مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور مدیریت بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از الگوریتم‌های SGAs و NSGA-II

محمود محمدرضا پور طبری[1] رضا مکنون[2] تقی عبادی[2]

(دریافت ۸۷/۱/۲٤ پذیرش ۸۷/۹/٤)

چکیده

سیر گسترده فعالیتها در زمینه‌های مختلف منابع آب سطحی و زیرزمینی و عدم توجه کافی به برنامه‌ریزی و مدیریت تلفیقی، ضرورت تحقیق در این خصوص را ایجاب می‌نماید. با توجه به عدم توازن در توزیع منابع آب و محدودیتهای استفاده از آبهای سطحی، تلفیق بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی، امری ضروری است. در این مطالعه مدل‌سازی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که حداقل اطمینان‌پذیری سیستم، حداکثر و هزینه‌های ناشی از عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان، تخطّی از ظرفیت مخزن در حال بهره‌برداری و اولویتهای تخصیص حداقل گردد. برای نمایش منحنی تبادل بین این اهداف از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست در مقایسه با الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای استفاده شده است. نتایج مدل تدوین شده نشان می‌دهد که مدل NSGA-II در مدت زمان بسیار کمتری قادر به ارائه مقادیر بهینه تخصیص خواهد بود. با استفاده از منحنی تبادل بهینه می‌توان دریافت که برای افزایش مقدار اندکی در حداقل اطمینان‌پذیری، لازم است سیستم متحمل جریمه زیادی گردد و این نشان‌دهنده حساسیت بالای تأمین نیاز نسبت به تغییرات در سیستم طبیعی منابع آب است. از آنجا که در مدل الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای، اهداف به صورت وزنی در قالب مدل تک‌هدفه اجرا می‌گردد، وجود جواب بهینه حاصل از این مدل در مجموعه جوابهای مدل الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست نشان از صحت مقادیر بهینه تخصیص تدوین یافته، دارد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری تلفیقی، بهینه‌سازی، چندهدفه، الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای، جواب غیرپست، آبخوان.

Multi-objective Optimal Model for Surface and Ground-water Conjunctive Use Management Using SGAs and NSGA-II

Mahmoud Mohammad Rezapour Tabari[1] *Reza Maknoon*[2] *Taghi Ebadi*[2]

(Received April 12, 2008 Accepted Nov. 24, 2008)

Abstract

The widespread activities in water resources exploitation and use require sound research programs on planning and management of conjunctive use of surface and ground-water. Conjunctive management is a suitable approach for the imbalanced water resources distribution and related constraints in using surface water. In this paper, a multi-objective model is developed to maximize the minimum reliability of the system and to minimize the costs due to failure to supply water, aquifer storage, failure to cope with reservoir capacity, and prioritizing water allocations. The non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is used to present the optimal trade-off between the objectives. The sequential genetic algorithm (SGA) is also applied in order to be compared with the NSGA-II model. The results show that the NSGA-II model can considerably reduce the computational cost of the conjunctive use models in comparison with the SGA optimization model. The obtained trade-off curve shows that a slight increase in reliability leads to much higher system costs. The weighted single objective SGA model results verify the optimal trade-off obtained from NSGA-II model and show the optimality of the allocated discharges.

Keywords: Conjunctive Use, Optimization, Multi-objective, Sequential Genetic Algorithm, Non-Dominated Solution, Aquifer.

۱- کاندیدای دریافت دکترای عمران-آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (نویسنده مسئول) ۰۹۱۲۲۴۹۲۶۱۵ ، mrtabari@yahoo.com
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

1. Ph.D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology (Corresponding Author) (+98) 9122492615 mrtabari@yahoo.com
2. Assist. Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology

۱- مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت باعث شده است که نیازهای آبی در بخشهای آب شرب، صنعت و کشاورزی افزایش یابد. به همین دلیل، بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و مقبولیت بیشتری یافته است. استفاده مجزا از منابع می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی همچون کمبود آب در مواقع خشکسالی به‌دلیل نبود منابع آب سطحی، ناپایداری در تولید محصول و محیط‌زیست، افت تراز سطح ایستایی و اختلاط آب شور و شیرین در نواحی ساحلی و افزایش هزینه پمپاژ در نتیجه برداشت بی‌رویه شود. استفاده تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی می‌تواند باعث افزایش ذخیره منابع آبی موجود، حداقل نمودن اثرات منفی استفاده مجزا از منابع و مدیریت مؤثر و بهینه آب شود. استفاده تلفیقی در واقع بهره‌برداری از منابع سطحی و زیرزمینی به منظور افزایش میزان آب برداشتی و استفاده پایدار از منابع آبی موجود است. به‌طور کلی زمانی که از منابع (مخزن، رودخانه، آب زیرزمینی و ...) به‌صورت تلفیقی استفاده می‌شود اثرات بهتری نسبت به بهره‌برداری به‌صورت مجزا، حاصل می‌گردد. با توجه به برنامه‌ریزی تلفیقی، در دوره‌های ترسالی که در آن نزولات جوی زیاد است از منابع سطحی برای تأمین نیازهای منطقه و ایجاد تعادل در منابع آبی موجود استفاده می‌شود و بخش مازاد آن برای تغذیه آبخوان و افزایش ذخیره منابع زیرزمینی استفاده می‌شود. یکی از اولین مطالعاتی که در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی انجام شد توسط براس[1] در سال ۱۹۶۳ ارائه گردید. در مدل تهیه شده توسط این محقق از منابع سطحی (سد) و زیرزمینی برای تأمین نیاز آبی اراضی کشاورزی استفاده شده است و تغذیه مصنوعی از سد به آبخوان نیز مدنظر قرار گرفته است. برای بهینه نمودن برداشت از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی از مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با گام زمانی سالانه استفاده گردید [۱]. همچنین اسکات[2] و آرون[3] در سال ۱۹۷۱ از مدل برنامه‌ریزی پویا به‌منظور بهینه نمودن سیستم بهره‌برداری تلفیقی استفاده نمودند. در این مدل چندین مخزن سطحی، رودخانه، آبخوان و سیستم انتقال در نظر گرفته شده است. در مطالعه مذکور، طول دوره بهینه‌سازی ۸ سال با گام زمانی ۳ ماهه بود. نتایج مدل، قوانین بهره‌برداری از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی را در بر دارد. [۲]. در سال ۲۰۰۶ پولیدو[4] و همکاران یک مدل اقتصادی- هیدرولوژیکی را برای بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی ارائه دادند. در این مدل تابع هدف به‌صورت اقتصادی و در جهت حداکثر نمودن منافع حاصل از بهره‌برداری منابع سطحی و زیرزمینی بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن منافع اقتصادی در تخصیصها می‌تواند باعث توسعه ظرفیتهای موجود در سیستم گردد [۳]. علاوه بر مطالعات فوق تاکنون تحقیقات زیاد دیگری نیز در این رابطه انجام شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به بارلو[5] و همکاران، رائو[6]، ودلا[7] و همکاران، کارا[8] و همکاران، زهرایی و همکاران، افشار و همکاران، فردریک[9]، بسگاگولا[10]، کارآموز و همکاران، نارایان ستی[11] و علی‌محمدی اشاره نمود [۴-۱۵]. از مطالعات صورت گرفته در خصوص مدیریت بهره‌برداری تلفیقی که از سال ۱۹۶۳ شروع شده و تاکنون ادامه دارد، می‌توان دریافت که در پژوهشهای انجام شده بخشهایی از یک سیستم منابع سطحی و زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته و به‌صورت یک هدف کاملاً مجزا، مدیریت بهره‌برداری از منابع انجام شده است. در این تحقیق با توجه به محدودیتهای منابع و مصارف و اولویتهای تخصیص، ساختار مدل چند هدفه که در آن به‌طور هم‌زمان حداقل اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای آبی سیستم حداکثر و هزینه‌های مرتبط با عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان، تخطّی از ظرفیت مخزن در حال بهره‌برداری و اولویتهای تخصیص حداقل می‌گردد، تدوین شده است. برای حل مدل بهینه‌سازی تدوین شده در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست[12] در مقایسه با الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای[13] که دارای سرعت همگرایی بیشتری نسبت به مدل الگوریتم ژنتیک معمولی است، استفاده شده است. نتایج مدل در قالب منحنی تبادل بین اهداف ذکر شده در بالا می‌تواند الگوی مناسبی را برای مدیریت منابع آبی موجود با توجه به میزان اطمینان‌پذیری و هزینه‌های ناشی از برداشت مازاد در اختیار مدیران و تصمیم‌گیرندگان منابع آب قرار دهد. در ادامه ساختار مدل بهینه‌سازی مورد استفاده به اختصار ارائه می‌گردد.

