



Optimal Water Scheduling in Irrigation Networks Using Genetic Algorithm

M.J. Monem¹, M.R. Najafi²
and S. Khoshnavaz³

Abstract

The development of water delivery schedules in irrigation canals is mostly performed on the basis of heuristic methods and personal judgment. However, the great impact of water delivery schedules on the performance of systems has recently called for analytical methods to be considered. Analytical methods used so far are mostly single objective. Only one study has considered a multi-objective approach using simulated annealing optimization techniques. In this research the genetic algorithm is used and a model has been developed accordingly. In this model an optimal water delivery schedule for lateral intakes is developed such that different objectives of canal capacity and/or delivery periods are optimized. In this model the number of lateral intakes, their delivery flow limits, and coverage areas are given and an optimal water delivery schedule for the distributary canal is determined. The model is applied on one of the secondary canals of Fomanat Irrigation Network in west Gilan Province, Iran. For this purpose, two objective functions and two options for irrigation blocks including 6 and 7 groups of lateral intakes, totally 4 variants, are tested. The model has derived the optimal water delivery schedule for each variant. Considering the management strategies, the best option could be selected. The results show the ability of the developed model as an efficient tool for water management in irrigation canals.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization, Water delivery schedule, Operating irrigation networks.

برنامه ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمد جواد منعم^۱، محمد رضا نجفی^۲
و صائب خوشنواز^۳

چکیده

برنامه ریزی تحویل و توزیع آب در کانال‌های آبیاری اغلب بصورت توصیفی و مبتنی بر قضاوت کارشناسی صورت می‌گیرد. با توجه به اهمیت موضوع، اخیراً روش‌های تحلیلی مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های تحلیلی مورد استفاده غالباً روش‌های تک هدفی بوده‌اند. در یک مطالعه، روش بهینه سازی SA مورد استفاده قرار گرفته و در آن حل مسائل توزیع آب در کانال‌های آبیاری بصورت چند هدفی بوده و اهداف متفاوت را بصورت همزمان مد نظر قرار داده است. در تحقیق حاضر، از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک بصورت چند هدفی استفاده شده و بر این اساس مدل برنامه ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری تهیه گردید. مدل تهیه شده برای گزینه‌های مختلف در یک کانال توزیع کننده در شبکه آبیاری فومانات در گیلان مورد آزمون قرار گرفت و برای هر یک از گزینه‌ها، برنامه بهینه تحویل آب را ارائه نمود. با توجه به نتایج بهینه‌سازی و سیاست‌های مورد نظر مدیریت سیستم، می‌توان مناسبترین گزینه‌ها را برای شرایط مورد نظر انتخاب کرد. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان اظهار داشت که مدل توسعه یافته می‌تواند بعنوان یک ابزار مفید در مدیریت توزیع آب در شبکه‌های آبیاری بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی، برنامه تحویل آب، بهره برداری از شبکه آبیاری

1- Associate Professor, Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, The University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Soil and water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj, Iran.

3- Former Graduated Student, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Soil and water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Iran.

۱- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران، کرج
۳- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران

۱- مقدمه

یکی از عوامل موثر بر عملکرد ضعیف کانال‌های آبیاری عدم برنامه ریزی مناسب تحویل آب در کانال‌ها است. عدم برنامه ریزی مناسب تحویل آب موجب کمبود یا مازاد آب برای مصرف کنندگان، اتلاف آب و نابرابری در تحویل آب می‌گردد. بطور کلی بهبود برنامه ریزی تحویل آب در کانال‌های آبیاری موجب ارتقاء قابل توجه عملکرد کانال‌ها می‌گردد (Chambers, 1988). برای ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضای آب با هزینه مناسب در شبکه‌های آبیاری، برنامه‌ریزی تحویل آب به آبیگرها باید صورت گیرد. این برنامه‌ریزی بر روی خصوصیات فیزیکی شبکه شامل ظرفیت کانال‌ها و سازه‌ها، نوع و مکانیزم بهره‌برداری از سازه‌های کنترل و آبیگر تأثیر می‌گذارد (Replogle et al., 1980). علاوه بر آن خصوصیات مدیریتی شبکه اعم از عملکرد سیستم، کفایت و راندمان تحویل، سهولت و هزینه بهره‌برداری نیز تحت تأثیر برنامه تحویل آب می‌باشد. بنابراین مسئله برنامه ریزی تحویل آب علاوه بر هنگام طراحی سیستم در زمان بهره‌برداری نیز حائز اهمیت می‌باشد. برنامه ریزی تحویل آب در کانال‌ها تاکنون اغلب بصورت توصیفی و مبتنی بر قضاوت کارشناسی صورت می‌گرفته که همواره متضمن مناسبترین برنامه نبوده است. اخیراً با توجه به محدودیت‌های موجود و اهمیت بهره‌برداری بهینه از منابع، توجه به استفاده از روش‌های تحلیلی در این امر ایجاد شده است.

روش بهینه سازی روش مناسبی برای حل مسئله تحویل آب در کانال‌های آبیاری است. بطور کلی روش‌های بهینه سازی را می‌توان به دو دسته شامل روش‌های کلاسیک مبتنی بر ریاضیات دیفرانسیل و روش‌های عددی تقسیم نمود. روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی از نظر نوع تابع هدف و قیدها و تعداد متغیرها دارای محدودیت‌هایی هستند که در روش‌های عددی وجود ندارد. ردی و همکاران در سال ۱۹۹۴ با استفاده از برنامه ریزی صفر و یک بصورت تک هدفی اقدام به تهیه برنامه بهینه تحویل آب در یک کانال نمودند (Reddy et al., 1994). (Wang et al., 1995) با توسعه مدل ردی و همکاران آنرا بر روی کانال فنگ جیاشان با تعداد ۲۶ آبیگر در چین بکار بردند. با توجه به محدودیت‌های مختلف روش‌های کلاسیک در مقایسه با توانمندی و انعطاف‌پذیری روش‌های عددی بهینه سازی، استفاده از روش‌های عددی بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک و SA^۱ در این خصوص مورد توجه قرار گرفته است. منعم و نامداریان در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ از روش عددی بهینه سازی بصورت چند هدفی استفاده نموده، مدلی برای توزیع بهینه آب در کانال‌های آبیاری ارائه کردند و آن را بر روی کانالی

در شبکه آبیاری ورامین مورد آزمون قرار دادند (Monem and Namdarian, 2002 & 2005).

