

برنامه‌ریزی چندهدفه به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی و سیستم تغذیه مصنوعی

نیما صالحی شفا^۱، حسین بابازاده^{۲*}، فیاض آقایی^۳، علی صارمی^۴

۱. دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه زراعت، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۴. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۷/۰۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۰۸/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

چکیده

افزایش جمعیت در مناطق توسعه‌یافته چالش‌های زیادی را در تأمین نیازهای آبی ایجاد کرده است. این امر باعث پدید آمدن مشکلات متعدد در کمیت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود. با توجه به این موضوع، مدیریت بهینه منابع آبی امری ضروری است. در این تحقیق مدل ریاضی (HEC- HMS) برای روندیابی سیلاب در رودخانه کرج و مخازن سیستم تغذیه مصنوعی واقع در شمال دشت شهریار مورد استفاده قرار گرفت. سپس، حجم نفوذ سیلاب در رودخانه کرج و نیز حجم ذخیره سیلاب در مخازن طرح تغذیه مصنوعی وارد الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) شد که از آن به منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب دشت شهریار و بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی و با هدف حداقل کردن عدم تأمین نیاز و نیز حداکثر کردن حجم نفوذ در سیستم تغذیه مصنوعی، استفاده شد. با توجه به نتایج مدل بهینه‌سازی، شاخص قابلیت اطمینان مربوط به کل محدوده به طور میانگین برابر ۵۶/۵۰ درصد بوده و بیشترین کاهش در مصارف از کل منابع آب قابل دسترس در تمام بخش‌ها به ترتیب در ناحیه شهریار برابر ۴۴/۰۹ درصد، در ناحیه رباط‌کریم برابر ۱۴/۵۷ درصد، در ناحیه اسلامشهر برابر ۱۱/۰۶ درصد و در کل محدوده برابر ۲۸/۵۵ درصد است. حجم کل تغذیه بهینه در سیستم تغذیه مصنوعی برابر ۱۱۴/۸۱ میلیون متر مکعب در دوره زمانی مورد نظر بوده و به میزان ۷۰/۰۹ میلیون متر مکعب افزایش یافته و منجر به افزایش تغییرات تراز آبخوان به اندازه ۴/۸۴ متر شده است. همچنین، با اعمال سیاست‌های هم‌زمان بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود و بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، به طور میانگین ۱۰/۴۱ متر در سال تغییرات تراز آبخوان افزایش خواهد یافت.

کلیدواژگان: روندیابی سیلاب، سیستم تغذیه مصنوعی، تغییرات تراز آبخوان، بهره‌برداری بهینه.

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و توسعه صنعت و فعالیت‌های کشاورزی منجر به افزایش نیازهای آبی در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی شده است. این موضوع موجبات ایجاد چالش‌های جدید در برنامه‌ریزی سیستم‌های منابع آب و بهره‌برداری از آن‌ها را فراهم کرده و از این‌رو، توسعه و اجرای طرح‌های آبی به همراه مدیریت کارآمد یک امر ضروری است. برای دسترسی به این هدف، مطالعات دقیق و توجه به مسائل و پیچیدگی‌های موجود و آنالیز دقیق و ارائه راهکارهای متناسب با شرایط طرح‌ها لازم و ضروری است. بهره‌برداری تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی و پساب و سازه‌های آبی مانند سیستم تغذیه مصنوعی و غیره، یک راهکار مؤثر به منظور مدیریت مناسب و کارآمد و بهره‌برداری بهینه از منابع و طرح‌های آبی است. پراتتا و همکاران (۲۰۱۴) برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با هدف حداکثر کردن تولید برق آبی و تأمین آب و حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی انتقال آب در یک سیستم هیدرولیکی غیرخطی شامل آبخوان، رودخانه و مخزن از الگوریتم (NSGA-II) استفاده کردند. نتایج این مطالعه بیانگر توانایی الگوریتم (NSGA-II) در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی است [۱]. داس و همکاران (۲۰۱۵) سیاست‌های تخصیص بهینه منابع آب و زمین را برای کشاورزی آبی پایدار در پروژه‌ای در کنار رودخانه ماهاندی واقع در کشور هندوستان را با یک مدل برنامه‌ریزی خطی توسعه دادند. نتایج نشان داد بهره‌برداری تلفیقی (۸۷ درصد از آب سطحی و ۱۳ درصد آب زیرزمینی)، سیاست تخصیص پایدار در منطقه است [۲]. ذکری و همکاران (۲۰۱۵) یک الگوی برنامه‌ریزی در چارچوب برآورد برداشت بهینه آب‌های زیرزمینی برای تأمین نیاز شهری در شرایط عدم قطعیت و در شرایط پیچیده نوسانات سطح آب و نفوذ آب دریا، برای آبخوان ساحلی در منطقه شهری مسقط در عمان را پیشنهاد کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد حجم برداشت سالیانه از آب‌های زیرزمینی ممکن است به ۱۲/۷ تا ۱۸/۸ میلیون متر مکعب (در مقایسه با شرایط حال حاضر که ۶/۸ میلیون متر مکعب است) افزایش یابد [۳]. دالسن و همکاران (۲۰۲۰) یک رویکرد مدل‌سازی ارائه دادند که شیوه استفاده از ابزارهای مدیریت آب یکپارچه با یکدیگر را برای ارائه یک استراتژی تخصیص آب هماهنگ با

پیش‌بینی‌های توسعه اقتصادی و تغییر ترجیحات استفاده از آب مشخص می‌کردند. نتایج نشان داد برنامه‌های حفاظت از آب در کجا و چه زمانی باید همراه با اهداف کمی (چقدر) اعمال شود [۴]. داناپور و همکاران (۲۰۲۱) یک چارچوب بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی در مقیاس حوضه جامع توسعه دادند که امکان بهینه‌سازی فضایی برداشت آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از سناریوهای مختلف بهینه‌سازی نشان می‌دهد استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی همراه با مدل‌های یکپارچه، اطلاعات ارزشمندی را برای راهنمایی متخصصان آب در طراحی یک طرح مؤثر برداشت آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن معیارهای جریان محیطی مهم برای وضعیت اکولوژیکی کل سیستم ارائه می‌دهد [۵]. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی راه‌کاری نوین، کم‌هزینه، سریع و مؤثر به منظور ارتقای مدیریت منابع آبی به شمار می‌آید. بر این اساس، در مناطق بسیاری مانند حوضه رودخانه ماد، ایالت کالیفرنیا در ایالات متحده [۶]، دلتای ساحلی شرقی هندوستان [۷]، منطقه‌ای در ایالت کارناتااکا هندوستان [۸]، آبخوان دره‌های آبرفتی شمال شرقی ایالات متحده [۹]، منطقه هاندان چین [۱۰]، بخش جنوبی شهر تهران در ایران [۱۱]، دشت نجف‌آباد اصفهان در ایران [۱۲]، منطقه‌ای در جنوب شرقی اسپانیا [۱۳]، شبه‌جزیره ایبری در جنوب غربی اروپا [۱۴]، بخش شرقی استان تهران در ایران [۱۵]، حوضه آبریز دریاچه دیانچی چین [۱۶] منطقه گوانگ ژو چین [۱۷]، سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آبی تدوین شده است. طرح‌های تغذیه مصنوعی به عنوان یک روش مدیریت تغذیه آبخوان می‌توانند بخشی از آب‌های خارج‌شده از زیر زمین را جبران کنند و برای مهار و استفاده بهینه از سیلاب بسیار مؤثرند. با توجه به این موضوع، فتخوت دینف و استفتان (۲۰۱۹) در تحقیق خود از مدل‌های جریان آب‌های زیرزمینی (MODFLOW-2005) و انتقال املاح (MT3D-USGS) و الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی چندمنظوره جهانی/محلی با هدف به حداکثر رساندن کارایی طرح تغذیه آبخوان مدیریت شده (MAR)، استفاده کردند. تجزیه و تحلیل راه‌حل‌های بهینه پارتو منجر به کشف الگوها و وابستگی‌های ارزشمندی بین چیدمان فضایی چاه‌های تزریق و برداشت آب و نرخ‌های مختلف زمان پمپاژ و تزریق، ویژگی‌های مدل و اهداف مشکل شد

رابط کریم تغییر نکرده است. طرح تغذیه مصنوعی در شمال محدوده مطالعه شده و در مخروطه‌افکنه قرار گرفته که شامل پنج حوضچه تغذیه بوده که به صورت متوالی و در راستای محور طولی رودخانه قرار گرفته‌اند. ظرفیت آن‌ها حدود ۳/۲ میلیون متر مکعب است و خاکریز اول تا چهارم هر یک دارای یک سرریز هستند، ولی خاکریز پنجم دو سرریز دارد، زیرا آب مازاد در حوضچه آخر از این دو سرریز و سازه مقسم روی خاکریز پنجم، بین رودخانه‌های کرج و شاد چای تقسیم می‌شود. در گذشته، رودخانه کرج در این محدوده به دو شاخه رودخانه کرج و شادچای تقسیم می‌شد. در حال حاضر، رودخانه کرج پس از وارد شدن به سد انحرافی بیلقان از بالادست به مصارف شرب شهرستان تهران و مصارف کشاورزی کرج و شهریار اختصاص می‌یابد. همچنین، مقادیر سیلاب از سد انحرافی بیلقان به سمت پایین دست حرکت می‌کند و وارد مخروطه‌افکنه و طرح تغذیه مصنوعی می‌شود. نوع سرریزها، اوجی بوده و از جنس بتن و قلوه‌سنگ با روکش بتن مسلح هستند. در پایین دست طرح تغذیه، شن‌چاله‌های وسیع قرار دارند که در بخش انتهایی مخروطه‌افکنه قرار گرفته‌اند. در تحقیق حاضر منابع آب قابل دسترس در محدوده مطالعاتی شامل آبخوان دشت شهریار، جریان‌های سطحی شامل رودخانه‌های کرج، رودخانه‌های کن و چیتگر و نیز تصفیه‌خانه‌های شهریار، شهرقدس، کهریزک، فرودگاه بین‌المللی امام است. رودخانه کرج پس از عبور از بند انحرافی بیلقان، نیاز بخش شرب شهر تهران و نیاز بخش‌های شرب و کشاورزی شهر کرج را تأمین می‌کند و سپس، وارد محدوده مطالعاتی شهریار می‌شود. کانال سیل‌برگردان غرب با عبور از شهر تهران بخشی از فاضلاب‌های این شهر را جمع‌آوری می‌کند و جریان کانال تپه نیزار و رودخانه‌های درکه، فرحزاد، حصارک به آن وارد می‌شود و سپس، این کانال به رودخانه کن متصل شده و جریان آن به رودخانه مورد نظر تخلیه می‌شود. سپس، در مسیر رودخانه کن به سمت پایین دست، موتورپمپ‌های احداث شده در بخش شمالی آن اقدام به برداشت می‌کنند. در نهایت، پس از انحراف جریان پایه از طریق بند انحرافی نواب صفوی و ورود جریان به کانال نواب در ایستگاه (کاشانک)، به مسیر خود به سمت جنوب ادامه می‌دهد و از ایستگاه جهان‌آباد در منطقه کهریزک، عبور می‌کند. رودخانه چیتگر نیز که جزء سرشاخه‌های رودخانه کن به شمار می‌رود، در اراضی حاشیه شمال شرقی محدوده