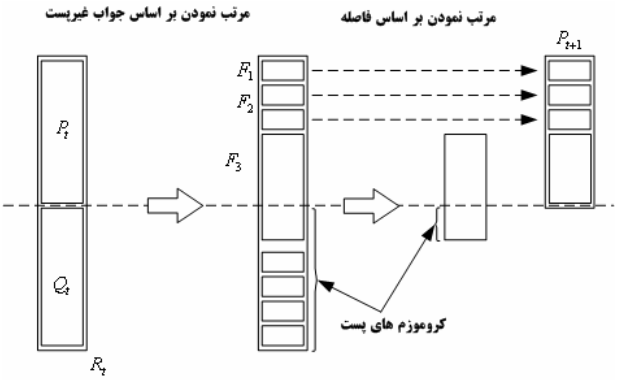
۲- ساختار مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست (NSGA-II)

برای حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه، روشهای مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن‌دهی[14]، روش محدودیت[15]، روش

[1] Buras
[2] Scott
[3] Aron
[4] Pulido

[5] Barlow
[6] Rao
[7] Vedula
[8] Khare
[9] Fredericks
[10] Basagaoglu
[11] Narayan Sethi
[12] Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
[13] Sequential Genetic Algorithm (SGA)
[14] Weighted Sum Method
[15] Epsilon-constraint Method

آرمانی[1] و الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه[2] اشاره نمود. در این مطالعه از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه به‌دلیل دارا بودن توانایی بالا در حل مسائل پیچیده و ارائه منحنی تبادل بهینه بین اهداف، استفاده شده است. این مدل‌ها به‌راحتی می‌توانند مسائلی که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌نمایند، فضای تصمیم موجه یکپارچه‌ای ندارند و یا توابع هدف آنها دارای پارامترهای تصادفی هستند را حل نمایند. این مدل توسط دب[3] و همکاران در سال ۲۰۰۰ برای حل مسائل و مشکلات مدل الگوریتم ژنتیک کلاسیک، پیشنهاد گردید [۱۶]. مشکلات عمده مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه پیشین عبارت‌اند از: حجم بالای محاسبات در هر تکرار که منجر به افزایش زمان اجرای مدل می‌گردد و عدم نگهداری تعداد مناسب مقادیر برتر در طول اجرای مدل.



شکل ۱- ساختار مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مراحل اجرای این مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت زیر است:

۱- تولید نسل والد تصادفی (P_0) به تعداد N؛

۲- مرتب نمودن نسل اولیه والد بر اساس جوابهای غیرپست؛[4]

۳- در نظر گرفتن رتبه‌ایی متناسب با تراز غیرپست برای هر جواب غیرپست (۱ برای بهترین تراز، ۲ برای بهترین تراز بعد از ۱ و ...)؛

۴- تولید نسل فرزندان (Q_0) به تعداد N با استفاده از عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش؛

۵- با توجه به نسل اول تولید شده مذکور که شامل کروموزم‌های والد و فرزندان هستند، نسل جدید به‌صورت زیر تولید می‌شود:

• ترکیب کروموزم‌های والد (P_t) و فرزندان (Q_t) و تولید نسلی (R_t) به تعداد 2N؛

• مرتب نمودن نسل (R_t) بر اساس روش دسته‌بندی غیرپست و شناسایی جبهه‌های غیرپست[5] ($F_1, F_2, \ldots, F_l$)؛

• تولید نسل والد برای تکرار بعد (P_{t+1}) با استفاده از جبهه‌های غیرپست تولید شده به تعداد N. در این مرحله با توجه به تعداد کروموزم‌های مورد نیاز برای نسل والد (N)، ابتدا تعداد کروموزم‌های اولین جبهه برای نسل والد انتخاب می‌شود و در صورتی که این تعداد جوابگوی تعداد کل مورد نیاز نسل والد نباشد، به ترتیب از جبهه‌های ۲، ۳ و ... برداشت می‌شود تا به میزان کل (N) دست یابد؛

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

• تکرار مرحله ۵ تا دستیابی به تعداد کل تکرارهای مورد نظر.

۳- ساختار مدل بهره‌برداری تلفیقی چند هدفه پیشنهادی

در این تحقیق مدل بهره‌برداری تلفیقی به صورت چندهدفه تدوین شد. به این ترتیب که در آن هدف اول یعنی حداکثر نمودن حداقل اطمینان‌پذیری نیازهای آبی در طی دوره برنامه‌ریزی در مقابل هدف دوم یعنی حداقل نمودن میزان تخطّی ناشی از عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان، تخطّی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن سد و اولویتهای تخصیص، به نحوه مطلوبی به چشم می‌خورد. در این مطالعه با توجه به واقعیتهای موجود در سیستم مدیریت منابع آب کشور محدودیتهایی به منظور تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شد. همچنین اولویتها در تخصیص از منابع به این صورت بود که ابتدا منابع آبهای سطحی و سپس منابع آبهای زیرزمینی برای تخصیص به مصارف مدنظر قرار گرفت. علت در نظر گرفتن اولویت تخصیصها به این صورت، این است که منابع آب سطحی به‌دلیل تبخیر زیاد و عدم نگهداشت مناسب لازم است در مدت زمان کمتری مصرف شده و یا به‌منظور برنامه‌ریزی بلندمدت به صورت تغذیه مصنوعی با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی دشت وارد آبخوان گردند تا بتوان با اتخاذ چنین سیاستی مدت زمان بهره‌برداری از منابع آبی موجود را افزایش داد. لازم به ذکر است اولویتهای ارائه شده با توجه به شرایط سیاسی، وضعیت هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی محدوده‌های مورد مطالعه می‌تواند متفاوت باشد. در این مطالعه نیز فرمول‌های ارائه شده در این خصوص متغیر بود تا بتوان با استفاده از آن برای شرایط مختلف، سیاست‌های متناظر حاصل از آن را ارائه نمود. در این بخش از تحقیق، تابع هدف و محدودیتهای مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد.

