



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

صفحه‌های ۱۱۹-۱۰۵

# ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه‌رود

سیف‌الله خدادادی<sup>۱</sup>، مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>، محمدجواد منعم<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۷

### چکیده

احیای دریاچه ارومیه نیازمند افزایش بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری است. در تحقیق حاضر، عملکرد تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه‌رود در حوضه دریاچه ارومیه ارزیابی و الگوی بهینه ارائه شد. داده‌های انشعابات اصلی ساحل چپ شبکه در تابستان ۱۳۹۴ برداشت گردید. نیاز آبی هر محدوده از شبکه برای دوره‌های مختلف سال تعیین و با میزان تحویل‌شده شرکت بهره‌برداری مقایسه شد. چهار شاخص ارزیابی عملکرد مولدن-گیتس محاسبه شد. نتایج نشان داد که شاخص راندمان، با متوسط ۵۶ درصد در کلاس ضعیف قرار دارد. گرچه شاخص کفایت با متوسط ۹۷ درصد خوب است، شاخص پایداری با متوسط ۳۸ درصد و شاخص عدالت توزیع با متوسط ۵۰ درصد بیانگر عدم تعادل عرضه و تقاضای آب در اجزای شبکه است. توزیع نامناسب آب سطحی سبب افزایش شوری و عمق آب زیرزمینی در پایین دست شبکه و ماندابی شدن در بالادست شبکه بوده است. در این بررسی، الگوی توزیع آب در شرایط کشت موجود با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی شد. بر این اساس، چهار شاخص راندمان، کفایت، پایداری و عدالت توزیع، به ترتیب به ۶۵، ۱۰۰، ۸ و ۶۰ درصد ارتقا می‌یابد. نتایج نشانگر ظرفیت بهبود عملکرد شبکه آبیاری زرینه‌رود، حتی در شرایط موجود است.

**کلیدواژه‌ها:** الگوریتم تجمع بهینه ذرات (PSO)، تعادل عرضه و تقاضا، شاخص‌های مولدن-گیتس، شبکه آبیاری زرینه‌رود، مدیریت آبیاری.

## مقدمه

شبکه آبیاری و بهبود عملکرد آن‌ها در استان سند پاکستان در سال‌های ۹۸-۱۹۹۷ انجام گرفت، عدالت توزیع آب کانال‌ها با شاخص نسبت عملکرد تحویل و شاخص اطمینان‌پذیری با درصد تغییرات زمانی و مکانی بدء جریان تحویلی ارزیابی شد. با توجه به حداقل نسبت عملکرد تحویل ۰/۷ و حداکثر ضریب تغییرات ۰/۳، عملکرد شبکه‌ها ضعیف ارزیابی شد (۱۸).

ارزیابی عملکرد توزیع آب در کانال اردیبهشت شبکه آبیاری درودزن استان فارس با اندازه‌گیری بدء ورودی به انشعابات فرعی، طی سه فصل مختلف و استفاده از شاخص‌های نسبت عملکرد تحویل، بازده، عدالت توزیع زمانی و مکانی آب برای دو حالت زیرکشت واقعی و قراردادی انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده عدالت توزیع پایین در کانال و مقدار متفاوت شاخص‌ها برای دو حالت مذکور بود (۵).

در تحقیق دیگری، الگوی توزیع آب در هفت آبگیر کانال EIRI از شبکه آبیاری دز با کاربرد روش عددی SA<sup>۱</sup> بهینه‌سازی شد (۷). تابع هدف، ترکیب خطی غیرصریح شاخص‌های راندمان، کفایت، عدالت و پایداری تحویل آب بود. پایین‌بودن مقادیر شاخص‌ها سبب عدم تعادل عرضه و تقاضای آب می‌شود. نتایج بررسی وضعیت توزیع مکانی و زمانی آب کشاورزی در هجده واحد آبیاری ساحل راست شبکه آبشار در حوزه زاینده‌رود اصفهان در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ حاکی از عدم تعادل عرضه و تقاضا و بهره‌وری پایین آب بود (۸). بررسی عملکرد تحویل آب در ساحل چپ شبکه مینیمم ترکیب با شاخص‌های مولدن-گیتس طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ در سطح مزرعه از روی اطلاعات آبیاری کشاورزان شامل راندمان‌های کاربرد آب، راندمان ذخیره، ضریب یکنواختی و ضریب پخش مطالعه شد. شاخص‌های راندمان و کفایت

بررسی‌های اولیه میدانی از وضع موجود و الگوی تحویل آب شبکه بیانگر مشکلات عدیده سازه‌ای، بهره‌برداری، مدیریتی و نگهداری است که سبب تلفات آب در بالادست و دریافت نامطمئن آب در پایین‌دست شبکه می‌شود. کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب حوضه دریاچه ارومیه و تأمین ۷۷ درصدی آب از منابع درون‌حوضه‌ای یکی از راهکارهای مصوب ستاد احیای دریاچه و نیازمند مدیریت پایدار تقاضا و افزایش بهره‌وری آب حوضه است (۹). در این راستا، ارتقای عملکرد شبکه آبیاری زهکشی زرينه‌رود، با توجه به نقش ۴۲ درصدی رودخانه زرينه‌رود در تأمین آب دریاچه ارومیه، ضروری است. نخستین گام در بهبود عملکرد شبکه‌های آبیاری، ارزیابی وضع موجود آن‌هاست (۱۱). ارزیابی از دیدگاه‌های مختلف مدیریتی، فنی، اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی با شاخص‌های متفاوت کمی و کیفی قابل تحقیق است، شامل روش‌های مختلف کیفی (نظیر تجزیه و تحلیل تشخیصی، ارزیابی سریع و ارزیابی چارچوبی) و روش‌های کمی (نظیر روش کلاسیک، تحلیل پوششی داده‌ها و روش فازی) (۱۷). از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی شبکه‌ها تعادل عرضه و تقاضای آب در وضعیت مطلوب بهره‌برداری است که باید هدف توزیع و تحویل آب با اعتمادپذیری بالا را تحقق بخشد (۴). این هدف نیاز به اطلاعاتی دارد، نظیر مقدار تخصیص آب از منابع سطحی و زیرزمینی و نحوه توزیع آن در فصل کشت، الگو و تراکم کشت، نیاز آبی در تقویم زراعی، بارندگی مؤثر و وضعیت بهره‌برداری شبکه (۸). در مطالعات مولدن و گیتس، عملکرد شبکه با شاخص‌های بدون بعد کفایت، راندمان، پایداری و عدالت ارائه شده یا ترکیب مختلفی از این شاخص‌ها ارزیابی می‌شود (۱۵).

مطالعات متعددی به بررسی عملکرد شبکه‌ها پرداخته‌اند. در تحقیقی که برای آموزش و توانمندسازی تشکل‌های کشاورزی نسبت به بهره‌برداری و نگهداری سه

## 1. Simulating Annealing

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه رود

چندهدفه در موضوعات مختلف از جمله تخصیص بهینه منابع آب (۱۹، ۲۰) و شبکه توزیع آب (۵، ۱۶) تأیید شد.

