

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی الگوی کشت در راستای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های

DE و PSO

مهدی کماسی<sup>۱\*</sup> - امیر علیزاده فرد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

چکیده

پایش‌های میدانی بیانگر کاهش تراز آبخوان‌های دشت سیلاخور در سال‌های اخیر هستند که این موضوع لزوم بهره‌برداری بهینه از منابع محدود آب‌های زیرزمینی را می‌رساند. در همین راستا با توجه به سهم عمده کشاورزی در مصرف آب، بهینه‌سازی الگوی کشت از مهم‌ترین عوامل مدیریت منابع آب و مقابله با کم‌آبی محسوب می‌شود. در این پژوهش عملکرد توابع جریمه مختلف به منظور تعیین الگوی کشت بهینه در دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات بررسی شده است. در این راستا در گام نخست بارندگی سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در دشت سیلاخور با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی و مدل میانگین متحرک خود هم‌بسته یکپارچه فصلی پیش‌بینی شده و با توجه به تغذیه ناشی از بارندگی و میزان برداشت در سال‌های گذشته، برای هر سال زراعی ۱۰۰ سناریو برداشت تعیین شد. سپس الگوی کشت بهینه متناسب با هر سناریو برداشت با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی به دست آمد. حداکثرسازی درآمد کشاورزان به عنوان تابع هدف، و آب و زمین در دسترس به عنوان محدودیت‌های برنامه‌ریزی خطی در نظر گرفته شدند. در گام دوم عملکرد توابع جریمه مختلف در دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای رسیدن به پاسخ‌های حاصل از برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج این بررسی به طور میانگین الگوریتم ازدحام ذرات در ۸۴٪ سناریوها سریع‌تر به الگوی کشت بهینه می‌رسد. همچنین اعمال تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده تعداد تکرارهای الگوریتم تکامل تفاضلی را ۱۱٪ و الگوریتم ازدحام ذرات را ۳٪ نسبت به استفاده از جریمه ساکن کاهش می‌دهد. در مجموع می‌توان دریافت که با میزان برداشت فعلی، در صورت پیروی از الگوی کشت بهینه پیشنهاد شده برای چهار محصول عمده زراعی دشت سیلاخور، یعنی گندم، جو، شلتوک و ذرت علوفه‌ای، درآمد کشاورزان منطقه ۱۸٪ افزایش می‌یابد. همچنین به کارگیری تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده در الگوریتم ازدحام ذرات به منظور بهینه‌سازی الگوی کشت پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، الگوریتم‌های فراکاوشی، برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی، دشت سیلاخور

مقدمه

بی‌رویه انسان از منابع آبی و مدیریت نادرست منابع آب می‌دانند (۲) و (۱۹). نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که در دشت سیلاخور عوامل انسانی نسبت به تغییرات اقلیمی تأثیر بیشتری در کاهش تراز آب‌های زیرزمینی دارند (۱۲). علاوه بر خشکسالی، تغییر الگوی کشت به سمت محصولات آب‌بر نیز بحران آب را در سال‌های اخیر به نخستین پدیده بحرانی در سطح جامعه تبدیل کرده است که این بحران بر روی بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف کننده آب تأثیر مستقیم می‌گذارد. آب از مهم‌ترین اجزاء برای تولید محصولات کشاورزی است و مدیریت منابع ارزشمند و محدود آن از زمینه‌های گسترش کشاورزی می‌باشد. تولید محصولات کشاورزی به طور متوسط ۷۰٪ از کل

وقوع خشکسالی‌های پی در پی در کنار افزایش نیازهای آبی و عدم مدیریت صحیح منابع آب، باعث ایجاد بحران آبی شده است که پیامدهای مختلف محیط‌زیستی و اقتصادی را به دنبال دارد. از آن جا که این بحران بر بخش‌های مختلف جامعه تأثیر می‌گذارد، بنابراین بررسی راه‌های مقابله با آن نیز، امری لازم و ضروری است. در زمینه شناسایی علل خشکسالی رویکرد واحد و روشنی وجود ندارد. برخی تغییر اقلیم گسترده را به عنوان عامل اصلی بحران کم‌آبی، در ایران معرفی می‌کنند (۲۳ و ۳۰) و در مقابل برخی دیگر علت آن را برداشت

(Email: komasi@abru.ac.ir

\*)- نویسنده مسئول:

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران

۱۳۲ تا ۱۶۸٪، بهره‌وری آب اقتصادی ۲۰۵ تا ۲۴۱٪، عملکرد ۱۰۸ تا ۱۵۳٪ و سود متوسط ۱۵۳ تا ۳۰۸٪ از طریق بهینه‌سازی الگوی کشت، ارزش اقتصادی بالاتری خواهد داشت. در پژوهشی دیگر در مصر، اسامه و همکاران (۲۰) با در نظر گرفتن میزان استراتژیک بودن هر محصول و استفاده از برنامه‌ریزی خطی، الگوی کشت بهینه را تعیین کرده و با الگوی کشت فعلی مقایسه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در الگوی کشت بهینه سطح کشت محصولاتی مانند پیاز، سیر، نخود و عدس به دلیل استراتژیک نبودن آن‌ها، کاهش می‌یابد. در مقابل سطح کشت محصولاتی مانند گندم، برنج، ذرت و محصولات قندی که ارزش غذایی بالایی دارند و به عنوان محصولات استراتژیک تعریف می‌شوند، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همچنین مناطق اختصاص یافته به محصولاتی که بازده خالص بالایی دارند، مانند گوجه فرنگی بطور قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

رویکرد دوم در زمینه تخصیص بهینه و تعیین الگوی کشت، بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراکاوشی است؛ به عنوان نمونه راجو و کومار (۲۴) در راستای افزایش سود یک پروژه آبیاری، عملکرد الگوریتم ژنتیک را در برنامه‌ریزی آبیاری و توسعه الگوی کشت بررسی کردند. در این مطالعه مجموع حداکثر عملکرد نسبی کل گیاهان در مناطق تحت آبیاری به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. محدودیت‌های مدل نیز شامل معادله پیوستگی، نیاز آب، تنوع محصول و محدودیت ذخیره بود. همچنین برای انحراف مسئله از حالت منطقی به غیرمنطقی از تابع جریمه<sup>۲</sup> استفاده شد. آن‌ها نشان دادند نتایج بهینه به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی یکسان می‌باشد. در پژوهشی دیگر به منظور بررسی شرایط مختلف بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره در هندوستان ردی و کومار (۲۵) الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر نخبه‌گرایی<sup>۳</sup> را بکار بردند. این پژوهشگران ذخیره‌سازی اولیه، تخلیه، سرریز و تبخیر را در سمت مخزن، و تخصیص آب، تبخیر و تعرق واقعی و رطوبت اولیه خاک را در سمت مزرعه، به عنوان خروجی‌های مدل در هر دوره ده روزه و برای هر محصول تعریف کردند. مدل آن‌ها تصمیم‌گیری برای تخصیص بهینه آب را تسهیل می‌کند. یوسف دوست و همکاران (۳۳) از الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین سطح زیر کشت بهینه برخی از محصولات کشاورزی در قزوین، تحت شرایط متفاوت آب و هوایی استفاده کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، سود حاصل از الگوی کشت بهینه در شرایط آب و هوایی نرمال، مرطوب، خشک و گرم و هنر خشک افزایش چشمگیری خواهد داشت. از سویی دیگر سیاسر و هنر (۲۸) نیز به بهینه‌سازی تخصیص آب و الگوی کشت محصولات غالب کشاورزی با بکارگیری الگوریتم ژنتیک در دشت سیستان پرداختند.

برداشت آب در جهان را شامل می‌شود (۷). یکی از کارآمدترین راهکارهای مناسب جهت کاهش هدررفت آب و دستیابی به توسعه پایدار، بهینه‌سازی تخصیص است (۱۸). در این راستا باید به اهداف اقتصادی که شامل درآمد کشاورزان می‌شود نیز توجه نمود. به طور کلی هدف محیط‌زیستی برداشت کمتر از آب‌های زیرزمینی و هدف اقتصادی افزایش درآمد کشاورزان با یکدیگر در ناسازگاری هستند. در بررسی مسئله برنامه‌ریزی مصرف آب در بخش کشاورزی باید تعادل مناسبی میان این اهداف ایجاد نمود که در این زمینه رویکردهای متفاوتی ارائه گردیده است؛ به عنوان نمونه کایر و همکاران (۱۰) با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> با هدف حداکثر کردن درآمد خالص و صرفه‌جویی در مصرف آب، در پنجاب، الگوی کشت بهینه را تعیین کردند. آن‌ها نشان دادند که با اضافه کردن پنبه به الگوی کشت منطقه در مصرف آب ۲۶/۵۵٪ صرفه‌جویی شده و درآمد ۴٪ افزایش می‌یابد. لو و همکاران (۱۴) نیز با استفاده از همین رویکرد در حالت فازی به بررسی مدیریت منابع آب پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که مجموعه‌های فازی قادرند عدم قطعیت دو جانبه‌ای در مدل‌ها به وجود آورند و تصمیم‌های ارزشمندی مطابق با اولویت‌ها و شرایط عملی تصمیم‌گیرندگان با استفاده از روش حل به دست می‌آید. به منظور بهینه‌سازی الگوی کشت در مشهد، مجیدی و همکاران (۱۵) برنامه‌ریزی خطی را با هدف کاهش مصرف آب بکار بردند. آن‌ها محدودیت‌های مختلفی مانند سطح زیرکشت، نیروی کار، سرمایه، بازده برنامه‌ای، ماشین آلات، کود شیمیایی، سم شیمیایی و تناوب زراعی را در مدل‌سازی خود در نظر گرفتند. براساس نتایج این پژوهشگران، محصولاتی با مصرف بالای آب و بازده برنامه‌ای کمتر، در الگوی کشت بهینه حذف می‌شوند. عبدالقادر و همکاران (۱) برای بهینه‌سازی الگوی کشت از برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کاهش مصرف آب، حداکثرسازی بازده سالانه و تخصیص کارآمد زمین‌های کشاورزی استفاده کردند. آن‌ها میزان واردات و صادرات محصولات کشاورزی را نیز در مدل‌سازی خود در نظر گرفته و با مقایسه دو الگوی کشت فعلی و بهینه نشان دادند در الگوی کشت بهینه، مصرف آب ۵۳٪ کاهش و سود خالص برآورد شده در حدود ۲/۴۲ میلیارد دلار در سال افزایش می‌یابد. در الگوی کشت بهینه به محصولات غلات، میوه، علوفه و سبزی به ترتیب ۴۸/۴٪، ۳۵/۴٪، ۱۳/۱٪ و ۳/۲٪ زمین اختصاص می‌یابد. بیرهانو و همکاران (۳) نیز با استفاده از برنامه‌ریزی خطی الگوی کشت بهینه را در کشور اتیوپی تعیین کردند. در این پژوهش آن‌ها محدودیت آب و زمین را در چهار سناریو مختلف، و هدف‌ها را حداکثرسازی بازده و حداکثرسازی تولید تعریف کردند. نتایج این مطالعه نشان داد بهره‌وری آبیاری ۴۸٪، بهره‌وری آب فیزیکی

