذیری μ مربوط به سایر راه‌حل‌ها برای انتخاب راه‌حل بهبوددهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور تصادفی SIVهای از راه‌حل منتخب با SIVهای راه‌حل S_i جایگزین می‌گردند. باید در نظر داشت که تمامی راه‌حل‌ها (در صورت عدم نخبه‌گرایی) در هر مرحله، اصلاح می‌گردد، ولی میزان اصلاح هر راه‌حل با میزان مناسب بودن HSI آن رابطه‌ای معکوس دارد. انتخاب راه‌حل اصلاح‌کننده بر اساس احتمال متناسب با نرخ مهاجرت‌دهی انجام می‌گیرد. در این زمینه می‌توان از چرخ رولت [۹] استفاده کرد. انتقال SIVها به طور کاملا مشابه از یک راه‌حل به راه‌حلی دیگر شاید مناسب به نظر نرسد، چه باعث عدم جستجوی کامل فضای تصمیم می‌گردد، بنابراین بهتر است از رابطه‌ی زیر برای جایگزین کردن SIVها استفاده شود (رابطه۱۹):

رابطه (۱۹):

$$SIV_{i,k}^{new} = SIV_{i,k} + \alpha\left(SIV_{j,k} - SIV_{i,k}\right)$$

در رابطه فوق، $SIV_{i,k}^{new}$، k امین SIV اصلاح‌شده راه‌حل i ام، $SIV_{i,k}^{new}$، k امین SIV راه‌حل i ام (راه‌حل اصلاح شونده)، $SIV_{i,k}$، k امین SIV راه‌حل j ام (راه‌حل اصلاح‌کننده) و α، فراسنجی است بین صفر و یک که به وسیله‌ی کاربر مشخص می‌شود. بلایای بزرگ نظیر بیماری، فجایع طبیعی و ... به‌شدت می‌توانند HSI یک زیستگاه را تغییر دهند، بنابراین به‌صورت ناگهانی ممکن است وضعیت یک زیستگاه مناسب یا نامناسب شود. در واقع، این پدیده همانند جهش در GA است. این جهش بعد از مهاجرت (گام قبل) به صورت تصادفی می‌تواند در مورد راه‌حل‌ها اعمال شود. جهش می‌تواند بر اساس یک توزیع احتمالی، مانند توزیع یکنواخت یا زنگوله‌ای، در مورد SIVها بعد از انجام مهاجرت اعمال گردد.

۱-۶. الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) برای اولین بار توسط گیم و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۱ میلادی ارائه گردید. هر چند این الگوریتم، الگوریتمی نسبتا جدید است، ولی اثربخشی و مزیت‌های آن در برنامه‌های مختلف به اثبات رسیده و کارایی خود را به خوبی نشان داده است. با وجود این که زمان زیادی از معرفی و به‌کارگیری این الگوریتم نمی‌گذرد، ولی برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین امکان ترکیب الگوریتم جستجوی هارمونی با سایر الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک (GA)،کلونی مورچه‌ها (ACO)، بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) نیز بررسی شده است. همان‌طور که بیان شد، الگوریتم جستجوی هارمونی با هدف هماهنگی و هارمونی، برای رسیدن به بهترین جواب، از موسیقی الهام گرفته شده است. تلاش برای یافتن این هارمونی و هماهنگی در موسیقی، مثل پیدا کردن شرایط بهینه در فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. در واقع الگوریتم جستجوی هارمونی بهترین راهبرد برای تبدیل روندهای مورد بررسی کیفی به فرآیندهای کمی و قابل لمس بهینه‌سازی است. روندی به همراه بعضی از قوانین ایده‌آل که نتیجه آن تبدیل قطعه‌ای زیبا از موسیقی به یک راه‌حل مناسب برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی خواهد بود. اجرای موسیقی به دنبال پیدا کردن یک هارمونی زیبا بر مبنای علم زیبا شناختی استوار است در حالی که فرآیند بهینه‌سازی به دنبال پیدا کردن یک پاسخ بهینه سراسری بر اساس تابع هدف مسأله است. در بداهه نوازی موسیقی هر نوازنده هر گام موسیقی را در یک بازه ممکن می‌نوازد که با همدیگر یک بردار هارمونی را تشکیل می‌دهند. اگر همه گام‌ها یک هارمونی خوب و قابل قبول را بر اساس علم زیباشناختی تولید کنند این تجربه در حافظه نوازنده ذخیره می‌شود و امکان ساخت یک هارمونی بهتر در زمان‌های بعدی افزایش می‌یابد. به همین ترتیب در مسائل بهینه‌سازی مهندسی، هر متغیر تصمیم‌گیری در ابتدا یک مقدار را داخل یک دامنه مجاز به خود اختصاص می‌دهد که همگی با هم یک بردار پاسخ را می‌سازند. اگر همه متغیرهای تصمیم‌گیری پاسخ خوب و قابل قبول را بر اساس تابع هدف مسأله تولید کنند، این تجربه در حافظه متغیر ذخیره می‌شود و احتمال پاسخ‌های بهتر افزایش پیدا می‌کند. زیباشناسی و گوش‌نوازی قطعه‌ای که با یک ابزار خاص موسیقی نواخته می‌شود، در اصل توسط زیر و بمی صدا (فرکانس صدا)، طنین (کیفیت صدا) و دامنه نوسانات (بلندی صدا) تعیین می‌شود. در واقع موارد اشاره شده، چارچوب‌هایی برای ارزیابی زیباشناختی یک قطع موسیقی است که نواخته می‌شود. طنین صدا به طور عمده توسط محتوای هم ساز هارمونی به شکل موج و از طریق مدولاسیون سیگنال صدا مشخص می‌شود؛ با این حال، هارمونی‌هایی که تولید می‌شوند تا حد زیادی به زیر و بمی صدا و یا طیف فرکانس‌های موجود در ابزارها یا آلات موسیقی مختلف بستگی دارند. نت‌های مختلف، دارای فرکانس‌های متفاوتی می‌باشند. به عنوان مثال نت A4 دارای فرکانس پایه F_0 = ۴۴۰ هرتز می‌باشد، این در حالی

است که سرعت صوت در هوای خشک و بدون رطوبت در حدود $V = 331 + 0.6T$ متر بر ثانیه است. (T: درجه حرارت بر حسب درجه سیلسیوس). این نت (A۴) دارای طول موج $\lambda = \frac{v}{f_0} \approx 0.7795$ در دمای اتاق ($T = 20^{\circ}C$) است. هنگامی‌که زیر و بمی صدا را تنظیم می‌کنیم، در واقع در پی آن هستیم که فرکانس را تغییر دهیم. در تئوری موسیقی، P_n گام صدا (زیر و بمی صدا) اغلب به صورت یک ماتریس عددی نمایش داده می‌شود. که به‌صورت روابط (۲۰) و (۲۱) می‌باشد.

رابطه (۲۰):
$$P_n = 69 + 12log_2\left(\frac{f}{440Hz}\right)$$

رابطه (۲۱):
$$P_n = 69 + 12log_2\left(\frac{f}{440Hz}\right)$$

به این معنی که نت A۴ عدد گام ۶۹ را دارا می‌باشد. در این مقیاس، نت‌های هشت‌گانه موسیقی مطابق با اندازه ۱۲ که نیم گامی هم مطلق به اندازه یک است، منجر به این واقعیت می‌شود که نسبت فرکانس‌های هر دو نت ۲:۱ باشد. به این ترتیب، در یک نت هشت‌گانه موسیقی فرکانس‌ها وقتی که بالا می‌رود، یک یا دو برابر می‌شود و زمانی هم که کاهش پیدا می‌کند، به نصف تنزل می‌یابد. به عنوان مثال، A۲ فرکانسی در حدود ۱۱۰ هرتز دارد، در حالی که A۵ دارای فرکانسی معادل ۸۸۰ هرتز می‌باشد.