همزمان با تحقیقات وسیعی که برای افزایش قابلیت‌های روش کلاسیک و رفع محدودیت‌های آنها صورت گرفته مهندسیین با استفاده از نظریات سایر علوم سعی در ابداع روش‌های کارآمد بهینه‌سازی در مسائل کاربردی مهندسی نمودند. روش ژنتیک یکی از روش‌های عددی است که در مدت زمان اندکی کاربردهای گسترده‌ای در مسائل بهینه سازی یافته است. الگوریتم ژنتیک برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط جان هلند مطرح شد (Lawrence, 1991). کاربردهای موفق الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۸۹ با نوآوری‌های گلدبرگ آغاز گردید (Goldberg, 1989) و در گستره وسیعی از مسائل بهینه سازی بطور موفق به کار گرفته شد (Lawrence, 1991). در سال‌های اخیر از این روش جهت بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع، مدیریت آب‌های زیر زمینی و مخازن آب، استفاده گردیده است. منعم (۱۳۷۶) برای بهینه سازی عملکرد شبکه‌های آبیاری از روش ژنتیک در مدل ICSS-POM استفاده نمود. Wang (1991) جهت کالیبره نمودن یک مدل بارش-رواناب برای داده‌های حوضه‌ای واقع در اوکلاهاما از روش ژنتیک بهره گرفت. نمونه‌ای از مسئله چند هدفی آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط Ritzel and Eheart (1994) بررسی گردید. طی تحقیقات بعمل آمده توسط Davidson and Goulter (1995) امکان استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ارائه طرح بهینه مسیر انشعابات شبکه توزیع بررسی گردید. جهت طراحی بهینه سیستم نقلی شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحقیقاتی توسط دندی و همکاران (Dandy et al., 1996) صورت گرفت. همچنین Savic and Walter (1997) با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک مدل کامپیوتری بنام GANET تدوین کرده که طراحی شبکه توزیع آب را بصورتی انجام می‌دهد که هزینه بهره برداری را به حداقل برساند. تحقیق دیگری توسط Wardlow and Sharif (1999) در جهت بهینه سازی استفاده از مخازن بوسیله الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. تجربیات حاصله از کاربرد روش ژنتیک در انواع مسائل بهینه‌سازی بخصوص در مسائل توزیع آب بیانگر آن است که روش ژنتیک روشی کارآمد در مسائل بهینه سازی است که محدودیت روش‌های کلاسیک را نداشته و می‌توان از آن در بهینه سازی تحویل آب در کانال‌های آبیاری استفاده نمود. در این تحقیق برای برنامه ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری، با توجه به توانمندی‌های قابل توجه الگوریتم ژنتیک و انعطاف پذیری مناسب آن در فرایند بهینه‌سازی از این روش استفاده گردید. مدل

نسل‌های بعد دارای شایستگی بالاتری خواهند بود. در الگوریتم ژنتیک متغیرهای تصمیم‌گیری مانند ژن‌ها می‌باشند که از ترکیب تعدادی از آن‌ها بعنوان یک جواب مسئله یک رشته شبیه به کروموزوم بدست می‌آید. تعدادی از گزینه‌های جواب مسئله بصورت اعضا جامعه اولیه تلقی می‌گردند که با تلاقی رشته کروموزوم آن‌ها گزینه‌های جدیدی از متغیرها ایجاد می‌شود. با اختصاص احتمال بقاء بیشتر به جواب‌های مطلوبتر انتخاب اصلح صورت گرفته و نسل جدید با شایستگی بالاتر تولید خواهد شد. با تکرار این فرایند و پس از چندین نسل، شایسته‌ترین نسل که همان پاسخ بهینه مسئله باشد تولید خواهد شد.

روش ژنتیک برای شبیه‌سازی ریاضی فرایند طبیعی تکامل، از نمایش متغیرها به صورت کدهای مختلف (دو دویی) یا مقدار واقعی به دنبال یکدیگر به شکل یک رشته کروموزوم، و عملگرهای سه گانه ژنتیک شامل به‌گزینی، تلاقی و جهش که مختصرا تشریح می‌شود استفاده می‌نماید.

۲-۱-۱- به‌گزینی

پس از تولید جمعیت اولیه که بصورت تصادفی انجام می‌شود، زوج‌هایی از میان جمعیت اولیه برای تولید مثل به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. شانس انتخاب زوج‌هایی با شایستگی بالاتر در جامعه بیشتر خواهد بود. روش‌های مختلفی برای به‌گزینی پیشنهاد گردیده که انتخاب تناسبی نمونه‌ای از این تکنیک‌ها است. در این روش احتمال انتخاب والدین متناسب بامیزان شایستگی آنها می‌باشد.

۲-۱-۲- تلاقی

تلاقی یکی از مهمترین عملگرهای روش ژنتیک می‌باشد که برای ترکیب زوج‌های از قبل انتخاب شده با جابجایی قسمت‌هایی از کروموزوم آن‌ها استفاده می‌گردد. برای انجام تلاقی روش‌های متعددی پیشنهاد شده که تلاقی یک نقطه‌ای نمونه‌ای از آنها می‌باشد. در این روش نقطه خاصی از طول دو رشته کروموزوم والدین بصورت تصادفی انتخاب شده و از ابتدا تا محل برش، ژن‌های متناظر جابجا می‌گردند. در این صورت افراد جدید با خصوصیات تازه که برخی از خصوصیات خویش را از والدین به ارث برده اند تولید می‌گردد.

۲-۱-۳- جهش

در طبیعت جهش بصورت تغییر تصادفی یک ژن بر روی یک کروموزوم اتفاق می‌افتد. این امر اگر چه با احتمال ضعیف حادث می‌شود اما نقش مهمی در تکامل جامعه ایفا می‌کند. برای

برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک تهیه شد و در یک کانال توزیع کننده در شبکه آبیاری فومنات با اهداف زیر مورد استفاده قرار گرفت.

- ۱- تدوین مدل ریاضی به منظور ارائه برنامه بهینه توزیع آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک
- ۲- ارائه برنامه بهینه توزیع آب با تامین اهداف متفاوت اعم از کاهش ظرفیت کانال توزیع کننده و کاهش زمان مورد نیاز برای تکمیل برنامه آبیاری
- ۳- استفاده از مدل تهیه شده برای ارائه برنامه توزیع آب در یک کانال توزیع کننده در شبکه آبیاری فومنات

۲- روش تحقیق

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چند هدفی مدل برنامه ریزی تحویل آب در کانال‌های آبیاری تهیه شد. در این مدل برنامه تحویل آب به انشعابات کانال‌های توزیع کننده بگونه‌ای ارائه شده که اهداف متفاوتی اعم از کاهش ظرفیت کانال توزیع کننده و کاهش زمان مورد نیاز برای تکمیل برنامه آبیاری بصورت تک یا دو هدفی بهینه گردد. در این مدل ابتدا تعداد انشعابات، حد بالا و پایین میزان دبی تحویلی به هر انشعاب و سطح تحت پوشش هر انشعاب معرفی گردیده و برای تامین نیاز آبی گیاه در دوره مورد نظر برنامه بهینه تحویل آب به انشعابات و چگونگی تنظیم درجه سراب کانال توزیع کننده تعیین می‌شود. برنامه فوق برای یک کانال توزیع کننده در شبکه آبیاری فومنات واقع در غرب گیلان بکار گرفته شده و برای این منظور دو تابع هدف بصورت تک جمله‌ای و دو جمله‌ای به اضافه دو گزینه تعداد بلوک آبیاری شامل ۶ یا ۷ مجموعه آبگیر که به صورت مستقل آبیاری می‌شوند، جمعاً چهار گزینه مورد آزمون و بررسی قرار گرفت.

