

مقایسه کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات برای تخصیص بهینه آب به زمین‌های کشاورزی در شرایط محدودیت آب

بهرام سعیدیان^{۱*}، محمد سعدی مسگری^۲، مصطفی قدوسی^۳

- ۱- کارشناس ارشد سیستم اطلاعات مکانی - دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
- ۲- دانشیار گروه سیستم اطلاعات مکانی - دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی (عضو قطب علمی فناوری اطلاعات مکانی)
- ۳- دانشجوی دکتری سیستم اطلاعات مکانی - دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۶

چکیده

با توجه به این که بخش کشاورزی بیشترین مصرف کننده آب است، اتخاذ روش مناسب و توسعه مدلی برای تخصیص بهینه آب به محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین گام‌ها در جهت مدیریت منابع آب است. هدف اصلی این مقاله تخصیص بهینه آب به محصولات کشاورزی در شرایط محدودیت آبی و با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات و مقایسه کارایی آن‌ها است. روش انجام تحقیق بدین صورت است که ابتدا داده‌های لازم توسط توابع و تحلیل‌های مکانی سیستم اطلاعات مکانی (GIS) تهیه و آماده‌سازی می‌شوند. سپس آورد منابع آبی استخراج می‌گردد و میزان آب مورد نیاز هر کدام از محصولات کشاورزی محاسبه می‌شود. سپس بر اساس مساحت و عملکرد محصول هر زمین و درآمد حاصله از هر محصول، تابع هدف محاسبه و با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات آورد منابع آب به زمین‌های کشاورزی تخصیص داده می‌شود. این تخصیص به گونه‌ای است که سود اقتصادی حاصل از محصولات تمام زمین‌ها حداکثر شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که سود حاصل از تخصیص با الگوریتم انبوه ذرات، ۱۰۶۹۳۸۹۷۶ ریال بیشتر از الگوریتم ژنتیک است. همچنین نتایج تست همگرایی الگوریتم‌ها، حاکی از سرعت همگرایی بسیار بالاتر انبوه ذرات است. نتایج تست تکرارپذیری الگوریتم‌ها نیز، ثبات بالاتر الگوریتم انبوه ذرات را نمایان می‌کند (واریانس جواب‌های نرمال شده الگوریتم ژنتیک در ۱۰ اجرا ۰/۱۵۱ و الگوریتم انبوه ذرات ۰/۱۰۴ است). با توجه به نتایج ارزیابی زمان اجرای الگوریتم‌ها در دو حالت تعریف شرط توقف (تعداد اجرا و رسیدن به دقتی خاص)، الگوریتم انبوه ذرات در هر دو حالت زمان اجرای کمتری (به میزان به ترتیب ۳۲۰ و ۲۷۲ ثانیه) دارد. در مجموع الگوریتم انبوه ذرات در تمام جنبه‌های بررسی شده برتری قابل توجهی نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. تنها مسئله در اجرای این الگوریتم، تخصیص ندادن هیچ آبی به برخی از زمین‌ها است. در واقع با توجه به این موضوع، به نظر می‌رسد که در مواقع کمبود آب برای رسیدن به سود اقتصادی بیشتر، بهتر است به جای کم‌آبیاری، برخی از زمین‌ها خشک شوند.

کلید واژه‌ها: تخصیص آب کشاورزی، محدودیت آب، GIS، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم انبوه ذرات.

* نویسنده مسئول: تهران - خیابان ولیعصر - تقاطع میرداماد غربی - دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، کد پستی: ۱۹۹۶۷۱۵۴۳۳

تلفن: ۰۹۱۹۶۷۳۱۵۲۵

۱- مقدمه

مشترک است، برای رسیدن به هدفی خاص بین این حوضه‌ها تخصیص می‌یابد. تحقیقاتی که به تخصیص آب در سطح کاربری یا حوضه می‌پردازند، متمرکز روی تصمیم‌گیری‌های کلان مصرف آب هستند.

برخلاف تحقیقات فوق، تحقیقات دیگری نیز وجود دارد که به تخصیص آب به واحدهای مکانی ریزتر متمرکز بوده‌اند. [۱۱] تخصیص آب به شبکه‌های آبیاری را انجام داده است. همچنین [۱۲] و [۱۳] تخصیص آب بین شبکه‌ها و زیرناحیه‌های مختلف و بین محصولات هر شبکه یا زیرناحیه را انجام داده‌اند. در این دسته از تحقیقات، نوع محصولات و یا زمان کشت آن‌ها در هر زمین لحاظ نشده است. به‌منظور لحاظ کردن این موارد نیاز است تا تخصیص در سطح مزرعه انجام شود. [۴] تغییر الگوی کشت و نوع محصولات در سطح مزرعه را با توجه به آب در دسترس انجام داده است. علاوه بر این تحقیقات، [۱۴، ۱۵ و ۱۶] نیز به تغییر الگوی کشت و نوع محصول در واحدهای مکانی مختلف، با توجه به محدودیت‌های مختلف که یکی از اصلی‌ترین آن محدودیت آب است، پرداخته‌اند. مشکل اصلی این دسته از تحقیقات این است که با برآورد آب، پیشنهاد تغییر محصول را در سال‌های آتی می‌دهند. [۱۷] نیز سطح زیر کشت برای هر مزرعه را بر اساس آب تأمین شده تعیین کرده است که در این تحقیق نیز آب موجود به محصولات تخصیص می‌یابد و در ادامه طبق آب تخصیصی به هر محصول و با توجه به راندمان و حبابه مزارع و آب تأمینی از چاه‌ها و قنات‌ها سطح زیر کشت هر زمین تعیین می‌شود.

روال موردنظر در تحقیق حاضر این است که با برآورد آب موجود، تخصیص بهینه آب در سطح مزرعه و با لحاظ کردن نوع محصول و مرحله رشد محصول هر زمین انجام می‌شود که با وضعیت موجود وفق دارد و با روش‌های تغییر الگوی کشت متفاوت می‌باشد.

بیشتر کشورهای دنیا با مشکل کمبود آب مواجه هستند که ایران نیز یکی از کم‌آب‌ترین آن به شمار می‌آید [۱]. در چنین شرایطی مدیریت صحیح منابع آب و بهره‌برداری بهینه از این منابع بارزش به‌خصوص در ایران ضروری است. مصرف‌کنندگان آب بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب، خدمات، صنعت و غیره هستند که بیشترین میزان مصرف آب مربوط به کشاورزی است [۲، ۳ و ۴]؛ لذا تخصیص بهینه‌ی آب به مزارع لازمه اصلی مدیریت آب کشور است. در تخصیص آب، عرضه‌کننده با توجه به محدودیت‌هایی از قبیل میزان آب قابل استحصال از منابع آبی مختلف و حداکثر کردن درآمد حاصل از آب، برای تخصیص آن تصمیم می‌گیرد. توسعه مدلی که بتواند تأثیر این عوامل را همزمان در نظر بگیرد، به‌منظور بررسی تأثیر سیاست‌های مختلف بر تخصیص آب اهمیت خاصی دارد [۵].

در شرایط موجود، اغلب تخصیص آب به زمین‌ها بر اساس کنترل زمان آبیاری و با توجه به مساحت زمین‌ها یا حبابه‌ها صورت می‌گیرد. در این شرایط نوع محصول و دوره کشت لحاظ نمی‌شود و از سویی دیگر با توجه به کمبود آب، مدیریت بهینه‌ای روی آبیاری، مخصوصاً با دید صرفه‌ی اقتصادی کل صورت نمی‌گیرد.

تخصیص آب به محصولات کشاورزی به دلیل محدودیت‌های منابع آب، افزایش خشکسالی‌ها و بسیاری از عوامل دیگر، مورد توجه زیادی قرار گرفته و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. [۵ و ۶] به تخصیص آب به کاربری‌های مختلف (از قبیل کشاورزی، صنعت، برقایی، خدماتی و غیره) پرداخته‌اند. در این دسته از تحقیقات، میزان آب تخصیصی به هر کاربری در راستای بیشینه کردن سود اقتصادی تعیین می‌شود. [۷، ۸، ۹ و ۱۰] به تخصیص آب بین حوضه‌های مختلف پرداخته‌اند. در این دسته از تحقیقات، آبی که بین حوضه‌های مختلف

زمین‌های کشاورزی، به‌عنوان ریزترین واحد مکانی تصمیم‌گیری در شرایط کم‌آبی و با هدف حداکثر سازی سود اقتصادی و همچنین مقایسه کارایی این دو الگوریتم می‌باشد. نوآوری اصلی این تحقیق در استفاده از قطعه زمین به‌عنوان ریزترین واحد مکانی آبیاری و تخصیص آب موجود در هر مقطع زمانی به شکل پویا به زمین‌ها می‌باشد. از سویی دیگر مقایسه کارایی دو الگوریتم فرا ابتکاری رایج ژنتیک و انبوه ذرات برای بهینه‌سازی تخصیص آب، از جنبه‌های مثبت این تحقیق است.

۲- مبانی نظری

در این بخش مبانی الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات و محاسبه‌ی نیاز آبی گیاه و نیاز آبی آبیاری ارائه می‌شود.

۲-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک از نظریه تکامل داروین الهام گرفته شده است [۲۴، ۲۵ و ۲۶] و امروزه به‌طور گسترده در حل مسائل بهینه‌سازی و فرآیندهای یادگیری به کار می‌رود [۲۴ و ۲۵]. در طبیعت از ترکیب کروموزوم‌های مناسب، نسل‌های بهتری پدید می‌آیند. در این بین گاهی جهش‌هایی نیز در کروموزوم‌ها رخ می‌دهد که ممکن است باعث بهتر شدن نسل بعدی شوند. الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از این ایده اقدام به حل مسائل می‌کند [۲۵]. شکل (۱-الف)، مراحل حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در ادامه به بیان عملگرهای مختلف این الگوریتم پرداخته می‌شود.

• تعریف ژن^۵: هر کدام از پارامترهای تصمیم (یعنی پارامترهایی که انتخاب و

در تخصیص آب کشاورزی، به دلیل محدودیت منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، استفاده از روش‌های کم‌آبیاری^۱ امری اجتناب‌ناپذیر است [۵] و در تحقیقات از آن به‌عنوان روشی مؤثر یاد شده و به لزوم استفاده از آن در شرایط کمبود آب اشاره شده است [۲ و ۳]. اصلاح برنامه‌ریزی آبیاری نه بر اساس نیاز آبی کامل گیاه^۲، بلکه بر اساس مصرف بهینه آب اختصاص‌یافته، رویکرد مناسبی خواهد بود که از طریق کم‌آبیاری قابل تحقق است [۱۸]. در این تحقیق نیز به دلیل محدودیت شدید منابع آب از کم‌آبیاری استفاده شده است.

با توجه به حجم محاسبات مربوط به تابع هدف، محدودیت‌های موجود در امر تخصیص و تنوع بسیار زیاد حالات تخصیص (فضای جستجوی وسیع)، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌تواند راه‌حل مناسبی برای حل مسئله‌ی تخصیص آب در شرایط محدودیت آب باشد. [۵، ۱۳، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳] از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای مدیریت منابع آب و تخصیص آب استفاده کرده‌اند و کارایی مناسب این الگوریتم‌ها را برای این حوزه نشان داده‌اند؛ ولی تمرکز این تحقیقات روی تخصیص آب به تک تک زمین‌های کشاورزی نبوده است.

هیچ‌کدام از تحقیقات فوق به موضوع استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری برای تخصیص آب موجود به مزارع در شرایط کم‌آبی و شرایط مقطعی موجود پرداخته‌اند؛ لذا هدف اصلی تحقیق حاضر استفاده از دو الگوریتم فرا ابتکاری رایج‌تر ژنتیک (GA^۳) و انبوه ذرات (PSO^۴) برای تخصیص آب قابل استحصال از منابع مختلف به

^۱ Deficit irrigation

^۲ crop water requirement

^۳ Genetic Algorithm

^۴ Particle Swarm Optimization

^۵ Gene

تغییر داده می‌شوند.