**مواد و روش ها**

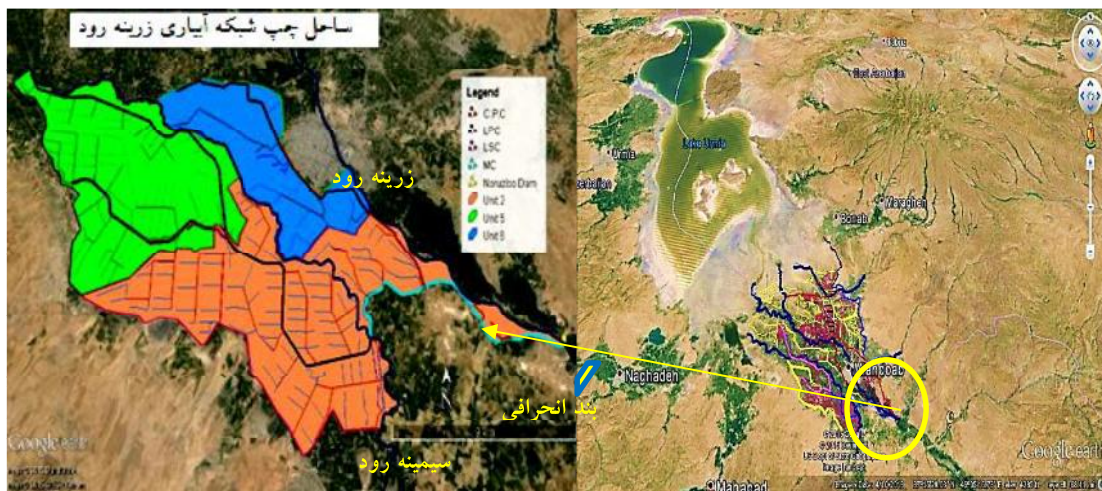
**محدوده مطالعه**

محدوده مطالعه این تحقیق، واحدهای عمرانی ۲، ۵ و ۶ در ساحل چپ شبکه آبیاری و زهکشی زرینه رود، در دشت میاندوآب، واقع در جنوب شرقی دریاچه ارومیه است که در موقعیت جغرافیایی ۳۶°۵۰' تا ۳۷°۱۰' طول شرقی و ۴۵°۵۴' تا ۴۶°۱۵' عرض شمالی به مساحت حدود ۱۶۳۱۳ هکتار قرار دارد (شکل ۱). آب شبکه از طریق کانال اصلی به ظرفیت ۳۵ مترمکعب در ثانیه از ابتدای سد تنظیمی - انحرافی نوروزلو (در ۱۵ کیلومتری میاندوآب) تأمین و در انشعابات درجه دو توزیع می شود. موقعیت و وضعیت اجرایی شبکه کانالها و انشعابات با پیمایش صحرایی و تطابق با نقشه های طراحی موجود تدقیق و نقشه آن با استفاده از نرم افزارهای Google Earth و Arc GIS تهیه شد. با تعیین محل دریاچه های انشعاب درجه دو و شبکه کانال های فرعی، محدوده تحت پوشش هر انشعاب (در مجموع چهارده انشعاب اصلی) مشخص شد (شکل ۲).

خوب بود و شاخص اعتمادپذیری، متوسط و شاخص عدالت ضعیف ارزیابی شد (۱۳). همچنین، شبیه سازی هیدرولیک انتقال جریان آب شبکه درودزن و ارزیابی عملکرد آن با شاخص های کفایت، عدالت توزیع و آب مازاد، الگوی بهره برداری بهینه را به صورت جریان دائمی متغیر ارائه داده است (۱۰).

در تحقیقی که برای انتخاب روش های بهینه مدیریت آب مزرعه در شبکه درودزن انجام گرفت، بهینه سازی معیارهای کارایی (عدالت توزیع و بهره وری آب) با استفاده از الگوریتم ژنتیکی بررسی شد (۱۴).

در تحقیق حاضر نیز به دلیل اهمیت بهبود بهره وری آب کشاورزی حوضه دریاچه ارومیه، به خصوص در شبکه های آبیاری سطحی، همسو با مصوبه کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی ستاد احیا، نخست، الگوی تحویل و توزیع آب شبکه آبیاری زرینه رود با شاخص های مولدن - گیتس ارزیابی شد و الگوی بهینه برای شرایط موجود، با استفاده از الگوریتم فراکاوشی تجمع ذرات ارائه گردید. این الگوریتم با الهام از رفتار اجتماعی حیوانات، مانند حرکت دسته جمعی پرندگان، برای حل مسائل بهینه سازی پیوسته ارائه شد. اساس آن بر تکرار و هوش جمعی ذرات است (۱۲). کارایی این الگوریتم در بهینه سازی تک هدفه و



شکل ۱. موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی زرینه رود و دریاچه ارومیه

**مدیریت آب و آبیاری**

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶



شکل ۲. محدوده‌های تحت پوشش انشعابات درجه دو از ساحل چپ کانال اصلی

تحویلی واقعی در یک دوره تحویل  $(m^3/hr)$  و  $CV_R$  و  $CV_T$  به ترتیب ضریب تغییرات مکانی و زمانی (بدون بعد) است. هر چه شاخص رابطه (۱) به عدد ۱ نزدیک باشد، کفایت تحویل بهتر و مشکل کمبود آب حداقل می‌شود. تحویل آب مازاد بر نیاز سبب اتلاف و کاهش راندمان عملکرد می‌شود که شاخص رابطه (۲) آن را نشان می‌دهد. شاخص‌های روابط (۳) و (۴) به ترتیب پایداری توزیع زمانی و عدالت توزیع مکانی آب را بیان می‌کند. برای محاسبه مقادیر شاخص‌ها، اطلاعات زیر از شبکه جمع‌آوری شد.

### الگوی کشت محصولات

سطح و الگوی کشت منطقه با هفت گروه با همکاری میراب‌های محلی در تابستان ۱۳۹۴ آماربرداری شد. جدول ۱ جزئیات سطح و الگوی کشت باغی و زراعی را در محدوده انشعابات ارائه می‌دهد. علی‌رغم تنوع بالای محصولات کشت‌شده در منطقه، الگوی زراعی غالب گندم، جو و چغندر قند به ترتیب با ۲۳، ۱۸ و ۲۰ درصد و الگوی باغی غالب سیب و هلو به ترتیب با ۲۰ و ۵ درصد است. این الگو در مجموع حدود ۸۵ درصد سطح زیرکشت محصولات را شامل می‌شود.

### شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های بی‌بعد مولدن-گیتس در ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه به صورت زیر تعریف می‌شود (۱۵).

$$P_A = \frac{1}{T} \sum \left[ \frac{1}{R} \sum (P_a) \right] \begin{cases} \text{if: } Q_d < Q_r \\ P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \end{cases} \begin{cases} \text{if: } Q_r < Q_d \\ P_a = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_F = \frac{1}{T} \sum \left[ \frac{1}{R} \sum (P_f) \right] \begin{cases} \text{if: } Q_d > Q_r \\ P_f = \frac{Q_r}{Q_d} \end{cases} \begin{cases} \text{if: } Q_d < Q_r \\ P_a = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$P_D = \frac{1}{R} \sum CV_T(Q_d/Q_r) \quad (3)$$

$$P_E = \frac{1}{T} \sum CV_R(Q_d/Q_r) \quad (4)$$

در این روابط  $P_A^1$  شاخص کفایت (بدون بعد) و بیانگر توانایی روش بهره‌برداری در تحویل آب به قدر تأمین نیاز،  $P_F^2$  راندمان (بدون بعد) و بیانگر میزان آب مازاد تحویلی در اثر عملکرد نامناسب،  $P_D^3$  شاخص پایداری یا اعتمادپذیری تحویل آب (بدون بعد) در طول دوره بهره‌برداری (T)،  $P_E^4$  شاخص عدالت توزیع (بدون بعد) و بیانگر میزان تناسب مقادیر آب تحویلی و مورد نیاز در آبگیرهای مختلف،  $Q_r$  بده مورد تقاضا  $(m^3/hr)$ ،  $Q_d$  بده