[۱۸]. به دلیل تأثیرات مثبت روش‌های تغذیه مصنوعی بر آبخوان از آن‌ها در مناطق بسیاری استفاده شده است. که با توجه به این موضوع در آبخوان ساحلی در حوضه زهکشی گاوبندی در جنوب ایران [۱۹]، منطقه‌ای در سریلانکا [۲۰]، حوضه گربایگان در ایران [۲۱]، حوضه بیست دو آب پنجاب هندوستان [۲۲]، حوضه مک ناسی، واقع در مرکز تونس [۲۳]، منطقه‌ای در بنگال غربی هندوستان [۲۴]، آبخوان کرمان در ایران [۲۵]، منطقه سن لوئیس ریو کلرادو در مکزیک [۲۶]، منطقه صنعتی پاتراس در یونان [۲۷] حوضه آبریز لونی در اوتار پرادش هندوستان [۲۸] به بررسی تغذیه مصنوعی برای بهبود وضعیت آبخوان پرداخته شده است. هدف این تحقیق، بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی و پساب و سازه‌های آبی با استفاده از مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز به منظور تأمین نیاز بخش‌های مختلف و نیز افزایش پایداری سیستم منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی است. که با توجه به این موضوع، نوآوری در تحقیق حاضر ارائه سیاست‌های هم‌زمان بهره‌برداری بهینه از منابع آبی و سازه‌های آبی موجود در محدوده مطالعاتی در راستای اهداف تعریف شده و با رویکردی قابلیت تعمیم به مناطق مشابه است.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مطالعه شده

محدوده دشت شهریار در حاشیه غربی شهر تهران و در موقعیت جغرافیایی $50^{\circ} 22' 14''$ تا $51^{\circ} 22' 02''$ طول شرقی و $35^{\circ} 44' 32''$ تا $35^{\circ} 02' 25''$ عرض شمالی واقع شده است، که از شمال غربی به شهر کرج، از غرب به ارتفاعات سیاه‌کوه، از شرق و شمال شرقی به شهر تهران و رودخانه کن و از جنوب به رباط کریم محدود می‌شود. این محدوده به مساحت تقریبی $897/214$ کیلومتر مربع است. این محدوده مطالعاتی از نظر تقسیمات سیاسی جزء استان تهران بوده و شهرهای شهریار، رباط کریم، اسلامشهر و نیز بخش‌هایی از شهرستان‌های تهران، کرج و همچنین، حاشیه شمالی شهرستان ری را در خود جای می‌دهد. محدوده مطالعه شده برای انجام محاسبات و تحلیل‌های مربوطه به سه ناحیه (شهریار، اسلامشهر، رباط کریم) تقسیم شدند. بنابراین، در محدوده مطالعاتی، مناطق تهران و کرج بخشی از ناحیه شهریار شده و منطقه ری به ناحیه اسلامشهر پیوسته و ناحیه

انجام آبیاری در شبکه توزیع، تعداد ۱۳ ایستگاه پمپاژ با ظرفیت ۷۰-۷۲۰ لیتر در ثانیه اجرا شده که آب را به شبکه پمپاژ می‌کنند. اطلاعات این بخش از تحقیق از شرکت مهندسی مشاور لار دریافت شده است. تصفیه‌خانه فاضلاب شهرداری با دبی متوسط ۴۰ هزار متر مکعب در روز و با روش (SBR) و تصفیه‌خانه فاضلاب شهر قدس با دبی ۲۸۶۵۰ متر مکعب در روز و با روش (Bio luck) و تصفیه‌خانه فاضلاب کهریزک با دبی ۲۲۰۰ متر مکعب در روز و با روش لجن فعال با هوادهی گسترده و تصفیه‌خانه فاضلاب فرودگاه بین‌المللی امام^(۵) با دبی ۶۵۰ متر مکعب در روز و با روش لجن فعال با هوادهی ممتد، فاضلاب ورودی را تصفیه می‌کنند. کیفیت خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد نظر مطابق استاندارد حفاظت محیط زیست ایران است و به منظور استفاده در بخش کشاورزی و همچنین، فضای سبز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. آمار و اطلاعات مربوط به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از شرکت مهندسی موجان و شرکت آب و فاضلاب شهرها و شهرک‌های غرب تهران دریافت شده است. اطلاعات مربوط به حجم آب رودخانه کرج و موقعیت حجم جریان در رودخانه کن در دوره زمانی مطالعاتی در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند. اندازه‌گیری حجم جریان رودخانه کرج و کن به ترتیب در ایستگاه‌های هیدرومتری سد انحرافی بیلقان و سولقان و برداشت کانال نواب در ایستگاه کاشانک صورت گرفته است. حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری برآورد شده است. حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی در دوره زمانی مورد نظر در جدول ۳ نمایش داده شده است. مقیاس زمانی تمام داده‌های تحلیل شده به صورت ماهانه بوده و مربوط به سه سال آبی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ است. اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شده است. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی و سیستم تغذیه مصنوعی را نشان می‌دهد.

مطالعات شهرداری جریان دارد. رودخانه چیتگر در غرب رودخانه کن و تقریباً به موازات آن به سمت جنوب جریان دارد و حجم جریان آن طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ به طور میانگین ۸/۲۶ میلیون متر مکعب در سال است. شبکه آبیاری کرج با حدود ۹۴ کیلومتر کانال درجه ۱ و ۲، حدود ۱۵ هزار هکتار از اراضی محدوده مورد مطالعه را تحت پوشش قرار داده است. کانال‌های MC2 و FC5 به عنوان بخشی از شبکه آبیاری کرج در محدوده مطالعه شده قرار گرفته‌اند و به طور میانگین در بازه زمانی مطالعاتی به میزان ۸/۰۴ و ۲/۸۴ میلیون متر مکعب در سال نیاز بخش کشاورزی را تأمین می‌کنند. منبع تأمین آب شبکه آبیاری، رودخانه کرج و سد تنظیمی بیلقان است. حجم بهره‌برداری از منابع آب سطحی با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری برآورد شده‌اند. این آمار و اطلاعات از شرکت مهندسی مشاور سازه‌پردازی ایران و مدیریت منابع آب ایران دریافت شده است. طرح تأمین، انتقال و شبکه رباط کریم برای تولید حدود ۶ متر مکعب در ثانیه آب (حدود ۱۰۰ میلیون متر مکعب آب در سال) که از ذخایر سفره آب زیرزمینی دشت تهران تغذیه می‌شود و انتقال و توزیع آن در مساحتی حدود ۷۸۲۱ هکتار از اراضی دشت رباط کریم (در جنوب غربی تهران) در جهت بهبود و توسعه کشاورزی منطقه، اجرا شده است. آب مورد نیاز اراضی کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تهران پس از جمع‌آوری توسط تونل انتقال به طول حدود ۱۲ کیلومتر به خارج از تهران انتقال می‌یابد. کانال اصلی انتقال به طول حدود ۲۷ کیلومتر با مقطع دوزنقه‌ای و پوشش بتنی است و ظرفیت آن ابتدا ۶ هزار لیتر در ثانیه و در انتها ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه است. شبکه فرعی توزیع آب منشعب از کانال اصلی شامل کانال‌های درجه ۲ و ۳ است که در نهایت، آب را روی قطعات زراعی تحویل می‌دهند. شبکه کانال‌های درجه ۲ و ۳ به صورت لوله طراحی شده‌اند و به لحاظ هیدرولیکی، شبکه توزیع، تحت فشار است. برای تأمین حداقل فشار لازم برای

جدول ۱. حجم جریان رودخانه کرج در سد انحرافی بیلقان (میلیون متر مکعب)

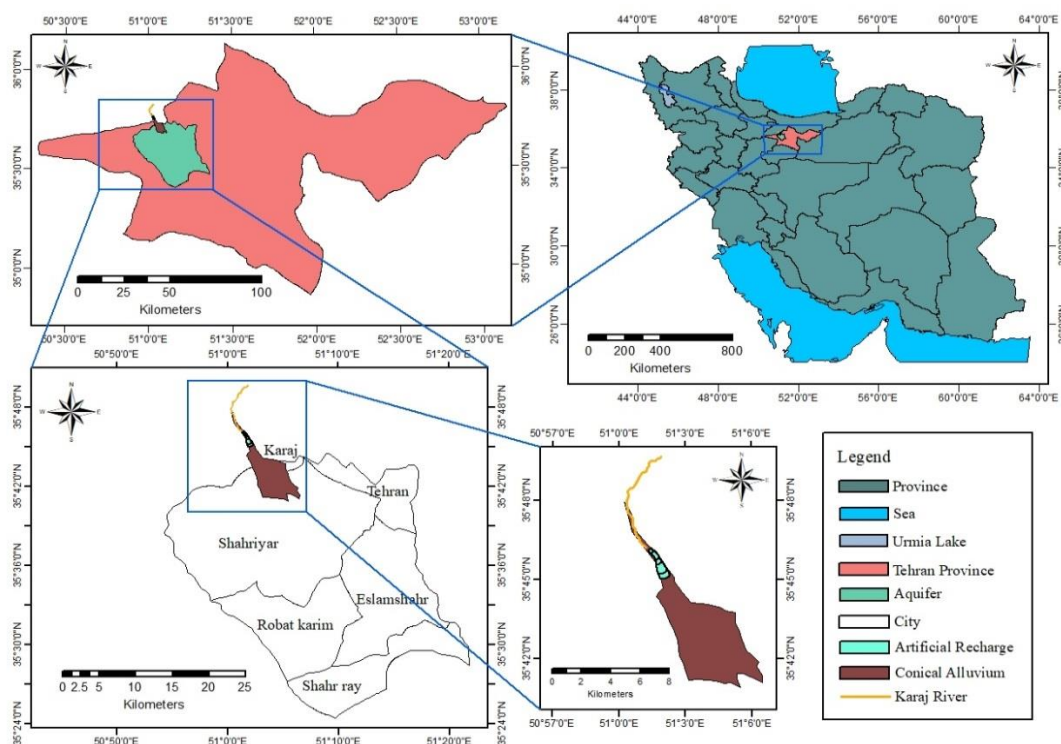
سال آبی	کل بیلقان	سیلاب بیلقان	آب ورودی از بیلقان به شهرداری	مصارف شهر تهران و کرج
۹۳	۵۸۰/۹۴	۲۱/۸۷	۷۷/۸۳	۴۸۱/۲۴
۹۴	۳۸۴/۵۶	۱۳/۰۱	۵۱/۵۸	۳۱۹/۹۷
۹۵	۳۰۴/۲۴	۸/۳۴	۴۰/۹۸	۲۵۴/۹۲

جدول ۲. موقعیت حجم جریان در مسیر رودخانه کن (میلیون متر مکعب)