به‌منظور توضیح الگوریتم جستجوی هارمونی لازم است تا روند ایجاد یک قطعه موسقی ایده‌آل را توسط یک موسیقی‌دان حرفه‌ای بررسی کنیم. وقتی که یک موسیقی‌دان در حال آفرینش یک قطعه موسیقی است سه گزینه را در پیش روی خود دارد:

۱-نواختن یک نغمه و موسیقی معروف دقیقا به همان ترتیبی که در ذهن موسیقی‌دان است.

۲-نواختن آهنگی شبیه موسیقی معروف، با تغییر دادن جزئی آن چیزی که وجود دارد.

۳-ایجاد یک قطعه موسیقی کاملا جدید با نت‌های جدید.

شکل و فرم دادن قطعی و مشخص به سه گزینه ذکر شده، فرآیندی بهینه‌سازی است که گیم و همکاران در سال ۲۰۰۱ با وجود سه مؤلفه متناظر زیر ایجاد کردند:

۱- استفاده از حافظه هارمونی (HM) ۲- تنظیم گام صدا ۳- انتخاب تصادفی

استفاده و کاربرد حافظه هارمونی بسیار مهم است، زیرا مشخص می‌کند که آیا جواب‌ها و هارمونی‌های جدید می‌توانند قابل قبول باشند یا خیر. به این منظور استفاده مؤثر و کارا از این حافظه، پارامتری برای نشان دادن احتمال انتخاب از حافظه هارمونی با عنوان HMCR احتمال پذیرش از حافظه هارمونی) ارائه می‌شود که با توجه به نرخ و میزان آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر این نرخ خیلی پایین و نزدیک به صفر باشد، تعداد اندکی از متغیرهای برگزیده برای هارمونی، که در حافظه هارمونی الگوریتم قرار دارند، انتخاب می‌شوند و به احتمال بالا و نزدیک به یک، مقادیر متغیر هارمونی جدید به صورت تصادفی از فضای جستجو انتخاب می‌شوند و اگر میزان HMCR بسیار بالاو نزدیک به یک باشد، احتمال انتخاب از حافظه هارمونی زیاد و احتمال تصادفی در کل فضای جستجو کم خواهد شد. در هر دو صورت، الگوریتم به مقادیر بهینه همگرا نشده یا عمل بهینه‌سازی و همگرایی بسیار کند صورت می‌گیرد. به منظور ایجاد تعادل در استفاده از متغیرها و جواب‌های با کیفیت بالاتر موجود در حافظه هارمونی (تشدید) و جستجوی تصادفی در کل فضای جستجو و فرار از بهینه‌های محلی (تنوع)، مقدار مطلوب برای پارامتر HMCR را حدود ۰/۷ تا ۰/۹ در نظر می‌گیرند. دومین عملگر، تنظیم گام صدا است که دارای پارامترهای پهنای باند bw (ماکزیمم مقدار تغییر ایجاد شده در متغیر انتخاب شده) و میزان احتمال تنظیم و تغییر گام PAR می‌باشد. این دو پارامتر در ایجاد یک هارمونی (بردار جواب) جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در ادامه مراحل الگوریتم جستجوی هارمونی را به صورت قدم به قدم مورد بررسی قرار می‌دهیم:

۱-تعریف تابع هدف و پارامترهای الگوریتم (HMCR,PAR, bw): در ابتدا برای شروع حل با این الگوریتم، تابع برازش و پارامترهای الگوریتم مشخص می‌شوند. سپس به تعریف پارامترهای HMCR و PAR که دو پارامتر بین صفر و یک هستند و به ترتیب احتمال در نظرگیری متغیر از حافظه و احتمال تغییر در متغیر انتخاب شده از حافظه ماتریس به اندازه‌ی تصادفی می‌باشد، می‌پردازیم. معمولاً مقدار HMCR حدود ۰/۷ تا ۰/۹۵ اختیار می‌شود، به این معنی است که احتمال انتخاب از حافظه هارمونی برابر با ۰,۷ تا ۰,۹۵ می‌باشد و پارامتر PAR مقداری در حدود ۰/۱ تا ۰/۵ به خود می‌گیرد به معنی اینکه احتمال تغییر جزئی مقدار انتخاب شده از حافظه هارمونی به اندازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۵ می‌باشد. برای تعیین مقدار تغییر بر روی متغیر انتخاب‌شده از حافظه‌ی ماتریس،پارامتر دیگری به نام bw نیز تعریف می‌گردد که این پارامترها در ادامه بیش‌تر توضیح داده خواهند شد.

۲-ایجاد ماتریس حافظه: در مرحله دوم یک ماتریس حافظه هارمونی از چندین راه‌حل یا هارمونی تشکیل می‌گردد. شکل کلی این ماتریس حافظه به صورت رابطه (۲۲) است:

رابطه (۲۲):
$$HM\begin{bmatrix} X_1^1 & \dots & X_N^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_1^{HMC} & \dots & x_N^{HMC} \end{bmatrix}$$

تعداد ردیف‌ها در این ماتریس حافظه به تعداد HMS می‌باشد که هر ردیف به معنی یک راه‌حل یا جواب مساله است که به صورت تصادفی تولید شده‌اند. در این ماتریس تعداد متغیرها N می‌باشد. این ماتریس حکم موسیقی‌های معروفی را دارد که یک موسیقی‌دان قصد دارد دقیقا مثل آن‌ها را بنوازد. هر ردیف در حکم یک هارمونی یا قطعه موسیقی می‌باشد که به احتمال زیاد هیچ‌کدام از این هارمونی‌ها یا جواب‌ها بهترین هارمونی یا جواب ممکن نمی‌باشد و با استفاده از یک تابع برازش،مقدار برازش یا ارزش هر کدام از این راه‌حل‌ها را به دست می‌آوریم.

۳-تولید یک راه‌حل یا هارمونی جدید: برای ایجاد یک هارمونی یا راه‌حل جدید مانند الگوریتم ژنتیک به چند عملگر احتیاج داریم و تک تک به ایجاد متغیرها می‌پردازیم. برای ایجاد مقدار برای متغیر i ام، ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌کنیم، این عدد تصادفی با HMCR مقایسه می‌گردد و اگر کوچک‌تر از آن باشد، یک مقدار برای متغیر i ام از ماتریس حافظه و از ستون i ام انتخاب می‌گردد و در غیر این صورت یک مقدار تصادفی از فضای جستجو برای متغیر i ام انتخاب می‌گردد. در صورتی که از ماتریس حافظه یک مقدار انتخاب شد، سپس عدد تصادفی دیگری تولید می‌گردد و با PAR مقایسه می‌شود، در صورتی که عدد تصادفی کوچک‌تر از PAR باشد این متغیر انتخاب شده از ماتریس حافظه به مقدار کوچکی با توجه به رابطه زیر تغییر پیدا می‌کند. برای تعیین مقدار تغییر بر روی متغیر انتخاب شده از حافظه ماتریس، پارامتر دیگری به نام bw تعریف می‌گردد که با توجه به رابطه (۲۳) مقدار متغیر جدید به‌دست می‌آید.

رابطه (۲۳):
$$X_{new} = X_{old} + bw + \varepsilon$$

۴-به روز کردن ماتریس حافظه: به همین صورت تمام متغیرهای یک جواب یا هارمونی ایجاد می‌شود و سپس ارزش آن هارمونی با توجه به تابع برازش محاسبه شده، و با بدترین هارمونی موجود در حافظه ماتریس مقایسه می‌گردد. در صورت بهتر بودن از بدترین هارمونی موجود در حافظه ماتریس، هارمونی جدید جایگزین هارمونی قبلی می‌شود.

۵-شرط توقف: شرط توقف الگوریتم به چند صورت می‌تواند تعیین گردد. معمولا شرط توقف، رسیدن به مقدار بهینه مورد نظر می‌باشد. از دیگر شروط می‌توان به تغییر نکردن بهترین هارمونی موجود در ماتریس حافظه یا رسیدن به تعداد تکرارهای مشخص اشاره کرد. با تکرار این پنج مرحله، الگوریتم به مرور به مقادیر بهینه نزدیک‌تر شده

و جواب‌های مسأله بهبود می‌یابد. در جدول (۱) مزایا و معایب الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده است.