عمده زراعی دشت سیلاخور، با هدف حداکثرسازی درآمد کشاورزان در سه سال آینده و محدودیت‌های آب و زمین در دسترس، از میزان تغذیه ناشی از بارندگی به‌عنوان معیاری برای مشخص کردن بازه استخراج آب استفاده شد. به‌منظور پیش‌بینی بارندگی از الگوهای سری زمانی  $SARIMA^y$  و برنامه‌ریزی ژنتیکی<sup>۸</sup> با در نظر گرفتن داده‌های ۱۰ سال گذشته در دو حالت فصلی و ماهیانه استفاده شده و طبق معیارهای سنجش و ارزیابی مدل‌سازی، مدل بهتر انتخاب گردید. سپس برای هر سال زراعی ۱۰۰ سناریو برداشت مختلف با فواصل مساوی در نظر گرفته شد. حدود بالا و پایین این سناریوها با توجه به میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی و میزان برداشت در سال‌های گذشته تعیین شده است. به‌منظور حداکثرسازی درآمد کشاورزان متناسب با هر سناریو برداشت نیز از برنامه‌ریزی خطی استفاده شد. در نهایت عملکرد سه نوع تابع جریمه ساکن، پویا و پویای طبقه‌بندی شده در دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام رسیدن به جواب‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ روند کلی پژوهش را نشان می‌دهد.

به‌منظور مدل‌سازی سری زمانی بارش با استفاده از الگوی  $SARIMA$  از نرم‌افزار EViews 10 و برای مدل‌سازی با روش برنامه‌ریزی ژنتیکی از نرم‌افزار 4 GeneXproTools استفاده شد. همچنین برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات به‌صورت برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB R2018b پیاده‌سازی شدند. اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی هر محصول در دشت سیلاخور نیز با استفاده از نرم‌افزار NETWAT به دست آمد. در این پژوهش داده‌های مربوط به بارندگی دشت سیلاخور از شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان و اطلاعات مربوط به محصولات کشاورزی از ادارات کشاورزی شهرستان‌های بروجرد و دورود، آمارنامه‌های کشاورزی منتشر شده توسط وزارت جهاد کشاورزی و بانک مرکزی به‌دست‌آمده است.

مدل آن‌ها علاوه بر الگوی کشت بهینه، سطح زیر کشت محصولات را نیز با لحاظ کم‌آبیاری‌های مجاز در کل دوره رشد، به‌صورت همزمان، تعیین می‌کند. همچنین اثر محدودیت آب در دوره‌های مختلف رشد بر سطح زیر کشت محصولات مختلف در این مطالعه بررسی شده است. نتایج این بررسی حاکی از آن است که گندم و هندوانه به‌ترتیب محصولات اقتصادی کشت اول و دوم زراعی هستند.

استفاده از برنامه‌ریزی خطی برای تعیین الگوی کشت در حقیقت حل یک مسئله بهینه‌سازی مقید<sup>۱</sup> خطی است. برای حل مسائل مقید با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز روش‌های مختلفی وجود دارد. در این پژوهش پس از پیش‌بینی میزان بارندگی سه سال آینده و محاسبه تغذیه ناشی از آن، محدودیت‌های برداشت در ۱۰۰ سناریو مختلف برای هر سال تعریف شده و دو رویکرد استفاده از برنامه‌ریزی خطی و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تعیین الگوی کشت بهینه محصولات عمده زراعی دشت سیلاخور بررسی و مقایسه شده‌اند. همچنین عملکرد سه نوع تابع جریمه ساکن<sup>۲</sup>، پویا<sup>۳</sup> و پویای طبقه‌بندی<sup>۴</sup> شده در دو الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی<sup>۵</sup> و ازدحام ذرات<sup>۶</sup> مورد بررسی قرار گرفته است.

#### منطقه مورد مطالعه

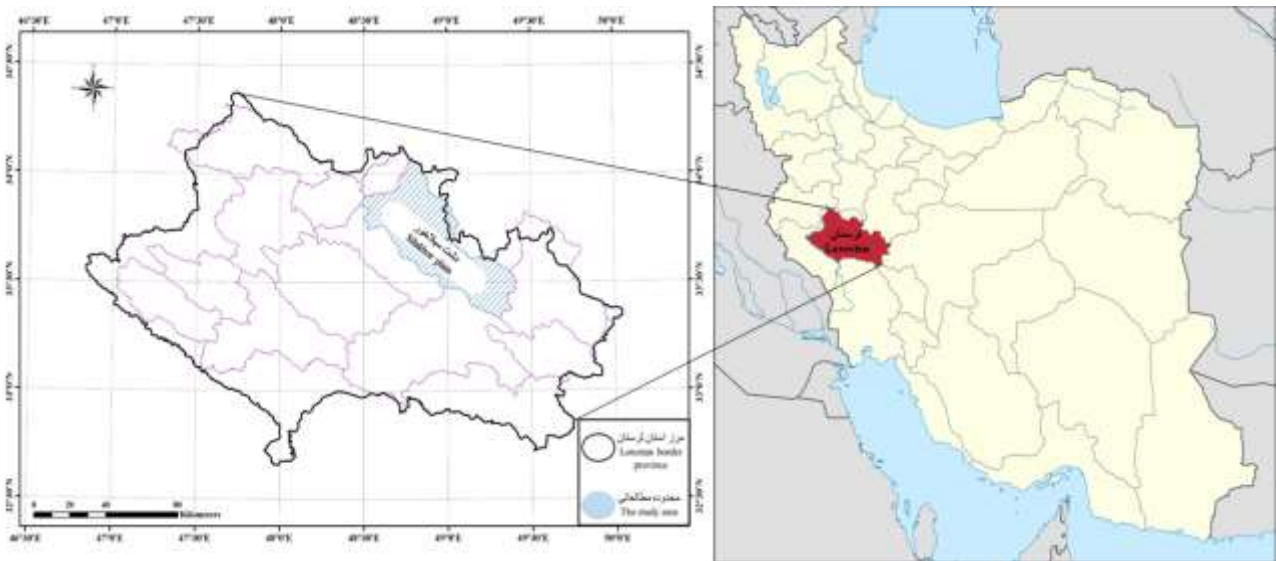
محدوده مطالعاتی دشت سیلاخور، پیرامون شهرهای بروجرد و دورود، بزرگ‌ترین زمین هموار استان لرستان بوده که با مساحت ۲۵۴۱ کیلومترمربع، در غرب ایران و شمال شرقی‌ترین بخش این استان واقع شده است. ۸۱۹ کیلومتر مربع این محدوده را دشت و ۱۷۲۲ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات تشکیل داده‌اند. دشت سیلاخور در شمالی‌ترین قسمت حوزه آبریز کارون بزرگ واقع شده و از اقلیم سرد و بارش مناسب برخوردار است؛ اما مطالعات میدانی در سال‌های اخیر کاهش تراز آب‌های زیرزمینی این منطقه را نشان می‌دهد. بر اساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای لرستان، مخازن آب زیرزمینی دشت سیلاخور با ۶۲ میلیون متر مکعب کسری مواجه هستند که یکی از عوامل آن تغییر الگوی کشت به سمت کشت محصولات آب‌بر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت دشت را در استان لرستان و غرب کشور نشان می‌دهد.