[1] Goal Attainment Method
[2] Multi-objective Evolutionary Algorithms (MOEAs)
[3] Deb
[4] Non-dominated Solution
[5] Non-dominated Fronts

تابع هدف

$$F_1 = \text{Maximize}\left(\text{minimum Reliability}\right)$$

$$F2 = \text{Minimize}\left(\sum_{t=1}^{m}\sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns}\left(DM_{tzs} - TAW_{tzs}\right)^2 + \text{Loss Function}\right) \quad (1)$$

$$\text{Reliability}_t = \sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns} TAW_{tzs} \Big/ \sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns} DM_{tzs} \quad (2)$$

محدودیتها:

$$E_t = EV_t \times 10^{-3} \times \left[\left((-3)\times 10^{-5} \times S_t^2\right) + \left(+0.023 \times S_t + 0.4098\right)\right] \quad (3)$$

$$S_{t+1} = \max\left(\min\left(\left(S_t + I_t - E_t - R_t\right), S_{max}\right), S_{min}\right) \quad (4)$$

$$TSR_t = R_t + Rtaleghan_t + Rbin_t \quad (5)$$

$$\text{Loss Function} = \sum_{t=1}^{m}\left(\max\left(\left(1 - \frac{S_t}{S_{min}}\right), 0\right) \times \gamma + \sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns}\left(\begin{matrix}\left(RS_{tzs} - ARS_{tzs}\right)^2 \times \alpha \\ + \left(RG_{tzs} - ARG_{tzs}\right)^2 \times \beta\end{matrix}\right)\right) \quad (6)$$

$$TAW_{tzs} = RS_{tzs} + RG_{tzs} \quad , \; t = 1,\ldots, m \times y, \;\; z = 1,\ldots, nz, \;\; s = 1,2,3 \quad (7)$$

$$ARS_{tzs} = \begin{cases} DM_{tzs} & \text{if } \left(TSR_t - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} DM_{tzs}\right) \geq DM_{tzs} \\ TSR_t - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} DM_{tzs} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$Z = IZ(1),\ldots, IZ(nz) \quad , \quad S = IS(1),\ldots, IS(ns)$$

$$TDF_{tzs} = DM_{tzs} - ARS_{tzs} \quad (9)$$

$$Dh_t\left(V_t\right) = \frac{\left(\text{Input}_t - \text{Output}_t - \text{Eff} \times V_t\right)}{A \times S_S} \quad (10)$$

$$ARG_{tzs} = \begin{cases} TDF_{tzs} & \text{if } Dh_t\left(\sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} TDF_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} TDF_{tzs}\right) \leq \Delta h_{max} \\ \frac{\left(\text{Input} - \text{Output} + \Delta h_{max} \times A \times S_S\right)}{\text{Eff}} - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} TDF_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} TDF_{tzs} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z = IZ(1),\ldots, IZ(nz) \quad , \quad S = IS(1),\ldots, IS(ns) \quad (11)$$

واحد حجم‌ها میلیون مترمکعب است[1] و متغیرهای ارائه شده در معادلات فوق به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

Loss Function میزان کل جریمه تخصیص داده شده به‌دلیل عدم رعایت اولویتهای برداشت، مصرف و احیای منابع آبی موجود (بی‌بعد)،

[1] Million Cubic Meter (MCM)

DM_{tzs} نیاز آبی بخش s در دوره t از منطقه z،

TAW_{tzs} میزان کل آب تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z،

EV_t میزان تبخیر از مخزن سد در دوره t بر حسب میلی‌متر،

S_t حجم مخزن سد در در دوره t،

I_t میزان آورد رودخانه در دوره t،

R_t حجم آب خروجی از مخزن سد در دوره t (متغیر تصمیم)،

S_{max} و S_{min} حداکثر (۲۰۶ MCM) و حداقل (۳۰ MCM) ظرفیت مخزن سد،

$Rtaleghan_t$ میزان حجم آب انتقالی از مخزن سد طالقان در دوره t (در بخش کاربرد مدل معرفی می‌شود)،

$Rbin_t$ حجم آورد بین‌راهی در دوره t،

TRS_t میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده در دوره t،

RS_{tzs} حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (متغیر تصمیم)،

RG_{tzs} حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (متغیر تصمیم)،

ARS_{tzs} حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویتهای منابع و مصارف)،

ARG_{tzs} حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویتهای منابع و مصارف)،

β, α, γ ضرایب ثابت برای هم‌بعد نمودن توابع جریمه (در این مطالعه β, α برابر با ۱۰ و γ برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است)،

IS (s) میزان اولویت بخش s،

IZ(z) میزان اولویت منطقه z،

TDF_{tsz} حجم کل کمبود آب بخش s در دوره t از منطقه z،

$Dh_t(V_t)$ میزان تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان در نتیجه برداشت به میزان V در دوره t بر حسب متر،

$Input_t$ حجم کل آب ورودی به آبخوان به‌صورت زیرزمینی،

$Output_t$ حجم کل آب خروجی از آبخوان به صورت زیرزمینی،

Eff درصد استفاده مفید از آب تخصیص داده شده ،

A مساحت آبخوان برحسب کیلومتر مربع،

S_s ضریب ذخیره ویژه آبخوان،

Δh_{max} حد مجاز تغییر ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی به متر،

nz تعداد مناطق نیاز،

ns تعداد بخشهای مصرف‌کننده آب واقع در هر منطقه نیاز و

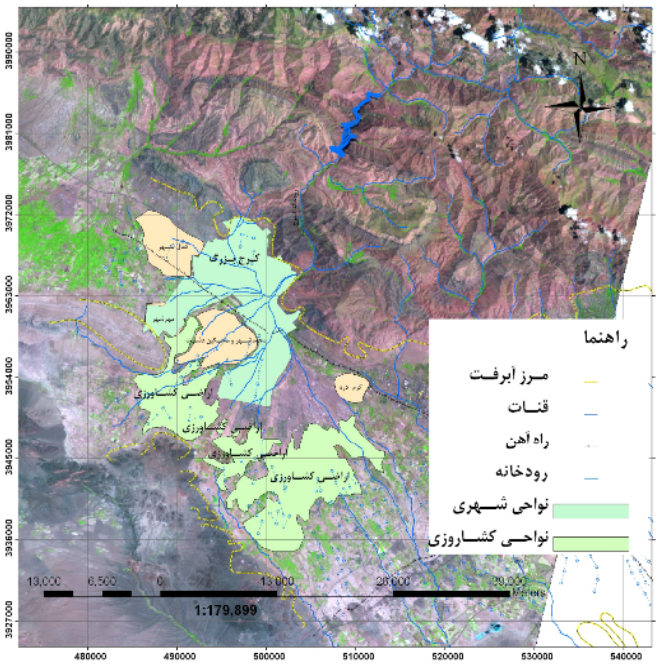
m تعداد ماههای دوره برنامه‌ریزی.