1. Performance of Adequacy
2. Performance of Efficiency
3. Performance of Dependability
4. Performance of Equity

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه رود

جدول ۱. سطح زیر کشت (هکتار) و الگوی کشت باغی و زراعی در محدوده منطقه مطالعاتی

| LPC   | LSC   | PS    | H25L  | H24T | H23L  | H22L  | H19L  | H4T1  | H4T2 | CPC    | H3T   | H1Q3 | H1Q2 | کشت/انشعاب |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|------------|
| ۴/۷   | ۱۰۴/۵ | ۸/۵   | ۳۴/۸  | ۰/۶  | ۹/۲   | ۱۱/۴  | ۸/۲   | ۴۳/۰  | ۲۳/۲ | ۱۳/۲   | ۲۸/۳  | ۸/۷  | ۲/۶  | جو         |
| ۴۸۶/۲ | ۳۲۵/۸ | ۳۳۱/۵ | ۳۷۷/۷ | ۵۶/۱ | ۴۲۳/۵ | ۵۸۶/۳ | ۴۱۶/۷ | ۵۳/۲  | ۶۰/۲ | ۴۱۸/۰  | ۱۴۳/۸ | ۲۳/۳ | ۱۵/۲ | گندم       |
| ۳۱۹/۶ | ۳۵۱/۶ | ۲۷۱/۴ | ۱۶۹/۲ | ۵۵/۰ | ۱۴۵/۴ | ۳۳۶/۰ | ۳۰۳/۱ | ۱۱۵/۲ | ۸۰/۶ | ۵۵۰/۹  | ۹۷/۷  | ۴۴/۸ | ۴۰/۱ | یونجه      |
| ۴۲۲/۲ | ۳۴۵/۰ | ۳۱۱/۸ | ۲۴۲/۰ | ۸۱/۶ | ۲۰۱/۶ | ۴۲۰/۵ | ۲۴۴/۶ | ۱۲۲/۳ | ۸۹/۴ | ۵۶۳/۳  | ۱۲۵/۱ | ۲۴/۸ | ۲۶/۱ | چغندر      |
| ۶۰/۳  | ۱۳/۶  | ۳۴/۶  | ۱۴/۵  | ۸/۱  | ۱۵/۴  | ۴۱/۵  | ۳۲/۶  | ۱۴/۳  | ۲۰/۸ | ۲۰۸/۲  | ۵/۶   | ۰/۰  | ۰/۰  | ذرت        |
| ۱۶۸/۶ | ۳۶/۶  | ۹۶/۷  | ۲۶/۴  | ۱۲/۸ | ۲۰/۷  | ۷۴/۳  | ۱۰۸/۸ | ۱۵/۲  | ۱۱/۶ | ۲۶۳/۴  | ۱۴/۴  | ۲/۴  | ۰/۴  | صیفی جات   |
| ۲۵/۴  | ۱۰/۸  | ۲۹/۴  | ۱۷/۴  | ۲۳/۶ | ۸/۹   | ۱۳/۶  | ۵/۳   | ۲۰/۷  | ۰/۰  | ۶۰۳/۹  | ۳۷/۸  | ۹/۶  | ۱/۶  | هلو و آلو  |
| ۰/۵   | ۳/۳   | ۲/۶   | ۰/۰   | ۲/۲  | ۲/۴   | ۲۱/۱  | ۳۰/۰  | ۱۸/۳  | ۰/۰  | ۶۸/۲   | ۴/۸   | ۳/۵  | ۱/۶  | گردو       |
| ۰/۰   | ۰/۰   | ۰/۰   | ۰/۶   | ۰/۰  | ۰/۷   | ۲/۹   | ۳/۶   | ۱۳/۴  | ۰/۰  | ۴۷/۲   | ۵/۶   | ۰/۰  | ۰/۰  | انگور      |
| ۶۶۷/۱ | ۱۹۲/۷ | ۴۷۳/۵ | ۹۷/۸  | ۸۴/۷ | ۸۱/۶  | ۲۰۹/۲ | ۱۸۷/۷ | ۳۷/۳  | ۱۳/۹ | ۱۱۱۷/۲ | ۳۷/۳  | ۸/۸  | ۱۴/۹ | سیب        |
| ۱۱۶/۳ | ۸۲/۰  | ۶۰/۸  | ۱/۶   | ۰/۲  | ۱۲۳/۲ | ۲۹/۰  | ۱۱/۵  | ۲۳/۰  | ۳۲/۴ | ۱۱۲/۷  | ۸/۷   | ۵/۲  | ۱/۴  | آیش        |

### برآورد نیاز آبی محصولات

برای برآورد نیاز آبی، نخست تبخیرتعرق، باران مؤثر و عمق آبیاری لازم برای هر محصول در دوره‌های ده روزه سال در منطقه میاندوآب از سند ملی تعیین شد. برای آبیاری اولیه محصولات زراعی جو، گندم و چغندر قند به ترتیب مقدار ۳۰، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر خاک آب به نیاز خالص اضافه شد (۸). بارش مؤثر مازاد بر نیاز در دوره‌های مذکور نفوذ عمقی در نظر گرفته شد. مدیریت کم آبیاری محصولات به شرح زیر اعمال شد.

کشت پاییزه گیاه چغندر به دلیل کنترل بیماری‌های ریشه‌ای، خسارت کمتر آفات، همچنین سرمادوست بودن (دمای پایه رشد ۳ درجه سانتی‌گراد) نسبت به کشت بهاره ارجح (۶) و در منطقه مطالعاتی رایج بود. اعمال تنش جزئی آب تا مرحله هشت تا ده برگی موجب اختصاص مواد فتوسنتزی به توسعه بیشتر عمق ریشه می‌شود، لذا بعد

از آبیاری اولیه، تا اواخر خرداد آبیاری نمی‌شود.

در مورد غلات، رقم‌های امید، نوید، الموت، الوند و زرین برای کشت آبی استفاده می‌شود که تا اواخر بهمن و اسفند آبیاری انجام نمی‌شود. نیاز آبی این دوره برای تنفس گیاه (نه فتوسنتز) است و از رطوبت خاک تأمین می‌شود (۶).

درختان میوه نیز غالباً در دوره گلدهی (فروردین ماه) به صورت غرقابی آبیاری نمی‌شود، چون شرایط عدم تهویه و تنفس کافی ریشه، سبب تولید تنظیم‌کننده رشدی به نام آبسزیک اسید و در نتیجه ریزش گل‌ها می‌شود. شرایط تنفس غیرهوازی با تولید هورمون بازدارنده رشد اتیلن سبب تولید ماده سمی اتانول می‌شود. تداوم این شرایط علاوه بر ریزش گل‌ها، به مرگ گیاه نیز منجر می‌شود (۲). همچنین، با استناد به نتایج تحقیقات قبلی، راندمان انتقال کانال‌های درجه یک و دو، ۸۰ درصد و راندمان توزیع کانال‌های درجه ۳ و ۴ برابر ۵۰ درصد اعمال شد (۱).

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

کارکرد هر ماه، شوری و اسیدیته آب، نوع مصرف، عمق و سطح آب) و تهیه‌شده در آماربرداری سال ۱۳۹۴ در Arc GIS تشکیل شد. جدول ۲ آمار کلی چاه‌های محدوده مطالعاتی را ارائه می‌دهد. به دلیل غیرقانونی بودن برداشت چاه‌های غیرمجاز، تنها برداشت چاه‌های مجاز فعال محدوده هر انشعاب، در ارزیابی عملکرد لحاظ شد. با کسر سهم برداشت آب زیرزمینی از نیاز ناخالص آبیاری، حجم خالص ماهانه آب مورد نیاز هر انشعاب محاسبه شد.

بدین ترتیب، عمق ناخالص مورد نیاز آبیاری محاسبه شد که بخشی از آن در محدوده هر انشعاب شبکه از طریق چاه‌های مجاز فعال تأمین می‌شود.

### برداشت آب زیرزمینی

به منظور لحاظ سهم آب زیرزمینی در تأمین بخشی از نیاز آبی، پایگاه داده تمام چاه‌های محدوده (شامل تعداد و مختصات موقعیت جغرافیایی آن‌ها، آبدهی و ساعات

جدول ۲. آمار چاه‌های موجود در محدوده مطالعاتی شبکه زرينه‌رود (مستخرج از منبع ۳)

| چاه       | تعداد | فعال | بدنه جریان (لیتر بر ثانیه) |       |        | تخلیه سالانه<br>(میلیون مترمکعب) | مساحت تحت پوشش (هکتار) |
|-----------|-------|------|----------------------------|-------|--------|----------------------------------|------------------------|
|           |       |      | حداقل                      | متوسط | حداکثر |                                  |                        |
| مجاز      | ۵۵۳   | ۵۰۸  | ۱                          | ۱۳    | ۴۵     | ۱۵/۱۶                            | ۱۷۶۱                   |
| غیرمجاز   | ۴۱۶۷  | ۳۷۴۷ | ۰/۴                        | ۱۲    | ۵۰     | ۶۶/۷۴                            | ۸۲۵۷                   |
| کل چاه‌ها | ۴۷۲۰  | ۴۲۵۵ | ۰/۴                        | ۱۲    | ۵۰     | ۸۱/۹۰                            | ۱۰۰۱۸                  |

جدول ۳. الگوی آب تحویلی به انشعابات محدوده مطالعاتی در سال ۱۳۹۴ (مترمکعب)