#### مواد و روش‌ها

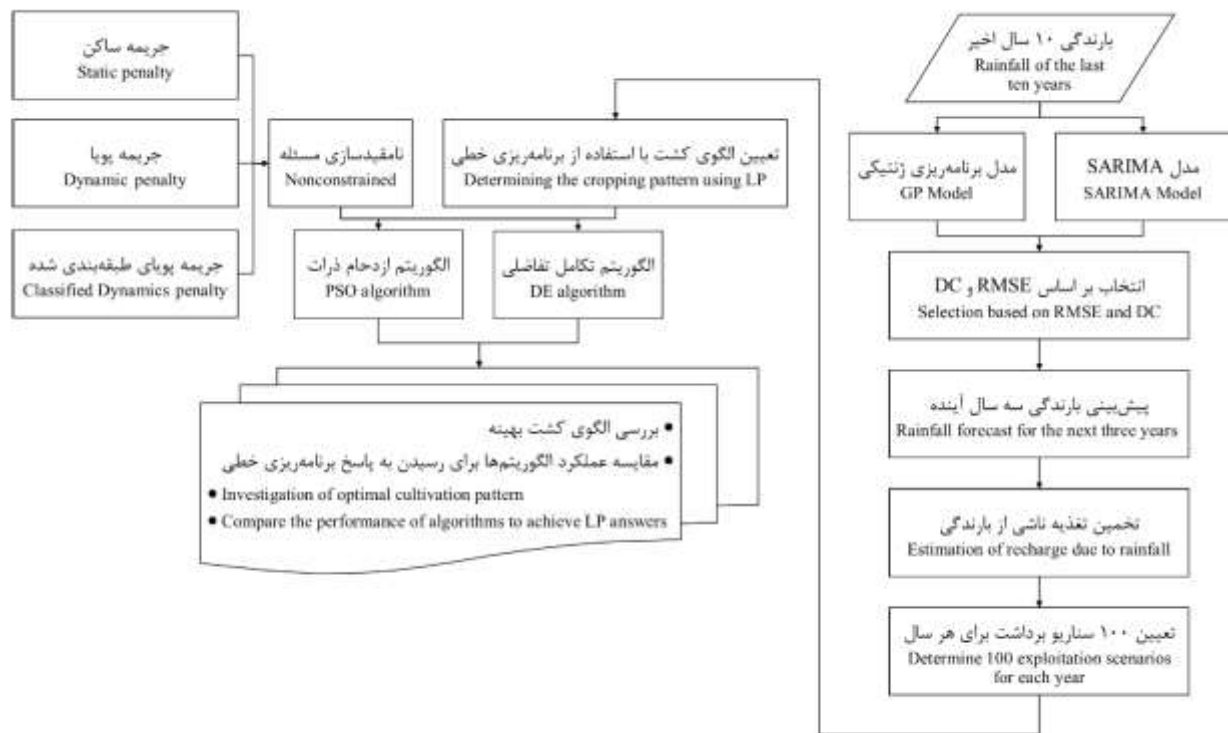
در این پژوهش به‌منظور تعیین الگوی کشت بهینه محصولات

- 6- Particle Swarm Optimization (PSO)
- 7- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA)
- 8- Genetic Programming (GP)

- 1- Constrained Optimization
- 2- Static Penalty
- 3- Dynamic Penalty
- 4- Classified Dynamics Penalty
- 5- Differential Evolution



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت سیلاخور در استان لرستان و ایران  
Figure 1- Geographical location of Silakhour plain in Lorestan province and Iran



شکل ۲- روندنمایی کلی مدل سازی پژوهش  
Figure 2- General trend of research modeling

پیش بینی سری زمانی فصلی استفاده می شود (۵). مدل SARIMA در مقایسه با سایر مدل ها به تعداد داده های کمتری نیاز داشته و رصدی کلی بر روی تمامی داده ها دارد؛ همچنین این مدل به دلیل دارا بودن

مدل میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه فصلی (SARIMA)

مدل SARIMA یک مدل عمومی خطی است که از آن برای

$$\bar{R}_i = \frac{R_{ih}A_h + R_{id}A_d}{A_h + A_d} \quad (۲)$$

$$\bar{\bar{R}}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{R}_i}{n} \quad (۳)$$

$$\overline{ST} = 10^6 d.c.A_t \quad (۴)$$

$$\overline{VM} = \overline{E} - \overline{ST} \quad (۵)$$

$$\alpha = 10^3 \frac{\overline{VM}}{\overline{R}} \quad (۶)$$

که در آن‌ها  $\bar{R}_i$  میانگین موزون بارندگی منطقه در سال  $i$  ام (میلی‌متر)،  $R_{ih}$  و  $R_{id}$  به ترتیب بارندگی سالیانه ارتفاعات و دشت در سال  $i$  ام (میلی‌متر)،  $A_h$  و  $A_d$  به ترتیب سطح ارتفاعات و دشت (کیلومتر مربع)،  $\bar{R}$  و  $n$  به ترتیب میانگین طولانی مدت بارندگی سالیانه دشت (میلی‌متر) و تعداد سال‌های مورد بررسی،  $\overline{E}$ ،  $\overline{ST}$  و  $\overline{VM}$  به ترتیب میانگین تخلیه، افت و تغذیه طولانی مدت (میلی‌متر)،  $d$  و  $c$  به ترتیب افت متوسط سطح آب (متر) و ضریب ذخیره،  $A_t$  سطح تیسن (کیلومتر مربع) و  $\alpha$  درصد تغذیه از بارندگی در مقیاس طولانی مدت می‌باشد. در نهایت ارتفاع و حجم تغذیه برای هر سال  $i+1$  طبق روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

$$H_M = \alpha \bar{R}_{i+1} \quad (۷)$$

$$V_M = 10^3 H_M A_d \quad (۸)$$

که  $\bar{R}_{i+1}$  میانگین وزنی بارندگی سالانه دشت در سال  $i+1$  ام بر حسب میلی‌متر و  $H_M$  و  $V_M$  نیز به ترتیب ارتفاع و حجم تغذیه بر حسب میلی‌متر و متر مکعب می‌باشند (۱۷).

### برنامه‌ریزی خطی

برنامه‌ریزی خطی یا همان بهینه‌سازی خطی، از روش‌های ریاضی است که با استفاده از آن می‌توان مقدار بیشینه یا کمینه یک تابع خطی با تعدادی قید به صورت نامعادله را، روی یک چندضلعی محدب پیدا کرد. در واقع قیدها به صورت نامعادله، همان نمایش نموداری چندضلعی محدب هستند. ارتباط آسان با کاربر در نرم‌افزارهای مختلف و گستردگی کاربرد این روش در علوم مختلف از جمله مزایای برنامه‌ریزی خطی بشمار می‌روند. در این پژوهش برای هر سناریو برداشت از آب‌های زیرزمینی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی حداکثر درآمد کشاورزان تعیین شد. در این راستا تابع هدف مطابق رابطه ۹ در نظر گرفته شد.

$$\max NI = \sum_{j=1}^n (Y_j P_j - C_j) A_j \quad (۹)$$

ماهیت فصلی، از توانایی بالایی در مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی مانند بارندگی برخوردار است. شکل عمومی مدل SARIMA به صورت  $SARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$  بوده که بخش دوم آن مربوط به سری زمانی فصلی است. رابطه ۱ فرم کلی این مدل را نشان می‌دهد.

$$\phi_p(B) \Phi_p(B^S) W_t = \theta_q(B) \Theta_q(B^S) a_t \quad (۱)$$

$$W_t = (1-B)^d (1-B^S)^D Z_t$$

به ترتیب چندجمله‌ای‌های خودهمبسته و میانگین متحرک فصلی هستند. همچنین  $B$  عملگر وقفه،  $p$  و  $q$  به ترتیب مرتبه عملگر خودهمبسته و میانگین متحرک غیرفصلی،  $P$  و  $Q$  به ترتیب مرتبه عملگر خودهمبسته و میانگین متحرک فصلی،  $d$  و  $D$  به ترتیب مرتبه تفاضل‌گیری غیرفصلی و فصلی و  $a_t$  دنباله متغیرهای تصادفی مستقل و هم‌توزیع با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_a^2$  است. مدل SARIMA مبتنی بر سه مرحله شناسایی، ارزیابی و پیش‌بینی می‌باشد (۴ و ۲۷).

### برنامه‌ریزی ژنتیکی

برنامه‌ریزی ژنتیکی کاربرد بسیاری در مشخص کردن ساختار مدل، برای علم مهندسی دارد. در این راستا از این روش جهت مشخص کردن ساختار اساسی پدیده‌های طبیعی یا مصنوعی به منظور مدل‌سازی عددی آن‌ها استفاده می‌شود (۲۶). خروجی‌ها در مدل برنامه‌ریزی ژنتیکی برخلاف سایر مدل‌ها به صورت یک رابطه ارائه می‌شوند که این امر موجب سهولت بکارگیری آن‌ها در کارهای اجرایی می‌شود. به بیان دیگر نتایج این مدل کاملاً صریح بوده و به سادگی توسط سایرین قابل درک و استفاده می‌باشد. این روش قادر است ساختار مدل و پارامترهای آن را بهینه‌سازی کند. برنامه‌ریزی ژنتیکی به صورت یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار عمل می‌کند؛ به طوری که جمعیتی برای ایجاد فرزندان اصلاح شده و به منظور تکامل، به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها می‌کنند. برنامه‌ریزی ژنتیکی به جای سلسله ارقام دودویی، برخلاف الگوریتم ژنتیک روی ساختار درختی فرمول‌ها عمل می‌کند. مجموعه توابع و ترمینال‌ها، ساختارهای درختی را تشکیل می‌دهند (۱۳).

### تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی

برای محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی پیش‌بینی شده، میانگین وزنی بارندگی برای هر سال از طریق رابطه ۲ محاسبه شده و با استفاده از درصد تغذیه از بارندگی در طولانی مدت، تغذیه سه سال آینده تخمین زده شد. روابط ۲ تا ۶ روند کلی محاسبات را نشان می‌دهند.

اطلاعات بین اعضاء ایجاد شده و این اصل آن را به یکی از ساده‌ترین و درعین‌حال پرکاربردترین الگوریتم‌های فرا کاوشی تبدیل کرده است. الگوریتم ازدحام ذرات از دیدگاه محاسباتی سرعت بالایی داشته و به حافظه کمی نیاز دارد.