۲-۱- معرفی روش ژنتیک

روش ژنتیک با بهره‌گیری از نظریات تکامل و اصول علم ژنتیک بعنوان روشی موثر برای بهینه‌سازی که محدودیت‌های روش کلاسیک را ندارد ابداع شده است. این روش براساس اصل انتخاب اصلح استوار است که در آن موجوداتی با شایستگی بالاتر امکان بقا و تولید مثل بیشتری پیدا می‌کنند و پس از چندین نسل به درجه شایستگی بالاتری می‌رسند. در این روش فرایند تکامل طبیعی و انتخاب اصلح به صورت ریاضی شبیه‌سازی می‌شود. در فرایند تکامل طبیعی یک جامعه اولیه از موجودات وجود دارند که زوج‌های آن بصورت تصادفی با یکدیگر تلاقی نموده و با ترکیب کروموزوم‌ها تولید مثل می‌نمایند. با تکرار این فرایند و با توجه به اصل انتخاب اصلح

شبهه‌سازی ریاضی جهش، یکی از رشته متغیرها بصورت تصادفی انتخاب شده و یک ژن از آن رشته بصورت تصادفی انتخاب می‌گردد و با تغییر مقدار آن، عمل جهش شبهه سازی می‌شود.

۲-۲- تشریح اجزا اصلی الگوریتم بهینه سازی

سه جز اصلی هر مسئله بهینه سازی متغیرتصمیم گیری، قیدها و تابع هدف می‌باشند. متغیرهای تصمیم گیری جهت تحویل آب به هر آبگیر سه عامل مقدار جریان تحویلی، مدت زمان تحویل آب و دور آبیاری است و در سطح کانال‌ها ترتیب و نوبت بندی تحویل آب به آبگیرهای جانبی در امتداد هر کانال می‌باشد.

در این تحقیق با توجه به شرایط آبیاری در شبکه فونمات در هر نوبت آبیاری مدت زمان تحویل آب بصورت پیوسته، و در هر دوره آبیاری دور آبیاری ثابت و جریان تحویلی بصورت متغیر در نظر گرفته شده است. متغیر دیگر ترتیب قرار گیری انشعابات در کنار هم به منظور تعیین زمانبندی تحویل آب به آنها بوده است. قیدها شامل میزان دبی قابل انتقال هر انشعاب در محدوده حداقل و حداکثر و میزان دبی قابل انتقال کانال توزیع کننده بوده بنحوی که مجموع جریان ورودی به انشعاباتی که همزمان آبیاری می‌نمایند برابر یا کمتر از ظرفیت نهایی کانال توزیع کننده باشد. محدودیت بعدی شامل قید زمان بهره برداری بوده به نحوی که مجموع زمان تحویل آب به انشعابات واقع در هر بلوک، از دور آبیاری مورد نظر تجاوز ننماید. جهت مقایسه برنامه‌های تحویل آب و دستیابی به بهترین گزینه از شاخصی بنام فاکتور شایستگی (FF) یا تابع هدف استفاده شده است. اجزاء تابع هدف بصورت نرمال شده در فاکتور شایستگی در نظر گرفته شده اند. هدف از نرمال نمودن عوامل، هم وزن نمودن آنها در توابع هدف بوده است. برای نرمال نمودن عوامل مانند ظرفیت کانال، مقدار متوسط آن در جامعه محاسبه و از تقسیم میانگین بر ظرفیت کانال مقدار نرمال شده آن محاسبه گردیده است. تابع هدف به دو صورت تک هدفی و دو هدفی در نظر گرفته شد که در حالت تک هدفی کاهش ظرفیت کانال توزیع کننده در طول دوره آبیاری مد نظر قرار گرفت و در تابع دو هدفی علاوه بر کاهش ظرفیت کانال توزیع کننده، کاهش زمان مورد نیاز برای تکمیل برنامه آبیاری نیز منظور گردید. مسئله بهینه سازی مورد نظر را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان نمود. که در آن $Nor(Q_d)$ حداکثر ظرفیت کانال نرمال شده، $Nor(T_r)$ حداکثر زمان مورد نیاز برای تکمیل برنامه آبیاری به صورت نرمال شده، Q_{di} ، Q_{maxdi} و Q_{mindi} به ترتیب دبی تحویلی به آبگیر و حداکثر و حداقل دبی قابل تحویل به آبگیر، m تعداد آبگیرهایی که همزمان آب دریافت می‌کنند، Q_{maxd} حداکثر ظرفیت

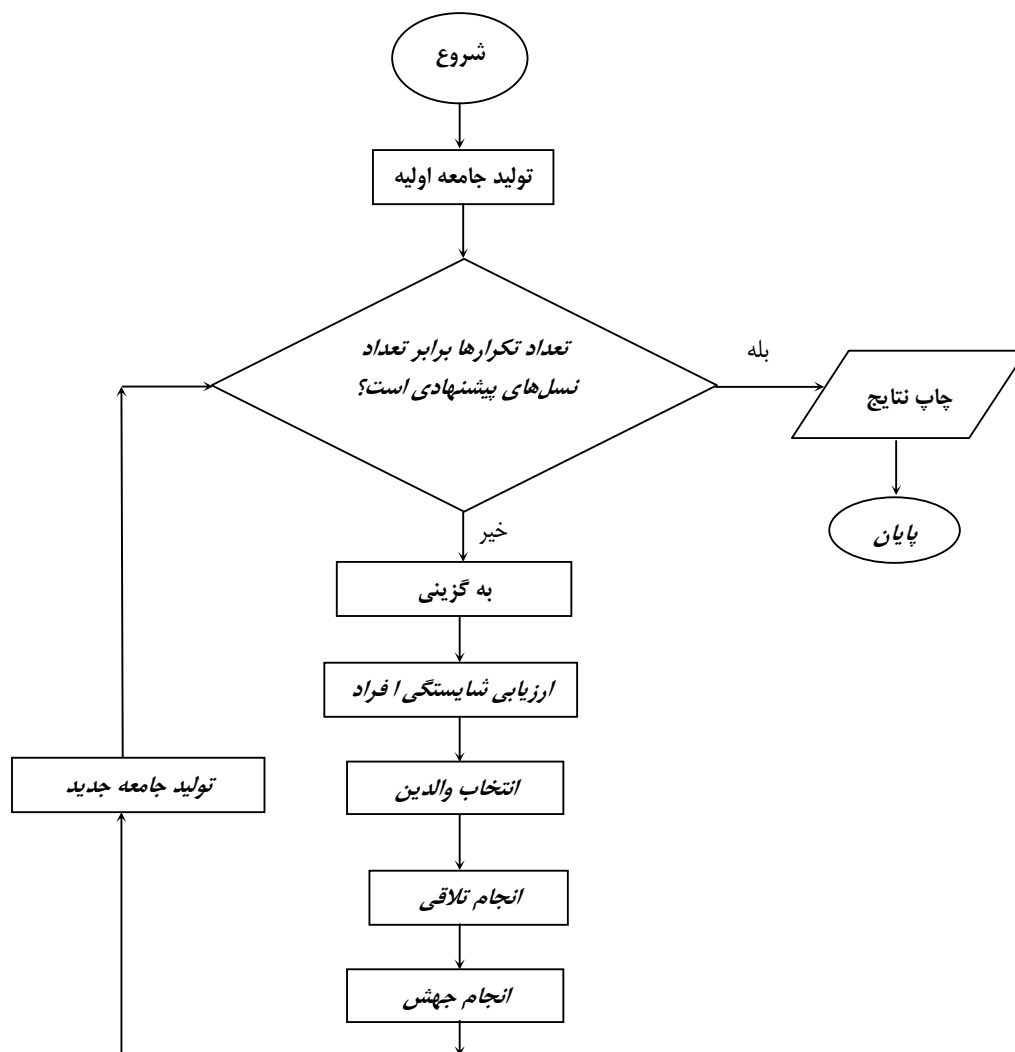
کانال، t_{di} مدت زمان تحویل آب به آبگیرهای واقع در هر بلوک آبیاری، n تعداد آبگیرهای واقع در هر بلوک آبیاری، و f فرکانس مجاز آبیاری می‌باشد.

