ارائه روش ترکیبی نوین DSM جهت تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری

الهام شادکام[۱،*] و مهرناز غیور مداح[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

واژگان کلیدی:
الگوریتم‌های فراابتکاری،
تنظیم پارامتر،
الگوریتم فاخته،
روش سطح پاسخ،
تحلیل پوششی داده‌ها.

چکیده

تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری در عملکرد آنها بسیار مؤثر می‌باشد و معمولاً به‌صورت تجربی انجام می‌شود که بسیار زمان بر است. در این پژوهش یک روش ترکیبی جهت انتخاب پارامترهای بهینه الگوریتم‌های فراابتکاری ارایه شده است. روش پیشنهادی ترکیبی از روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها و سطح پاسخ می‌باشد و DSM نامیده می‌شود. در واقع این روش قابل استفاده برای بهینه‌سازی مسائل چند هدفه می‌باشد و مزیت اصلی آن ایجاد و بهینه‌سازی یک رویه‌ی پاسخ کارایی به جای بهینه‌سازی چندین رویه پاسخ خروجی‌ها می‌باشد، همچنین علاوه بر بهینه‌سازی پارامترها به‌صورت هم‌زمان به بیشینه سازی کارایی نیز می‌پردازد. در این پژوهش از روش پیشنهادی DSM جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای بهینه سازی توابع استاندارد و آزمایشی آکلی و راستریگین استفاده شده است. در روش ترکیبی DSM، ابتدا مقدار کارایی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها برای هر مجموعه از پارامترهای الگوریتم فراابتکاری محاسبه می‌گردد، سپس رویه پاسخ برای کارایی بر حسب پارامترهای الگوریتم فراابتکاری با استفاده از روش سطح پاسخ تعیین می‌گردد. در نهایت با بهینه‌سازی رویه کارایی مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم فاخته بدست می‌آید. به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصله از روش پیشنهادی با روش مشابه مقایسه گردیده است. نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم فرابتکاری با توجه به زمان حل، تعداد تکرارها و دقت تابع بهینه سازی نسبت به سایر روش های مشابه است.

۱-مقدمه

بسیاری از مسائل در دنیای واقعی می‌توانند توسط تکنیک‌های تحقیق در عملیات، مدل‌سازی و سپس با روش‌های مختلف بهینه‌سازی شوند. هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. در هر مسئله بهینه‌سازی متغیرهای تصمیمی وجود دارند که توسط مجموعه‌ای از محدودیت‌ها یا شرط‌ها محدود می‌شوند.

درصورتی‌که متغیرهای تصمیم از طبیعتی گسسته برخوردار باشند، این‌گونه مسائل را مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌گویند. به دلیل اینکه برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی باید جواب‌های بالقوه بسیاری را در نظر گرفت، این مسائل به عنوان مسائل سخت شناخته می‌شوند. در بسیاری از مسائل دنیای واقعی، زمان حل با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی دقیق، به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. برای رفع این مشکل، با صرف نظر کردن از از دقت جواب، می توان با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تقریبی، جوابی قابل قبول در زمانی بسیار کوتاه‌تر و منطقی‌تر ایجاد کرد. بنابراین روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: e.shadkam@khayyam.ac.ir
۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه خیام، مشهد.
۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه خیام، مشهد.

بهینه‌سازی سخت کارایی کافی ندارند. به‌این‌ترتیب، ابتدا الگوریتم‌های ابتکاری به وجود آمده‌اند که از مجموعه الگوریتم‌های تقریبی می‌باشند، اما این الگوریتم‌ها عموما برای یک مسئله خاص طراحی می‌شوند و اغلب برای مسائل دیگر قابل استفاده نیستند. بنابراین الگوریتم‌های فراابتکاری مطرح شدند که مستقل از یک مسئله خاص هستند و دارای مقادیری به نام پارامترهای الگوریتم می‌باشند که تعیین بهترین مقادیر برای این پارامترها تاثیر قابل توجهی در عملکرد آنها دارد. به منظور عملکرد مطلوب این الگوریتم ها، یافتن مقادیر خاص برای هر پارامتر الزامی می باشد. بنابراین مسئله تنظیم مقادیر پارامترهای الگوریتم های فرابتکاری مطرح گردیده است. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری، عاملی تاثیرگذار بر عملکرد این الگوریتم‌ها می‌باشد، لذا این موضوع در بسیاری از مطالعات گذشته مورد توجه واقع شده و روش‌های مختلفی برای آن ارائه گردیده است [۱].

اهمیت پارامترهای هر الگوریتم بهینه‌سازی، خصوصا الگوریتم‌های فراابتکاری امری اجتناب‌ناپذیر است. مقادیر بهینه این پارامترها که عموما به مشخصات پارامتر و مسئله وابسته است، تاثیر قابل توجهی در عملکرد الگوریتم‌های مذکور و جستجوی بهتر فضای جواب دارد [۲].

استفاده از الگوریتم فاخته COA[1] در علوم مختلف مهندسی کاربرد فراوانی دارد. این الگوریتم مانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری به تنظیم پارامتر حساس است. در استفاده از الگوریتم فاخته باید تنظیمات دقیقی در اجرای الگوریتم، تعیین ترکیب مناسب پارامترها، اجرای نهایی الگوریتم و اعتبارسنجی جواب‌ها انجام شود. در تحقیقات پیشین از روش‌هایی مانند آزمون و خطا، طراحی آزمایشات، روش تاگوچی و غیره برای تنظیم پارامترهای این الگوریتم استفاده شده است. مسئله تنظیم پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری به اندازه ای مهم و مورد توجه است که مقاله ای تحت عنوان "چرا تنظیم پارامترهای کنترل الگوریتم‌های فراابتکاری برای مقایسه منصفانه بسیار مهم است؟" در این راستا مطرح شده است [۳]. چنگ و چانگ در پژوهشی الگوریتم ژنتیکی را برای بهینه‌سازی مسئله برنامه ریزی زمان بندی پیشنهاد دادند و با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی، یک روش ترکیبی برای پارامترهای بهینه الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. آنها هفت پارامتر الگوریتم شامل: جواب اولیه، روش انتخاب، رویکرد تقاطع، میزان جهش، اندازه جمعیت اولیه، سرعت الگوریتم و روش جهش را آزمایش و بهینه‌سازی کردند[۴]. نادری و همکاران، از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم SA[2] (تبرید شبیه‌سازی شده) استفاده کردند، آنها پارامترهایی مانند جواب اولیه، الگوی کدگذاری، ساختار جستجوی محلی را به عنوان فاکتورهای قابل کنترل SA در نظر گرفتند و سطوح مختلفی برای هر فاکتور لحاظ کردند، سپس با استفاده از روش تاگوچی به بهینه‌سازی این فاکتورها پرداختند [۵]. بارتز و همکاران در پژوهشی یک روش برای تنظیم پارامتر مسائل پیچیده بهینه‌سازی دنیای واقعی ارائه کردند. این روش ترکیبی از روش‌های طراحی آزمایشات آماری، تحلیل رگرسیون، طراحی و آنالیز آزمایش‌های کامپیوتری و درخت رگرسیون می‌باشد که برای تنظیم پارامترهای الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و استراتژی تکاملی به کار گرفته شده است [۶]. ریدج و کادنکو در مقاله‌ای به تنظیم پارامتر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان با استفاده از طراحی آزمایشات برای حل مسئله فروشنده دوره‌گرد پرداختند که از روش رویه پاسخ جهت ارزیابی کیفیت جواب‌ها و زمان‌های حل استفاده شده است [۷]. فالاحیا و همکاران در مقاله‌ای پارامترهای الگوریتم کلونی مورچگان را برای مسائل فروشنده دوره‌گرد بررسی کرده‌اند که در پنج مرحله شامل: غربالگری مشخصات پارامترها، خوشه‌بندی، غربالگری پارامترها، مدل رویه پاسخ و در نهایت بهینه‌سازی انجام شده است [۸].

سارمی و همکاران در مقاله‌ای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از الگوریتم ممتیک را مدنظر قرار دادند و به تنظیم پارامترهای مورد نظر با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل واریانس برای بررسی اثرات متقابل پرداختند [۹]. زو و همکاران به بررسی تنظیم پارامترها در الگوریتم جستجوی ممنوعه با استفاده از تست‌های آماری و طراحی آزمایشات پرداختند. در این مطالعه مسئله مینیمم سازی درخت تصمیم با تشریح سه نوع روش انتخاب ساختار همسایه در نظر گرفته شده‌ا ست. این روش توسط پژوهشگران دیگر برای تنظیم پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوعه به منظور حل مسئله مسیریابی وسایل

[1] Cuckoo Optimization Algorithm

[2] Simulated Annealing

نقلیه استفاده گردیده است [۱۰]. بیلستان و همکاران پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها را بررسی کردند و پارامترهای مهم و تاثیر متقابل آنها را مورد تحلیل قرار دادند [۱۱]. ریدج در مقاله‌ای به تنظیم پارامترهای یکی از انواع الگوریتم های کلونی مورچگان برای حل مسائل فروشنده دوره گرد پرداخت و نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم نام برده با پارامترهای استاندارد شده می باشد [۱۲]. سیلیک و همکاران در مقاله‌ای رویکرد داده‌کاوی را برای تنظیم عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری مطرح کردند. در این مقاله ایده یادگیری یک مدل برای رفتار الگوریتم با استفاده از داده‌کاوی نتایج به‌دست آمده در تنظیم پارامتر را مطرح نموده است [۱۳].

مقاله‌ای توسط وسک و همکاران ارائه شده است که شامل روشی به نام سیستم رتبه بندی شطرنج[1] می‌باشد. این رویکرد برای مقایسه و امتیازدهی به الگوریتم‌های تکاملی مورد استفاده قرار گرفته است. در آن روش مطلوبیت و عملکرد یک ترکیب از پارامترها از طریق مقایسه با ساختارهای دیگر براساس امتیاز آنها، انحراف از امتیاز و فاصله امتیاز به‌دست می‌آید. در طول اجرا و در هر تکرار به طور قابل توجهی ساختارهای بد از بین رفته و ساختارهای جدید از طریق جهش و ترکیب ساختارهای موجود به‌دست می‌آیند. نتایج این روش نشان می‌دهد که همیشه تفاوت قابل ملاحظه ای در فرض صفر آزمون‌های آماری مشاهده نمی‌شود، اما روش نام برده شده در مقاله مذکور در هنگام استفاده از ساختارهای پارامتری مشابه، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. همچنین تنظیم پارامتر با این روش سریع تر از روش‌های دیگر مانند روش رقابتی بوده است و محدودیتی در تنظیم پارامترهای مطلق نیز ندارد [۱۴]. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بسیار متنوع و گسترده می باشند و در جدول ۱ به مرور مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.