۲-۲- الگوریتم انبوه ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات اولین بار توسط ابرهارت^۶ و کندی^۷ ارائه شده است. این الگوریتم الهام گرفته از حرکت دسته‌جمعی پرندگان، ماهی‌ها و حشرات است [۲۷] و به‌نوعی الهام گرفته از تحقیق هپنر^۸ و گرناندر^۹ بر روی فوج پرندگان است [۲۸]. شهرت انبوه ذرات به علت سادگی آن است. این الگوریتم مانند سایر الگوریتم‌های مبتنی بر ازدحام، شامل تعدادی المان است. این المان‌ها در انبوه ذرات دارای موقعیت و سرعت هستند و به‌عنوان ذره در نظر گرفته می‌شوند. در الگوریتم انبوه ذرات، ذرات به سمت موقعیت‌هایی در فضا می‌روند که تابع بهینگی بالاتری دارد. هر ذره یک حافظه دارد و حرکت آن ترکیبی است از حرکت کنونی خود، حرکت به‌سوی بهترین موقعیتی که تاکنون خود ذره مشاهده کرده است و نیز حرکت به‌سوی بهترین موقعیت تمامی ذره‌ها (اگر همه‌ی ذرات به‌عنوان یک جامعه در نظر گرفته شود). مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی، انبوه ذرات نیز یک تابع ارزیابی بهینگی دارد که بر طبق آن به موقعیت هر ذره یک بهینگی تعلق می‌گیرد [۲۹]. در شکل (۱-ب) روند حل مسئله بهینه‌سازی توسط الگوریتم انبوه ذرات نشان داده شده است.

تعیین مقدار آن‌ها نقشی در تابع بهینگی دارند) در این الگوریتم به‌عنوان یک ژن تلقی می‌شوند.

- **تعریف کروموزوم^۱:** مجموعه‌ای شامل تمامی ژن‌ها (پارامترهای تصمیم) که مقاردهی می‌شوند، یک کروموزوم نامیده می‌شود که در اساس یک جواب ممکن از مسئله است.
- **محاسبه تابع بهینگی (برازش)^۲:** مرحله‌ی برازش برای هر کروموزوم مقدار تابع بهینگی را محاسبه می‌کند که همان احتمال ترکیب آن برای تولید نسل‌های آینده است. بنابراین کروموزوم‌های بهینه شانس بیشتری برای ترکیب با دیگر کروموزوم‌ها دارند.
- **انتخاب^۳:** وظیفه این عملگر انتخاب کروموزوم‌هایی از میان جمعیت موجود برای ترکیب شدن است. کروموزوم‌های با تابع بهینگی بیشتر، شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارند.
- **ترکیب (ادغام)^۴:** این عملگر کروموزوم‌های انتخابی را باهم ترکیب می‌کند تا شاید کروموزوم‌های فرزند حاصل از ترکیب، از کروموزوم‌های والد بهتر باشد. به‌طور معمول عملگر ترکیب روی یک جفت از کروموزوم‌ها عمل می‌کند و یک یا دو فرزند برای هر جفت تولید می‌شود.
- **جهش^۵:** به‌منظور اجتناب از همگرایی به بهینه محلی و ایجاد تنوع و گوناگونی در جمعیت با استفاده از عملگر جهش یک تعداد از کروموزوم‌های به‌دست‌آمده از ترکیب

⁶. Eberhart

⁷. Kennedy

⁸. Heppner

⁹. Grenander

¹. Chromosome

². Fitness

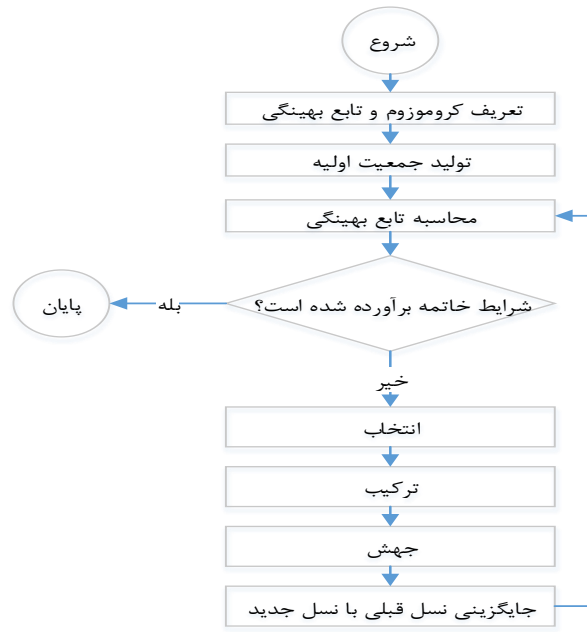
³. Selection

⁴. Crossover

⁵. Mutation



(ب)



(الف)

شکل ۱: روند حل مسئله بهینه‌سازی؛ الف-الگوریتم ژنتیک [۲۶]؛ ب-الگوریتم انبوه ذرات [۲۸]

می‌شود. c_1 و c_2 پارامترهای مثبت ثابتی هستند که ضرایب شتاب نامیده می‌شوند (حداکثر میزان گامی که ذرات می‌توانند کسب کنند را مشخص می‌کند). وزن داخلی w تأثیر مقدار سرعت قبلی را بر روی سرعت کنونی کنترل می‌کند [۳۱]. انتخاب مناسب وزن داخلی و ضرایب شتاب، تعادلی بین جستجوی جهانی^۲ و بهره‌برداری محلی^۳ به وجود می‌آورد [۳۰ و ۳۱]. موقعیت هر ذره در هر مرحله با اضافه کردن بردار سرعت به بردار موقعیت، به‌روز می‌شود (رابطه ۲) [۲۹].

$$\vec{x}_i = \vec{x}_i + \vec{v}_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

۲-۳- نیاز آبی گیاه و نیاز آبی آبیاری

اطلاع از نیاز آبی گیاهان از ملزومات هر طرح آبیاری است. آب مصرفی گیاه شامل دو قسمت است. یکی مقدار آبی که وارد ریشه‌ها شده و سپس از طریق

تلاش‌های بسیاری برای بهبود عملکرد الگوریتم انبوه ذرات انجام شده است و پارامترهای بسیاری همچون وزن داخلی^۱ ارائه شده است [۲۹ و ۳۰]. انبوه ذرات استاندارد، همراه با وزن داخلی در بسیاری از مطالعات و کاربردهای مهندسی استفاده شده است. در انبوه ذرات متعارف هر ذره i دارای موقعیت x_i و سرعت v_i (سرعت نشان‌دهنده‌ی مسافتی است که یک ذره از یک موقعیت تا موقعیت بعدی حرکت کرده است) است که در هر تکرار به‌روز می‌شوند. سرعت از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۹].

$$\text{رابطه (۱)}$$

$$\vec{v}_i = w\vec{v}_i + c_1\vec{\phi}_{1i}(\vec{p}_i - \vec{x}_i) + c_2\vec{\phi}_{2i}(\vec{p}_g - \vec{x}_i)$$

در رابطه‌ی بالا w وزن داخلی، p_i بهترین موقعیت ذره و p_g بهترین موقعیت جهانی که توسط توده جهانی کشف شده است، می‌باشد. وزن‌های ϕ_1 و ϕ_2 در هر مرحله به‌طور تصادفی برای اجزای ذرات ایجاد

^۲. Exploration

^۳. Exploitation

^۱. inertia weight

به زمین داده شود تا گیاه با حداکثر توان خود رشد نموده و تولید محصول نماید. بخشی از نیاز آبیاری ممکن است از طریق باران‌های مؤثر تأمین شود همچنین علاوه بر تأمین تبخیر-تعرق باید مقداری آب اضافی نیز به زمین وارد شود تا نمک‌های اضافی از منطقه توسعه ریشه‌ها شسته شود. حداکثر آب موردنیاز آبیاری کامل محصول از طریق رابطه ۴ به دست می‌آید [۳۲].

$$W_p = \left(\frac{ET_{crop} - P_e + L}{E_i / 100} \right) \times 10 \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این معادله W_p حداکثر آب موردنیاز آبیاری کامل محصول (مترمکعب بر هکتار)، P_e بارندگی مؤثر (میلی‌متر)، L مقدار آبشویی (میلی‌متر) و E_i راندمان آبیاری (%) است. عدد ۱۰ برای تبدیل میلی‌متر به مترمکعب در هکتار است. راندمان آبیاری درصدی از مقدار آب تأمین شده برای مزرعه است که بتواند مفید واقع گردد. بارندگی مؤثر نیز از روش‌های مختلفی همچون درصد ثابتی از بارندگی، روش فائو، روش تجربی و غیره محاسبه می‌شود. در این روش، درصد ثابتی از بارندگی استفاده می‌شود. در این روش، بارندگی از رابطه ۵ محاسبه می‌شود که در آن P مقدار واقعی بارندگی و α درصد ثابتی از بارندگی است. مقدار α معمولاً بین ۰/۷ تا ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود [۳۲].

$$P_e = \alpha \cdot P \quad \text{رابطه (۵)}$$

۳- روش تحقیق

شکل ۲ فلوجارت کلی کار را نمایش می‌دهد.

روزنه‌های گیاه وارد هوا می‌شود و دیگری مقدار آبی که مستقیماً از سطح خاک وارد هوا می‌شود. بخش اول را تعرق^۱ و بخش دوم را تبخیر^۲ و مجموع آن‌ها را که در واقع همان نیاز آبی گیاه است، تبخیر-تعرق^۳ گویند [۳۲]. متدولوژی محاسبه‌ی نیاز آبی گیاه در این تحقیق بر اساس راهنمای فائو (FAO^۴) (رابطه ۳) است [۳، ۵، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۳۶].

$$ET_{crop} = K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه ET_{crop} تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر)، ET_0 تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر) و K_c ضریب محصول موردنظر است. تبخیر-تعرق پتانسیل^۵ حداکثر مقدار آبی است که اگر بدون محدودیت وجود داشته باشد، می‌تواند توسط سطوح خاک و گیاه تبخیر شود. گیاه مرجع معمولاً یونجه یا چمن انتخاب می‌شود [۳۲]. روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی ET_0 پیشنهاد شده است که هرکدام از نظر داده‌های مورد لزوم، نیازهای متفاوتی دارند. ET_0 معمولاً با استفاده از روش پنمن-مونتیث^۶ محاسبه می‌شود [۵، ۳۳، ۳۴ و ۳۵]. این متدولوژی در تحقیقات برای نواحی نیمه‌خشک ارزیابی و پذیرفته شده است [۳۴]. در این تحقیق نیز از این روش استفاده می‌شود. ضرایب گیاهی نیز باید از طریق تحقیق و به صورت میدانی برای هر منطقه به طور دقیق محاسبه گردد؛ اما اکثراً به علت مشکلات این امر امکان پذیر نیست و به همان مقادیر پیشنهادی فائو اکتفا می‌شود [۳۶]. در این تحقیق نیز به دقت موجود در ضرایب فائو اکتفا شده است.