| انشعاب/ ماه | اردیبهشت | خرداد    | تیر      | مرداد    | شهریور   | جمع      |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| H1Q2        | ۶۴۴۳۸    | ۸۹۵۲۲    | ۱۳۳۳۱۱   | ۱۴۸۱۳۴   | ۱۶۰۳۳۰   | ۵۹۵۷۳۵   |
| H1Q3        | ۱۷۲۸۰۰   | ۲۱۶۰۰۰   | ۱۹۴۴۰۰   | ۱۹۴۴۰۰   | ۱۴۰۴۰۰   | ۹۱۸۰۰۰   |
| H3T         | ۲۰۷۳۶۰   | ۲۵۹۲۰۰   | ۲۳۳۲۸۰   | ۲۳۳۲۸۰   | ۱۶۸۴۸۰   | ۱۱۰۱۶۰۰  |
| CPC         | ۶۹۱۲۰۰۰  | ۸۶۴۰۰۰۰  | ۷۷۷۶۰۰۰  | ۷۷۷۶۰۰۰  | ۵۶۱۶۰۰۰  | ۳۶۷۲۰۰۰۰ |
| H4T2        | ۱۵۲۰۶۴   | ۱۹۰۰۸۰   | ۱۷۱۰۷۲   | ۱۷۱۰۷۲   | ۱۲۳۵۵۲   | ۸۰۷۸۴۰   |
| H4T1        | ۵۱۸۴۰۰   | ۶۴۸۰۰۰   | ۵۸۳۲۰۰   | ۵۸۳۲۰۰   | ۴۲۱۲۰۰   | ۲۷۵۴۰۰۰  |
| H19L        | ۶۹۱۲۰۰   | ۸۶۴۰۰۰   | ۷۷۷۶۰۰   | ۷۷۷۶۰۰   | ۵۶۱۶۰۰   | ۳۶۷۲۰۰۰  |
| H22L        | ۱۵۵۸۶۵۶  | ۱۹۴۸۳۲۰  | ۱۷۵۳۴۸۸  | ۱۷۵۳۴۸۸  | ۱۲۶۶۴۰۸  | ۸۲۸۰۳۶۰  |
| H23L        | ۷۹۱۴۲۴   | ۹۸۹۲۸۰   | ۸۹۰۳۵۲   | ۸۹۰۳۵۲   | ۶۴۳۰۳۲   | ۴۲۰۴۴۴۰  |
| H24T        | ۲۲۸۰۹۶   | ۲۸۵۱۲۰   | ۲۵۶۶۰۸   | ۲۵۶۶۰۸   | ۱۸۵۳۲۸   | ۱۲۱۱۷۶۰  |
| H25L        | ۵۱۸۴۰۰   | ۶۴۸۰۰۰   | ۵۸۳۲۰۰   | ۵۸۳۲۰۰   | ۴۲۱۲۰۰   | ۲۷۵۴۰۰۰  |
| PS          | ۱۱۴۰۴۸۰  | ۱۴۲۵۶۰۰  | ۱۲۸۳۰۴۰  | ۱۲۸۳۰۴۰  | ۹۲۶۶۴۰   | ۶۰۵۸۸۰۰  |
| LSC         | ۲۷۰۹۵۰۴  | ۲۸۰۸۰۰۰  | ۳۰۴۸۱۹۲  | ۳۰۴۸۱۹۲  | ۲۲۰۱۴۷۲  | ۱۳۸۱۵۳۶۰ |
| LPC         | ۱۸۰۱۸۰۲  | ۲۲۴۳۲۷۸  | ۱۹۶۶۲۰۹  | ۱۹۵۱۳۸۶  | ۱۳۵۵۹۹۰  | ۹۳۱۸۶۶۵  |
| جمع         | ۱۷۴۶۶۶۲۴ | ۲۱۲۵۴۴۰۰ | ۱۹۶۴۹۹۵۲ | ۱۹۶۴۹۹۵۲ | ۱۴۱۹۱۶۳۲ | ۹۲۲۱۲۵۶۰ |

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زربینه رود

### الگوی آب تحویلی به شبکه

برنامه توزیع سهمیه آب کانال‌های آبیاری ساحل چپ شبکه زربینه رود، بر اساس تحویل مدیریت امور منابع آب میاندوآب در سال ۱۳۹۴، از آرشیو فنی شرکت آب منطقه‌ای استان استخراج شد. کل حجم رهاسازی شده ۱۲۴/۷ میلیون مترمکعب بود که به ترتیب مقادیر ۲۷/۹ و ۴/۵ میلیون مترمکعب آن آب رهاسازی شده به سیمینه رود و تلفات مسیر بوده است. حجم ۹۲/۲ میلیون مترمکعب طی ماه‌های اردیبهشت تا شهریور مطابق جدول ۳ به انشعابات شبکه تحویل شده است. با محاسبه نسبت آب تحویلی به آب خالص مورد نیاز انشعابات در طول ماه‌های بهره‌برداری، مقادیر شاخص‌ها از روی روابط (۱) تا (۴) محاسبه و عملکرد شبکه ارزیابی می‌شود. سپس، الگوی توزیع شرایط موجود آب با الگوریتم تجمع ذرات بهینه‌سازی می‌شود.

### الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات<sup>۱</sup> (PSO)

الگوریتم PSO با ایجاد جمعیت تصادفی از ذرات شروع می‌شود که هر ذره نماینده یک جواب ممکن در فضای مسئله است. مشخصات هر ذره با دو بردار موقعیت (X) و سرعت (V) بیان می‌شود که نخست به‌طور تصادفی، مقداری اولیه می‌گیرد. سپس، به‌صورت تکرارشونده در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کند و با محاسبه مقدار بهینگی، گزینه‌های جدید بهتر را می‌یابد. هر یک از ذرات دارای حافظه است و بهترین موقعیت تجربه‌شده را به‌خاطر می‌سپارد. اصلاح موقعیت و سرعت هر ذره تحت تأثیر بهترین موقعیت تجربه‌شده هر ذره (P<sub>best</sub>) و بهترین موقعیت کل ذرات (G<sub>best</sub>) از ابتدای حرکت، طبق روابط (۵) و (۶) انجام می‌شود.

(۵)

$$V_{id}^{t+1} = X \left( w V_{id}^t + c_1 r_1 (P_{bestid}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (G_{bestid}^t - x_{id}^t) \right) \quad (5)$$

$$V_{\min} \leq V_{id}^{t+1} \leq V_{\max} \quad (6)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + V_{id}^{t+1} \times \Delta t$$

که در آن  $X$  و  $V_{id}^t$  به ترتیب موقعیت و سرعت ذره  $i$ ام در تکرار  $t$ ام و  $X_{id}^{t+1}$  و  $V_{id}^{t+1}$  موقعیت و سرعت جدید در فضای  $d$  بعدی است. ضرایب بدون بعد  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده (۰ و ۱) است.  $w$  پارامتر وزن اینرسی و عامل تعادل در همگرایی به بهینه موضعی و سراسری است. مقدار آن بین ۰/۹ و ۰/۴ به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی و دو مقدار ثابت مثبت در بازه (۰ و ۴) با شرط  $C_1 + C_2 \leq 4$  است (۱۲).

برای بهینه‌سازی الگوی تحویل آب، اهداف تحقیق شامل حداقل کمبود آبیاری و مینیمم ضریب تغییرات مکانی و زمانی نسبت تحویل، به شکل ریاضی طبق روابط (۷) تا (۹) تعریف و به روش مجموع وزندار با فرض اهمیت مضاعف عدالت توزیع و ثبات الگو نسبت به کمبود آب، مطابق رابطه (۱۰) به حالت یک‌هدفه تبدیل شد. فرض مدل بر برقراری جریان دائمی در کانال انتقال است.

$$f_1 = \min \sum_{j=1}^m |V_{del} - V_{dem}| \quad (7)$$

$$f_2 = \min \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m C_r \cdot V_r \left( \frac{V_{del}}{V_{dem}} \right) \quad (8)$$

$$f_3 = \min \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C_t \cdot V_t \left( \frac{V_{del}}{V_{dem}} \right) \quad (9)$$

$$F = 0.2 \times f_1 + 0.4 \times f_2 + 0.4 \times f_3 \quad (10)$$

در روابط فوق  $V_{del}$  و  $V_{dem}$  به ترتیب حجم تحویلی و مورد نیاز آب ( $m^3$ )،  $C_r \cdot V_r$  و  $C_t \cdot V_t$  به ترتیب ضریب تغییرات زمانی و مکانی تحویل،  $N$  تعداد دفعات آبیاری و  $m$  تعداد دریاچه یا انشعاب است. متغیرهای مسئله عبارت است از حجم ماهانه آب تحویلی به هر انشعاب، مجموع حجم آب تحویلی هر انشعاب در طول دوره بهره‌برداری و

1 Particle Swarm Optimization (PSO)

مترمکعب است که ۱۵/۱۶ میلیون مترمکعب آن از چاه‌های مجاز پمپاژ می‌شود. کمتر از ۱۲ درصد چاه‌ها مجاز، و بیش از ۸۸ درصد چاه‌ها فاقد مجوز است. چاه‌های غیرمجاز سالانه حدود ۴/۴ برابر چاه‌های مجاز برداشت دارد و این گواه بر ضعف عملکرد شبکه در تأمین مطمئن نیاز آبی است. مقایسه نیاز واقعی با مقادیر تحویلی نشان می‌دهد، گرچه اختلاف ناسچیزی بین ۹۲/۲ میلیون مترمکعب آب تحویلی با ۱۰۱ میلیون مترمکعب آب مورد نیاز (احتساب کل چاه‌های مجاز و غیرمجاز) وجود دارد، ولی اعمال برداشت‌های غیرمجاز در برنامه تحویل وجهه قانونی ندارد؛ ضمن اینکه در محدوده تحت پوشش کانال LSC، به جز در تابستان، و محدوده کانال‌های HIQ3 و H3T در پاییز، مازاد برداشت وجود دارد. برداشت‌های غیرمجاز به شکل پمپاژ از کانال‌ها نیز به دلیل نبود آمار لحاظ نشده است. با کسر برداشت چاه‌های مجاز، الگوی خالص آب مورد نیاز هر انشعاب، مطابق جدول ۴ است.

