

کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه و بهینه‌سازی اجتماع ذرات در بهره‌برداری بهینه از منابع آب در کشاورزی

محمدامین زارعی*^۱، رضا لاله‌زاری^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی
^۲ پژوهشگر پسادکتر پژوهشگاه دانشگاه تهران، دانشگاه تهران

دریافت: ۱۳۹۴/۵/۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۵/۲۶

چکیده

تخصیص نامناسب آب بین مصرف‌کننده‌های مختلف از مشکلات اصلی برنامه‌ریزی در بخش منابع آب است. تدوین برنامه تخصیص آب یک مسئله پیچیده، چندمتغیره و دارای محدودیت‌های متنوع است؛ بنابراین حل این‌گونه مسائل نیازمند استفاده از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی است. روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک با محدودیت‌هایی از جمله، قرار گرفتن در نقاط بهینه محلی و عدم توانایی در پشتیبانی از متغیرهای مختلف مواجه می‌باشند. در این پژوهش دو روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات، PSO (Particle Swarm Optimization) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب NSGAI (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) توسعه یافته و کارایی آن‌ها در بهینه‌سازی مسائل بهره‌برداری از منابع آب مقایسه شده است. با توجه به ضرورت دقت برنامه‌ریزی چندهدفه، دو مدل تک‌هدفه به صورت جداگانه با استفاده از روش PSO برای صحت‌سنجی نتایج NSGAI توسعه داده شد. مقایسه بین الگوریتم‌های NSGAI و PSO در نقاط انتهایی توابع هدف انجام شد. نتایج نشان داد مقدار پاسخ ایده‌آل روش NSGAI در نسبت سود به هزینه نسبت به روش PSO برتری دارد. استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه با برقراری تعادل بین اهداف توانست به جواب بهینه معادل ۰/۴ تا ۰/۶۸ افزایش در کارایی مصرف آب بهینه در گیاهان الگوی کشت دشت بوشهر دست یابد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت منابع آب، جبهه پارتو، رتبه‌بندی نامغلوب، بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص آب.

۱- مقدمه

تصمیم داشته باشند، برنامه‌ریزی غیرخطی محسوب می‌شود. بدین‌جهت در کنار روش‌های برنامه‌ریزی خطی (LP)^۱، روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)^۲ و برنامه‌ریزی پویا (DP)^۳ نیز به صورت گسترده به کار گرفته شده‌اند (Azamathulla و همکاران، ۲۰۰۸).

دسته دیگری از روش‌های نوین بهینه‌سازی که به روش‌های فرااکتشافی یا هوشمند نیز موسوم‌اند از یک نقطه تصادفی آغاز و نقاط جدیدتر را در فضای جستجو با به‌کارگیری عملگرهایی بر روی نقاط فعلی و حرکت به سمت فضاهای بهینه ایجاد می‌کنند. این روش‌ها در تصمیم‌گیری برای انتخاب جهت و نرخ حرکت باهم تفاوت دارند. الگوریتم‌های فرااکتشافی نیاز به مشتق‌گیری از توابع نداشته و عموماً نمادی از فرآیندهایی هستند که در طبیعت برای بهینه‌سازی پدیده‌های طبیعی صورت می‌گیرند. نمونه‌های فراگیر

از دهه ۱۹۶۰ برنامه‌ریزی خطی با حداکثر یا حداقل کردن تابع هدف و در نظر گرفتن تعدادی از محدودیت‌ها (منابع) و متغیرهای تصمیم (فعالیت‌ها) مهم‌ترین ابزار بهینه‌سازی بوده است. این تکنیک کاربرد گسترده‌ای در طراحی و اجرای مخازن آب داشته و مدل‌های گوناگونی را برای شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و مدیریت آن ارائه کرده است (Yeh، ۱۹۸۵، Labadie، ۲۰۰۴).

در برنامه‌ریزی خطی روابط بین متغیرها باید کاملاً متناسب و مستقیم باشد. به عبارتی تابع هدف و توابع قید توابعی خطی از متغیرهای مسئله هستند (Dai و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از ویژگی‌ها و مزیت‌های مهم این روش این است که یک جواب کمینه یا بیشینه موضعی همواره یک جواب سرتاسری تلقی می‌شود. در مقابل اگر تابع هدف و توابع قیدها رابطه‌ای غیرخطی با متغیرهای

3. Dynamic Programming

1. Linear Programming
2. Nonlinear Programming

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۰۹۱۷۶۸۷۳۳۶۳

آدرس ایمیل: mohammadaminzare@gmail.com (م. ا. زارعی)، reza.lalezari@ut.ac.ir (ر. لاله‌زاری).

r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه [0 1] با توزیع یکنواخت می‌باشند (Lalehzari و همکاران ۲۰۱۶). انتخاب مقادیر مناسب برای c_1 و c_2 منجر به تسریع الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در نقاط بهینه محلی می‌شود. الگوریتم اجتماع ذرات به‌عنوان یکی از روش‌های هوشمند فرااکتشافی در مطالعات زیادی پایه و ابزار اصلی محاسبات تخصیص بهینه آب و زمین بوده و دقت و صحت آن با سایر روش‌های بهینه‌سازی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است (Lalehzari و همکاران ۲۰۲۰).

مقدسی و همکاران (۱۳۸۷) روش‌های بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی (NPL)، بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) در مدیریت تخصیص آب در شرایط خشک‌سالی را با هدف بهینه‌سازی درآمد مورد مقایسه قرار دادند. مدل‌سازی در چهار سطح سد چادگان، شبکه، محصولات و دور آبیاری در اصفهان و بین سال‌های ۷۸ تا ۸۰ انجام گرفت. بعد از آنالیز حساسیت و تکرارهای متعدد، جمعیت ۸۰۰، تعداد تکرار ۳۰۰۰، احتمال تلفیق ۰/۳۵ و احتمال جهش ۰/۰۱ به دست آمد. مقایسه عملکرد محاسباتی سه روش نشان می‌دهد روش GA بسیار کند بوده و با سعی و خطای زیاد به ضرایب احتمال وقوع عملگرها می‌رسد و به‌شدت به جمعیت اولیه حساس است. در مجموع NPL روش برگزیده و پس از آن PSO بهترین عملکرد را داشته و برنامه تخصیص آن‌ها بیش‌ترین درآمد را ارائه داده است. تابع هدف در مورد این رویکرد از برنامه‌ریزی امکان افزایش ۳۶ درصدی درآمد را نسبت به مدیریت سنتی نشان می‌دهد.