جدول ۱- مزایا و معایب الگوریتم‌های فراابتکاری

نام الگوریتم	مبتکران	سال	مزایا	معایب
الگوریتم کلونی مورچگان	دوریگو - دی کارو	۱۹۹۲	سیستم موازی - فیدبک مثبت - یافتن سریع پاسخ - اجتناب از همگرایی زودرس مسایل پویا	تئوری دشوار - عدم استقلال - تکرار تغییرات براساس احتمال - زمان همگرایی نامشخص
الگوریتم زنبور عسل	بس تورک - کارابوگا	۲۰۰۵	کارآمدی بسیاردر جواب بهینه - پارامترهای کنترلی- محدودیتی به یک حیطه‌ی علمی ندارد- سرعت همگرایی بالا- خروجی مینیمم محلی - انعطاف‌پذیری بالا - مسایل چند بعدی - بهینه‌سازی سراسری - تشخیص آسان - جستجوی سراسری و محلی - احتمال بالا در یافتن پاسخ	تعداد هماهنگی از متغیرها - پارامترهای کمی - وابستگی به اندازه جمعیت - مقداردهی تصادفی - داشتن چندین پارامتر - نیاز به تنظیم پارامترها- استفاده ازروش احتمالات
الگوریتم جغرافیای زیستی	سیمون	۲۰۰۸	هر مسأله قابل فرموله شدن را حل می‌کند - عدم نیاز به دانش مساله - مبتنی برتکامل	محاسبات زمان‌بر - عدم فرموله‌کردن یک مساله
جستجوی هارمونی	گیم	۲۰۰۱	نسبتا بهینه - پیاده‌سازی آسان - مشارکت کلیه هارمونی‌ها- محاسبات کم- مفهوم ساده - الزامات ریاضی کمتر- انعطاف بالا در جستجوی فضای بهتر	به دام افتادن در بهینه محلی- عدم کارایی در مسایل گسسته
الگوریتم کرم شب‌تاب	یانگ	۲۰۰۶	مسایل بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی با قید و بدون قید - تنظیم آسان - پارامترهای کم - همگرایی بسیار سریع استقلال اعضا- گذر از بهینه محلی - پیاده‌سازی موازی - بخش‌بندی خودکار تمام جمعیت - قابلیت بهینه‌سازی چند کیفیتی - تنوع در راه‌حل‌ها	روش دقیقی برای تعیین پارامترها ندارد - به دام افتادن در بهینه محلی - عدم تغییر در لحظه - عدم یادآوری بهترین بهینه
الگوریتم تجمعی ذرات	کندی - ابراهات	۱۹۹۵	مرتبه صفر است- عدم نیاز به عملیات پیچیده ریاضی انعطاف‌پذیری بالا - پیاده‌سازی آسان- هم‌گرایی سریع - حافظه دارد- اشتراک‌گذاری اطلاعات- عدم حذف اجزاء	گرفتار شدن در بهینه محلی- کاهش تنوع جمعیت

۲. پیشینه پژوهش

در زمینه مباحث مالی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مطالعاتی در خارج و داخل کشور انجام گرفته است که در ادامه بررسی می‌شود.

۲-۱. ورشکستگی

گولتسیس و همکارانش [۱۱] در تحقیقی کاربرد سیستم‌های کلونی مورچگان در پیش‌بینی مسأله ورشکستگی را بررسی کردند. محققان در این تحقیق، از سیستم‌های کلونی مورچگان برای استخراج قواعد دسته‌بندی برای پیش‌بینی ورشکستگی استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که عملکرد زیاد سیستم‌های کلونی مورچگان که بیشتر به واسطه توانایی‌اش برای استخراج دسته‌بندی پشتیبانی می‌شود، به منظور تفسیر نتایج پیش‌بینی پیشنهاد شد. وانگ و همکاران، نیز در مقاله‌ای رویکردی نو برای استخراج قواعد پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها با آزمایش بر روی ۲۰۰ شرکت نشان دادند الگوریتم کلونی مورچگان برای پیش‌بینی ورشکستگی پیشنهادی مؤثر و دقیق است. بربوزا و همکاران، روش‌های مختلف یادگیری ماشینی بردار پشتیبان، Bagging، Boosting و Random Forest را برای پیش‌بینی ورشکستگی یک سال قبل از وقوع مورد ارزیابی قرار داده و نتایج را با روش‌های تحلیل ممیزی خطی، رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتایج نشان‌دهنده بهبود ۱۰ درصدی دقت تشخیص در مقایسه با روش‌های سنتی می‌باشد. لیانگ و همکاران [۱۲]، دقت حاصل از انتخاب متغیرهای ورودی را بر پایه روش‌های آماری و هوشمند مورد ارزیابی قرار داده‌اند. مدل‌های طبقه‌بندی مورد بررسی

ماشین‌بردار پشتیبان خطی، ماشین‌بردار پشتیبان تابع شعاعی پایه، نزدیک‌ترین k همسایه، روش Naïve Bayes و شبکه عصبی مصنوعی را شامل می‌شود. روش‌های انتخاب ویژگی آماری مورد بررسی آزمون t، تحلیل ممیزی خطی و رگرسیون لجستیک و روش‌های هوشمند استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را شامل می‌شود. نتایج نشان‌دهنده عدم امکان تصمیم‌گیری به منظور تعیین بهترین ترکیب به دلیل متفاوت بودن خروجی بر روی پایگاه داده‌های مختل می‌باشد، اما به‌طور کلی دقت استفاده از الگوریتم ژنتیک و رگرسیون لجستیک به منظور انتخاب ویژگی از سایر ترکیبات بالاتر می‌باشد. دهقان و همکاران [۱۳] در پژوهشی با عنوان "ارائه یک الگوریتم برای تخمین ورشکستگی موسسات مالی با الهام از الگوریتم زنبور عسل" به ارائه روشی هوشمند مبتنی بر الگوریتم زنبور عسل جهت پیش‌بینی ورشکستگی پرداختند. به منظور ساخت یک فرضیه پیش‌بینی‌کننده ورشکستگی، مجموعه داده‌ها مربوط به سال ۲۰۱۴ در دانشکده مهندسی وینایاگار و دانشگاه پوندیچری در کشور هند استفاده گردید. نتایج نشان داد دقت روش پیشنهادی در این پژوهش بالاتر از دیگر الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های یادگیری ماشین بوده است. غضنفری و همکاران، در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی ورشکستگی شرکت‌ها مبتنی بر سیستم‌های هوشمند ترکیبی با پیاده‌سازی یک سیستم منسجم و هوشمند مبتنی بر شبکه عصبی، ماشین‌های بردار پشتیبان و یادگیری تشدیدشده و در کنار آن استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی رقابت استعماری، الگوریتم فرهنگی و جستجوی هارمونی سعی شده است تا حد امکان نواقص مدل‌های پیشین در سطح بین‌الملل رفع شود. نتایج نشان‌دهنده برتری عملکرد ترکیب ماشین‌بردار پشتیبان با الگوریتم‌های بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و رقابت استعماری در شرایط عدم حذف داده‌های پرت می‌باشد. تقی‌زاده و همت‌فر [۱۴]، در پژوهشی با عنوان بررسی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان پیوسته در پیش‌بینی ورشکستگی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران به دنبال ساخت مدلی بودند که با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلونی مورچگان، پیش‌بینی ورشکستگی در یک یا دو یا سه سال قبل از وقوع ورشکستگی را میسر سازد. مدل پیشنهادی بر اساس الگوریتم کلونی مورچگان ارائه شده است و نتایج نشان داد میانگین دقت در قالب داده‌های آموزش معادل ۹۲/۸ درصد و در قالب داده‌های آزمایش معادل ۹۰ درصد می‌باشد.