مجموع حجم تحویلی به کل شبکه در هر ماه. قیود مسئله نیز تأمین حداقل ۶۰ درصد نیاز آبی انشعابات و عدم تجاوز از موجودی آب بود. کد الگوریتم به صورت mfile به زبان MATLAB تهیه شد. الگوی آب خالص مورد نیاز انشعابات به عنوان ورودی مدل در قالب ماتریسی با ابعاد ۱۴\*۵ به ترتیب بیانگر تعداد انشعابات و تعداد ماه‌های تحویل آب تعریف شد. سپس، مقادیر پارامترهای الگوریتم با تحلیل حساسیت تعیین و مدل با تخصیص حجم آب به درایه‌های ماتریس در هر تکرار تا رسیدن به حد مجاز خطا یا تعداد تکرار معین (شرط توقف مدل) اجرا شد.

### نتایج و بحث

کل نیاز ناخالص شبکه با داشتن عمق تبخیر-تعرق خالص هر محصول، سطح و الگوی کشت هر محدوده و اعمال راندمان‌های انتقال و توزیع آب، حدود ۱۸۳ میلیون مترمکعب به دست آمد. آمار چاه‌های منطقه (جدول ۲) نشان می‌دهد کل برداشت آب زیرزمینی منطقه ۸۲ میلیون

جدول ۴. حجم خالص نیاز آب هر انشعاب از کانال اصلی شبکه آبیاری با اعمال چاه‌های مجاز فعال (مترمکعب)

| انشعاب/ ماه | فروردین | اردیبهشت | خرداد    | تیر      | مرداد    | شهریور   | مهر     | آبان    | جمع       |
|-------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|-----------|
| HIQ2        | ۴۴۵۳۵   | ۸۵۸۲۹    | ۱۸۷۷۳۹   | ۲۵۶۳۶۸   | ۲۴۲۸۴۳   | ۱۹۰۸۶۹   | ۴۴۵۵۹   | ۹۳۸۱    | ۱۰۶۲۱۲۳   |
| HIQ3        | ۴۴۷۸۸   | ۱۱۰۸۹۱   | ۲۱۵۶۰۱   | ۲۵۱۳۰۶   | ۲۳۴۶۳۴   | ۱۸۰۳۰۲   | ۵۴۵۸۲   | ۱۷۱۹۶   | ۱۱۰۹۳۰۰   |
| H3T         | ۱۴۰۸۳۹  | ۴۱۵۰۲۸   | ۸۰۶۸۸۴   | ۹۹۰۳۴۷   | ۹۰۶۴۶۶   | ۶۶۳۸۱۰   | ۱۳۱۵۳۲  | ۶۰۱۳۰   | ۴۱۱۵۰۳۶   |
| CPC         | ۷۸۸۲۷۰  | ۳۰۹۸۶۷۰  | ۷۷۸۸۱۱۳  | ۱۰۲۵۵۰۸۴ | ۹۵۳۰۳۲۰  | ۶۶۹۶۷۸۱  | ۱۸۴۶۵۷۶ | ۳۱۵۶۹۷  | ۴۰۳۱۹۵۱۱  |
| H4T2        | ۱۰۶۱۶۷  | ۲۱۱۶۶۶   | ۴۶۳۷۲۷   | ۶۸۶۶۴۶   | ۶۳۶۴۶۸   | ۴۵۴۰۶۲   | ۱۹۲۶۰۶  | ۶۵۶۸۳   | ۲۸۱۷۰۲۵   |
| H4T1        | ۱۸۴۱۱۰  | ۴۰۵۰۰۹   | ۸۹۹۹۰۶   | ۱۱۹۱۶۷۶  | ۱۱۲۲۷۷۱  | ۸۲۸۹۱۹   | ۳۳۰۵۱۸  | ۹۰۱۰۲   | ۵۰۵۳۰۱۱   |
| H19L        | ۴۲۹۲۶۳  | ۱۳۸۴۶۷۹  | ۲۸۰۶۳۴۶  | ۳۰۳۵۹۶۳  | ۲۷۹۸۴۸۱  | ۲۱۲۸۴۹۶  | ۷۶۰۱۶۹  | ۳۱۰۹۷۳  | ۱۳۶۵۴۳۷۰  |
| H22L        | ۵۸۴۱۴۱  | ۱۷۱۶۱۸۴  | ۳۴۷۶۲۷۶  | ۳۸۲۱۳۸   | ۳۵۵۰۱۶۳  | ۲۶۵۰۴۰۹  | ۹۱۱۸۳۲  | ۴۳۰۱۶۳  | ۱۷۲۷۱۳۰۶  |
| H23L        | ۲۴۴۷۸۲  | ۹۲۷۴۵۶   | ۱۶۵۹۵۶۳  | ۱۶۰۸۷۳۴  | ۱۴۲۲۵۴۷  | ۱۰۵۸۰۷۱  | ۴۲۸۷۶۰  | ۲۸۹۰۸۵  | ۷۶۳۸۹۹۸   |
| H24T        | ۱۰۶۶۸۰  | ۲۸۷۳۱۸   | ۶۹۷۱۸۷   | ۸۸۰۳۱۸   | ۸۲۳۲۶۰   | ۶۰۴۹۸۸   | ۲۱۸۴۵۳  | ۴۶۷۶۱   | ۳۶۶۴۹۶۵   |
| H25L        | ۳۲۰۰۴۴  | ۱۰۴۳۷۴۸  | ۱۹۴۱۷۸۱  | ۲۰۲۳۷۰۹  | ۱۸۲۶۷۲۳  | ۱۳۵۹۲۹۵  | ۵۴۸۴۹۹  | ۳۰۴۸۳۷  | ۹۳۶۸۶۳۶   |
| PS          | ۴۶۴۹۶۳  | ۱۴۹۵۹۹۵  | ۳۴۱۳۱۹۸  | ۴۰۹۱۸۷۱  | ۳۸۳۰۰۹۶  | ۲۹۰۳۵۵۷  | ۱۰۶۹۰۹۶ | ۲۷۲۵۷۷  | ۱۷۵۴۱۳۵۳  |
| LSC         | ۵۱۸۵۴۴  | ۱۳۲۷۹۷۱  | ۲۶۲۶۰۹۷  | ۳۱۷۴۵۸۵  | ۲۹۶۰۷۲۷  | ۲۲۶۹۷۷۶  | ۹۱۲۰۷۷  | ۳۲۵۸۵۱  | ۱۴۱۱۵۶۲۸  |
| LPC         | ۶۱۹۲۷۹  | ۲۱۳۵۸۵۱  | ۴۹۰۷۹۲۹  | ۵۷۱۷۳۴۹  | ۵۳۴۳۲۵۵  | ۴۰۲۵۵۹۶  | ۱۴۵۱۹۹۱ | ۳۹۳۱۷۸  | ۲۴۵۹۴۴۲۸  |
| جمع         | ۴۵۹۶۴۰۵ | ۱۴۶۴۶۲۹۵ | ۳۱۸۹۰۳۴۷ | ۳۸۰۴۶۰۹۴ | ۳۵۲۲۸۷۵۴ | ۲۶۰۱۴۹۳۱ | ۸۹۷۱۲۵۰ | ۲۹۳۱۶۱۴ | ۱۶۸۳۲۵۶۹۰ |

### مدیریت آب و آبیاری



ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه رود

**محاسبه شاخص های ارزیابی عملکرد**

شاخص های ارزیابی عملکرد تنها برای ماه های تحویل آب به شبکه (پنج ماه فروردین تا آبان)، با مقایسه مقادیر جدول ۳ و ۴، و با استفاده از روابط (۱) تا (۴) ارزیابی شد. شاخص های راندمان (PF)، کفایت (PA) و پایداری (PD) برای هر یک از انشعابات شبکه، در دوره زمانی پنج ماهه تحویل آب، به صورت جدول ۵ محاسبه شد. شاخص عدالت (PE) در ماه های مختلف تحویل آب، برای کل شبکه ارزیابی می شود (جدول ۶). مقادیر استاندارد این شاخص ها را در سه کلاس کیفی خوب، متوسط و ضعیف مولدن و گیتس مطابق جدول ۷ پیشنهاد کردند.

با در نظر گرفتن ۱۶۸/۳ میلیون مترمکعب نیاز خالص، اختلاف آب تحویلی به ۷۶/۱ میلیون مترمکعب می رسد. در هیچ یک از انشعابات برای نیازهای فروردین، مهر و آبان رهاسازی صورت نگرفته است. انشعابات CPC و LSC به ترتیب ۳۹/۸ و ۱۴/۹ درصد و در مجموع بیش از نصف آب تحویلی سال را دریافت کرده اند، در حالی که به ترتیب ۲۴/۸ و ۸/۷ درصد و در مجموع حدود یک سوم نیاز خالص آب را لازم داشته اند. لذا، الگوی زمانی و حجمی تحویل با نیاز آبی تطابق خوبی ندارد و صحت آن با محاسبه شاخص های ارزیابی عملکرد، تنها برای ماه های تحویلی آب، در بخش زیر روشن تر می شود.