سال آبی	حجم جریان رودخانه کن (سولقان)	تخلیه کانال غرب	برداشت موتور پمپ‌های کن	برداشت کانال نواب (کاشانک)
۹۳	۱۲۲/۱۶	۶۷/۷۶	۲۰/۵۶	۵۲/۲۹
۹۴	۶۶/۲۷	۶۷/۹۱	۲۱/۹۸	۶۴/۵۵
۹۵	۳۱	۶۸/۰۶	۲۳/۴	۶۴/۲۷

جدول ۳. حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب)

سال آبی	کشاورزی	شرب	صنعت	کل
۹۳	۵۰۱/۸	۱۹۲/۵۴	۵۰/۰۷	۷۴۴/۴۱
۹۴	۵۱۳/۶۱	۱۹۰/۲۳	۴۸/۴۵	۷۵۲/۲۹
۹۵	۵۲۴/۷۱	۲۰۷/۷۵	۵۲/۴۸	۷۸۴/۹۴



شکل ۱. محدوده مطالعه‌شده

(میلی‌متر بر روز)، EAP تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، هستند. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از معادله فائو پنمن مانیتیس و با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 برآورد شده است. تبخیر و تعرق مرجع به صورت روزانه، ماهانه و سالانه محاسبه شده و سپس، با استفاده از ضرایب گیاهی نشریه ۳۳ سازمان خواروبار جهانی (فائو)، تبخیر و تعرق واقعی گیاهان محاسبه شد.

$$Y_a = Y_p \times \left(\prod_t^n \left(1 - K_y \left(1 - \frac{EAT}{EAP} \right) \right) \right) \quad (1)$$

برآورد نیاز بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت برآورد نیاز بخش کشاورزی

به منظور محاسبه نیاز خالص و ناخالص آبیاری محصولات زراعی و باغی هر ناحیه در محدوده مطالعاتی، نیاز به تعیین عملکرد واقعی محصولات است. به این منظور با استفاده از رابطه ۱، عملکرد واقعی تولید محصولات کشاورزی ناحیه‌ها برآورد شدند. در رابطه زیر، Y_a عملکرد واقعی (کیلوگرم بر هکتار)، Y_p عملکرد حداکثر (کیلوگرم بر هکتار)، K_y ضریب حساسیت گیاه به آب (بی‌بعد)، EAT تبخیر و تعرق واقعی

آن $Real_{nst}$ قابلیت اطمینان هر بخش مصرف در هر ناحیه مطالعاتی در بازه زمانی مورد نظر، WSG_{nst} تخصیص بهینه یا (مقدار آب مصرفی بهینه)، NE_{nst} مقدار نیاز آبی است.

$$Real_{nst} = ((WSG_{nst} / NE_{nst}) \times 100) \quad (۴)$$

حداقل و حداکثر شاخص قابلیت اطمینان فعلی کل محدوده مطالعه شده به ترتیب برابر ۶ و ۳۹ درصد است. بنابراین، محدوده مجاز این شاخص برای شرایط بهینه از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد برای کل محدوده در نظر گرفته شده است. در تحقیق مورد نظر سیستم تغذیه مصنوعی شامل (رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی) بوده و کل حجم تغذیه بهینه در رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی مورد محاسبه قرار گرفته است. به منظور محاسبه روندیابی سیلاب در رودخانه و مخازن طرح تغذیه مصنوعی با استفاده از شبیه ساز HEC-HMS، دو مدل تهیه و شبیه سازی شد. در مدل اول، به روندیابی سیلاب در رودخانه پرداخته شده که با توجه به شرایط پروژه، مقدار آبی که از بالادست سد انحرافی بیلقان وارد آن شده، یک منبع آبی در نظر گرفته و با المان منبع شبیه سازی شده است. سپس، سد انحرافی بیلقان به دلیل انحراف سیلاب از مقادیر تخصیص داده شده به شهر تهران و کرج و شهریار و ورود آن به سمت رودخانه کرج و طرح تغذیه مصنوعی، با المان انحراف آب، و رودخانه کرج با استفاده از المان رودخانه شبیه سازی شده اند. مقدار نفوذ و نشت در رودخانه با استفاده از معادله ماسینگهام-کانژ برآورد شده است و با محاسبه طول رودخانه تا ابتدای مخزن اول طرح تغذیه مصنوعی، دبی سیلاب ورودی به سیستم نیز برآورد شده است. در مدل دوم ابتدا محاسبه روندیابی سیلاب در مخازن به صورت دستی، صورت گرفته است و به این منظور، حجم نفوذ که شامل دو بخش می شود، برآورد شده است. بخش اول شامل نفوذ اولیه در محل ساختگاه طرح است و زمانی که سیلاب وارد مخازن می شود، اتفاق می افتد. بنابراین، بر اساس آبنمود ورودی سیلاب به مخازن طرح، روندیابی سیلاب طی زمان ورود آن به مخازن با توجه به نفوذ اولیه محاسبه شده است. بخش دوم مربوط به زمانی است که سیلاب تا لبه سرریز ذخیره شده و بعد از آن وارد مخزن بعدی می شود. در این بخش روندیابی بقیه دبی سیلاب ورودی تا لبه سرریز در مخزن به منظور عمل ذخیره سازی

برآورد نیاز بخش شرب

نیاز بخش شرب نواحی در محدوده مورد نظر با توجه به رابطه ۲، با در نظر گرفتن جمعیت و سرانه مصرف شرب در بازه زمانی مطالعه شده، برآورد شده است. در این رابطه Nsh_{nt} نیاز شرب هر ناحیه در دوره زمانی مطالعاتی، P_n جمعیت نواحی و dwy_{nt} سرانه مصرف شرب نواحی است. همچنین، n معرف ناحیه ها و t زمان است.

$$Nsh_{nt} = P_n \times dwy_{nt} \quad (۲)$$

برآورد نیاز بخش صنعت

نیاز صنعت بر اساس تعداد واحدهای صنعتی و مصارف آن ها طی یک سال در نظر گرفته شده است. به این منظور، واحدهای صنعتی در نواحی محدوده مورد نظر که طی یک سال به طور کامل دارای مصرف آب بودند، در نظر گرفته شده و سپس، مقدار مصرف واحدهای صنعتی هر بخش از صنایع در تعداد آن در بازه زمانی مطالعاتی به عنوان نیاز بخش صنعت برآورد شده است. در رابطه ۳ Nsa_{nt} نیاز بخش صنعت در هر ناحیه و در دوره زمانی مطالعاتی، wsa_{kt} و iwn_{kt} به ترتیب مصرف و تعداد واحدهای صنعتی هر بخش از صنایع نواحی است. همچنین، k معرف بخش های واحدهای صنعتی در ناحیه ها است.

$$Nsa_{nt} = \sum_t^k (wsa_{kt} \times iwn_{kt}) \quad (۳)$$

شاخص قابلیت اطمینان

با توجه به مدل بهینه سازی و اهداف و محدودیت های آن، مناسب ترین معیاری که نشان دهنده آب تخصیص داده شده در مقایسه با نیاز آبی باشد، قابلیت اطمینان یا اطمینان پذیری است. این معیار بیانگر تأمین اهداف سیستم است و یکی از معیارهای مهم برای بررسی کارایی سیاست های بهره برداری از سیستم های منابع آب است. با استفاده از این شاخص می توان اندازه جمعیت کروموزم های الگوریتم را تعیین کرده و نیز نتایج نهایی الگوریتم را تحلیل کرد. با توجه به مقادیر بهینه تخصیص از منابع آب زیرزمینی و سطحی می توان شاخص قابلیت اطمینان نواحی محدوده مورد مطالعه را که نشان دهنده درصد تأمین نیاز است، به صورت ماهانه برآورد کرد. رابطه ۴ شاخص قابلیت اطمینان ناحیه ها را نشان می دهد که در

انجام شده است. در نهایت، بعد از عمل ذخیره‌سازی در مخزن فعلی، سیلاب وارد مخزن بعدی شده و محاسبات تا مخزن آخر تکرار می‌شود. در نهایت، مازاد سیلاب از آخرین حوضچه طرح تغذیه مصنوعی خارج می‌شود. حجم کل تغذیه با استفاده از طرح تغذیه مصنوعی در بازه زمانی مطالعه‌شده به صورت رابطه ۵ محاسبه شده است.

در رابطه یادشده QT_t حجم کل تغذیه در دوره زمانی مورد نظر، V_{ti} حجم نفوذ اولیه از سیلاب ورودی به مخازن و V_{ts} حجم ذخیره سیلاب در مخازن هستند. در ادامه، مقادیر روندیابی شده دستی به صورت تجمعی وارد مدل شدند. و در آن سیلاب‌های ورودی به طرح تغذیه مصنوعی با المان منبع و مخازن طرح تغذیه مصنوعی با المان مخزن شبیه‌سازی شده‌اند. روش روندیابی حوضچه‌های سیستم تغذیه مصنوعی، نمودار جریان خروجی و روش محاسبه ذخیره‌سازی در مدل، تخلیه - ذخیره و روش محاسبه شرایط اولیه، تعادل دبی ورودی - خروجی است. روش نمودار جریان خروجی با استفاده از الگوریتم پالس اصلاح‌شده، مخازن طرح را روندیابی می‌کند. در محاسبه ذخیره‌سازی با روش منحنی تخلیه - ذخیره، روندیابی و محاسبه ذخیره با استفاده از منحنی مورد نظر انجام می‌شود. شرط اولیه با استفاده از روش ورودی - خروجی در ابتدای شبیه‌سازی، ورودی را به مخزن می‌برد و از منحنی تخلیه - ذخیره برای تعیین میزان ذخیره مورد نیاز برای تولید جریان خروجی از مخزن استفاده می‌کند. پس از محاسبات روندیابی سیلاب در رودخانه کرج و حوضچه‌های طرح تغذیه مصنوعی، در نهایت حجم نفوذ سیلاب در رودخانه کرج، حجم نفوذ در طی سیلاب در حوضچه‌ها، حجم ذخیره سیلاب در حوضچه‌ها و نیز حجم سیلاب خروجی از طرح تغذیه مصنوعی مورد نظر، وارد محاسبات الگوریتم شدند. در این تحقیق به تخصیص بهینه منابع آبی به مصارف بخش‌های مختلف مصرف در ناحیه‌های مورد نظر محدود مطالعه‌شده و بهینه‌سازی حجم نفوذ سیستم تغذیه مصنوعی، پرداخته شده است.

$$QT_t = \sum_t \sum_i (V_{ti} + V_{ts}) \quad (5)$$

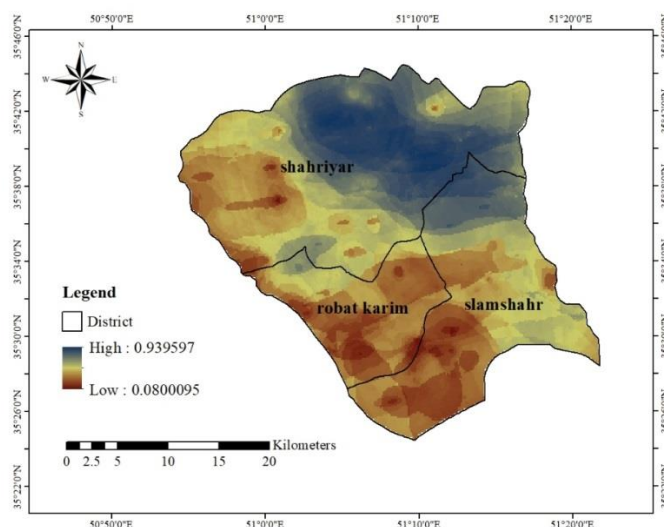
تحقیق مورد نظر به برنامه‌ریزی تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و حجم نفوذ سیستم تغذیه پرداخته