$$\begin{aligned} Min.....FF &= Nor(Q_d) \\ or.....FF &= Nor(Q_d) + Nor(T_r) \\ ST \\ Q_{mind_i} &\leq Q_{d_i} \leq Q_{maxd_i} \\ \sum_{i=1}^m Q_{d_i} &\leq Q_{maxd} \\ \sum_{i=1}^n t_{d_i} &\leq f \end{aligned} \quad (1)$$

بر مبنای اصول روش بهینه سازی ژنتیک برای حل مسئله ابتدا باید اقدام به تولید جامعه اولیه نمود. سپس با استفاده از عملگرهای ژنتیک به ارتقاء جامعه آغازین پرداخت و پس از تکرار محاسبات به تعداد نسل‌های مورد نظر پاسخ بهینه را به دست آورد. در شکل ۱ نمودار گردش تولید جامعه اولیه و سیکل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است. مدل برنامه ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری بر این اساس تهیه شده است.

اطلاعات ورودی مدل شامل: تعداد آبگیرها از کانال توزیع کننده، سطح زیر کشت هر آبگیر، دبی حداکثر و حداقل هر آبگیر، مقدار عمق ناخالص آب آبیاری، دور آبیاری، حداکثر تعداد آبگیرهایی که همزمان می‌توانند آبیاری نمایند، و حداکثر تعداد آبگیرهایی که بصورت متوالی آبیاری می‌نمایند می‌باشد.

برای تولید جامعه اولیه ابتدا تعداد اعضاء جامعه تعیین می‌گردد. سپس به تعداد اعضاء جامعه مراحل زیر تکرار می‌شود. با توجه به نوع دریاچه هر آبگیر دبی تصادفی در محدوده مجاز آن تولید می‌شود. با دبی تولید شده برای هر انشعاب مدت زمان تحویل آب برای تامین نیاز آبی آن محاسبه می‌گردد. با معین بودن تعداد بلوک آبیاری (حداکثر تعداد آبگیرهایی که همزمان آبیاری می‌شوند) ترتیب آبگیرها در هر بلوک بصورت تصادفی به نحوی تعیین می‌گردد که هر آبگیر فقط یکبار ظاهر شود و هر بلوک حداقل یک آبگیر داشته باشد. سپس رشته ای به طول دو برابر تعداد انشعابات تشکیل می‌شود (شکل ۲). شماره آبگیر و مقدار دبی مربوط به آن به ترتیب در سلول‌های رشته قرار می‌گیرند. ظرفیت کانال توزیع کننده (Q_{dr}) در هر مقطع زمانی محاسبه می‌شود و از بین آنها بیشترین مقدار بعنوان حداکثر ظرفیت کانال توزیع کننده (Q_d) منظور می‌گردد.



شکل ۱- نمودار گردش تولید جامعه اولیه و سیکل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک

انتخاب تناسبی افراد جامعه به گزینی شده و برای تشکیل جامعه جدید به نسل بعد منتقل می‌گردند. همه افراد دو به دو به صورت تصادفی به عنوان والدین انتخاب و عمل تلاقی تک نقطه ای بر روی آنها اعمال می‌شود. جهت حصول اطمینان از حضور تمامی آبیگرها در هر یک از فرزندان جدید و یا عدم تکرار بیش از یکبار هر آبیگر در هر فرزند رشته فرزندان جدید بررسی و اصلاح لازم در آنها صورت می‌گیرد. با توجه به ثابت بودن تعداد بلوک‌های آبیاری هر یک از فرزندان جدید نشانگر یک گزینه از برنامه تحویل آب به آبیگرها می‌باشد. نمونه ای از دو رشته کروموزوم و تلاقی یک نقطه ای روی دو رشته کروموزوم تولید شده از برنامه تحویل آب و اصلاح آنها در شکل ۲ نشان داده شده است.

زمان مورد نیاز برای تکمیل آبیاری هر بلوک (Ct) محاسبه گردیده و بیشترین آنها، بعنوان حداکثر زمان مورد نیاز برای تکمیل برنامه آبیاری (Tr) انتخاب می‌شود. تعداد تنظیمات دریچه آبیگر سراب کانال توزیع کننده (Np) نیز از تعداد تغییرات ظرفیت کانال توزیع کننده به دست می‌آید. مقادیر نرمال شده پارامتر Tr و Qd محاسبه می‌شود. از بین اعضاء جامعه برنامه‌ای که دارای بیشترین درجه شایستگی است ذخیره می‌شود و سپس با استفاده از سیکل بهینه‌سازی ژنتیک نسبت به تولید نسل بعد اقدام می‌گردد.