۲-۲. پرتفوی بهینه

کوشینو و همکاران، از الگوریتم پرواز پرندگان برای انتخاب پرتفوی بهینه استفاده کردند. نتایج این پژوهش برتری الگوریتم پرندگان را نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ذوب نشان داد. فرضی و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی و مقایسه حرکت ذرات و مدل مارکوویتز با روش الگوریتم ژنتیک می‌پردازد و نتایج نشان داد که اگر چه مدل مارکوویتز با الگوریتم ژنتیک بازده بیشتری را نشان می‌دهد، اما روش حرکت تجمعی ذرات ریسک پایین‌تر در بازده برابر را نشان می‌دهد. کورا ازروش PSO در مسأله بهینه‌سازی پرتفوی مقید استفاده می‌کند. او در این پژوهش قیمت‌های هفتگی تعداد محدودی از سهام در بازارهای مختلف دنیا را در بازه ۵ ساله انتخاب کرده و با این تکنیک مرز کارا را رسم می‌کند و در پایان نتیجه می‌گیرد که این تکنیک در بهینه‌سازی پرتفوی بسیار موفق عمل می‌کند. فشاری و مظاهری‌فر، [۱۵]، در پژوهشی با عنوان مقایسه الگوریتم‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی پرتفوی در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از دو الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و شبکه فازی- عصبی به عنوان دو الگوریتم پیش‌بینی قیمت اوراق بهادار و از دو الگوریتم ممتیک حرکت تجمعی ذرات، الگوریتم ژنتیک و روش کوادراتیک به منظور حل مسأله بهینه‌سازی پرتفوی بدون‌محدودیت برای ۲۳ شرکت فعال بازار بورس استفاده شده است. نتایج نشان داد شبکه‌های عصبی توانسته عملکرد بهتری را در پیش‌بینی

بازده اوراق بهادار نسبت به سیستم فازی عصبی نشان دهد. همچنین الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه توانسته عملکرد بهتری را در مقایسه با دو الگوریتم دیگر نشان‌دهد. دنیوی و حسام [۱۶]، در پژوهشی تحت عنوان" الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی مسأله چندهدفه پرتفوی در حالت فازی- تصادفی بر اساس روش‌های امکان و لزوم"، به طراحی یک مدل ریاضی برای مسأله انتخاب بهینه پرتفوی با متغیرهای تصادفی فازی پرداخته‌اند سپس مسیله انتخاب بهینه پرتفوی با متغیرهای تصادفی فازی به دو مسأله انتخاب بهینه پرتفوی مستقل از هم تبدیل شد. نتایج حاکی از قابلیت استفاده الگوریتم جستجوی هارمونی در به دست‌آوردن جواب‌های بهینه مسأله انتخاب پرتفوی است. افضل، در پژوهشی تحت عنوان بهینه‌سازی سبد سهام بازارهای مالی با به‌کارگیری الگوریتم‌های شب‌تاب و حرکت پرندگان، با استفاده از روش‌های فراابتکاری کرم شب‌تاب و حرکت پرندگان اقدام به حل مساله نمودند. دقت ردیابی الگوریتم‌ها و همبستگی بالای سبد سهام و شاخص، خصوصا در بازارهای مالی با ثبات بالا، نشان از توانایی حل این مساله توسط این الگوریتم‌ها است. راعی و همکاران [۱۷]، از روش جستجوی هارمونی در جهت بهینه‌سازی مقید پرتفوی سهام استفاده کردند. این الگوریتم با الهام از فرایند بهبود و تکامل هارمونی به‌وسیله مجموعه نوازندگان موسیقی جهت حل مسائل بهینه‌سازی به وجود آمده‌است. به منظور حل مسأله بهینه‌سازی پرتفوی سهام با استفاده از اطلاعات قیمت ۲۰ سهم پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران از مهر ۱۳۸۵ تا اسفند ۱۳۸۷، مرز کارای سرمایه‌گذاری برای دو الگو با عامل خطرپذیری واریانس و نیم‌واریانس رسم شده است. هدف این پژوهش حل مسأله بهینه‌سازی پرتفوی سهام با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) برای بهینه‌سازی الگوهای CCMV و CCMSV است. الگوی CCMV و CCMSV صرفاً در تابع هدف و در بخش کمینه‌سازی خطرپذیری با یکدیگر تفاوت دارند. نتایج این پژوهش نشان‌داد که روش جستجوی هارمونی در بهینه‌سازی مقید پرتفوی سهام، موفق عمل می‌کند و در یافتن جواب‌های بهینه در تمامی سطوح خطرپذیری و بازده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. بیدگلی و طیبی‌نژاد [۱۸]، در مطالعه‌ای به بررسی بهینه‌سازی پرتفوی با استفاده از الگوریتم ممتیک مورچگان پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم ترکیبی در تمامی حالت‌های مورد بررسی در این پژوهش، نتایج بهتری از الگوریتم ژنتیک به‌دست آورده‌اند.

۲-۳. شاخص قیمت سهام

گوچن و همکاران [۱۹]، با استفاده از نماگرهای تحلیل تکنیکال و شبکه عصبی مصنوعی هیبریدی مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی هارمونی به پیش‌بینی شاخص قیمت در بازار سهام ترکیه پرداختند. نتایج حاصله نشان‌می‌دهد خطای پیش‌بینی مدل‌های هیبریدی فراابتکاری از شبکه عصبی مصنوعی پایین‌تر است. آن‌ها با مقایسه معیارهای خطای مدل شبکه عصبی هیبریدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی هیبریدی مبتنی بر جستجوی هارمونی دریافتند خطای مدل هیبریدی مبتنی بر جستجوی هارمونی از مدل هیبریدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پایین‌تر است. بیات و باقری [۲۰]، در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی قیمت سهام با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب به پیش‌بینی قیمت سهام ۱۰ شرکت از شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس و تعدادی از شرکت‌های حاضر در فرابورس با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب پرداختند. نتایج حاکی از توانایی الگوریتم کرم شب‌تاب در پیش‌بینی قیمت سهام می‌باشد. پاریابی و سالمی [۲۱]، در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی قیمت سهام با داده‌های ترکیبی به روش الگوریتم کلونی زنبور عسل به پیش‌بینی قیمت سهام با داده‌های ترکیبی و ارائه یک مدل پویا و با خطای کمتر پرداختند. نتایج نشان‌داد استفاده از کلونی زنبور عسل با داده‌های ترکیبی به عنوان یک روش انتخاب ویژگی پوشش‌دهنده نقش مهمی در افزایش دقت و سرعت در اجرای تکنیکی پیش‌بینی، حذف