مدل بهینه‌سازی تدوین شده به این صورت عمل می‌نماید که با توجه به منابع و مصارف و اولویت آنها، ابتدا، نیازها از منابع آب سطحی تأمین می‌شود و در صورت کمبود، مطابق با رابطه ۱۱ از منابع آب زیرزمینی با توجه به شرایط پایداری آبخوان (تخصیص به میزان ورودی منهای خروجی و با در نظر گرفتن محدودیت تغییرات تراز ماهانه) نیازها، تأمین خواهد شد. بنابراین برای محاسبه هزینه ناشی از موارد ذکر شده در بخش ۴، میزان اختلاف آب تخصیص داده شده (سطحی و زیرزمینی) با استفاده از رعایت محدودیتهای منابع و اولویتهای منابع و مصارف (ARS_{tzs} و ARG_{tzs}) و تخصیصی که مدل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد (RS_{tzs} و RG_{tzs})، محاسبه شد و به‌صورت عبارت دوم رابطه ۶ ارائه گردید. ترم اول این رابطه در واقع محدودیت ظرفیت مخازن را کنترل می‌نماید که با استفاده از ضریب γ (که برابر با ۱۰۰۰ است) با عبارت اول این رابطه هم‌بعد می‌گردد. همچنین ضرایب α و β نیز که برابر با ۱۰ می‌باشند به منظور هم‌بعد نمودن، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به‌ذکر است این ضرایب با سعی و خطا تعیین شده‌اند. همچنین محدودیت در نظر گرفته شده برای تخصیص بهینه به مصارف از منابع آب زیرزمینی به این صورت بود که برداشت به‌گونه‌ای صورت گیرد تا تغییرات ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی از ۳ سانتی‌متر تجاوز ننماید.

با توجه به اینکه چاههای جذبی در نقاط شهری و آب برگشتی از اراضی کشاورزی، حجم قابل توجهی را وارد آبخوان می‌نمایند، برای تعیین میزان تغییرات حجم آب زیرزمینی، از میزان خالص برداشت از منبع آب زیرزمینی استفاده شد (رابطه ۱۰).

۴- کاربرد مدل

با توجه به اهمیت مطالعه مناطق بحرانی و دارای حساسیت خاص سیاسی، اجتماعی و منطقه‌ای، در این تحقیق محدوده مورد مطالعه شهرستان کرج به‌دلیل دارا بودن شرایط استراتژیک در تأمین نیازهای آبی برای بررسی انتخاب شد. این محدوده به‌دلیل نزدیکی به مرکز کشور، تراکم جمعیتی زیادی را در سالهای اخیر متحمل شده است (شکل ۲). این امر منجر به افزایش برداشت از ذخایر زیرزمینی و در نتیجه افت قابل توجه در آبخوان دشت تهران-کرج گردیده است. همچنین برداشت‌های بی‌رویه در سایر بخشها همچون کشاورزی نیز با سرعت قابل توجهی رو به افزایش است. در این مطالعه به منظور مدیریت بهره‌برداری تلفیقی، محدوده مورد تحقیق به پنج منطقه شهری، یک منطقه روستایی، یک منطقه کشاورزی و یک منطقه صنعتی تقسیم شد. اولویت و نحوه تأمین این مناطق از منابع، به تفکیک در جدولهای ۱و۲ ارائه شده است. در این محدوده



شکل ۲- شماتیک محدوده مورد مطالعه با توجه به مؤلفه‌های برنامه‌ریزی منابع آب

جدول ۱- میزان اولویت مصارف در تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی

مصارف	شهر تهران	کرج بزرگ	کمالشهر	مشکین‌دشت	ماهدشت	گرم‌دره	روستاها	صنعت	کشاورزی
اولویت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

جدول ۲- نحوه تأمین مصارف از منابع آب سطحی و زیرزمینی

مصارف	شهر تهران	کرج بزرگ	کمالشهر	مشکین‌دشت	ماهدشت	گرم‌دره	روستاها	صنعت	کشاورزی
منابع آب سطحی	*	*	*						*
منابع آب زیرزمینی	*	*	*	*	*	*	*	*	*

تراز سطح آب زیرزمینی با توجه به اطلاعات تاریخی ثبت شده در طول یک دوره چهارده ساله از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۴ به میزان ۱۱/۳۸ متر افت داشته و مخزن زیرزمینی این دشت در طول این مدت با کسری معادل ۶۸۲/۸ میلیون متر مکعب مواجه شده است. وضعیت بیلان آبی آبخوان دشت کرج بر اساس آخرین آماربرداری در جدول ۳ مندرج در بخش ضمائم نشان داده شده است. مؤلفه‌های برنامه‌ریزی منابع آب در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت‌اند از: رودخانه کرج و چالوس (منبع سطحی)، سد کرج و طالقان (مخزن سطحی)، چاههای برداشت (منبع زیرزمینی)، مناطق نیازها (مشتمل بر شهرها، روستاها، مناطق کشاورزی و صنعتی واقع در محدوده مورد مطالعه).

در این تحقیق با توجه به کمبود منابع آبی درون حوضه‌ای، از منابع آبی برون حوضه‌ای مانند رودخانه چالوس نیز استفاده شد. همچنین از آنجا که برای تأمین نیازهای آب شرب، لازم است از خط انتقال طالقان نیز برای این امر استفاده گردد، میزان آب انتقالی توسط این خط در برنامه‌ریزی توسعه منابع آب، مورد توجه قرار

جدول ۳- بیلان آبخوان دشت کرج در سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ (میلیون مترمکعب) [۱۷]

مؤلفه‌های بیلان	تخلیه	تغذیه
جریان ورودی از مرزهای آبخوان	-	۲۳۶/۵
بارش	-	۱۷/۸۸
نفوذ به آبخوان توسط چاههای جذبی	-	۱۵۵/۸۶
آب برگشتی از بخش کشاورزی	-	۲۰۸
جریان خروجی از مرزهای آبخوان	۳۹/۴	-
برداشت توسط چاهها	۵۹۲/۵	-
برداشت توسط قنوات	۱۱	-
مجموع	۶۴۲/۹	۶۱۸/۲۶
میزان تغییرات در حجم آبخوان	-۲۴/۶۴	