جهت سیکل بهینه سازی ژنتیک، ابتدا مقادیر ورودی مدل شامل احتمال جهش و تعداد تکرارها مشخص می‌شود. سپس براساس

محل قطع

۷۰	۵	۸۵	۸	۵۵	۴	۷۰	۷	۶۵	۲	۷۵	۱	۹۵	۶	۱۵۰	۳	۲۹۵	۹	والد اول
۶۵	۱	۶۵	۳	۹۰	۴	۶۰	۶	۸۰	۸	۹۵	۹	۸۵	۵	۱۱۵	۲	۱۰۵	۷	والد دوم
۶۰	۶	۸۵	۸	۵۵	۴	۶۵	۱	۱۵۰	۳	۹۵	۹	۸۵	۵	۱۱۵	۲	۱۰۵	۷	فرزند اول
۷۰	۷	۸۵	۵	۹۰	۴	۶۵	۳	۸۰	۸	۷۵	۱	۹۵	۶	۱۵۰	۳	۲۹۵	۹	فرزند دوم

شکل ۲- دونمونه کروموزوم و نمونه تلاقی یک نقطه‌ای و اصلاح صورت گرفته روی دو کروموزوم

دقیق‌تر کانال‌های درجه ۲ آن انتخاب شده است. طول کانال ۶۸۵۲ متر با مقطع دوزنقه بوده و ظرفیت آن در ابتدا ۳ متر مکعب بر ثانیه و در انتها ۱/۸ متر مکعب بر ثانیه و تنظیم کننده‌های جریان از نوع سرریزهای نوک اردکی به تعداد ۷ عدد و آبگیرهای فرعی آن ۱۲ عدد، از نوع نیر پیک XX2 است، همچنین وسعت تحت پوشش انشعابات در مجموع ۲۱۰۰ هکتار می‌باشد. محصول آبی منطقه فومنتا برنج است. به منظور تحویل آب کانال‌های درجه یک به کانال‌های درجه دو برنامه مشخصی وجود ندارد و تمام کانال‌های درجه دو به طور هم زمان آب می‌گیرند (شرکت آب منطقه‌ای گیلان، ۱۳۴۲). در شکل ۳ شمای کلی کانال و انشعابات مورد مطالعه ارائه شده است.

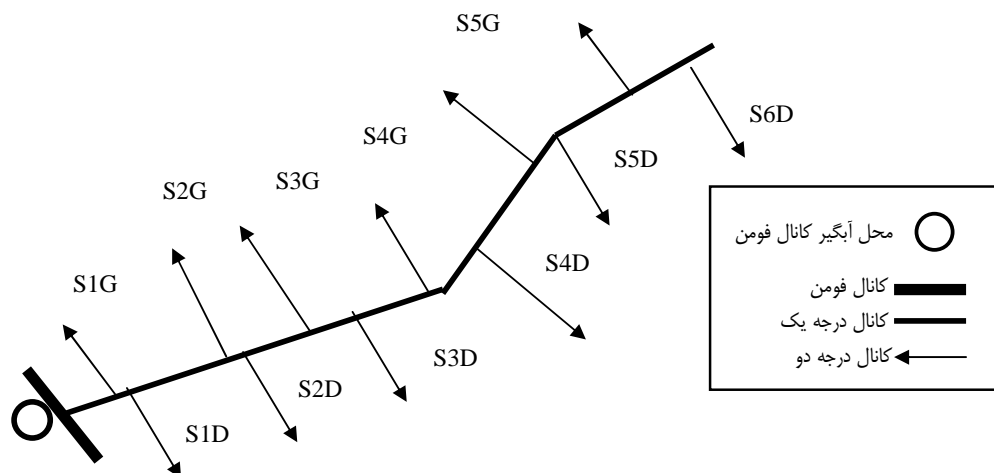
۲-۴- تعیین عوامل الگوریتم ژنتیک

تعیین برخی عوامل الگوریتم ژنتیک شامل تعداد اعضاء جامعه و احتمال جهش با انجام تحلیل حساسیت صورت گرفت. برای این منظور تابع هدف تک جمله‌ای شامل ظرفیت کانال توزیع کننده، تعداد بلوک‌های آبیاری، و سایر عوامل آبیاری ثابت در نظر گرفته شد. با آزمون‌های اولیه تعداد تکرارهای مناسب (نسل‌ها) که پس از آن عملاً بهبودی در نتایج مشاهده نشد به میزان ۶۰ تکرار یا نسل تعیین گردید. اعضاء جامعه در محدوده ۴ تا ۱۲ عضو در ۵ گزینه و برای هر گزینه در ۱۰ تکرار مورد آزمون قرار گرفت و با بررسی روند تغییرات تابع هدف و تحلیل حساسیت نتایج حاصله مناسب‌ترین تعداد اعضاء جامعه ۱۰ عضو تعیین شد. با در نظر گرفتن تعداد ۱۰ عضو در جامعه و ثابت بودن سایر عوامل، ۴ گزینه برای احتمال جهش به میزان ۰/۸۳٪، ۱/۶۷٪، ۲/۵٪، و ۳/۳۳٪ مورد آزمون قرار گرفت. با توجه به نقش جهش در پراکندگی نتایج، علاوه بر بررسی روند تغییرات تابع هدف، سرعت همگرایی و میزان پراکندگی پاسخ‌ها در طی نسل‌های مختلف نیز مورد بررسی و تحلیل حساسیت قرار گرفت و مناسبترین احتمال جهش مقدار ۳/۳۳٪ تعیین شد.

برای اجرای عملگر جهش برای هر عضو جامعه یک عدد تصادفی، بین صفر و یک با توزیع یکنواخت تولید شده و با احتمال جهش مقایسه می‌گردد. در صورت کمتر بودن آن از احتمال جهش عمل جهش روی یکی از ژن‌های آن عضو که عبارت است از یک آبگیر در یک بلوک انجام می‌گردد. در عمل جهش چنانچه بلوک مورد نظر دارای بیش از یک آبگیر باشد یکی از آبگیرهای آن بصورت تصادفی انتخاب می‌گردد و از بلوک مورد نظر حذف و به بلوک مجاور منتقل می‌گردد. اگر بلوک مورد نظر فقط یک آبگیر داشته باشد از بلوک مجاور یک آبگیر بصورت تصادفی انتخاب و به بلوک مورد نظر منتقل می‌شود. پس از عمل جهش نتایج به نحوی کنترل می‌گردد که تعداد کل آبگیرها به همان تعداد اولیه باقی مانده و بلوکی بدون آبگیر باقی نماند. سپس مطابق مراحل شرح داده شده در تولید جامعه اولیه پارامترهای Qd، Tr و Np برای جامعه جدید محاسبه و از بین اعضاء جدید، چنانچه فردی دارای شایستگی بالاتری از بهترین فرد جوامع قبلی باشد جایگزین آن می‌شود. در صورت تکرار تعداد سیکل بهینه سازی به تعداد نسل‌های مورد نظر، نتیجه (بهترین فرد) گزارش می‌گردد.