خاشعی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش فرااکتشافی و هوشمند PSO مقدار بهینه سطح زیر کشت محصولات در دشت نیشابور را در شرایط هیدرولوژیکی مختلف تعیین کرده و در نتیجه توانستند نوسانات سطح ایستابی حاصل از آن را برآورد نمایند. نتایج مدل نشان داد می‌توان با کاهش ۳۰ درصدی سطح زیر کشت اغلب محصولات بهاره و افزایش ۳۰ درصدی سطح زیر کشت گندم، جو و کلزا بیش‌ترین درآمد را از آب استحصال آبخوان کسب نمود. ذرت و گوجه‌فرنگی بیش‌ترین سهم را در بین محصولات بهاره در افزایش سطح داشت. همچنین، با افزایش ۲۰۵۹۱ هکتار به محصولات پاییزه و کاهش ۱۰۹۷۰ هکتار از محصولات بهاره می‌توان به‌طور متوسط ۷/۵ میلیون ریال در هکتار افزایش درآمد داشت. در صورت بروز خشک‌سالی در دشت می‌توان با کاهش ۳۰ درصدی کشت گندم و جو و افزایش سطح زیر کشت کلزا، شرایط بیلان منفی آبخوان با شدت کنونی را حفظ کرد.

Lalehzari و Kerachian (۲۰۲۰a) مدلی با تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی و سیستم فازی برای تخصیص بهینه آب در بخش کشاورزی ارائه کردند. آب استحصال شده توسط بارندگی به دلیل تحمیل هیدرولوژیکی به‌صورت کامل و آب زیرزمینی با توجه به

الگوریتم‌های هوشمند عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی فرآیند تبرید، بهینه‌سازی اجتماع ذرات، بهینه‌سازی کلونی مورچگان، بالا رفتن از کوه و الگوریتم مونت‌کارلو^۴ می‌باشند. علی‌رغم مزیت‌های فراوان این تکنیک‌ها مانند سرعت در یافتن نقاط بیشینه یا کمینه، برخی معایب از جمله عدم توانایی در یافتن جواب بهینه سرتاسری در برخی از آن‌ها یافت می‌شود.

۱-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک اقتباس هوشمندانه از دانش ژنتیک برای حل مسائل پیچیده در یک گسترده وسیع از مسائل بهینه‌سازی است (Goldberg, ۱۹۸۹). در فرایند جستجو تعداد زیادی از پاسخ‌های احتمالی وجود دارد که باید یک یا چند پاسخ از بین آن‌ها انتخاب شود. روش انتخاب باید تا حد ممکن بین سرعت و دقت تعادل برقرار کند. فضای انتخاب در حقیقت مجموعه پاسخ‌های احتمالی است. عملگرهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک عبارت‌اند از: انتخاب، دورگه‌گیری^۵، جهش و وراثت. عملگرهای چهارگانه در هر مرحله که یک نسل گفته می‌شود با استفاده از ژن‌های موجود، ژن‌های جدیدی ایجاد می‌کنند. جواب نهایی با تکرار و قیود اعمال شده به مدل محاسبه می‌شود و بهترین مقدار تابع هدف است (Anwar و Haq, ۲۰۱۳).

۱-۲- الگوریتم اجتماع ذرات

این الگوریتم الهام گرفته شده از رفتارهای اجتماعی برخی گروه‌های دسته‌جمعی مثل پرندگان و ماهی‌ها است. اساس این الگوریتم در این است که هرگونه کنش و واکنش در حرکت گروه تأثیر گذاشته و متعاقباً هر یک از اعضای مجموعه، می‌توانند از اکتشافات و مهارت‌های سایر اعضای گروه بهره‌مند گردند. تفاوت اساسی این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این است که هر ذره علاوه بر داشتن بردار حرکت دارای یک بردار سرعت نیز است که اعضای مجموعه را به تغییر موقعیت در فضای جستجو وادار می‌کند (Shi و Eberhart, ۱۹۹۹). رابطه الگوریتم اجتماع ذرات به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$A_{id}^{n+1} = \chi \left(\omega v_{id}^n + c_1 r_1^n (P_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_{id}^n (P_{pg}^n - x_{id}^n) \right) \quad (1)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (2)$$

که در آن، P بهترین موقعیتی است که یک ذره تاکنون به آن رسیده و P_g بهترین موقعیتی است که بهترین ذره در همسایگی آن ذره تاکنون به آن رسیده است، χ ضریب انقباض؛ ω وزن اینرسی، n ، شماره تکرارها؛ c_1 و c_2 ، ضرایب اجتماعی و شناختی و

اول مورد بررسی کارایی نسبی مصرف آب خواهد بود که توسط رابطه ذیل تعریف می‌گردد.

$$RE = \frac{\sum_{t=1}^n k_{ct} ETO_t}{\sum_{t=1}^n R_t + x_{ws}} \prod_{s=1}^4 \left(\left(1 - Ky_s \left(1 - \frac{R_{ts} + x_{ws}}{k_{ct} ETO_t} \right) \right) \right) \quad (3)$$

که RE ، کارایی مصرف آب نسبی؛ R_t بارندگی در دوره t (میلی-متر)؛ x_{ws} متغیر تصمیم‌گیری (آب تخصیص‌یافته (میلی-متر))؛ ETO تبخیر و تعرق بیشینه، k_c ضریب گیاهی در هر دوره تنش t و n تعداد دوره‌های شبیه‌سازی است. توابع تولید و هزینه محصولات در گذشته به صورت جداگانه و تنها تابع میزان آب مصرفی بدون لحاظ کردن ارزش فرعی محصولات، هزینه‌های ثابت و متغیر، نوع سیستم آبیاری و تلفات آن بوده است. رابطه (۴) وابستگی بین پارامترهای تولید را به صورت نسبت بدون بعد درآمد ناخالص (B) و هزینه (C) نشان می‌دهد.

$$\frac{B_p}{C_p} = \frac{\left(\sum_{IS=1}^{MS} (MY_p RY_p)_{IS} \right) YB_p + \varphi_p}{\sum_{IS=1}^{MS} (S_{IS} (CC_{IS} + 10E_{IS} CW_{IS} \sum_{s=1}^4 x_{ws}))} \quad (4)$$

در این معادله MY و RY به ترتیب حداکثر عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و عملکرد نسبی برای محصول p به ازای کاربرد هر سیستم آبیاری، YB قیمت فروش محصول (ریال بر کیلوگرم) و φ ارزش محصول فرعی (ریال در هکتار) می‌باشند. که درصدی از زمین که تحت پوشش سیستم آبیاری IS قرار دارد، CC و CW به ترتیب هزینه ثابت کشت و سیستم آبیاری (ریال در هکتار) و آب‌بها (ریال بر مترمکعب)، E ، تلفات انتقال و توزیع برای هر سیستم آبیاری و x_w نیاز آبی تأمین شده (متغیر تصمیم اول) در گام‌های زمانی برای دوره رشد s است. معادلات (۳) و (۴) بدون بعد بوده و در تحلیل، ترسیم و مقایسه نتایج کارایی مطلوب‌تری خواهند داشت. محدودیت‌های حاکم بر سیستم توسعه‌یافته در این مطالعه به صورت خلاصه عبارت‌اند از:

الف) رعایت حدود مجاز برداشت از آب زیرزمینی، تأمین مصارف شهری و صنعتی، بررسی امکان ذخیره یا عدم ذخیره آب در یک زمان یا مکان مشخص، تغییرات میزان بارندگی در زمان و مکان، تفاوت برنامه توزیع آب و نیاز آبی از سه بخش بارندگی مؤثر، آب سطحی و پمپاژ آب زیرزمینی تأمین می‌شود. جریان‌های سطحی و آب باران در شرایط عدم وجود سازه‌های ذخیره آب مانند سد، آب‌بند یا استخر باید در هر دوره به صورت مستقیم به منابع مصرف تخصیص یابد. با توجه به امکان یا عدم امکان ذخیره‌سازی در هر مقطع زمانی یا مکانی محدوده حجم آب سطحی در دسترس برای هر دوره شبیه‌سازی قابل تفکیک و برآورد است. همچنین در صورت عدم تأمین نیاز آبی الگوی کشت توسط بارندگی و سپس آب سطحی، برداشت از آبخوان اولویت بعدی تخصیص محسوب می‌شود.