جدول ۵. مقادیر شاخص های ارزیابی عملکرد (راندمان، کفایت و پایداری) در شبکه زرینه رود

| انشعاب شبکه | شاخص راندمان (PF) | شاخص کفایت (PA) | شاخص پایداری (PD) |
|-------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| H1Q2        | ۰/۶۴              | ۱/۰۰            | ۰/۲۴              |
| H1Q3        | ۰/۸۷              | ۰/۹۳            | ۰/۳۲              |
| H3T         | ۰/۳۱              | ۱/۰۰            | ۰/۳۳              |
| CPC         | ۰/۸۸              | ۰/۸۷            | ۰/۵۳              |
| H4T2        | ۰/۳۸              | ۱/۰۰            | ۰/۵۰              |
| H4T1        | ۰/۶۵              | ۰/۹۶            | ۰/۴۷              |
| H19L        | ۰/۳۲              | ۱/۰۰            | ۰/۳۱              |
| H22L        | ۰/۵۸              | ۱/۰۰            | ۰/۳۲              |
| H23L        | ۰/۶۴              | ۱/۰۰            | ۸۰/۱              |
| H24T        | ۰/۴۲              | ۱/۰۰            | ۰/۵۰              |
| H25L        | ۰/۳۵              | ۱/۰۰            | ۰/۲۴              |
| PS          | ۰/۴۳              | ۱/۰۰            | ۰/۴۴              |
| LSC         | ۰/۹۹              | ۰/۸۸            | ۰/۳۸              |
| LPC         | ۰/۴۷              | ۱/۰۰            | ۰/۴۶              |
| متوسط       | ۰/۵۶              | ۰/۹۷            | ۰/۳۸              |

جدول ۶. ارزیابی شاخص عدالت توزیع آب (P<sub>E</sub>) در شبکه زیربنای رود

| ماه تحویل آب | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات | متوسط شبکه |
|--------------|---------|--------------|--------------|------------|
| اردیبهشت     | ۱/۰۲    | ۰/۵۶         | ۰/۵۵         | ۰/۵۰       |
| خرداد        | ۰/۵۹    | ۰/۲۸         | ۰/۴۸         |            |
| تیر          | ۰/۴۶    | ۰/۲۳         | ۰/۴۹         |            |
| مرداد        | ۰/۵۰    | ۰/۲۵         | ۰/۴۹         |            |
| شهریور       | ۰/۵۱    | ۰/۲۵         | ۰/۵۰         |            |

جدول ۷. مقادیر استاندارد شاخص‌های ارزیابی (۱۳)

| شاخص عملکرد               | کلاس‌های عملکرد |           |       |
|---------------------------|-----------------|-----------|-------|
|                           | خوب             | متوسط     | ضعیف  |
| کفایت (P <sub>A</sub> )   | ۰/۹-۱           | ۰/۸۰-۰/۸۹ | <۰/۸۰ |
| راندمان (P <sub>F</sub> ) | ۰/۸۵-۱          | ۰/۷۰-۰/۸۴ | <۰/۷۰ |
| عدالت (P <sub>E</sub> )   | ۰-۰/۱           | ۰/۱۱-۰/۲۵ | <۰/۲۵ |
| پایداری (P <sub>D</sub> ) | ۰-۰/۱           | ۰/۱۱-۰/۲۰ | <۰/۲۰ |

متوسط ۳۸ درصد، بیانگر اطمینان‌پذیری ضعیف به تأمین آب کانال‌ها در طول ماه‌های مختلف است. از پیامدهای آن، عدم مشارکت جوامع ذی‌نفع محلی در نگهداری شبکه، لایروبی کانال‌ها، و روی آوردن به منابع جایگزین مثل حفر چاه‌ها یا پمپاژ از رودخانه خواهد بود.

در خصوص شاخص عدالت<sup>۱</sup> باید توجه داشت که منظور تساوی<sup>۲</sup> در دریافت آب یا عدالت اجتماعی<sup>۳</sup> (برخورداري به اندازه استحقاق) نیست، بلکه حقابه‌ای است که بر مبنای قوانین محلی به‌ازای واحد سطح اراضی تحت مالکیت یا زیرکشت آبی اختصاص داده شده است (۱۳). تحقق عدالت به‌معنای توزیع منصفانه<sup>۴</sup> و رعایت

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که شاخص راندمان در انشعاب H3T با ۳۱ درصد کمترین مقدار و در انشعاب LSC با ۹۹ درصد بیشترین مقدار را دارد. میزان متوسط کل این شاخص ۵۶ درصد است که به‌غیر از انشعابات LSC و H1Q3، بقیه در کلاس ضعیف قرار می‌گیرد. از علل پایین‌بودن این شاخص، خاکی‌بودن مسیر بعضی کانال‌های فرعی، شکستگی یا آب‌بند نبودن بعضی دریچه‌ها، کنترل غیراصولی سطح آب و دستکاری تنظیم دریچه‌ها با آب‌بران محلی است. بررسی‌های میدانی نشانگر آن است. شاخص کفایت آبیاری با حداقل مقدار ۸۷ درصد در CPC، و حداکثر ۱۰۰ درصد در غالب انشعابات، و متوسط ۹۷ درصد، در کلاس خوب قرار دارد، ولی از ثبات و پایداری خوبی برخوردار نیست، به‌طوری که شاخص پایداری به‌جز در انشعاب H23L با مقدار ۱۸ درصد (کلاس متوسط)، در سایر انشعابات با ضریب تغییرات بیش از ۲۰ درصد، و

1. equity
2. equality
3. justic
4. fairness

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه رود

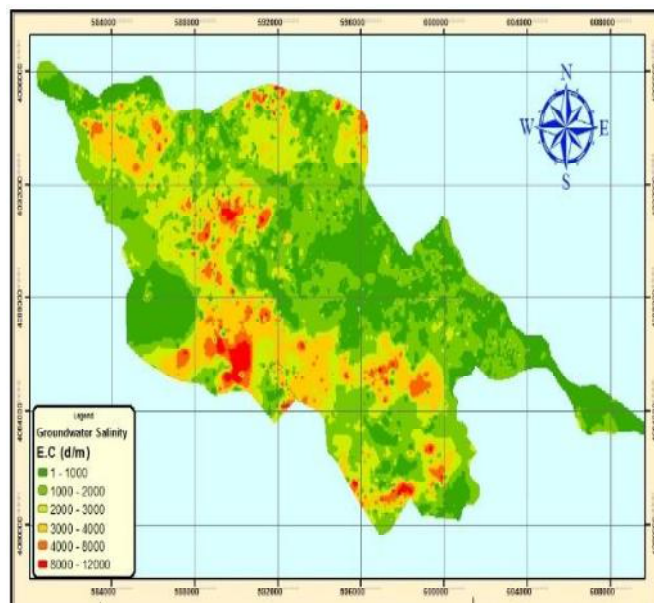
$$EC_{std} = [1 - 0.02 \times (T - 25)] \times EC_t \quad (11)$$

به روش مشابه، نقشه تغییرات عمق آب منطقه، مطابق شکل ۴، از روی اطلاعات سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که شوری آب در محدوده اراضی بین دو رودخانه زرینه و سیمینه، به دلیل بالابودن سطح آب کمتر است، در حالی که به دلیل توزیع نامناسب آب، در پایاب شبکه و جنوب غربی محدوده، با رسیدن عمق آب به بیش از ۱۵ متر، میزان شوری نیز از  $4000 \text{ ds/m}$  تجاوز کرد و بر اساس طبقه‌بندی آب آبیاری ویلکاکس در کلاس شور قرار گرفت. شوری بخش‌هایی از اراضی واقع در بالادست شبکه، علی‌رغم بالابودن سطح آب زیرزمینی، به‌خوبی مشهود است. با توجه به پیمایش‌های صحرائی و بازدیدهای مکرر از وضعیت شبکه، همچنین صحبت با افراد محلی، فاضلاب یا آب‌های برگشتی در محدوده مطالعاتی وجود نداشت. عامل اصلی شوری اراضی، مشکل ماندابی شدن و زهکشی ضعیف اراضی بوده است.

تناسب آب تحویلی به آب مورد نیاز در همه انشعابات است. متوسط زمانی نوسان تناسب تحویل به‌صورت ضریب تغییرات مکانی تحویل در محل انشعابات، مصداق عدم عدالت توزیع قلمداد می‌شود. این شاخص با مقدار متوسط ۵۰ درصد نشان‌دهنده عدالت توزیع ضعیف است که سبب عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب در شبکه کانال‌های محدوده مطالعاتی شبکه زرینه رود شده است.