جدول ۴- میزان حجم آب انتقالی از مخزن سد طالقان (متغیر $Rtaleghan_t$) (میلیون مترمکعب) [۱۷]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
حجم آب انتقالی	۳/۸	۳/۷	۳/۵	۳/۵	۳/۲	۳/۴	۳/۶	۳/۷۸	۴	۴/۱۶	۴/۱۴	۴/۱	۴۵

گرفته است (جدول ۴). آمار و اطلاعات مرتبط با میزان آورد رودخانه کرج و میزان نیاز آبی بخشهای مختلف به‌ترتیب در جدولهای ۵ و ۶ ارائه شده است. جدولهای ۷ و ۸ به ترتیب میزان تبخیر از سطح مخزن سد کرج و میزان آورد بین‌راهی بعد از سد کرج را نشان می‌دهد. متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی عبارت‌اند از: میزان آب تخصیص از منابع آب زیرزمینی و سطحی به مصارف سه‌گانه شرب، کشاورزی، صنعت و میزان آب خروجی از سد. در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم برای هر ماه از افق برنامه‌ریزی برابر با ۱۲ متغیر است که شامل شش متغیر برای مقادیر تخصیص از منابع زیرزمینی به شش شهر، دو متغیر به منظور مقادیر تخصیص از منابع سطحی به دو شهر، دو متغیر برای مقادیر تخصیص از منابع سطحی و زیرزمینی به بخش کشاورزی، یک متغیر به منظور مقادیر تخصیص از منابع زیرزمینی به بخش صنعت و یک متغیر برای مقادیر آب خروجی از سد می‌باشد که برای یک دوره ۱۰ ساله تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۱۴۴۰=۱۰×۱۲×۱۲ خواهد بود. در این محدوده، شش شهر مورد مطالعه قرار گرفت که دو شهر آن قابلیت استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را دارا بود. همچنین به‌منظور تأمین نیازهای بخش صنعت تنها از منابع آب زیرزمینی استفاده شد.

در این تحقیق با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و در نتیجه زمان‌بر بودن اجرای مدل بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای به منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص استفاده گردید. در

جدول ۵- متوسط آورد ماهانه جریان ورودی به مخزن سد کرج (متغیر I_t)(میلیون مترمکعب) [۱۷]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
دبی	۱۴/۱	۱۵/۶	۱۴/۷	۱۳/۵	۱۴/۶	۲۶/۱	۶۳/۹	۱۰۱	۸۱/۹	۴۸/۷	۲۵/۶	۱۶/۹	۴۳۶/۵

جدول ۶- میزان نیاز آبی ماهانه بخشهای مختلف مورد مطالعه (میلیون مترمکعب) [۱۷]

ماه	کرج بزرگ	کمالشهر	مشکین‌دشت	ماهدشت	گرم‌دره	روستاها	شهر تهران	کشاورزی	صنعت	مجموع
مهر	۶/۵۸	۰/۶۱	۰/۸۸	۰/۲۷	۰/۱۱	۰/۳۱	۲۹/۶۲	۵۵/۱۷	۰/۷۳	۹۴/۲۸
آبان	۱۳/۱۵	۰/۹۷	۱/۳۷	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۴۹	۲۸/۵۶	۲۴/۷۶	۰/۷۳	۷۰/۳۷
آذر	۱۴/۸	۱/۰۸	۱/۱۱	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۳۹	۲۷/۲۱	۹/۰۳	۰/۷۳	۵۵/۱۳
دی	۱۶/۴۴	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۵۸	۰/۱۱	۰/۳	۲۸/۰۲	۰/۶۳	۰/۷۳	۴۸/۶۴
بهمن	۱۳/۱۵	۱/۰۵	۰/۷۶	۰/۶۶	۰/۱	۰/۲۸	۲۴/۸۵	۰/۰۶	۰/۷۳	۴۱/۶۵
اسفند	۱۶/۴۴	۰/۹۸	۱/۴۴	۰/۴	۰/۱۸	۰/۵۱	۲۶/۵۵	۱/۴۹	۰/۷۳	۴۸/۷۳
فروردین	۱۴/۸	۱/۱۷	۱/۱۳	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۴	۲۸/۳۲	۱/۶۴	۰/۷۳	۴۸/۹۷
اردیبهشت	۱۴/۸	۰/۷۶	۱/۰۴	۰/۳	۰/۱۳	۰/۳۷	۲۹/۴۵	۲/۲	۰/۷۳	۴۹/۷۹
خرداد	۱۱/۵۱	۰/۸۳	۱/۰۸	۰/۴۹	۰/۱۴	۰/۳۸	۳۱/۲۸	۱۴/۹۶	۰/۷۳	۶۱/۴
تیر	۱۴/۸	۱/۱۶	۱/۰۵	۰/۵۷	۰/۱۴	۰/۳۷	۳۲/۳۸	۲۸/۶۹	۰/۷۳	۷۹/۸۹
مرداد	۱۳/۱۵	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۵۷	۰/۰۸	۰/۲۳	۳۲/۲۱	۴۰/۷۵	۰/۷۳	۸۹/۱
شهریور	۱۴/۸	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۴۱	۰/۰۸	۰/۲۳	۳۱/۸۵	۴۷/۴۹	۰/۷۳	۹۶/۸۲

جدول ۷- میزان تبخیر از سطح مخزن سد کرج (متغیر E_t) (میلی‌متر) [۱۷]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
میزان تبخیر	۱۴۸/۴	۷۱/۸	۲۶/۱	۵/۵	۲/۶	۳/۵	۸۲/۹	۱۵۹/۴	۲۴۸/۲	۳۰۱/۴	۳۰۲	۲۵۴/۶	۱۶۰۶/۴

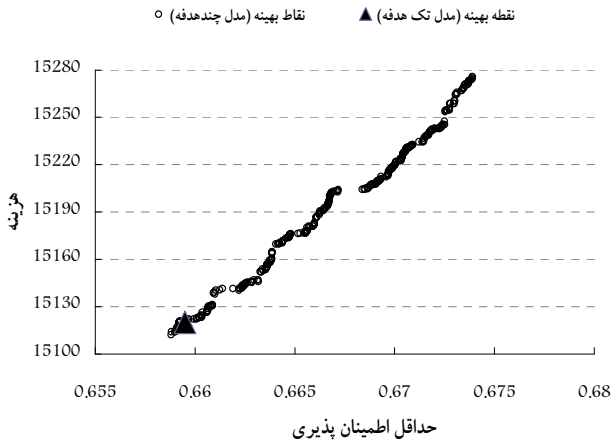
جدول ۸- متوسط آورد بین‌راهی بعد از سد کرج (متغیر $Rbin_t$)(میلیون مترمکعب) [۱۷]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
متوسط آورد	۰/۸۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۹۶	۱/۶۴	۴/۱۷	۶/۲۵	۴/۹۴	۲/۹۷	۱/۵۵	۱	۲۷/۲۷

این روش حل، ابتدا مدل بهینه‌سازی برای یک دوره یک‌ساله، اجرا شد و مقادیر بهینه آن تعیین گردید. سپس از نتایج بهینه‌سازی مرتبط با سال اول به عنوان مقادیر اولیه به جای تولید مقادیر تصادفی برای هر ژن، برای بهینه‌سازی سال دوم استفاده شد. این روند تا تکمیل دوره برنامه‌ریزی مورد نظر ادامه یافت. در مدل SGA استفاده شده، اهداف ابتدا بی‌بعد و سپس با هم جمع شده و در قالب مدل تک هدفه مدل‌سازی گردیدند. لازم به‌ذکر است طول دوره برنامه‌ریزی ۱۰ سال بود که به‌صورت گام زمانی ماهانه در مدل بهینه‌سازی دیده شد. برای مقایسه مقادیر بهینه تخصیص حاصل از مدل چندهدفه NSGA-II، از نتایج مدل SGA استفاده گردید.