جدول ۱- مرور مقالات تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری

ردیف	نام نویسندگان	سال انتشار	شماره مرجع	الگوریتم استفاده شده	روش‌های به کاربرده شده
۱	زو و همکاران	۱۹۹۸	[۱۰]	الگوریتم جستجوی ممنوعه	تست‌های آماری و طراحی آزمایشات
۲	بیلستین و همکاران	۲۰۰۲	[۱۱]	الگوریتم ازدحام ذرات	طراحی آزمایشات
۳	بارتز و همکاران	۲۰۰۴	[۶]	الگوریتم تبرید شبیه شده و استراتژی تکاملی	طراحی آزمایشات، تحلیل رگرسیون، طراحی و آنالیز آزمایش‌های کامپیوتری و درخت رگرسیون
۴	ریج و همکاران	۲۰۰۷	[۷]	الگوریتم کلونی مورچگان	طراحی آزمایشات و روش رویه پاسخ
۵	فلاهیا و همکاران	۲۰۱۴	[۸]	الگوریتم کلونی مورچگان	غربالگری مشخصات پارامترها، خوشه بندی، غربالگری پارامترها، روش رویه پاسخ و بهینه‌سازی
۶	سارمی و همکاران	۲۰۰۷	[۹]	الگوریتم ممتیک	طراحی آزمایش‌ها و تحلیل واریانس
۷	سیلک و همکاران	۲۰۱۵	[۱۳]	الگوریتم‌های فراابتکاری	داده‌کاوی
۸	وسک و همکاران	۲۰۱۶	[۱۴]	الگوریتم‌های تکاملی	مقایسه و امتیازدهی
۹	نجفی و بهنود	۲۰۱۵	[۲]	الگوریتم ژنتیک	روش سطح پاسخ و تحلیل پوششی داده‌ها
۱۰	سیهیو	۲۰۲۰	[۱۵]	الگوریتمHCSCROCFO-3Opt	روش با مبنای تصادفی
۱۱	اودیلی و فاتوکام	۲۰۲۰	[۱۶]	الگوریتم بهینه سازی بوفالوی آفریقایی	مدلسازی ریاضی
۱۲	گمز و همکاران	۲۰۲۰	[۱۷]	بهینه سازی آفتابگردان	طراحی مخلوط
۱۳	کومار و همکاران	۲۰۲۰	[۱۸]	الگوریتم جستجوی گرانشی	ویژگی های توپولوژیکی مسئله بهینه سازی داده شده

[1] Chess Rating System

یکی از روش‌هایی که برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش سطح پاسخ RSM [1]می‌باشد. RSM ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها کاربرد فراوانی دارد. در این روش متغیرهای پاسخ (خروجی‌ها) توسط چندین متغیر مستقل (ورودی‌ها) تحت تاثیر قرار می‌گیرند و هدف به دست آوردن بهترین مقادیر ورودی‌ها به منظور بهینه‌سازی خروجی‌ها است [۱۹]. از نخستین تحقیقات انجام شده برای تعیین پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری با استفاده از RSM می‌توان به پژوهش وانگ و وو اشاره کرد، که در آن یک فرایند شش مرحله‌ای مبتنی بر RSM برای شناسایی و بهینه‌سازی الگوریتم SA با محدودیت‌های زمان محاسبات انجام شده است [۲۰]. نجفی و بهنود در مقاله‌ای، الگوریتم تلفیقی از روش سطح پاسخ و تحلیل پوششی داده‌ها را برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ، به تنظیم پارامترهای یک الگوریتم ژنتیک که برای بهینه‌سازی مسئله زمانبندی کار روی ماشین با فرض زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی پرداخته‌اند [۲]. در روش آنها به منظور بهینه‌سازی پارامترهای الگوریتم تنها به بهینگی تابع هدف توجه شده است و به زمان حل الگوریتم پرداخته نشده است. همچنین شادکام و بیجاری در پژوهشی از تلفیق روش های سطح پاسخ و تحلیل پوششی داده‌ها به منظور بهینه‌سازی مسائل چند هدفه برای شعب بانک استفاده نموده‌اند [۲۱]. مرسوم ترین روشی که به عنوان اولین گزینه جهت تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌گردد، طراحی آزمایشات تاگوچی می‌باشد. در این روش پارامترهای به نحوی تنظیم می‌گردند که بهترین جواب برای تابع هدف ایجاد گردد. در واقع به دلیل اینکه تنها یک پاسخ قابل بررسی می‌باشد معمولاً مقدار تابع هدف در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که بخواهیم سایر پاسخ‌ها مانند تعداد تکرارها و زمان اجرای الگوریتم را در نظر بگیریم باید بصورت جداگانه این فرآیند برای هر پاسخ تکرار گردد. در نهایت پارامترهای ایجاد شده به دلیل اینکه هر پاسخ بصورت مجزا بهینه شده است، عملکرد مطلوبی در تمام خروجی‌ها نخواهد داشت.

در این پژوهش با ترکیب روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)[2] و روش سطح پاسخ (RSM)، روش ترکیبی تحت عنوان DSM ارائه شده است. نام روش ترکیبی پیشنهادی از روش‌های مورد استفاده در آن گرفته شده است. این روش کاربردهای مختلفی دارد که در تحقیقات آتی از نویسندگان این مقاله به آنها پرداخته خواهد شد. در اصل این روش جهت بهینه سازی مسائل چندهدفه ارائه شده است و یکی دیگر از کاربردهای آن تنظیم پارامتر الگوریتم فراابتکاری می‌باشد که در این مقاله به منظور بهینه سازی پارامترهای الگوریتم فاخته مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم فاخته یکی از جدیدترین و قوی ترین الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد که قابلیت حل مسائل گسسته و پیوسته را دارا است.

فرآیند تنظیم پارامتر این الگوریتم با روش پیشنهادی DSM، به کمک داده‌های بدست آمده از طراحی آزمایشات و اجرای الگوریتم برای دو تابع استاندارد آکلی و راستریگین، انجام می‌شود. در روش ترکیبی DSM، ابتدا تعدادی واحد تصمیم گیرنده (DMU)[3] انتخاب شده و مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌های آن‌ها تعیین می‌شوند. سپس مقادیر کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه با روش RSM رویه‌های سطح پاسخ ساخته شده که شامل یک رویه کارایی و به تعداد متغیرهای خروجی، رویه پاسخ می‌باشد. رویه‌ی کارایی بهینه سازی می‌شود و مقادیر متغیرهای مستقل بهینه به دست می‌آیند، سپس با توجه به متغیرهای مستقل بهینه، متغیرهای پاسخ بهینه به دست می‌آیند. متغیرهای مستقل و متغیرهای پاسخ بهینه به دست آمده به عنوان یک پیکربندی مناسب برای الگوریتم فراابتکاری فاخته در نظر گرفته می‌شود.

روش پیشنهادی مقاله مشکلات روش طراحی آزمایشات تاگوچی و روش نجفی و بهنود را مرتفع کرده است. در این روش جهت تنظیم پارامترها علاوه بر مقدار تابع هدف، سایر پاسخ ها (زمان و تعداد تکرارها) نیز بررسی می‌گردند. همچنین هر سه پاسخ بصورت همزمان بهینه می‌شوند که در نهایت منجر به پیکربندی مطلوبتری برای الگوریتم می‌گردد. در ادامه، ابتدا در بخش بعدی به شرح الگوریتم فاخته پرداخته شده است، سپس روش پیشنهادی DSM

[1] Response Surface Methodology
[2] Data Envelopment Analysis
[3] Decision Making Unit

ارائه می‌گردد و نحوه پیاده سازی آن جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم های فراابتکاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش بعدی به تنظیم پارامترهای الگوریتم فاخته با کمک تابع آکلی و تابع راستریگین پرداخته شده است. در بخش پنجم به معرفی مقاله نجفی و بهنود (۲۰۱۵) پرداخته شده است و روش آنها با روش پیشنهادی DSM مقایسه می گردد و نتایج مورد بررسی و تفسیر قرار خواهد گرفت.

۲-معرفی الگوریتم فاخته

این الگوریتم توسط رجبیون در سال ۲۰۱۱ ارائه شده است و از زندگی پرنده فاخته الهام می‌گیرد [۲۲]. در مقالات مختلفی به مقایسه عملکرد این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های مشابه پرداخته شده است که می‌توان جهت اطلاعات بیشتر در این زمینه می توان به مراجع [۲۳] و [۲۴] مراجعه کرد. این الگوریتم در حوزه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، مانند برنامه‌ریزی تولید [۲۵]، انتخاب سبد سهام [۲۶]، انتخاب تأمین کننده [۲۷] و حل مسائل بهینه سازی چند هدفه [۲۸]، [۲۹] و [۳۰]. در شکل (۱) نمودار الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱)، گام‌های اصلی الگوریتم COA به صورت زیر می باشند:

گام ۱: مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها را به صورت تصادفی مشخص نمایید.

گام ۲: تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص دهید.

گام ۳: شعاع تخم‌گذاری هر فاخته را تعیین نمایید.

گام ۴: فرآیند تخم‌گذاری فاخته‌ها در لانه‌های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آنها قرار دارند، انجام دهید.

گام ۵: تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین ببرید.

گام ۶: تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشده‌اند را پرورش دهید.

گام ۷: محل سکونت فاخته‌هایی جدید را ارزیابی نمایید.

گام ۸: ماکزیمم تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آنهایی را که در مکان‌های نامناسب هستند از بین ببرید.

گام ۹: فاخته‌ها را با استفاده از روش k-میانگین[1] خوشه بندی کنید و بهترین گروه فاخته را به عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید.

گام ۱۰: جمعیت جدید فاخته‌ها را به سمت مکان هدف حرکت دهید.

گام ۱۱: اگر شرط توقف برقرار گردیده توقف کنید و در غیر اینصورت به گام ۲ بروید.

۲-۱-تولید محل‌های سکونت اولیه فاخته‌ها

برای حل یک مسئله بهینه سازی باید مقادیر متغیرهای مسئله به صورت یک ماتریس درآیند. در الگوریتم ژنتیک و توده ذرات، این ماتریس‌ها با عنوان "کروموزوم" و "موقعیت ذرات" مشخص می‌شوند. ولی در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته این ماتریس محل سکونت[2] نامیده می‌شود. در یک مسئله بهینه سازی N_{var} بعدی (var تعداد متغیرهای مسئله می‌باشد) یک محل سکونت فاخته یک آرایه $1\times N_{var}$ خواهد بود که موقعیت فعلی فاخته‌ها را نشان می‌دهد. این آرایه طبق رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$Habitat = [x_1,x_2,\ldots,x_{Nvar}] \quad (1)$$

میزان مناسب بودن (یا مقدار سود) در محل سکونت فعلی با ارزیابی تابع سود (f_p) طبق رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$Profit=f_p(habitat)=f_p(x_1,x_2,\ldots,x_{Nvar}) \quad (2)$$