۲-۳- کانال مورد تحقیق

کانال مورد مطالعه که مدل مزبور بر روی آن مورد آزمون قرار گرفته در منطقه فومنتا در غرب گیلان واقع می‌باشد. وسعت کشتزارهای منطقه فومنتا ۱۴۵ هزار هکتار بوده و منبع اصلی تامین آب این منطقه سد سفیدرود است. سد انحرافی تاریک در پایین دست سد سفید رود وظیفه انحراف آب رودخانه سفید رود به این منطقه را بر عهده داشته و آب منحرف شده توسط تونل و کانال فومن به واحدهای عمرانی شبکه آبیاری فومنتا منتقل می‌شود. در این تحقیق کانال درجه یک BP14 از واحد عمرانی F2 شرقی به علت قرار گرفتن در مکان نسبتاً میانی شبکه، و دور بودن از نقاط مرزی ابتدا و انتها، نزدیکی به اداره آبیاری فومنتا و امکان کنترل و تنظیم



شکل ۳- شمای کلی کانال BP14 و انشعابات مربوطه

هدف تک جمله‌ای و تعداد بلوک آبیاری به ترتیب ۶ و ۷ در نظر گرفته شد. در گزینه سوم و چهارم تابع هدف دو جمله‌ای و تعداد بلوک آبیاری به ترتیب ۶ و ۷ می‌باشد.

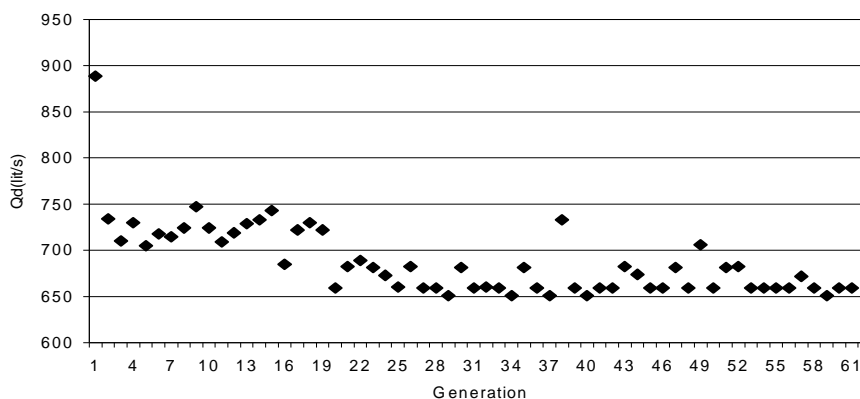
۳- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نمونه‌ای از سیر تکاملی تابع هدف برای یافتن پاسخ بهینه و سپس جزئیات نتایج حاصل از آزمون گزینه یک و نهایتاً نتایج مقایسه‌ای گزینه‌های مختلف ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد.

نمونه‌ای از سیر تکاملی تابع هدف برای یافتن پاسخ بهینه در یک گزینه در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۵- گزینه‌های مورد آزمون

با حصول اطمینان از عملکرد مطلوب مدل با عوامل تعیین شده برای مسائل توزیع آب در کانال‌ها، تأثیر تعداد بلوک‌های آبیاری و تعداد جملات تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد بلوک‌های آبیاری که بیانگر بیشترین تعداد آبگیرهایی است که هم زمان آبیاری می‌کنند بر ظرفیت کانال توزیع کننده و زمان تکمیل آبیاری موثر است. با توجه به تعداد ۱۲ آبگیر در طول کانال، تجربیات و هماهنگی زارعین در آبیاری هم زمان، حداکثر زمان لازم برای تکمیل آبیاری در هر نوبت و ظرفیت موجود کانال، برای تعداد بلوک‌ها دو گزینه ۶ و ۷ عدد در نظر گرفته شد. انتخاب تابع هدف بصورت تک جمله‌ای و دو جمله‌ای با این منظور انجام شده است که اثر پارامترهایی که در تابع هدف رفتار رقابتی دارند مورد بررسی قرار گیرد. بنا بر این تعداد ۴ گزینه مورد آزمون قرار گرفته است. در گزینه اول و دوم تابع



شکل ۴- تغییرات تابع هدف در طی نسل‌ها

حاصله از تکرارها نتایج پاسخ متوسط در مقابل پاسخ بهینه منتخب در جدول ۱ ارائه شده است.

مقادیر جدول یک نشان می‌دهد که پاسخ بهینه منتخب به میزان ۴۰ لیتر بر ثانیه از پاسخ متوسط بهتر بوده است. در مقابل، زمان تکمیل آبیاری که جزو تابع هدف نبوده است به میزان ۱۱ ساعت افزایش یافته است. تعداد تنظیمات سراب کانال یکسان بدست آمده است. پاسخ بهینه منتخب در نسل ۲۳ حاصل شده در حالیکه پاسخ متوسط در نسل ۱۱ به دست آمده که نشانگر حصول جواب در نسل‌های تکامل یافته تر است.

دستورالعمل بهینه تحویل و توزیع آبیاری برای این گزینه شامل دبی تحویلی به هر آبگیر و برنامه زمان بندی تحویل آب شامل زمان شروع و خاتمه آبیاری و مدت تحویل هر انشعاب در جدول ۲ ارائه شده است.

در این نمونه نیاز آبی طی ده روز ۵۰ میلی متر و دور آبیاری ۱۵ روز بوده است. تابع هدف تک جمله ای و مطابق با ظرفیت کانال توزیع کننده در نظر گرفته شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای جامعه اولیه حداقل ظرفیت کانال ۸۹۰ لیتر بر ثانیه بوده که طی نسل‌های اولیه به ۷۰۰ لیتر بر ثانیه کاهش یافته و بتدریج به مقدار بهینه (۶۵۰ لیتر بر ثانیه) رسیده است.

در گزینه اول با تابع هدف تک جمله ای، برنامه آبیاری که حداقل ظرفیت کانال را بدست آورد بعنوان پاسخ بهینه در نظر گرفته شده است. برای هر گزینه، مدل تهیه شده ۱۰ بار اجرا و برای هر بار اجرا تعداد ۶۰ نسل در نظر گرفته شده است. برای ۱۰ تکرار متوسط فاکتور شایستگی پاسخ‌های بهینه محاسبه شده و یکی از تکرارها که فاکتور شایستگی آن به مقدار متوسط نزدیکتر است بعنوان پاسخ متوسط در نظر گرفته شد. برای مقایسه پاسخ بهینه منتخب با نتایج

جدول ۱ - مقایسه پاسخ بهینه منتخب با پاسخ متوسط تکرارها در گزینه یک

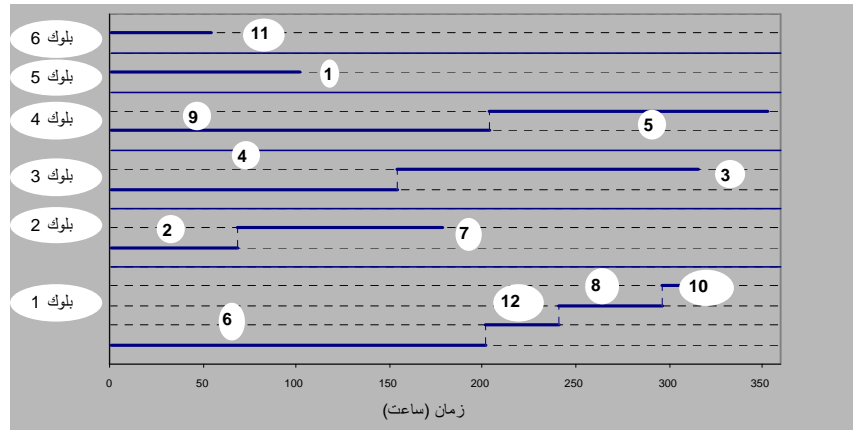
پاسخ	ظرفیت کانال Qd (lit/s)	زمان تکمیل آبیاری Tr (h)	تعداد تنظیمات سراب کانال Np	تعداد نسل مورد آزمون برای یافتن پاسخ بهینه
بهینه منتخب	۶۱۰	۳۵۳	۱۱	۲۳
متوسط	۶۵۰	۳۴۲	۱۱	۱۱