### تابع جریمه

دو نمونه از مهم‌ترین روش‌های بهینه‌سازی تصادفی در حل مسئله‌های مقید عبارت‌اند از: روش‌هایی که بر اساس جستجوی ناحیه قابل قبول طراحی شده‌اند و روش‌هایی که بر اساس استفاده از تابع جریمه مسئله را حل می‌کنند (۶). روش‌های جریمه با استفاده از عملگرهای جمع شونده و ضرب شونده، تابع هدف جدیدی ایجاد کرده و مسئله را نامقید می‌کنند. روابط ۱۱ و ۱۲ به ترتیب عملگرهای جمع شونده و ضرب شونده را نشان می‌دهند.

$$eval(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & \text{if } \bar{x} \in F \\ f(\bar{x}) + p(\bar{x}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$eval(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & \text{if } \bar{x} \in F \\ f(\bar{x}) \times p(\bar{x}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$p(\bar{x})$  عملگر جریمه و  $F$  ناحیه پاسخ‌های امکان‌پذیر است که در صورت خارج شدن پاسخ‌ها از این ناحیه، تابع هدف به مقدار  $p(\bar{x})$  جریمه خواهد شد (۳۲). در مسئله‌های کمینه‌سازی در صورت تخطی از محدودیت‌های تعیین شده، در حالت جمع شونده  $p(\bar{x})$  مقداری مثبت و در حالت ضرب شونده مقداری بزرگ‌تر از یک به خود می‌گیرد. طبق طبقه‌بندی دیگری، توابع جریمه به دودسته اصلی ساکن و پویا تقسیم می‌شوند. توابع جریمه ساکن از مقداری ثابت در طول فرایند بهینه‌سازی استفاده می‌کنند، در مقابل در توابع جریمه پویا، جریمه‌ها در طول فرایند اصلاح می‌شوند.

### جریمه‌های ساکن

در این نوع جریمه، مقادیر جریمه به شماره نسل‌ها وابستگی ندارد و برای پاسخ‌های غیرقابل قبول یک جریمه ثابت در نظر گرفته می‌شود. همایف و همکاران (۸) نوعی تابع جریمه ساکن را ارائه دادند. در این روش پس از تعریف  $L$  گروه تخطی برای هر قید، ضریب‌های جریمه نیز توسط کاربر تعریف شده و سپس جمعیت تصادفی با استفاده از پاسخ‌های قابل قبول و غیرقابل قبول تولید می‌شود. هر یک از پاسخ‌ها با استفاده از رابطه ۱۳ ارزیابی می‌شوند.

که در این رابطه  $NI$  سود خالص کشاورزان در سناریو مورد بررسی (ریال)،  $Y_j$  عملکرد محصول  $z$  ام (کیلوگرم بر هکتار)،  $P_j$  و  $C_j$  به ترتیب قیمت هر کیلوگرم محصول  $z$  ام و هزینه تولید هر هکتار محصول  $z$  ام (ریال)،  $A_j$  سطح زیر کشت محصول  $z$  ام (هکتار) و  $n$  تعداد محصولات می‌باشد.

همان‌طور که در رابطه ۱۰ نشان داده شده است، آب و زمین در دسترس به‌عنوان مهم‌ترین قیدهای مدل تعریف می‌شوند. همچنین سطح زیر کشت هر محصول به حداقل ۳۰٪ و حداکثر ۱۷۰٪ سطح زیر کشت فعلی محدود شده است.

$$\sum_{j=1}^n W_j A_j \leq W_T$$

$$\sum_{j=1}^n A_j \leq A_T \quad (10)$$

$$0.3A_{j_{current}} \leq A_j \leq 1.7A_{j_{current}}$$

در این رابطه  $W_j$  و  $W_T$  به ترتیب آب مورد نیاز محصول  $z$  ام و کل آب در دسترس در هر سناریو برداشت (متر مکعب)،  $A_j$  و  $A_T$  به ترتیب سطح کشت بهینه محصول  $z$  ام و کل سطح قابل کشت دشت سیلاخور (هکتار) و  $A_{j_{current}}$  سطح زیر کشت فعلی محصول  $z$  ام (هکتار) است.

### الگوریتم تکامل تفاضلی

یک الگوریتم بهینه‌سازی عمومی علاوه بر داشتن قابلیت استفاده آسان، باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که بطور قابل اطمینان، به مقدار بهینه واقعی همگرا شود؛ همچنین زمانی که رایانه برای جستجوی راه‌حل صرف می‌کند نباید زیاد باشد. بنابراین یک روش عمومی و کارآمد بهینه‌سازی باید کاملاً ساده، دارای استفاده آسان، قابل اعتماد و سریع باشد. الگوریتم تکامل تفاضلی دارای چنین ویژگی‌هایی است که از زمان ایجاد آن در سال ۱۹۹۵، به‌عنوان یک بهینه‌ساز پرکاربرد مورد استقبال قرار گرفت (۲۲). این روش برای شروع کار تنها به تنظیم سه پارامتر NP اندازه جمعیت،  $F$  وزن جهش، و  $Cr$  احتمال انجام بازترکیبی یا تقاطع<sup>۳</sup> نیاز دارد. الگوریتم تکامل تفاضلی از چهار قسمت اصلی ارزش‌دهی، جهش، تقاطع و انتخاب تشکیل شده است (۲۹).

### الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات از رفتار گروهی پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته شده است. پرندگان و ماهی‌ها با استفاده از تجربه موفقیت‌آمیز خود و اعضاء همسایه، به صورتی که با یکدیگر برخورد نکنند، به دنبال غذا می‌گردند (۱۱). این الگوریتم بر اساس همین تقسیم

$$H(x) = \sum_{i=1}^m \theta(q_i(x)) q_i(x)^{\gamma q_i(x)} \quad (18)$$

که  $q_i(x) = \max\{0, g_i(x)\}, i = 1, \dots, m$  است و به‌عنوان تابع وابسته به تخطی قیود تعریف می‌شود؛ همچنین  $\theta(q_i(x))$  تابع تخصیص چند مرحله‌ای،  $\gamma(q_i(x))$  توان تابع جریمه و  $g_i(x)$  تابع قیود مسئله می‌باشد (۲۱).

## نتایج و بحث

### نتایج الگوی کشت بهینه

به‌منظور پیش‌بینی بارندگی سه سال آینده، نخست سری زمانی بارش ۱۰ سال گذشته با استفاده از الگوهای سری زمانی SARIMA و برنامه‌ریزی ژنتیکی در دو حالت فصلی و ماهیانه مدل‌سازی شده و با استفاده از معیارهای سنجش و ارزیابی  $RMSE$  و  $DC$  مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این ارزیابی که در جدول ۱ درج شده است، بیانگر برتری مدل برنامه‌ریزی ژنتیکی در حالت ماهیانه بر سایر مدل‌ها می‌باشد.

پس از انتخاب مدل برتر، بارندگی سه سال آینده زراعی پیش‌بینی شد. سری زمانی بارش واقعی دشت سیلاخور در ده سال گذشته و سری زمانی مدل‌سازی شده با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین میزان بارندگی پیش‌بینی شده برای سه سال آینده نیز در این شکل مشخص شده است.

در گام بعد تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی پیش‌بینی شده در دشت سیلاخور برای سه سال زراعی آینده تخمین زده شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، روند بارش و به دنبال آن میزان تغذیه در سه سال آینده به‌صورت کاهشی می‌باشد.

افت تراز آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور، لزوم تغذیه آن در سال‌های آینده را می‌رساند. از طرفی حدود ۵۰٪ برداشت از آب‌های زیرزمینی در این دشت صرف کشت محصولات باغی، مصارف صنعتی و آشامیدنی شده و ۵۰٪ مابقی صرف کشت محصولات زراعی مورد مطالعه در این پژوهش می‌شود؛ بنابراین با در نظرگیری حاشیه اطمینان، ۴۵٪ حجم تغذیه در هر سال به‌عنوان حداقل برداشت تعیین شد. حداکثر برداشت سالانه برای کشت چهار محصول زراعی گندم، جو، شلتوک و ذرت علوفه‌ای نیز معادل ۱۴۰٪ برداشت در سال ۱۳۹۴، یعنی ۲۴۴/۱ میلیون متر مکعب، در نظر گرفته شد. سپس ۱۰۰ مقدار مختلف برای برداشت از آب‌های زیرزمینی با فواصل مساوی، تحت ۱۰۰ سناریو برداشت در هر سال تعیین شد.

$$eval(\bar{x}) = f(\bar{x}) + \sum_{j=1}^m R_{ij} \max[0, g_j(\bar{x})]^2 \quad (13)$$

که  $m$  به‌عنوان تعداد قیود،  $R_{ij}$  به‌عنوان ضریب جریمه وابسته به قید  $j$ ام و گروه تخطی  $i$ ام و  $g_j(\bar{x})$  به‌عنوان قید نامساوی  $j$ ام است. هماییفر و همکاران با استفاده از رابطه  $h_j(\bar{x}) - \varepsilon \leq 0$  قیود نامساوی را به قیود مساوی تبدیل کردند که  $\varepsilon$  یک عدد مثبت کوچک است. میخالویچ (۱۶) نشان داد که کیفیت پاسخ‌ها حساسیت بسیاری به مقادیر این مولفه‌ها دارند.