نیاز آبیاری متفاوت از نیاز آبی گیاه است. نیاز آبیاری به مقدار آبی گفته می‌شود که باید به صورت آبیاری

¹. transpiration

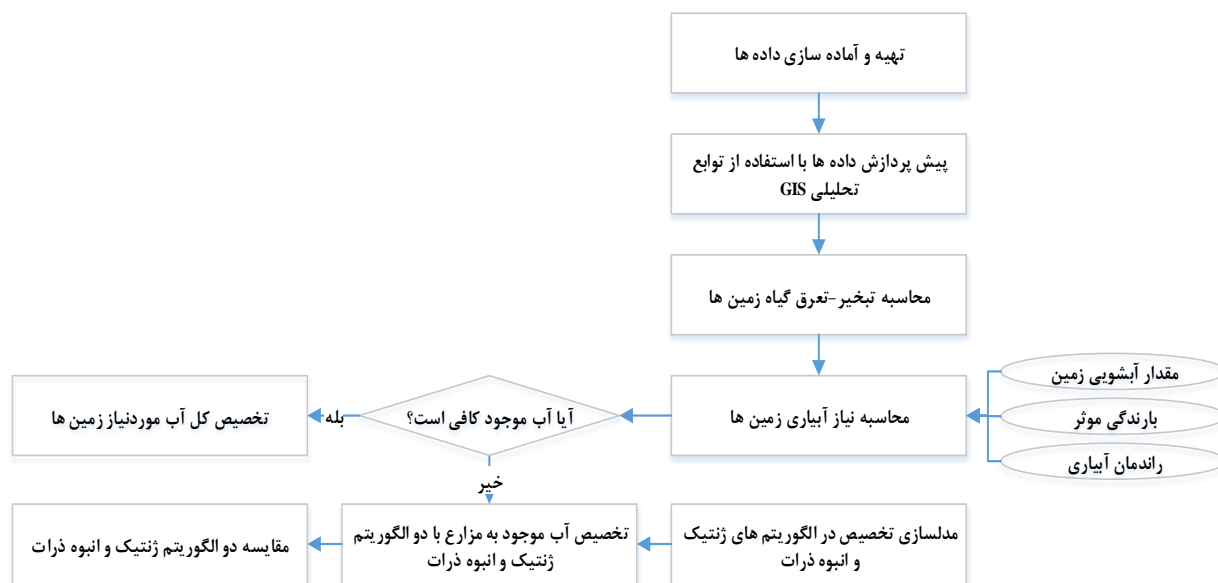
². evaporation

³. evapotranspiration

⁴. Food and Agriculture Organization of the United Nation

⁵. potential ET

⁶. penman-monteith



شکل ۲: فلوچارت کلی کار

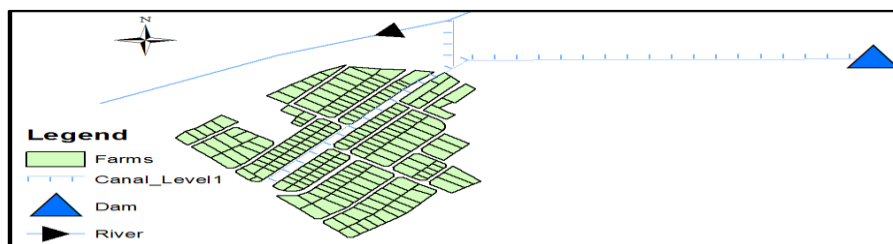
در مرحله بعدی مدل توسعه داده شده، با توجه به نیاز آبی مزارع و آب موجود اجرا می شود و نتایج تخصیص مورد بحث قرار می گیرد. در گام آخر نیز نتایج دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات با توجه به معیارهای مختلف مقایسه می شوند.

۴- تهیه و آماده سازی داده ها

به دلیل عدم دسترسی به نقشه‌ی املاک زراعی منطقه، نقشه قطعات زراعی به صورت دستی و فرضی ترسیم شده است؛ ضمناً فرض شده است که پلیگون‌های ترسیم شده وسعت بیش از ۵۵ هکتار دارند (شکل (۳)). یک سد و یک رودخانه نیز به صورت فرضی به عنوان منابع آب در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق منبع تأمین آب به صورت نقطه، کانال‌های انتقال آب به صورت خط و مزارع کشاورزی به صورت پلیگون مدل می شوند. علی‌رغم اینکه این داده‌ها شبیه سازی بوده‌اند، ولی در ترسیم آن‌ها ممکن است خطاهایی وجود داشته باشد (با توجه به خطاهای کاربر در ترسیم)؛ لذا برای آماده سازی داده‌ها (GIS ready کردن) و رفع خطاهای نرسیدگی، ردشدگی و سایر خطاها از بسته نرم‌افزاری ArcGIS استفاده شده است.

با توجه به شکل ۲، روش کلی کار بدین صورت است که ابتدا داده‌های موجود شامل نقشه‌های مزارع و اطلاعات توصیفی آن‌ها (محصولات تحت کشت هر زمین و تاریخ کشت آن‌ها)، اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه نیاز آبی مزارع (بارندگی، ضریب محصول و غیره) و اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه تابع بهینگی (هزینه و قیمت محصولات، ضریب واکنش عملکرد محصولات و غیره) تهیه و آماده می شود. سپس با استفاده از توابع تحلیلی سیستم اطلاعات مکانی (GIS) پیش پردازشی روی داده‌ها صورت می گیرد و قطعات هم جوار با محصول و مرحله رشد یکسان، ادغام می شوند. در مراحل بعدی برای هر مزرعه، نیاز آبی گیاه و نیاز آبی آبیاری (نیاز مزرعه) محاسبه می شود. مجموع نیاز آبی آبیاری تمام مزارع، کل آب مورد نیاز را مشخص می کند. اگر به میزان نیاز آب موجود نبود، از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات برای تخصیص آب در شرایط کم آبیاری استفاده می شود. در گام دیگری از تحقیق، مسئله بهینه سازی تخصیص آب موجود به مزارع، مدل می شود. سپس

¹. Geospatial Information System



شکل ۳: منطقه مورد مطالعه

ولی سعی شده است که حتی المقدور داده‌ها به وضعیت واقعی نزدیک باشند؛ لذا فرض شده است که منطقه شبیه‌سازی شده در دشت طارم-خلخال واقع در استان زنجان قرار دارد و از اطلاعات این دشت استفاده شده است. نوع محصولات زمین‌ها (الگوی کشت موجود) و زمان کاشت آن‌ها با توجه به محصولات کشت شده و زمان کشت آن‌ها در دشت طارم-خلخال شبیه‌سازی شده است. در جدول (۲) گیاهان زراعی کاشت شده در منطقه ارائه شده است. داده‌های این تحقیق برای محاسبات اقتصادی، شامل هزینه، عملکرد و درآمد یک هکتار از کاشت محصول است که از گزارش‌های جهاد کشاورزی استان زنجان برای سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ استخراج شده است (جدول (۲)) [۳۷].

در این تحقیق تخصیص در یک دور آبیاری (ماه خرداد) انجام می‌شود. در جدول (۱) آورد منابع آب در این ماه (حجم آب قابل استحصال) ارائه شده است که البته شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱: حجم آب قابل استحصال منابع آب تحقیق

منابع	حجم آب قابل استحصال (مترمکعب)
سد	۶۰۰۰۰
رودخانه	۷۹۰۰۰

برای محاسبه‌ی آب مورد نیاز گیاه و آب مورد نیاز آبیاری و همچنین محاسبه‌ی تابع بهینگی، نیاز به یکسری اطلاعات دیگر از قبیل محصولات تحت کشت منطقه، تاریخ کشت محصولات در منطقه، مدت زمان رشد محصولات در منطقه، هزینه و درآمد محصولات، بارندگی منطقه و غیره است. برای این منظور، اگرچه داده‌های استفاده شده در این تحقیق فرضی هستند،

جدول ۲: گیاهان زراعی کاشت شده در منطقه و درآمد و هزینه کاشت هر یک [۳۷]

محصول	هزینه محصول (ریال در هکتار)	درآمد محصول (ریال در هکتار)	محصول تولیدی (کیلوگرم در هکتار)
گندم	۴۳۵۹۰۰۰۰	۵۳۰۵۰۰۰۰	۴۰۰۰
جو	۲۳۲۰۳۲۶۶	۲۹۰۰۴۰۸۳	۳۵۰۰
لوبیا	۶۰۳۷۸۸۵۸	۷۵۴۷۳۵۷۲	۲۳۰۰
پیاز	۱۱۳۰۴۲۶۰۵	۱۴۱۳۰۳۲۵۶	۴۰۰۰۰
سیب‌زمینی	۱۹۵۰۴۷۴۸۵	۲۴۳۸۰۹۳۵۷	۳۸۰۰۰

در نظر گرفته شده است. آب آبیاری مورد نیاز گیاهان زراعی در هر ماه از فصل رشد، با استفاده از نرم‌افزار OPTIWAT بر مبنای معادله پنمن-مونتیت

برای محاسبه‌ی آب مورد نیاز آبیاری کامل محصول، مقدار α برابر ۰/۷۵ (رابطه ۵)، آبشویی برابر ۵ درصد (رابطه ۴) و راندمان آبیاری ۴۰ درصد (رابطه ۴)

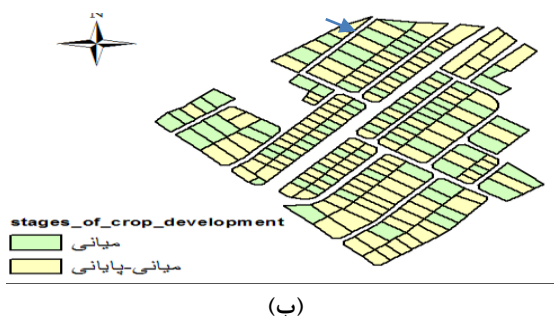
شروع شده و تا زمان پوشش مؤثر کامل ادامه دارد. پوشش مؤثر کامل در بیشتر گیاهان در زمان پیدایش گل ظاهر می‌شود. ۳- مرحله میانی: این مرحله از پوشش کاملاً مؤثر شروع شده و تا رسیدن محصول ادامه می‌یابد. ۴- مرحله پایانی: این مرحله از انتهای مرحله میانی (رسیدگی محصول) شروع شده و تا مرحله برداشت گیاه یا پلاسیدگی آن ادامه می‌یابد [۳۲]. پارامتر مذکور نیز از گزارش‌های جهاد کشاورزی برای محصولات دشت موردنظر (طول رشد محصول و مدت هر مرحله از رشد) استخراج شده است. مراحل رشد برای محصول پیاز طبق این گزارش و تاریخ کشت آن در یکی از زمین‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

محاسبه شده است. در جدول (۳) حداکثر نیاز آبی ماهانه آبیاری کامل یکی از زمین‌های مورد مطالعه با محصول پیاز و تاریخ کشت ۲۰ اسفند به‌عنوان نمونه ارائه شده است. چنین جدولی برای تمامی زمین‌ها طبق محصول تحت کشت و تاریخ کشت آن تهیه می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای مهمی که در محاسبه تابع بهینگی نیاز خواهد بود، تاریخ مراحل رشد محصولات هر زمین طبق نوع محصول و تاریخ کشت آن است. مراحل مختلف رشد گیاه عبارت‌اند از: ۱- مرحله آغازین: بخش آغازین از زمان کاشت گیاه تا زمانی است که گیاه ۱۰ درصد زمین را می‌پوشاند. ۲- مرحله توسعه گیاه: این مرحله از پوشش ۱۰ درصد

جدول ۳: حداکثر آب مورد نیاز آبیاری کامل یکی از زمین‌های مورد مطالعه با محصول پیاز و تاریخ کشت ۲۰ اسفند

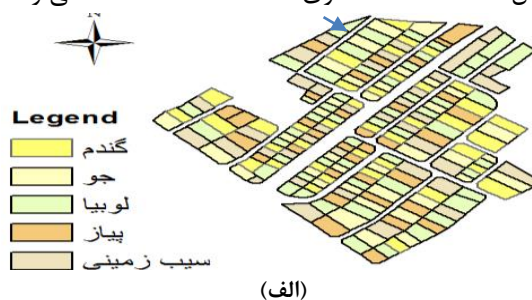
نیاز آبی مزرعه (مترمکعب بر هکتار)	بارندگی مؤثر	مرحله رشد	ماه‌های رشد
۱۴۰	۲۱	آغازین	اسفند
۱۰۹۰	۴۳	آغازین-توسعه	فروردین
۱۸۶۰	۴۰	توسعه-میانی	اردیبهشت
۲۴۹۰	۱۶	میانی-پایانی	خرداد

شکل ۴-ب نقشه مرحله رشد محصول هر زمین در ماه خرداد را نشان می‌دهد.



۴-۱- پیش‌پردازش داده‌ها با استفاده از توابع تحلیلی GIS

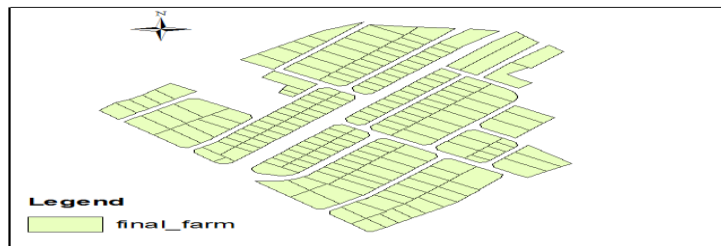
شکل ۴-الف نقشه الگوی کشت منطقه مطالعاتی و



شکل ۴: الف - نقشه الگوی کشت منطقه مطالعاتی؛ ب - نقشه مرحله رشد محصول هر زمین در ماه خرداد
 رشد مشابهی دارد (یک مورد به‌عنوان نمونه نشان داده شده است)؛ با توجه به اینکه تخصیص آب

با توجه به نقشه‌های شکل ۴، دیده می‌شود که تعدادی از زمین‌های هم‌جوار، نوع محصول یکسان و مرحله

توصیفات، زمین‌هایی که بیش از ۲۰ متر باهم هم‌جواری دارند و نوع محصول و مرحله‌ی رشد مشابهی نیز دارند، مشخص می‌شوند. در نهایت نیز با استفاده از تابع merge، این پلیگون‌ها باهم ادغام می‌شوند که نتیجه آن در شکل ۵ دیده می‌شود. بعد از ادغام، ۱۹۱ قطعه زراعی به‌عنوان خروجی این مرحله به‌دست می‌آید.