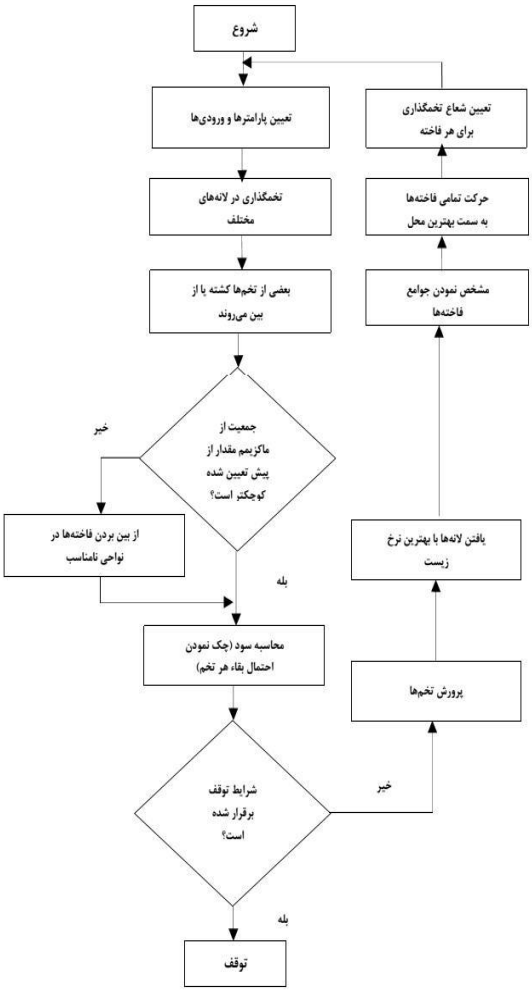
همانطور که مشاهده می‌گردد، این الگوریتم تابع سود را بیشینه میکند و برای استفاده از COA برای حل مسائل کمینه سازی کافی است تابع هزینه در علامت منفی ضرب گردد. برای شروع الگوریتم بهینه سازی یک ماتریس سکونت فاخته‌ها با ابعاد $N_{pop}\times N_{var}$ تولید می‌شود که pop تعداد جمعیت اولیه و var تعداد متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد. سپس برای هر یک از این محل سکونت‌ها تعدادی تصادفی تخم تخصیص می‌یابد. در طبیعت هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ تخم می‌گذارد. این اعداد به عنوان حد بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف استفاده می‌شود. فاخته‌ها در یک شعاع مشخص تخم‌های خود را می‌گذارند که به آن حداکثر شعاع تخم گذاری (ELR[3]) گفته می‌شود. در یک مسئله بهینه سازی هر متغیر دارای حد بالا var_{hi} و حد پایین var_{low} است که هر ELR با استفاده از این حدود قابل تعریف خواهد بود. ELR متناسب با تعداد کل تخم‌ها، تعداد تخم‌های فعلی فاخته و حد بالا و پایین متغیرهای مسئله است. بنابراین ELR به صورت

[1] K-means
[2] habitat
[3] Egg Laying Radius

رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$ELR = \propto \times \frac{number\ of\ current\ cuckoo\ eggs}{total\ number\ of\ eggs} \times (var_{hi} - var_{low}) \quad (۳)$$

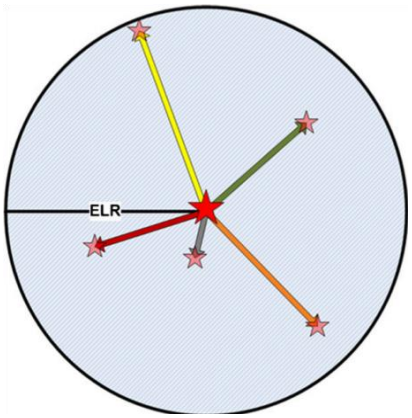
آلفا متغیری است که حداکثر مقدار ELR با آن تنظیم می‌شود. مطابق شکل (۲) هر فاخته به صورت تصادفی تخم‌هایی را در لانه پرندگان میزبان که در ELR خود قرار دارد، می‌گذارد. بعد از هر تخم گذاری p% از تمام تخم‌ها (معمولاً ۱۰٪) با کمترین مقدار تابع سود، نابود می‌شوند.



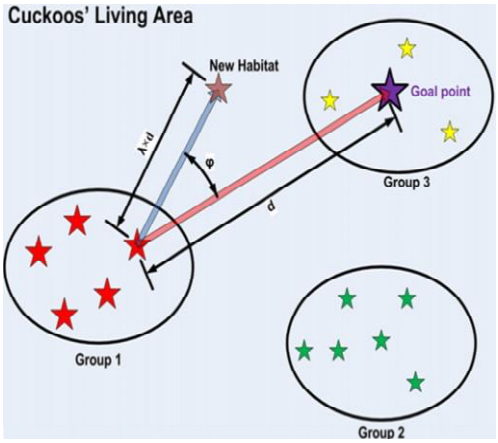
شکل ۱- نمودار الگوریتم بهینه‌سازی فاخته [۲۲]

۲-۲- تعیین نواحی زندگی برای مهاجرت فاخته‌ها

گروه‌بندی فاخته‌ها توسط روش خوشه‌بندی k-میانگین انجام می‌شود (k بین ۳ تا ۵ کفایت می‌کند). سپس میانگین سود هر گروه محاسبه می‌شود تا بهینگی نسبی محل زیست آن گروه به دست آید. گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط سود (بهینگی) می‌باشد، به عنوان گروه هدف انتخاب شده و گروه‌های دیگر مطابق شکل (۳) به سمت آن مهاجرت می‌کنند. همانطور که از شکل معلوم است هر فاخته فقط λ٪ از کل مسیر را به سمت هدف ایده آل فعلی طی میکند و یک انحراف φ رادیان نیز دارد.



شکل ۲- شعاع تخم گذاری فاخته‌ها [۲۲]



شکل ۳- مهاجرت فاخته‌ها به سمت نقطه هدف [۲۲]

این دو پارامتر به فاخته‌ها کمک می‌کند تا محیط بیشتری را جستجو کنند. λ عددی تصادفی بین ۰ و ۱ و φ عددی تصادفی بین π/۶ و -π/۶ می‌باشد. وقتی تمام فاخته‌ها به سمت نقطه هدف مهاجرت کردند و نقاط سکونت جدید هرکدام مشخص شد، هر فاخته صاحب تعدادی تخم می‌شود. با توجه به تعداد تخم هر فاخته یک ELR برای آن مشخص می‌شود و سپس تخم‌گذاری انجام می‌شود. فرمول عملگر مهاجرت در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به صورت رابطه ۴ است، F پارامتری است که باعث انحراف می‌شود.

$$X_{next\text{-}habitat}=X_{current\text{-}habitat}+F(X_{goalpoint}-X_{current\text{-}habitat}) \quad (۴)$$

برای ایجاد تعادلی بین پرنده فاخته با دیگر پرندگان، آستانه N_{MAX} تعریف می‌شود، تا هرگاه تعداد فاخته‌ها بیشتر از این آستانه شود، تعدادی از فاخته‌ها که در مناطق نامناسب

زندگی می‌کنند نابود شوند. پس از چند تکرار، تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و همچنین به محلی با بیشترین منابع غذایی می‌رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهند رفت [۵].

۳- معرفی روش پیشنهادی DSM

در اکثر مسائل دنیای واقعی با بیش از یک پاسخ یا خروجی روبرو هستیم و بهینه‌سازی هم‌زمان چندین پاسخ یکی از مشکلات عمده در مسائل طراحی می‌باشد. از طریق داده‌های طراحی آزمایشات، رویه پاسخ که یک معادله ارتباط دهنده بین یک متغیر پاسخ و متغیرهای مستقل (ورودی) می‌باشد، به دست می‌آید. در چنین مواردی بهینه‌سازی همزمان چندین رویه پاسخ به منظور به دست آوردن بهترین متغیرهای مستقل، دشوار می‌باشد. روش‌های مختلفی برای حل اینگونه مسائل ارائه شده‌اند که عبارتند از مقیدسازی مسئله با استفاده از اهداف دیگر، تابع مطلوبیت، روش کمترین هزینه رویه پاسخ.

از آنجا که روش پیشنهادی ارائه شده شامل دو روش DEA و RSM است، با عنوان روش DSM نام گذاری می‌گردد. این الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از روش سطح پاسخ به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده است. به منظور کاراتر کردن فرآیند بهینه‌سازی، در کنار روش سطح پاسخ روش تحلیل پوششی داده‌ها بکار برده شده است و یک مدل تلفیقی از ترکیب هر دو ارائه می‌شود. مزیت اصلی الگوریتم DSM ایجاد یک رویه‌ی پاسخ به جای تولید چندین رویه برای هر کدام از خروجی‌ها یا توابع هدف می‌باشد. در الگوریتم DSM در ابتدا، یک طرح آزمایشی مناسب برای به وجود آوردن آزمایش‌ها انتخاب می‌شود، سپس فرآیند شبیه‌سازی برای آزمایش‌های طراحی شده اجرا می‌گردد و ورودی و خروجی‌های ایجاد شده از شبیه‌سازی با استفاده از ابزارهای DEA و RSM مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در نهایت، با استفاده از رویه به دست آمده برای کارایی، می‌توان پارامترهای ورودی سیستم را به نحوی تعیین کرد که سیستم مورد بررسی بیشترین مقدار کارایی را داشته باشد و باتوجه به این مقادیر ورودی می‌توان خروجی‌های متناظر را از رویه پاسخی که برای هر پاسخ نوشته می‌شود نیز بدست آورد. مزیت اصلی مدل پیشنهادی کاربردی بودن آن برای تعداد نامحدود تابع هدف و توجه هم‌زمان به بیشینه‌سازی کارایی در کنار بهینه‌سازی خروجی‌های مسئله می‌باشد. در ادامه مراحل روش DSM مطابق شکل (۴) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

گام ۱. طراحی آزمایشات

متغیرهای ورودی و متغیرهای خروجی به واسطه تحقیقات پیشین و نظر خبرگان تعیین می‌شوند. این داده‌ها به عنوان داده‌های اولیه برای تعدادی واحد تصمیم گیرنده مشخص، جمع آوری می‌شوند.

گام ۲. نرمال سازی داده‌ها

برای کاهش اثر مقیاس‌های گوناگون در داده‌ها، نرمال سازی انجام می‌شوند. در این پژوهش از نرمال‌سازی اقلیدسی که در رابطه ۵ آمده است، استفاده می‌گردد.

$$y'ij = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_j^n y_{ij}^2}} \qquad (۵)$$

گام ۳. تعیین کارایی هر واحد تصمیم گیرنده با روش DEA

اندازه‌گیری میزان کارایی در حوزه بازرسی عملیات در شرکت‌ها و ارگان‌ها بسیار حائز اهمیت است. تحلیل پوششی داده‌ها یک روش غیرپارامتری در ارزشیابی عملکرد می‌باشد. مدل‌های مختلفی در حوزه تحلیل پوششی داده‌ها وجود دارد. روش CCR در رابطه ۶، یک مدل پایه و اساسی می‌باشد که در این پژوهش به منظور بررسی کارایی واحدهای تصمیم گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

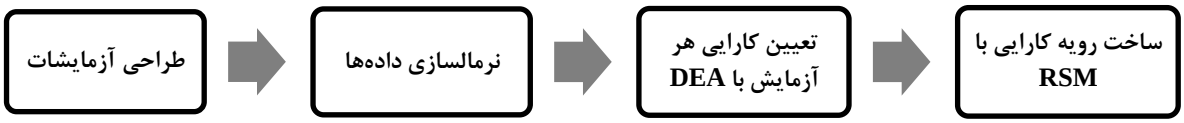
$$\begin{aligned} &\text{Max } E_u=\frac{\sum_x u_y o_{ty}}{\sum_x u_x I_{tx}} \\ &\text{s.t. } \frac{\sum_y u_y o_{wy}}{\sum_x u_x I_{wx}} < 1 \\ &W= 1,\dots, L \quad , \quad u_y> 0 \quad , \quad u_x> \end{aligned} \qquad (۶)$$