### جریمه پویا

جونز و هوک (۹) رابطه پویای ۱۴ را برای ارزیابی پاسخ‌ها ارائه دادند که مقدار جریمه‌ها با تولید نسل‌ها افزایش می‌یابد.

$$eval(\bar{x}) = f(\bar{x}) + (Ct)^\alpha SCV(\beta, \bar{x}) \quad (14)$$

$$SCV(\beta, \bar{x}) = \sum_{i=1}^q D_i^\beta(\bar{x}) + \sum_{j=q+1}^m D_j(\bar{x}) \quad (15)$$

$$D_j(\bar{x}) = \begin{cases} 0 & g_i(\bar{x}) \leq 0, 1 \leq i \leq q \\ |g_j(\bar{x})| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$D_j(\bar{x}) = \begin{cases} 0 & -\varepsilon \leq h_j(\bar{x}) \leq \varepsilon, q+1 \leq j \leq m \\ |h_j(\bar{x})| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه  $C, \alpha, \beta$  ثابت بوده و کاربر آن‌ها را تعریف می‌کند. کیفیت پاسخ‌های ممکن، نسبت به تغییرات  $\alpha$  و  $\beta$  بسیار حساس هستند (۳۲).

### جریمه پویا طبقه‌بندی شده

در این نوع جریمه، گروه‌هایی از تخطی تعیین شده و جریمه پویای هر پاسخ با توجه به مقدار تخطی از قیود و شماره نسل تعیین می‌شود. رابطه ۱۷ صورت کلی این‌گونه توابع جریمه را نشان می‌دهد.

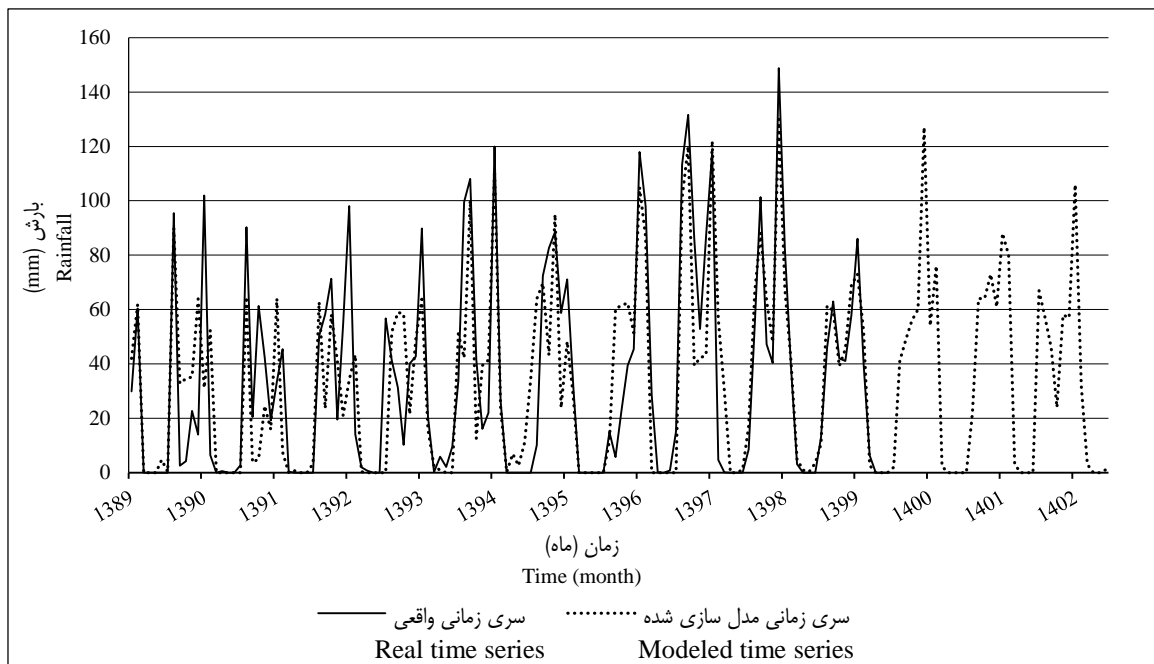
$$F(x) = f(x) + h(k)H(x) \quad x \in S \subset R^n \quad (17)$$

در این رابطه  $f(x)$  تابع هدف اصلی مسئله مقید بوده و  $h(k)$  به‌عنوان مقدار جریمه اصلاح‌شده پویا و  $k$  به‌عنوان شماره تکرار جاری الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.  $H(x)$  نیز به‌عنوان ضریب جریمه مطابق رابطه ۱۸ تعریف می‌شود (۳۱).

جدول ۱- ارزیابی و مقایسه مدل‌های SARIMA و GP

Table 1- Evaluation and comparison of SARIMA and GP models

	مدل (Model)	RMSE	DC
SARIMA	ماهانه (Monthly)	44.4	0.71
	فصلی (Seasonal)	77.2	0.52
GP	ماهانه (Monthly)	23.6	0.91
	فصلی (Seasonal)	52	0.68



شکل ۳- سری زمانی بارش واقعی و مدل‌سازی شده با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی

Figure 3- Real rainfall time series and modeled using GP

جدول ۲- میزان بارندگی پیش‌بینی شده با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی و تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از آن

Table 2- Forecasted rainfall using GP and groundwater recharge

سال Year	بارندگی پیش‌بینی شده Forecasted rainfall (mm)	ارتفاع تغذیه Recharge height (mm)	حجم تغذیه Recharge volume (MCM)
1399-1400	467	75.7	130.4
1400-1401	455	75.3	127
1401-1402	448	72.6	125

شده و سود حاصل از کشت هر محصول با بررسی سال‌های گذشته به صورت نسبی از قیمت محصول در هر سال محاسبه گردید. همان‌طور که شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی، درآمد کشاورزان نیز افزایش می‌یابد؛ اما در برداشت‌های بیشتر از ۲۲۳/۵، ۲۲۵/۲ و ۲۲۵/۱ میلیون متر مکعب به ترتیب برای سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-

حداکثر درآمد کشاورزان و الگوی کشت منطقه نیز برای هر سناریو برداشت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های کل زمین در دسترس برای کشاورزی و میزان برداشت تعیین شده در هر سناریو به دست آمد. همچنین مساحت کشت هر محصول به حداقل ۳۰٪ و حداکثر ۱۷۰٪ سطح زیر کشت فعلی محدود شد. قیمت هر محصول با توجه به میانگین تورم بلندمدت کشور، یعنی ۲۰٪ پیش‌بینی



پیروی از الگوی کشت بهینه، درآمد کشاورزان منطقه ۱۸٪ افزایش می‌یابد؛ به صورتی که، سطح کشت محصولات گندم و ذرت علوفه‌ای نسبت به سطح کشت فعلی تا محدوده مجاز تعریف شده افزایش یافته و سپس به منظور حداکثرسازی تابع هدف، به دلیل صرفه اقتصادی محصول شلتوک نسبت به جو، سطح کشت آن افزوده می‌شود.

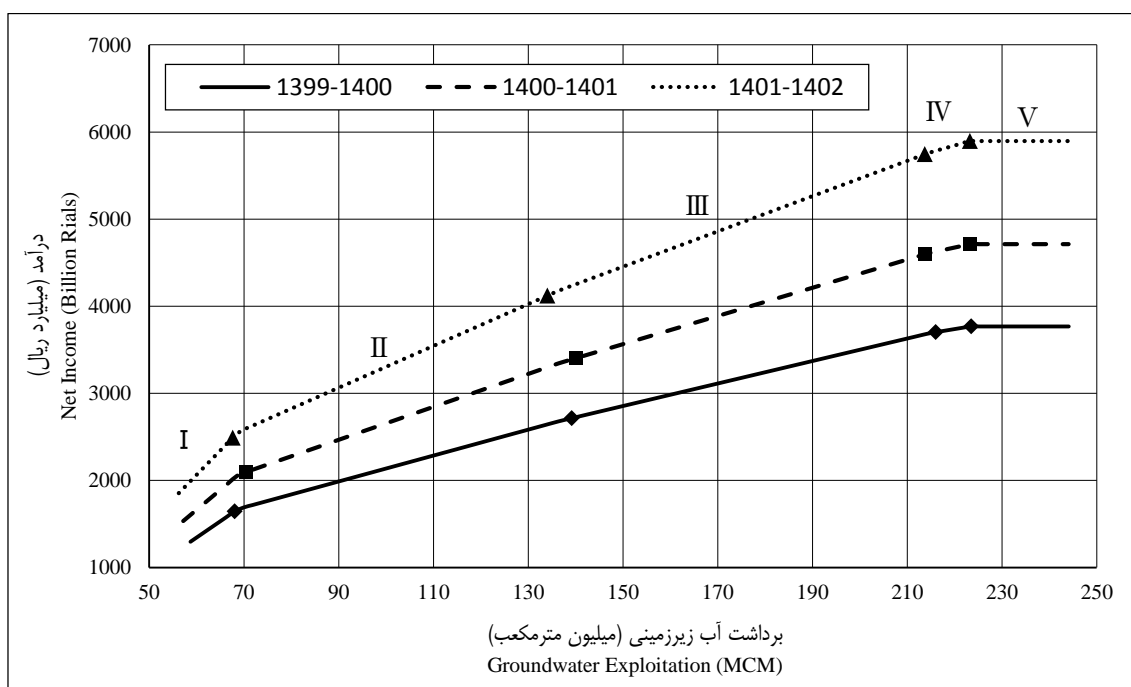
#### نتایج بررسی الگوریتم‌ها و توابع جریمه

پس از تعیین درآمد کشاورزان در سناریوهای برداشت مختلف برای سه سال آینده، عملکرد دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای حداکثرسازی درآمد کشاورزان و رسیدن به جواب‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی بررسی شد؛ در این راستا به‌منظور نامقیدسازی مسئله تعیین الگوی کشت، محدودیت‌های زمین قابل کشت و آب قابل برداشت در هر سناریو به‌صورت توابع جریمه ضرب شونده تعریف شدند. همچنین تعداد جمعیت و ضرایب عملگرهای تقاطع و جهش در هر دو الگوریتم یکسان در نظر گرفته شدند. همان‌طور که در شکل ۷، تعداد تکرارهای دو الگوریتم برای سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نشان داده شده است، به‌طور کلی الگوریتم ازدحام ذرات در این مسئله بسیار سریع‌تر به جواب می‌رسد. به‌طور میانگین تعداد تکرارهای الگوریتم ازدحام ذرات برای حل هر سناریو در این مسئله، ۳۸٪ تعداد تکرارهای الگوریتم تکامل تفاضلی است. الگوریتم تکامل تفاضلی با تغییر شرایط مسئله، در تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب، تغییرات محسوسی از خود نشان می‌دهد.