### تأثیر الگوی توزیع آب سطحی بر آب زیرزمینی

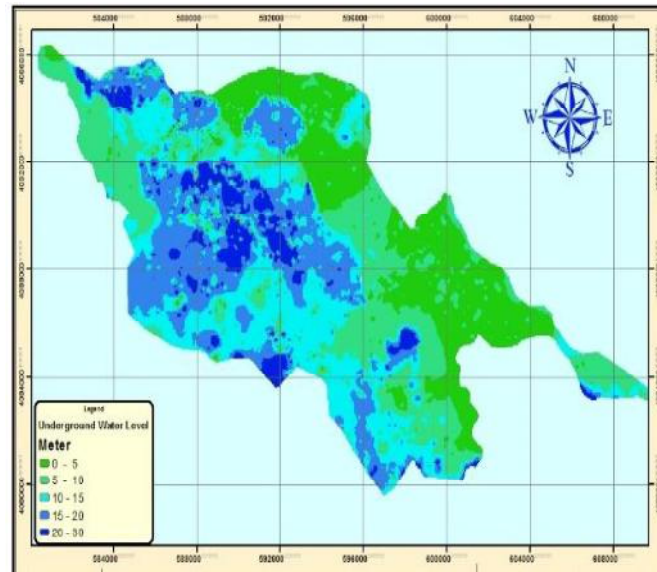
از آثار و پیامدهای الگوی توزیع نامناسب آب سطحی شبکه بر آب زیرزمینی محدوده شبکه آبیاری، دو مؤلفه شوری و عمق آب زیرزمینی بررسی شد. بدین منظور چاه‌های مجاز و غیرمجاز فعال محدوده مورد مطالعه در Arc GIS جدا شد. هدایت الکتریکی (EC) استاندارد چاه‌ها به‌عنوان شاخص شوری آب زیرزمینی از روی اطلاعات دما و EC اندازه‌گیری صحرائی طبق رابطه (۱۱) و اسنجی شد. نقشه توزیع آن مطابق شکل ۳ به روش درون‌یابی IDW تهیه و ارائه شده است.



شکل ۳. نقشه تغییرات شوری آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

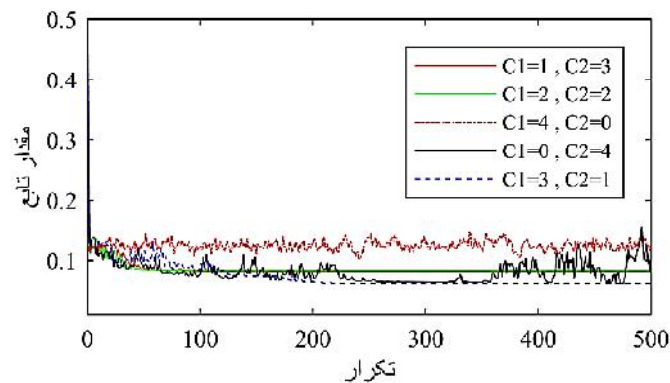


شکل ۴. نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

### الگوی بهینه تحویل و توزیع آب

و ۱۰ درصد آب تحویلی را پیشنهاد می‌کند. در بعد مکانی نیز آب تخصیصی انشعاب LSC، از ۱۳/۸ میلیون مترمکعب سال ۱۳۹۴ که در اردیبهشت ماه دو برابر و در مجموع ۱۱ درصد بیش از نیاز خالص بود و به ۸/۱ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. سهم انشعاب LPC با ۲۳ درصد افزایش به ۱۴/۴ میلیون مترمکعب می‌رسد. حجم تخصیص دو انشعاب CPC و HIQ3 به حدود دوسوم تقلیل یافت و در انشعاب‌های H3T و H4T2، H19L، H25L مقدار آب تحویلی حدود دو برابر افزایش می‌یابد.

با تحلیل حساسیت و تعیین مقادیر مناسب پارامترهای مدل مطابق شکل ۵، الگوریتم تهیه‌شده با تعداد پانزده ذره و شرط خطای کمتر از ۵ درصد با ۱۰۰۰ بار تکرار محاسباتی اجرا شد. مدل، الگوی بهینه تحویل آب را با ۳/۹ درصد بیش‌برآورد با مجموع ۹۵/۸ میلیون مترمکعب مطابق جدول ۸ ارائه می‌دهد. مقایسه با الگوی سال ۱۳۹۴ نشان می‌دهد که آب تحویلی اردیبهشت از ۱۷/۴ میلیون مترمکعب (۱۸ درصد مازاد نیاز) به ۹/۷ میلیون مترمکعب (۶۶ درصد نیاز) تقلیل می‌یابد. در خرداد تفاوت چشمگیری وجود ندارد، اما در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور، به ترتیب افزایش ۱۴، ۹



شکل ۵. تأثیر مقادیر مختلف ضرایب شتاب در همگرایی الگوریتم PSO

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

ارزیابی عملکرد و ارائه الگوی بهینه تحویل آب در شبکه آبیاری زرینه رود

جدول ۸. الگوی بهینه تحویل آب با الگوریتم PSO (مترمکعب)

| انشعاب / ماه | اردیبهشت | خرداد    | تیر      | مرداد    | شهریور   | جمع      |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| H1Q2         | ۵۷۰۵۴    | ۱۲۳۵۴۱   | ۱۶۸۷۳۰   | ۱۵۸۸۴۳   | ۱۲۵۳۱۶   | ۶۳۳۴۸۴   |
| H1Q3         | ۷۵۲۸۱    | ۱۴۳۷۵۴   | ۱۶۴۸۲۵   | ۱۵۴۶۱۹   | ۱۱۷۱۸۶   | ۶۵۵۶۶۵   |
| H3T          | ۲۸۰۲۲۸   | ۵۴۳۶۳۲   | ۶۴۶۵۱۸   | ۵۸۹۸۳۷   | ۴۳۴۰۱۹   | ۲۴۹۴۲۳۴  |
| CPC          | ۲۰۴۳۴۸۲  | ۵۰۹۶۹۸۷  | ۶۷۸۰۲۶۸  | ۶۲۲۵۳۳۴  | ۴۳۶۶۵۰۱  | ۲۴۵۱۲۵۷۲ |
| H4T2         | ۱۴۳۴۶۵   | ۳۱۴۱۲۵   | ۴۴۴۴۵۷   | ۴۱۶۴۳۷   | ۲۹۷۴۱۶   | ۱۶۱۵۹۰۰  |
| H4T1         | ۲۶۶۶۸۲   | ۵۹۵۶۶۷   | ۷۷۵۶۶۲   | ۷۲۸۱۷۹   | ۵۴۰۸۹۳   | ۲۹۰۷۰۸۳  |
| H19L         | ۹۲۳۵۷۷   | ۱۸۶۵۰۱۱  | ۲۰۱۰۷۸۴  | ۱۸۲۴۴۴۳  | ۱۳۹۹۵۱۸  | ۸۰۲۳۳۳۳  |
| H22L         | ۱۱۳۹۲۸۹  | ۲۲۹۹۷۵۷  | ۲۵۴۱۹۷۲  | ۲۳۱۴۲۰۰  | ۱۷۴۷۰۶۲  | ۱۰۰۴۲۲۸۰ |
| H23L         | ۶۲۴۵۰۱   | ۱۱۱۵۳۶۱  | ۱۰۵۵۱۱۷  | ۹۳۶۰۷۵   | ۶۹۲۶۶۵   | ۴۴۲۳۷۱۹  |
| H24T         | ۱۹۰۴۵۰   | ۴۵۷۱۹۳   | ۵۷۳۶۲۴   | ۵۳۹۹۸۵   | ۳۹۶۵۲۶   | ۲۱۵۷۷۷۸  |
| H25L         | ۶۹۰۴۴۹   | ۱۲۸۰۵۷۳  | ۱۳۴۴۴۱۰  | ۱۲۰۲۶۲۴  | ۸۷۶۴۱۸   | ۵۳۹۲۴۷۴  |
| PS           | ۹۹۳۸۹۲   | ۲۲۸۱۴۹۸  | ۲۷۰۷۸۰۱  | ۲۵۳۵۱۶۰  | ۱۸۹۴۵۹۷  | ۱۰۴۱۲۹۴۷ |
| LSC          | ۸۸۰۲۴۶   | ۱۷۴۵۳۷۲  | ۲۰۸۷۶۶۵  | ۱۹۱۳۷۸۴  | ۱۴۷۲۵۰۶  | ۸۰۹۹۶۷۳  |
| LPC          | ۱۴۰۰۲۲۹  | ۳۲۲۲۸۹۶  | ۳۷۲۴۸۸۳  | ۳۴۶۷۴۱۷  | ۲۶۲۹۲۳۵  | ۱۴۴۴۴۶۶۰ |
| جمع          | ۹۷۰۸۸۲۴  | ۲۱۰۸۵۳۶۷ | ۲۵۰۲۴۸۱۷ | ۲۳۰۰۶۹۳۶ | ۱۶۹۸۹۸۵۹ | ۹۵۸۱۵۸۰۳ |