است. اهدافی که در تهیه و تدوین مدل بهینه‌سازی در این تحقیق دنبال می‌شود، به ترتیب شامل هدف اول، حداقل کردن عدم تأمین نیازها و هدف دوم، حداکثر کردن حجم تغذیه با استفاده از سیستم تغذیه مصنوعی است. در این مدل بهینه‌سازی، اهداف دیگر مانند احیای آبخوان و کنترل تغییرات تراز آب زیرزمینی و استفاده بهینه از ذخایر منابع آب سطحی به منظور استفاده از آن در مصارف، نیز تأمین می‌شوند. در این تحقیق با توجه به شرایط موجود محدود مطالعه‌شده، محدودیت‌هایی به منظور تخصیص پساب، منابع آب سطحی (رودخانه‌ها و کانال‌ها) و منابع آب زیرزمینی و کانال رباط کریم (محمدیه)، به مصارف مختلف و همچنین، محدودیت‌هایی برای حجم نفوذ بهینه سامانه تغذیه در نظر گرفته شد. همچنین، اولویت‌ها در تخصیص از منابع به این صورت است که ابتدا پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و بعد از آن منابع آب‌های سطحی (رودخانه‌ها و کانال‌ها) و سپس، منابع آب‌های زیرزمینی و در نهایت، کانال رباط کریم (محمدیه) برای تخصیص به مصارف در نظر گرفته شدند. در نظر گرفتن اولویت تخصیص‌ها به دلیل استفاده حداکثر از منابع آب قابل دسترس مانند پساب‌ها و نیز تبخیر زیاد و عدم نگهداشت مناسب منابع آب سطحی و استفاده کمتر از منابع آب‌های زیرزمینی به دلیل کمبود آن و مسائل و مشکلات زیست‌محیطی پیچیده و هزینه‌بر این منبع آبی، است. همچنین، کانال رباط کریم که منبع اصلی تأمین آب آن، آبخوان تهران است به منظور برداشت کمتر از این آبخوان و کاهش مسائل و مشکلات مربوط به آن در حال و آینده، در مرحله آخر به منظور تخصیص به مصارف در نظر گرفته شده است. بنابراین، باید منابع آب سطحی در مدت زمان کمتری مصرف شده و یا به منظور تغذیه مصنوعی و با توجه به شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی دشت، وارد آبخوان شوند که در این صورت، مدت زمان بهره‌برداری از منابع آب سطحی به طور غیر مستقیم و در ترکیب با منابع آب زیرزمینی افزایش یافته و همچنین، مسائل و مشکلات زیست‌محیطی پیچیده منابع آب زیرزمینی کاهش می‌یابد و در نهایت، می‌توان به صورت بهینه از منابع آبی موجود بهره‌برداری کرد.

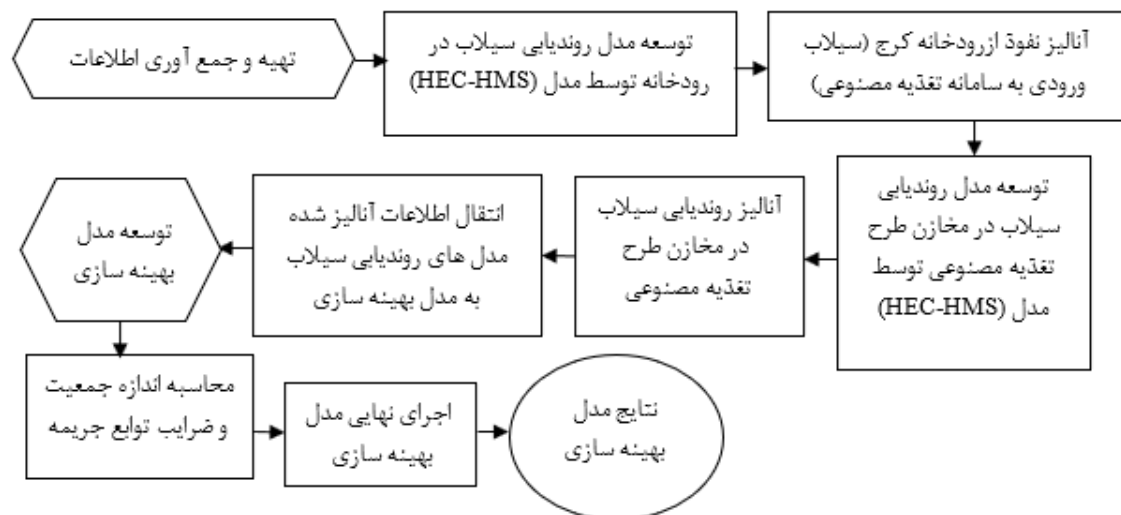
درخور یادآوری است اولویت‌های ارائه‌شده با توجه به شرایط محدود مورد مطالعه، می‌تواند متفاوت باشد. به

رستری شده و به عنوان بخشی از داده‌ها به همراه لایه‌های رستری درون‌یابی شده، ارزش‌گذاری سپس توسط توابع عضویت، فازی‌سازی شده‌اند. سپس، تمام لایه‌های فازی، با یکدیگر ترکیب شده و در نهایت، با استفاده از داده کاربری اراضی و ژئومورفولوژی، نواحی پرآب و کم‌آب محدوده مطالعه شده مشخص شدند. توابع عضویت استفاده شده در این مطالعه، تابع عضویت اسمال (small) و تابع عضویت لارج (large) است. همچنین، عملگر گاما با مقدار ۰/۹ به منظور همپوشانی لایه‌هایی که تابع عضویت آن‌ها تهیه شده بود، اعمال شد. تحلیل مورد نظر برای سه سال آبی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ انجام شده است. در این مدل برای افزایش دقت محاسبات و همچنین، مشاهده واضح روند تغییرات داده‌ها و به دنبال آن تغییرات نتایج، داده‌های هر سال به صورت جدا درون‌یابی، فازی و با یکدیگر ترکیب و برآورد شدند. در نهایت، لایه‌های فازی شده هر سال به منظور تهیه لایه کل بازه زمانی با یکدیگر ترکیب و محاسبه شدند. با توجه به شکل ۲، مکان‌های پرآب با رنگ آبی و ارزش بیشتر بین (صفر و یک) و مکان‌های کم‌آب با رنگ قهوه‌ای و ارزش کمتر در محدوده و دوره زمانی مورد مطالعه مشخص شده‌اند. با توجه به تحلیل مدل GIS ناحیه رباط کریم سپس اسلامشهر و در انتها ناحیه شهریار به عنوان کم‌آب‌ترین مناطق در محدوده مطالعاتی مشخص شدند. الگوریتم فرایند محاسبات مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز مطالعه مورد نظر در شکل ۳ نشان داده شده است.

عنوان مثال، می‌توان به منابع پساب اشاره کرد که در صورت وجود مسائل پیچیده زیست‌محیطی و فرهنگی، این منبع مهم از اولویت‌های مورد نظر حذف می‌شود. در این تحقیق، به منظور محاسبه تغییرات تراز آب زیرزمینی و رفتار آبخوان، سفره آب زیرزمینی به صورت گسترده مورد محاسبه قرار گرفته است. پیش از تهیه مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز، اولویت ناحیه‌ها به منظور تخصیص منابع آبی با استفاده از مدل GIS تعیین شده است. به این منظور، داده‌های تراز، عمق، دبی بهره‌برداری بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت و داده‌های زمین‌شناسی مانند ضخامت آبرفت، شیب زمین، ضرایب هیدرودینامیکی مانند هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و ضریب انتقال به منظور درون‌یابی مورد استفاده قرار گرفتند. برای محاسبات درون‌یابی داده‌های یادشده با روش‌های درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW)، چندجمله‌ای جهانی (GPI)، چندجمله‌ای محلی (LPG)، توابع پایه شعاعی (RBF)، کریجینگ (Kriging)، کوکریجینگ (Co-Kriging)، محاسبه شدند. بعد بهترین روش درون‌یابی برای هر لایه تعیین شد. انتخاب معیارهای فنی بر اساس شرایط منابع آبی و زیست‌محیطی محدوده مطالعه شده صورت گرفته است. حجم مصارف در بخش‌های مختلف، فاصله از رودخانه‌ها و فاصله از کانال‌ها عوامل مهمی هستند که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد. بعد از مرحله درون‌یابی لایه‌ها، مدل با استفاده از منطق فازی برآورد شده و به این منظور ابتدا لایه پلیگونی طول و عرض رودخانه‌ها، مسیل‌ها و کانال‌ها تبدیل به لایه



شکل ۲. نواحی پرآب و کم‌آب محدوده در دوره زمانی مطالعاتی



شکل ۳. روندنمای فرایند محاسبات در مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز

$$Z_1 = \text{Minimize} \sum_t \sum_z \sum_p \left((NW_{azp} - TW_{azp})^2 + \text{penalty function} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{penalty function} = & \left((klp_{azp})^2 \times \alpha \right) + \left((klgb_{azp})^2 \times \beta \right) + \left((car_{azp})^2 \times \gamma \right) + \left((capa_{azp})^2 \times \lambda \right) \\ & + \left((lgb_{azp})^2 \times \omega \right) + \left((wacap_{azp})^2 \times \epsilon \right) + \left((wa_{azp})^2 \times c \right) \end{aligned} \quad (7)$$

بهینه‌ساز مصارف این دو بخش در ناحیه‌های مورد نظر، به صورت معادلات ۸ و ۹ است. که در این معادلات، $input$ ، $output$ ، $perd$ ، ΔL_{MAX} ، A ، S_y ، به ترتیب حجم آب ورودی و خروجی به آبخوان در مرزهای محدوده (میلیون متر مکعب)، مصرف خالص (درصد)، حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی (متر)، مساحت آبخوان (کیلومتر مربع)، آبدهی ویژه (بی‌بعد)، هستند. در این تحقیق با توجه به شرایط پروژه، محدوده و آبخوان، حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ΔL_{MAX} برابر 0.4 متر در ماه در نظر گرفته شد. در این روابط $NWSH_{azp}$ مقدار نیاز آبی شرب و صنعت در ناحیه‌های رباط کریم، اسلامشهر و شهریار و dg_{azp} مصارف بهینه شرب و صنعت ناحیه‌ها از منابع آب زیرزمینی به صورت ماهانه در سال‌های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ هستند. در معادلات lgb_{azp} ، dg_{azp} متغیر تصمیم است. در روابط lgb_{azp} ، نیاز آبی از اختلاف ورودی و خروجی آب زیرزمینی و با رعایت حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در تابع جریمه lgb_{azp} اگر مقدار برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی که با رعایت محدودیت تغییرات تراز آب زیرزمینی و به منظور مصارف

در این تحقیق، ساختار مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت زیر ارائه شده‌اند که در آن تابع هدف اول Z_1 مطابق معادله ۶ ارائه شده است.