شکل ۵: نتیجه ادغام زمین‌های هم‌جواری با نوع محصول و مرحله رشد مشابه

محصول پتانسیل (کیلوگرم در هکتار) و Y_a/Y_p عملکرد محصول (تابع تولید محصول^۱) است. توابع تولید محصول توابعی هستند که با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر میزان آب تأمین‌شده برای گیاه یا میزان تبخیر و تعرق گیاه، میزان تولید محصول را در دوره‌ی زمانی مشخص محاسبه می‌کنند. میسر^۲ و همکاران برای تخمین عملکرد محصول رابطه ۷ را پیشنهاد نمودند [۵، ۱۴، ۳۶، ۳۸، ۳۹ و ۴۰].

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{j=1}^n [1 - K_{y_j} [1 - \frac{W_a}{W_p}]_j] \quad (7)$$

در این رابطه Y_p عملکرد محصول در شرایط آبیاری کامل، Y_a عملکرد محصول در شرایط کم‌آبیاری، z مرحله‌ی مشخصی از رشد، n تعداد مراحل رشد، K_{y_j} ضریب واکنش عملکرد محصول نسبت به آب^۳ در مرحله رشد z ، W_p عمق آب آبیاری کامل محصول (نیاز آبی گیاه) و W_a عمق آب کم‌آبیاری محصول (آب تخصیصی به محصول) است. می‌توان به‌جای عمق آبیاری (میلی‌متر)، W_p را حداکثر آب موردنیاز آبیاری کامل محصول (مترمکعب

بر اساس مساحت، نوع محصول و مرحله‌ی رشد صورت می‌گیرد، می‌توان این زمین‌ها را باهم ادغام نمود و از حجم محاسبات بهینه‌سازی کاست. بدین منظور ابتدا با استفاده از تحلیل Polygon Neighbors در نرم‌افزار ArcGIS، زمین‌های هم‌جواری شناسایی می‌شوند که طول هم‌جواری نیز به عنوان یک فیلد ذخیره می‌شود. سپس با استفاده از پرس‌وجو روی

۵- مدل‌سازی مسئله در الگوریتم‌ها

در این بخش مسئله‌ی تخصیص در الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات مدل‌سازی می‌شود. لازم به ذکر است که مراحل تعریف تابع بهینگی، تعریف یک جواب (کروموزوم در الگوریتم ژنتیک و ذره در الگوریتم انبوه ذرات)، ایجاد جمعیت اولیه (در الگوریتم ژنتیک) یا ذره‌های اولیه (در الگوریتم انبوه ذرات) و ارزیابی تابع بهینگی در هر دو الگوریتم مشابه است. لذا، ابتدا این بخش‌ها تشریح می‌شود و سپس عملگرهای هر الگوریتم توضیح داده خواهد شد.

۵-۱- تعریف تابع بهینگی و قیود مسئله

تابع بهینگی در این تحقیق حداکثر نمودن سود اقتصادی حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی با استفاده از بهینه‌سازی میزان کم‌آبیاری است. تابع هدف به‌صورت رابطه ۶ بیان می‌شود.

$$\max \sum_{i=1}^n [B_i \left(\frac{Y_a}{Y_p}\right)_i - C_i] A_i \quad (6)$$

در این رابطه A_i مساحت زمین i ام (هکتار)، B_i و C_i به ترتیب درآمد و هزینه محصول i ام در واحد سطح (ریال در هکتار)، Y_a و Y_p به ترتیب محصول واقعی و

¹. water production function

². Meyer

³. yield response factor

در صورتی که این ضریب یک باشد، میزان کم شدن محصول مستقیماً متناسب با میزان کم کردن آب است [۳۵]. مقدار K_y در دستورالعمل شماره ۳۳ فائو برای ۳۳ محصول محاسبه شده و برای پروژه‌های زیادی ارزیابی و استفاده شده است [۴۰ و ۴۱]. برای محصولات منطقه مورد مطالعه در این تحقیق نیز به دقت همین مقادیر اکتفا شده است (جدول ۴).

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی دارای دو قید است؛ قید اول محدودیت آب قابل دسترس است که در آن مجموع آب اختصاص یافته به تمام زمین‌ها باید کمتر یا مساوی کل آب قابل استحصال باشد. قید دوم مربوط به آب تخصیص یافته به هر زمین است که در آن آب تخصیصی به هر زمین نباید بیشتر از آب موردنیاز برای آبیاری کامل آن باشد.

بر هکتار) و W_a را آب کم‌آبیاری محصول (مترمکعب بر هکتار) گرفت.

در رابطه فوق اگر کم‌آبیاری محصول برابر با آبیاری کامل محصول باشد ($W_a = W_p$)، در نتیجه Y_a/Y_p نیز برابر با یک خواهد شد؛ اما اگر کم‌آبیاری محصول کمتر از آبیاری کامل محصول شود ($W_a < W_p$)، در این صورت $Y_a/Y_p < 1$ شده و مقدار آن نسبت به W_a/W_p به صورت خطی (که شیب آن متناسب با K_y است) تغییر می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، در رابطه Y ، ضریب واکنش عملکرد محصول نسبت به آب در مرحله رشد ز است. اگر این ضریب بزرگ‌تر از یک باشد، پاسخ محصول خیلی حساس به کم‌آبیاری است؛ اگر این ضریب کمتر از یک باشد، محصول مقاوم به کمبود آب است و

جدول ۴: مقادیر K_y برای محصولات منطقه بر اساس دستورالعمل شماره ۳۳ فائو [۲، ۳، ۳۵، ۴۱ و ۴۲]

محصول	ضریب واکنش عملکرد محصول نسبت به آب در هر از مرحله رشد			
	Tr-1110	Tr-1101	Tr-1011	Tr-0111
گندم	۰/۲۵*	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۲۰
جو	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۲۰
لوبیا	۰/۲۰	۰/۷۵	۱/۱۰	۰/۲۰
پیاز	۰/۳۰	۰/۸۰	۱/۱۰**	۰/۴۵
سیب‌زمینی	۰/۲۰	۰/۷۰	۰/۳۳*	۰/۶۰
Tr-0111: کم‌آبیاری در مرحله آغازین اتفاق افتاده است.				
Tr-1011: کم‌آبیاری در مرحله توسعه اتفاق افتاده است.				
Tr-1101: کم‌آبیاری در مرحله میانی اتفاق افتاده است.				
Tr-1110: کم‌آبیاری در مرحله پایانی اتفاق افتاده است.				
* با توجه به اینکه محققان موفق به یافتن این مقادیر در دستورالعمل شماره ۳۳ فائو نشدند، برای این مقادیر از اطلاعات IAEA [۳ و ۳۵] استفاده شده است.				
** با توجه به اینکه محققان موفق به یافتن این مقادیر در دستورالعمل شماره ۳۳ فائو و IAEA نشدند، برای این مقادیر از K_y کلی محصول بر اساس دستورالعمل شماره ۳۳ فائو استفاده شده است.				

W_{mi} آب آبیاری کامل زمین نام (مترمکعب) در ماه موردنظر و Q_j میزان آب در دسترس از منبع آبی نام (مترمکعب) در ماه موردنظر است.

$$D_{total} = \sum_{i=1}^n W_{mi} - \sum_{j=1}^m Q_j \quad (۸)$$

۵-۲- تعریف یک جواب مسئله

در فضای بهینه‌سازی

مقدار کمبود آب از رابطه ۸ محاسبه می‌شود که در آن D_{total} میزان کمبود آب (مترمکعب) در یک دور آبیاری،

۵-۳- تولید جمعیت اولیه

تعدادی جواب به صورت تصادفی به منظور ایجاد جمعیت یا ذره‌های اولیه باید تولید شود. برای ایجاد هر جواب، مقدار آبی که از هر زمین باید کم شود، به صورت تصادفی تعیین می‌شود؛ به طوری که قیود مسئله (روابط ۹ و ۱۰) رعایت شود؛ در غیر این صورت آن جواب حذف و جواب جدیدی که این قیود در آن رعایت شده است، ایجاد می‌شود.

۵-۴- محاسبه مقدار برازندگی

در ادامه باید تابع بهینگی برای هر جواب از جمعیت یا ذره‌های نسل محاسبه شود. برای هر جواب ابتدا باید روابط ۱۱ و ۱۲ اجرا شود. سپس عملکرد محصول (Y_a/Y_p) از رابطه ۷ به دست می‌آید. در نهایت نیز تابع بهینگی (رابطه ۶) محاسبه می‌شود. برای استفاده از رابطه ۷ نیاز است تا برای هر مرحله از رشد محصول هر زمین، کل آب تخصیصی و همچنین آب آبیاری کامل یک هکتار از زمین در طول هر مرحله محاسبه شود.

۵-۵- عملگرهای الگوریتم ژنتیک

در این بخش نحوه مدل کردن عملگرهای الگوریتم ژنتیک توضیح داده خواهد شد. **انتخاب دو والد:** به منظور انتخاب دو والد از روش چرخ گردونه استفاده می‌شود. در این روش احتمال انتخاب برای هر کروموزوم با نسبت برازندگی آن کروموزوم نسبت به مجموع برازندگی تمامی کروموزوم‌ها در جمعیت برابر است [۴۳]. **ترکیب دو والد:** در این تحقیق از ترکیب تک نقطه‌ای^۱ استفاده می‌شود. در این روش یک نقطه (که می‌تواند از قبل تعیین شود و یا به طور تصادفی انتخاب شود) در کروموزوم‌های والد انتخاب شده و هر کروموزوم در این نقطه به دو بخش تقسیم می‌شود و بخشی

با توجه به داده‌ها میزان آب مورد نیاز کل زمین‌ها در ماه خرداد ۱۵۹۳۷۷ مترمکعب است؛ اما میزان آب قابل استحصال در این ماه ۱۳۹۰۰۰ مترمکعب است. در نتیجه ۲۰۳۷۷ مترمکعب کمبود آب وجود دارد و نیاز به استفاده از روش‌های کم‌آبیاری است.

در این تحقیق برای کاهش ابعاد مسئله به جای تخصیص آب موجود به زمین‌ها، میزان کمبود آب به زمین‌ها تخصیص پیدا می‌کند. در واقع مقدار آبی که از هر زمین باید کم شود تا کمبود ۲۰۳۷۷ مترمکعب جبران شود، تعیین می‌شود؛ سپس آب تخصیصی به هر زمین از کم کردن آب مورد نیاز هر زمین از این مقدار، مشخص می‌شود. این مقدار باید طوری باشد که سود حاصل بیشینه شود (رابطه ۶). در نتیجه یک جواب در صورت داشتن n زمین (در این تحقیق ۱۹۱ قطعه زراعی)، به صورت شکل (۶) تعریف می‌شود که در آن L_{ai} مقدار کم کردن آب آبیاری زمین i ام (مترمکعب) در ماه مورد نظر است.

L_{a1}	L_{a2}	L_{a3}	L_{a4}	...	L_{an}
----------	----------	----------	----------	-----	----------

شکل ۶: یک جواب از مسئله

با این تعریفی که برای یک جواب انجام می‌شود، قیود مسئله نیز به روابط ۹ و ۱۰ تغییر پیدا می‌کند.

$$\sum_{i=1}^n L_{ai} \geq D_{total} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$0 \leq L_{ai} \leq W_{mi} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

همان‌طور که اشاره شد، هر بخش از جواب، میزان کم کردن آب از آبیاری کامل محصول زمین i ام است. در نتیجه میزان آب تخصیصی به هر زمین (S_{ai}) در ماه مورد نظر از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود. در نهایت برای محاسبه عملکرد محصول (رابطه ۷)، نیاز است تا W_{ki} که آب کم‌آبیاری یک هکتار از زمین i ام (مترمکعب بر هکتار) در ماه خرداد است، محاسبه شود (رابطه ۱۲).

$$S_{ai} = W_{mi} - L_{ai} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$W_{ki} = \frac{S_{ai}}{A_i} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

^۱. One-Point Crossover

به‌منظور سادگی شکل‌ها تعداد ژن‌های کروموزوم شش عدد فرض شده که بسیار کمتر از تعداد واقعی آن‌ها است که در اصل تعداد زمین‌ها می‌باشند.