تحلیل اقتصادی و توابع هدف عملکرد محصول تخصیص یافت. در مدل توسعه‌یافته، بیشینه‌سازی تابع هدف در چارچوب محدودیت‌های جمله تولید، سطح زیر کشت، عملکرد و درآمد حاصله از محصول انجام شد. با توجه به نتایج تحقیق، می‌توان برداشت از آب زیرزمینی را با حفظ شاخص‌های الگوریتم اجتماع ذرات نیز در طرح‌های مختلف آب و فاضلاب با موفقیت مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است. بهینه‌سازی شبکه‌های آب‌رسانی و جمع‌آوری فاضلاب، استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن سدها، پیش‌بینی تراز سطح ایستابی و حجم رواناب و پیدا کردن بهترین ابعاد سرریزها از کاربردهای این شیوه در گذشته بوده است. روش PSO در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچه با کاهش تعداد ارزیابی تابع هدف و تلاش محاسباتی کمتر توانایی بالاتری در همگرا شدن به جواب بهینه نشان داده است.

اخیراً روش NSGAII در بهینه‌سازی برداشت آب از منابع زیرزمینی و تخصیص آن الگوی کشت دشت شهرکرد (Lalehzari و ۲۰۲۰b Kerachian) و دشت باغملک (Lalehzari و همکاران ۲۰۱۶) مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعات دوره‌های زمانی به ترتیب ۱۰ روزه و یک‌روزه برای تعیین برنامه برداشت از آب زیرزمینی مدنظر بوده است.

در مطالعه پیش‌رو الگوی تخصیص آب از منابع آب زیرزمینی و بارندگی به اراضی زراعی دشت بوشهر برنامه‌ریزی شده و قابلیت مدل چندهدفه الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب (NSGAII) و روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) در این موضوع بررسی شده است. در مطالعات گذشته کاربرد این روش‌ها با اهداف مدیریت برداشت از آب زیرزمینی مطرح بوده است، اما در این تحقیق اهداف موردنظر در توزیع آب آبیاری برای افزایش راندمان کاربرد و درآمد الگوی کشت ارزیابی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساختار مدل تخصیص آب

مدل تخصیص آب با دو هدف متضاد بیشینه‌سازی نسبت درآمد به هزینه و کمینه‌سازی نسبت آب دریافتی به کل آب موردنیاز به عنوان توابع هدف برنامه‌ریزی شد. از طرفی متغیرهای تصمیم مسئله آب اختصاص‌یافته به اراضی در هر دوره ده روزه از سال در نظر گرفته شد.

یکی از مسائل موردتوجه در تخصیص منابع آب در کشاورزی، شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی است که بر اساس دستورالعمل نشریه شماره ۳۳ سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد انجام گرفته است. مطالعات گوناگونی با استفاده از این رابطه که بر پایه نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل و ضریب حساسیت گیاهی استوار می‌باشد انجام گرفته است. بنابراین هدف

۲-۲- محدود مطالعه

مطالعه موردی مدل توسعه‌یافته در الگوی کشت دشت بوشهر مرکز استان بوشهر از مناطق گرمسیر و جنوبی با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی انجام گرفت. مشخصات الگوی کشت در نظر گرفته‌شده در این محدوده در جدول (۱) خلاصه شده است.

مدل توسعه‌یافته برای ورود به ابزار بهینه‌سازی چندهدفه از اصل غلبگی و معیار فاصله جمعیتی استفاده کرده و شایستگی هر عضو از جمعیت برای قرار گرفتن در رتبه‌های بالاتر بر این اساس سنجیده شد. محدودیت‌های اعمال‌شده به مدل برای تعریف مسئله در جدول (۱) خلاصه شده است.

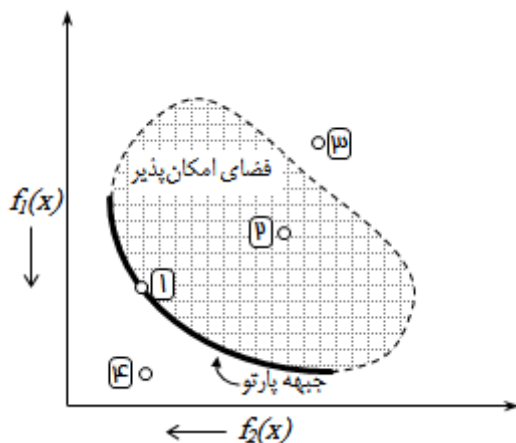
(ب) رقابت محصولات برای زمین با رعایت به صورت گروه‌بندی شده انجام می‌گیرد، جداسازی کاربری اراضی آبی و دیم، رعایت حد بالا و پایین که قابلیت تخصیص دارند. تغییر کاربری براساس کیفیت آب، نیاز آبی و شرایط اقتصادی، جلوگیری از تغییر ناگهانی در الگوی کشت و ...

(ج) جلوگیری از تنش در مراحل حساس رشد، لحاظ نمودن نوع سیستم انتقال و توزیع آب بر برنامه‌ریزی از طریق هزینه اجراء تلفات آب و راندمان کاربرد.

(د) دستیابی به حداقل سود قابل انتظار از هر محصول به صورت جداگانه، تأمین کردن نیاز بازار، در نظر گرفتن تغییر قیمت‌ها در طول سال و در سال‌های مختلف.

جدول ۱- مشخصات الگوی کشت مورد مطالعه در دشت بوشهر در سال آبی ۹۹-۱۳۹۸

محصول	سطح کشت (هکتار)	عملکرد بیشینه (کیلوگرم در هکتار)	قیمت فروش (هزارریال در کیلوگرم)	هزینه (میلیون ریال در هکتار)	نیاز آبی (میلی‌متر)
گندم	۵۷	۳۶۰۰	۲۸۰۰۰	۶۵	۵۶۵
جو	۲۳	۲۹۵۰	۲۲۰۰۰	۵۴	۵۲۸
کلزا	۱۷	۱۴۵۰	۴۳۰۰۰	۷۶	۸۷۰
عدس	۳	۱۳۵۰	۸۵۰۰۰	۸۷	۴۸۴
گوجه‌فرنگی	۴	۲۳۰۰۰	۱۶۵۰۰	۱۱۳	۱۱۱۴
پیاز	۲	۲۱۵۰۰	۲۱۰۰۰	۱۰۹	۹۸۳
خیار	۱	۱۸۰۰۰	۲۴۰۰۰	۱۱۲	۹۱۴



شکل ۱- موقعیت جواب‌های مسئله نسبت به فضای امکان پذیر

کد کامپیوتری الگوریتم بهینه‌سازی مذکور در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB نوشته و اجرا شد. برای رسیدن به کد بهینه‌ساز برنامه مدل ریاضی تدوین شده در محیط برنامه اجرا و سپس فرایند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با توسعه کد کامپیوتری آن به دست می‌آید. ساختار الگوریتم مورد استفاده تا رسیدن به جواب بهینه در ادامه تشریح شده است.