تابع جریمه اول penalty function ، به منظور تخصیص جریمه به دلیل عدم رعایت اولویت‌های برداشت از منابع سطحی، زیرزمینی و نیز عدم رعایت حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی است. مقادیر جریمه بی‌بعد هستند. همچنین، NW_{azp} و TW_{azp} به ترتیب نیاز آبی کل و میزان کل آب تخصیص داده شده به بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی با واحد (میلیون متر مکعب)، در ناحیه‌های رباط کریم، اسلامشهر و شهریار، و در دوره زمانی ماهانه و در سال‌های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵، هستند. α ، β ، γ ، λ ، ϵ ، c ضرایب ثابت برای متناسب کردن مقدار جریمه با تابع هدف و با توجه به شرایط متغیرهای مورد نظر و ساختار مدل بهینه‌سازی و به منظور محاسبه جواب‌های بهینه مناسب محاسبه می‌شوند، که در تابع جریمه اول برابر ۱۰ هزار در نظر گرفته شده‌اند. ضرایب مورد نظر با سعی و خطا محاسبه شده‌اند. برای مصارف شرب و صنعت از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود. بنابراین، محاسبه

غیر این صورت، به اندازه اختلاف این دو مقدار، تابع هدف، جریمه می‌شود.

شرب و صنعت محاسبه شده است، به اندازه مقدار فعلی بود، جریمه‌ای اعمال نمی‌شود و یا مقدار آن صفر است در

$$I_{g_{azp}} = \begin{cases} NWSH_{azp}, & \text{if } \left| \frac{input - output - (NWSH_{azp} \times perd)}{A \times S_y} \right| \leq \Delta L_{MAX} \\ \left| \frac{input - output + (\Delta L_{MAX} \times A \times S_y)}{perd} \right| - NWSH_{azp}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{gb_{azp}} = \begin{cases} 0, & \text{if } (dg_{azp}) - I_{g_{azp}} = 0 \\ (dg_{azp}) - I_{g_{azp}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$Kl_{mrb} = \begin{cases} 0, & \text{if } kl_{frb} = KNW_{rb} \\ KNW_{rb}, & \text{if } kl_{frb} = 0 \\ TDWK, & \text{if } kl_{frb} = |TDWK - KNW_{rb}| \end{cases} \quad (11)$$

در ناحیه‌های شهریار و اسلامشهر به خلاف ناحیه رباط کریم تصفیه‌خانه‌های فاضلاب وجود دارد. در این نواحی ابتدا پساب تصفیه‌خانه‌ها و سپس، منابع آب سطحی محاسبه می‌شوند. بنابراین، محاسبه معادلات تخصیص از منابع سطحی در این نواحی با ناحیه رباط کریم متفاوت است. در روابط زیر psw_{tzp} حجم تولید پساب، $wastcap_{tzp}$ حداکثر حجم تولید پساب و knw_{tzp} نیاز بخش کشاورزی در ناحیه‌های شهریار و اسلامشهر با واحد (میلیون متر مکعب)، هستند. در این معادلات نیز، psw_{tzp} متغیر تصمیم است.

معادلات ۱۰ و ۱۱ برای محاسبات مصارف کشاورزی ناحیه رباط کریم از منابع آب سطحی استفاده شده است. در این ناحیه تصفیه‌خانه فاضلاب برای استفاده از آن در مصارف کشاورزی وجود ندارد. بنابراین، در این ناحیه فقط می‌توان از منابع آب سطحی (رودخانه‌ها و کانال‌ها) و آب زیرزمینی استفاده کرد که اولویت مصارف کشاورزی ابتدا با منابع آب سطحی (رودخانه‌ها و کانال‌ها) و سپس، با منابع آب زیرزمینی و در نهایت، کانال رباط کریم (محمدیه) است. در روابط $TDWK$ مقدار کل آب سطحی موجود در محدوده و KNW_{rb} مقدار نیاز بخش کشاورزی در ناحیه رباط کریم هستند. واحد مقادیر در روابط زیر (میلیون متر مکعب)، است. همچنین، معادلات یادشده dg_{azp} متغیر تصمیم است.

$$Kl_{frb} = \begin{cases} KNW_{rb}, & \text{if } TDWK = 0 \\ 0, & \text{if } TDWK \geq KNW_{rb} \\ |TDWK - KNW_{rb}|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$wacap_{tzp} = \begin{cases} 0, & \text{if } psw_{tzp} - wastcap_{tzp} \leq 0 \\ |psw_{tzp} - wastcap_{tzp}|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$wa_{tzp} = \begin{cases} 0, & \text{if } psw_{tzp} - KNW_{tzp} \leq 0, \\ |psw_{tzp} - KNW_{tzp}|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$Kl_{f_{tzp}} = \begin{cases} 0, & \text{if } wa_{tzp} = 0 \\ |wa_{tzp}|, & \text{if } wa_{t-1p} + TDWK - KNW_{rb} \leq 0 \\ 0, & \text{if } wa_{tzp} + wa_{t-1p} + TDWK - KNW_{rb} \geq 0 \\ |wa_{tzp} + wa_{t-1p} - TDWK - KNW_{rb}|, & \text{if } wa_{tzp} + wa_{t-1p} + TDWK - KNW_{rb} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$Kl_{m_{tzp}} = \begin{cases} KNW_{tzp}, & \text{if } wa_{tzp} = 0 \\ |wa_{tzp}|, & \text{if } wa_{tzp} + wa_{t-1p} + TDWK - KNW_{rb} \geq 0 \\ KNW_{tzp} - (|wa_{tzp} - wa_{t-1p} - TDWK - KNW_{rb}|), & \text{if } Kl_{f_{tzp}} = |wa_{tzp} - wa_{t-1p} - TDWK - KNW_{rb}| \end{cases} \quad (15)$$

روابط ۱۶ تا ۲۰ برای نواحی شهریار و اسلامشهر نیز محاسبه می‌شوند. همچنین، به جای معادلات Kl_{mr} و Kl_{fr} ، معادلات Kl_{fzp} و Kl_{mzp} برای دو ناحیه مورد نظر محاسبه می‌شوند. در تابع جریمه به غیر از محاسبات پساب که فقط برای نواحی شهریار و اسلامشهر انجام شده‌اند، کل محاسبات انجام‌شده برای دوره زمانی مورد نظر (a) و در تمام نواحی (z) و نیز در بخش کشاورزی (p) هستند. بنابراین مقادیر kl_{pr} ، kl_{gr} ، kl_{gbr} ، cap_{rb} و car_{rb} به صورت کلی kl_{azp} ، $kl_{g_{azp}}$ ، $kl_{gb_{azp}}$ و cap_{azp} محاسبه شده‌اند.

$$Kl_{pr} = \begin{cases} 0, & \text{if } (kdw_{rb}) - Kl_{mr} = 0 \\ (kdw_{rb}) - Kl_{mr} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$kl_{gr} = \begin{cases} 0, & \text{if } Kl_{fr} = 0 \\ Kl_{fr}, & \text{if } \left| \frac{|\text{input} - \text{output}| - (Kl_{fr} \times \text{perd})}{A \times S_y} \right| \leq \Delta L_{MAX} \\ \left| \frac{|\text{input} - \text{output}| + (\Delta L_{MAX} \times A \times S_y)}{\text{perd}} \right| - Kl_{fr}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$Kl_{gbr} = \begin{cases} 0, & \text{if } (kdg_{rb}) - kl_{gr} = 0 \\ (kdg_{rb}) - kl_{gr}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$Capa_{rb} = \begin{cases} 0, & \text{if } cds_{rb} - cap_{rb} \leq 0 \\ cds_{rb} - cap_{rb}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$Carb_{rb} = \begin{cases} 0, & \text{if } kl_{gr} = 0 \\ 0, & \text{if } kl_{gr} - |kl_{fr}| = 0 \\ cds_{rb} + kl_{gr} - |kl_{fr}|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$Z_2 = \text{Maximize} \sum_t^{nt} (VI_t - \text{penalty function}) \quad (21)$$

$$\text{Penalty function} = \left((VI_{ref})^2 \times u \right) + \left((Q_{bag})^2 \times h \right) \quad (22)$$

فعلی با محاسبه حجم بهینه تغذیه مصنوعی، اثر آن بر تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تابع جریمه دوم u و h نیز برابر ۱۰ هزار محاسبه شدند. زمانی که تابع هدف حداکثر می‌شود، تابع جریمه از آن کم می‌شود، زیرا الگوریتم سعی بر حداکثر کردن تابع هدف را دارد، ولی

در روابط ۱۴ و ۱۵ wa_{iz-1p} تأمین نیاز بخش کشاورزی به وسیله پساب تصفیه‌خانه‌های ناحیه قبل است. روابط ۱۰ و ۱۱ برای ناحیه رباط کریم محاسبه شده‌اند و این روابط برای ناحیه‌های شهریار و اسلامشهر به صورت معادلات ۱۲ تا ۱۵ هستند که در آن‌ها t زمان، z ناحیه و p معرف بخش هستند. روش محاسبه Kl_{pr} مانند Igb_{azp} است و در معادلات Kl_{pr} ، kdw_{rb} متغیر تصمیم است. در رابطه ۱۸، kdg_{rb} متغیر تصمیم است. در روابط ۱۹ و ۲۰ cds_{rb} حجم آب کانال و cap_{rb} حداکثر ظرفیت کانال جهت انتقال آب و آبیاری بوده و همچنین، cds_{rb} متغیر تصمیم است.

رابطه ۲۱، Z_2 تابع هدف دوم و رابطه ۲۲، penalty function جریمه محاسبه شده به دلیل عدم رعایت منابع سطحی تخصیص داده شده به تغذیه مصنوعی و حجم تغذیه و ذخیره برآوردشده بر اساس حجم سیلاب و مخازن سامانه تغذیه مصنوعی هستند. در این بخش از تحقیق

موجود، کمتر یا مساوی حجم کمبود سیلاب باشد و پاسخ معادله کمتر از صفر و یا مساوی آن شود به همان اندازه آب، به سیستم تغذیه اختصاص داده می‌شود و به عنوان مقدار VI_b محاسبه می‌شود، زیرا به همان اندازه آب موجود است یا به اندازه حجم حوضچه‌ها، و اگر هم به اندازه حجم حوضچه‌ها آب موجود باشد، در ماه‌های غیره سیلابی، کمبود سیلاب نیز به همان اندازه است که در این شرایط با همدیگر برابرند، ولی اگر مقدار حجم آب تخصیص داده شده به اندازه حجم حوضچه‌ها و یا حجم موجود بیشتر از حجم کمبود سیلاب باشد و پاسخ معادله بیشتر از صفر شود، حجم کمبود سیلاب به عنوان مقدار VI_b انتخاب می‌شود، زیرا در حوضچه‌ها به اندازه حجم کمبود سیلاب می‌شود، زیرا در حوضچه‌ها به اندازه حجم در ماه‌های سیلابی اتفاق می‌افتد. بنابراین VI_b ، حجم آب تخصیص داده شده از بیلقان به اندازه حجم کمبود سیلاب و حوضچه‌ها را به خوبی محاسبه می‌کند. در این تحقیق، حجم مصارف کشاورزی، Q_{agr} نیز متغیر تصمیم است. واحد تمام حجم آب‌های محاسبه شده (میلیون متر مکعب) و تغییرات تراز ناشی از حجم آب‌های تغذیه شده (متر)، است.