داده‌های غیرمرتبط و افزایش قابلیت فهم‌پذیری ایفا نمود همچنین زنبور عسل به عنوان یک روش پوشش‌دهنده در ترکیب با شبکه عصبی دقت پیش‌بینی بالایی از خود نشان‌داد. تهرانی و خدایار به پیش‌بینی شاخص قیمت سهام با استفاده از شبکه عصبی پرداختند. در این مطالعه، الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان نه تنها برای بهبود الگوریتم یادگیری به‌کار رفته بلکه این الگوریتم پیچیدگی فضای حالت را نیز کاهش می‌دهد. نتایج تجربی در این پژوهش نشان می‌دهد که روش الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان، مدل بهینه در مقایسه با دیگر مدل‌های مرسوم است. دولو و حیدری [۲۲]، در مدلی با عنوان پیش‌بینی شاخص سهام با استفاده از ترکیب شبکه‌ی عصبی مصنوعی و مدل‌های فراابتکاری جستجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک به پیش‌بینی شاخص قیمت بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از مدل شبکه عصبی هیبریدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و جستجوی هارمونی پرداختند. نتایج نشان‌می‌دهد دقت پیش‌بینی مدل‌های فراابتکاری ژنتیک و جستجوی هارمونی در دوره آزمون بالاتر از شبکه عصبی عادی است. نتایج پژوهش عادل آذر و همکاران [۲۳]، با مقایسه روش‌های کلاسیک و هوش مصنوعی و مدل‌های ترکیبی در پیش‌بینی شاخص قیمت سهام نشان داد که روش‌های هوش مصنوعی و روش‌های ترکیبی نتایج بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک داشته است. دولو و همکاران، در پژوهشی با عنوان " آزمون پیش‌بینی شاخص قیمت سهام بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و جستجوی هارمونی" به پیش‌بینی شاخص قیمت کل بورس اوراق بهادار، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و جستجوی هارمونی پرداخته‌اند. نتایج نشان‌داد که مدل‌های فراابتکاری مطرح شده از شبکه عصبی عادی دقت بالاتری دارند. همچنین مدل شبکه عصبی هیبریدی مبتنی بر جستجوی هارمونی در پیش‌بینی در دوره آزمون نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی هیبریدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک از دقت بالاتری برخوردار است. شیری و همکاران [۲۴]، در پژوهشی تحت عنوان بررسی خطای پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام در صنعت مواد و محصولات دارویی با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی به مقایسه بین الگوریتم‌های کرم شب‌تاب، توابع پایه شعاعی، شبکه‌های چند لایه پرسترون، رقابت استعماری و شبکه تطبیقی در پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام پرداختند. یافته‌ها نشان‌داد استفاده از این الگوریتم‌ها خطای پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام درسطح صنعت مواد و محصولات دارویی را کاهش می‌دهد. صالحی و همکاران [۲۵] در پژوهشی با عنوان بررسی مقایسه‌ای پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام در نهادهای پولی با استفاده از هوش مصنوعی، به مطالعه پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام صنعت بانک‌ها و نهادهای پولی در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد الگوریتم‌های پیشنهادی در مجموع توانایی بالایی در پیش‌بینی شاخص قیمت سهام در بورس اوراق بهادار تهران دارد و در این بین الگوریتم ANFIS نسبت سایر الگوریتم‌های فوق‌الذکر عملکرد بهتری در پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام داشت. آقاخانی و کریمی [۲۶]، به بررسی "روش‌های سنتی و مدرن پیش‌بینی قیمت سهام در بازار بورس و معرفی روش بهینه" پرداختند. در این مقاله، با معرفی روش‌های سنتی و مدرن پیش‌بینی قیمت سهام، با توجه به اینکه بازار سهام یک سیستم غیرخطی و آشوبناک است، لذا به‌کارگیری ابزارهای تجزیه و تحلیل سنتی برای اتخاذ تصمیم‌های دقیق در مورد سهام بسیار مشکل بوده و از دقت لازم نسبت به روش‌های مدرن برخوردار نیستند. از این‌رو به مقایسه چهارده متد از روش‌های پیش‌بینی مدرن پرداخته و روش بهینه را معرفی نمود. بر اساس تحلیل صورت گرفته در این مقاله بر روی چهارده الگوریتم از روش‌های نوین در عرصه پیش‌بینی، همان‌طور که در جدول متد ترکیب شبکه عصبی مبتنی و الگوریتم نشان داده شده است، با توجه به معیار ارزیابی قدرمطلق درصد خطا جستجوی هارمونی، نسبت به سیزده الگوریتم دیگر مورد بررسی دارای درصد خطای پایین‌تری بوده

است. همچنین بر اساس رتبه‌بندی آزمون فرایدمن این متد در رتبه اول قرار گرفته است، بنابراین این امر نشان‌دهنده عملکرد بهتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

۴-۲. سایر موارد

چییم و همکاران [۲۷]، یک الگوی تقلیدی الگوریتم پرواز پرندگان را برای کاربردهای محاسباتی مالی مورد استفاده قرار دادند. هدف آن‌ها پیش‌بینی سری‌های زمانی قیمت سهام و تشکیل پرتفوی بهینه بود. نتایج نشان داد که با استفاده از الگوریتم پرندگان الگویی را می‌توان ارائه کرد که دارای کمترین خطای پیش‌بینی و دقت زیاد باشد. کومار و همکاران [۲۸]، به قیمت‌گذاری مشتقات با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان پرداختند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی مورچگان اصلاح‌شده در پیش‌بینی زمان بهینه فروش یک اوراق اختیار معامله نمونه عملکرد قابل‌قبولی دارد. توسکاری به تخمین تولید و تقاضای انرژی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مورچگان پرداخته‌است، نتایج حاصل از پژوهش وی نشان می‌دهد که رویکرد بهینه‌سازی کلونی مورچگان تولید و تقاضا را نسبت به روش‌های خطی بهتر تخمین می‌زند. چوی و ژیانگ، به پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی با استفاده از بهینه‌سازی تجمعی ذرات باینری پرداختند. در این پژوهش، آن‌ها از بهینه‌سازی تجمعی ذرات باینری برای انتخاب پارامترهای بهینه مدل پیش‌بینی خطی جدید استفاده کردند. ژانگ و چن، از الگوریتم پرواز پرندگان برای پیش‌بینی نرخ ارز استفاده کردند. نشان‌داد که الگوریتم PSO مدلی مناسب‌تر برای پیش‌بینی نرخ ارز می‌باشد. توبا و بکانین در مطالعه‌ای به بررسی و مقایسه الگوریتم ارتقا یافته کرم شب‌تاب و روش‌های فراابتکاری هوش جمعی پرداختند. نتایج مطالعه نشان‌داد که گرچه الگوریتم کرم شب‌تاب اصلی نتایج خوبی نشان نمی‌دهد، اما با تعدیل این روش و مقایسه روش جدید با پنج روش هوش جمعی روش تعدیل‌شده نتایج بهتری نسبت به بقیه روش‌ها نشان می‌دهد. در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی در زمینه کاربرد روش‌های فراابتکاری انجام شده‌است که در ادامه به تفکیک به آن‌ها اشاره می‌شود. عزیزگرد و همکاران [۲۹]، در پژوهشی با عنوان مقایسه دقت پیش‌بینی مدیریت سود با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان و غذایابی باکتری به بررسی این موضوع پرداخت که آیا می‌توان مدیریت سود را بر اساس مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین کشف کرد. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم حرکات ذرات اقدام به شناسایی متغیرهای معنی‌دار با مدیریت سود شده و در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان و غذایابی باکتری اقدام به پیش‌بینی مدیریت سود شده است. نتایج نشان داد که هر دو الگوریتم با دقت بالای ۹۸ درصد توانایی پیش‌بینی مدیریت سود را دارند. همچنین نتایج نشان داد که مدل کلونی مورچه‌ها توانایی بیشتری در پیش‌بینی مدیریت سود نسبت به مدل غذایابی باکتری دارد. کاردان و همکاران [۳۰]، در پژوهشی با عنوان" بررسی دقت الگوریتم‌های خطی- تکاملی BBO و ICDE و الگوریتم‌های غیرخطی SVR و CART در پیش‌بینی مدیریت سود" به بررسی دقت الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی مدیریت سود پرداختند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که به طورکلی الگوریتم‌های غیرخطی از دقت بیشتری نسبت به الگوریتم‌های خطی برخوردار بوده و الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان، مدیریت سود را بهتر از سایر الگوریتم‌ها پیش‌بینی می‌کند. همچنین الگوریتم‌های خطی در پیش‌بینی مدیریت سود نتایج تقریباً مشابهی را از خود نشان دادند. فلاح‌پور و ارم [۳۱]، در پژوهشی با عنوان "پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌ها با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان" به مطالعه پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌ها با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم کلونی مورچگان در پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌ها به طور معنی‌داری نسبت به روش تحلیل ممیز چندگانه عملکرد بهتری دارد. راعی و همکاران، در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی با استفاده از بهینه‌سازی کلونی