گام ۴. محاسبه رویه کارایی با روش RSM

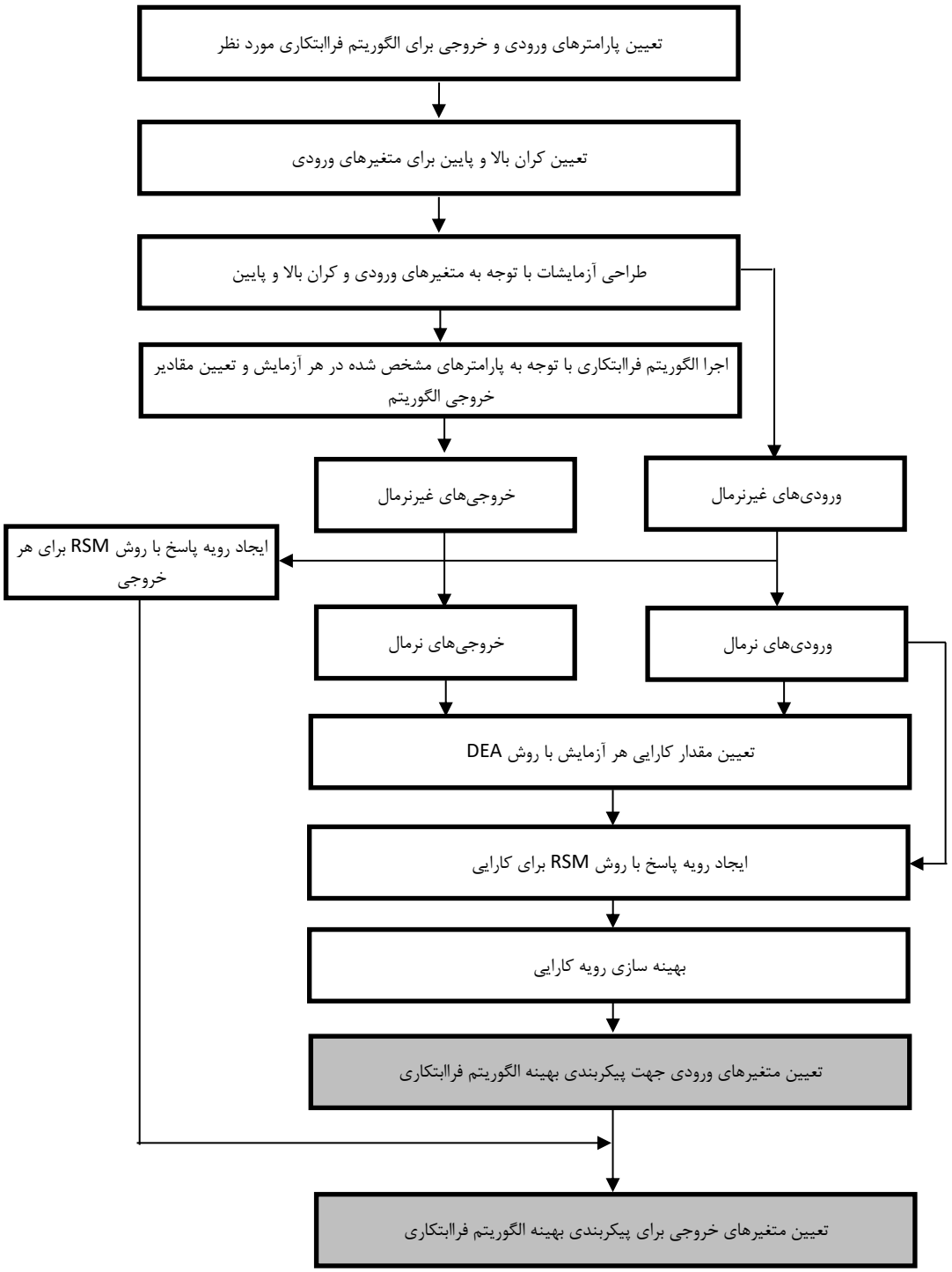
هدف از به‌کارگیری روش سطح پاسخ (رابطه ۷) تعیین بهترین متغیرهایی (ورودی‌ها) است که بتواند بهترین مقادیر را برای تابع هدف (خروجی سیستم) ایجاد کند.

مزیت اصلی روش پیشنهادی در این گام می‌باشد. در واقع به جای تولید چندین رویه پاسخ برای خروجی‌ها به صورت جداگانه، یک رویه کارایی مطابق رابطه ۷ جهت محاسبه سطح بهینه پارامترها ارائه می‌شود.

$$\text{Max efficiency} = e(X) \qquad (۷)$$



شکل ۴- فرآیند الگوریتم پیشنهادی DSM



شکل ۵ نحوه پیاده‌سازی روش DSM برای تنظیم پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری

در واقع برای ساخت رویه کارایی از ورودی‌های نرمال شده به عنوان متغیرهای مستقل و همچنین از کارایی‌های محاسبه شده به عنوان متغیر پاسخ استفاده می‌کنیم. پس از تنظیم رویه کارایی توسط نرم افزار مینیتب[۱]، رویه توسط نرم افزار لینگو[۲] بهینه‌سازی می‌شود و جواب‌های حاصل را به عنوان ورودی‌های بهینه سیستم معرفی می‌کنیم. در ادامه برای هر خروجی نیز یک رویه مجزا تنظیم کرده، با این تفاوت که در اینجا هر یک از خروجی‌ها به عنوان متغیر پاسخ قرار می‌گیرند. سپس متغیرهای مستقل بهینه، در رویه‌های پاسخ جایگذاری می‌شوند و متغیرهای پاسخ بهینه به دست می‌آیند که به عنوان خروجی‌های بهینه سیستم لحاظ می‌گردند.

۴- تنظیم پارامتر الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با استفاده از روش پیشنهادی ترکیبی DSM

در این بخش به منظور بررسی روش پیشنهادی DSM، به تنظیم پارامترهای بهینه الگوریتم فراابتکاری فاخته پرداخته می‌شود، جزییات پیاده سازی رویکرد پیشنهادی جهت تنظیم پارامتر الگوریتم مطابق شکل (۵) می‌باشد.

گام ۱: تعیین توابع استاندارد

تابع اکلی[۳] و تابع راستریگین[۴] از توابع استاندارد بهینه‌سازی به شمار می‌روند و در هر دو تابع به دنبال نقطه‌ای بهینه جهت کمینه‌سازی تابع هدف می‌باشند. توابع اکلی و راستریگین به ترتیب به صورت روابط ۸ و ۹ بیان می‌شوند:

$$F(x) = -20\,exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2}\right) - exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos(2\pi.x_i)\right) + 20 + e \quad (۸)$$

$$F(x) = An + \sum_{i=1}^{n}[x_i^2 - A\cos(2\pi x_i)] \quad (۹)$$

گام ۲ : تعیین متغیرهای مسئله

در این گام متغیرهای مستقل (ورودی‌ها) الگوریتم فاخته که همان پارامترهای الگوریتم می‌باشند، انتخاب تعیین می‌شوند که به شرح ذیل می‌باشند:

۱- تعداد فاخته اولیه[۵]

۲- کم ترین مقدار تخم‌ها[۶]

۳- بیشترین مقدار تخم‌ها[۷]

۴- تعداد خوشه‌ها[۸]

۵- حداکثر تعداد فاخته در هر تکرار[۹]

و متغیرهای پاسخ (خروجی‌ها) به شرح زیر می‌باشد :

۱- مقدار تابع هدف مسئله[۱۰]

۲- زمان حل مسئله [۱۱]

۳- تعدا تکرارها جهت حل مسئله[۱۲]

گام ۳ : طراحی آزمایشات

با مشخص کردن کران بالا و پایین برای هر کدام از متغیرهای ورودی طبق جدول ۲، طراحی آزمایشات با استفاده از نرم افزار مینی‌تب انجام می‌شود که خروجی آن انجام ۳۲ طرح آزمایش می باشد. در واقع هر آزمایش یک پیکربندی برای پارامترهای الگوریتم فراابتکاری می باشد.

جدول ۲- مقادیر کران پایین و بالا متغیرهای ورودی (پارامترهای الگوریتم)

متغیرهای ورودی	کران پایین	کران بالا
تعداد فاخته اولیه	۵	۲۰
کم ترین مقدار تخم‌ها	۲	۴
بیش ترین مقدار تخم‌ها	۳	۵
تعداد خوشه‌ها	۲	۵
حداکثر تعداد فاخته در هر تکرار	۱۰	۵۰

سپس با قرار دادن هر یک از این پیکربندی پارامترها در الگوریتم فاخته، بهینه سازی توابع اکلی و راستریگین با تعداد متغیر برابر ۱۰۰ انجام می شود و مقادیر متغیرهای خروجی تعیین شده در گام قبل، اندازه‌گیری می‌شوند که در نتایج مربوط به توابع آکلی و راستریگین در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

[1] Minitab
[2] Lingo
[3] Ackley
[4] Rastrigin
[5] Number of cuckoos
[6] Min number of eggs
[7] Max number of eggs
[8] knn cluster number
[9] Max number of cuckoos
[10] Cost function
[11] Time
[12] number of iteration

جدول ۳- مقادیر ورودی و خروجی مربوط به تابع اکلی

شماره آزمایش	ورودی‌ها (xها)					خروجی‌ها (yها)		
	تعداد فاخته اولیه	کمترین مقدار تخم‌ها	بیشترین مقدار تخم‌ها	تعداد خوشه‌ها	حداکثر تعداد فاخته‌ها	تابع هدف مسئله	زمان حل	تعداد تکرار
۱	۲۰	۴	۵	۲	۱۰	۲,۹۹۱۴	۰,۹۴۸	۱۸
۲	۲۰	۲	۳	۲	۵۰	۲,۹۸۳۸	۱,۱۰۷	۱۸
۳	۵	۲	۳	۵	۵۰	۲,۹۸۷۹	۱,۰۶۷	۱۷
۴	۲۰	۴	۳	۵	۵۰	۲,۹۸۶	۱,۴۱۳	۱۶
۵	۵	۴	۳	۵	۵۰	۲,۹۸۵۶	۰,۹۴۱	۱۷
۶	۵	۴	۳	۲	۱۰	۲,۹۸۶۳	۰,۹۲	۱۷
۷	۲۰	۴	۳	۲	۵۰	۲,۹۸۴۷	۱,۳۳	۱۸
۸	۲۰	۴	۳	۲	۱۰	۲,۹۸۲۹	۰,۹۲۵	۱۶
۹	۲۰	۴	۵	۵	۱۰	۲,۹۸۳۹	۰,۹۶۶	۱۷
۱۰	۲۰	۴	۵	۵	۵۰	۲,۹۸۵	۱,۸۰۶	۱۷
۱۱	۵	۲	۳	۲	۵۰	۲,۹۸۵۲	۱,۰۲۶	۱۷
۱۲	۲۰	۲	۳	۵	۵۰	۳,۰۰۹۵	۱,۱۹۵	۱۶
۱۳	۲۰	۲	۳	۲	۱۰	۲,۹۹۰۴	۰,۹۳۴	۱۷
۱۴	۵	۲	۵	۲	۱۰	۲,۹۸۵۵	۰,۹۰۷	۱۷
۱۵	۵	۴	۵	۵	۱۰	۲,۹۸۶۱	۰,۹۳۵	۱۷
۱۶	۵	۲	۳	۵	۱۰	۲,۹۹۸۴	۰,۹۱	۱۶
۱۷	۵	۲	۵	۵	۵۰	۳,۰۰۱	۱,۳۱۶	۱۶
۱۸	۵	۲	۳	۲	۱۰	۲,۹۸۷۸	۰,۹۲۵	۱۷
۱۹	۵	۴	۳	۲	۵۰	۲,۹۸۵	۱,۲۴۴	۱۸
۲۰	۵	۲	۵	۵	۱۰	۳,۰۳۳۷	۰,۹۳۴	۱۹
۲۱	۵	۴	۳	۵	۱۰	۲,۹۸۲	۰,۹۱۱	۱۸
۲۲	۲۰	۲	۵	۲	۵۰	۲,۹۸۶	۱,۳۱۳	۱۸
۲۳	۵	۴	۵	۵	۵۰	۲,۹۸۵۸	۱,۶۵۳	۱۸
۲۴	۲۰	۲	۵	۵	۱۰	۲,۹۸۷۷	۰,۹۲۲	۱۷
۲۵	۲۰	۴	۵	۲	۵۰	۲,۹۸۳	۱,۶۱۴	۱۷
۲۶	۵	۴	۵	۲	۵۰	۲,۹۸۹۷	۱,۶	۱۷
۲۷	۵	۲	۵	۲	۵۰	۲,۹۸۷۵	۱,۲۳۶	۱۸
۲۸	۲۰	۲	۵	۵	۵۰	۲,۹۸۸۶	۱,۴۲۸	۱۷
۲۹	۲۰	۲	۳	۵	۱۰	۲,۹۸۶	۰,۹۲۸	۱۷
۳۰	۲۰	۴	۳	۵	۱۰	۲,۹۸۲۲	۰,۹۴۶	۱۶
۳۱	۲۰	۲	۵	۲	۱۰	۲,۹۸۹۴	۰,۹۳۷	۱۸
۳۲	۵	۴	۵	۲	۱۰	۲,۹۹۱۴	۰,۹۱۷	۱۸