$$V_{ret} = V_{sto} + VI_b \quad (32)$$

$$VI_{ref} = \begin{cases} 0, & \text{if } V_{ret} - V_{sb} \leq 0 \\ |V_{ret} - V_{sb}|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

$$VI = Q_{rtb} + V_{sto} + Q_{out} \quad (34)$$

$$VI_{ru} = VI + Q_{ri} \quad (35)$$

$$VI_t = VI_{ru} + VI_b \quad (36)$$

در پایین دست طرح تغذیه، شن چاله‌های وسیع قرار دارند. بنابراین، مازاد سیلاب در صورتی که از طرح تغذیه مصنوعی خارج شود، وارد این شن چاله‌های بزرگ می‌شود و در آنجا به سفره آب زیرزمینی نفوذ می‌کند. به همین دلیل، در محاسبه VI ، سیلاب خروجی وارد شده است. به طور کلی، در این تحقیق، تعداد متغیرهای تصمیم برای هر ماه در مدت زمان برنامه‌ریزی تلفیقی از منابع آبی و حجم بهینه تغذیه مصنوعی ۱۵ بوده که برای مدت زمان ۳ سال، تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۵۴۰ خواهد بود. در

چون محدودیت‌ها را رعایت نکرده است، جریمه می‌شود. در نتیجه، تابع هدف کمتر حداکثر خواهد شد، بنابراین الگوریتم سعی می‌کند تا حد امکان محدودیت‌ها را طوری رعایت کند که جریمه کمتر محاسبه شده و تابع هدف بیشتر حداکثر شود. این موضوع برای اهدافی که باید حداقل شوند برعکس است. یعنی الگوریتم سعی می‌کند تا حد امکان محدودیت‌ها را طوری رعایت کند که جریمه کمتر محاسبه شده و تابع هدف بیشتر حداقل شود. بنابراین در این تحقیق، اهدافی که حداکثر می‌شوند تابع جریمه به آن‌ها افزوده می‌شود و اهدافی که حداقل می‌شوند، تابع جریمه از آن‌ها کم می‌شود.

$$Q_{in} = Q_{rt} - Q_{ri} \quad (23)$$

$$V_{rst} = Q_{in} - Q_{rtb} \quad (24)$$

$$V_{sto} = \begin{cases} V_{rst}, & \text{if } V_{rst} - V_{sb} \leq 0 \\ V_{sb}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

$$Q_{out} = \begin{cases} 0, & \text{if } V_{sto} = V_{rst} \\ V_{rst} - V_{sb}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

$$VI_r = \begin{cases} V_{sb} - V_{rst}, & \text{if } Q_{out} = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$$Q_{rem} = \begin{cases} 0, & \text{if } Q_b - Q_{agr} \leq 0 \\ Q_b - Q_{agr}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

$$Q_{bag} = \begin{cases} 0, & \text{if } Q_b - Q_{agr} > 0 \\ Q_{agr}, & \text{if } Q_b - Q_{agr} \leq 0 \end{cases} \quad (29)$$

$$VI_{bc} = \begin{cases} Q_{rem}, & \text{if } Q_{rem} - V_{sb} \leq 0 \\ V_{sb}, & \end{cases} \quad (30)$$

$$VI_b = \begin{cases} VI_{bc}, & \text{if } VI_{bc} - VI_r \leq 0 \\ VI_r, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

در روابط یادشده، Q_{rt} سیلاب بیلقان، Q_{ri} حجم نفوذ در رودخانه کرج، Q_{rtb} حجم نفوذ طی سیلاب در حوضچه‌های طرح تغذیه، V_{sb} حجم حوضچه‌های طرح تغذیه، VI_{bc} حجم آب تخصیص داده شده از بیلقان به اندازه حجم حوضچه‌ها هستند. در محاسبه VI_b اگر مقدار حجم آب تخصیص داده شده به اندازه حجم حوضچه‌ها و یا حجم

با توجه به بررسی شاخص قابلیت اطمینان، بهترین جمعیت انتخاب شد. شکل ۴ ساختار مدل بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد.

این تحقیق اندازه جمعیت کروموزم‌ها ۳۰۰ و تعداد تکرارها ۱۰۰۰ دور در نظر گرفته شد. به منظور تعیین اندازه جمعیت کروموزم‌ها، الگوریتم با چهار جمعیت ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ و هر جمعیت با ۴۰۰ تکرار اجرا شد. سپس،



شکل ۴. ساختار مدل بهینه‌سازی

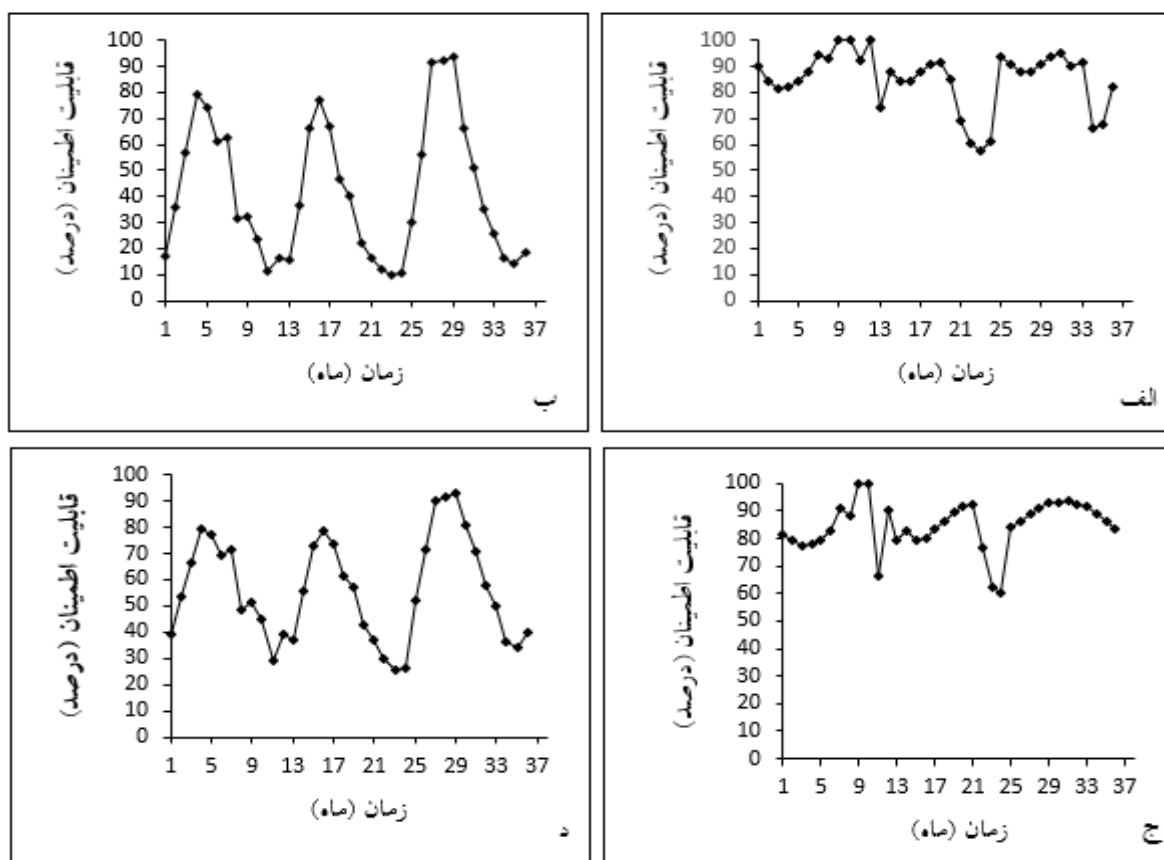
مورد نظر نسبت به نواحی اسلامشهر و شهریار بیشتر و برابر با ۸۵/۰۵ درصد است. همچنین، مقدار تأمین نیاز آبی ناحیه اسلامشهر کمترین مقدار نسبت به سایر نواحی دیگر بوده و به طور میانگین برابر ۴۱/۹۶ درصد است. مقدار تأمین نیاز آبی ناحیه شهریار به طور میانگین برابر ۸۴/۷۵ است که بعد

نتایج و بحث

شاخص اطمینان‌پذیری نواحی واقع در محدوده مطالعاتی و نیز کل محدوده در بازه زمانی مورد نظر در شکل ۵ نمایش داده شده است. در ناحیه رباط کریم میانگین مقادیر تأمین نیاز آب بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در بازه زمانی

رعایت محدودیت تراز سطح آب زیرزمینی، برداشت از آبخوان صورت می‌گیرد و همچنین، در صورتی که آب زیرزمینی پاسخ‌گوی نیاز نباشد از کانال رباط‌کریم در این بخش استفاده خواهد شد. بنابراین، با توجه به این موضوع تخصیص از پساب، منابع آب سطحی و کانال رباط‌کریم تنها به بخش کشاورزی است، زیرا در محدوده مورد مطالعه، پساب‌ها و آب‌های سطحی به دلیل حجم و کیفیت کمتر نسبت به آب زیرزمینی در بخش کشاورزی استفاده می‌شود و آب زیرزمینی تنها در بخش‌های شرب، صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ناحیه رباط‌کریم به دلیل اینکه تصفیه‌خانه فاضلاب ندارد، مقادیر پساب در این ناحیه محاسبه نشده است، ولی ناحیه شه‌ریار دارای تصفیه‌خانه‌های شه‌ریار و شهر قدس و ناحیه اسلامشهر دارای تصفیه‌خانه‌های کهریزک و فرودگاه بین‌المللی امام^(د) هستند. بنابراین، مقادیر پساب در این نواحی محاسبه شده‌اند.