۲۰۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۵۵۰/۱	۹۰۰/۸	۲۱۷۰/۵	۱۷۰۰/۱	والد اول
۸۰۰/۱	۲۰۰۸/۹	۳۵۴۲/۲	۵۷۰/۴	۱۸۵۰/۶	۲۶۰۰/۳	والد دوم
۲۰۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۵۵۰/۱	۵۷۰/۴	۱۸۵۰/۶	۲۶۰۰/۳	فرزند

شکل ۷: مثالی از ترکیب در تخصیص آب

انتخاب می‌شود؛ اگر عدد کوچک‌تر از نرخ جهش بود، برای این کروموزوم جهش انجام می‌شود. روند جهش به این صورت است که دو ژن به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس، از یکی از این ژن‌ها ۱۰۰ مترمکعب کم شده و به ژن دیگر که به‌صورت تصادفی انتخاب شده است، اضافه می‌شود (مقدار کم شده از ژن اول به ژن دوم اضافه می‌شود). این در صورتی است که کروموزوم صحیح ایجاد شود؛ درواقع قیود مسئله برقرار باشند که قید اول با این تعریف همیشه برقرار است و فقط باید قید دوم را بررسی کرد). در صورتی که قید دوم در تغییر دو ژن (کم کردن یک مقدار از یک ژن و اضافه کردن آن به ژن دیگر) برقرار نباشد، دو ژن دیگر برای معاوضه انتخاب می‌شوند. این عملیات n بار انجام می‌شود. درواقع کروموزوم جهش‌یافته حاصل n تغییر کروموزوم اولیه است که هر تغییر کم کردن یک مقدار از یک ژن و اضافه کردن آن به ژن دیگر به صورتی که کروموزوم صحیح ایجاد شود، می‌باشد. در شکل (۸)، نمونه‌ای از این‌گونه جهش در صورت یک تغییر ($n=1$) به مقدار ۱۰۰ مترمکعب ارائه شده است.

از یک کروموزوم والد با بخشی دیگر از کروموزوم والد دیگر دوباره با هم‌دیگر ترکیب می‌شوند. در شکل (۷) مثالی از ترکیب در مسئله‌ی تخصیص آب نمایش داده شده است. در این شکل و شکل‌های بعدی

حال باید برای فرزند حاصل قیود مسئله را بررسی کرد تا کروموزوم صحیح ایجاد شده باشد. با این تعریف قید دوم همواره برقرار است و باید قید اول را بررسی نمود. اگر حاصل جمع مقادیر ژن‌های کروموزوم فرزند کمتر از مقدار کمبود کلی آب بود، چنین کروموزومی صحیح ایجاد نشده است و باید به ژن‌های آن، مقدار اختلاف اضافه شود تا این کروموزوم به فضای مسئله برگردد. برای تصحیح، به‌طور تصادفی ژنی انتخاب می‌شود و مقدار ۱۰ مترمکعب به مقدار آب آن اضافه می‌شود. حال شرط دوم برای این ژن بررسی می‌شود. اگر برقرار نبود، عملیات قبلی حذف (مقدار ۱۰ اضافه نمی‌شود) و ژنی دیگر انتخاب می‌شود. این کار به تعدادی که باعث شود شرط اول برقرار شود، انجام می‌شود تا کروموزوم صحیح ایجاد شود. با توجه به اینکه مقدار کمی به هر ژن اضافه می‌شود (مقدار اضافه‌شده نسبت به مقادیر ژن‌ها کم است)، این مقدار اضافه‌شده نسبت مقادیر ژن‌ها را زیاد تغییر نمی‌دهد و فرزند حاصل را می‌توان حاصل از دو والد اولیه دانست.

عملگر جهش: پس از انجام ترکیب بر روی کروموزوم‌ها، نوبت به انجام عمل جهش می‌رسد. بدین منظور عددی به‌صورت تصادفی بین صفر تا یک

۲۰۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۵۵۰/۱	۹۰۰/۸	۲۱۷۰/۵	۱۷۰۰/۱	کروموزوم اولیه
۱۹۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۶۵۰/۱	۹۰۰/۸	۲۱۷۰/۵	۱۷۰۰/۱	کروموزوم جهش یافته

شکل ۸: نمونه‌ای از جهش در مسئله تخصیص آب

برقرار نشود الگوریتم تکرار می‌شود. شرط توقف می‌تواند رسیدن به دقتی خاص، تعداد تکرارهای خاص، زمان خاص و یا ترکیبی از این‌ها باشد. در این پژوهش به منظور ساده‌سازی روند پیاده‌سازی و اجرای الگوریتم، شرط توقف تعداد اجرای خاص در نظر گرفته شده است.

۵-۶- عملگرهای الگوریتم انبوه ذرات

در این بخش نحوه مدل کردن عملگرهای الگوریتم انبوه ذرات توضیح داده خواهد شد. لازم به توضیح است که تعریف ذره دقیقاً مساوی تعریف کروموزوم می‌باشد و تعریف هر بعد یک ذره معادل تعریف ژن در الگوریتم ژنتیک است.

تغییر بردار سرعت و موقعیت: بردار سرعت برای هر ذره به صورت یک آرایه تعریف می‌شود که در هر کدام از خانه‌های این آرایه، میزان تغییر مقدار آب هر زمین قرار می‌گیرد. همان‌طور که در بخش ۲-۲ بیان شد، تغییر موقعیت هر ذره در هر اجرا از طریق رابطه ۲ انجام می‌شود. برای این منظور هر خانه آرایه ذره با سرعت متناظر آن جمع می‌شود. نمونه‌ای از تغییر بردار موقعیت یک ذره، در شکل (۹) ارائه شده است.

۲۰۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۵۵۰/۱	۹۰۰/۸	۲۱۷۰/۵	۱۷۰۰/۱
--------	--------	-------	-------	--------	--------

موقعیت اولیه ذره

۳۲/۱	-۱۱/۶	-۲۰/۵	۹/۲	۴۰/۴	۱/۰
------	-------	-------	-----	------	-----

سرعت ذره

۲۰۴۲/۵	۳۰۵۸/۵	۵۲۹/۶	۹۱۰/۰	۲۲۱۰/۹	۱۷۰۱/۱
--------	--------	-------	-------	--------	--------

موقعیت ثانویه ذره

شکل ۹: نمونه‌ای از تغییر بردار موقعیت یک ذره در مسئله تخصیص آب

جوابی صحیح ایجاد نشده است و باید این جواب را به فضای مسئله برگرداند. برای این منظور در صورتی که این مقدار کمتر از صفر بود، آن مقدار صفر قرار داده می‌شود و اگر بیشتر از آب موردنیاز زمین بود، برابر با آب موردنیاز زمین قرار داده می‌شود.

نخبه‌گرایی: نخبه‌گرایی در این الگوریتم به دادن بیشتر به نخبه‌ها است. در این تحقیق نخبه‌گرایی از طریق درصد نخبه‌گرایی اعمال می‌شود. این پارامتر تعداد کروموزوم‌هایی از هر نسل که به‌عنوان نخبه در نظر گرفته می‌شوند را مشخص می‌کند. کروموزوم‌های نخبه هر نسل بهترین تابع بهینگی را دارند و این تعداد کروموزوم‌ها بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند و باقی اعضای نسل بعدی توسط ترکیب و جهش تولید می‌شود. با کم گرفتن درصد نخبه‌گرایی الگوریتم کندتر به جواب می‌رسد. با زیاد گرفتن درصد نخبه‌گرایی نیز احتمال گیر افتادن در بهینه‌ی محلی افزایش می‌یابد.

ذخیره بهترین پاسخ: با انجام مرحله‌ی قبل الگوریتم یک‌بار اجرا شده است. در ادامه باید بهترین جواب که بالاترین تابع بهینگی را دارد، ذخیره شود. در واقع هدف پیدا کردن چنین جوابی است. جواب نهایی، بهترین جواب از بین بهترین‌ها در تمام اجراها است.

شرایط خاتمه: بعد از ذخیره‌ی بهترین جواب، شرط خاتمه‌ی الگوریتم بررسی می‌شود. اگر این شرط یا شروط برآورده شود، الگوریتم خاتمه می‌یابد و جواب نهایی ذخیره می‌شود (بهترین جواب در بین بهترین هر تکرار). در صورتی که شرط یا شروط

حال باید برای موقعیت جدید ذره قیود تخصیص را بررسی کرد تا جوابی صحیح ایجاد شده باشد. ابتدا قید دوم بررسی می‌شود. اگر مقدار آبی که باید از زمینی کم شود از صفر کمتر و یا بیشتر از مقدار آب موردنیاز آبیاری کامل زمین باشد،

زیاد نباشد، یک شرطی برای حداکثر و حداقل سرعت در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که سرعت از این مقدار خارج شود، برابر با مقدار مینیمم یا ماکسیمم سرعت قرار داده می‌شود (بر طبق اینکه از کدام سمت خارج شده است). مقدار حداقل و حداکثر سرعت جزء پارامترهایی است که باید با توجه به همگرایی و سرعت الگوریتم در مقدارهای مختلف آن به الگوریتم معرفی شود.

مسئله دیگری که در استفاده از رابطه ۱ وجود دارد، تفاضل موقعیت دو ذره است (تفاضل موقعیت یک ذره از بهترین موقعیت خود و بهترین موقعیت جهانی). تفاضل دو موقعیت، به صورت تفاضل مقدار درایه‌های متناظر آرایه‌های موقعیت هر ذره تعریف می‌شود (شکل ۱۰)).

۲۰۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۵۵۰/۱	۹۰۰/۸	۲۱۷۰/۵	۱۷۰۰/۱
--------	--------	-------	-------	--------	--------

ذره ۱

۸۰۰/۰	۲۰۰۸/۳	۳۵۴۲/۵	۵۷۰/۳	۱۸۵۰/۹	۲۶۰۰/۷
-------	--------	--------	-------	--------	--------

ذره ۲

۱۲۱۰/۴	۱۰۶۱/۸	-۲۹۹۲/۴	۳۳۰/۵	۳۱۹/۶	-۹۰۰/۶
--------	--------	---------	-------	-------	--------

تفاضل ذره ۱ از ۲

شکل ۱۰: مثالی از تفاضل موقعیت دو ذره

در مقدار تک تک درایه‌های آرایه ضرب می‌شود (شکل ۱۱)).

جمع دو موقعیت نیز به طریق مشابه انجام می‌شود. مسئله‌ی دیگر در رابطه ۱، ضرب یک عدد در یک موقعیت است. برای این منظور نیز عدد

۲۰۱۰/۴	۳۰۷۰/۱	۵۵۰/۱	۹۰۰/۸	۲۱۷۰/۵	۱۷۰۰/۱
--------	--------	-------	-------	--------	--------

موقعیت ذره

۴۰۲/۱	۶۱۴/۰	۱۱۰/۰	۱۸۰/۲	۴۳۴/۱	۳۴۰/۰
-------	-------	-------	-------	-------	-------

۰/۲ * موقعیت ذره

شکل ۱۱: مثالی از ضرب یک عدد در موقعیت یک ذره

حالا رفته‌اند، گرفته شده است. بهترین پاسخ: در این الگوریتم بهترین جواب یا جواب نهایی، موقعیت جهانی بعد از اجرای آخر خواهد بود. در واقع جواب نهایی بهترین موقعیتی است که ذره‌ها در تمام اجراها به آن رسیده‌اند. شرایط خاتمه: در این الگوریتم نیز مثل ژنتیک،

مشخص کردن بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت جهانی: بهترین هر ذره در تکرار اول برابر با خود ذره گرفته شده است. در تکرارهای بعدی نیز اگر موقعیت ذره بهتر بود، جایگزین بهترین موقعیت قبلی خود می‌شود. بهترین جهانی نیز برای تمام ذرات بهترین موقعیتی که کل ذرات تا

استفاده شده است. مقادیر بهینه پارامترهای اولیه الگوریتم‌ها برای این مسئله بر اساس تجربیات به دست آمده از تکرارهای مختلف الگوریتم و به صورت سعی و خطا به دست آمده است (جدول ۵).

به منظور ساده‌سازی روند پیاده‌سازی و اجرای الگوریتم، شرط توقف تعداد اجرای خاص در نظر گرفته شده است.