۱۴۰۱ محدودیت کل زمین قابل کشت مانع از افزایش سطح زیر کشت محصولات شده و با افزایش برداشت، درآمد کشاورزان ثابت می‌ماند. همچنین منحنی درآمد هر سال از پنج خط تشکیل شده است که در طول هر پاره خط، سطح کشت یک محصول افزایش پیدا کرده و باعث افزایش درآمد می‌شود. در طول پاره خط پنجم نیز سطح کشت تمام محصولات ثابت باقی‌مانده که به دنبال آن درآمد نیز ثابت می‌شود. همچنین به دلیل در نظرگیری تورم در تخمین قیمت سه سال آینده محصولات کشاورزی، منحنی درآمد در طی سال‌های متوالی افزایش یافته است.

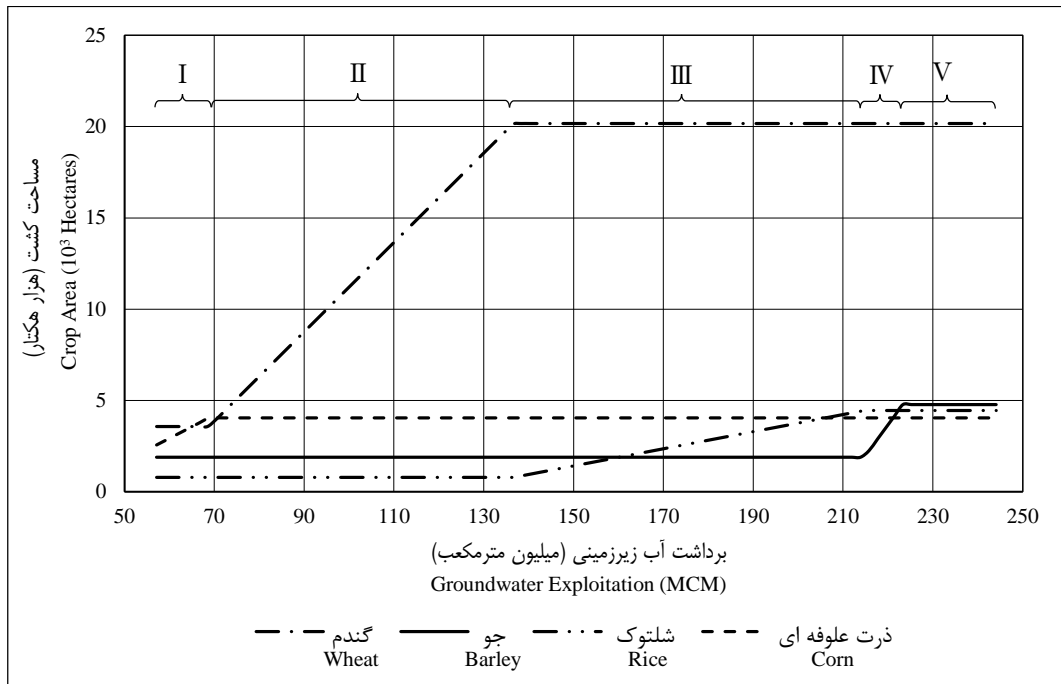
شکل ۵ مساحت کشت بهینه حاصل از برنامه‌ریزی خطی را در سناریوهای برداشت مختلف برای سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ نشان می‌دهد. ترتیب تغییر مساحت کشت محصولات بیانگر آن است که اولویت افزایش سطح کشت یک محصول هم‌زمان افزایش میزان برداشت، رابطه مستقیمی با به‌صرفه بودن آن محصول از نظر سود خالص و مصرف آب دارد؛ به بیان دیگر با مصرف مقدار مشخصی آب، به ترتیب محصولات ذرت، گندم، شلتوک و جو بیشترین درآمد را نصیب کشاورزان می‌کنند. روند کلی تغییرات سطح کشت محصولات با افزایش برداشت آب برای دو سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نیز به همین صورت است.

با مقایسه الگوی کشت بهینه حاصل از برنامه‌ریزی خطی و الگوی کشت بهینه فعلی که در شکل ۶ نشان داده شده است می‌توان دریافت، در صورت عدم تغییر میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی و

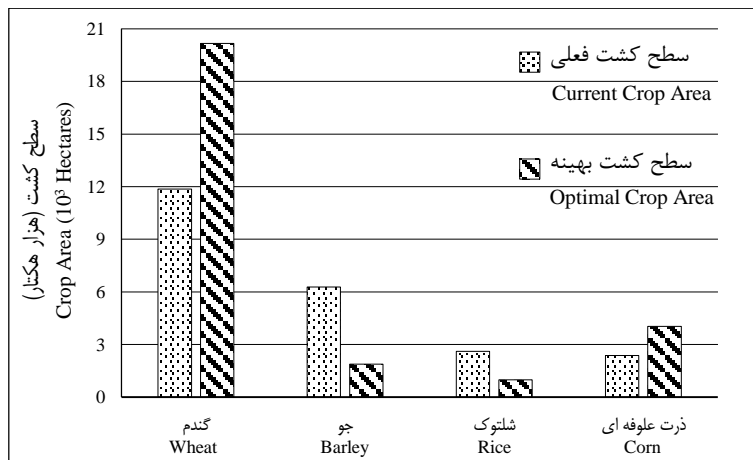


شکل ۴- درآمد خالص کشاورزان متناسب با برداشت آب

Figure 4- The net income of farmers in proportion to water exploitation



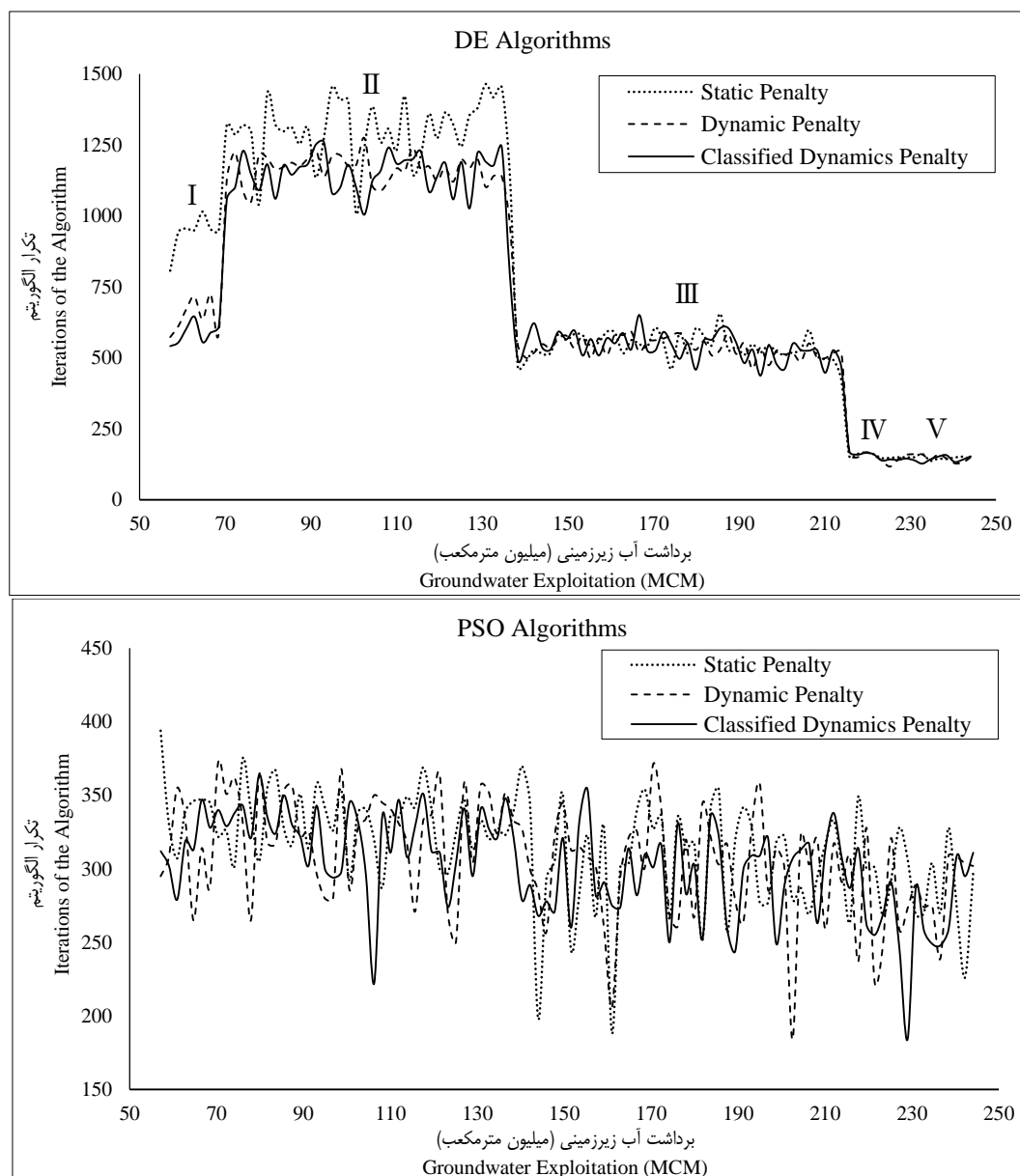
شکل ۵- الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰  
 Figure 5- Optimal cropping pattern of agricultural products in 2021-2022



شکل ۶- الگوی کشت فعلی و بهینه با میزان برداشت آب یکسان  
 Figure 6- Current and optimal cropping pattern with the same amount of water exploitation

اعمال توابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده، پویا و ساکن به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش تعداد تکرارهای الگوریتم برای رسیدن به پاسخ بهینه حاصل از برنامه‌ریزی خطی ایفا می‌کنند. روند کلی تعداد تکرارهای دو الگوریتم برای رسیدن به پاسخ‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی در دو سال دیگر نیز به همین صورت است.