گام ۴: نرمال‌سازی داده‌ها

بنابر گفته‌های پیشین داده‌ها با نرم اقلیدسی نرمال‌سازی می‌شوند. قابل ذکر است که مقادیر خروجی‌ها از جنس هزینه هستند و برای نرمال‌سازی آنها از رابطه ۱۰ استفاده می‌شود.

$$y_i' = 1 - \left(\frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}\right) \qquad (۱۰)$$

مقادیر نرمال شده داده‌ها برای توابع آکلی و راستریگین طبق جدول ۵ و ۶ می‌باشد.

جدول ۴- مقادیر ورودی و خروجی مربوط به تابع راستریگین

شماره آزمایش	ورودی‌ها (xها)					خروجی‌ها (yها)		
	تعداد فاخته اولیه	کمترین مقدار تخم‌ها	بیشترین مقدار تخم‌ها	تعداد خوشه‌ها	حداکثر تعداد فاخته‌ها	تابع مسئله	زمان حل	تعداد تکرار
۱	۲۰	۴	۵	۲	۵۰	۳,۱۵۳۸	۱,۷۱۲	۳۴
۲	۵	۲	۳	۵	۱۰	۲,۶۷۲۴	۰,۹۸	۳۴
۳	۵	۲	۵	۲	۱۰	۳,۳۰۷۲	۰,۹۶۲	۳۴
۴	۵	۴	۳	۵	۱۰	۰,۳۵۲۷۹	۰,۹۴۵	۳۱
۵	۵	۴	۳	۵	۵۰	۱۹,۳۶۹۱	۱,۲۶۷	۳۷
۶	۲۰	۲	۵	۵	۵۰	۲,۹۰۳۲	۱,۳۳۳	۳۵
۷	۵	۲	۳	۵	۵۰	۲۲,۶۰۸۳	۱,۱۱۴	۳۳
۸	۲۰	۲	۵	۲	۱۰	۱۲,۲۶۴۷	۰,۹۱۶	۳۵
۹	۲۰	۴	۵	۵	۱۰	۲,۶۹۹۱	۰,۹۷۲	۳۶
۱۰	۵	۲	۵	۲	۵۰	۵,۴۴۱۶	۱,۲۳۲	۳۶
۱۱	۵	۴	۵	۲	۵۰	۳۲,۸۵۵۷	۱,۵۵۲	۳۴
۱۲	۵	۴	۵	۵	۱۰	۶,۵۰۶۷	۰,۹۷	۳۰
۱۳	۵	۲	۵	۵	۵۰	۷,۸۱۳	۱,۲۲۹	۳۲
۱۴	۲۰	۴	۵	۲	۱۰	۵,۳۰۶۷	۱,۱۲۵	۳۳
۱۵	۲۰	۴	۳	۲	۵۰	۲,۳۷۵۳	۱,۲۳۳	۳۸
۱۶	۲۰	۲	۳	۵	۵۰	۴,۶۴۶۱	۱,۱۳۸	۳۴
۱۷	۲۰	۴	۳	۵	۵۰	۱۴,۷۱۶	۱,۲۸۹	۳۴
۱۸	۲۰	۲	۵	۵	۱۰	۱۳,۸۶۰۵	۱,۰۴۵	۳۰
۱۹	۲۰	۲	۵	۲	۵۰	۱,۱۳۳۸	۱,۲۹۳	۳۶
۲۰	۲۰	۴	۳	۵	۱۰	۹,۰۵۲۳	۰,۹۴۲	۳۲
۲۱	۵	۲	۳	۲	۱۰	۱۸,۳۶۶	۰,۹۲	۳۳
۲۲	۵	۴	۵	۵	۵۰	۱۴,۰۴۶۵	۱,۶۲۱	۳۷
۲۳	۵	۲	۵	۵	۱۰	۳,۰۵۳۲	۰,۹۲۲	۳۳
۲۴	۲۰	۴	۳	۲	۱۰	۱۲,۳۲۲۵	۰,۹۵۲	۴۳
۲۵	۲۰	۲	۳	۵	۱۰	۰,۱۱۶	۱,۲۶۵	۳۲
۲۶	۲۰	۲	۳	۲	۵۰	۴,۴۰۲۸	۱,۲۴	۳۳
۲۷	۲۰	۲	۳	۲	۱۰	۰,۶۶۸۷	۱,۰۹۷	۳۶
۲۸	۵	۴	۳	۲	۱۰	۱۹,۵۹۱	۱,۱۴۵	۳۲
۲۹	۵	۴	۵	۲	۱۰	۷,۲۲۴	۱,۰۴۲	۳۵
۳۰	۲۰	۴	۵	۵	۵۰	۱,۰۵۳	۱,۸۳	۳۲
۳۱	۵	۲	۳	۲	۵۰	۱,۹۰۸۷	۱,۱۳۶	۳۲
۳۲	۵	۴	۳	۲	۵۰	۹,۹۱۹۶	۱,۱۴۰۹	۳۱

گام ۵. محاسبه کارایی با تحلیل پوششی داده‌ها

در ادامه هر یک از آزمایشات یا پیکربندی‌های گام قبل به عنوان یک DMU درنظر گرفته شده است و مقادیر کارایی برای هر پیکربندی الگوریتم در هر دو تابع با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و نرم افزار لینگو طبق جدول ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند.

محاسبه مقادیر کارایی با رویکرد CCR انجام شده است.

جدول ۵- مقادیر نرمال شده ورودی‌ها و خروجی‌های تابع اکلی

DMU	x۱	x۲	x۳	x٤	x٥	y۱	y۲	y۳
۱	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۱	۰,۸۵۵۵	۰,۸۱۵۰۵
۲	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۵۵	۰,۸۳۱۲۶	۰,۸۱۵۰۵
۳	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۳۱	۰,۸۳۷۳۶	۰,۸۲۵۳۳
۴	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۲	۰,۷۸۴۶۲	۰,۸۳۵۶
۵	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۵	۰,۸۵۶۵۶	۰,۸۲۵۳۳
۶	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴	۰,۸۵۹۷۶	۰,۸۲۵۳۳
۷	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۵	۰,۷۹۷۲۷	۰,۸۱۵۰۵
۸	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۶۱	۰,۸۵۹	۰,۸۳۵۶
۹	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۵۵	۰,۸۵۲۷۵	۰,۸۲۵۳۳
۱۰	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۸	۰,۷۲۴۷۱	۰,۸۲۵۳۳
۱۱	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۷	۰,۸۴۳۶۱	۰,۸۲۵۳۳
۱۲	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۲۰۳	۰,۸۱۷۸۵	۰,۸۳۵۶
۱۳	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۱۶	۰,۸۵۷۶۳	۰,۸۲۵۳۳
۱۴	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴۵	۰,۸۶۱۷۵	۰,۸۲۵۳۳
۱۵	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴۲	۰,۸۵۷۴۸	۰,۸۲۵۳۳
۱۶	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۲۶۹	۰,۸۶۱۲۹	۰,۸۳۵۶
۱۷	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۲۵۴	۰,۷۹۹۴	۰,۸۳۵۶
۱۸	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۳۲	۰,۸۵۹	۰,۸۲۵۳۳
۱۹	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۸	۰,۸۱۰۳۸	۰,۸۱۵۰۵
۲۰	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۰۶	۰,۸۵۷۶۳	۰,۸۰۴۷۸
۲۱	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۶۶	۰,۸۶۱۱۴	۰,۸۱۵۰۵
۲۲	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۲	۰,۷۹۹۸۶	۰,۸۱۵۰۵
۲۳	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۳	۰,۷۴۸۰۳	۰,۸۱۵۰۵
۲۴	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۳۲	۰,۸۵۹۴۶	۰,۸۲۵۳۳
۲۵	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۶	۰,۷۵۳۹۸	۰,۸۲۵۳۳
۲۶	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۲	۰,۷۵۶۱۱	۰,۸۲۵۳۳
۲۷	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۳۳	۰,۸۱۱۶	۰,۸۱۵۰۵
۲۸	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۲۷	۰,۷۸۲۳۳	۰,۸۲۵۳۳
۲۹	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴۲	۰,۸۵۸۵۵	۰,۸۲۵۳۳
۳۰	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۶۵	۰,۸۵۵۸	۰,۸۳۵۶
۳۱	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۲۲	۰,۸۵۷۱۷	۰,۸۱۵۰۵
۳۲	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۱	۰,۸۶۰۲۲	۰,۸۱۵۰۵

گام ۶ : ساخت رویه کارایی و رویه‌های پاسخ با روش سطح پاسخ

در این گام با استفاده از اطلاعات به دست آمده از گام ۴ و ۵ به ساخت رویه برای کارایی و متغیرهای خروجی پرداخته شده است. رویه‌ها به کمک نرم افزار مینی‌تب ایجاد می‌شوند، ورودی‌ها به عنوان متغیرهای مستقل و کارایی محاسبه شده در گام ۵ به عنوان متغیر پاسخ یا وابسته در نظر گرفته شده است.