مورچگان در بورس اوراق بهادار تهران به این نتیجه رسید که الگوریتم مبنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچگان داده‌ها را به خوبی و با کمترین خطا نسبت به مدل‌های گارچ تخمین می‌زند، البته نتایج بررسی با استفاده از آماره دایبولد ماریانو برابری نتایج پیش‌بینی را رد نکرد. امیرحسینی و داورپناه [۳۲]، در پژوهشی با عنوان طراحی الگویی جهت پیش‌بینی قیمت طلا، با استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان و الگوریتم ژنتیک و ارائه الگوریتم ترکیبی به پیش‌بینی قیمت طلا در بازار بین‌المللی، با در نظر گرفتن عوامل موثر بر آن با استفاده از الگوریتم‌های نوین ابتکاری پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که استفاده از الگوی ترکیبی پرواز پرندگان با الگویی ژنتیک؛ به علت پوشش نقاط ضعف هر یک از الگوها و استفاده از نقاط قوت آن‌ها در مسیر پیش‌بینی، دقت پیش‌بینی بیشتری دارد. حمیدیان و همکاران، در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی ریسک سیستماتیک شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از الگوریتم‌های کلونی مورچه‌ها و لارس به بررسی پیش‌بینی ریسک سیستماتیک بر اساس الگوریتم کلونی مورچگان و الگوریتم لارس پرداختند. نتایج نشان‌داد که الگوریتم‌های به کارگرفته‌شده با دقت بالایی توانایی کشف ریسک سیستماتیک را دارد. نتایج بررسی بهزادی [۳۳]، نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی ریسک سیستماتیک، به‌طور معنی‌داری نسبت به مدل‌های آماری رگرسیون از دقت پیش‌بینی بیشتری برخوردار است. حری و مهدوی [۳۴]، در پژوهشی تحت عنوان طراحی مدلی جهت پیش‌بینی رتبه اعتباری مشتریان بانک‌ها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری و هیبریدی چند معیاره شبکه عصبی فازی- کلونی مورچگان به این سوال پاسخ دادند که آیا روش ترکیبی استفاده‌شده به خوبی رتبه اعتباری مشتریان را پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان داد که ۸۹/۶۷ درصد از مواقع این سیستم می‌تواند تخمین درستی نسبت به رتبه اعتباری مشتریان ارائه دهد. برای بهینه‌سازی شبکه عصبی- فازی از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده گردید که منتج به بهبود عملکرد مدل تا ۹۰/۵۰ درصد گردید. رضایی و تولمی، در پژوهشی به مقایسه الگوریتم مورچگان با دو مدل پارامتری تحلیل تمایزی چندگانه و لوجیت برای پیش‌بینی درماندگی مالی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که درسطح ۵٪ اهیت، مدل مورچگان برتر از تحلیل تمایزی می‌باشد و در سطح ۹٪ برتر از لوجیت می‌باشد. افسر و سرفراز [۳۵]، طی مقاله‌ای به کمک شبکه‌های عصبی فازی مدلی را در زمینه پیش‌بینی قیمت طلا ارائه کردند. نتیجه‌ای که کسب کردند این بود که شبکه‌های عصبی فازی نسبت به روش رگرسیون در این زمینه برتری دارد. مظهری و همکاران [۳۶]، در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌های قابل پذیرش در بورس برق و انرژی با استفاده از کلونی مصنوعی زنبور عسل به دنبال یافتن یک الگوی نسبتا جامع برای پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌های قابل پذیرش در بورس برق و انرژی بودند. ابراهیمی و همکاران [۳۷]، در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی شاخص بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم کرم شب‌تاب بر پایه الگوریتم ژنتیک چند هفته با مرتب‌سازی غیرمغلوب سعی بر آن شده‌است تا مقدار شاخص بازار اول از سری شاخص‌های بورس اوراق بهادار تهران برای یک روز آتی پیش‌بینی شود. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که دقت مدل ترکیبی نسبت به مدل ساده افزایش می‌یابد. آقاخانی و کریمی، در پژوهشی تحت عنوان ارائه یک تکنیک نوین هوشمند جهت پیش‌بینی داده‌های حجیم بورس مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی و شبکه عصبی مصنوعی به ارائه روشی نوین هوشمند جهت پیش‌بینی داده‌های حجیم بورس با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری جستجوی هارمونی و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد دقت پیش‌بینی نسبت به سایر مدل‌های استفاده شده در این پژوهش به مراتب بهتر بوده است. مرادی و همکاران [۳۸] در پژوهشی تحت عنوان

پیش‌بینی درماندگی مالی مبتنی بر الگوریتم کاوش باکتری از مدل الگوریتم کاوش باکتری به همراه مقایسه آن با روش کلونی مصنوعی زنبورعسل جهت پیش‌بینی درماندگی مالی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد مدل کاوش باکتری از مدل زنبور عسل دقت بالاتری در پیش‌بینی دارد. دموری و همکاران [۳۹] در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی شاخص کل بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان و مقایسه آن با الگوهای سنتی با استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان، الگوهای سنتی نمو هموار ساده، هلت وینترز، اتورگرسیون، میانگین متحرک و آریما به پیش‌بینی شاخص کل بورس اوراق بهادار پرداختند. نتایج نشان داد که در میان الگوهای سنتی، آریما دارای بهترین برآورد است. همچنین در مقایسه الگوی پرواز پرندگان با آریما مشخص شد که خطای برآورد این الگوی هوشمند نسبت به آریما بسیار کم است که می‌توان از آن به منظور پیش‌بینی‌های آینده شاخص کل قیمت سهام استفاده کرد. مایلی و همکاران [۴۰]، در پژوهشی تحت عنوان استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب برای پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران به ارائه یک مدل پیش‌بینی‌کننده با عملکرد بالا و مقایسه نتایج حاصل از آن با دیگر مدل‌های رایج در پیش‌بینی درماندگی مالی پرداختند. نتایج نشان داد که روش ترکیبی شبکه عصبی بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب از عملکرد بالاتری نسبت به مدل شبکه عصبی و همچنین مدل رگرسیون لجستیک برخوردار است. بیگی و صالحی [۴۱]، در تحقیقی با عنوان کاربرد الگوریتم فاخته در پیش‌بینی ورشکستگی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران با رویکردی مبتنی بر داده‌کاوی و با استفاده از الگوریتم‌های حرکت تجمعی ذرات و فاخته به پیش‌بینی ورشکستگی شرکت‌های عضو بورس اوراق بهادار پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم فاخته با دقتی معادل ۹۸/۲۳ توانست ورشکستگی شرکت‌ها را پیش‌بینی نماید.

۳. کاربرد الگوریتم‌ها در مباحث مالی

سیستم‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری امکان به‌کارگیری استانداردهای سازمانی منسجم‌تر را برای ارزیابی درجه امکان خطرات متفاوت افزایش داده است. پایگاه دانش لازم برای سیستم‌های تعهد خرید شامل اطلاعات خاص صنعت در مورد تجهیزات ایمنی و اقدامات انجام شده برای کاهش خطر و نیز تکنیک‌های ارزیابی سطح خطر است. همچنین این الگوریتم‌ها در مباحثی مانند اینکه چقدر از درآمدهای جاری را باید برای مطالبات احتمالی آینده بابت جبران خسارات کنار گذاشت نیز می‌توانند به منزله ابزاری برای تخصیص همه‌جانبه و منسجم منابع برای پاسخ‌گویی به تقاضاهای ناشناخته به‌کار روند. بانک‌ها نیز وام‌های مصرفی مختلف، وام‌های رهنی، و حد اعتباری به مشتریان خود ارائه می‌دهند. به علاوه، برای خدمات حواله‌ها و انتقال وجوه، عملیات خرید و فروش ارز و سایر معاملات بانکی می‌توان از سیستم‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کرد. اگر نقطه شروع و عطف کار مدیریت را برنامه‌ریزی استراتژیک بدانیم آنگاه اهمیت این سیستم‌ها بیشتر مشخص می‌شود. در سال‌های اخیر با افزایش پیچیدگی صنایع تولید و نیاز به کارایی بیشتر، چرخه عمر کوتاه‌تر محصول، انعطاف‌پذیری بالاتر، کیفیت بیشتر محصول، رضایت مشتری و برآوردن انتظارات او و هزینه کمتر، چهره عملیات تولید را تغییر داده است. سیستم‌های خبره در بنگاه‌های مالی برای نظارت بر اطلاعات موردانتظار و یافتن کلاه‌برداری‌ها استفاده می‌شود. همچنین سیستم خبره می‌تواند در جایی که حجم اطلاعاتی که باید پردازش شود بسیار زیاد است بسیار مفید باشد. این سیستم می‌تواند همچون یک حسابرس پاسخگوی تعداد زیادی ارباب رجوع باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی برخی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری الهام گرفته از طبیعت، پیشینه و کاربرد آن‌ها در حسابداری