۵- آزمون مدل

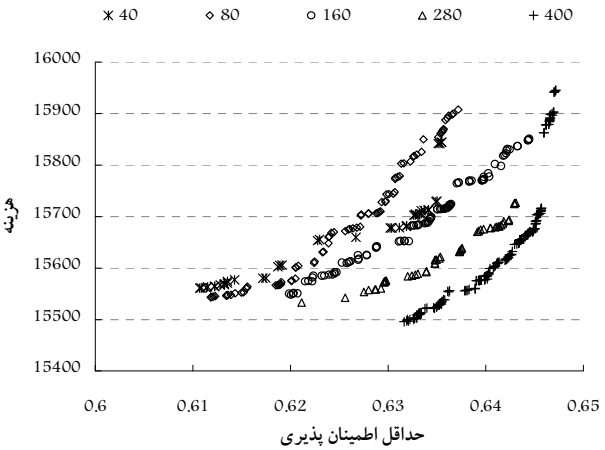
برای تعیین میزان صحت و برتری مدل بهینه‌سازی تدوین شده، از مدل تخصیص مبتنی بر سیاست استاندارد بهره‌برداری[1] استفاده شده است. در این مدل، میزان تخصیص ماهانه با توجه به منابع آبی موجود و بدون در نظر گرفتن شرایط آتی تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر این مدل تک زمانه[2] است. با توجه به اینکه مقادیر بهینه استخراج شده از مدل پیشنهادی، تمامی محدودیتهای مورد نظر را رعایت می‌نمایند و اینکه اعمال سیاست‌های اتخاذ شده توسط این مدل منجر به افزایش اطمینان‌پذیری سیستم و احیا و پایداری منابع آبی موجود در مقایسه با سیاست استاندارد بهره‌برداری می‌گردد، می‌توان به صحت نتایج مدل پیشنهادی و کارایی آن در حل مسائلی با این پیچیدگی دست یافت. به‌عنوان نمونه حداقل میزان اطمینان‌پذیری در تأمین نیازهای آب شرب شهر کرج بزرگ و بخش کشاورزی با استفاده از مدل SOP به‌ترتیب برابر با ۹۲ درصد و ۵۱ درصد است. در صورتی که این مقادیر با استفاده از مدل NSGA-II به‌ترتیب برابر با ۹۷ درصد و ۶۰ درصد خواهد بود. این مقایسه نشان‌دهنده کارایی مدل مورد استفاده در مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. به‌عبارت دیگر استفاده از مدل پیشنهادی می‌تواند باعث افزایش پایداری در سیستم منابع آب زیرزمینی و متعادل نمودن تخصیص به نیازها گردد. همچنین برای اطمینان از صحت منحنی تبادل ارائه شده توسط مدل NSGA-II، توابع هدف به‌صورت وزنی با هم جمع جبری شده و در قالب مدل تک‌هدفه اجرا شد. نتایج حاصل از این مدل باید با یکی از جوابهای منحنی تبادل هماهنگی داشته باشد که این امر به خوبی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی تبادل بهینه بین میزان تخطی و حداقل اطمینان‌پذیری برای اندازه جمعیت ۴۰۰

۶- نتایج

با توجه به مدل بهینه‌سازی تدوین شده و اجرای آن توسط مدل‌های SGA و NSGA-II می‌توان مقادیر بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی به نیازها را تعیین نمود. برای حل مدل بهینه‌سازی با استفاده از مدل NSGA-II ابتدا تحلیل حساسیتی بر روی اندازه جمعیت کروموزم‌ها صورت گرفت. نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش اندازه جمعیت کروموزم‌ها از ۴۰ تا ۴۰۰ برای ۳۰۰ تکرار، منحنی تبادل بین اهداف، تغییرات قابل توجهی را نشان می‌دهد، به‌طوری که این تغییرات در فواصل بین اندازه جمعیت ۲۸۰ و ۴۰۰ کمتر است و به ازای تعداد جمعیت بیش‌تر از ۴۰۰، این منحنی تغییرات قابل توجهی را نسبت به حالتی که تعداد جمعیت ۴۰۰ باشد، نشان نمی‌دهد. لذا در این مطالعه تعداد کروموزم‌های مورد استفاده برای تعیین منحنی تبادل بهینه بین اطمینان‌پذیری و میزان تخطی سیستم برابر با ۴۰۰ انتخاب شد.



شکل ۴- تحلیل حساسیت منحنی تبادل بین میزان تخطّی و حداقل اطمینان‌پذیری نسبت به اندازه جمعیت کروموزم‌ها