رویه کارایی مربوط به توابع اکلی و راستریگین مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ می‌باشند.

$$\begin{aligned}\text{Max e} = {} & -0.83051 + 0.00409814\,x_1 + 0.178639\,x_2 + 0.153667\,x_3 + 0.0912142\,x_4 + \\ & 0.0005852\,x_5 - 2.24079E-4\,x_1\,x_2 - 2.20808E-4\,x_1\,x_3 - 9.77674E-5\,x_1\,x_4 - 5.59514E- \\ & 7\,x_1\,x_5 - 5.59514E-7\,x_2\,x_3 - 0.00549792\,x_2\,x_4 - 3.14486E-05\,x_2\,x_5 - 0.00559131\,x_3\,x_4 - \\ & 3.09067E-05\,x_3\,x_5 - 1.38115E- \\ & 5\,x_4\,x_5\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

$$\text{Max e} = 1.45733 + 0.00155771\ x_1 - 0.106527\ x_2 - 0.0891887\ x_3 + 0.0263433\ x_4 - 2.60030E-4\ x_5 - 1.36606E-4\ x_1\ x_2 + 8.01367E-5\ x_1\ x_3 - 1.37235E-4\ x_1\ x_4 + 3.86481E-7\ x_1\ x_5 + 0.0154681\ x_2\ x_3 - 0.00284819\ x_2\ x_4 + 4.48567E-5\ x_2\ x_5 + 0.000478417\ x_3\ x_4 - 2.33423E-5\ x_3\ x_5 + 1.34745E-5\ x_4\ x_5 \quad (۱۲)$$

جدول ۶- مقادیر نرمال شده ورودی‌ها خروجی‌های تابع راستریگین

DMU	x۱	x۲	x۳	x٤	x٥	y۱	y۲	y۳
۱	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۱	۰,۸۵۵۵	۰,۸۱۵۰۵
۲	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۵۵	۰,۸۳۱۲۶	۰,۸۱۵۰۵
۳	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۳۱	۰,۸۳۷۳۶	۰,۸۲۵۳۳
۴	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۲	۰,۷۸۴۶۲	۰,۸۳۵۶
۵	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۵	۰,۸۵۶۵۶	۰,۸۲۵۳۳
۶	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴	۰,۸۵۹۷۶	۰,۸۲۵۳۳
۷	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۵	۰,۷۹۷۲۷	۰,۸۱۵۰۵
۸	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۶۱	۰,۸۵۹	۰,۸۳۵۶
۹	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۵۵	۰,۸۵۲۷۵	۰,۸۲۵۳۳
۱۰	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۸	۰,۷۲۴۷۱	۰,۸۲۵۳۳
۱۱	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۷	۰,۸۴۳۶۱	۰,۸۲۵۳۳
۱۲	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۲۰۳	۰,۸۱۷۸۵	۰,۸۳۵۶
۱۳	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۱۶	۰,۸۵۷۶۳	۰,۸۲۵۳۳
۱۴	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴۵	۰,۸۶۱۷۵	۰,۸۲۵۳۳
۱۵	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴۲	۰,۸۵۷۴۸	۰,۸۲۵۳۳
۱۶	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۲۶۹	۰,۸۶۱۲۹	۰,۸۳۵۶
۱۷	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۲۵۴	۰,۷۹۹۴	۰,۸۳۵۶
۱۸	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۳۲	۰,۸۵۹	۰,۸۲۵۳۳
۱۹	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۸	۰,۸۱۰۳۸	۰,۸۱۵۰۵
۲۰	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۰۶	۰,۸۵۷۶۳	۰,۸۰۴۷۸
۲۱	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۶۶	۰,۸۶۱۱۴	۰,۸۱۵۰۵
۲۲	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۲	۰,۷۹۹۸۶	۰,۸۱۵۰۵
۲۳	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۴۳	۰,۷۴۸۰۳	۰,۸۱۵۰۵
۲۴	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۳۲	۰,۸۵۹۴۶	۰,۸۲۵۳۳
۲۵	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۶	۰,۷۵۳۹۸	۰,۸۲۵۳۳
۲۶	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۲	۰,۷۵۶۱۱	۰,۸۲۵۳۳
۲۷	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۳۳	۰,۸۱۱۶	۰,۸۱۵۰۵
۲۸	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۲۴۵۱۴۵	۰,۸۲۳۲۷	۰,۷۸۲۳۳	۰,۸۲۵۳۳
۲۹	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۴۲	۰,۸۵۸۵۵	۰,۸۲۵۳۳
۳۰	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۱۲۸۶۲۴	۰,۲۳۲۱۱۹	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۶۵	۰,۸۵۵۸	۰,۸۳۵۶
۳۱	۰,۲۴۲۵۳۶	۰,۱۱۱۸۰۳	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۲۲	۰,۸۵۷۱۷	۰,۸۱۵۰۵
۳۲	۰,۰۶۰۶۳۴	۰,۲۲۳۶۰۷	۰,۲۱۴۳۷۳	۰,۰۹۲۸۴۸	۰,۰۴۹۰۲۹	۰,۸۲۳۱	۰,۸۶۰۲۲	۰,۸۱۵۰۵

جدول ۷- مقادیر کارایی مربوط به پیکربندی الگوریتم برای تابع اکلی

DMU	کارایی	DMU	کارایی	DMU	کارایی	DMU	کارایی
۱	۰,۹۹۹۳۸	۹	۰,۹۹۹۸۷۱	۱۷	۱	۲۵	۰,۹۹۹۹
۲	۱	۱۰	۰,۵۹۹۹	۱۸	۱	۲۶	۱
۳	۰,۹۹۹۸۲	۱۱	۱	۱۹	۱	۲۷	۰,۹۹۹۸۳۵
۴	۱	۱۲	۱	۲۰	۰,۹۹۶۵۳۹	۲۸	۰,۹۹۹۷۷۳
۵	۱	۱۳	۱	۲۱	۱	۲۹	۱
۶	۱	۱۴	۱	۲۲	۰,۹۹۹۸۴۳	۳۰	۱
۷	۰,۹۹۹۸۷۱	۱۵	۰,۹۹۹۹۶	۲۳	۰,۹۹۹۷۳۳	۳۱	۰,۹۹۹۷۲
۸	۱	۱۶	۱	۲۴	۰,۹۹۹۸۵۳	۳۲	۰,۹۹۹۵۷۶

جدول۸ مقادیر کارایی مربوط به به پیکربندی الگوریتم برای تابع راستریگین

DMU	کارایی	DMU	کارایی	DMU	کارایی	DMU	کارایی
۱	۱	۹	۰,۹۸۹۰۷۶	۱۷	۰,۹۹۶۷	۲۵	۱
۲	۱	۱۰	۰,۶۲۸۷۶۷	۱۸	۱	۲۶	۰,۹۵۳۲۴۳
۳	۱	۱۱	۱	۱۹	۱	۲۷	۱
۴	۱	۱۲	۰,۹۴۶۱۷۹	۲۰	۰,۹۴۱۱۷۶	۲۸	۰,۸۳۸۳۴۲
۵	۱	۱۳	۱	۲۱	۰,۹۴۲۸۵۷	۲۹	۱
۶	۱	۱۴	۱	۲۲	۱	۳۰	۱
۷	۰,۹۱۶۶۶۷	۱۵	۱	۲۳	۰,۹۶۲۳۴۵	۳۱	۱
۸	۱	۱۶	۱	۲۴	۱	۳۲	۰,۸۸۵۷۱۴

همچنین برای سه خروجی تعیین شده، رویه‌های مجزا در نظر گرفته می‌شود که ورودی‌های تعیین شده به عنوان متغیرهای مستقل و خروجی‌ها به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته می‌شوند. رویه‌های پاسخ تابع اکلی به صورت روابط ۱۳، ۱۴ و ۱۵ می‌باشند. همچنین رویه‌های پاسخ تابع راستریگین به صورت روابط ۱۶، ۱۷ و ۱۸ می‌باشند.

رویه تابع هدف مسئله (y_1):

$$y_1 = 2.87342 + 0.000230282x_1 + 0.00919271\,x_2 + 0.00825863\,x_3 + 0.00982920\,x_4 + 7.13368E-6\,x_5 + 1.82222E-5\,x_1\,x_2 - 4.05556E-5\,x_1\,x_3 - 1.10617E-05\,x_1\,x_4 + 7.80556E-08\,x_1\,x_5 - 2.75000E-04\,x_2\,x_3 - 0.00159722\,x_2\,x_4 + 2.18750E-6\,x_2\,x_5 + 0.000227778\,x_3\,x_4 - 4.23437E-6\,x_3\,x_5 + 3.33333E-7\,x_4\,x_5 \quad (۱۳)$$

رویه زمان حل مسئله (y_2):

$$y_1 = 3.19427 - 9.64494E-4\,x_1 - 0.248918\,x_2 - 0.260315\,x_3 + 0.00982920\,x_4 - 0.00220977\,x_5 + 0.000213333\,x_1\,x_2 - 2.21111E-4\,x_1\,x_3 + 0.000149136\,x_1\,x_4 + 1.35556E-6\,x_1\,x_5 + 0.0283750\,x_2\,x_3 - 0.00336111\,x_2\,x_4 + 0.000143906\,x_2\,x_5 + 0.00816667\,x_3\,x_4 + 0.000201250\,x_3\,x_5 + 1.07639E-5\,x_4\,x_5 \quad (۱۴)$$

رویه تعداد تکرارها (y_3):

$$y_3 = 11.5064 + 0.0201019\,x_1 + 0.512674\,x_2 + 0.559201\,x_3 - 0.211343\,x_4 + 0.00434028\,x_5 - 0.00333333\,x_1\,x_2 + 0.00111111\,x_1\,x_3 - 0.00148148\,x_1\,x_4 + 2.77778E-6\,x_5 - 0.0625000\,x_2\,x_3 + 0.0277778\,x_2\,x_4 + 0.000156250\,x_2\,x_5 + 0.0277778\,x_3\,x_4 - 4.68750E-4\,x_3\,x_5 - 2.08333E-4\,x_4\,x_5 \quad (۱۵)$$

رویه تابع مسئله (y_1):

$$y_1 = 38.5052 + 0.0296916\,x_1 + 8.45343\,x_2 + 3.47633\,x_3 + 3.01223\,x_4 - 0.0229248\,x_5 - 0.0188956\,x_1\,x_2 + 0.00478616\,x_1\,x_3 + 0.00731104\,x_1\,x_4 - 1.03883E-04\,x_1\,x_5 - 0.288790\,x_2\,x_3 - 0.487949\,x_2\,x_4 + 0.00295977\,x_2\,x_5 - 0.315704\,x_3\,x_4 - 2.05134E-4\,x_3x_5 + 0.00231603x_4x_5 \quad (۱۶)$$

رویه زمان حل (y_2):

$$y_2 = 4.26218 + 0.000353820x_1 - 0.439723x_2 - 0.426627x_3 + 0.00826078x_4 - 0.00226608x_5 - 2.55500E-4x_1x_2 + 0.000104389x_1x_3 + 8.09630E-5\,x_1\,x_4 + 4.83472E-7x_1x_5 + 0.0583781x_2\,x_3 - 0.00410972\,x_2\,x_4 + 0.000151867\,x_2\,x_5 + 0.000165278\,x_3\,x_4 + 0.000198133\,x_3\,x_5 + 1.38924E-5\,x_4\,x_5 \quad (۱۷)$$

رویه تعداد تکرار (y_3ها):

$$y_3 = 14.7940 + 0.117650\,x_1 + 2.27370\,x_2 + 2.67040\,x_3 - 0.191397\,x_4 - 0.0120052\,x_5 + 0.00611111\,x_1\,x_2 - 0.0105556\,x_1\,x_3 - 0.00567901\,x_1\,x_4 - 1.52778E-5\,x_1\,x_5 - 0.343750\,x_2\,x_3 + 0.0138889\,x_2\,x_4 + 7.81250E-5\,x_2\,x_5 - 0.0138889\,x_3\,x_4 + 0.000859375\,x_3\,x_5 + 0.000798611\,x_4\,x_5 \quad (۱۸)$$

گام ۷: بهینه‌سازی رویه کارایی و رویه‌های پاسخ

برای یافتن پارامترهای بهینه الگوریتم فاخته، رویه‌های به دست آمده برای کارایی (روابط ۱۱ و ۱۲) با نرم افزار لینگو بهینه‌سازی می‌شوند و مقادیر متغیرهای مستقل به صورت جدول ۹ تعیین می‌گردد.