۶- نتایج و بحث

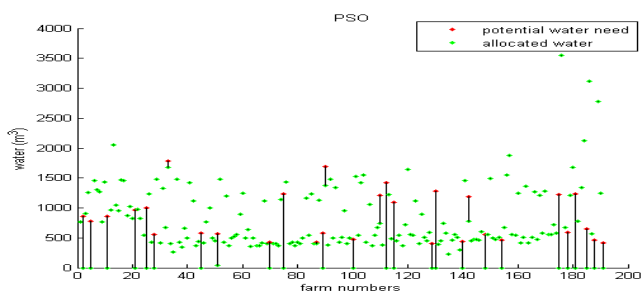
در این تحقیق از محیط MATLAB به منظور مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات

جدول ۵: پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌ها

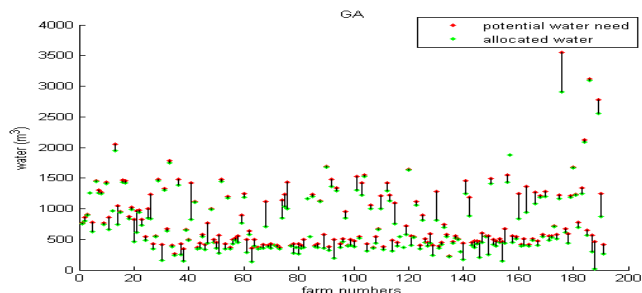
الگوریتم انبوه ذرات		الگوریتم ژنتیک	
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۳۰	تعداد ذرات اولیه	۱۰۰	تعداد جمعیت اولیه
۱	W	٪۱۵	درصد نخبه‌گرایی
۱	C1	۵۰	نقطه تقاطع در ترکیب
۱	C2	۰/۳	نرخ جهش
۰	سرعت اولیه ذره‌ها	۳۰	تعداد تغییرها در جهش
±۵۰	حداقل و حداکثر سرعت (مترمکعب)	۶۰	مقدار تغییر در جهش (مترمکعب)
rand(0,2)	ϕ_1 و ϕ_2	۱۵۰۰	تعداد تکرارها (شرط توقف)
۲۰۰	تعداد تکرارها (شرط توقف)		

کم‌آبیاری بهینه هر زمین در ماه خرداد برای هر الگوریتم نمایش داده شده است. در این شکل برای هر زمین، نقطه به رنگ قرمز مقدار آبیاری کامل و رنگ سبز مقدار آب تخصیصی به آن است. خطوط موجود در شکل نیز نشان دهنده اختلاف این دو مقدار برای هر زمین است. برای زمین‌هایی که کل آب مورد نیاز آن‌ها تخصیص یافته است، این اختلاف صفر است و نقاط سبز روی نقطه قرمز افتاده است.

با الگوریتم‌های توسعه داده شده و با کم‌آبیاری در ماه خرداد سود حاصل از الگوریتم ژنتیک ۹۶۳۵۱۱۵۶۱ ریال و سود حاصل از الگوریتم انبوه ذرات ۱۰۷۰۴۵۰۵۳۷ می‌شود. در نتیجه سود حاصل از کم‌آبیاری با الگوریتم انبوه ذرات، ۱۰۶۹۳۸۹۷۶ ریال بیشتر از الگوریتم ژنتیک و یا ۱/۱۱۱ برابر آن است که برتری انبوه ذرات را نشان می‌دهد. در شکل (۱۲) مقادیر آبیاری کامل و



(ب)

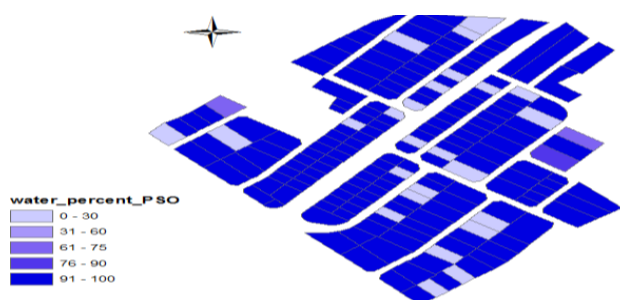


(الف)

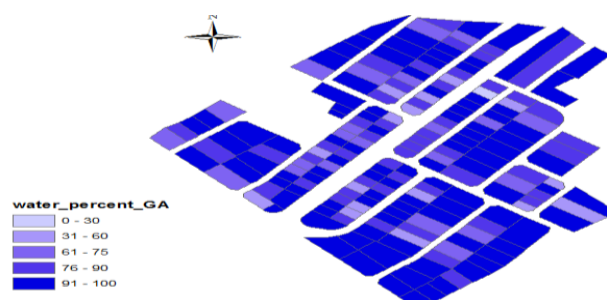
شکل ۱۲: مقادیر آبیاری کامل و کم‌آبیاری هر زمین در ماه خرداد؛ الف-الگوریتم ژنتیک؛ ب-الگوریتم انبوه ذرات

کامل شوند؛ اما با این مدل با توجه به اینکه زمین برخی از کشاورزان خشک می‌شود، رضایت همه‌ی کشاورزان حاصل نمی‌شود. درحالی‌که با نتایج الگوریتم ژنتیک رضایت تقریباً تمام کشاورزان به طور نسبی حاصل می‌شود. بیشترین اختلاف بین آبیاری کامل و کم‌آبیاری زمین‌ها در ماه خرداد برای الگوریتم ژنتیک ۶۴۳/۶ مترمکعب، کمترین اختلاف ۰/۳ مترمکعب و میانگین اختلاف‌ها ۱۰۶/۷ مترمکعب و برای الگوریتم انبوه ذرات به ترتیب ۱۴۲۲/۷، ۰ و ۱۰۶/۷ مترمکعب است. در شکل (۱۳) نسبت آب تخصیص داده‌شده به هر زمین توسط دو الگوریتم به آب موردنیاز هر زمین در صورت آبیاری کامل به درصد نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۱۲)، در الگوریتم ژنتیک مقدار کمبود آب تقریباً بین اکثر زمین‌ها (با توجه به نوع محصول، دوره رشد آن و مساحت زمین) توزیع شده است اما در الگوریتم انبوه ذرات ۱۶۰ زمین آبیاری کامل شده‌اند و به ۲۴ زمین هیچ آبی اختصاص نیافته است. با توجه به نتایج انبوه ذرات این نتیجه حاصل می‌شود که در مواقع کمبود آب برای رسیدن به سود اقتصادی بیشتر در تمام زمین‌ها، بهتر است به‌جای اختصاص آب محدود به تمام زمین‌ها (کم‌آبیاری)، برخی از زمین‌ها آبیاری نشوند و حتی می‌توان آن‌ها را خشک کرد. درواقع جای کم‌آبیاری، تعدادی از زمین‌ها حذف شوند (با توجه به نوع محصول، دوره رشد آن، مساحت زمین‌ها و پارامترهای دیگر) و بقیه آبیاری



(ب)



(الف)

شکل ۱۳: نسبت آب تخصیصی به آب مورد نیاز برای هر زمین به درصد؛ الف-الگوریتم ژنتیک؛ ب-الگوریتم انبوه ذرات

که زمین‌هایی که در الگوریتم انبوه ذرات آب کمتر از ۳۰ درصد مورد نیاز گرفته‌اند، در الگوریتم ژنتیک نیز اکثراً کم‌آبیاری شده‌اند (کمتر از ۶۰ درصد آب گرفته‌اند). درواقع این زمین‌ها با توجه به نوع محصول و مرحله رشد آن، در برابر کم‌آبیاری مقاوم‌تر بوده‌اند و هر دو الگوریتم آن‌ها را برای کم‌آبیاری انتخاب کرده‌اند. در جدول (۶) مقدار آبی که از هر دوره از رشد محصولات کل زمین‌ها کم شده است، ارائه شده است.

با توجه به اینکه در الگوریتم انبوه ذرات بیشتر زمین‌ها یا آبی به آن‌ها اختصاص نیافته یا کل آب موردنیاز به آن‌ها داده شده است، مقادیر شکل (۱۳-ب) بیشتر در دو دسته اول و آخر قرار گرفته‌اند. در الگوریتم ژنتیک به‌جز چند زمین که نسبت آب تخصیصی به آب موردنیاز کمتر از ۶۰ درصد است، بقیه‌ی زمین‌ها به نسبت آب مناسبی گرفته‌اند و برای بیشتر زمین‌ها این نسبت بالای ۸۰ درصد است. نکته‌ای که در توزیع کم‌آبیاری زمین‌ها قابل توجه است، این است

جدول ۶: میزان کاهش مصرف آب در اثر کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاهان

آب کم شده از هر مرحله در ماه خرداد (مترمکعب)				الگوریتم
پایانی	میانی	توسعه	آغازین	
۶۹۴۷	۱۳۴۳۲	۰	۰	ژنتیک
۵۲۹۵	۱۵۰۸۲	۰	۰	انبوه ذرات
۱۶/۸۹	۳۸/۷۷	۰	۰	مجموع مساحت (هکتار)

از مرحله رشد پایانی در الگوریتم ژنتیک ۰/۵۲ برابر مرحله رشد پایانی است که دلیل این امر رسیدن به سود بیشتر (با کم کردن بیشتر آب زمین‌هایی با مرحله رشد پایانی) است؛ ولی در انبوه ذرات این نسبت برابر ۰/۳۵ است. دلیل اینکه این مقدار کمتر از نسبت مساحت شده است (درحالی‌که باید هرچه بیشتر می‌شد) می‌تواند تأثیر نوع محصولات باشد که در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود. در جدول (۷) مقدار آبی که از هر نوع محصول کم شده است، ارائه شده است.

با توجه به اینکه در ماه خرداد محصول هیچ زمینی در مرحله رشد آغازین و توسعه نیست، مقادیر برای این مراحل در جدول (۶) صفر است. با توجه به جدول (۴)، ضریب واکنش عملکرد تمام محصولات در مرحله پایانی به میزان قابل توجهی از مرحله میانی کمتر است. در نتیجه در صورت جبران کمبود آب با کم کردن بیشتر آب زمین‌هایی با مرحله رشد پایانی، به سود بیشتری خواهیم رسید تا زمین‌هایی با مرحله رشد میانی. با توجه به ردیف آخر جدول (۶) مساحت زمین‌های با مرحله رشد پایانی ۰/۴۴ برابر زمین‌های با مرحله رشد میانی است؛ درحالی‌که کم کردن آب

جدول ۷: مقدار کم‌آبیاری محصولات زمین‌ها

سیب زمینی	پیاز	لوبیا	جو	گندم	
۱۳۲۴	۸۷۸	۴۶۷۷	۸۳۳۷	۵۱۶۰	آب کم شده از هر محصول (مترمکعب) در الگوریتم ژنتیک
۰	۰	۱۴۰۷	۹۱۸۳	۹۷۸۶	آب کم شده از هر محصول (مترمکعب) در الگوریتم انبوه ذرات
۱۱/۳۰	۸/۶۸	۱۵/۱۶	۹/۹۵	۱۰/۵۷	مجموع مساحت هر محصول (هکتار)

نسبت به آب در اکثر مراحل رشد به میزان قابل توجهی از سه محصول دیگر کمتر است. در نتیجه در صورت جبران کمبود آب با کم کردن بیشتر آب زمین‌هایی با این محصولات، به سود بیشتری خواهیم رسید که نتایج اجرا نیز گواه این موضوع است. دلیل دیگری که می‌توان اشاره کرد اختلاف درآمد و هزینه کاشت محصولات است. محصولاتی که هزینه بالاتری دارند باید کمتر آسیب ببینند تا ضرر

همان‌طور که از نتایج جدول (۷) مشخص است، برای هر دو الگوریتم میزان کم کردن آب از زمین‌هایی با محصول گندم و جو خیلی بیشتر از زمین‌هایی با محصولات دیگر است. برای محصولات پیاز و سیب‌زمینی نیز در الگوریتم انبوه ذرات آب کم شده صفر و در ژنتیک نیز کم است. دلیل این نتایج و این‌گونه تخصیص می‌تواند دو موضوع باشد. با توجه به جدول (۴)، ضریب واکنش عملکرد گندم و جو

بروند که نتایج جدول (۷) به خوبی این را نشان می‌دهد.