جدول ۲ - دستورالعمل بهره برداری بهینه کانال برای گزینه یک

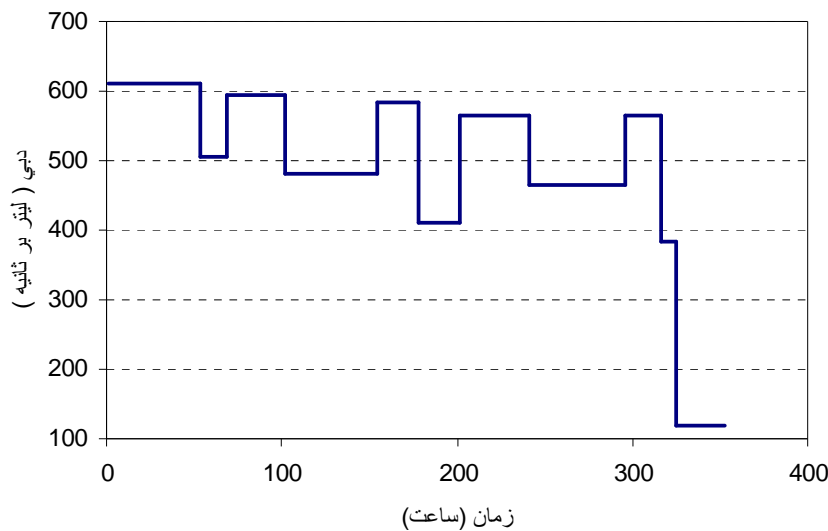
شماره آبگیر	دبی آبگیر (لیتر بر ثانیه)	مدت تحویل (ساعت)	زمان شروع آبیاری (ساعت)	زمان خاتمه آبیاری (ساعت)
۱	۱۱۵	۱۰۲	۰	۱۰۲
۲	۸۵	۶۹	۰	۶۹
۳	۱۸۰	۱۶۲	۱۵۴	۳۱۶
۴	۷۵	۱۵۴	۰	۱۵۴
۵	۱۲۰	۱۴۹	۲۰۴	۳۵۳
۶	۱۱۰	۲۰۲	۰	۲۰۲
۷	۱۷۵	۱۰۹	۶۹	۱۷۸
۸	۱۶۵	۵۵	۲۴۱	۲۹۶
۹	۱۲۳۰	۲۰۴	۰	۲۰۴
۱۰	۲۶۵	۲۹	۲۹۶	۳۲۵
۱۱	۱۰۵	۵۴	۰	۵۴
۱۲	۲۶۵	۳۹	۲۰۲	۲۴۱

جهت بررسی نتایج بهینه سازی گزینه‌های مورد نظر عوامل مختلف پاسخ بهینه مربوط به هر یک از آنها در جدول ۳ ارائه شده است. برای گزینه‌های اول و دوم برنامه آبیاری که حداقل ظرفیت کانال توزیع کننده را به دست آورده بعنوان پاسخ بهینه انتخاب شد. برای گزینه‌های سوم و چهارم برنامه آبیاری که حداکثر فاکتور شایستگی را داراست بعنوان پاسخ بهینه انتخاب گردید.

برنامه زمان بندی تحویل آب به انشعابات و برنامه تنظیم دبی جریان در سراب کانال برای گزینه ۱ در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. دستورالعمل بهینه تحویل و توزیع آب و برنامه تنظیم دبی جریان در سراب کانال برای سایر گزینه‌ها نیز مشابه با گزینه یک بدست آمد (خوشنواز، ۱۳۸۱).



شکل ۵- نمودار زمانبندی تحویل آب به انشعابات در گزینه یک



شکل ۶- هیدروگراف تنظیمات دریچه سراب کانال برای گزینه یک

جدول ۳- عوامل جواب بهینه حاصل از گزینه‌های متفاوت

گزینه	درجه شایستگی FF	ظرفیت کانال Qd(lit/s)	زمان تکمیل آبیاری Tr(h)	تعداد تنظیمات سراب کانال
اول	۱/۲۱	۶۱۰	۳۵۳	۱۱
دوم	۱/۲۷۵۵	۶۶۰	۳۴۸	۱۲
سوم	۳/۰۲	۷۰۵	۳۰۴	۱۱
چهارم	۳/۲۸	۷۹۵	۲۵۳	۱۲

هدفی با افزایش ظرفیت کانال به مقدار ۱۳۵ لیتر بر ثانیه در گزینه چهارم نسبت به گزینه دوم، زمان تکمیل برنامه آبیاری گزینه چهارم به میزان ۹۵ ساعت کاهش یافته است.

با مقایسه گزینه‌های دوم و سوم مشاهده می‌گردد که بر خلاف انتظار ظرفیت کانال توزیع کننده (Qd) حاصل از ۷ بلوک آبیاری از ظرفیت کانال حاصل از ۶ بلوک آبیاری کمتر می‌باشد و مدت زمان تکمیل آبیاری آن (Tr) بیشتر است. این امر بعلت آن است که در گزینه دوم علیرغم افزایش تعداد بلوک‌ها، تابع هدف تک جمله‌ای و صرفاً ظرفیت کانال بوده است. اما در گزینه سوم گرچه تعداد بلوک‌ها کمتر است ولی تابع هدف دو جمله‌ای بوده و رقابت بین دو جمله تابع هدف موجب آن گردیده است که دبی گزینه سوم از دبی گزینه دوم به میزان ۳۵ لیتر بر ثانیه بیشتر باشد. در مقابل به همین دلیل زمان تکمیل آبیاری گزینه سوم به میزان ۴۴ ساعت از گزینه دوم کمتر می‌باشد. تعداد تنظیمات سراب کانال نیز برای گزینه سوم یک مرحله کمتر از گزینه دوم به دست آمده است.