جدول ۹- مقادیر بهینه پارامترهای مسئله

ورودی‌ها	متغیرهای مستقل	تابع اکلی	تابع راستریگین
تعداد فاخته اولیه	X۱	۲,۰۸۶	۱,۲۳۴
کم ترین تخم‌ها	X۲	۴,۵۸	۱,۲۳۴
بیش ترین تخم‌ها	X۳	۶,۱۲۸	۵,۱۱۶۷
تعداد خوشه‌ها	X۴	۲,۰۸	۱,۲۳۴
حداکثر تعداد فاخته	X۵	۱,۲۳	۱,۲۳۴

جدول ۱۰- مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ

خروجی‌ها	متغیرهای پاسخ	تابع اکلی	تابع راستریگین
تابع هدف مسئله	y_1	۲,۹۶۶	۶۵,۹
زمان حل	y_2	۱,۲	۱,۹
تعداد تکرار	y_3	۱۵,۷۲ ≅ ۱۶	۲۸,۸ ≅ ۲۹

در ادامه برای محاسبه مقادیر متغیرهای پاسخ متناظر، مقادیر به دست آمده متغیرهای مستقل (پارامترهای جدول ۹) در رویه‌های خروجی جایگذاری می‌شوند و مقادیر متغیرهای پاسخ مطابق جدول ۱۰ محاسبه می‌شوند.

گام. مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج عددی روش DSM (اعتبارسنجی ۱)

در این گام با استفاده از پیکربندی بهینه به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی مقاله، الگوریتم فاخته ۱۰ مرتبه با کمک نرم افزار متلب اجرا می‌شود. این فرآیند برای هر دو تابع اکلی و راستریگین به صورت مجزا انجام می‌شود. لازم به ذکر است به‌دلیل اینکه متغیرهای مستقل (ورودی‌ها) باید اعداد صحیح باشند، متغیرهای بهینه به دست آمده از قبل به صورت جدول ۱۱ گرد شده‌اند. پس از اجرای الگوریتم فاخته، میانگین هر کدام از متغیرهای پاسخ به صورت جدول ۱۲ محاسبه می‌شود.

جدول ۱۱- مقادیر بهینه گرد شده متغیرهای مستقل

متغیرهای مستقل	مقادیر بهینه گرد شده	
	تابع اکلی	تابع راستریگین
۱X	۳	۲
۲X	۴	۲
۳X	۶	۵
۴X	۲	۱
۵X	۲	۲

جدول ۱۲- مقادیر متغیرهای پاسخ حاصل از اجرای الگوریتم

متغیرهای پاسخ	مقادیر بهینه گرد شده	
	تابع اکلی	تابع راستریگین
y_1	۲,۹۹۳۲	۴۳,۸۵
y_2	۰,۹۲۹۱	۰,۸۹
y_3	۱۸	۳۰

جدول ۱۳- مقایسه نتایج تابع اکلی

متغیر پاسخ	روش DSM	اجرای الگوریتم	قدرمطلق تفاضل
۱y	۲,۹۶۶	۲,۹۹۳۲	۰,۰۲۷۲
۲y	۱,۲	۰,۹۲۹۱	۰,۲۷۰۹
۳y	۱۶	۱۸	۲

این فرآیند به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش پیشنهادی DSM با نتایج حاصل از اجرای واقعی الگوریتم می باشد. در واقع نتایج رویکرد تحلیلی با نتایج عددی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جهت سهولت در مقایسه هنتایج هر دو روش، قدر مطلق تفاضل متغیرهای پاسخ در هر دو رویکرد مطابق جداول ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شود.

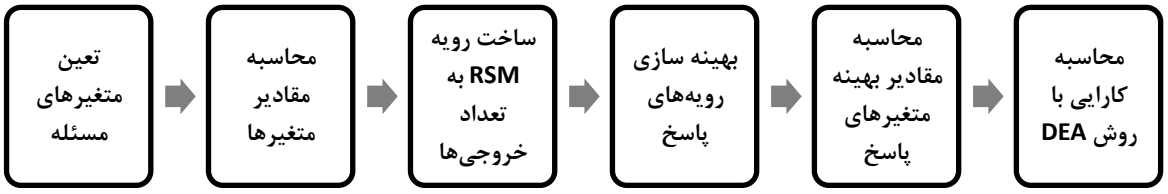
همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین مقادیر بهینه حاصل از روش DSM و مقادیر حاصل از اجرای الگوریتم بسیار کم می‌باشد و این امر نشان‌دهنده بهینگی روش پیشنهادی DSM می‌باشد.

جدول ۱۴- مقایسه نتایج تابع راستریگین

متغیر پاسخ	روش DSM	اجرای الگوریتم	قدر مطلق تفاضل
۱y	۶۵,۹	۴۳,۸۵	۲۲,۰۵
۲y	۱,۹	۰,۸۹	۱,۰۱
۳y	۲۹	۳۰	۱

۵- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی روش نجفی و بهنود (اعتبارسنجی ۲)

در این بخش به مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش نجفی و بهنود که در مرور ادبیات به آن اشاه شد، پرداخته می‌شود [۲]. در این روش در ابتدا یک طرح مرکب مرکزی ایجاد شد و سپس با استفاده از داده‌های مربوط به این طرح، مدل کامل مرتبه دوم برازش شده است. در ادامه مقادیر بهینه پارامترها با حل مدل برنامه ریزی غیرخطی تعیین گردیده است. سپس کارایی مسائل حل شده توسط الگوریتم با درنظرگرفتن پارامترهای به‌دست آمده به عنوان ورودی‌های مدل تحلیل پوششی داده‌ها سنجیده شده و کاراترین پیکربندی الگوریتم ژنتیک تعیین گردیده است.



شکل ۶- فلوچارت روش مقاله نجفی و بهنود

فرآیند روش نجفی و بهنود مطابق شکل (۶) می‌باشد و در این بخش به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی DSM، به پیاده‌سازی روش نجفی و بهنود برای توابع اکلی و راستریگین پرداخته شده‌است. همانطور که از فرآیند این روش مشاهده می‌گردد، در تنظیم پارامترهای الگوریتم فقط به پاسخ مقدار تابع هدف توجه شده است و سایر خروجی های مهم از قبیل زمان و تعداد تکرار بررسی نمی‌گردد.

گام ۱:تعیین متغیرهای مسئله

متغیرهای ورودی (پارامترهای اثرگذار در عملکرد الگوریتم) شناسایی می‌گردند که همان متغیرهای ورودی روش DSM می‌باشند. همچنین خروجی مقدار تابع هدف مسئله می‌باشد.

گام ۲: محاسبه مقادیر متغیرها

مقادیر ورودی‌ها و مقدارتابع هدف متناظر با آن برای الگوریتم فاخته مشابه با روش DSM تعیین می‌گردند (جداول ۳ و ۴).

گام ۳: ساخت رویه RSM

به منظور پیاده‌سازی روش RSM برای داده‌های گام ۲، رویه سطح پاسخ با توجه به مقادیر ورودی‌ها برای خروجی مقدار تابع هدف ایجاد می‌شوند. به صورت مشابه رویه پاسخ

مقدار تابع هدف برای توابع اکلی و راستریگین مطابق روابط ۱۳ و ۱۶ می‌باشد.

گام ۴: بهینه‌سازی رویه پاسخ

به منظور تعیین پارامترهای ورودی، رویه پاسخ مقدار تابع هدف (روابط ۱۳ و ۱۶) در نظر گرفته شده و محدودیت‌های مربوط به کران پارامترها لحاظ می‌گردند. در نهایت مدل ریاضی تنظیم پارامتر مربوط به توابع آکلی و راستریگین به ترتیب بصورت روابط ۱۹ و ۲۰ می‌باشد. این مدل‌ها با نرم افزار لینگو بهینه‌سازی می‌شوند و مقادیر بهینه به‌دست آمده برای هر دو تابع مطابق جدول ۱۵ می‌باشد.

$$y_1 = 2.87342 + 0.000230282\,x_1 + 0.00919271\,x_2 + 0.00825863\,x_3 + 0.00982920\,x_4 + 7.13368E-06\,x_5 + 1.82222E-05\,x_1\,x_2 - 4.05556E-05\,x_1\,x_3 - 1.10617E-05\,x_1\,x_4 + 7.80556E-08\,x_1\,x_5 - 2.75000E-04\,x_2\,x_3 - 0.00159722\,x_2\,x_4 + 2.18750E-06\,x_2\,x_5 + 0.000227778\,x_3\,x_4 - 4.23437E-06\,x_3\,x_5 + 3.33333E-07\,x_4\,x_5$$

S.t.

$$5 \le x1 \le 20$$
$$2 \le x2 \le 4$$
$$3 \le x3 \le 5$$
$$2 \le x4 \le 5$$
$$10 \le x5 \le 50$$

(۱۹)

$$y_1 = 38.5052 + 0.0296916\,x_1 + 8.45343\,x_2 + 3.47633\,x_3 + 3.01223\,x_4 - 0.0229248\,x_5 - 0.0188956\,x_1\,x_2 + 0.00478616\,x_1\,x_3 + 0.00731104\,x_1\,x_4 - 1.03883E-04\,x_1\,x_5 - 0.288790\,x_2\,x_3 - 0.487949\,x_2\,x_4 + 0.00295977\,x_2\,x_5 - 0.315704\,x_3\,x_4 - 2.05134E-04\,x_3\,x_5 + 0.00231603\,x_4\,x_5$$

S.t.

$$5 \le x1 \le 20$$
$$2 \le x2 \le 4$$
$$3 \le x3 \le 5$$
$$2 \le x4 \le 5$$
$$10 \le x5 \le 50$$

(۲۰)

جدول ۱۵- مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم با روش نجفی و بهنود

ورودی‌ها	متغیرهای مستقل	تابع اکلی	تابع راستریگین
تعداد فاخته اولیه	$X_۱$	۲۰	۵
کم ترین تخم‌ها	$X_۲$	۲	۲
بیش ترین تخم‌ها	$X_۳$	۳	۳
تعداد خوشه‌ها	$X_٤$	۲	۲
حداکثر تعداد فاخته	$X_٥$	۵۰	۵۰

جدول ۱۶- مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ

خروجی‌ها	متغیرهای پاسخ	تابع اکلی	تابع راستریگین
تابع هدف مسئله	$y_۱$	۲,۶۵۷	۶۵,۷۱
زمان حل	$y_۲$	۱,۹۱	۲,۳۸
تعداد تکرار	$y_۳$	۱۴,۱۰	۲۴,۹

مقادیر بهینه به دست آمده برای پارامترهای الگوریتم فاخته در رویه‌های پاسخ جایگذاری می‌شوند و مقدار پاسخ‌ها طبق جدول ۱۶ محاسبه می‌گردند.

گام ۵: مقایسه نتایج

در این مرحله با استفاده از متغیرهای ورودی به دست آمده در گام ۴، الگوریتم فاخته برای هر دو تابع اکلی و راستریگین، به کمک نرم افزار متلب، ۱۰ مرتبه اجرا می‌شود و میانگین متغیرهای پاسخ به دست آمده (عددی) جهت مقایسه با متغیرهای پاسخ به دست آمده در گام ۴ (تحلیلی)، محاسبه می‌شود. به منظور سهولت در مقایسه ، مقدار قدرمطلق تفاضل پاسخ‌ها به صورت جداول ۱۷ و ۱۸ محاسبه شده است. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می-گردد که روش نجفی و بهنود اختلاف زیادی از نظر عددی و تحلیلی دارند، در حالی که در روش پیشنهادی مقاله این اختلاف ناچیز بود.