۲-۳- مفهوم غلبگی

در یک الگوریتم جمعیت‌گرا با n هدف در فرایند کمینه‌سازی، پاسخ p بر q غلبه می‌کند اگر هم‌زمان دو شرط زیر برقرار باشد:

$$p \leq q \begin{cases} \forall n = 1, 2, \dots, N & f_n(p) \leq f_n(q) \\ \exists n = 1, 2, \dots, N & f_n(p) < f_n(q) \end{cases} \quad (5)$$

به عبارت دیگر پاسخ p در تمامی توابع هدف از پاسخ q بدتر نباشد و پاسخ p حداقل در یک تابع هدف اکیداً بهتر از پاسخ q باشد. در نتیجه کلیه جواب‌هایی که توسط سایر نقاط مغلوب نمی‌شوند، نامغلوب به‌شمار می‌روند. در جبهه پارتو^۷ بهبود هر یک از اهداف تنها با بدتر شدن حداقل یکی از اهداف دیگر امکان‌پذیر است. شکل (۱) نمایی فرضی از فضای امکان‌پذیر و جبهه پارتو را با دو هدف کمینه‌سازی نشان می‌دهد.

مطابق شکل، نقطه (۱) یکی از پاسخ‌های نامغلوب و بهینه و نقطه (۲) یک پاسخ امکان‌پذیر ولی مغلوب است. نقاط (۳) و (۴) در خارج از فضای تصمیم قرار گرفته‌اند و با وجود این که نقطه (۴) در شرایط بهتر بهینگی قرار دارد اما قابل قبول محسوب نمی‌شود.

۴-۲- اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب

در این روش h امین تابع هدف بهینه می‌شود در حالی که $k-1$ هدف باقی‌مانده بخشی از محدودیت‌های مدل را تشکیل می‌دهند. بنابراین رابطه فوق را می‌توان به شکل ذیل بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} & \text{Max } Z_h(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ & \text{Subject to:} \\ & Z_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq b_1, \\ & \vdots \\ & Z_{h+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq b_{h+1}, \\ & X \in F, \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (۶)$$

که b_j محدودیت در نظر گرفته شده برای اهداف بهینه‌سازی است. برای حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه، روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن‌دهی، روش محدودیت، روش آرمانی و الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه به دلیل دارا بودن توانایی بالا در حل مسائل پیچیده و ارائه منحنی تبادل بهینه بین اهداف، استفاده شده است. این مدل‌ها به راحتی می‌توانند مسائلی که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌نمایند و فضای تصمیم موجه یکپارچه‌ای ندارند و یا توابع هدف آن‌ها دارای پارامترهای تصادفی هستند را حل نمایند.

مدل NSGA اولین بار در سال ۱۹۹۴ برای بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شد و در سال‌های بعد به شکل مدل NSGAII توسط Deb و همکاران (۲۰۰۲) با چندین اصلاح برای حل مسائل و مشکلات مدل الگوریتم ژنتیک کلاسیک پیشنهاد گردید. مشکلات عمده مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه پیشین عبارت‌اند از: حجم بالای محاسبات در هر تکرار که منجر به افزایش زمان اجرای مدل می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، مراحل اجرای این مدل بهینه‌سازی چندهدفه به صورت زیر است:

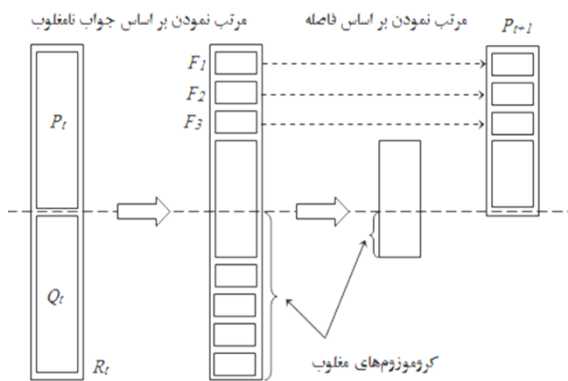
- تولید نسل والد تصادفی (P_0) به تعداد N ؛
- مرتب نمودن نسل اولیه والد بر اساس جواب‌های نامغلوب؛
- در نظر گرفتن رتبه‌ای متناسب با تراز نامغلوب برای هر جواب نامغلوب (۱ برای بهترین تراز، ۲ برای بهترین تراز بعد از ۱ و ...)
- تولید نسل فرزندان (Q_0) به تعداد N با استفاده از عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش؛
- با توجه به نسل اول تولیدشده مذکور که شامل کروموزوم‌های والد و فرزندان هستند، نسل جدید به صورت زیر تولید می‌شود:
- ترکیب کروموزوم‌های والد (P_t) و فرزندان (Q_t) و تولید نسلی (R_t) به تعداد $2N$ ؛
- مرتب نمودن نسل (R_t) بر اساس روش دسته‌بندی نامغلوب و شناسایی جبهه‌های نامغلوب (F_1, F_2, \dots, F_l)؛
- تولید نسل والد برای تکرار بعد (P_{t+1}) با استفاده از جبهه‌های نامغلوب تولیدشده به تعداد N . در این مرحله با توجه به تعداد کروموزوم‌های موردنیاز برای نسل والد (N)، ابتدا تعداد کروموزوم‌های اولین جبهه برای نسل والد انتخاب می‌شود و

در صورتی که این تعداد جوابگویی تعداد کل موردنیاز نسل والد نباشد، به ترتیب از جبهه‌های ۲؛ ۳ و ... برداشت می‌شود تا به میزان کل (N) دست یابد؛

- اعمال عملگرهای تزویج، جهش برای روی نسل والد جدید تولیدشده (P_{t+1}) و تولید نسل فرزندان (Q_{t+1}) به تعداد N ؛

- تکرار مرحله ۵ تا دستیابی به تعداد کل تکرارهای موردنظر.

جواب‌های دو تابع هدف موردبررسی به صورت شکل (۳) ترسیم و به اعضای حاضر در دسته یک رتبه نامغلوب نسبت به دو دسته دیگر داده می‌شود.