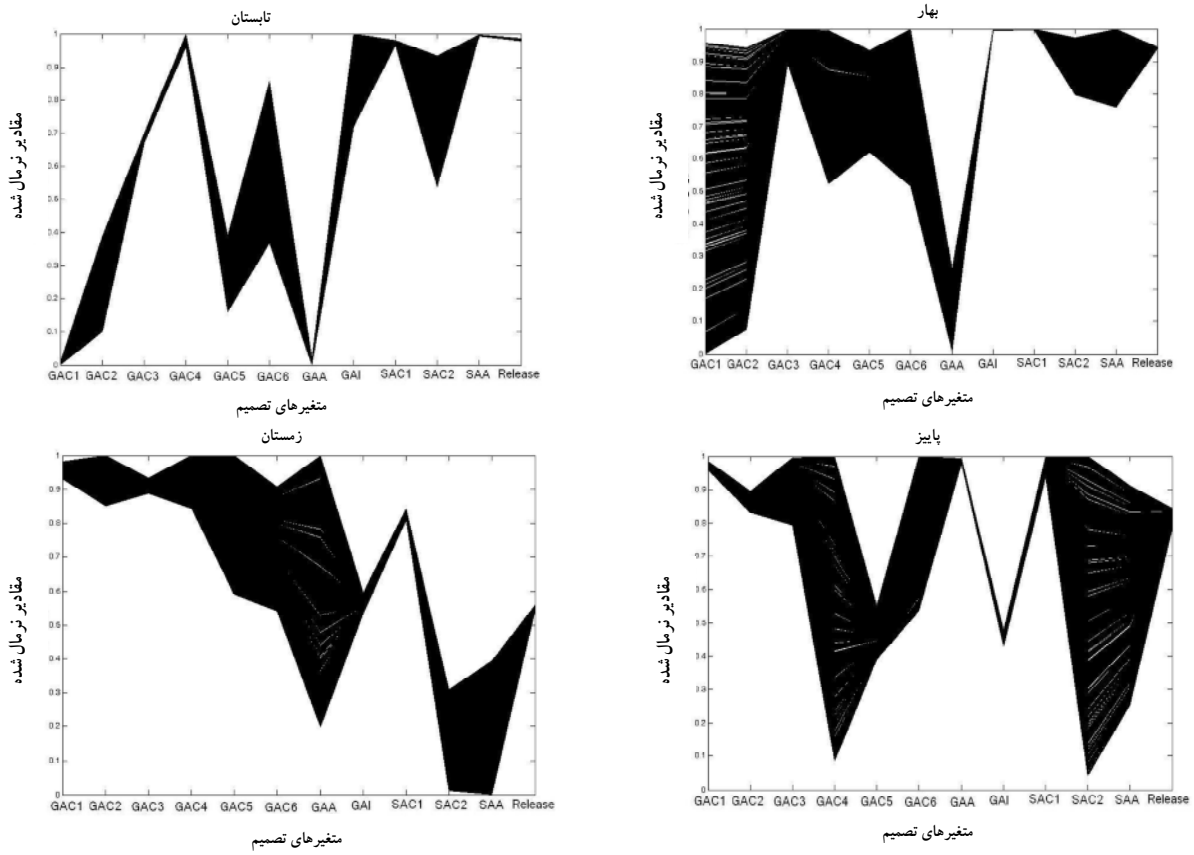
[1] Standard Operation Policy (SOP)
[2] Single Period

با توجه به اندازه جمعیت ۴۰۰ و اجرای مدل NSGA-II برای ۱۰۰۰ تکرار، منحنی تبادل ارائه شده در شکل ۳ حاصل می‌گردد. مقایسه بین زمان‌های اجرای مدل‌های مورد بررسی در دستیابی به مقادیر بهینه، نشان می‌دهد که مدل NSGA-II در مدت ۶ ساعت و مدل SGA در مدت ۵۳ ساعت به جواب نزدیک به بهینه دست یافتند که این نشانگر توانایی بالای مدل مبتنی بر جواب غیرپست در ارائه منحنی تبادل بهینه بین اهداف در مقایسه با الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای است.

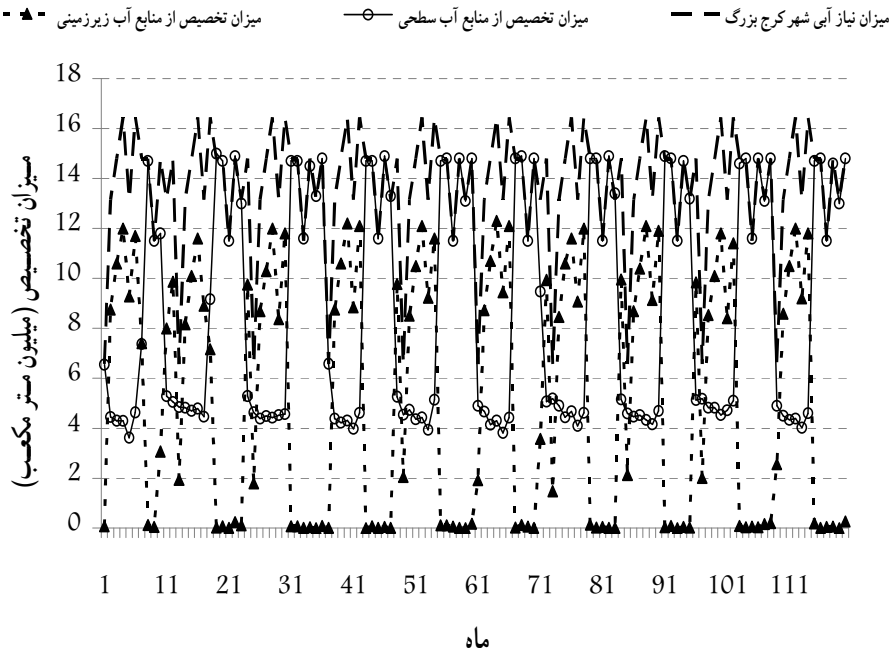
همچنین با توجه به شکل ۳ می‌توان مشاهده نمود که چنانچه در سیستم منابع آب مورد بررسی، حداقل اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای آبی بخشهای سه گانه، به میزان اندکی افزایش یابد لازم است سیستم میزان تخطّی بیشتری را از محدودیتهای موجود منابع آبی، به منظور ایجاد تعادل در منابع آب موجود، اعمال نماید.

برای تعیین میزان حساسیت متغیرهای تصمیم مورد بررسی، مقادیر بهینه تخصیص به دست آمده از مدل مدیریت بهره‌برداری تلفیقی پیشنهادی به صورت فصلی نرمال شده و بازه تغییرات آنها مطابق شکل ۵ ترسیم گردید. در این شکلها پارامترهای GAC_1 تا GAC_6 نشان‌دهنده میزان آب زیرزمینی بهینه تخصیص داده شده به شش شهر مورد مطالعه می‌باشد که دو شهر اول به صورت تلفیقی برداشت می‌نمایند. همچنین SAC_1 و SAC_2 نمایانگر میزان تخصیص بهینه از منابع آب سطحی به دو شهر است. نمایه‌های GAA، SAA و GAI عبارت‌اند از: میزان تخصیص بهینه از منابع آب زیرزمینی به بخش کشاورزی، میزان تخصیص بهینه از منابع آب سطحی به بخش کشاورزی و میزان تخصیص بهینه از منابع آب زیرزمینی به بخش صنعت.

مقایسه بازه تغییرات مقادیر بهینه تخصیص در فصول مختلف نشان می‌دهد که در فصل تابستان به‌دلیل مطلوب بودن شرایط هیدروژئولوژیکی، میزان برداشت از آبخوان از حساسیت کمتری نسبت به توابع هدف مورد بررسی برخوردار است و این به این معنی است که برداشت از منابع آب زیرزمینی در این فصل در حد نیاز تا حدود قابل توجهی به مقادیر بهینه تخصیص نزدیک می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۵، بخشهایی که توانایی استفاده تلفیقی از منابع را دارا بوده و در تخصیص اولویت بالاتری دارند، و دارای میزان حساسیت بیشتری در برداشت از منابع خواهند بود. حساسیت بخشهایی که تنها از منبع زیرزمینی برای تأمین نیازهای خود استفاده می‌نمایند در تمامی فصول قابل توجه نیست و رعایت حریمهای برداشت به‌منظور جلوگیری از افزایش میزان تخطّی سیستم بهره‌برداری ضروری است.