درصد مطلوب است، اما تلفات آب مازاد سبب پایین بودن راندمان (متوسط ۵۶ درصد) شده است. شاخص عدالت توزیع با متوسط ۵۰ درصد بیانگر زیاد بودن ضریب تغییرات مکانی تحویل آب به آبگیرهاست که با متوسط ضریب تغییرات ۳۸ درصدی شاخص پایداری از ثبات زمانی کافی برخوردار نیست. این امر عدم اطمینان‌پذیری جوامع ذی‌نفع نسبت به تحویل به‌موقع آب کانال‌ها و در نتیجه اتکا به منابع تأمین جایگزین را موجب شده است، به‌طوری که تنها کمتر از ۱۲ درصد چاه‌های محدوده مجاز و ۸۸ درصد چاه‌ها فاقد مجوز است. حجم برداشت سالانه از چاه‌های غیرمجاز حدود ۴/۴ برابر چاه‌های مجاز است. از آثار الگوی نامناسب توزیع آب سطحی در آب زیرزمینی، افزایش شوری به بیش از ۴۰۰۰ ds/m و افزایش عمق ایستابی به بیش از ۱۵ متر در پایاب شبکه و جنوب‌غربی محدوده بوده است. در بخش‌هایی از بالادست شبکه نیز شوری ناشی از شرایط ماندابی و زهکشی ضعیف مشهود است.

محاسبه مجدد شاخص‌های ارزیابی عملکرد در الگوی تحویل پیشنهادی مدل نشان می‌دهد که مقدار شاخص کفایت، به دلیل شرایط کمبود، برابر ۱ (۱۰۰ درصد) است و در کلاس خوب قرار دارد. شاخص راندمان با ۹ درصد افزایش به ۶۵ درصد ارتقا یافت و همچنان در کلاس ضعیف است. شاخص پایداری با ۳۰ درصد کاهش ضریب تغییرات، به مقدار متوسط ۸ درصد رسید و در کلاس خوب قرار دارد که ثبات الگوی توزیع را نشان می‌دهد. شاخص عدالت توزیع نیز به دلیل تأمین حداقل ۶۰ درصد و متوسط ۶۵ درصد نیاز آبی، با مقدار متوسط ۱۲ درصد ضریب تغییرات، حدود ۳۸ درصد بهبود می‌یابد و در کلاس متوسط قرار دارد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ارزیابی الگوی تحویل آب شبکه زرینه رود با شاخص‌های مولدن- گیتس نشان می‌دهد که کفایت آبیاری با متوسط ۹۷

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۶

۳. دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی (۱۳۹۴) مطالعات آماربرداری منابع آب. ۱۸۸ ص.
۴. شاهرخ‌نیا م. و جوان م. (۱۳۸۵) بررسی شاخص‌های عملکرد آبیاری در شبکه آبیاری درودزن (مروذشت استان فارس). تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۷(۲۹): ۳۳-۴۶.
۵. قادری ک. و قادری نسب گروهی ف. (۱۳۹۵) بررسی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی PSO و ICA در ارائه برنامه تحویل و توزیع بهینه آب؛ مطالعه موردی کانال اردیبهشت شبکه آبیاری درودزن استان فارس. پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.
۶. کاظمی اربط، ح. (۱۳۸۴) مورفولوژی و آناتومی غلات. جلد ۲، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز. ۵۸۸ ص.
۷. محسنی‌موحد ا.، محسنی ن. و نوروزپور س. (۱۳۸۹) ارزیابی اثرات وزندهی به شاخص‌ها بر عملکرد کانال‌های آبیاری. آب و خاک. ۶(۲۴): ۱۰۸۳-۱۰۹۶.
۸. وردی‌نژاد و.ر.، سهرابی ت.، حیدری، ن.، عراقی‌نژاد ش. و مأمّن‌پوش ع. (۱۳۸۸) بررسی عرضه و تقاضا برآورد بهره‌وری آب کشاورزی در حوزه آبریز زاینده‌رود، مطالعه موردی: شبکه آبیاری سمت راست آبشار. آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۲): ۸۸-۹۹.
۹. یاسی، م. (۱۳۹۳) راهکار احیای دریاچه ارومیه با مدیریت زیست‌محیطی رودخانه‌های درون حوضه. مجموعه مقالات دومین همایش ملی بحران آب. دانشگاه شهرکرد، ایران. ۱-۸.
- بهینه‌سازی الگوی تحویل با الگوریتم تجمع ذرات (POS) نشان داد که طبق برنامه جدید توزیع آب، شاخص راندمان ۹ درصد افزایش یافت، اما همچنان در کلاس ضعیف است. شاخص‌های پایداری و عدالت توزیع نیز به ترتیب با کاهش ۳۰ و ۳۸ درصدی ضریب تغییرات امکان بهبود دارد. ارتقای مقادیر شاخص‌ها در الگوی پیشنهادی مدل هم تأکیدی است بر ضعف الگوی جاری و در نتیجه ظرفیت بهبود عملکرد شبکه. همچنین، بیانگر توانایی الگوریتم تجمع ذرات در بهینه‌سازی است.
- با توجه به نتایج تحقیق پیشنهاد می‌شود که در راستای بهبود الگوی توزیع برای ایجاد تعادل عرضه و تقاضای آب شبکه، علاوه بر اقدام‌های سازه‌ای (نظیر تجهیز و تعمیر دریچه‌ها)، نظارت و کنترل بیشتری بر تحویل و برداشت آب انجام گیرد. نگاه مدیریتی شبکه باید از دید صرف اقتصادی (با هدف وصول حبابه)، به نگاه مدیریت مشارکتی آب (با همکاری و توانمندسازی جوامع محلی) در جهت برقراری و ثبات الگوی توزیع عادلانه تغییر یابد. پژوهش حاضر، برای الگوی کشت موجود منطقه انجام شد. بررسی امکان جایگزینی گندم، کلزا و محصولات کم‌مصرف با گیاهان پرمصرف مثل چغندر قند، و تغییر روش‌های آبیاری برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

## منابع

۱. جمالی ر. (۱۳۹۵) ارزیابی راندمان آبیاری زهکشی زرينه‌رود و تأثیر بهبود آن بر حجم جریان ورودی به دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه ارومیه، ارومیه، ۱۳۸ ص.
۲. خوشخوی م. (۱۳۸۴) اصول باغبانی. چاپ سیزدهم. مرکز نشر دانشگاه شیراز، شیراز، ۵۹۶ ص.

## مدیریت آب و آبیاری

10. Afrasiabikia P., Parvaresh Rizi A. and Javan M. (2017) Scenarios for improvement of water distribution in Doroodzan irrigation network based on hydraulic simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 135: 312-320.
11. Jiang Y., Huang Q., Huo Z. and Huang G. (2015) Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model. *Agricultural Water Management*. 147: 67-81.
12. Kennedy J. and Eberhart R. (1995) Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia, 1942-1948.
13. Korkmaz N. and Avci M. (2012) Evaluation of water delivery and irrigation performances at field level: the case of the Menemen Left Bank irrigation district in Turkey. *Science and Technology*. 5(2): 2079-89.
14. Moghimi M.M. and Sepaskhah A.R. (2017) Optimization of performance measures in Doroodzan Irrigation Network. *Iran Agriculture Research (IAR)*. 36(1): 49-60.
15. Molden D. and Gates K. (1990) Performance measures for evaluation of irrigation-water delivery system. *Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineering. 116(6): 804-822.
16. Montalvo A., Joaquín Izquierdo A., Silvia Schwarze B. and Pérez-García R. (2010) Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction. *Mathematical and Computer Modelling*. 52: 1219-1227.
17. Murray-Rust D. and Hand Snellen W.B. (1993) *Irrigation system performance assessment and diagnosis*. Colombo, Srilanka, International Irrigation Management Institute.
18. Murray-Rust, D.H., Lashari, B. and Memon, Y. (2000). *Extended project on farmer managed irrigated agriculture under the National Drainage Program (NDP): Water distribution equity in Sindh Province, Pakistan*. International Water Management Institute (IWMI).
19. Rezaei F., Safavi H.R., Mirchi A. and Madani K. (2017) F-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Hydro-environment Research*. 14: 1-8.
20. Roozbahani R., Schreider S. and Abbasi B. (2015) Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social and economic preferences. *Environmental Modelling & Software*. 64: 18-30.