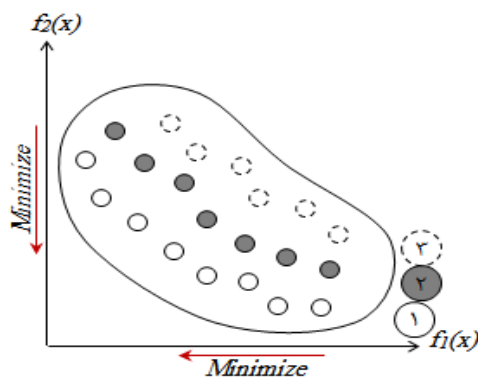
شکل ۲- ساختار مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

برای انتخاب هر تعداد جمعیت از بین اعضای رتبه‌بندی شده به ترتیب از جبهه‌های نامغلوب گزینش صورت می‌گیرد. در صورت تکمیل نشدن تعداد جمعیت اولیه در دسته اول از دسته‌های بعد به ترتیب برداشته خواهد شد. اعضای موجود در یک دسته از نظر کارایی مصرف آب و دارا بودن سود بالا باهم متفاوت بوده اما با در نظر گرفتن تلفیق دو هدف در یک جایگاه واقع هستند. گزینش اعضا در یک دسته با رتبه یکسان بر اساس پارامتر کنترلی فاصله جمعیت انجام می‌گیرد. این پارامتر اعضای هر گروه محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونه موردنظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته است. مقدار بزرگ فاصله جمعیت منجر به واگرایی و گستره بهتری در مجموعه اعضای جمعیت خواهد شد. رابطه (۷) محاسبه این پارامتر را با توجه به موقعیت نقاط در شکل (۴) نشان می‌دهد.

$$CD_i = \sum_{m=1}^2 \frac{OF_m(i+1) - OF_m(i-1)}{OF_m^{max} - OF_m^{min}} \quad (۷)$$

فلوچارت تولید فاصله جمعیت در شکل (۵) آمده است. مطابق طرح ارائه‌شده، ورودی الگوریتم اعضای رتبه‌بندی شده در جبهه‌های نامغلوب می‌باشند که در فلوچارت شکل (۳) تولید شده‌اند. این عملگر در قالب سلول‌های تولید فاصله جمعیتی الگوریتم اصلی عمل کرده و گزینش اعضای دارای پراکندگی بهینه‌تر (فاصله جمعیتی بزرگ‌تر) را در یک جبهه برعهده دارد.

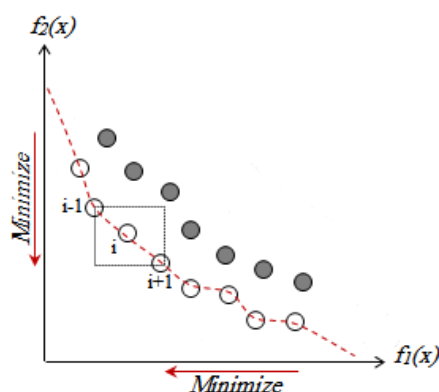
CD و O به ترتیب معادل فاصله جمعیتی و تابع هدف هر کدام از اعضای جمعیت در موقعیت اندیس‌های نشان داده شده‌اند. در مواردی که هر یک از اندیس‌های عبارات فوق، ذکر نشده است نشان‌دهنده حفظ آخرین مقدار بوده و عمدتاً خصوصیات هر عضو با شماره‌های جبهه، تابع هدف و رتبه آمده است؛ به عبارت دیگر شماره عضو در جبهه و رتبه آن از ضرایب اختصاصی هر عضو بوده و متناسب با نوع معادله یکی از این دو اندیس (شماره و رتبه) به کار گرفته می‌شود. خروجی این الگوریتم مقدار عددی فاصله جمعیتی برای تمام اعضای جمعیت رتبه‌بندی شده است.



شکل ۳- مرتب‌سازی جمعیت و گزینش اعضای نامغلوب

۳- نتایج و بحث

عملکرد برنامه نوشته‌شده در دو مرحله، ابتدا توسط توابع استاندارد ارزیابی شده در مرجع اصلی (Deb و همکاران ۲۰۰۲) و سپس الگوریتم تک‌هدفه اجتماع ذرات سنجیده شد. در بخش اول صحت‌سنجی که برای اطمینان از عملکرد کد توسعه‌یافته رتبه‌بندی نامغلوب و فاصله ازدحامی در قالب مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد، دو مسئله استاندارد KUR در مطالعه Kursawe و همکاران (۱۹۹۰) و SCH در پژوهش Schaffer و همکاران (۱۹۸۷) مورد استفاده قرار گرفت. مسائل و قیود حاکم بر آن در جدول (۲) و پارامترهای مدل بهینه‌سازی جهت اجرای توابع در جدول (۳) آمده است. مقایسه جبهه پارتو حاصل از الگوریتم توسعه‌یافته و مسئله استاندارد در حالت محدب در شکل (۶) و در حالت غیرمحدب در شکل (۷) نشان داده شده است. همسانی جبهه به دست آمده در حل این دو معادله با محدودیت‌های تعریف شده صحت الگوریتم توسعه‌یافته را تأیید می‌کند. این بخش از صحت‌سنجی اختصاص به ارزیابی دقت مدل بهینه‌ساز چندهدفه داشته و برای بررسی کد شبیه‌سازی تحقیق از دو الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات برای تعیین بهترین نقطه از دیدگاه هر یک از اهداف استفاده شد.



شکل ۴- محاسبه فاصله جمعیت در یک جبهه

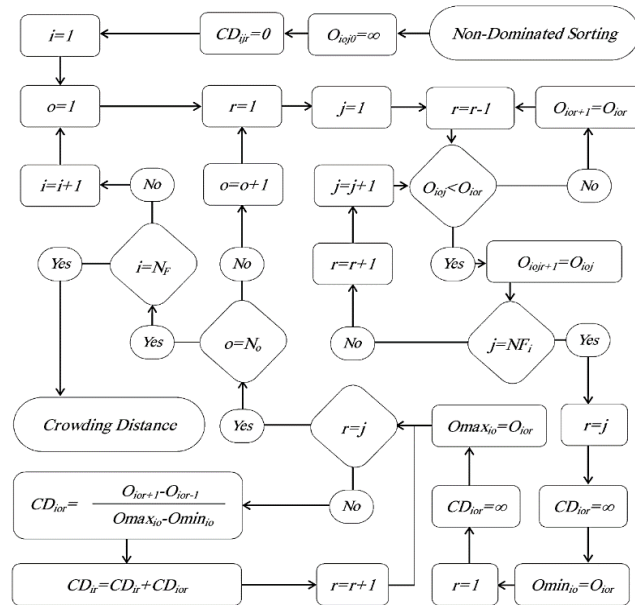
در شکل (۶) i ، شمارنده جبهه‌های نامغلوب، NF، تعداد کل جبهه‌ها، O و NO ، به ترتیب اندیس و تعداد توابع هدف، NF i ، تعداد اعضای جبهه i ، j و r ، شماره و رتبه هر یک از اعضا در جبهه i می‌باشند. هر متغیر موجود در الگوریتم با چهار اندیس i ، j و r و O معرفی می‌گردد که مطابق تعاریف بیانگر مشخصات هر پارامتر است.