منظور از تغییر شرایط مسئله، تغییر محصول انتخابی برای افزایش سطح کشت با افزایش برداشت است. پنج ناحیه متناظر در شکل‌های ۴ و ۵ که شرایط مسئله در آن‌ها تغییر می‌کند نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. در نظر گرفتن یک تابع جریمه یکتا برای تمام مسائل بهینه‌سازی به دلیل حساسیت بالای کیفیت پاسخ‌ها به پارامترهای جریمه، غیرممکن است؛ اما طبق نتایج مندرج در شکل ۷،



شکل ۷- تعداد تکرار الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات با سه نوع تابع جریمه برای سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰  
 Figure 7- Number of iterations of DE and PSO algorithms with three types of penalty functions for 2021-2022

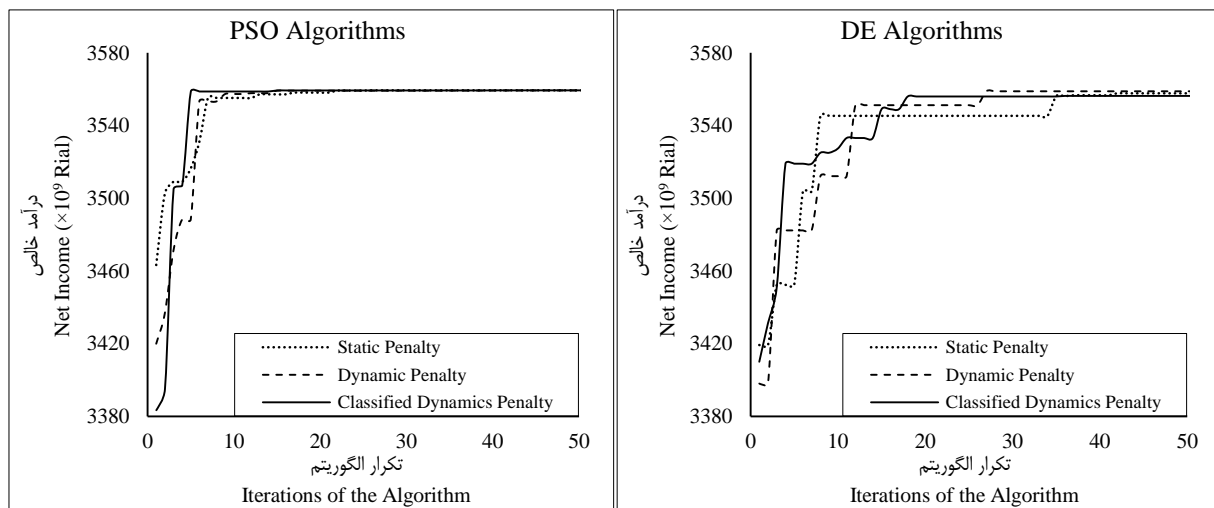
کشاورزان، در ۱۰۰ تکرار ابتدایی دو الگوریتم، نشان داده شده است. این نتایج متعلق به حداکثرسازی درآمد در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و متناسب با سناریو برداشت ۱۵۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، الگوریتم تکامل تفاضلی با اعمال تابع جریمه ساکن پس از ۳۶ تکرار و با اعمال تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده پس از ۱۷ تکرار به پاسخ بهینه همگرا می‌شود که بیانگر تأثیر توابع جریمه در فرایند بهینه‌سازی این الگوریتم می‌باشد.

نتایج مندرج در جدول ۳ حاکی از آن است که الگوریتم تکامل تفاضلی همان‌طور که نسبت به تغییر شرایط مسئله واکنش نشان می‌داد، در اینجا نیز با تغییر تابع جریمه از حالت ساکن به پویای طبقه‌بندی شده، تعداد تکرارهای آن برای رسیدن به جواب برنامه‌ریزی خطی به طور میانگین ۱۱٪ کاهش می‌یابد؛ در مقابل الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به تغییر تابع جریمه واکنش محسوسی نشان نداد و تکرارهای آن به طور میانگین تنها ۳٪ کاهش می‌یابد. در شکل ۸ تاریخچه زمانی فرایند بهینه‌سازی درآمد خالص

جدول ۳- میانگین تعداد تکرار الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای تعیین الگوی کشت بهینه در ۱۰۰ سناریو

Table 3- Average number of iterations of DE and PSO algorithms to determine the optimal cropping pattern in 100 scenarios

سال Year	الگوریتم Algorithm	تابع جریمه Penalty Function		
		ساکن Static	پویا Dynamic	پویای طبقه‌بندی شده Classified Dynamics
1399-1400	DE	779	710	701
	PSO	307	305	300
1400-1401	DE	780	707	696
	PSO	315	308	302
1401-1402	DE	791	704	698
	PSO	316	308	306
میانگین درصد کاهش تعداد تکرار الگوریتم نسبت به تعداد تکرار با جریمه ساکن		DE	2%	3%
The average percentage reduction of the number of iterations of the algorithm compared to the number of iterations with Static Penalty		PSO	10%	11%



شکل ۸- تاریخچه زمانی فرایند تعیین حداکثر درآمد کشاورزان

Figure 8- Time history of the process of determining the maximum income of farmers

شده و میزان برداشت در سال‌های گذشته تعیین شد. سپس الگوی کشت بهینه با تابع هدف حداکثرسازی درآمد کشاورزان و محدودیت‌های آب و زمین در دسترس برای هر سناریو برداشت، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به دست آمده و عملکرد دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات با سه نوع تابع جریمه ساکن، پویا و پویای طبقه‌بندی شده برای رسیدن به جواب‌های به دست آمده از برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند الگوی کشت منطقه بهینه نبوده و با بهینه‌سازی آن، می‌توان درآمد کشاورزان را تا ۱۸٪ افزایش داد. همچنین با افزایش برداشت آب، الگوی کشت منطقه به سمت محصولات آب‌بر خواهد رفت. نتایج بررسی الگوریتم‌ها

الگوریتم ازدحام ذرات نیز با اعمال تابع جریمه ساکن پس از ۱۲ تکرار و با اعمال تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده پس از ۷ تکرار به پاسخ بهینه میل می‌کند که این موضوع بیانگر تأثیر کم تغییر توابع جریمه در این الگوریتم می‌باشد. روند کلی تاریخچه زمانی فرایند حداکثرسازی درآمد کشاورزان در سایر سناریوهای برداشت نیز برای هر دو الگوریتم به همین صورت است.

### نتیجه گیری

در این پژوهش ۱۰۰ سناریو برداشت مختلف از آب‌های زیرزمینی برای سه سال زراعی آینده با توجه به تغذیه ناشی از بارندگی پیش‌بینی

در نهایت پیشنهاد می‌شود سیاست‌های اقتصادی حاکم بر بخش کشاورزی با در نظر گرفتن میزان سود خالص محصولات کشاورزی نسبت به میزان آب مصرفی آن‌ها اتخاذ شود که در صورت افزایش برداشت آب از منابع زیرزمینی، الگوی کشت به سمت محصولات آب‌بر نرود.

و توابع جریمه نیز حاکی از آن است که در حل این مسئله الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی در ۸۴٪ سناریوها با تعداد تکرار کمتری به پاسخ بهینه می‌رسد. اعمال توابع جریمه طبقه‌بندی شده نیز تعداد تکرارهای الگوریتم تکامل تفاضلی را ۱۱٪ و تعداد تکرارهای الگوریتم ازدحام ذرات را ۳٪ نسبت به استفاده از جریمه ساکن کاهش می‌دهد.