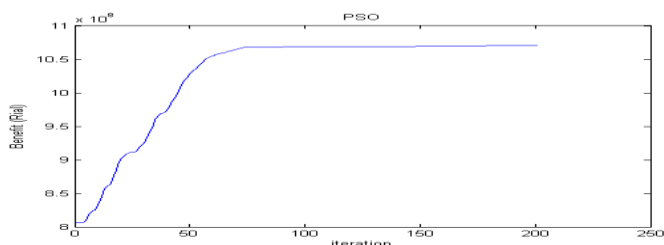
۶-۱- مقایسه و ارزیابی عملکرد دو الگوریتم

به منظور مقایسه‌ی الگوریتم‌ها از پارامترهای همگرایی، پایداری، پیچیدگی مدل‌سازی و زمان اجرای الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. در ادامه نتایج این مقایسه ارائه می‌شود.

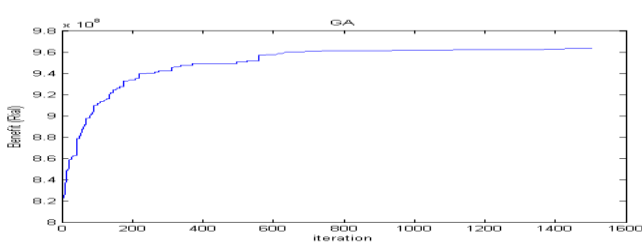
۶-۱-۱- همگرایی الگوریتم‌ها

هرقدر یک الگوریتم سریع‌تر به همگرایی برسد، نشان از برتری این الگوریتم دارد. شکل (۱۴) روند بهینه شدن تابع بهینگی را نشان می‌دهد.

کمتر شود. از طرف دیگر محصولاتی که درآمد بیشتری دارند نیز باید کمتر آسیب ببینند تا سود نهایی بیشتر شود. دادن آب کمتر نسبت به آب مورد نیاز باعث بیشتر شدن آسیب به محصولات زمین‌ها می‌شود. با توجه به جدول (۲)، سیب‌زمینی و پیاز و در مرتبه بعدی لوبیا هزینه و درآمد بسیار بالاتری نسبت به دو محصول دیگر دارند. حتی اختلاف درآمد و هزینه این محصولات نیز تفاوت چشمگیری با دو محصول دیگر دارد. در نتیجه الگوریتم‌ها باید برای بیشتر شدن سود به سمت آسیب کمتر زدن به محصولات سیب‌زمینی و پیاز و در مرحله بعدی لوبیا



(ب)



(الف)

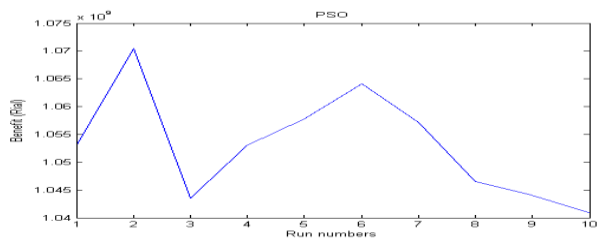
شکل ۱۴: روند همگرایی تابع بهینگی؛ الف-الگوریتم ژنتیک؛ ب-الگوریتم انبوه ذرات

همگرایی شتاب زیادی دارد و به اوج رشد خود رسیده است و از این اجرا به بعد الگوریتم همگرا می‌شود و تغییرات جزئی می‌شود. نتایج این دو شکل سرعت همگرایی بسیار بالاتر الگوریتم انبوه ذرات نسبت به ژنتیک را اثبات می‌کند.

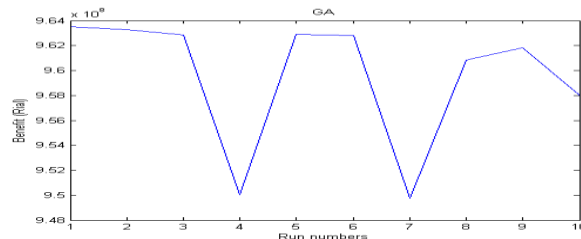
۶-۱-۲- تست تکرارپذیری الگوریتم‌ها

هرقدر یک الگوریتم در اجراهای متوالی نتایج مشابه‌تری را به دست آورد، این الگوریتم پایداری بیشتری دارد. برای بررسی این معیار، هر الگوریتم، ۱۰ بار اجرا شده است. نتایج اجراها در تکرارهای متوالی در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای شکل (۱۴)، در هر دو الگوریتم سرعت همگرایی در تکرارهای اولیه بسیار زیاد است اما به تدریج از این سرعت کاسته شده و در نهایت هر دو الگوریتم همگرا می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است تابع بهینگی هر دو الگوریتم همگرایی تدریجی دارد تا مقطعی. در الگوریتم ژنتیک از شروع تا اجرای تقریباً ۲۰۰ همگرایی شتاب بیشتری دارد؛ اما از این اجرا تا اجرای تقریباً ۶۰۰، شتاب همگرایی کمتر شده است. سپس یک همگرایی جزئی از این اجرا تا اجرای ۷۰۰ وجود دارد و از این اجرا به بعد دیگر الگوریتم همگرا شده و بهبود کمی بعد از این اجرا اتفاق می‌افتد. در مورد الگوریتم انبوه ذرات تا اجرای تقریباً ۷۰



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: پایداری الگوریتم‌ها در اجراهای متوالی؛ الف- الگوریتم ژنتیک؛ ب- الگوریتم انبوه ذرات

اجرا است؛ ولی ممکن است که برای رسیدن به نتیجه‌ای با دقت خاص، یک الگوریتم زمان کمتر نسبت به الگوریتم دیگر بگیرد. برای تست این مسئله، زمان رسیدن به دقتی خاص بررسی می‌شود (رسیدن به سود ۰.۹۵۰۰۰۰۰۰). پارامترهای هر الگوریتم هم همان پارامترهای دست آمده از مراحل قبلی است و تنها شرط توقف تغییر یافته است. باز به دلیل اینکه زمان اجراها به شرایط بستگی دارد از میانگین زمان ۱۰ اجرا برای رسیدن به دقتی خاص در هر الگوریتم استفاده شده است. متوسط زمان اجرای الگوریتم ژنتیک در این ۱۰ اجرا ۳۴۲ ثانیه و الگوریتم انبوه ذرات ۷۰ ثانیه است که این ارزیابی نیز برتری الگوریتم انبوه ذرات را نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحقیق حاضر تلاشی برای تعیین یک برنامه در تخصیص بهینه آب به زمین‌های کشاورزی بوده است، به گونه‌ای که در شرایط محدودیت آب بتوان عملکرد مطلوبی از لحاظ بهره‌وری اقتصادی به دست آورد. در این راستا با توجه به گسترده و پیچیده بودن فضای جواب برای تعیین برنامه بهره‌برداری از منابع آبی، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و انبوه ذرات برای بهینه‌سازی استفاده گردید. همچنین به دلیل محدودیت آبی، روش کم آبیاری استفاده شد تا به مدیریت صحیح و بهینه منابع آب کمک نماید. نتایج حاکی از کارا بودن

به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر ثبات الگوریتم، واریانس تغییرات جواب نهایی الگوریتم در ۱۰ اجرا محاسبه شده است. به منظور درک و مقایسه‌ی بهتر از واریانس داده‌های نرمال شده استفاده می‌شود. این داده‌ها از طریق رابطه ۱۳ نرمال شده‌اند.

$$N_{ij} = \frac{S_{ij} - \min(S_{ij})}{\max(S_{ij}) - \min(S_{ij})} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

به دلیل نرمال کردن داده‌ها، واریانس بین صفر تا یک متغیر خواهد بود و هرچه قدر به صفر نزدیک‌تر باشد، الگوریتم ثبات بیشتری دارد. واریانس الگوریتم ژنتیک ۰/۱۵۱ و الگوریتم انبوه ذرات ۰/۱۰۴ است که ثبات نسبتاً مناسب هر دو الگوریتم را اثبات می‌کند. در این ارزیابی نیز الگوریتم انبوه ذرات جواب بهتری داده است و ثبات بیشتری نسبت به ژنتیک دارد.

۶-۱-۳- زمان اجرای الگوریتم‌ها

متوسط زمان اجرای الگوریتم ژنتیک در ۱۰ اجرای بالا (با شرط توقف تعداد اجراها) ۳۹۴ ثانیه و الگوریتم انبوه ذرات ۷۴ ثانیه است که این زمان‌ها با توجه به فضای گسترده جواب (تخصیص ۱۳۹۰۰۰ مترمکعب آب به ۱۹۱ زمین با مساحت بیش از ۵۵ هکتار و با محصولات و دوره رشد مختلف) و پیوسته بودن این فضا، مناسب و منطقی است. زمان اجرای الگوریتم انبوه ذرات با توجه به کم بودن تعداد جمعیت اولیه و تعداد اجراها و با توجه به عملگرهای آن به طور معناداری از زمان اجرای الگوریتم ژنتیک کمتر است. زمانی که در بالا بررسی شد با فرض شرط توقف تعداد

کل زمین‌های کشاورزی است که این امر موجب می‌شود تا با این مدل، بیشتر زمین‌ها به عملکرد قابل قبولی برسند و رضایت بیشتر کشاورزان حاصل گردد؛ هرچند که سود اقتصادی کل با کاهش معناداری روبرو شود.

با توجه به نتایج شکل (۱۲)، برای رسیدن به سود اقتصادی بیشتر بهتر است جای کم‌آبیاری در مواقع کمبود آب، برخی از زمین‌ها خشک شوند؛ اما با این کار شاهد نارضایتی برخی از کشاورزان خواهیم بود. برای این منظور نیز چند راهکار ارائه می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان خسارت این کشاورزان را با سیاست‌هایی مثل بیمه جبران کرد. یا می‌توان یک شرط دیگر وارد مدل کرد و آن این است که از هر زمینی تا نسبتی از آب موردنیاز آن می‌توان کم کرد نه کل آب آن. در به دست آوردن این نسبت ابتدا باید یک پیش‌پردازشی انجام داد تا جمع مقدار مجاز کم کردن از تمام زمین‌ها بزرگ‌تر از کمبود آب در دور آبیاری موردنظر باشد.

در ادامه در رابطه با مشکلات عمده این تحقیق و راهکارهای آن برای تحقیقات آینده، توضیح داده خواهد شد. در این تحقیق فرض شده است که کمبود آب فقط در ماه خرداد اتفاق می‌افتد درحالی‌که این مسئله می‌تواند در ماه‌ها دیگر هم رخ دهد. بهتر است این تحقیق به‌صورت پویا برای تمام ماه‌ها انجام شود. همچنین دور آبیاری در این پژوهش ماه گرفته شده است که دوره‌ی بسیار طولانی و تقریباً غیرعملی است. بهتر است تحقیق برای دوره‌های آبیاری کمتر مثل ۱۰ روز اجرا شود. در این تحقیق آب قابل استحصال از منابع آب فرض شده است که معلوم است. برای این منظور نیز می‌توان مدل‌های پیش‌بینی استفاده کرد تا بتوان با اجرای مدل‌ها برای آینده تصمیم‌گیری کرد. حتی برای برنامه‌ریزی میزان آب استحصالی از منابعی مثل سد در دوره‌های آبیاری فعلی و آینده می‌توان به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی نمود

مدل‌های پیشنهادی است. با ارائه این مدل‌ها جواب‌های قابل قبولی در زمینه حداکثر سازی سود اقتصادی در منطقه مورد مطالعه به دست آمدند. با توجه به تحلیل نتایج تخصیص دو الگوریتم برای محصولات و مراحل رشد (جدول (۶) و (۷)) به نظر می‌رسد که در صورت جبران کمبود آب از زمین‌هایی که محصولات آن‌ها با توجه به مرحله رشد، ضریب واکنش عملکرد کمتری نسبت به محصولات زمین‌های دیگر دارند و یا هزینه و درآمد محصولات آن‌ها نسبت به محصولات زمین‌های دیگر پایین‌تر است، سود اقتصادی بیشتر خواهد شد. در واقع بهتر است که در هر دور آبیاری، زمین‌هایی که محصولات آن‌ها با توجه به مرحله رشد، ضریب واکنش عملکرد بالاتر دارند و همچنین محصولات آن‌ها هزینه و درآمد بیشتری دارند، کمترین آسیب را از محدودیت آب ببینند تا سود حاصل بیشینه شود.