جدول ۲- مسائل استاندارد جهت ارزیابی برنامه بهینه‌سازی NSGAII

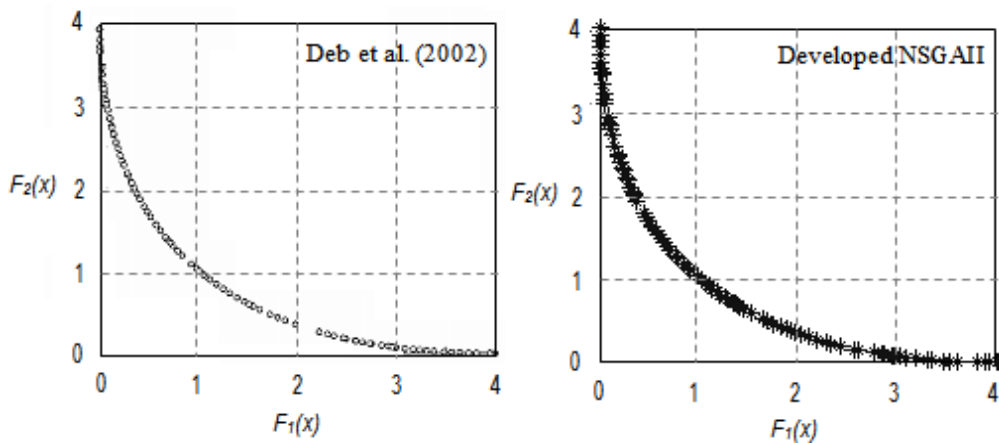
مسئله	توابع هدف	فضای تصمیم	تعداد متغیر	جبهه پارتو
SCH	$f_1(x) = x^2$ $f_2(x) = (x-2)^2$	$[-10^3, 10^3]$	۱	محدب
KUR	$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(-10 \exp \left(-0.2 \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2} \right) \right)$ $f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i ^{0.8} + 5 \sin x_i^3)$	$[-5, 5]$	۳	غیر محدب

جدول ۳- تنظیمات مدل برای اجرای توابع استاندارد

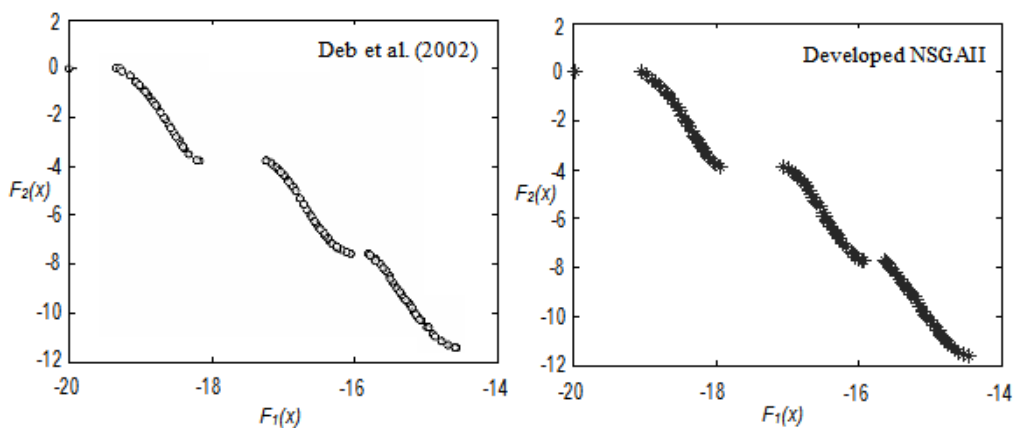
جمعیت اولیه	تعداد تکرار	درصد جهش	احتمال جهش	احتمال تقاطع
۱۰۰	۳۰۰	۰/۰۲	۰/۳	۰/۸



شکل ۵- الگوریتم فاصله جمعیت



شکل ۶- مقایسه نتایج الگوریتم توسعه یافته و روش Deb و همکاران (۲۰۰۲) در مسئله SCH



شکل ۷- مقایسه نتایج الگوریتم توسعه یافته و روش Deb و همکاران (۲۰۰۲) در مسئله KUR

واستجی جواب‌های ۱۰ اجرای مدل برای رسیدن به بهترین پاسخها به دست آمد. مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه توسط روش PSO در دو مرحله با اهداف افزایش کارایی مصرف آب (هدف ۱) و

در این مرحله از ارزیابی ضرایب روش NSGAII مطابق با جدول (۳) و ضرایب مورد نیاز روش PSO در جدول (۴) خلاصه شده است. لازم به توضیح است ضرایب استفاده شده برای هر دو مدل از

کلی با تبدیل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به یک مسئله تک‌هدفه در هر بار اجرای برنامه تنها یک پاسخ بهینه به دست می‌آید؛ اما تصمیم‌گیرنده اغلب ترجیح می‌دهد مجموعه‌ای از پاسخ‌های مطلوب را در اختیار داشته باشد.

افزایش نسبت درآمد به هزینه (هدف ۲) اجرا و نقاط بهینه برای مقایسه و ارزیابی مدل چندهدفه در جدول (۵) خلاصه شده است. همچنین پارامترها و جزئیات روش‌های اجرا شده در جدول (۶) به صورت خلاصه آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالت

جدول ۴- ضرایب و پارامترهای مدل بهینه‌سازی اجتماع ذرات

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار	ردیف	پارامتر	نماد	مقدار
۱	تعداد متغیر	nvar	۴۵	۴	ضریب اجتماعی	c_1	۲
۲	ضریب انقباض	χ	۰/۹	۵	ضریب شناختی	c_2	۲
۳	وزن اینرسی مینیمم	ω_{min}	۰/۴	۶	وزن اینرسی ماکزیمم	ω_{min}	۰/۹

جدول ۵- مقایسه نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه (PSO) و چندهدفه (NSGAI)

معیار	تابع هدف	گندم	جو	کلزا	عدس	گوجه‌فرنگی	پیاز	خيار
NSGAI	Min RE	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۶
	Min B/C	۱/۳	۱/۳	۱/۶	۲/۶	۱/۴	۱/۷	۱/۴
	Max RE	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۱	۰/۹۹
	Max B/C	۲/۲	۲/۳	۶/۴	۷/۱	۵/۴	۶/۳	۴/۹
پاسخ بهینه	RE	۰/۹۸	۰/۹۸	۱	۱	۰/۸۶	۰/۷۹	۰/۹۳
	B/C	۲	۲	۶/۴	۷/۱	۴/۵	۵/۸	۴/۵
	Min RE	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۴
	Min B/C	۱/۳	۱/۳	۱/۸	۲/۶	۱/۴	۱/۷	۱/۴
PSO	Max RE	۱	۱	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹۴	۱
	Max B/C	۲/۲	۲/۲	۵/۸	۶/۶	۵/۴	۶/۱	۴/۸

جدول ۶- مقایسه اجزاء مدل‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه صحت‌سنجی

پارامتر	الگوریتم اجتماع ذرات	الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب
مقدار	واحد	مقدار
جمعیت	۳۰۰	۲۰۰
تعداد تکرار	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
زمان اجرا	۲۵ دقیقه	۳۹ ساعت

نسبت به تک‌هدفه در پژوهش حاضر را می‌توان به صورت ذیل برشمرد:

- در مدل تک‌هدفه برای تعیین ۲۰۰ نقطه بهینه نیاز به ۴۰۰ بار اجرای الگوریتم وجود دارد که زمان موردنیاز را به حدود ۱۶۷ ساعت (در مقابل ۳۹ ساعت) افزایش می‌دهد.
- برای محاسبه هر نقطه از جبهه پارتو توسط مدل تک‌هدفه باید شرایط جداگانه شامل تعیین حداقل سود و مقدار مجاز پمپاژ از آب زیرزمینی و سایر قیود وابسته تعریف شوند و براساس آن یک نقطه بهینه به دست می‌آید. در حالی که مدل‌سازی چندهدفه به تعداد جمعیت اولیه نقاط بهینه را با شرایط مختلف وضعیت آب در سودآوری‌های مختلف نتیجه خواهد داد که هیچ کدام بر دیگری مزیت نداشته و گزینه برتر براساس تصمیم مدیریتی انتخاب می‌گردد.
- روش NSGAI سرعت و دقت بیشتری در رسیدن به نقاط بهینه و گذشتن از مرزهای روش PSO از خود نشان داد.