پرداخته شد. با توجه به گستردگی و پیچیدگی‌های مربوط به مسائل پیش‌روی شرکت‌ها و مراکز فعال در حوزه حسابداری، الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان یکی از شاخص‌های مهم در جهت ارتقاء سیستم‌های نرم‌افزاری مدیریت و تجزیه و تحلیل اطلاعات نقش مهمی را دارد. این الگوریتم‌ها علاوه بر افزایش سرعت باعث افزایش چشمگیر دقت در تجزیه و تحلیل‌های مالی خواهند شد. استفاده از این شیوه‌های نوین توسط هر سازمان و شرکتی سبب افزایش کارآمدی بیشتر و عملکرد بهتر و در نتیجه افزایش فعالان این حوزه خواهد شد. این روش‌ها به صورت روش‌های تکمیلی می‌توانند در سایر موضوعات حسابداری به عنوان روش‌هایی قابل اعتماد به حل هر چه سریع‌تر مسائل بپردازند. نتایج مطالعات و بررسی‌ها نشان داد استفاده از روش‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت در سیستم‌های اطلاعاتی به‌خصوص بخش‌های مالی روز به روز در حال افزایش بوده و جهت دستیابی به این مهم شرکت‌ها و گروهای زیادی در حال توسعه فعالیت‌های خود می‌باشند. همچنین نتایج مطالعات در زمینه مقایسه این الگوریتم‌ها با روش‌های کلاسیک در پیش‌بینی‌های مالی نشان‌دهنده توان بالاتر این الگوریتم‌ها می‌باشد. بنابراین استفاده از این الگوریتم‌ها می‌تواند نتایج بهتری را هم برای اداره‌کنندگان بورس و هم سرمایه‌گذاران بورس داشته‌باشد.

پی‌نوشت

1. Konar, 2005.
2. Glover.
3. Modern Hevristic.
4. Abrahat & Conady.
5. Dorigo.
6. Yang, 2008.
7. Artificial bee Colony.
8. Simon.
9. Roulette Wheel.
10. Geem & Kim & Lognathan, 2001.
11. Goletsis &., Exarchos & Themis & Katsis & Cheristos, 2009.
12. Leung & Chenand DAOUK, h., 2015.

منابع

میرقادری، ه و زندیه (۱۳۹۰)، «طراحی یک الگوریتم فراابتکاری جدید بر اساس رفتار توابع ریاضی XCos (x) و tanh (x) و چشم‌انداز مدیریت صنعتی»، شماره ۲، صص ۱۰۷-۱۲۳.

۱۳. دهقان و عطارزاده، ۱۳۹۵.

۱۴. تقی‌زاده و همت‌فر، ۱۳۹۴.

۱۵. فشاری و مظاهری‌فرد، ۱۳۹۵.

۱۶. دنیوی و حسام ساداتی، ۱۳۹۲.

۱۷. راعی، رستمی و هاشم پور، ۱۳۹۲.

۱۸. بیدگلی و طیبی‌نژاد، ۱۳۹۳.

19. Gocuken & Ozcualoco & Boru and Dosdoguru, 2016.

۲۰. بیات و باقری، ۱۳۹۵.

۲۱. پاریابی و سالمی، ۱۳۹۵.

۲۲. دولو و حسین یو حیدری، ۱۳۹۵.

۲۳. اذر وافسر، ۱۳۸۵.

۲۴. شیری و صالحی و حمیده پور، ۱۳۹۴.

۲۵. صالحی و حمیده‌پور و خادم، ۱۳۹۵.

۲۶. آقاخانی و کریمی، ۱۳۹۳.

27. Chiam& Tan& Mamun, 2009.

28. Kumar &Thulasiram and, Thulasiraman P., 2009.

۲۹. گرد، وقفی، حبیب‌زاده و خواجه‌زاده، ۱۳۹۴.

۳۰. کاردان، صالحی، قره خانی و منصوری، ۱۳۹۶.

۳۱. فلاح‌پور و ارم، ۱۳۹۵.

۳۲. امیر حسینی و داورپناه، ۱۳۹۵.

۳۳. بهزادی، ۱۳۹۱.

۳۴. حری و مهدوی، ۱۳۹۴.

۳۵. افسر و سرافراز، ۱۳۸۹.

۳۶. مظهری، فریدونیان و یوسفی و لسانی، ۱۳۹۱.

۳۷. ابراهیمی، رحمانی منشف بهرامی نسب و شفیعی، ۱۳۹۶.

۳۸. مرادی، مظهری و اسدزاده، ۱۳۹۳.

۳۹. دموری و د، اشهر، ۱۳۹۰.

۴۰. مایلی، عیوضلو و فلاح پور، ۱۳۹۴.

۴۱. بیگی و صالحی، ۱۳۹۲.

دهقان، ح، کاظم و عطارزاده (۱۳۹۵)، «ارائه یک الگوریتم برای تخمین ورشکستگی موسسات مالی با الهام از الگوریتم زنبور عسل»، فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری، ۲(۱) صص ۱۰-۲۴.

تقی‌زاده، ح و هم‌فر (۱۳۹۴)، «بررسی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان پیوسته در پیش‌بینی ورشکستگی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران»، دانش حسابرسی (۵۹) ۱۵.

فشاری، م، و مظاهری‌فرد (۱۳۹۵)، «مقایسه الگوریتم‌های پیش‌بینی و بهینه‌های پرتفوی در بورس اوراق بهادار تهران»، سیاست‌گذاری پیشرفت اقتصادی، صص۷۵-۵۹.

دنیوی، ع و حسام ساداتی (۱۳۹۲)، «الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی مسأله چند هدفه پرتفوی در حالت فازی - تصادفی بر اساس روش‌های امکان و لزوم. پایان‌نامه جهت اخذ کارشناسی ارشد»، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع.

افضل، ر (۱۳۹۴)، «بهینه‌سازی سبد سهام بازارهای مالی با به‌کارگیری الگوریتم‌های کرم شب تاب و حرکت پرندگان»، کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در فناوری اطلاعات، کامپیوتر و مخابرات.

بیدگلی، غ و طیبی‌نژاد (۱۳۹۳)، «بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری بر اساس ارزش در معرض ریسک با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان»، دانش سرمایه‌گذاری، سال سوم، شماره دهم، صص ۱۲۲-۱۰۱.

بیات، ع و باقری (۱۳۹۵)، «پیش‌بینی قیمت سهام با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب»، دانش مالی تحلیل اوراق بهادار، ۱۰(۳۵)، صص ۱۴۵-۱۳۵.

پاریابی، آ و سالمی (۱۳۹۵)، «پیش‌بینی قیمت سهام با داده‌های ترکیبی به روش الگوریتم کلونی زنبور عسل، اولین کنفرانس ملی اقتصاد، مدیریت و حسابداری»، اهواز، سازمان صنعت، معدن و تجارت خوزستان- انجمن حسابداری ایران- پارک علم و فناوری خوزستان -انجمن مدیریت ایران، https://www.civilica.com/Paper-EMAC01-EMAC01_205.html.

دولو، م و حیدری (۱۳۹۶)، «پیش‌بینی شاخص سهام با استفاده از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های فراابتکاری جستجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک»، اقتصاد مالی، سال یازدهم شماره ۴۰.

اذر، ع و افسر (۱۳۸۵)، «الگوسازی پیش‌بینی شاخص قیمت سهام با استفاده از شبکه‌های عصبی فازی و روش ترکیبی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه حسابداری. دانشکده مدیریت، دانشگاه تربیت مدرس.

دولو، م حسینی و حیدری (۱۳۹۵)، «آزمون پیش‌بینی شاخص قیمت بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و جستجوی هارمونی»، پایان‌نامه جهت اخذ کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی ارشاد دماوند، مدیریت مالی.