## منابع

- 1- Alabdulkader A.M., Al-Amoud A.I., and Awad F.S. 2012. Optimization of the cropping pattern in Saudi Arabia using a mathematical programming sector model. *Agricultural Economics* 58(2): 56-60.
- 2- Amini A., and Mirzaei M. 2014. Consequences of water deficiency crisis and become dry of Zayande-Roud in rural areas (Case study: Baraan plain in eastern Isfahan). *Journal of Community Development* 5(2):157-180. (In Persian with English abstract)
- 3- Birhanu K., Alamirew T., Olumana M.D., Ayalew S., and Aklog D. 2015. Optimizing cropping pattern using chance constraint linear programming for koga irrigation dam, Ethiopia. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 10.
- 4- Box G.E., Jenkins G.M., and Reinsel G.C. 2011. *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- 5- Chen K.Y., and Wang C.H. 2007. A hybrid SARIMA and support vector machines in forecasting the production values of the machinery industry in Taiwan. *Expert Systems with Applications* 32(1): 254-264.
- 6- Coello C.A.C. 2002. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 191(11): 1245-1287.
- 7- Hekmatnia M., Hosseini S.M., and Safdari M. 2020. Water Resource Management of the Agricultural Sector in Sistan and Baluchestan Province: a Virtual Water Perspective. *Journal of Irrigation & Water Engineering* 11(41): 137-149. (In Persian with English abstract)
- 8- Homaifar A., Qi C.X., and Lai S.H. 1994. Constrained optimization via genetic algorithms. *Simulation* 62(4): 242-253.
- 9- Joines J.A., and Houck C.R. 1994. On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's. p. 579-584. The first IEEE conference on evolutionary computation, June 1994. IEEE world congress on computational intelligence.
- 10- Kaur B., Sidhu R.S., and Vatta K. 2010. Optimal crop plans for sustainable water use in Punjab. *Agricultural Economics Research Review* 23: 273-284.
- 11- Kennedy J., and Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization. p. 1942-1948. ICNN'95-International Conference on Neural Networks, November 1995.
- 12- Komasi M., and Sharghi S. 2019. Recognizing factors affecting decline in groundwater level using wavelet-entropy measure (case study: Silakhor plain aquifer). *Journal of Hydroinformatics* 21(3): 510-522.
- 13- Koza J.R., and Poli R. 1992. *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. MIT press.
- 14- Lu H.W., Huang G.H., and He L. 2010. Development of an interval-valued fuzzy linear-programming method based on infinite  $\alpha$ -cuts for water resources management. *Environmental Modelling & Software* 25(3): 354-361.
- 15- Majidi N., Alizadeh A., and Ghorbani M. 2011. Determining The Optimum Cropping Pattern In Same Direction With Water Resources Management Of Mashhad-CHenaran Plain. *Journal of Water and Soil* 25(4): 776-785. (In Persian with English abstract)
- 16- Michalewicz Z. 1995. Genetic algorithms, numerical optimization, and constraints. p. 151-158. The 6<sup>th</sup> international conference on genetic algorithms, July 1995. Morgan Kaufman San Mateo.
- 17- Mohammadian F., Shahnooshi N., Ghorbani M., and Aghel H. 2002. Development of a sustainable crop pattern in Fariman-Torbat Jam plain. *Journal of Agricultural Economics* 4(2): 1-41. (In Persian)
- 18- Moradi H.R., Jalili K., and Bozorg Hadad O. 2017. Optimization of Land and Irrigation Water Allocation Based on Water Balance Approach Using Linear Programming. *Journal of Water and Soil* 31(2): 372-385. (In Persian with English abstract)
- 19- Nourani V., Ranjbar S., and Tootoonchi F. 2016. Change Detection of Hydrological Processes Using Wavelet-Entropy Complexity Measure Case Study: Urmia Lake. *Journal of Civil and Environmental Engineering University of Tabriz*, 45(3): 75-86. (In Persian with English abstract)
- 20- Osama S., Elkholy M., and Kansoh R.M. 2017. Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4):557-566.
- 21- Parsopoulos K.E., and Vrahatis M.N. 2002. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems. *Intelligent Technologies–Theory and Application: New Trends in Intelligent Technologies* 76(1): 214-

- 220.
- 22- Price K., Storn R.M., and Lampinen J.A. 2006. Differential evolution: a practical approach to global optimization. Springer Science & Business Media.
- 23- Rabani F., and Alikhani A. 2010. Regional Analysis of Climate Change (Drought) in the Karaj River Basin. Water challenge scientific conference in Qom. (In Persian)
- 24- Raju K.S., and Kumar D.N. 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. *Water Resources Management* 18(2): 163-176.
- 25- Reddy M.J., and Kumar D.N. 2007. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal* 52(4): 686-701.
- 26- Selle B., and Muttill N. 2011. Testing the structure of a hydrological model using Genetic Programming. *Journal of Hydrology* 397(1-2): 1-9.
- 27- Shumway R.H., and Stoffer D.S. 2017. Time series analysis and its applications: with R examples. Springer.
- 28- Siasar H., & Honar T. 2017. Optimization of Water Allocation Pattern crops Using a Genetic Algorithm. Proceedings of 3<sup>th</sup> International Conference on Agricultural Engineering and Natural Resources, July 2017. Ghazvin, Iran. (In Persian with English abstract)
- 29- Storn R., and Price K. 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization* 11(4): 341-359.
- 30- Vahidi A. 2012. The Impact of Climate Change and Drought on Iran's Water Resources. Proceedings of 5<sup>th</sup> National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management, 2012. The Iranian Society of Irrigation & Water Engineering Kerman. Iran. (In Persian)
- 31- Yang J.M., Chen Y.P., Horng J.T., and Kao C.Y. 1997. Applying family competition to evolution strategies for constrained optimization. p. 201-211. International conference on evolutionary programming, April 1997. Springer, Berlin, Heidelberg.
- 32- Yeniay Ö. 2005. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms. *Mathematical and computational Applications* 10(1): 45-56.
- 33- Yoosefdoost I., Mohamadrezapuor O., and Ebrahimi M. 2016. Applying Genetic Algorithms in Determining Optimal Cropping Pattern in Different Weather Conditions in Qazvin Plain. *Journal of Water Research in Agriculture* 30(3): 317-331. (In Persian with English abstract)

## Optimization of Cropping Pattern through Groundwater Resources Management Using DE and PSO Algorithms

M. Komasi<sup>1\*</sup> - A. Alizadefard<sup>2</sup>

Received: 23-02-2021

Accepted: 04-05-2021

**Introduction:** The occurrence of successive droughts, along with increasing water needs and lack of proper management of water resources has caused a water crisis that has various environmental and economic consequences. In addition to the drought, the change in the cropping pattern towards water crops has also made the water crisis the first critical phenomenon in recent years in the community, which has a direct impact on the agricultural sector as the largest consumer of water. Therefore, optimizing the cropping pattern is one of the most important factors in managing water resources and coping with water shortages. In this study, to determine the optimal cropping pattern of major crops in Silakhor plain in the next three years using two approaches using Linear Programming and Meta-Heuristic Algorithms.

**Materials and Methods:** In the first step, in order to determine the optimal cropping pattern with the aim of maximizing farmers' incomes in the next three years and the limited water and land available, the amount of rainfall recharge is used as a criterion to determine the water exploitation interval and determine the minimum and maximum exploitation each year. In order to forecast rainfall, SARIMA time series models and Genetic Programming were used considering the data of the last 10 years in both seasonal and monthly modes, and according to RMSE and D.C. criteria, a better model was selected. Then, for each crop year, 100 exploitation scenarios were determined according to the amount of groundwater recharge caused by rainfall and the amount of exploitation in previous years.

In the second step, Linear Programming was used to determine the optimal cropping pattern with the aim of maximizing farmers' incomes and limitations of exploitable water in each scenario and arable land. The price of each product is projected according to the average long-term inflation of the country, i.e., 20%, and the profit from the cultivation of each product was calculated as a proportion of the price of the product in each year by examining the previous years. Finally, the performance of three types of Static, Dynamic, and Classified Dynamics Penalty Functions into two algorithms, Differential Evolution and PSO was investigated to achieve the results obtained from Linear Programming. Static penalty functions use a constant value during the optimization process, whereas in dynamic penalty functions, the fines are modified during the process and depend on the number of generations. In the classified dynamics penalty, groups of violations are also determined, and the penalty of each response is determined according to the amount of violation of the restrictions and the generation number.

**Results and Discussion:** The results show that with increasing groundwater exploitation, farmers' incomes also increase; However, in the exploitation of more than 223.5, 222.2, and 225.1 million cubic meters for the cropping years 2020-2021, 2021-2022, and 2022-2023, respectively, the limitation of the total arable land has prevented the increase of the area under cultivation, and by increasing exploitation, farmers' incomes remain stable. Also, in order to cultivate four crops of wheat, barley, rice, and corn with the current area under cultivation in Silakhor plain, 142 million cubic meters of water is harvested annually from underground sources. By optimizing the cropping pattern for the four crops studied, with the current water exploitation, the income of farmers in the region will increase by 18%.

In general, the PSO algorithm answers this problem much faster. The average number of iterations of the PSO algorithm to solve each scenario in this problem is 38% of the number of iterations of the Differential Evolution algorithm. Overall, in solving this problem, the PSO algorithm has performed better in 84% of the scenarios. In penalty functions, the best performance in both algorithms belongs to the classified dynamics, dynamic, and static penalty functions, respectively. By changing the penalty function from static to classified dynamics penalty function, the number of iterations of the Differential Evolution algorithm to achieve the Linear Programming solution is reduced by an average of 11%; In contrast, the PSO algorithm did not react significantly to the change in the penalty function, and its repetitions decreased by an average of only 3%.

1 and 2- M.Sc. Student and Associate Professor of Water Engineering and Hydraulic Structures, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: komasi@abru.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2021.68763.1025

**Conclusion:** The results show that the cropping pattern of the region is not optimal, and with the increase of water exploitation, it will move towards the cultivation of water products. Also, by optimizing the cultivation pattern of the region, farmers' incomes can be increased. Examination of Differential Evolution and PSO algorithms with three types of penalty functions also show that using the classified dynamics penalty function in the PSO algorithm can have good results.

**Keywords:** Groundwater, Linear Programming, Metaheuristic algorithms, Optimization, Silakhor plain