این موضوع به دلیل تمایل به دست آوردن یک دید کلی نسبت به مسئله و آگاهی یافتن از پاسخ‌های جایگزین است. از این رو در مسائل تک‌هدفه جبهه پارتو با چندین بار اجرای مستقل برنامه حاصل می‌گردد که زمان بر بوده و حجم محاسباتی زیادی را نیز لازم دارد. همچنین به دلیل اجرای مستقل برنامه، الگوریتم قادر نیست تا اطلاعات مفید پیرامون و یا پاسخ غیرمفید قبلی را مورد استفاده قرار دهد و در نتیجه امکان پدید آمدن پاسخ‌های مشابه در اجراهای مختلف برنامه وجود دارد.

همان‌گونه که در جدول (۶) نشان داده شده است، مدل PSO به دلیل حل معادله ساده تابع تک‌هدفه با تعداد جمعیت بیشتر مدت اجرای کمتری نسبت به NSGAI دارد، اما تنها یک نقطه از جبهه پارتو را می‌تواند محاسبه نماید. از طرفی مدل NSGAI در برآورد سناریوی بهینه اقتصادی به مراتب کاراتر عمل نموده و در سناریوی کم‌آبی دقت نسبتاً مشابه دارند (جدول (۵)). با توجه به مقایسه دو الگوریتم توسعه یافته مزیت برنامه‌ریزی چندهدفه

2002, 6, 181-197.

Goldberg DE, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989, 399.

Kursawe F, "A variant of evaluation strategies for vector optimization", Berlin, Germany: Springer, 1990, 193-197.

Labadie JW, "Optimal operation of multi reservoir systems: state-of-the-art review", Journal of Water Resource Planning and Management, 2004, 130 (2), 93-111.

Lalehzari R, Boroomand Nasab S, Moazed H, Haghghi A, Yaghoobzadeh M, "Simulation-optimization modeling for water resources management using NSGAII-OIP and Modflow", Irrigation and Drainage, 2020,

Lalehzari R, Boroomand Nasab S, Moazed H, Haghghi A, "Multi-objective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2016.

Lalehzari R, Kerachian R, "Developing a framework for daily common pool groundwater allocation to demands in agricultural regions", Agricultural Water Management. 2020b, 241, 106278.

Lalehzari R, Kerachian R, "An integrated framework for optimal irrigation planning under uncertainty: application of soil, water, atmosphere and plant modeling", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2020a.

Schaffer JD, "Multi-objective optimization with vector evaluated genetic algorithm", Proceedings of the First International Conference on genetic algorithm. Lawrence Erlbaum, 1987, 93-100.

Shi Y, Eberhart R, "Empirical study of particle swarm optimization", Proceeding IEEE International Congress Evolutionary Computation, Washington, DC., USA, 1999, 1945-1950.

Yeh WWG, "Reservoir management and operation models: a state of the art review", Water Resource Research, 1985, 21 (1), 1797-1818.

۴- نتیجه‌گیری

صحت‌سنجی مدل چندهدفه مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب و استفاده از معیار فاصله جمعیتی توسط دو تابع استاندارد انجام شد. علاوه بر این، کارایی مدل در مقایسه با دو مدل تک‌هدفه PSO برای اهداف کاهش آب مصرفی و افزایش بازده اقتصادی بررسی شد. نتایج نشان داد مدل چندهدفه با مدت‌زمان اجرای ۳۹ ساعت با تعداد ۲۰۰ جمعیت اولیه نتایج بهتری نسبت به الگوریتم اجتماع ذرات در شناسایی نقاط ماکزیمم نسبت درآمد به هزینه داشته است.

استفاده از مدل‌های تک‌هدفه برای محاسبه هر نقطه از جبهه پارتو مستلزم تعیین حداقل سود و مقدار مجاز پمپاژ از آب زیرزمینی بوده و محدودیت‌های مسئله تنها در جهت رسیدن به یک مقدار بهینه تدوین می‌شود. در مقابل در مدل‌سازی چندهدفه به تعداد جمعیت اولیه نقاط بهینه با شرایط متفاوت از نظر مقدار آب مصرفی و سوددهی مختلف نتیجه می‌شود که بهترین گزینه بر مبنای نیاز بهره‌بردار انتخاب خواهد شد.

امروزه ابزارهای بهینه‌سازی با الهام گرفتن از پدیده‌های طبیعی در حال گسترش است و ترکیب آن‌ها با نظریه‌های مختلف راه‌حل‌های زیادی را در مسائل مهندسی پدید می‌آورد. پژوهش حاضر می‌تواند با اعمال نظریه فازی در خصوص ضریب حساسیت گیاهی و کاربرد روش‌های الگوریتم اجتماع ذرات، شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم کلونی مورچگان و ... اجرا گردد.

۵- مراجع

خاشعی سیوکی ع، قهرمان ب، کوچک‌زاده م، "کاربرد تخصیص و مدیریت آب کشاورزی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی PSO (مطالعه موردی: دشت نیشابور)", نشریه آب و خاک، ۱۳۹۲، ۲۷ (۲)، ۲۹۲-۳۰۳.

مقدسی م، مرید س، عراقی‌نژاد ش، "بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی)", تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۸۷، ۴ (۳)، ۱-۱۳.

Anwar AA, Haq ZU, "Genetic algorithms for the sequential irrigation scheduling problem", Irrigation Science, 2013, 31 (4), 815-829.

Azamathulla HM, Wu FC, Ghani, AA, Narulkar SM, Zakaria NA, Chang CK, "Comparison between genetic algorithm and linear programming approach for real time operation", Journal of Hydro-environment Research, 2008, 2, 172-181.

Dai C, Yao M, Xie Z, Chen C, Liu J, "Parameter optimization for growth model of greenhouse crop using genetic algorithm", Applied Soft Computing, 2009, 9, 13-19.

Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T, "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transaction on Evolutionary Computation,

EXTENDED ABSTRACT

Efficiency of Particle Swarm Optimization and Multiobjective Genetic Algorithm in Optimal Operation of Agricultural Water Resources

Mohammad Amin Zarei^{a,*}, Reza Lalehzari^b

^a Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

^b Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 23 July 2015; Accepted: 17 August 2021

Keywords:

Water Resource Management, Pareto Front, Non-Dominated Sorting, Multiobjective Optimization, Water Allocation.