شیری، م، صالحی و حمیده پور (۱۳۹۴)، «بررسی خطای پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام در صنعت مواد و محصولات دارویی با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی»، حسابداری سلامت سال چهارم شماره اول.

صالحی، م، حمیده پور و خادم (۱۳۹۵)، «بررسی مقایسه‌ای پیش‌بینی تغییرات شاخص قیمت سهام در نهادهای پولی با استفاده از هوش مصنوعی پژوهش‌های پولی و بانکی»، سال نهم، شماره ۲۷.

آقاخانی، ک و کریمی (۱۳۹۳)، «ارائه یک تکنیک نوین هوشمند جهت پیش‌بینی داده‌های حجیم بورس مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی و شبکه عصبی مصنوعی»، اولین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی رایانه.

گرد، ع، وقفی، حبیب زاده و خواجه زاده (۱۳۹۴)، «مقایسه دقت پیش‌بینی مدیریت سود با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان و غذایابی باکتری»، پژوهش‌های تجربی حسابداری، (۴)۱۵، ۱۸۱ - ۲۰۳.

کاردان، ب، صالحی، قره‌خانی و منصوری (۱۳۹۶)، «بررسی دقت الگوریتم‌های خطی- تکاملی BBO و ICDE و الگوریتم‌های غیرخطی SVR و CART در پیش‌بینی مدیریت سود»، پژوهش‌های حسابداری مالی، سال نهم شماره اول، صص۹۵-۷۷.

فلاح پور، س و ارم (۱۳۹۵)، «پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌ها با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان»، پژوهش‌های مالی، دوره ۱۸، شماره ۲.

راعی، ر، رستمی و هاشم پور (۱۳۹۲)، «پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی با استفاده از بهینه‌سازی کلونی مورچگان در بورس اوراق بهادار تهران»، مجله پژوهش‌های مدیریت در ایران،(۱۸)۱، ۸۳- ۱۰۰.

امیرحسینی، ز و داورپناه (۱۳۹۵)، «طراحی الگویی جهت پیش‌بینی قیمت طلا، با استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان و الگوریتم ژنتیک و ارائه الگوریتم ترکیبی»، مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار،شماره ۲۶ صص۸۳-۵۹.

بهزادی، ع (۱۳۹۱)، «پیش‌بینی ریسک سیستماتیک شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی»، پایان نامه کارشناسی ارشد. بهشهر. دانشگاه پیام نور.

حری، م و مهدوی (۱۳۹۴)، «طراحی مدلی جهت پیش‌بینی رتبه اعتباری مشتریان بانک‌ها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری و هیبریدی چند معیاره شبکه عصبی فازی- کلونی مورچگان»، پژوهش‌های مدیریت در ایران، دوره ۱۹ شماره ۱.

افسر، ا و سرافراز (۱۳۸۹)، «بررسی عوامل موثر بر قیمت طلا و ارائه مدل

پیش‌بینی بر مبنای شبکه‌های عصبی فازی»، فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی، شماره ۱۶، ص ۱۶۵ ۱۹۴.

مظهری، م، فریدونیان، یوسفی و لسانی (۱۳۹۱)، «پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌های قابل پذیرش در بورس برق و انرژی با استفاده از کلونی مصنوعی زنبور عسل»، بیست و هفتمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو، https://www.civilica.com/ Paper-PSC27-PSC27_174.html.

ابراهیمی، ک، محمد رحمانی منش، علی بهرامی نسب و نوید شفیعی (۱۳۹۶)، «پیش‌بینی شاخص بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم کرم شب‌تاب بر پایه الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی غیرمغلوب»، دومین کنفرانس سالانه اقتصاد، مدیریت و حسابداری، اهواز، دانشگاه شهید چمران- سازمان صنعت، معدن و تجارت خوزستان- https://WWW.civilica.com/Paper-EMAC02-EMAC02_342.HTML.

مرادی، مهدی، مهدی مظهری و پوریا اسدزاده (۱۳۹۳)، «پیش‌بینی درماندگی مالی مبتنی بر الگوریتم کاوش باکتری»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش‌های عالی غیر دولتی-غیر انتفاعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه امام رضا علیه السلام.

دموری، د، فرید و اشهر (۱۳۹۰)، «پیش‌بینی شاخص کل بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان و مقایسه آن با الگوهای سنتی»، دانش حسابداری، ۵(۲۴) صص۳۰-۷.

مایلی، ع، عیوضلو و فلاح پور (۱۳۹۴)، «استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب برای پیش‌بینی درماندگی مالی شرکت‌های پذیرفته‌شده در بورس اوراق بهادار تهران»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده تهران، دانشگاه تهران، مهندسی مالی.

بیگی، ر و صالحی (۱۳۹۲)، «کاربرد الگوریتم فاخته در پیش‌بینی ورشکستگی شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران»، یازدهمین همایش ملی حسابداری ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی، https: // WWW.civilica.com/ Paper-IAAC11-IAAC11-091.html.

Konar, A., (2005), Computational Intelligence: Principles, techniques.Berlin: Springer.

Yang, X. S., (2008), Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press,.

Geem Z.W, Kim J.H, Lognathan G.V., (2001), A new heuristic optimization algorithm, harmony search. Simulation, 76,60-68.

Cura, T, (2009), Particle swarm optimization approach to portfolio optimization. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2396-2406.

Gocuken, M. Ozcualoco,M. Boru, A. Dosdoguru, A., (2016), Integrating Metaheuristics and Artifitial Networks for improved StockPrice Prediction. Expert Systems With Applications, doi:10.1016/ j. eswa.

Tehrani, R, Khodayar, F, (2010), Optimization of Artificial Neural Networks Using Colony Algorythm to Predict the Variation of Stock Price Index. Journal of Applied Sciences,10(3).

Goletsis, Y., Exarchos P., Themis, Katsis, Cheristos, (2009), Can Ants Predict Bankruptcy? A Comparison of Ant Colony Systems to Other State-of-The Art Computational Methods. New Mathematics and Natural Computation, 5(3), 571-588.

Brabazon, A. O'Neill, M., (2006), Biologically Inspired Algorithms for Financial Modelling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.

Leung, M. t., Chen, A. S., and DAOUK, h., (2015), Application of neural networks to an emerging financial market: forcasting and trading the Taiwan stock index. www.ssrn.com.

Gocüken, M. & Ozcüalõcõ, M. & Boru, A. & Dosdogùru, A., (2016), Integrating Metaheuristics and ArtiÞcial Neural Networks for improved Stock Price Prediction, Expert Systems With Applications, doi: 10.1016/j.eswa.2015.09.029

Chiam, S., Tan, K.,&Mamun, A., (2009), A memetic model of evolutionary PSO for computational finance applications. Expert Systems with Applications, (36), 3695-3711.

Kumar S., Thulasiram R.K., Thulasiraman P., (2009), Ant Colony Optimization for Option Pricing. In: Brabazon A., O'Neill M. (eds) Natural Computing in Computational Finance. Studies in Computational Intelligence, (185),

Toskari, M., (2009), Estimating the net electricity energy generation and demandusing the ant colony optimization approach"; http://www.sciencedirect.com/Energy Policy, Vol.37, Issue 3, pp. 1181-1187,

Goldwater and T. J. Fogarty., (1994) "Expert System-Driven Accounting Education: A Summary of Empirical Findings on the Reduction of Professorial Control". Accounting education for the 21st century: the global challenges, 253.

Blum, C., & Roli, A., (2008), Hybrid Metaheuristics: An Introduction. In C. Blum, M. J. e. B. Aguilera, A. Roli & M. Sampels (Eds.), Hybrid Metaheuristics (pp. 1-30). Berlin: Springer-Verlag.

Chase and J. K. Shim, (1991), "Artificial intelligence and big six accounting: A survey of the current uses of expert systems in the modern accounting environment". Computers & industrial engineering, 21(1-4), 205-209.

Malizia, K. A. Olsen, T. Turchi and P. Crescenzi, (2017), "An ant-colony based approach for real-time implicit colla collaborative information seeking". Information Processing & Management, 53(3), 608-623.