از ناحیه رباط‌کریم بیشترین درصد تأمین نیاز آبی را به خود اختصاص داده است. حداکثر قابلیت اطمینان مربوط به کل محدوده برابر ۹۲/۹۳ درصد و حداقل آن برابر ۲۵/۶۰ درصد و به طور میانگین ۵۶/۵۰ درصد است. منظور از مقداری که بیشترین قابلیت اطمینان را دارد، مقداری است که کمترین عدم تأمین نیاز را دارد و عکس این حالت بیشترین عدم تأمین نیاز را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین با توجه به نتایج، قابلیت اطمینان کل محدوده در حد مطلوبی است. جدول‌های ۴ و ۵ سیاست‌های بهینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع، برای نواحی مورد نظر در محدوده مطالعاتی برای بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در دوره زمانی مورد نظر را مشخص می‌کنند. همان‌طور که در این جدول‌ها مشخص است با توجه به اینکه اولویت برداشت از منابع برای تخصیص به نیاز بخش کشاورزی ابتدا با پساب و سپس با آب سطحی است، بنابراین در بیشتر ماه‌ها درصدی از نیازها با استفاده از این دو منبع تأمین شده و در صورت کمبود و



شکل ۵. الف) قابلیت اطمینان ناحیه رباط‌کریم؛ ب) قابلیت اطمینان ناحیه اسلامشهر؛ ج) قابلیت اطمینان ناحیه شه‌ریار؛ د) قابلیت اطمینان کل محدوده مطالعاتی

جدول ۴. سیاست تخصیص بهینه منابع آب زیرزمینی به نواحی مطالعاتی (میلیون متر مکعب)

سال آبی	منابع آبی	ناحیه	بخش شرب	بخش صنعت
۹۳	آب زیرزمینی	رباط کریم	۲۶/۵۹	۶/۲۷
		اسلامشهر	۶۱/۲۶	۲۱/۴۳
		شهریار	۹۶/۶۱	۲۰/۲۸
۹۴	آب زیرزمینی	رباط کریم	۳۴/۳	۳/۵۹
		اسلامشهر	۶۲/۱۲	۱۰/۹۱
		شهریار	۶۸/۲۲	۲۷/۴۴
۹۵	آب زیرزمینی	رباط کریم	۲۳/۶۸	۹/۰۶
		اسلامشهر	۵۶/۱۳	۱۷/۱۷
		شهریار	۱۰۰	۱۹/۱۹

جدول ۵. سیاست‌های تخصیص بهینه منابع آبی به نواحی مطالعاتی (میلیون متر مکعب)

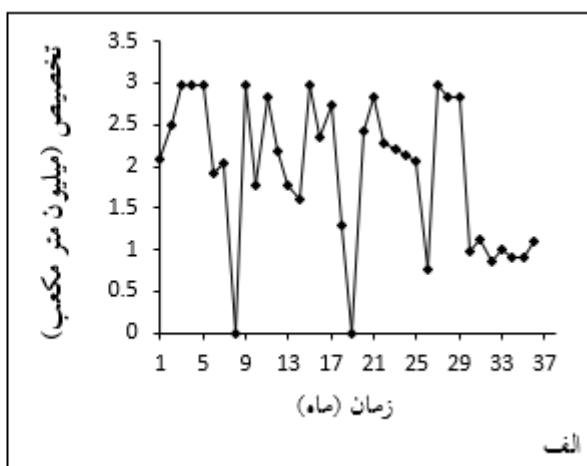
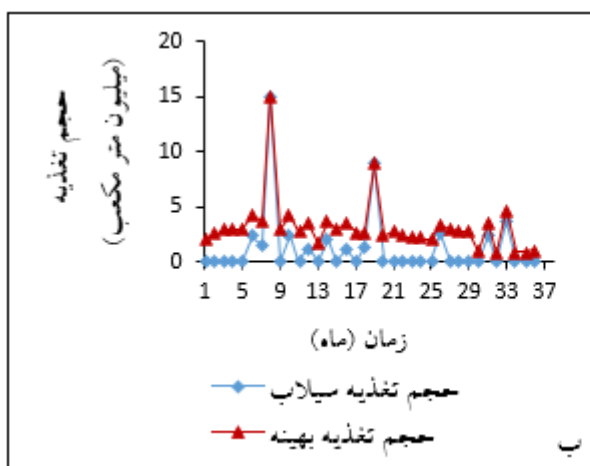
بخش کشاورزی				
سال آبی	منابع آبی	رباط کریم	اسلامشهر	شهریار
۹۳	پساب	۰	۱/۰۵	۱۰/۵۴
	سطحی	۳/۴۴	۴۲/۰۸	۳۵/۸۹
	زیرزمینی	۳/۲۲	۱۵۶/۰۱	۷۳/۳۹
۹۴	کانال	۳/۲۵	۳/۹۴	۲/۵۲
	پساب	۰	۰/۹	۲۱/۶۹
	سطحی	۵۳/۵۶	۳۸/۸۹	۳۰/۲۳
۹۵	زیرزمینی	۶۸/۳۶	۱۳۸/۸۸	۱۰۱/۲۵
	کانال	۶۵/۵۲	۳/۰۱	۲/۷۳
	پساب	۰	۰/۹	۲۱/۶۹
۹۵	سطحی	۲۰/۶۴	۴۰/۲۹	۲۹/۴
	زیرزمینی	۳۷/۹۷	۱۲۸/۶۲	۱۲۷/۲۷
	کانال	۳۴/۹	۲/۹۶	۰

سوم را دارد. بر اساس جدول ۵ مقدار پساب تخصیص داده شده به ناحیه شهریار بیشتر از ناحیه اسلامشهر است. ناحیه رباط کریم نیز تصفیه‌خانه فاضلاب ندارد که بتوان پساب حاصل از آن را به این ناحیه و بخش کشاورزی تخصیص داد. بیشترین تخصیص بهینه منابع آب سطحی به ترتیب به ناحیه اسلامشهر، شهریار و رباط کریم است. منابع آب زیرزمینی اختصاص یافته به مصارف در ناحیه اسلامشهر بیشتر از ناحیه شهریار بوده و در نهایت، کمترین مقدار آب زیرزمینی به ناحیه رباط کریم اختصاص یافته است. علاوه بر این، بیشترین مقدار حجم آب کانال رباط کریم به ناحیه رباط کریم سپس ناحیه اسلامشهر و در نهایت، به ناحیه شهریار اختصاص یافته است. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین حجم آب

بر اساس جدول ۴ منابع آب زیرزمینی اختصاص یافته به مصارف شرب و صنعت در ناحیه شهریار بیشتر از ناحیه اسلامشهر بوده و در نهایت، کمترین مقدار آب زیرزمینی به ناحیه رباط کریم اختصاص یافته است. بنابراین، با توجه به نتایج حاصل شده، بیشترین حجم آب اختصاص یافته به بخش شرب در کل بازه زمانی مورد مطالعه به ناحیه شهریار برابر ۲۶۴/۸۲۵ سپس ناحیه اسلامشهر برابر ۸۴/۵۶۵ و در نهایت، ناحیه رباط کریم برابر ۱۷۹/۲۱۶ میلیون متر مکعب است. همچنین، بیشترین حجم آب اختصاص یافته به بخش صنعت به ترتیب به ناحیه شهریار، اسلامشهر و رباط کریم برابر ۶۶/۹۰۹، ۴۹/۵۰۳ و ۱۸/۹۱۵ است. ناحیه شهریار، در مصارف بخش کشاورزی رتبه دوم و ناحیه اسلامشهر رتبه اول را دارد و ناحیه رباط کریم رتبه

زیرزمینی به ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، مدل بهینه‌سازی چندمنظوره در این تحقیق به عنوان یک ابزار قدرتمند و مناسب در تخصیص بهینه و کاهش مصارف آبی دارای عملکرد قابل قبول و مناسب است [۲۹]. شکل ۶ مقادیر تخصیص بهینه از منابع آب سطحی سد انحرافی بیلقان به سیستم تغذیه مصنوعی و همچنین، حجم تغذیه از سیلاب و حجم تغذیه بهینه را در بازه زمانی مورد مطالعه و به صورت ماهانه نمایش می‌دهد. همان طور که در شکل مورد نظر مشخص است، حجم تغذیه بهینه (حجم سیلاب و تخصیص بهینه از منابع آب سطحی سد انحرافی بیلقان) در سیستم تغذیه مصنوعی بیشتر از حجم تغذیه از سیلاب فعلی در بیشتر ماه‌های بازه زمانی مورد مطالعه است. حجم کل تغذیه فعلی و بهینه در سیستم تغذیه مصنوعی به ترتیب برابر ۴۴/۷۲ و ۱۱۴/۸۱ میلیون متر مکعب در دوره زمانی مورد نظر است. بنابراین، حجم کل تغذیه بهینه ۷۰/۰۹ میلیون متر مکعب افزایش یافته است که در واقع این مقدار، از منابع آب سطحی سد انحرافی بیلقان به سیستم تغذیه مصنوعی اختصاص یافته است که این امر در افزایش تراز و یا تغییرات تراز آب زیرزمینی تأثیرگذار است. همچنین، یکی از اهداف این تحقیق، افزایش حجم تغذیه در سیستم تغذیه از منابع آبی در دسترس است، که با توجه به نتایج به دست آمده، هدف مورد نظر محقق شده است.

اختصاص یافته به بخش کشاورزی در کل بازه زمانی مورد مطالعه به ناحیه اسلامشهر برابر ۵۵۷/۵۲۲ سپس ناحیه شهریار برابر ۴۵۶/۵۹۹ و در نهایت، ناحیه رباط کریم برابر ۲۹۰/۹۶ میلیون متر مکعب است. بنابراین، با توجه به مصارف بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در نواحی مورد مطالعه، ناحیه شهریار با مصرف ۷۸۸/۳۳۴ میلیون متر مکعب بیشترین حجم مصارف را به خود اختصاص داده است و سپس، ناحیه اسلامشهر با مصرف ۷۸۶/۵۴۰ و در آخر ناحیه رباط کریم با مصرف ۳۹۴/۴۴۰، کمترین حجم مصارف دارد. در تحقیق حاضر سیاست بهره‌برداری بهینه علاوه بر تخصیص بهینه به تقاضای آب در بخش‌های مختلف، باعث کاهش مصارف با توجه به شرایط تحقیق نیز شده است. که با توجه به این موضوع بیشترین کاهش در مصارف از کل منابع آب قابل دسترس در تمام بخش‌ها به ترتیب در ناحیه شهریار برابر ۴۴/۰۹ درصد، در ناحیه رباط کریم برابر ۱۴/۵۷ درصد و در ناحیه اسلامشهر برابر ۱۱/۰۶ درصد بوده و کل آب قابل دسترس که در کل محدوده کاهش یافته برابر ۲۸/۵۵ درصد است و در این ارتباط می‌توان به تحقیق یی و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به منظور بهینه‌سازی تخصیص آب فیزیکی و منابع آب مجازی به استفاده‌کنندگان مختلف آب در پکن، چین با توجه به توازن بین مزایای اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی مصرف آب، ارائه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد مصرف آب



شکل ۶. الف) تخصیص بهینه از منابع آب سطحی بیلقان به سیستم تغذیه مصنوعی؛ ب) حجم تغذیه از سیلاب و حجم تغذیه بهینه (حجم سیلاب و تخصیص از منابع آب سطحی بیلقان) در سیستم تغذیه مصنوعی

تغذیه آبخوان به شمار می‌آید. بر اساس جدول ۶، تغییرات تراز (برآورد شده با آمار و اطلاعات فعلی) و بهینه محدودۀ مطالعاتی و با اعمال تغذیه در حالت فعلی و بهینه به وسیله سیستم تغذیه مصنوعی به صورت سالانه مشخص شده‌اند. با توجه به جدول یادشده تغییرات تراز بهینه نسبت به تغییرات تراز دستی بیشتر بوده و افزایش چشمگیری داشته است. بنابراین، اعمال سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود و هم‌زمان بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، تأثیر بسزایی در تراز آب زیرزمینی و در کل رفتار آبخوان محدودۀ مورد مطالعه دارد.