۴- نتیجه گیری

۱- نتایج حاصله بیانگر آن است که مدل تهیه شده برای برنامه‌ریزی مسائل تحویل و توزیع آب در کانال‌های آبیاری سودمند بوده و به کمک آن می‌توان اهداف متفاوتی را بطور همزمان بهینه نمود.
 ۲- با توجه به سهولت استفاده از الگوریتم ژنتیک اضافه نمودن هر جمله به تابع هدف به آسانی امکان پذیر می‌باشد.
 ۳- در بهینه سازی تک هدفی صرفاً ظرفیت کانال (Qd) مورد نظر بوده و زمان تکمیل آبیاری (Tr) آزاد گشته ولی در بهینه سازی چند هدفی ظرفیت کانال و زمان تکمیل آبیاری هر دو بصورت توأم بهینه شده‌اند. بسته به سیاست مدیریت سیستم مبنی بر اولویت کاهش ظرفیت کانال و یا کاهش مدت زمان تحویل آب برای جلوگیری از بروز تنش آبی به گیاه می‌توان هر کدام از گزینه‌های مورد نظر را انتخاب نمود.

با مقایسه گزینه‌های اول و دوم مشاهده می‌شود که ظرفیت کانال توزیع کننده (Qd) حاصل از ۶ بلوک آبیاری در گزینه یک به جهت کمتر بودن تعداد آبگیرهایی که همزمان آبیاری می‌کنند، به میزان ۵۰ لیتر بر ثانیه کمتر بوده و تعداد تنظیمات دریچه سراب کانال توزیع کننده به تعداد یک مرحله کمتر از گزینه دو می‌باشد. این امر از جهت کاهش ظرفیت کانال توزیع کننده که موجب هزینه پایین تر کانال و تاسیسات مربوط و تلفات کمتر ناشی از امکان برداشت غیر مجاز آب و نشست از کانال می‌باشد و همچنین از نظر تعداد کمتر عملیات بهره برداری دریچه سراب کانال که موجب هزینه پایین تر و سهولت بهره برداری می‌گردد مطلوبتر می‌باشد. در این گزینه‌ها زمان مورد نیاز برای تکمیل آبیاری (Tr) حاصل از ۶ بلوک آبیاری در گزینه یک به میزان ۵ ساعت نسبت به گزینه دو طولانی تر بوده که این امر نیز به جهت قرار گیری تعداد آبگیرهای بیشتر در یک بلوک می‌باشد. از تبعات منفی افزایش مدت زمان آبیاری عدم تکمیل آبیاری انشعابات در مدت زمان مطلوب است که ممکن است باعث افزایش تنش وارده به گیاه و کاهش محصول شود. در این گزینه‌ها تابع هدف صرفاً ظرفیت کانال بوده و زمان جزو تابع هدف نبوده و جهت اطلاع و مقایسه گزینه‌ها ارائه شده است. بدین ترتیب با توجه به تابع هدف تک جمله‌ای که معادل ظرفیت کانال می‌باشد گزینه اول مناسب‌تر است.

با مقایسه گزینه‌های اول و سوم مشاهده می‌گردد که گرچه حداکثر آبگیرهایی که همزمان آبیاری می‌نمایند ثابت مانده، اما ترتیب و نوبت بندی تحویل آب به آبگیرها بگونه‌ای تغییر کرده که ظرفیت کانال توزیع کننده و زمان تکمیل برنامه آبیاری هم زمان و بصورت توأم کاهش یابند. در این حالت واضح است که اگرچه ظرفیت کانال توزیع کننده برای حالت دو هدفی به مقدار ۹۵ لیتر بر ثانیه نسبت به حالت تک هدفی افزایش یافته اما زمان مورد نیاز برای تکمیل برنامه آبیاری به میزان ۴۹ ساعت کاهش یافته است لذا کاهش زمان صرف شده باعث افزایش ظرفیت کانال شده است. این روند در مقایسه گزینه‌های دوم و چهارم نیز مشاهده می‌شود بطوریکه در حالت دو

Lawrence, D. (1991), Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand. Rein hold. New York.

Monem, M. J. and Namdarian, R. (2002), "Development of Optimal Water Distribution Schedule for Irrigation Systems Using Simulated Annealing Techniques" *The 5th International Conference on Hydroinformatics*. Cardiff. UK. 1th - 5th July 2002.

Monem, M. J. and Namdarian, R. (2005), "Application of Simulated Annealing (SA) Techniques of Optimal Water Distribution in Irrigation Canals" *Journal of Irrigation and Drainage*, Vol. 54, No 1, pp. 365-373.

Reddy, J. M., Wilamowski, B. and Sharmasarkar, F. C. (1994), "Optimal Scheduling Irrigation for Lateral Canals", *ICID Journal*. 48(3): pp. 1-12.

Replogle, J. A. and Merriam, J. L. (1980), "Scheduling and Management of Irrigation Water Delivery Systems". National symposium. Lincoln. Nebraska.

Ritzel, B.J. and Eheart, J. W. (1994), "Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem", *Water Resour. Res.* 30(5): pp. 1589-1603.

Savic, D. A. and Walter, G. A. (1997), "Genetic Algorithms for Least Cost Design of Water Distribution Networks", *J. Water Resour. Plng. Mgmt. ASCE*. 123(2): pp. 67-77.

Wang, Q. J. (1991), "The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models", *Water Resour. Res.* 27(9): pp. 2467-2471.

Wang, Z. R., Mohan, J. and Feyan, J. (1995), "Improved 0-1 programming model for optimal flow scheduling in irrigation canals", *Irrig. Drain. Sys.* 9: pp. 105 - 116.

Wardlaw, R. and Sharif, M. (1999), "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation", *J. Water Resour. Plng. Mgmt.* 1: pp. 25-33.

۴- با توجه به حساسیت بالای روش بهینه سازی ژنتیک به عوامل آن، تعیین صحیح این پارامترها، بر کیفیت جواب حاصله تأثیرگذار می باشد.

پی نوشتها

- 1- Simulated Annealing
- 2- Fitness Function

۵- مراجع

شرکت آب منطقه ای گیلان. ۱۳۴۲. خلاصه گزارش طرح عمران دشت گیلان و فومنات.

خوشنواز، ص.، ۱۳۸۱، تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

منعم، م. ج.، ۱۳۷۶، استفاده از روش ژنتیک در مدل مشابه سازی شبکه های آبیاری (ICSS-Pom) برای بهینه سازی عملکرد آنها، اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، ص ۳۱۹ - ۳۰۸.

Chamber, R. (1988), *Managing Canal Irrigation: Practical Analysis from South Asia*, Cambridge University Press.

Dandy, G. C., Simpson, A. R. and Murphy, L.J. (1996), "An improved genetic algorithm for pipe network optimization" *Water Resour. Res.* 32(2): pp. 449-458.

Davidson, J.W. and Goulter, I. C. (1995), "Evolution program for the design of rectilinear branched distribution systems" *J. Comp. in Civ. Engrg. ASCE*. 9(2): pp. 112-121 .

Goldberg, D. E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison - Wesley. Reading, Mass.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۸۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۲۰ خرداد ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹ تیر ۱۳۸۶