شکل ۵- بازه تغییرات مقادیر بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی درفصول مختلف



شکل ۶- میزان تخصیص بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی به شهر کرج بزرگ
در طی یک دوره ۱۰ ساله (یک نقطه از منحنی تبادل شکل)

با توجه به منحنی تبادل بهینه به‌دست آمده از مدل NSGA-II می‌توان برای هر بخش از مصارف با عنایت به نظر تصمیم‌گیران تأمین آب، بسته به اینکه با در نظر گرفتن میزان تخطّی سیستم از محدودیتهای منابع آبی موجود و اولویت منابع و مصارف تمایل به تأمین چه میزان از نیاز را دارند، میزان بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی را در طی دوره برنامه‌ریزی مشخص نمود. به‌عنوان نمونه نحوه تأمین نیاز به صورت تلفیقی برای شهر کرج بزرگ در شکل ۶ ترسیم شده است.

با توجه به این شکل می‌توان دریافت که این شهر به‌دلیل دارا بودن اولویت اول تخصیص، در اکثر ماهها به‌طور کامل تأمین نیاز شده و این تأمین نیاز در اکثر موارد توسط منبعی که دارای اولویت بالاتری بوده (منبع سطحی)، صورت گرفته است. این موضوع در خصوص سایر متغیرهای تصمیم نیز بسته میزان منابع آبی موجود و اولویت تخصیص آنها دارای روند مشابهی است به طوری که بخش کشاورزی به‌دلیل واقع شدن در اولویت انتهایی تخصیص از تأمین نیاز کمتری برخوردار می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدلی برای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تدوین گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل مدیریتی به صورت تک‌هدفه و چندهدفه نشان می‌دهد که چنانچه از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جواب غیرپست برای ارائه مقادیر بهینه استفاده شود، می‌توان در مدت زمان کمتری علاوه بر مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم، منحنی تبادل بین اهداف را برای تعیین میزان حساسیت اهداف ارائه نمود. همچنین سیاست‌های بهینه ارائه شده توسط مدل تلفیقی نشان می‌دهد که در ابتدای فصول گرم به دلیل شرایط مطلوب هیدروژئولوژیکی، میزان برداشت از آبخوان از حساسیت کمتری نسبت به توابع هدف (حداقل اطمینان‌پذیری و تخطّی از محدودیت کمی منابع آب) برخوردار بوده و مقادیر برداشتی در حد نیاز تا حدود قابل توجهی به مقدار بهینه خود نزدیک هستند. با استفاده از بازه تغییرات متغیرهای تصمیم واقع بر منحنی تبادل می‌توان دریافت که چنانچه در منطقه‌ای، امکان استفاده تلفیقی از منابع آب وجود داشته و دارای اهمیت بالاتری در تخصیص باشد، مقادیر بهینه تخصیص از حساسیت بیشتری در برداشت از منابع برخوردار خواهند بود. مطالعه صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که چنانچه برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از مدیریت بهینه بهره‌برداری تلفیقی جایگزین سیاست بهره‌برداری استاندارد گردد می‌تواند علاوه بر افزایش اطمینان‌پذیری سیستم، پایداری منابع آبی موجود را به خصوص در منابع آب زیرزمینی تا حد قابل توجهی تضمین نماید زیرا در سیاست بهره‌برداری استاندارد، آینده‌نگری در تخصیص جایگاهی نداشته و نیازها با توجه به منابع آب در شرایط فعلی تأمین می‌شوند.

۸- مراجع

1- Buras, N. (1963). "Conjunctive operation of dams and aquifers." *J. of the Hydraulics Division,* 89 (6), 111-132.

2- Aron, G., and Scott, V.H. (1971). "Dynamic programming for conjunctive water use." *J. of the Hydraulics Division,* 97 (5), 705-721.

3- Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., and Sahuquillo, A. (2006). "Economic optimization of conjunctive use of surface water and groundwater at the basin scale." *J. of Water Resources Planning and Management,* 132 (6), 454-467.

4- Barlow, P.M., Ahlfeld, D.P., and Dickerman, D.C. (2003). "Conjunctive-management models for sustained yield of stream-aquifer systems." *J. of Water Resources Planning and Management,* 129, (1), 35-48.

5- Rao, S.V.N., Murty Bhallamudi, S., Thandaveswara, B.S., and Mishra, G.C. (2004). "Conjunctive use of surface and groundwater for coastal and deltaic systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 130, (3), 255-267.

6- Vedula, S., Mujumdar, P.P., and Chandra Sekhar, G. (2005). "Conjunctive use modeling for multicrop irrigation." *Agricultural Water Management,* 73, 193-221.

7- Khare, D., M.K. Jat, Ediwahyunan. (2006). "Assessment of counjunctive use planning options: A case study of Sapon irrigation command area of Indonesia." *J. of Hydrology*, 328, 764-777.

8- Zahraie, B., Karamouz, M. Eslami, A., Kerachian, R. (2006). "GA model for crop pattern and conjunctive use management in varamin plain in Iran." *Proceedings of 7th ICCE Conference*, Tehran, Iran.

9- Afshar, A., Ostadrahimi, L., Ardeshir, A., and Alimohammadi, S. (2008). "Lumped approach to a multi-period–multi-reservoir cyclic storage system optimization." *Water Resources Management,* DOI: 10.1007/s11269-008-9251-y.

10- Fredericks, J., Labadie, J., and Altenhofen, J., (1998). "Decision support system for conjunctive stream-aquifer management." *J. of Water Resources Planning and Management,* 124 (2), 69-78.

11- Basagaoglu, H., Marino, M.A., and Shumway, R.H. (1999). "Delta-form approximating problem for a conjunctive water resource management model." *Advances in Water Resources,* 23, 69-81.

12- Karamouz, M., Mohammad Rezapour Tabari, M., and Kerachian, R. (2007). "Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources." *J. of Water International*, 32 (1), 163-176.

13- Karamouz, M., Mohammad Rezapour Tabari, M., Kerachian, R., and Zahraie, B. (2005). "Conjunctive use of surface and groundwater resources with emphasis on water quality." *World Water and Environmental Resources Congress* 2005, Raymond Walton, Anchorage, Alaska, USA.

14- Narayan Sethi, L., Panda, S.N., and Nayak, M.K. (2006). "Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa, India." *Agricultural Water Management,* 83 (3), 209-220.

۱۵- علی‌محمدی، س. (۱۳۸۴). "طراحی و بهره‌برداری بهینه تلفیقی از سیستم آبهای سطحی و زیرزمینی با رویکرد ذخیره سیکلی." پایان‌نامه دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

16- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2000). "A fast elitist non-dominated Sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II." *Kanpur Genetic Algorithm Laboratory (KanGAL) Report* 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.

۱۷- مهندسین مشاور ری‌آب. (۱۳۸۶). *مطالعات طرح تأمین درازمدت غرب استان تهران*، گزارش هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی، تهران.