سیاست بهره‌برداری بهینه منجر به افزایش تغییرات تراز آبخوان به اندازه ۴/۸۴ متر به وسیله سیستم تغذیه مصنوعی در بازۀ زمانی مورد نظر شده است. با توجه به این موضوع سیبیت و همکاران (۲۰۱۲) حوضۀ رودخانه مندرس را در کشور ترکیه برای ارزیابی پتانسیل اجرای طرح تغذیه مصنوعی به دو روش حوضچه‌ای و سد زیرزمینی برای بهبود منابع آب زیرزمینی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق مشخص کرد که اجرای سامانۀ تغذیه مصنوعی به دو روش یادشده منجر به افزایش سطح آب زیرزمینی می‌شود [۳۰]. بنابراین در تحقیق حاضر، بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی عامل مهم و مؤثری در مدیریت

جدول ۶. تغییرات تراز دستی و بهینه سالانه (متر)

سال آبی	تغییرات تراز دستی	تغییرات تراز بهینه	اختلاف تغییرات تراز بهینه و دستی
۹۳	-۹/۸۱	۰/۲۷	۱۰/۰۸
۹۴	-۴/۹۲	۵/۶۸	۱۰/۶
۹۵	-۴/۴۲	۶/۱۳	۱۰/۵۴

نتیجه‌گیری

زیرزمینی و بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی ارائه شده، از الگوریتم مناسب و کارآمد استفاده شود. تحقیقات انجام‌شده، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) را به دلیل استفاده از عملگرهای مناسب که از سرعت و دقت قابل توجهی در محاسبۀ جواب‌های نزدیک به مقادیر بهینه برخوردار است را معرفی کرد. بنابراین، در تحقیق حاضر این الگوریتم برای مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آبی و تغذیه آب زیرزمینی به وسیله سیستم تغذیه مصنوعی مورد توجه قرار گرفت. مقادیر بهینه تخصیص به نیازها با اجرای مدل مورد نظر به صورت ماهانه تعیین شد. با تدوین سیاست بهره‌برداری بهینه حاصل از مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز مورد نظر، قابلیت اطمینان مربوط به ناحیۀ رباط کریم در بازۀ زمانی مورد نظر به طور میانگین برابر با ۸۵/۰۵ درصد و قابلیت اطمینان مربوط به ناحیۀ اسلامشهر کمترین مقدار نسبت به سایر نواحی دیگر و به طور میانگین برابر ۴۱/۹۶ درصد است و قابلیت اطمینان مربوط به ناحیۀ شهریار برابر ۸۴/۷۵ است که بعد از ناحیۀ رباط کریم بیشترین درصد قابلیت اطمینان را به خود اختصاص داده است. همچنین قابلیت اطمینان مربوط به کل محدوده به طور میانگین برابر ۵۶/۵۰ درصد است. حجم کل تغذیه بهینه در سیستم تغذیه مصنوعی در دورۀ

با توجه به کمبود منابع آبی کشور و همچنین، به منظور بهبود مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی، ضروری است برای بهره‌برداری پایدار از منابع آبی و استفاده بهینه از آن‌ها، مدل‌های مدیریتی با توجه به اهداف متناسب با شرایط منطقه و محدودیت‌های آن، تهیه و برنامه‌ریزی‌های مورد نظر استخراج شود. بنابراین، در این تحقیق بر اساس آمار و اطلاعات، گزارش‌های هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعات نیاز آبی محدودۀ مورد مطالعه، مدل چندهدفه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و بهینه‌سازی حجم نفوذ سیستم تغذیه مصنوعی تدوین شود. در این مدل اهداف در نظر گرفته شده عبارت بودند از: کاهش میزان عدم تأمین نیاز، افزایش میزان حجم تغذیه در سیستم تغذیه مصنوعی به منظور کاهش مشکلات منابع آبی محدودۀ مطالعاتی. با توجه به اینکه طول دورۀ برنامه‌ریزی سه‌ساله در نظر گرفته شده است و متغیرهای تصمیم در نظر گرفته‌شده برای هر ماه ۱۵ بوده که برای بازۀ زمانی مورد نظر، تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۵۴۰ برآورد شد. بنابراین، با توجه به تعداد زیاد و غیرخطی بودن روابط حاکم بر سامانه منابع آبی، لازم است برای مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و

- [7]. Rao SVN, Murty Bhallamudi S, Thandaveswara BS, Mishra GC. Conjunctive Use of Surface and Groundwater for Coastal and Deltaic Systems. *J Water Resour Plan Manag.* 2004;130(3):255-67.
- [8]. Vedula S, Mujumdar PP, Chandra Sekhar G. Conjunctive Use Modeling for Multicrop Irrigation. *Agric Water Manag.* 2005;73(3):193-221.
- [9]. Barlow PM, Ahlfeld DP, Dickerman DC. Conjunctive-Management Models for Sustained Yield of Stream-Aquifer Systems. *J Water Resour Plan Manag.* 2003;129(1):35-48.
- [10]. Yan Z, Sha J, Liu B, Tian W, Lu J. An ameliorative whale optimization algorithm for multi-objective optimal allocation of water resources in Handan, China. *Water.* 2018 Jan;10(1):87.
- [11]. Karamouz M, Rezapour Tabari MM, Kerachian R. Application of Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks in Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources. *Water Int.* 2007;32(1):163-76.
- [12]. Safavi HR, Darzi F, Mariño MA. Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater. *Water Resour Manag.* 2010;24(10):1965-88.
- [13]. Pulido-Velazquez D, Ahlfeld D, Andreu J, Sahuquillo A. Reducing the Computational Cost of Unconfined Groundwater Flow in Conjunctive-Use Models at Basin Scale Assuming Linear Behaviour: The Case of Adra-Campo de Dalías. *J Hydrol.* 2008;353(1-2):159-74.
- [14]. Pereira-Cardenal SJ, Mo B, Gjelsvik A, Riegels ND, Arnbjerg-Nielsen K, Bauer-Gottwein P. Joint optimization of regional water-power systems. *Adv Water Resourc.* 2016;92:200-7.
- [15]. Mooselu MG, Nikoo MR, Latifi M, Sadegh M, Al-Wardy M, Al-Rawas GA. A multi-objective optimal allocation of treated wastewater in urban areas using leader-follower game. *J Clean Product.* 2020;267:122189.
- [16] Dai C, Qin XS, Chen Y, Guo HC. Dealing with equality and benefit for water allocation in a lake watershed: A Gini-coefficient based stochastic optimization approach. *J Hydrol.* 2018;561:322-34.
- [17]. Guan H, Chen L, Huang S, Yan C, Wang Y. Multi-objective optimal allocation of water resources based on 'three red lines' in Qinzhou, China. *Water Policy.* 2020 Aug 1;22(4):541-60.

زمانی مورد نظر برابر ۱۱۴/۸۱ میلیون متر مکعب بوده که با توجه به حجم کل تغذیه فعلی ۷۰/۰۹ میلیون متر مکعب افزایش یافته است. که در این شرایط حجم تغذیه بهینه منجر به افزایش تغییرات تراز آبخوان به اندازه ۴/۸۴ متر به وسیله سیستم تغذیه مصنوعی شده است. سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود و هم‌زمان بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، به طور میانگین ۱۰/۴۱ متر در سال باعث افزایش تغییرات تراز آبخوان شده است. اجرای سیاست‌های ارائه شده توسط مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز مورد نظر، می‌تواند نیاز آبی محدوده مورد مطالعه را تا حد زیادی تأمین کند و در صورت وجود مقادیر آب سطحی مازاد بر نیاز محدوده، آن را به پایین دست انتقال دهد. همچنین، حجم آب مورد تغذیه در سیستم تغذیه مصنوعی را افزایش می‌دهد و نیز تأثیر چشمگیری در افزایش تغییرات تراز آب زیرزمینی و نیز رفتار آبخوان محدوده مورد مطالعه دارد و باعث کاهش مشکلات پیچیده منابع آبی می‌شود.

منابع

- [1]. Peralta RC, Forghani A, Fayad H. Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow. *J Hydrol.* 2014;511:776-85.
- [2]. Das B, Singh A, Panda SN, Yasuda H. Optimal land and water allocation policies for sustainable irrigated agriculture. *Land Use Policy.* 2015;42:527-37.
- [3]. Zekri S, Triki C, Al-Maktoumi A, Bazargan-Lari MR. An optimization-simulation approach for groundwater abstraction under recharge uncertainty. *Water Resour Manag.* 2015;29(10):3681-95.
- [4]. Dalcin AP, Fernandes Marques G. Integrating water management instruments to reconcile a hydro-economic water allocation strategy with other water preferences. *Water Resour Manag.* 2020;56(5):e2019WR025558.
- [5]. Danapour M, Fienen MN, Højberg AL, Jensen KH, Stisen S. Multi-constrained catchment scale optimization of groundwater abstraction using linear programming. *Groundwater.* 2021;59(4):503-16.
- [6]. Matsukava J, Finney B, Willis R. Conjunctive-Use planning in Mad river basin, California. *J Water Resour Plan Manag.* 1992;118(2).

- [18]. Fatkhutdinov A, Stefan C. Multi-Objective Optimization of Managed Aquifer Recharge. *Groundwater*. 2019;57(2):238-44.
- [19]. Ghayoumian J, Mohseni Saravi M, Feiznia S, Nouri B, Malekian A. Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *J Asian Earth Sci*. 2007;30:364-74.
- [20]. Senanayake IP, Dissanayake DM, Mayadunna BB, Weerasekera WL. An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*. 2016;7:115e124.
- [21]. Nasiri H, Darvishi bolorani A, Faraji sabokbar AH, Jafari HR, Hamzeh M, Rafii Y. Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabayan basin, Iran). *Environ Monit Assess* 2013;185(1):707-18.
- [22]. Singh A, Panda SN, Kumar KS, Shekhar Sharma C. Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and GIS: a case study in Indian Punjab. *Environ Manag* 2013;52(1):61-71.
- [23]. Chenini I, Abdallah BM. Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. *Comput Geosci*. 2010;36(6):801-17.
- [24]. Chowdhury A, Jha MK, Chowdary VM. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in west Medinipur district, west Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environ Earth Sci*. 2010;59(6):1209-22.
- [25]. Ahmadi MM, Mahdavi-rad H, Bakhtiari B. Multi-criteria analysis of site selection for groundwater recharge with treated municipal wastewater. *Water Sci Technol*. 2017;76(4):909-19.
- [26]. Humberto HA, Raúl CC, Lorenzo VV, Jorge RH. Aquifer recharge with treated municipal wastewater: long-term experience at San Luis Rio Colorado, Sonora. *Sustain Water Resour Manag*. 2018;4(2):251-60.
- [27]. Voudouris K, Diamantopoulou P, Giannatos G, Zannis P. Groundwater recharge via deep boreholes in the Patras Industrial Area aquifer system (NW Peloponnesus, Greece). *Bull Eng Geol Environ*. 2005;65(3):297-308.
- [28]. Agarwal R, Garg PK, Garg RD. Remote Sensing and GIS Based Approach for Identification of Artificial Recharge Sites. *Water Resour Manag*. 2013;27(7):2671-89.
- [29]. Ye Q, Li Y, Zhuo L, Zhang W, Xiong W, Wang C, Wang P. Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China. *Water Res*. 2018;129:264-76.
- [30]. Sayit AP, Yazicigil H. Assessment of artificial aquifer recharge potential in the Kucuk Menderes River Basin, Turkey. *Hydrogeol J*. 2012;20(4):755-66.