1. Introduction

The main problem of water resources planning is the inappropriate allocation between different consumers. Water allocation planning is a complex, multi-variable, and multi-constraint problem, which requires advanced optimization methods to be solved. Classical optimization methods are facing some limitations such as being trapped in local optimum points, and difficulties in handling different variables. In this paper two of these methods including particle swarm optimization, PSO and multiobjective non-dominated sorting genetic algorithms, NSGAI were explored and their efficiency in optimization water reservoir operation problems is compared. Dealing with the necessary of multiobjective programming accuracy, two single objective models was developed separately using PSO to verify the NSGAI results.

1.1. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-NSGAI

The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm abbreviated as NSGA was one of the first evolutionary algorithms that utilized the principle of Pareto optimality in solving multiobjective problems. Deb et al., (2002) raised some criticisms to the NSGA and developed a powerful approach known as NSGAI. In comparison with the previous version, the NSGAI has a less computational complexity, considers elitism, systematically preserves the diversity of Pareto-optimal solutions and adaptively handles the problem constraints.

1.2. Particle Swarm Optimization-PSO

Particle Swarm Optimization (PSO) is another computing technique that the several recent researchers have summarized the essentials of its modelling. PSO is a biologically inspired computational search and intelligent optimization method developed in 1995 by Eberhart and Kennedy based on the social behaviors of birds flocking or fish schooling. Particle swarm optimization consists of a swarm of particles, where particle represent a potential solution (Shi and Eberhart, 1999).

2. Methodology

The structure of the optimal allocation of water is summarized in the two objective functions. Thereby, the first objective function (OF1) is minimization of water allocation and the second objective function (OF2) is maximizing the total benefits of cropping pattern relative to its costs. Irrigation water requirement for each

* Corresponding Author

E-mail addresses: mohammadaminzare@gmail.com (Mohammad Amin Zarei), reza.lalehzari@ut.ac.ir (Reza Lalehzari).

growing stage and cultivated area have been considered as decision-making variables. Field data for the model, covering the period 2013-2014, were obtained from Baghmalek plain in Iran.

The first step of NSGAI algorithm is generation of initial population randomly and evaluate by two objective functions. Then, the population is sorted based on the non-domination principle and is classified in different fronts that the best level of non-dominated fronts is called Pareto front. Every chromosome in each fronts ranked by crowding distance criterion for preserving diversity among the population members. As shown in Fig. 1 and follow equation, crowding distance is obtained:

$$CD_i = \sum_{m=1}^2 \frac{OF_m(i+1) - OF_m(i-1)}{OF_i^{\max} - OF_i^{\min}} \tag{1}$$

Where, CD = crowding distance, OF = objective function, i = chromosome rank in front.

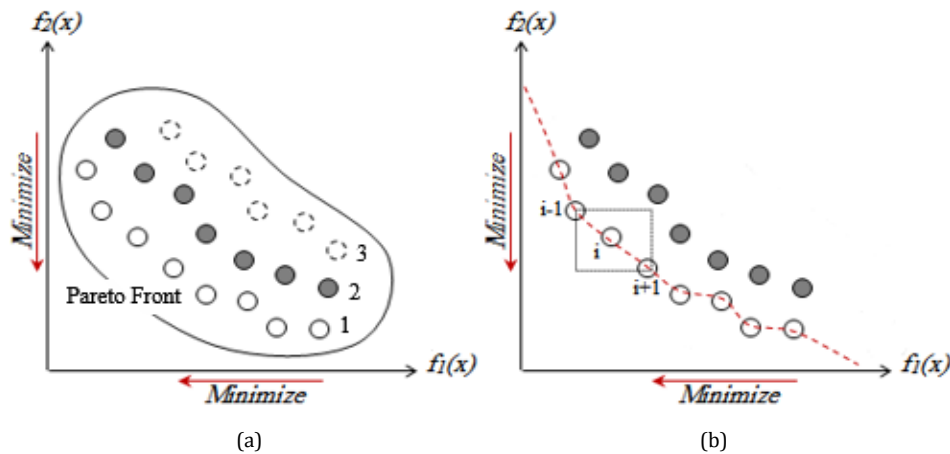


Fig. 1. Schematic illustration of the non-dominated sorting: a) and crowding distance, b) concepts

In the next step, the usual binary tournament selection, crossover and mutation are used to create offsprings with participation of non-dominated solutions. After that, in the main loop, parents and offsprings population are combined. So a population with the size of $2N$ is created (N is number of solutions). In the next step, the population is sorted according to non-domination and the new population will be created with the selection procedure based on the ranking and crowding distance parameter of a solution. This process continues until the number of generation is at the end (Goldberg, 1989).

3. Results and Discussion

The comparison between NSGAI and PSO algorithms was carried out in endpoints of objective functions. The intersection of two axes of NSGAI is the ideal point of endpoint Pareto front. The results show that the ideal solution value of NSGAI was better than PSO in benefit per cost ratio (first objective function). The more details of the comparison between two models showed in Tables 1 and 2.

Table 1. The results of single and multiobjective models

Technique	OF	Barley	Barley	Colza	Lentil	Tomato	Onion	Cucumber
NSGAI	Min RE	0.34	0.27	0.41	0.33	0.18	0.21	0.26
	Min B/C	1.3	1.3	1.6	2.6	1.4	1.7	1.4
	Max RE	1	1	1	1	0.97	0.91	0.99
	Max B/C	2.2	2.3	6.4	7.1	5.4	6.3	4.9
Optimal Solution	RE	0.98	0.98	1	1	0.86	0.79	0.93
	B/C	2	2	6.4	7.1	4.5	5.8	4.5
PSO	Min RE	0.37	0.28	0.48	0.33	0.24	0.26	0.24
	Min B/C	1.3	1.3	1.8	2.6	1.4	1.7	1.4
	Max RE	1	1	0.96	0.98	0.91	0.94	1
	Max B/C	2.2	2.2	5.8	6.6	5.4	6.1	4.8

Table2. Comparison between PSO and NSGAI

Parameters	PSO		NSGAI	
	Value	Unit	Value	Unit
Population	300	Particle	200	Chromosomes
Iteration	10000	-	10000	-
Run time	25	Min	39	Hours

4. Conclusions

This study was conducted to evaluate the NSGAI model using PSO for water allocation problem. For this subject, non-dominated sorting principle and crowding distance criterion were applied to find the best solution of two objective functions simultaneously. The results showed that in the developed multiobjective scheduling, there is the set of solution in Pareto front with the great potential to maximize the net income and water saving in the water shortages problem. Therefore, the optimum strategies of water allocation should be designed in a predetermined economic framework.

5. References

- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T, "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6,181-197.
- Shi Y, Eberhart R, "Empirical study of particle swarm optimization", Proceeding IEEE International Congress Evolutionary Computation, Washington, DC., USA, 1999, 1945-1950.
- Goldberg DE, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989, 399.