سود حاصل از تخصیص با الگوریتم انبوه ذرات اختلاف معناداری با نتایج الگوریتم ژنتیک دارد و از آن بیشتر است. همچنین نتایج تست همگرایی الگوریتم‌ها، حاکی از سرعت همگرایی بسیار بالاتر انبوه ذرات است. نتایج تست تکرارپذیری الگوریتم‌ها نیز، ثبات بالاتر الگوریتم انبوه ذرات را نمایان می‌کند. با توجه به نتایج ارزیابی زمان اجرای الگوریتم‌ها در دو حالت تعریف شرط توقف (تعداد اجرا و رسیدن به دقتی خاص)، الگوریتم انبوه ذرات در هر دو حالت زمان اجرای کمتری دارد. در مجموع الگوریتم انبوه ذرات در تمام جنبه‌های بررسی‌شده برتری قابل‌توجهی نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. همچنین با توجه به اهمیت معیارهای مقدار بهینگی جواب نهایی و پایداری برای برنامه‌ریزان آبیاری، الگوریتم انبوه ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک برتری دارد. تنها مسئله‌ای که در اجرای این الگوریتم وجود دارد، تخصیص ندادن هیچ آبی به برخی از زمین‌ها است که این امر باعث نارضایتی برخی از کشاورزان خواهد شد. درحالی‌که از نکات قابل‌توجه الگوریتم ژنتیک تخصیص بهینه آب موجود به

اهداف دیگری مثل هزینه آب را هم با آن تلفیق کرد و حتی می‌توان بهینه‌سازی را به صورت چندهدفه انجام داد تا سود ناخالص ملاک بهینه‌سازی شود. در این تحقیق از الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات استفاده شد. می‌توان نتایج روش‌های دیگر مثل بهینه‌سازی خطی و غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا و حتی الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر را با این الگوریتم‌ها مقایسه نمود.

که آب موجود و آورد پیش‌بینی شده به سد تکافوی نیاز آینده را بکند یا سود حاصل در پایان سال زراعی بیشینه شود. همچنین در این مدل مصرف کننده منابع آب فقط بخش کشاورزی است. این مدل را می‌توان برای جاهایی که بخش‌های دیگر مثل خدماتی، صنعتی و غیره نیز از آب استفاده می‌کنند توسعه داد. در تابع هدف این تحقیق سود، هزینه و تابع عملکرد محصولات هر زمین تأثیر دارند. در واقع سود خالص ملاک قرار گرفته است؛ درحالی که می‌توان

مراجع

- [1] H. Asadi, Gh. R. Soltani, and J. Torkamani, "Irrigation water pricing in Iran A case study on land downstream of Taleghan dam", *Agricultural economics and development*, Vol. 15(58), pp. 61-91, 2007 (Persian).
- [2] D. Raes, S. Geerts, E. Kipkorir, J. Wellens, and A. Sahli, "Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model". *Agricultural water management*, Vol. 81(3), pp. 335-357, 2006.
- [3] P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres and D. Raes, "Deficit irrigation practices", *FAO Water Reports No. 22*, 2002.
- [4] J. F. O. Alvarez, J. A. de Juan Valero, J. M. T. Martín-Benito, and E. L. Mata, "MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management", *Irrigation Science*, Vol. 23(2), pp. 61-75, 2004.
- [5] M. Habibi Davijani, M. E. Banihabib, and S. R. Hashemi, "Development of Optimization Model for Water Allocation in Agriculture, Industry and Service sectors By Using Advanced Algorithm, GAPSO", *Journal of Water and Soil*, Vol. 27(4), pp. 680-691, 2013 (Persian).
- [6] Divakar, L., Babel, M.S., Perret, S.R. and Gupta, A.D., "Optimal allocation of bulk water supplies to competing use sectors based on economic criterion—An application to the Chao Phraya River Basin, Thailand", *Journal of Hydrology*, Vol. 401(1), pp. 22-35, 2011.
- [7] [7] M. Zarezadeh, S. Morid, A. Salavitarab, and K. Madani, "Evaluating the Impacts of Climate Change and New Developments on Water Scarcity in Iran's Qezelozan-Sefidrood River Basin", *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, Vol. 6(2), pp. 93-104, 2012 (Persian).
- [8] [8] Rees, H. G., Matthew GR Holmes, M. J. Fry, Andrew R. Young, D. G. Pitson, and S. R. Kansakar, "An integrated water resource management tool for the Himalayan region", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 21(7), pp. 1001-1012, 2006.
- [9] [9] McKinney, Daene C., Ximing Cai, and David R. Maidment. "A prototype GIS-Based Decision Support System for River Basin Management", presented at the ESRI International User Conference. 1997.
- [10] [10] Schlüter, M., Savitsky, A.G., McKinney, D.C. and Lieth, H., "Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta: a water management model for ecological impact assessment", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 20(5), pp. 529-545, 2005.
- [11] [11] A. B. Yazdi, S. Araghinejad, A. P. Nejadhashemi, and M. S. Tabrizi, "Optimal water allocation in irrigation networks based on real time climatic data", *Agricultural water management*, Vol. 117, pp. 1-8, 2013.
- [12] [12] Z. Shangguan, M. Shao, R. Horton, T. Lei, L. Qin, and J. Ma, "A model for regional optimal allocation of irrigation

- water resources under deficit irrigation and its applications”, *Agricultural Water Management*, Vol. 52(2), pp. 139-154, 2002.
- [13] M. Moghaddasi, S. Morid, and Sh. Araghinejad, “Optimization of Water Allocation During Water Scarcity Condition Using Non-Linear Programming, Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization (Case Study)”, *Iran-Water Resources Research*, Vol. 4(3), 1-13, 2009 (Persian).
- [14] A. Montazar, and A. Rahimikob, “Optimal water productivity of irrigation networks in arid and semi- arid regions”. *Irrigation and drainage*, Vol. 57(4), pp. 411-423, 2008.
- [15] J. Reça, J. Roldán, M. Alcaide, R. López, and E. Camacho, “Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems: I. Description of the model”, *Agricultural water management*, Vol. 48(2), pp. 103-116, 2001.
- [16] S. F. Kuo, G. P. Merkley, and C. W. Liu, “Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm”, *Agricultural Water Management*. Vol. 45, pp. 243–266, 2000.
- [17] A. Chehraghani, M. S. Mesgari, M. Karimi, and A. S. Mastan, “Application of pattern search method in GIS for determining the optimal cultivation area of different crops”, *Geomatics 87 Conference*, Tehran. (Persian).
- [18] Kijne, Jacob W., Randolph Barker, and David J. Molden, eds, *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement* (Vol. 1). Cabi, 2003.
- [19] U. H. Zia, and A. Anwar, “Irrigation scheduling with genetic algorithms”, *Journal of Irrig. and Drain. Eng.*, Vol. 136(10), pp. 704-714, 2010.
- [20] D. Nagesh Kumar, K. S. Raju, and B. Ashok, “Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132(2), pp. 123-129, 2006.
- [21] R. Wardlaw, and K. Bhaktikul, “Application of genetic algorithms for irrigation water scheduling”, *Irrigation and Drainage*, Vol. 53(4), pp. 397-414, 2004.
- [22] J. Zhang, Z. Wu, C. T. Cheng, and S. Q. Zhang, “Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation”. *Water Science and Engineering*, Vol. 4(1), pp. 61-74, 2011.
- [23] D. Nagesh Kumar, and M. Janga Reddy, “Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133(3), pp. 192-201, 2007.
- [24] A. Sheta, and H. Turabieh, “A comparison between genetic algorithms and sequential quadratic programming in solving constrained optimization problems”, *ICGST International Journal on Artificial Intelligence and Machine Learning (AIML)*, Vol. 6(1), pp. 67–74, 2006.
- [25] S. N. Sivanandam, and S. N. Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
- [26] J. Y. Yeh, and W. S. Lin, “Using simulation technique and genetic algorithm to improve the quality care of a hospital emergency department”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 32(4), pp. 1073-1083, 2007.
- [27] R. C. Eberhart, and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory”, presented at the sixth international symposium on micro machine and human science, 1995.
- [28] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, “Particle swarm optimization”, *Swarm intelligence*, Vol. 1(1), pp. 33-57, 2007.
- [29] R. Samsami, “Comparison Between Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Colony Optimization (ACO) Techniques for NO Emission Forecasting in Iran”, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 28(12), pp. 1996-2002, 2013.
- [30] A. P. Engelbrecht, *Fundamentals of computational swarm intelligence* (Vol. 1).

- Chichester: Wiley, 2005.
- [31] R. C. Eberhart, and Y. Shi, "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization", presented at the Evolutionary Computation Conference, 2000.
- [32] A. Alizadeh, and K. Gholamali, Crops water requirements in Iran. Mashhad: Emam Reza university Press, 2008 (Persian).
- [33] R. Allen, L.A. Pereira, D. Raes and M. Smith, "Crop evapotranspiration", FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- [34] J. F. Ortega, J. A. De Juan, and J. M. Tarjuelo, "Improving water management: The irrigation advisory service of Castilla-La Mancha (Spain)", Agricultural Water Management, Vol. 77(1), pp. 37-58, 2005.
- [35] P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres and D. Raes, "Crop yield response to water", FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, 2012.
- [36] J. Doorenbos and W. O. Pruitt, "Guidelines for predicting crop water requirements", FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, 1977.
- [37] Estimated Costs of Crop Production in Zanan, WebPage, 2014. [Online]. Available from:
http://www.agrizanjan.ir/index.php?option=com_content&view=article&id=524:2014-08-21-07-14-21&catid=45&Itemid=232
- [38] S. J. Meyer, K.G. Hubbard and D.A. Wilhite, "A crop- specific drought index for corn: i. model development and validation", Agronomy Journal, Vol. 85, pp. 388-395, 1993.
- [39] B. Ghahraman, and A. R. Sepaskhah, "Use of water deficit sensitivity index for partial irrigation scheduling of wheat and barley", Irrigation Science, Vol. 18, pp. 11-16, 1997.
- [40] B. Ghahraman, and A. R. Sepaskhah, "Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply", Irrigation and Drainage, Vol. 53(1), pp. 39-54, 2004.
- [41] J. Doorenbos and A.H. Kassam, "Yield response to water", FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, 1979.
- [42] M. Najarchi, F. Kaveh, H. Babazadeh, and M. Manshouri, "Determination of the yield response factor for field crop deficit irrigation". African Journal of Agricultural Research, Vol. 6(16), pp. 3700-3705, 2011.
- [43] H. Motee G., Sh., Lotfi, M.M.S., and Esfahlan, An overview of some intelligent optimization methods. Shabestar: Islamic Azad University- Shabestar branch Press, 2010 (Persian).



Comparing the efficiency of GA and PSO metaheuristic algorithms in optimal allocation of water to agricultural farms in water scarcity condition

Bahram Saeidian^{*1}, Mohamad Saadi Mesgari², Mostafa Ghodousi³

1- MSc. in Geospatial Information System, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology

2- Associate Prof. in Geospatial Information System, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, and Geoinformation Technology Center of Excellence, K.N.Toosi University of Technology

3- Ph.D. student in Geospatial Information System, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology

Abstract

Water requirements in agricultural production sector have increased in recent years. This necessitates the adequate management of limited water resources. Since agriculture is the main water consumer, finding proper methods and models for the allocation of water to farm lands is vital to the management of available water. The goal of this study is to find ways to optimize the allocation of water to the farms in water scarcity condition, using Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA), and to compare their capabilities. First, the needed data was generated and prepared using analysis functions of GIS. Then, the water attainable from several resources and water required by different farms were computed. Afterwards, objective function was calculated using the land area, the crop price and yield response factor. The allocation of water to lands was optimized such that the total economic profits of all farms were maximized. The profits resulted from PSO were slightly about 106938976 Rial higher than GA. In addition, the convergence of PSO was much faster than GA. The repeatability test showed higher stability of PSO (The variance of the normalized values for GA and PSO are 0.151 and 0.104 respectively). In two different scenarios, termination conditions are considered as to reach a specified run number and to reach a defined accuracy of answers. For both scenarios, the execution times of PSO were less than GA (320 and 272 seconds correspondingly). In general, PSO performance is better than GA regarding all evaluation criteria. The only drawback of PSO is that it allocates no water to some of the farms. In other words, the algorithm suggests that for maximizing the economic revenue, some of the crops and farms should be left without irrigation.

Key words: Agricultural Water Allocation, Water Scarcity, GIS, GA, PSO.