جدول ۱۷- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی تابع اکلی

خروجی‌ها	متغیر پاسخ	روش مقاله	اجرا الگوریتم	قدرمطلق تفاضل
تابع مسئله	۱y	۲,۶۵۷	۲,۹۶	۰,۳۰۳
زمان حل	۲y	۱۹,۱	۱,۳۶	۱۷,۷۴
تعداد تکرار	۳y	۱۴	۱۷	۳

جدول ۱۸- مقایسه نتایج عددی و تحلیلی تابع راستریگین

خروجی‌ها	متغیر پاسخ	روش مقاله	اجرا الگوریتم	قدر مطلق تفاضل
تابع مسئله	۱y	۶۵,۷۱	۸,۱۴۵۶	۵۷,۵۶
زمان حل	۲y	۲,۳۸	۱,۰۴	۱,۳۴
تعداد تکرار	۳y	۲۵	۳۴	۹

۶- مقایسه روش DSM و روش پیشنهادی نجفی و بهنود (اعتبارسنجی ۳)

به منظور مقایسه روش پیشنهادی DSM با روش پیشنهادی نجفی و بهنود، کارایی پیکربندی بهینه حاصله از روش DSM با کارایی پیکربندی روش نجفی و بهنود مقایسه می‌گردند (جدول ۱۹). به منظور مقایسه بهتر دو روش به مدل تحلیل پوششی اجازه میدهیم مقدار کارایی بیش از یک را داشته باشد.

جدول۱۹- مقایسه مقادیر کارایی پیکربندی حاصل از روش‌ها

روش	کارایی تابع اکلی	کارایی تابع راستریگین
DSM	۴۵,۳۷۷۹	۴۶,۸۶۴۹
نجفی و بهنود	۳,۶۴۴۹۲	۲,۱۳۶۴۵

با توجه به جدول ۱۹ مشاهده می‌گردد که پیکربندی ایجاد شده از روش DSM در هر دو تابع اکلی و راستریگین ازمقدار کارایی بیشتری نسبت به روش نجفی و بهنود برخوردار می‌باشد و این نشانگر برتری روش DSM است. با توجه به اهمیت مبحث انتخاب پارامتر، می‌توان از رویکرد پیشنهادی در مسائل مختلفی از جمله زمانبندی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات [۳۱]، طراحی شبکه زنجیره تأمین [۳۲]، مسیریابی وسایل نقلیه [۳۳] و غیره استفاده کرد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با ترکیب دو روش رویه پاسخ و تحلیل پوششی داده‌ها روش ترکیبی DSM ارائه گردید. یکی از مزایای روش DSM کاهش تعداد رویه‌های سطح پاسخ به یک رویه کارایی می‌باشد و به جای بهینه‌سازی چندین رویه سطح پاسخ برای خروجی‌های مسئله تنها بهینه‌سازی رویه کارایی بررسی می‌گردد. همچنین علاوه بر بهینه‌سازی مسئله، به بهینه‌سازی کارایی به صورت هم‌زمان پرداخته می‌شود. در این مقاله از روش ترکیبی DSM جهت تنظیم پارامترهای بهینه الگوریتم فراابتکاری فاخته استفاده گردید. برای ارزیابی الگوریتم فاخته، توابع اکلی و راستریگین مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور اعتبارسنجی روش ترکیبی پیشنهادی، به بررسی و پیاده سازی روش نجفی و بهنود پرداخته شد و نتایج روش پیشنهادی با این روش مقایسه گردید که نتایج عددی نشان دهنده کارایی بالاتر الگوریتم پیشنهادی ترکیبی DSM می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت که با تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری به‌صورت علمی، می‌توان از خطاهای مربوط به روش آزمون و خطا جلوگیری کرد. به عنوان تحقیقات آتی می‌توان از روش DSM جهت تنظیم پارامتر سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نیز استفاده کرد و با اختصاص مقادیر مناسب به پارامترهای مؤثر در الگوریتم‌ها بتوان به یک راه حل مناسب و قابل قبول در کمترین زمان و با کمترین خطا و اطمینان بالا دست یافت.

منابع

[۱] حوریا حاجیان و مسعود یقینی، "مروری بر روش‌های تنظیم و کنترل پارامترهای الگوریتم‌های بهینه‌سازی"، کنفرانس بین المللی چالش‌های مهندسی، تکنولوژی و علوم کاربردی، اسفند، دبی، ۱۳۹۶.

[2] S.E. Najafi, and R. Behnoud, “Consolidated Technique of Response Surface Methodology and Data Envelopment Analysis for setting the parameters of meta-heuristic algorithms - Case study: Production Scheduling Problem”, International Journal of Data Envelopment Analysis, Vol.3, No.1, 2015, pp. 363 – 367.

[3] A. Kazikova, M. Pluhacek, and R. Senkerik, “Why Tuning the Control Parameters of Metaheuristic Algorithms Is So Important for Fair Comparison?” MENDEL. Vol.26, No.2, 2020, pp.9-16.

[4] B. W. Cheng, and C. L. Chang, “A Study on Flowshop Scheduling Problem Combining Taguchi Experimental Design and Genetic Algorithm”, Expert Systems with Applications, Vol. 32, No. 2, 2007, pp. 415-421.

[5] B. Naderi, M. Zandieh, and V. Roshanaei, “Scheduling Hybrid Flowshops with Sequence Dependent Setup Times to Minimize Makespan and Maximum Tardiness”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 41, No. 11, 2009, pp. 1186-1198.

[6] T. Bartz-Beielstein, and S, Markon. “Tuning search algorithms for real-world applications: A regression tree based approach", Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, Jun 19, Vol. 1, 2004, pp. 1111-1118.

[7] E. Ridge, and D. Kudenko, "Analyzing heuristic performance with response surface models: prediction, optimization and robustness", Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation, 2007, pp. 150-157.

[8] M. Fallahia, S. Amiri, and M. Yaghinic, “A Parameter Tuning Methodology for Metaheuristics Based on Design of Experiments”, International Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, No. 6, 2014, pp. 497-521.

[9] A. Saremi, T. ElMekkawy, and G. Wang, “Tuning the parameters of a memetic algorithm to solve vehicle routing problem with backhauls using design of experiments”, International Journal of Operations Research, Vol. 4, 2007, pp. 206-219.

[10] J. Xu, S. Y. Chiu, and F. Glover, “Fine-tuning a Tabu Search Algorithm with Statistical Tests”, International Transactions in Operational Research, Vol. 5, No. 3, 1998, pp. 233-24.

[11] T. Beielstein, K. E. Parsopoulos, and M. N. Vrahatis, “Tuning PSO parameters through sensitivity analysis”, Universitätsbibliothek Dortmund; Jan, 2002.

[12] E. Ridge, “Design of experiments for the tuning of optimisation algorithms”, University of York, Department of Computer Science, 2007.

[13] J. Silc, K. Taskova, and P. Korosec, “Data Mining-Assisted Parameter Tuning of a Search Algorithm. Informatica”, Vol. 39, No. 2, 2015, pp. 169.

[14] N. Veček, M. Mernik, B. Filipič, and M. Črepinšek, "Parameter tuning with Chess Rating System (CRS-Tuning) for meta-heuristic algorithms", Information Sciences, Vol. 372, 2016, pp. 446-469.

[15] T. Saeheaw, “Parameter tuning of the HCSCROCFO-3Opt algorithm for solving the capacitated vehicle routing problem”, International Journal of Industrial Engineering Computations, Vol. 11, No.4, 2020, pp.481-490.

[16] J. B. Odili, and J. O. Fatokun, "The Mathematical Model, Implementation and the Parameter-Tuning of the African Buffalo Optimization Algorithm." International Conference in Mathematics, Computer Engineering and Computer Science (ICMCECS), Ayobo, Nigeria, 2020, pp. 1-8.

[17] G. F. Gomes, and F. A. de Almeida, “Tuning metaheuristic algorithms using mixture design: Application of sunflower optimization for structural damage identification”, Advances in Engineering Software, Vol.149, 2020.

[18] S. K. Joshi, and J. C. Bansal, “Parameter tuning for meta-heuristics”, Knowledge-Based Systems, Vol.189, 2020.

[19] K. Hinkelmann, and O. Kempthorne, “Design and analysis of experiments”, New York: Wiley; 1994.

[20] T. Y. Wang, and K. B. Wu, “A Parameter Set Design Procedure for the Simulated Annealing Algorithm under the Computational Time Constraint”, Computers and Operations Research, Vol. 26, No. 7, 1999, pp. 665-678.

[21] E. Shadkam, and M. Bijari, “The Optimization of Bank Branches Efficiency by Means of Response Surface Method and Data Envelopment Analysis: A Case of Iran”, Journal of Asian Finance, Economics and Business, Vol. 2, 2015, pp. 13-18.

[22] R. Rajabioun, “Cuckoo Optimization Algorithm”, Applied Soft Computing journal, Vol. 11, 2011, pp. 5508-5518.

[23] E. Shadkam, and M. Bijari, “A Novel Improved Cuckoo optimization algorithm for engineering optimization”, International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing, Vol. 7, 2020, pp. 164-177.

[24] E. Shadkam, and M. Bijari, “Evaluation the Efficiency of CuckooOptimization Algorithm”, International Journal on Computational Sciences and Applications (IJCSA), Vol. 4, 2014, pp. 39-47.

[25] A. Akbarzadeh, and E. Shadkam, “The study of Cuckoo optimization algorithm for production planning problem”, International Journal of Computer-Aided technologies, Vol. 2, 2015, pp. 1-10.

[26] E. Shadkam, R. Delavari, F. Memariani, and M. Poursaleh, “Portfolio selection by the means of Cuckoo optimization algorithm”, International Journal on Computational Sciences and Applications (IJCSA), Vol. 5, 2015, pp. 1-1.

[27] E. Shadkam, and M. Bijari, “Multi-objective simulation optimization for selection and determination of order quantity in supplier selection problem under uncertainty and quality criteria”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 1, 2015, pp. 1-13.

[28] M. Gorjestani, E. Shadkam, M. Parvizi, and S. Aminzadegan, “A hybrid COA-DEA method for solving multi-objective problem”, International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA), Vol. 5, 2015, pp. 1-10.

[29] M. Parvizi, E. Shadkam, and N. Jahani, “A hybrid coa/ε-constraint method for solving multi-objective problems”, International Journal in Foundations of Computer Science and Technology (IJFCST), Vol. 5, 2015, pp. 27-40.

[30] Z. Borhanifar, and E. Shadkam, “The new hybrid coaw method for solving multi-objective problems”, International Journal in Foundations of Computer Science and Technology (IJFCST), Vol. 5, 2015, pp. 15-22.

[۳۱] عابد حسام، سعید امامی و رمضان نعمتی کشتلی، "زمانبندی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در محیط ماشین‌های موازی نامرتبط" نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۷- ۲۳۳.

[۳۲] جلال رضایی نور، فهیمه یزدیان و محسن عاقلان، "طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چهار سطحی با رویکرد یکپارچه سازی تصمیمات اقتصادی، زیست محیطی و مسئولیت اجتماعی در قبال کارمندان"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۹۲- ۶۹.

[۳۳] عرفان بابایی تیرکلایی، ایرج مهدوی و میر مهدی سید ا صفهانی، "حل م سئله م سیریابی و سایل نقلیه با در نظر گرفتن سفرهای چندگانه و پنجره‌های زمانی در مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۱۰- ۹۳.